

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده پردیس خوارزمی

گروه مهندسی استخراج معدن

مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن زیرزمینی و ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات (نت) مطالعه موردی: معدن زغال سنگ طزره

دانشجو: سید مصطفی طباطبائی

اساتید راهنما:

پروفسور محمد عطائی

پروفسور رضا کاکایی

استاد مشاور:

مهندس سجاد محمدی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

بهمن ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره: ۱۸۵۲ / ۳۱

تاریخ: ۹۴ / ۱۲ / ۱۰

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سید مصطفی طباطبائی به شماره دانشجویی ۹۳۴۷۴۶۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان: مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید معادن زیرزمینی و ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات (نت)، مطالعه موردی: معدن زغال سنگ طزره که در تاریخ ۹۴/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز ۱۹	☒ دفاع مجدد	☐ مردود
--------------------------------	---	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	محمد عطا	استاد	
۲- استاد مشاور	سجاد محمدری	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	علی بابا زهر	استاد	
۴- استاد ممتحن	محمد آبریز	استاد	
۵- استاد ممتحن	فرشته کرس	استاد	

امضاء



تقدیم به:

روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تادر عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه کنم

و

به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و

همسر عزیزم

که سایه مهربانی اش سایه سار زندگی ام می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر

را برایم تسهیل نمود

و

فرزندان عزیزم

که با کودکی خود مرا بسیار درک نمودند

و تقدیم به

کارگران زحمت کش و سخت کوش معادن زغال سنگ ایران

سپاس و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز.... سپاس او را که بزرگی‌اش را در اعماق زمین و در گرمای زغال‌سنگ یافتیم.

و از شما اساتید مهربان و فرزانه‌ام :

جناب آقایان پرفسور محمد عطایی و پرفسور رضا کاکائی

شما که روشنایی‌بخش تاریکی جان هستی و ظلمت اندیشه را نور می‌بخشی. چگونه سپاس گویم مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم‌آموزی شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه عظمت و شکوه شما مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف .

از استاد و دوست ارجمند جناب آقای **مهندس سجاد محمدی** که به‌عنوان مشاور اینجانب در این تحقیق مرا یاری نمودند سپاسگزار و متشکرم.

در پایان از مسئولین محترم مجتمع زغال‌سنگ البرز شرقی به‌ویژه آقایان مهندس حسین ربیع نژاد (مدیریت محترم عامل)، مهندس عبدالمحسن کریمی (مدیریت محترم منطقه طزره)، مهندس محمد جواد رضائی (مدیریت نظارت) مهندس پرویز خدایی (مدیریت دفتر فنی و طراحی)، که بامحبت و بزرگواری خویش بنده را یاری نمودند کمال تشکر را دارم. امیدوارم با به پایان رساندن این تحقیق، اندکی از دین خویش را به وطن عزیزم و مردمان مهربانش ادا کرده باشم.

تعهد نامه

اینجانب سید مصطفی طباطبائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید معادن زیر زمینی و ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات (نت)، مطالعه موردی: معدن زغال سنگ طزره تحت راهنمایی آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاکایی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

قابلیت اطمینان، به عنوان یک شاخص مهندسی، از کاربردهای بسیار زیادی در کنترل عملیات و راندمان ماشین‌آلات تولیدی برخوردار است. با توجه به حجم بالای عملیات در معادن، حفظ توان تولید و مدیریت ماشین‌آلات از جمله مواردی هستند که می‌توانند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را تحت تأثیر قرار دهند. قابلیت اطمینان تولید هر معدن به طور مستقیم به قابلیت اطمینان ماشین‌آلات فعال در آن معدن وابسته است. سیستم تولید و تجهیزات آن، در معادن زغال‌سنگ زیر زمینی غیره مکانیزه از ۴ بخش اصلی شامل: سیستم تولید هوای فشرده، سیستم تهویه شبکه زیرزمینی معدن، سیستم تجهیزات استخراج و کندن زغال‌سنگ و سیستم ترابری معدن تشکیل شده است.

در ادامه طی مطالعه موردی، معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، معدن بزرگ طزره، داده‌های خرابی و توقف‌های تولید ناشی از آن، در طی هفت ماه این معدن برای مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. زیرسیستم‌های، تولید هوای فشرده، تهویه شبکه معدن، کندن و استخراج زغال به جهت شرایط جاری دارای قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ بوده، مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان تنها بر روی ناوگان ترابری معدن انجام شده است. پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی تجهیزات ناوگان ترابری، محاسبات مربوط به قابلیت اطمینان به روش تحلیل آماری انجام شد. نتایج نشان داد که رفتار خرابی لکوموتیو ۱، نوار ۱ و لکوموتیو ۳ از تابع وایبول ۲ پارامتری، نوار نقاله ۲، لکوموتیو ۲ و لکوموتیو ۵ از تابع وایبول ۳ پارامتری، دستگاه وینچ ۱۶۰۰ از تابع لاگ‌نرمال و لکوموتیو شماره ۴ از تابع گامای تعمیم یافته تبعیت می‌کنند.

در مرحله بعد، با استفاده از نتایج تحلیل داده و در نظر گرفتن ساختار سری برای ماشین‌های هر مسیر ترابری، قابلیت اطمینان هر یک از مسیرها محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن ترکیب موازی مسیرها قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری معدن محاسبه شد، که نتایج محاسبات نشان داد که قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری پس از گذشت ۱۸۰ ساعت به صفر، ۴۳ ساعت به مقدار ۸۰٪ و ۶۴ ساعت به مقدار نصف، کاهش یافته است. در پایان، با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان، برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای بهبود عملکرد ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره پیشنهاد شد که بر اساس آن قابلیت اطمینان بین ۹۷٪ تا ۱۰۰٪ تغییر می‌کند.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، زغال‌سنگ، ناوگان ترابری، تعمیر و نگهداری، معدن بزرگ طزره

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۱-۲- معادن زغال سنگ البرز شرقی (طزره) ۳
- ۱-۲-۱- تاریخچه عملیات معدنکاری در منطقه طزره ۴
- ۱-۲-۲- معادن زغال سنگ بزرگ طزره ۵
- ۱-۳- بیان مسأله و سؤال های اصلی تحقیق ۵
- ۱-۴- ضرورت انجام تحقیق ۶
- ۱-۵- اهداف تحقیق ۷
- ۱-۶- ساختار رساله ۷

فصل دوم: قابلیت اطمینان؛ مفاهیم، مدل سازی و پیشینه تحقیق

- ۱-۲- مقدمه ۹
- ۲-۲- تعاریف و اصطلاحات رایج در مهندسی قابلیت اطمینان ۱۰
- ۲-۳- تعاریف ریاضی کمیتهای موجود در مهندسی قابلیت اطمینان ۱۱
- ۲-۳-۱- تابع چگالی توزیع احتمال ($f(t)$) ۱۲
- ۲-۳-۲- تابع توزیع تجمعی ($F(t)$) ۱۲
- ۲-۳-۳- تابع قابلیت اطمینان ($R(t)$) ۱۳
- ۲-۳-۴- تابع نرخ خرابی ($\lambda(t)$) ۱۳
- ۲-۴- شبکه های قابلیت اطمینان ۱۵
- ۲-۴-۱- سیستم سری ۱۵
- ۲-۴-۲- سیستم موازی ۱۶
- ۲-۴-۳- سیستم ترکیبی (مختلط) ۱۷
- ۲-۴-۴- سیستم k از m ۱۷
- ۲-۴-۵- سیستم آماده به کار ۱۸
- ۲-۵- روش های متداول در تحلیل قابلیت اطمینان ۱۸
- ۲-۶- تحلیل آماری و مدل سازی قابلیت اطمینان ۲۰
- ۲-۶-۱- آزمون های مستقل و مانا بودن داده ها ۲۳
- ۲-۶-۲- فرآیند تجدیدشونده ۲۶

۲۸.....	۳-۶-۲- فرآیند پواسون.....
۲۹.....	۴-۶-۲- فرآیند قانون توان.....
۳۱.....	۷-۲- پیشینه قابلیت اطمینان در مهندسی معدن.....
۳۴.....	۸-۲- نتیجه گیری.....

فصل سوم: سیستم تولید زغال سنگ، معدن بزرگ طزره

۳۵.....	۱-۳- مقدمه.....
۳۷.....	۲-۳- سیستم تولید زغال سنگ در معدن بزرگ طزره.....
۳۷.....	۱-۲-۳- تولید هوای فشرده.....
۳۹.....	۲-۲-۳- سیستم تهویه شبکه تونلی.....
۴۱.....	۳-۲-۳- عملیات استخراج و کندن زغال سنگ.....
۴۲.....	۴-۲-۳- سیستم ترابری معدن بزرگ طزره.....
۴۹.....	۳-۳- مسیرهای ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره.....
۴۹.....	۱-۳-۳- معرفی مسیر A.....
۴۹.....	۲-۳-۳- معرفی مسیر B.....
۴۹.....	۳-۳-۳- معرفی مسیر C.....
۴۹.....	۴-۳- نتیجه گیری.....

فصل چهارم: مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید در معدن بزرگ طزره

۵۱.....	۱-۴- مقدمه.....
۵۲.....	۲-۴- قابلیت اطمینان تجهیزات تولید هوای فشرده.....
۵۲.....	۳-۴- قابلیت اطمینان سیستم تهویه شبکه زیرزمینی.....
۵۳.....	۴-۴- قابلیت اطمینان تجهیزات استخراج و کندن زغال سنگ.....
۵۴.....	۵-۴- قابلیت اطمینان سیستم ترابری.....
۵۴.....	۱-۵-۴- داده های خرابی ماشین.....
۵۶.....	۲-۵-۴- روند تحلیل خرابی و مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین ها.....
۵۷.....	۶-۴- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر A.....
۵۸.....	۱-۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱.....
۶۲.....	۲-۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱.....
۶۷.....	۳-۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲.....
۷۱.....	۴-۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴.....

۷۵	۴-۶-۵- قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر A
۷۷	۴-۷-۷- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر B
۷۸	۴-۷-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲
۸۲	۴-۷-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰
۸۷	۴-۷-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵
۹۱	۴-۷-۴- قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر B
۹۳	۴-۸-۸- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر C
۹۴	۴-۸-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳
۹۸	۴-۹- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری تونل بزرگ طزره
۱۰۰	۴-۱۰- جمع بندی

فصل پنجم: تعمیر و نگهداری ماشین های ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره

۱۰۱	۵-۱- مقدمه
۱۰۲	۵-۲- اهمیت تعمیر و نگهداری ماشین آلات معدنی
۱۰۳	۵-۳- تعمیر و نگهداری
۱۰۴	۵-۴- انواع استراتژی های تعمیر و نگهداری
۱۰۴	۵-۴-۱- تعمیر و نگهداری اصلاحی
۱۰۵	۵-۴-۲- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه
۱۰۸	۵-۵- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین های ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره
۱۰۹	۵-۶- برنامه تعمیر و نگهداری ماشین های مسیر A
۱۱۱	۵-۶-۱- تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین های مسیر A
۱۱۲	۵-۷- برنامه تعمیر و نگهداری ماشین های مسیر B
۱۱۴	۵-۷-۱- تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین های مسیر B
۱۱۵	۵-۸- برنامه تعمیر و نگهداری ماشین های مسیر C
۱۱۷	۵-۸-۱- تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین های مسیر C
۱۱۸	۵-۹- تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره
۱۱۹	۵-۱۰- نتیجه گیری

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۲۱	۶-۱- نتیجه گیری
۱۲۴	۶-۲- پیشنهادها

پیوست ۱۲۷

منابع و مراجع ۱۳۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک دستگاه ۱۳
- شکل ۲-۲- سیستم سری ۱۶
- شکل ۳-۲- سیستم موازی ۱۶
- شکل ۴-۲- سیستم ترکیبی (مختلط) ۱۷
- شکل ۵-۲- روند نمای مربوط به انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان ۲۲
- شکل ۶-۲- آزمون گرافیکی جهت تعیین نوع داده‌ها ۲۵
- شکل ۷-۲- آزمون همبستگی سری ۲۶
- شکل ۸-۲- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته ۲۷
- شکل ۱-۳- پلان قائم مسیرهای ترابری A، B و C در معدن بزرگ طزره ۳۶
- شکل ۲-۳- پلان جانبی مسیرهای ترابری A، B و C در معدن بزرگ طزره ۳۷
- شکل ۳-۳- اتاق ونتیلاتورهای معدن بزرگ طزره ۴۰
- شکل ۴-۳- نمونه‌ای از پیکور مدل A7 و پرفراتور ۱۴ کیلویی در معدن بزرگ طزره ۴۲
- شکل ۵-۳- دستگاه وینچ ۱۶۰۰ معدن بزرگ ۴۳
- شکل ۶-۳- نمایی از نوارهای نقاله معدن بزرگ طزره ۴۶
- شکل ۷-۳- نمایی از لکوموتیوهای معدن بزرگ طزره ۴۸
- شکل ۱-۴- نمودار پارتو خرابی کل سیستم ترابری تونل بزرگ برحسب مدت‌زمان خرابی ۵۵
- شکل ۲-۴- نمودار پارتو خرابی کل سیستم ترابری تونل بزرگ برحسب تعداد دفعات خرابی ۵۶
- شکل ۳-۴- نمودار پارتو خرابی برای ماشین‌های مسیر A ۵۸
- شکل ۴-۴- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۱ ۵۸
- شکل ۵-۴- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱ ۵۹
- شکل ۶-۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱ ۶۰
- شکل ۷-۴- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱ ۶۱
- شکل ۸-۴- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۱ ۶۲
- شکل ۹-۴- نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۱ ۶۳
- شکل ۱۰-۴- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها نوار نقاله شماره ۱ ۶۳
- شکل ۱۱-۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۱ ۶۵
- شکل ۱۲-۴- نمودار قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱ ۶۵

شکل ۴-۱۳- نمودار نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۱.....	۶۶
شکل ۴-۱۴- نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۲.....	۶۷
شکل ۴-۱۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های نوار نقاله شماره ۲.....	۶۷
شکل ۴-۱۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۲.....	۶۹
شکل ۴-۱۷- نمودار قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲.....	۷۰
شکل ۴-۱۸- نمودار نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۲.....	۷۰
شکل ۴-۱۹- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۴.....	۷۱
شکل ۴-۲۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۴.....	۷۲
شکل ۴-۲۱- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۴.....	۷۳
شکل ۴-۲۲- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴.....	۷۴
شکل ۴-۲۳- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۴.....	۷۵
شکل ۴-۲۴- نمودار قابلیت اطمینان تمامی ماشین‌های مسیر A.....	۷۶
شکل ۴-۲۵- نمودار قابلیت اطمینان کل تجهیزات مسیر A.....	۷۷
شکل ۴-۲۶- نمودار پارتو خرابی ماشین‌آلات سیستم ترابری مسیر B.....	۷۸
شکل ۴-۲۷- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۲.....	۷۸
شکل ۴-۲۸- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۲.....	۷۹
شکل ۴-۲۹- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۲.....	۸۰
شکل ۴-۳۰- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲.....	۸۱
شکل ۴-۳۱- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۲.....	۸۲
شکل ۴-۳۲- نمودار پارتو خرابی وینچ ۱۶۰۰.....	۸۳
شکل ۴-۳۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰.....	۸۳
شکل ۴-۳۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰.....	۸۵
شکل ۴-۳۵- نمودار قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰.....	۸۶
شکل ۴-۳۶- نمودار نرخ خرابی وینچ ۱۶۰۰.....	۸۶
شکل ۴-۳۷- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۵.....	۸۷
شکل ۴-۳۸- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۵.....	۸۸
شکل ۴-۳۹- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۵.....	۸۹
شکل ۴-۴۰- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵.....	۹۰
شکل ۴-۴۱- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۵.....	۹۱

- شکل ۴-۴۲- نمودار قابلیت اطمینان تجهیزات سیستم ترابری مسیر B..... ۹۲
- شکل ۴-۴۳- نمودار قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر B..... ۹۳
- شکل ۴-۴۴- نمودار پارتو خرابی مسیر C و لکوموتیو شماره ۳..... ۹۴
- شکل ۴-۴۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۳..... ۹۵
- شکل ۴-۴۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۳..... ۹۶
- شکل ۴-۴۷- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳..... ۹۶
- شکل ۴-۴۸- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۳..... ۹۷
- شکل ۴-۴۹- سیستم موازی مسیرهای A، B و C در تونل بزرگ طزره..... ۹۸
- شکل ۴-۵۰- منحنی قابلیت اطمینان مسیرهای ترابری تونل بزرگ طزره..... ۹۹
- شکل ۴-۵۱- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری تونل بزرگ طزره..... ۹۹
- شکل ۵-۱- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مسیر A..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای تجهیزات مسیر A..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳- منحنی قابلیت اطمینان مسیر A پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مسیر B..... ۱۱۳
- شکل ۵-۵- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ماشین‌های مسیر B..... ۱۱۴
- شکل ۵-۶- منحنی قابلیت اطمینان مسیر B پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه..... ۱۱۴
- شکل ۵-۷- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مسیر C..... ۱۱۶
- شکل ۵-۸- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای لکوموتیو شماره ۳ مسیر C..... ۱۱۶
- شکل ۵-۹- منحنی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ مسیر C پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۰- منحنی قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه..... ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱- لایه های زغالی فعال و در حال استخراج معادن زغالسنگ منطقه طزره.....	۴
جدول ۱-۲- لیست تحقیقات انجام شده در زمینه ی قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن.....	۳۱
جدول ۲-۲- روش های مختلف به کاررفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی.....	۳۳
جدول ۱-۳- اطلاعات فنی نوار نقاله مدل KA-150 معدن بزرگ.....	۴۶
جدول ۱-۴- نمونه ای از فرم ثبت خرابی تجهیزات سیستم ترابری.....	۵۴
جدول ۲-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۱.....	۵۹
جدول ۳-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی نوار نقاله شماره ۱.....	۶۳
جدول ۴-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی نوار نقاله شماره ۲.....	۶۸
جدول ۵-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۴.....	۷۲
جدول ۶-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۲.....	۷۹
جدول ۷-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی وینچ ۱۶۰۰.....	۸۳
جدول ۸-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۵.....	۸۸
جدول ۹-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۳.....	۹۴
جدول ۱-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین های مختلف مسیر A.....	۱۰۹
جدول ۲-۵- دوره های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای تجهیزات مسیر A.....	۱۱۰
جدول ۳-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین های ناوگان ترابری مسیر B.....	۱۱۲
جدول ۴-۵- دوره های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای ماشین های مسیر B.....	۱۱۳
جدول ۵-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین های ناوگان ترابری مسیر C.....	۱۱۵
جدول ۶-۵- دوره های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای لکوموتیو شماره ۳ مسیر C.....	۱۱۶

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در حال حاضر ۸۰٪ انرژی مصرفی جهان از سوخت های فسیلی تامین می شود که این مقدار تا سال ۲۰۳۰ با رشد ۵۰٪ مواجه خواهد شد، بی شک در قرن حاضر بشر برای دستیابی به پیشرفت صنعتی و رفاه بیشتر به طور قابل توجهی به انواع حامل های انرژی شامل نفت، گاز و زغال سنگ نیاز دارد. در اقتصاد انرژی سه عامل ذخیره، میزان تولید و قیمت به عنوان پارامترهای مهم مطرح می باشند. در قرن گذشته با توجه به کشف نفت و توسعه کاربردهای صنعتی و تولید مشتقات مختلف از آن، تولید و مصرف این ماده حیاتی و با ارزش به صورت فزاینده ای افزایش یافت و امروزه عواقب این پدیده به اشکال مختلف جامعه بشری را درگیر خود کرده است. مصرف بالای نفت و گاز در قرن گذشته و ذخایر محدود آنها، جهان را به تکاپوی جدی برای یافتن انرژی های نو و بهینه سازی مصرف سوخت های موجود واداشته است. از جمله انرژی های نو می توان به انرژی زمین گرمایی و انرژی هسته ای اشاره نمود. همچنین در توجه به بهینه سازی سوخت های قدیمی، زغال سنگ به عنوان قدیمی ترین حامل انرژی جهان مدرن، مجدداً مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم ترین دلایل این امر را می توان فراوانی و گستردگی بسیار خوب ذخایر زغال سنگ در جهان دانست. میزان ۶۶٪ کل ذخایر انرژی فسیلی را ذخایر زغال سنگ تشکیل می دهد. زغال سنگ تنها سوخت فسیلی است که در تمامی مناطق جهان یافت شده و قابل استخراج می باشد.

صنعت فولادسازی امروزه بازار جهانی و اقتصاد زغال سنگ را داغ و پررونق ساخته است. طبق گزارش انجمن جهانی زغال سنگ، ۷۰٪ فولاد جهان با استفاده از زغال سنگ تولید می شود. جهان صنعتی امروز که به صورت سرسام آوری نیازمند فولاد می باشد، به طور غیرمستقیم به زغال سنگ نیز وابستگی قطعی دارد. با توجه به اینکه یکی از شاخص های توسعه یافتگی کشورها میزان مصرف سرانه فولاد آنها است، لذا می توان میزان مصرف سرانه زغال سنگ را نیز به طور غیرمستقیم شاخص توسعه یافتگی کشورها در نظر گرفت. شاهد این ادعا مصرف ۸۲٪ زغال سنگ جهان توسط پنج کشور چین، آمریکا، هندوستان، ژاپن و آفریقای جنوبی است که چهار مورد اول کشورهای قدرتمند اقتصادی جهان به شمار می آیند (World Coal Association, 2010).

با توجه به موارد اشاره شده فوق، میزان تولید بالا و ارزان، دو هدف عمده معدنکاری زغال سنگ در قرن حاضر به شمار می آیند. درصد بالایی از استخراج زغال سنگ جهان مربوط به معادن زیرزمینی است. معادن زیرزمینی زغال سنگ معمولاً به دو روش جبهه کار طولانی و اتاق و پایه استخراج می شوند. در این میان با توجه به اینکه روش جبهه کار طولانی با طبیعت لایه های زغال سنگ اقصی نقاط جهان تطابق بسیار خوبی دارد، به طور گسترده ای در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. این روش به دلیل همخوانی با ضخامت های مختلف لایه های زغال سنگ، در معادن شامل لایه های کم ضخامت تا لایه های ضخیم کاربرد داشته و لذا سهم بالایی از استخراج زغال سنگ را نسبت به روش اتاق و پایه به خود اختصاص داده است.

روش جبهه کار طولانی به دو صورت سنتی و مکانیزه انجام می شود. با توجه به نیاز بالا و درخواست جهانی برای زغال سنگ - در حال حاضر و آینده - و نیز مسأله قیمت تمام شده، پایداری تولید و ایمنی، روش مکانیزه از اقبال بیشتری برای استفاده در کشورهای مختلف برخوردار است. این در حالی است که نمی توان از سهم روش سنتی در استخراج زغال سنگ در برخی کشورها و نیز در لایه های با شرایط زمین شناسی خاص صرف نظر نمود.

در روش جبهه کار طولانی سنتی تمامی عملیات استخراج و کندن زغال سنگ از لایه برجا توسط نیروی انسانی، تجهیزات و ماشین آلات کوچک مقیاس (پیکور هوای فشرده) انجام می شود. جابجایی و انتقال زغال سنگ استخراج شده از محل کارگاه استخراج تا سطح زمین توسط ماشین آلات بارگیری و باربری از جمله لکوموتیو، واگن فلزی، نوار نقاله و نیزبالابر های تونلی (وینچ) انجام خواهد شد. به منظور جلوگیری از توقف های ناخواسته و افزایش عملکرد این ماشین آلات، اطلاع از شرایط کاری دستگاه و کنترل آماری دقیق آن یکی از رهیافت های عملی به شمار می آید. یکی از تکنیک های توانمند برای پیش بینی خرابی ها و عملکرد مناسب دستگاه در یک زمان مشخص، ارزیابی "قابلیت اطمینان"^۱ دستگاه می باشد. با استفاده از این کمیّت می توان احتمال عدم خرابی و عملکرد مطلوب دستگاه را در یک بازه زمانی تخمین زد. این کمیّت امروزه در اکثر صنایع به عنوان یک عامل فنی و مدیریتی کمک شایانی، به حفظ پیوستگی تولید و بهبود وضعیت مالی بنگاه های اقتصادی می کند. در این پایان نامه، قابلیت اطمینان تجهیزات و ماشین آلات تولیدی در معادن زغال سنگ زیر زمینی با استفاده از رهیافت مدل سازی و تحلیل سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه موردی این تحقیق معادن زغال سنگ البرز شرقی، معدن بزرگ طزره است.

۱-۲- معادن زغال سنگ البرز شرقی، معدن طزره

معدن زغال سنگ طزره بخشی از دامنه جنوبی البرز را تشکیل می دهد که در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب شاهرود و ۴۰ کیلومتری شمال دامغان قرار گرفته و از لحاظ تقسیمات اداری جزء استان سمنان به حساب می آید. رسوبات زغالدار این مناطق به دلیل همجواری با روستای طزره به نام منطقه طزره شهرت یافته است.

معدن طزره در ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است. نزدیکترین محل مسکونی معدن، روستای طزره می باشد که در ۳ کیلومتری شرق دفتر معدن واقع است. فاصله دفتر مرکزی معدن تا جاده شاهرود- دامغان ۲۸ کیلومتر می باشد. منطقه

^۱. Reliability

دارای آب و هوای کوهستانی، در تابستان خشک و اختلاف دما در شبانه روز از ۱۰+ درجه تا ۳۵+ درجه، در زمستان سرد و اختلاف دما از ۱۰+ تا ۲۰- درجه می‌باشد. در منطقه طزره گسترش طولی لایه‌های زغالی ۷ کیلومتر و گسترش عرضی ۱/۳ تا ۱/۵ کیلومتر و کل مساحت ۹/۸ کیلومتر مربع و حد تغییر ارتفاع رخنمون لایه‌های زغالی از افق ۲۳۷۵+ تا ۱۸۰۰+ متر است.

۱-۲-۱- تاریخچه عملیات معدنکاری در منطقه طزره

شروع عملیات اکتشافی در اواسط سال ۱۳۴۸ برای اولین بار در ناحیه زغال‌خیز طزره (پشکلات، کلاریز) توسط زمین‌شناسان ایرانی و شوروی سابق مورد بررسی مقدماتی قرار گرفت. رسوبات اصلی منطقه زغال‌خیز پشکلات از نقطه نظر زمانی متعلق به تریاسیک بالایی، ژوراسیک زیرین و میانی بوده که در مجموع سازند شمشک را تشکیل می‌دهد. در اواخر سال ۱۳۴۸ اکیپ اکتشافی برای مطالعه دقیق تر در شهر دامغان مستقر شدند. بعد از آن گسترش معدن طزره با حفر ترانشه‌های سرتاسری شروع و نتایج اولیه، نمایشگر ذخیره نسبتاً زیاد و خاصیت کک‌پذیری زغال‌سنگ منطقه طزره بود. در سال ۱۳۵۱ مرحله اول عملیات استخراج با حفر تونل 3A آغاز شد (معادن زغال‌سنگ البرز شرقی ۱۳۷۸).

در حال حاضر منطقه طزره با داشتن ۴ محدوده معدنی، معدن بزرگ طزره، معدن رزمجای غربی، معدن برناکی و معدن کلاریز شرقی و نیز داشتن ۱۰ لایه زغالی قابل کار (جدول ۱-۱) و تولید سالانه ۲۵۰ هزار تن زغال‌سنگ خام در سال در حال فعالیت است

جدول ۱-۱ لایه‌های زغالی فعال و در حال استخراج معادن زغال‌سنگ منطقه طزره

نام لایه	K5	K8	K10	K12	K19	K23	K24	K25	P7	P10	P13
ضخامت (متر)	۰/۷	۰/۸	۲/۲	۱/۸	۲/۳	۰/۸	۰/۸	۰/۹	۰/۸	۲/۲	۰/۵

۱-۲-۲- معدن زغال سنگ بزرگ طزره

در میان معادن منطقه طزره، معدن بزرگ، از جهت قدمت و گستردگی شبکه معدنی فعال‌ترین و بزرگ‌ترین معدن منطقه بوده و به روش جبهه کار طولانی سنتی استخراج می‌شود. این معدن هم اکنون با ظرفیت اسمی تولید سالانه ۶۰ هزار تن زغال سنگ خام کک‌شو فعالیت می‌نماید.

لایه‌های در حال کار این معدن دو لایه K12 و P10 است. این لایه‌ها از مهم‌ترین لایه‌های قابل کار در منطقه طزره به شمار می‌آیند. تغییرات ضخامت، ساختمان و پارامترهای کیفی این لایه‌ها در این محدوده نسبتاً کم است. لایه P10، لایه‌ای است مرکب و غالباً از دو تا سه بخش زغال سنگ تشکیل شده که عمدتاً به وسیله میان‌لایه‌هایی از جنس آرژیلیت از یکدیگر تفکیک می‌شوند. میان‌لایه‌ها به طور متوسط ۱۵ درصد بخش قابل کار لایه را تشکیل می‌دهند. حداقل و حداکثر ضخامت این لایه به ترتیب ۱/۴ و ۲/۵۵ متر است. شیب لایه در محدوده معدن بین ۳۸-۴۳ درجه می‌باشد. لایه K12 نیز دارای ضخامتی بین ۱/۵ تا ۲ متر و شیب آن نیز بین ۴۰-۴۵ درجه متغیر است.

در ادامه این فصل، ضرورت انجام پایان نامه، اهداف و ساختار کلی آن و نیز مطالب ارائه شده در فصول آینده مورد بحث قرار می‌گیرند.

۱-۳- بیان مسأله و سؤال‌های اصلی تحقیق

در معادن زیرزمینی سیستم‌های متفاوتی در ارتباط با یکدیگر هستند که مجموعه‌ی آن‌ها را می‌توان به عنوان زیرسیستم‌های، سیستم تولید معدن در نظر گرفت. به جهت وجود گازهای متان، دی اکسید کربن، منواکسید کربن و... و نیز قابلیت انفجاری برخی گازها، در معادن زغال سنگ از تجهیزات ضد جرقه و کار با هوای فشرده استفاده می‌شود بدین جهت دستگاه‌های تولید هوای فشرده، دستگاه‌های بادبزن و تهویه فضاها، زیرزمینی جزء ماشین‌های سیستم تولید معدن محسوب می‌شود. به علاوه ماشین‌آلات بخش حمل و نقل و سیستم ترابری (نوار نقاله، لکوموتیو برقی، لکوموتیو دیزل و دستگاه‌های بالابر معدنی) نیز از اصلی‌ترین واحدهای سیستم تولید در معادن زیرزمینی می‌باشند. این

زیرسیستم‌ها به منظور تولید ماده معدنی در سطح تولید مشخص، با یکدیگر در ارتباط تنگاتنگی هستند و در نتیجه دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان هر یک از این ماشین‌آلات تأثیر قابل توجهی در تولید معدن دارد. عدم دسترسی به هر یک از این ماشین‌آلات سبب کاهش تولید و افزایش هزینه‌های مرتبط با آن می‌شود. به منظور داشتن سطح تولید مدنظر و پیوستگی در چرخه‌ی معدن‌کاری می‌بایست با انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات (نت)، ماشین‌آلات را در سطح قابل اطمینان و ایمنی مناسب قرار داد و با کاهش دادن میزان ریسک تولید یا میزان تولید از دست رفته به پیوستگی مستمر و کارآمد تولید کمک نمود. در این پایان‌نامه، به مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌ها، و به منظور بهبود عملکرد تجهیزات و نیز ارائه برنامه تعمیرات و نگهداری برای حفظ پیوستگی سیستم تولید معدن زغال‌سنگ بزرگ طزره پرداخته شده است.

به طور کلی، مهم‌ترین سؤال‌هایی که در طی این تحقیق به آن‌ها پاسخ داده خواهند شد به شرح ذیل می‌باشند:

- زیرسیستم‌های تولید چه بخش‌هایی هستند و نحوه ارتباط این زیرسیستم‌ها چگونه است؟
- حساس‌ترین زیرسیستم چرخه تولید از نظر فراوانی خرابی‌ها کدام است؟
- رفتار خرابی هر یک از زیرسیستم‌ها، از چه نوع تابع توزیع احتمالی تبعیت می‌کنند؟
- منحنی قابلیت اطمینان تجهیزات تولید به چه صورتی است؟
- بازه قابلیت اطمینان در سطح اعتمادهای مختلف چه میزان است؟
- بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر زیرسیستم تولید چه زمانی است؟

۴-۱- ضرورت انجام تحقیق

به طور کلی مهم‌ترین دلایل انجام این تحقیق عبارتند از:

- هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری (ماشین‌آلات)، آماده‌سازی‌ها و استخراج مواد معدنی
- عدم معرفی زیرسیستم‌های عملیات استخراج در معادن زغال‌سنگ زیر زمینی

- عدم وجود مطالعات جامع و دقیق بر روی قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن زیر زمینی غیرمکانیزه و نیمه مکانیزه

- اهمیت فوق العاده سیستم ترابری مواد خام تولیدی در معدن زیرزمینی

- هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری تجهیزات تولیدی

۱-۵- اهداف تحقیق

در طی این تحقیق سعی خواهد شد تا با مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم تولید زغال سنگ در معادن زیر زمینی، راهکار عملی برای پیش بینی خرابی و بهبود عملیات استخراج ارائه شود. سایر اهداف این تحقیق به طور کلی عبارتند از:

- حفظ پیوستگی تولید در معدن مطالعه موردی

- تعیین بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای کل سیستم تولید و زیرسیستم های مرتبط

- بهبود شرایط فنی ماشین های معدن مطالعه موردی

۱-۶- ساختار پایان نامه

در **فصل اول** مقدمه ای در خصوص مصارف زغال سنگ و معادن زیرزمینی آن به خصوص معادن سنتی، از جمله معادن زغال سنگ البرز شرقی منطقه طزره بیان شده است.

در **فصل دوم** مفاهیم مرتبط با قابلیت اطمینان و روش های مطالعه آن به طور مختصر معرفی شده شده است. سپس روابط ریاضی و نیز توزیع های مهم آماری مورد استفاده در مدل سازی قابلیت اطمینان معرفی شده است. در ادامه، با توجه به متون علمی موجود و تحقیقات گذشته، شماری از کاربردهای فنی قابلیت اطمینان در معدنکاری مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این تحقیقات به طور خلاصه ارائه شده است.

در **فصل سوم**، سیستم تولید معدن بزرگ طزره، زیر سیستم های آن و نحوه عملکرد هر یک از ماشین ها بیان شده است.

در **فصل چهارم**، در ابتدا نحوه جمع‌آوری داده‌ها از معدن بزرگ طزره ارائه شده و سپس تمامی تحلیل‌های آماری و مطالعات عملی پایان‌نامه در این بخش آورده شده است. در ادامه نتایج مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌های معدن در این فصل ارائه شده است.

در **فصل پنجم**، ابتدا اهمیت تعمیر و نگهداری و ضرورت انجام آن در ماشین‌آلات معدنی بررسی شده و سپس انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری و تأثیر آن‌ها بر قابلیت اطمینان دستگاه ارائه شده است. پس از آن با توجه به نتایج تحلیل قابلیت اطمینان انجام شده، استراتژی مناسب برای تعمیر و نگهداری بیان و نتایج و تأثیرات این استراتژی بر قابلیت اطمینان ماشین‌های مختلف و قابلیت اطمینان کل سیستم تولید بررسی و ارائه شده است.

در **فصل ششم** به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای مطالعات آینده و بهبود وضعیت عملیات تولید در معدن بزرگ طزره پرداخته شده است.

فصل دوم

قابلیت اطمینان؛

مفاهیم، مدل سازی و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

یکی از معیارهای عمده در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مهندسی، قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات تجهیزات است. عام‌ترین و معمول‌ترین تعریف برای قابلیت اطمینان را می‌توان به این صورت گفت: قابلیت اطمینان یک سیستم عبارت است از احتمال کارکرد سالم و بدون اشکال یک سیستم (مؤلفه) برای یک مدت مشخص و در شرایط مشخص و از پیش تعیین شده. (حاج شیرمحمدی، ۱۳۹۰).

معمولاً برحسب نوع استفاده و موقعیت کاربرد، تعاریف گوناگونی برای قابلیت اطمینان وجود دارد. امروزه، مهندسی قابلیت اطمینان به عنوان ابزاری توانمند، در بسیاری از شاخه‌های مهندسی و فن‌آوری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این علم از نظر مبانی نظری بسیار گسترده بوده و دارای زیرشاخه‌های متعددی در سایر علوم است. به‌عنوان مثال، مفاهیم آمار، مدل‌سازی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، مکانیک، برق و مهندسی سیستم به‌طور جدی با قابلیت اطمینان درآمیخته و ارتباط تنگاتنگی میان تمامی این علوم و مهندسی قابلیت اطمینان شکل گرفته است.

در این فصل، به‌منظور آشنایی بیشتر و پرهیز از تکرار برخی مطالب در فصول آینده، یک سری مفاهیم و تعاریف کلی و پرکاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان شرح داده شده و در ادامه فصل روش‌های مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس، با توجه به

متون علمی موجود و تحقیقات گذشته، شماری از کاربردهای فنی قابلیت اطمینان در معدنکاری مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این تحقیقات به طور خلاصه ارائه شده است. در پایان، روش‌های مورد استفاده برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن زغال سنگ زیرزمینی در این رساله مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۲- تعاریف و اصطلاحات رایج در مهندسی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان، یک شاخص مهندسی و ریاضی برای بررسی کمی خرابی‌ها و پیش‌بینی زمان عملیات مفید هر دستگاه یا سیستم مهندسی است. در تحلیل قابلیت اطمینان، مجموعه‌ای از مفاهیم، کمیت‌ها و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و پرکاربرد مطرح هستند. تمامی تعاریف قابلیت اطمینان بر مبنای "سیستم" و "زیرسیستم" ارائه می‌شوند. از آنجایی که این پایان‌نامه در مورد مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید (تجهیزات و ماشین‌های مرتبط با تولید) در معادن زغال سنگ زیرزمینی نگاشته شده است، لذا در تمامی متن رساله از کلمه "ماشین" به جای "زیرسیستم" استفاده خواهد شد. تعاریف مفهومی از کمیت‌های مورد استفاده در مهندسی قابلیت اطمینان به شرح زیر می‌باشند (Dhillon, 2008; Finkelstein, 2008; Blischke & Murthy, 2003; Kececiyoglu, 2002):

- **خرابی^۱**: ناتوانی یک بخش یا یک قطعه از دستگاه در انجام وظایف تعریف شده، "خرابی" یا نقص نامیده می‌شود.

- **نرخ خرابی**: تعداد خرابی در واحد زمان "نرخ خرابی" خوانده می‌شود.

- **زمان بین خرابی‌ها (TBF)^۲**: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر (تعمیر پذیر) از دستگاه را "زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.

¹. Failure

². Time Between Failures

- میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)^۱: میانگین فاصله زمانی بین خرابی‌های یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه را "میانگین زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.
- زمان تعمیرات (TTR)^۲: زمان مورد نیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه را "زمان تعمیرات" می‌نامند.
- میانگین زمان تعمیرات (MTTR)^۳: میانگین زمانی صرف شده برای تعمیرات یک بخش از دستگاه را "میانگین زمان تعمیرات" می‌نامند.
- زیرسیستم^۴: هر یک از بخش‌های یک دستگاه را که عمل مشخص و فراوانی انجام می‌دهد، "زیرسیستم" می‌نامند.
- قابلیت اطمینان: احتمال این که یک دستگاه بتواند وظیفه محوله خویش را در یک بازه زمانی مشخص و تحت شرایط معلوم، به حالت مطلوب و از پیش طراحی شده انجام دهد، "قابلیت اطمینان"^۵ آن دستگاه نامیده می‌شود.
- مدل قابلیت اطمینان^۶: رابطه ریاضی که برای ارزیابی، تخمین و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان یک دستگاه به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود، "مدل قابلیت اطمینان" نامیده می‌شود.

۲-۳- تعاریف ریاضی کمیت‌های موجود در مهندسی قابلیت اطمینان

مهندسی قابلیت اطمینان تا حد بسیار زیادی بر مفاهیم علم آمار و جمع‌آوری داده‌های آماری استوار است. در کلیه مراحل مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان از تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود. خرابی دستگاه و زمان، دو رکن اصلی قابلیت اطمینان محسوب می‌شوند.

در این بخش تعاریف ریاضی کمیت‌های مورد استفاده در مهندسی قابلیت اطمینان به طور خلاصه ارائه

^۱. Mean Time Between Failures

^۲. Time To Repair

^۳. Mean Time To Repair

^۴. Subsystem

^۵. Reliability

^۶. Reliability Model

می‌شوند. به منظور رعایت پیوستگی مطالب، سعی شده تا کلیه کمیت‌ها حتی اصطلاحات بسیار شناخته‌شده آماری نیز در این بخش مورد اشاره قرار گیرند.

۲-۳-۱- تابع چگالی توزیع احتمال ($f(t)$)

این تابع بیان‌کننده شکل توزیع متغیر تصادفی است و تصویر کلی آن را می‌توان با ترسیم نمودار فراوانی متغیرهای تصادفی پیش‌آمده به دست آورد. در مهندسی قابلیت اطمینان، تابع چگالی احتمال به نام "تابع چگالی خرابی"^۱ خوانده می‌شود. در این محاسبات "زمان بین خرابی‌ها (TBF)" به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. از ویژگی‌های کلیه توابع چگالی این است که سطح زیر منحنی آن‌ها برابر یک است. گفته فوق منطبق با این واقعیت است که احتمال رخداد هر حادثه‌ای حداکثر ۱۰۰٪ یا یک است. توابع چگالی احتمال دارای تنوع و اشکال مختلفی هستند که در بخش‌های آینده به‌طور کامل ارائه خواهند شد.

۲-۳-۲- تابع توزیع تجمعی ($F(t)$)

تابع توزیع تجمعی، توزیع احتمال وقوع یک متغیر را بیان می‌کند. تابع توزیع تجمعی سطح زیر منحنی تابع چگالی احتمال است. در تحلیل‌های قابلیت اطمینان، این تابع "تابع توزیع خرابی"^۲ خوانده می‌شود. رابطه این تابع با تابع چگالی احتمال به‌قرار زیر است:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (1-2)$$

که در آن، $F(t)$ ، تابع توزیع تجمعی، $f(x)$ ، تابع چگالی احتمال و t نشان‌دهنده زمان است. با توجه به اینکه زمان $-\infty$ در قابلیت اطمینان فاقد مفهوم و معنای واقعی است، لذا، در این حیطه تابع چگالی احتمال به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

^۱. Failure Density Function

^۲. Failure Distribution Function

۳-۳-۲- تابع قابلیت اطمینان $(R(t))$

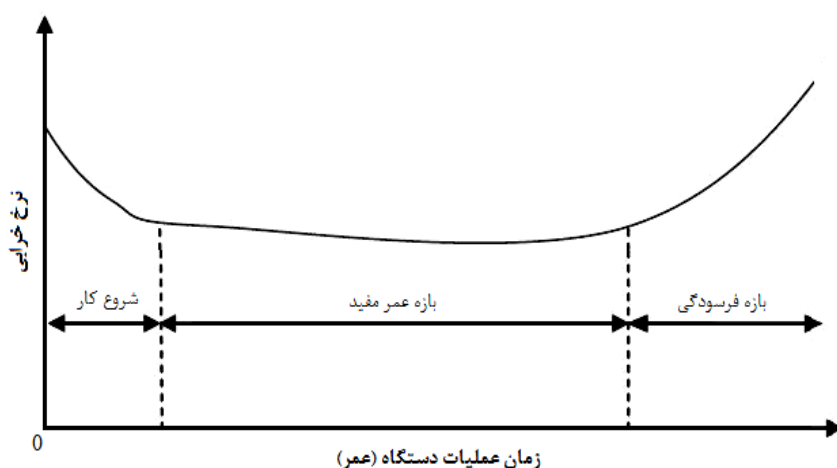
طبق منابع موجود، تعریف ریاضی قابلیت اطمینان یک دستگاه به طور کلی به صورت رابطه ذیل است (Gendenka & Ushakov, 1995; Birolini, 2007; Rausand & Hsyland, 2004):

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx \quad (3-2)$$

که در آن، $R(t)$ ، قابلیت اطمینان در زمان t است. این تابع در حالت ساده به صورت قابلیت اطمینان در زمان t خوانده می شود. همچنان که شرح داده شد، این کمیت از جنس احتمال بوده و به صورت درصد بیان می شود.

۳-۳-۴- تابع نرخ خرابی $(\lambda(t))$

میزان خرابی های هر دستگاه در طول عمر خود به طور خاص از یک روند تبعیت می کند. نرخ خرابی، به عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی کارآمدی دستگاه و وضعیت عملیاتی آن، در مهندسی قابلیت اطمینان و مدیریت تعمیر و نگهداری از جایگاه ویژه ای برخوردار است. هر دستگاه در طول عمر خود به صورت کلی سه بازه زمانی مشخص را طبق شکل (۱-۲) سپری می نماید. این منحنی در مهندسی قابلیت اطمینان به منحنی "وان شکل"^۱ شهرت یافته است (Ebeling, 2009; Gupta et al., 2010).



شکل ۱-۲- منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک دستگاه (Dhillon, 2008)

^۱. Bathtub failure rate curve

طبق شکل مذکور، در اوایل عمر دستگاه (بازه شروع کار)، ابعاد فنی و مشخصات عملیاتی بخش‌های مختلف برای کاربر به‌طور کامل مشخص نبوده و رفتار دستگاه تا حدودی ناشناخته است. این امر باعث بروز خرابی‌ها و توقف‌هایی در تولید در اوایل عمر دستگاه می‌شود. همچنین کنترل کیفیت ضعیف، مواد و لوازم یدکی ناسازگار با دستگاه، نقاط ضعف موجود در ساخت دستگاه، تعمیر نامناسب و خطاهای انسانی از جمله دلایل دیگر بالا بودن نرخ خرابی در اوایل عمر دستگاه می‌باشند (Kececiyoglu, 2002).

مدتی پس از شروع و راه‌اندازی دستگاه، نرخ خرابی با گذشت زمان کمتر می‌شود. در اواسط عمر دستگاه با توجه به شناخت کافی کاربر و همچنین برنامه‌ریزی صحیح برای تعمیر و نگهداری، دستگاه از نظر خرابی به حالت پایداری نسبی رسیده و نرخ خرابی در بازه زمانی کار مفید تقریباً ثابت می‌ماند (Dhillon, 2008). با نزدیک شدن به انتهای عمر دستگاه، کلیه بخش‌های دستگاه دچار فرسودگی و کاهش کیفیت می‌شوند. در نتیجه قطعات دستگاه دچار خرابی‌های غیرملموس شده و قطعات تحت تنش‌های بالاتر از توان خود قرار می‌گیرند و با گذشت زمان، نرخ خرابی دستگاه افزایش می‌یابد (Dhillon, 2008; Finkelstein, 2008).

در تحلیل‌های قابلیت اطمینان، تعریف ریاضی نرخ خرابی یک دستگاه به‌طور کلی به‌صورت زیر است:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4-2)$$

و یا به‌صورت:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (5-2)$$

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

علاوه بر این موارد، از منحنی نرخ خرابی می توان به منظور استخراج اطلاعات با ارزشی مثل موارد ذیل بهره جست (Kececiyoglu, 2002):

- پیش بینی زمان بهینه و هزینه دوره ضمانت دستگاه

- پیش بینی و مدیریت قطعات یدکی

- تخمین زمان پایان بازه شروع کار.

هرکدام از دو مورد اول به تنهایی زمینه پیچیده و وسیعی از مهندسی ماشین آلات و قابلیت اطمینان را شامل می شوند، لذا برای ارزیابی هر یک از آنها تحقیق جداگانه ای لازم است. اما مورد سوم یک پارامتر مدیریتی است که می توان با ارزیابی رفتار دستگاه و داده های خرابی، برای هر بخش یا کل دستگاه تعریف و محاسبه شود.

۲-۴- شبکه های قابلیت اطمینان

سیستم ها معمولاً از تعدادی عضو یا زیرسیستم تشکیل می شوند. نحوه ارتباط و قرارگیری این زیرسیستم ها نسبت به هم روی قابلیت اطمینان کل سیستم تأثیرگذار است. در ادامه انواع ارتباط زیرسیستم ها و شبکه های قابلیت اطمینان بیان شده است (حاج شیرمحمدی ۱۳۹۰؛ Dhillon. 2008):

۲-۴-۱- سیستم سری^۱

در این آرایش زیرسیستم ها به صورت متوالی باهم ارتباط دارند و برای این که سیستم بتواند به فعالیت خود ادامه دهد باید تمام زیرسیستم ها به درستی فعالیت کنند به عبارت دیگر از کار افتادن یک زیرسیستم سبب رکود کل سیستم می شود. اگر قابلیت اطمینان زیرسیستم ها به ترتیب $R_1, R_2, \dots, R_n$ باشد آنگاه قابلیت اطمینان کل سیستم به صورت رابطه (۲-۶) محاسبه می شود:

$$R_S = \prod_{j=1}^m R_j \quad (۲-۶)$$

که؛ $R_S = R_{system}$ قابلیت اطمینان کل سیستم و n تعداد زیرسیستم ها است.

^۱ Series system

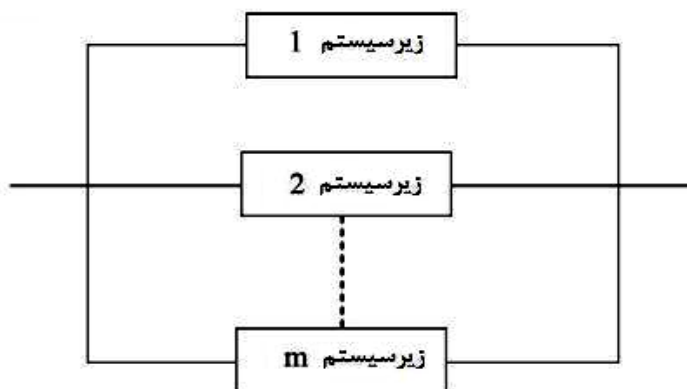
شکل (۲-۲) نمونه‌ای از یک سیستم سری را نشان می‌دهد. در صورتی که هریک از زیرسیستم‌ها دچار خرابی شود، تولید متوقف شده و هزینه‌هایی را به دنبال خواهد داشت (Kumar et al. 1989).



شکل ۲-۲- سیستم سری

۲-۴-۲- سیستم موازی^۱

در این سیستم‌ها، ارتباط زیرسیستم‌ها به گونه‌ای است که فعالیت حداقل یکی از آن‌ها هم می‌تواند عدم رکود در سیستم را تضمین کند و تنها در صورتی که کل زیرسیستم‌ها غیرفعال شوند در سیستم کل رکود ایجاد می‌شود. در شکل (۳-۲) یک سیستم بارگیری معدنی شامل سه زیرسیستم که به صورت موازی فعالیت می‌کنند نشان داده شده است (Kumar et al., 1989).



شکل ۳-۲- سیستم موازی

قابلیت اطمینان کل در این سیستم‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

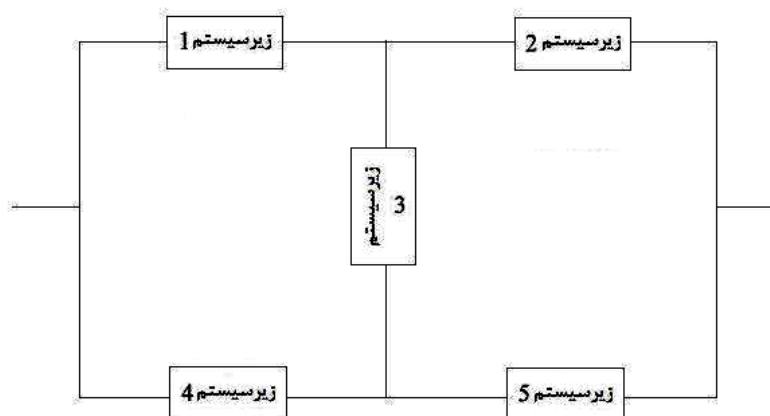
$$R_S = 1 - \prod_{j=1}^m F_j \quad (۷-۲)$$

^۱ Parallel System

۲-۴-۳- سیستم‌های ترکیبی^۱ (مختلط)

در این نوع سیستم‌ها، برخی زیرسیستم‌ها به صورت سری و برخی به صورت موازی باهم قرار می‌گیرند.

در شکل زیر نمونه‌ای از این زیرسیستم‌ها ارائه شده است (Kumar et al., 1989).



شکل ۲-۴- سیستم ترکیبی (مختلط)

به منظور محاسبه قابلیت اطمینان این سیستم‌ها، سیستم‌های معادلی جایگزین زیرسیستم‌های سری و موازی می‌شود.

$$R_s = 2R_1R_2R_3R_4R_5 + R_2R_3R_4 + R_1R_3R_5 + R_1R_4 + R_2R_5 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4 - R_5R_1R_2R_3 - R_1R_3R_4R_5 - R_1R_2R_4R_5 \quad (۲-۸)$$

۲-۴-۴- سیستم k از m^۲ (سیستم با عضو مازاد)

در این مورد تعداد m زیرسیستم (عضو) وجود دارد و حداقل تعداد k زیرسیستم باید به منظور جلوگیری از ایجاد رکود در سیستم فعال باشند. قابلیت اطمینان در این سیستم‌ها به صورت رابطه

(۲-۹) محاسبه می‌شود:

$$R_s = \sum_{j=k}^m \binom{m}{j} R^j (1-R)^{m-j} \quad (۲-۹)$$

که؛ R_s قابلیت اطمینان کل سیستم و R_j : قابلیت اطمینان هر زیرسیستم است.

^۱ Combinational System

^۲ k-Out-m Configuration

سیستم موازی و سری نوعی خاص از این سیستم می‌باشند که به ترتیب به ازای مقادیر $k=1$ و $k=m$ در رابطه (۹-۲) حاصل می‌شوند (Kumar et al., 1989).

۲-۴-۵- سیستم‌های آماده به کار^۱

در این نوع آرایش، سیستم از $n+1$ عضو (زیرسیستم) تشکیل می‌شود که یک عضو از $n+1$ عضو فعال بوده و بقیه به صورت آماده به کار قرار دارند و وقتی این زیرسیستم فعال خراب شود، یکی از زیرسیستم‌هایی که در حالت آماده به کار قرار دارند وارد عمل می‌شوند. در این سیستم‌ها تنها در صورتی که تمام زیرسیستم‌های آماده به کار خراب شوند، در سیستم رکود رخ می‌دهد. رابطه کلی محاسبه قابلیت اطمینان این سیستم‌ها رابطه (۱۰-۲) است:

$$R_{sb}(t) = \sum_{j=k}^m \left[\left[\int_0^t \lambda(t) dt \right]^j e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \right] / j \quad (10-2)$$

$R_{sb}(t)$: قابلیت اطمینان سیستم در حال انتظار در زمان t ، n تعداد زیرسیستم آماده به کار و $\lambda(t)$ تابع نرخ خرابی هر زیرسیستم است (Kumar et al., 1989).

۲-۵- روش‌های متداول در تحلیل قابلیت اطمینان

روش‌ها و تکنیک‌های مختلف و متنوعی برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه‌ها ارائه شده است که در ادامه، چهار روش اصلی مورد استفاده در تحلیل‌های قابلیت اطمینان معرفی خواهد شد.

الف- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA)^۲

این روش یکی از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. روش FMEA یک روش کیفی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌ها است. این روش در اوایل دهه ۱۹۲۰ برای ارزیابی طراحی‌های سیستم‌های کنترل پرواز ارائه شد (Countinho, 1964). مراحل اجرای این روش از فاز طراحی دستگاه شروع شده و در تمامی مراحل عمر دستگاه ادامه می‌یابد. اساس روش FMEA

¹ Standby System

². Failure Modes and Effects Analysis

کیفی بوده و هیچ گونه بحث کمی در تحلیل ها وارد نمی شود. این امر یکی از بزرگ ترین نقاط ضعف و محدودیت های این روش است.

ب- روش مارکوف^۱

روش مارکوف یکی از توانمندترین و پرکاربردترین روش های تحلیل قابلیت اطمینان است. این روش بر مبنای حالت های سیستم استوار بوده و با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می نماید. فرضیات زیر در روش مارکوف در نظر گرفته می شود (Wang & Pham, 2006):

- نرخ خرابی و نرخ تعمیر ثابت هستند.
- تمامی رخدادها مستقل از هم هستند.
- احتمال انتقال سیستم از یک حالت به حالت دیگر در بازه زمانی Δt برابر است با $\lambda \Delta t$ که λ نرخ انتقال سیستم (نرخ خرابی یا نرخ تعمیر) است.
- احتمال رخداد دو تغییر وضعیت از حال عملیاتی به حالت خرابی، در یک بازه زمانی محدود، بسیار کم و یا قابل صرف نظر کردن است.

ج- روش تحلیل درخت خطا (FTA)^۲

روش تحلیل درخت خطا یکی از جامع ترین روش های موجود در مهندسی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری ماشین آلات است. این روش به صورت نظام مند، تمامی دلایل خرابی و قطعات مربوط به هر دستگاه را در یک ساختار بالا به پائین که شبیه به درخت است، مرتب کرده و از این ساختار برای محاسبه احتمال خرابی یا سالم بودن یک دستگاه یا مجموعه استفاده می کند. این روش اولین بار در آزمایشگاه های تلفن بل^۳ ارائه و توسعه داده شد (Vesley et al., 1981).

روش درخت خطا یک روش کیفی و کمی بوده و به این دلیل به طور بسیار مناسبی شرایط فنی و

^۱. Markov

^۲. Fault Tree Analysis

^۳. Bell

خرابی‌های دستگاه را تحلیل می‌نماید.

د- روش تحلیل آماری

روش تحلیل آماری پایه‌ای‌ترین روش تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان است (Ridgon & Basu, 2000). چنانکه از تعاریف اول این فصل برمی‌آید، قابلیت اطمینان یک کمیت آماری و مبتنی بر تئوری احتمالات است. لذا روش تحلیلی آماری، توانمندترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌آید. به دلیل استفاده از این روش در این پایان‌نامه، توضیحات این روش به صورت بخش جداگانه در ادامه بحث ارائه می‌گردد.

۲-۶- تحلیل آماری و مدل‌سازی قابلیت اطمینان

با توجه به رابطه (۲-۳)، تابع توزیع احتمال زمان بین خرابی‌ها به عنوان اصلی‌ترین بخش محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است. لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان به شمار می‌آید.

با توجه به طبیعت آماری محاسبات، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین عامل در دستیابی به مدل قابلیت اطمینان مناسب، داشتن جامعه آماری کامل و دقیق است. چنانکه شرح داده شد، زمان بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان متغیرهای تصادفی، تشکیل‌دهنده جامعه آماری مورد استفاده در مدل‌سازی قابلیت اطمینان می‌باشند. معمولاً برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان یک دستگاه از سه روش عمده استفاده می‌شود (Ascher & Feingold, 1984; Modarres, 2006):

الف) فرآیند تجدیدشونده (RP)^۱

ب) فرآیند پواسون همگن (HPP)^۲

ج) فرآیند پواسون ناهمگن (NHPP)^۳

^۱. Renewal Process

^۲. Homogenous Poisson Process

^۳. Nonhomogeneous Poisson Process

انتخاب هر یک از روش‌های مدل‌سازی فوق بستگی به نوع داده‌های جمع‌آوری شده دارد. الگوریتم کلی برای انتخاب روش مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان که در این پایان‌نامه نیز مورد استفاده قرار گرفته است در شکل (۲-۵) ارائه شده است. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، برای تشخیص نوع داده‌ها و انتخاب بهترین روش مدل‌سازی، دو مرحله ارزیابی (آزمون) روی داده‌ها انجام می‌گیرد. در مرحله اول داده‌ها برای وجود یا عدم وجود روند مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در صورت وجود روند در داده‌ها، از فرآیند پواسون ناهمگن مانند روش فرآیند قانون توان^۱ برای تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می‌شود (Klefsjö & Kumar, 1992).

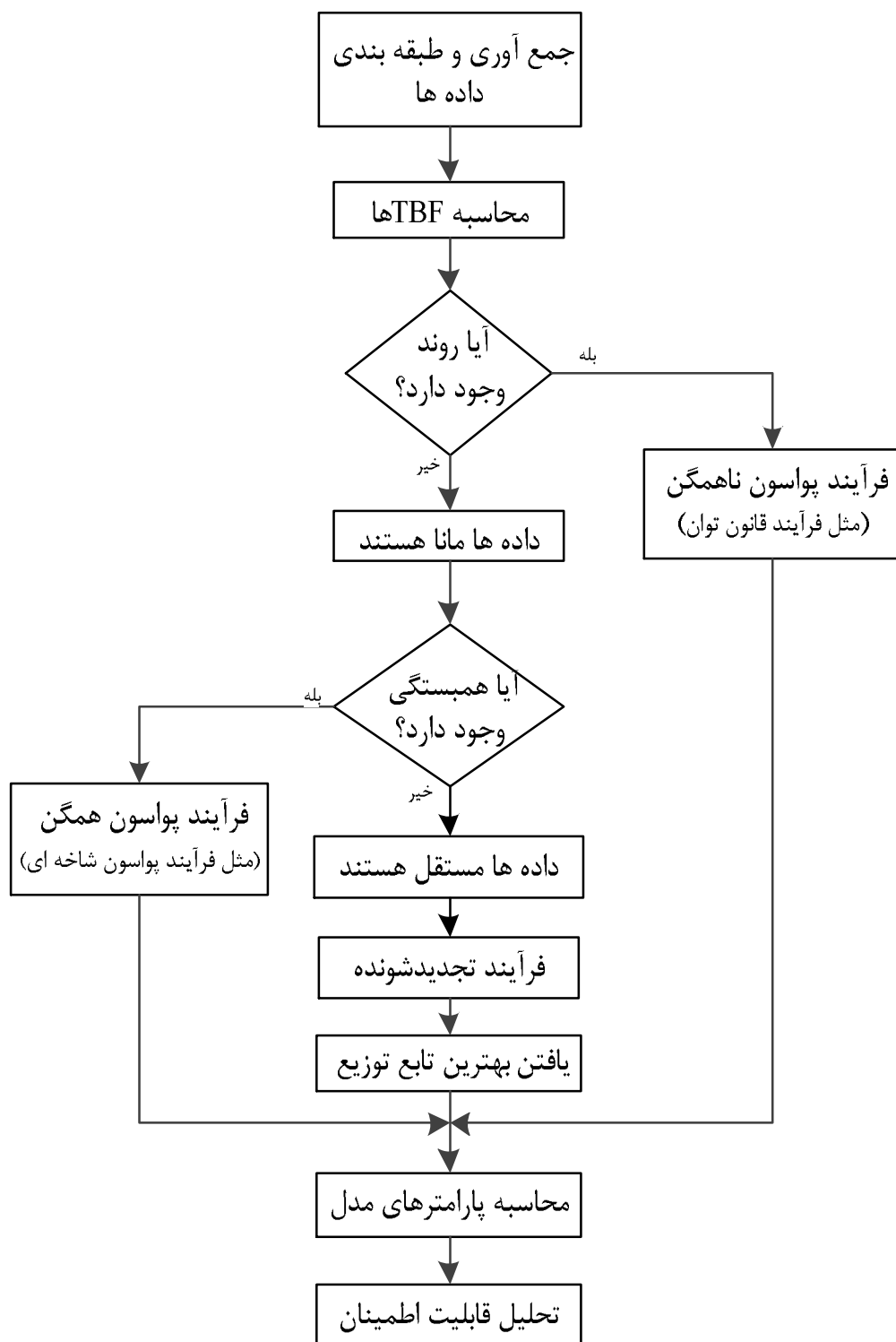
در صورت عدم وجود روند در داده‌ها، داده‌ها برای وجود یا عدم وجود همبستگی سری^۲ مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در صورت وجود همبستگی در داده‌ها، از روش‌های زیرمجموعه فرآیند پواسون همگن مثل فرآیند پواسون شاخه‌ای^۳ برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود. در صورت عدم وجود روند و همبستگی، داده‌ها از نظر آماری "مستقل و مانا (iid)"^۴ نامیده می‌شوند (Kumar, 1990). برای مدل‌سازی این نوع داده‌ها از فرآیند تجدیدشونده و آمار کلاسیک استفاده می‌شود (Ebeling, 2009; Ridgon & Basu, 2000). در ادامه انواع آزمون‌های روند و همبستگی سری که به آزمون‌های مستقل و مانا بودن داده‌ها شهرت دارند و در مدل‌سازی قابلیت اطمینان به کار می‌رود ارائه می‌شوند.

¹. Power Law Process

². Serial correlation

³. Branching Poison process

⁴. Independent and Identically Distributed



شکل ۲-۵- روند نمای مربوط به انتخاب روش مناسب برای مدل سازی قابلیت اطمینان

(Ascher & Feingold, 1984)

۲-۶-۱- آزمون‌های مستقل و مانا بودن داده‌ها

۲-۶-۱-۱- آزمون‌های روند^۱

به الگوی خرابی‌های یک دستگاه روند گفته می‌شود که می‌تواند یکنواخت یا غیر یکنواخت باشد. در حالت یکنواخت، اگر فاصله زمانی خرابی‌ها رو به افزایش باشد، شرایط دستگاه "رو به بهبود"^۲ (روند کاهشی) خوانده می‌شود. اگر فاصله زمانی خرابی‌ها با افزایش عمر دستگاه کاهش یابد، شرایط دستگاه "رو به زوال"^۳ (روند افزایشی) خوانده می‌شود. در صورتی که تغییرات چندانی در TBF های دستگاه رخ ندهد، دستگاه را "پایدار"^۴ می‌نامند (Kvaloy & Lindqvist, 1996).

برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها، آزمون‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند که به طور کلی به دو گروه آزمون‌های تحلیلی و گرافیکی تقسیم می‌شوند. از جمله روش‌های تحلیلی می‌توان به آزمون‌های لاپلاس^۵، هندبوک نظامی^۶، چیدمان معکوس^۷، نسبت همسایگی^۸ و آزمون مساحت^۹ اشاره کرد (Kvaløy & Lindqvist, 1996). در میان این روش‌ها روش هندبوک نظامی از کاربرد بیشتری نسبت به سایر آزمون‌ها برخوردار است (Kumar, 1990). در مواقعی که هدف از آزمون روند، انتخاب بین دو فرآیند تجدید شونده و پواسون ناهمگن از نوع قانون توان باشد، این آزمون بهترین و قابل اعتمادترین نتیجه را ارائه می‌نماید (NIST, 2011).

در آزمون نظامی، ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری (U) (رابطه ۲-۱۱) انجام می‌شود (MIL-HDBK-189, 1984).

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n / T_i) \quad (۲-۱۱)$$

^۱. Trend Test

^۲. Improving System

^۳. Deteriorating System

^۴. Stable

^۵. Laplace

^۶. Military Handbook Test

^۷. Reverse Arrangement

^۸. Likelihood-ratio

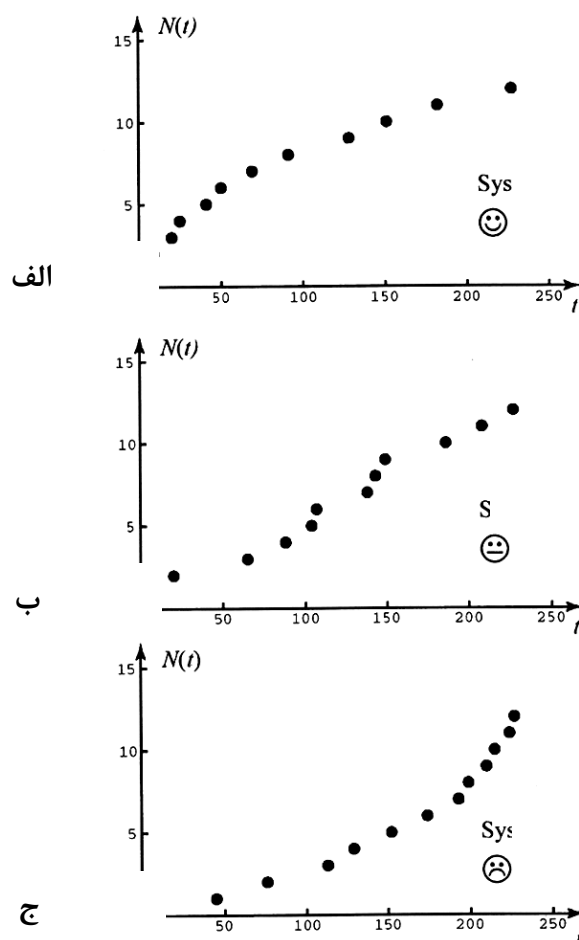
^۹. Area Test

که در آن، n تعداد خرابی، T_n زمان آخرین خرابی، T_i زمان خرابی i ام است. در این روش، فرض صفر این است که داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن تبعیت نمی‌کنند. بر مبنای این فرض، شاخص U دارای توزیع کی-دو (χ^2) با درجه آزادی $2(n-1)$ است. برای کنترل صحت فرض صفر، پس از محاسبه U برای داده‌ها، از جدول استاندارد توزیع کی-دو استفاده می‌شود. اگر U از عدد بحرانی قرائت شده از جدول استاندارد بزرگ‌تر باشد فرض پایه صفر پذیرفته می‌شود. در صورتی که فرض موجود در سطح اعتماد بالای ۹۰٪ (معمولاً ۹۵٪) پذیرفته شود، آنگاه مشخص می‌شود که داده‌ها دارای روند نیستند. در صورت رد این فرض، داده‌ها دارای روند تشخیص داده می‌شوند.

آزمون گرافیکی به دلیل سادگی، سرعت عملکرد و اطلاعات با ارزشی که در اختیار قرار می‌دهد، از کاربرد بیشتری نسبت به روش‌های تحلیلی برخوردار است. در این آزمون شماره خرابی‌ها بر اساس تابعی از زمان تجمعی وقوع هر خرابی (زمان تا خرابی) به صورت نقاط مجزایی رسم می‌شوند. نحوه قرارگیری این نقاط نشان دهنده نوع رفتار دستگاه و وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها است. در صورتی که الگوی کلی قرارگیری نقاط به صورت خطی باشد، داده‌ها عاری از روند می‌باشند. وجود حالت تحذب، تقعر و یا به طور کلی انحنا در نحوه قرارگیری نقاط، نشان‌دهنده روند در

داده‌هاست (Ascher & Feingold, 1984; Kumar & Klefsjo, 1992; Misra, 2011).

انواع حالت‌های ممکن برای آزمون روند گرافیکی در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، مهم‌ترین برتری و اهمیت روش گرافیکی نسبت به روش‌های تحلیلی، تشخیص همزمان روند و نوع "رو به بهبود" یا "رو به زوال" بودن دستگاه است که در روش‌های تحلیلی قابل تشخیص نیست.



الف) داده‌ها دارای روند می‌باشند (به دلیل تحدب شکل قرارگیری داده‌ها، سیستم رو به بهبود است)، ب) داده‌ها دارای روند نیستند

(سیستم پایدار است) ج) داده‌ها دارای روند می‌باشند (به دلیل تقعر شکل قرارگیری داده‌ها، سیستم روبه‌زوال است)،

شکل ۲-۶- آزمون گرافیکی برای تعیین نوع داده‌ها (Ridgon & Basu, 2000)

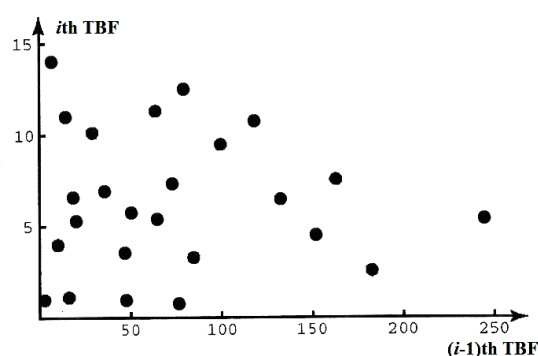
از آنجایی که در روش‌های تحلیلی با داده‌ها و سیستم موجود با استراتژی "جعبه سیاه"^۱ برخورد می‌شود، الگوی کلی داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و حالت‌های خرابی^۲ مورد توجه قرار نمی‌گیرند؛ اما اما در روش گرافیکی امکان بررسی و مطالعه وجود یا عدم وجود حالت‌های خرابی چندگانه وجود دارد. در این پایان‌نامه به منظور دستیابی به دقت بالا و نیز بررسی رفتار تابع زمان زیرسیستم‌های دستگاه، از آزمون گرافیکی و آزمون تحلیلی "نظامی" به طور همزمان استفاده خواهند شد.

^۱. Black Box

^۲. Failure modes

۲-۶-۱-۲-۲-آزمون همبستگی سری^۱

هدف از این آزمون ارزیابی استقلال^۲ یا همبستگی داده‌ها است. برای بررسی همبستگی داده‌های خرابی یک دستگاه از روش گرافیکی استفاده می‌شود. در این روش n امین داده‌های خرابی به صورت تابعی از $(n-1)$ امین داده‌های خرابی در یک فضای XY رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد، نشان‌دهنده آن است که داده‌های متوالی دارای همبستگی نیستند. در غیر این صورت داده‌ها غیرمستقل خوانده می‌شود (Ascher & Feingold, 1984). نمونه‌ای از نتیجه آزمون همبستگی در شکل (۷-۲) ارائه شده است. در این شکل، نقاط از پراکندگی و بی‌نظمی برخوردار هستند و این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی در داده است.



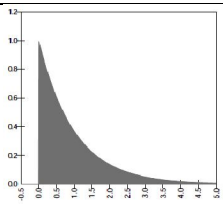
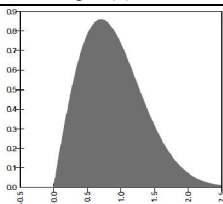
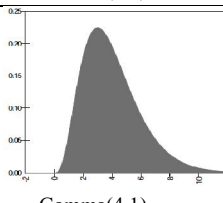
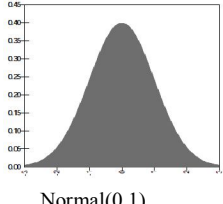
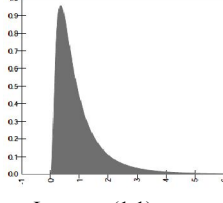
شکل ۷-۲-آزمون همبستگی سری

۲-۶-۲-۲-فرآیند تجدیدشونده

فرآیند تجدیدشونده فرآیندی شمارنده است که زمان‌های بین رخدادها در آن به صورت مانا و مستقل و تحت تابع توزیع مشخصی اتفاق می‌افتد (Rausand & Hsyland, 2004). برای یافتن توزیع مناسب در فرآیند تجدیدشونده از روش‌های آمار کلاسیک استفاده می‌شود. برای این منظور، توابع توزیع مختلف روی داده‌ها امتحان می‌شوند تا بهترین توزیع (دارای کمترین خطا و اختلاف با واقعیت) انتخاب شود. در شکل (۸-۲) تعدادی از توابع توزیع پیوسته که در تحلیل قابلیت اطمینان از کاربرد بیشتری برخوردارند، ارائه شده‌اند. توضیحات تکمیلی در بخش مطالعه موردی ارائه خواهد شد.

¹. Serial Correlation Test

². Dependence

نام توزیع	تابع توزیع تجمعی $F(t)$	تابع چگالی $f(t)=dF(t)/dt$	نرخ خرابی $\lambda(t)=f(t)/1-F(t)$	میانگین $E[\tau]$
Exponential	$1 - e^{-\lambda t}$	 Expon(1)	λ	$\frac{1}{\lambda}$
Weibull	$1 - e^{-(\alpha t)^\beta}$	 Weibull(2,1)	$h_{arms}(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$	$\frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{\lambda}$
Gamma	$\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$	 Gamma(4,1)	$\lambda(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha) [1 - \Gamma(\frac{t}{\beta}; \alpha)]}$	$\frac{\beta}{\lambda}$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$	 Normal(0,1)	$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-m}{\sigma})^2}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-m}{\sigma})^2} dt}$	m
Lognormal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln(\mu)}{\sigma}} e^{-x^2/2} dx$	 Lognorm(1,1)	$\lambda(t) = \frac{\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma \cdot R(t)}$	$\frac{e^{\sigma^2/2}}{\lambda}$

شکل ۲-۸- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته (حسینی، ۱۳۹۰)

برای انتخاب بهترین تابع چگالی احتمال خرابی، نیاز است که بدانیم هر توزیع تا چه حد بر داده‌ها تجربی موجود تطابق دارد. برای ارزیابی این موضوع آزمون‌های آماری "تطابق برازش"^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند. سه آزمون اصلی که در آمار بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: روش آزمون مربع کی^۲، کلموگروف-اسمیرنوف^۳ (K-S) و روش حداقل مربعات^۴. در مهندسی قابلیت اطمینان از دو

^۱. Goodness-of-fit test

^۲. χ^2 test

^۳. Kolmogorov-Smirnov test

^۴. Least Squares

روش اول بیشتر استفاده می‌شود. روش مربع کی برای تمامی توابع توزیع و در صورت وجود تعداد زیاد داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش کلموگروف-اسمیرنوف که به‌طور گسترده‌ای در تحلیل داده‌های قابلیت اطمینان استفاده می‌شود، نسبت به روش مربع کی ساده‌تر بوده و برای تعداد داده‌های کم نتایج بهتری نسبت به مربع کی ارائه می‌نماید (Misra, 2011). روش مذکور بر اساس بیشترین اختلاف عمودی داده‌های واقعی و مورد انتظار (تولیدشده توسط تابع چگالی احتمال انتخابی) استوار است. آزمون مذکور برای تطابق توزیع، احتمال‌های تجمعی مقادیر در مجموعه داده‌ها را با احتمال تجمعی همان مقادیر در یک تابع توزیع نظری خاص را مقایسه می‌کند. هر تابعی که دارای کمترین میزان این اختلاف باشد به‌عنوان منطبق‌ترین تابع توزیع روی داده‌ها انتخاب می‌شود.

۲-۶-۳- فرآیند پواسون

فرآیند پواسون، یک فرآیند تصادفی شمارشگر است که برای وقوع رخدادهای تصادفی بر روی یک بازه زمانی یا یک فاصله مکانی تعریف می‌شود. اگر $N(t)$ نشان‌دهنده تعداد پیش‌آمدهایی باشد که در فاصله زمانی $[0, t]$ رخ می‌دهند، به فرآیند شمارشگر $N(t)$ فرآیند پواسون با نرخ λ ($\lambda > 0$) گفته می‌شود اگر شرایط زیر را دارا باشد (چینلار، ۱۳۸۰):

الف) فرآیند از زمان صفر شروع شود ($N(0)=0$)

ب) تعداد پیش‌آمدهایی که در بازه‌های مجزا رخ می‌دهند، مستقل باشند. این شرط نمونه‌های مستقل نامیده می‌شود.

ج) توزیع تعداد پیش‌آمدهایی که در یک بازه مفروض رخ می‌دهند، تنها به طول بازه وابستگی داشته باشد و نه به موقعیت آن‌ها. این شرط نمو ایستا نامیده می‌شود و بیان‌کننده آن است که توزیع احتمال $N(t+s)-N(t)$ برای هر مقدار t یکسان است.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{P\{N(h)=1\}}{h} = \lambda \quad \text{د) معادله روبه‌رو برقرار باشد:}$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{P\{N(h) \geq 2\}}{h} = 0 \quad \text{ه) معادله روبه‌رو برقرار باشد:}$$

دو شرط آخر بیان می کنند که در یک بازه کوچک با طول h ، احتمال اینکه یک پیشامد رخ دهد تقریباً مساوی λh است. درحالی که احتمال اینکه ۲ یا تعداد بیشتر پیشامد رخ دهند تقریباً مساوی با صفر است. در نهایت شرطهای فوق نتیجه می دهند که تعداد پیشامدهایی که در بازه به طول t رخ می دهند یک متغیر تصادفی با پارامتر λt است.

فرآیندهای پواسون برحسب نوع پارامتر شدت^۱ (λ) به دو خانواده همگن یا ناهمگن تقسیم می شوند. در فرآیند پواسون همگن، λ باگذشت زمان ثابت می ماند؛ اما در فرآیند ناهمگن، λ باگذشت زمان تغییر می کند و به عبارتی تابع زمان است.

در مهندسی قابلیت اطمینان فرآیند پواسون از کاربرد بسیار گسترده ای برخوردار است. یکی از پرکاربردترین انواع فرآیندهای پواسون، فرآیند قانون توان است که در مدل سازی رفتار خرابی ماشین آلات از توانایی بالایی بهره مند است (Kumar & Klefsjo, 1992). در ادامه، این فرآیند و محاسبات مربوطه ارائه می شوند.

۲-۶-۴- فرآیند قانون توان

فرآیند قانون توان یکی از شناخته شده ترین روش های مطالعه قابلیت اطمینان دستگاه های تعمیر پذیر به شمار می آید. این روش اولین بار توسط دوآنه (Duane, 1964) ارائه گردید. کرو (Crow, 1974) این فرآیند را به صورت یک فرآیند پواسون ناهمگن فرموله کرده و تابع شدت (تابع نرخ خرابی) آن را به صورت تابعی از زمان به شکل زیر ارائه نمود:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (2-12)$$

که در آن θ ، پارامتر مقیاس و β ، پارامتر شکل می باشند که طبق پیشنهاد کرو می توان آن ها را با استفاده از روش تخمین نزدیک ترین همسایگی^۲ و روابط زیر محاسبه نمود:

^۱. Intensity parameter

^۲. Maximum likelihood

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n-1} \ln(t_n / t_i)} \quad (13-2)$$

$$\hat{\theta} = \frac{t_n}{n^{1/\beta}} \quad (14-2)$$

که در آن‌ها t_i زمان پیشامد i امین خرابی، t_n زمان کل عملکرد دستگاه و n تعداد کل خرابی دستگاه است. شایان ذکر است روابط ۱۳-۲ و ۱۴-۲ زمانی استفاده می‌شوند که داده‌ها "برش خورده بر مبنای خرابی"^۱ باشند؛ یعنی، مطالعه دستگاه در آخرین خرابی متوقف شده و زمان عملکردی پس از آخرین داده خرابی، برای دستگاه لحاظ نمی‌شود. تابع چگالی خرابی و قابلیت اطمینان فرآیند قانون توان به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (15-2)$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (16-2)$$

برای ارزیابی تطابق داده‌ها با مدل قانون توان، یک آزمون گرافیکی ساده به کار برده می‌شود. برای این منظور، لگاریتم شماره خرابی ($N(t)$) در مقابل لگاریتم زمان (t) در یک فضای XY با مقیاس مربع رسم می‌شود. برازش یک خط بر روی این نقاط، نشان‌دهنده تطابق خوب مدل قانون توان برداده‌ها است (Kumar & Klefsjo, 1992). در غیر این صورت، فرآیند قانون توان، روش مناسبی برای مدل سازی قابلیت اطمینان و خرابی دستگاه موجود، نیست.

در این فصل، تئوری‌ها و مفاهیم مربوط به قابلیت اطمینان و روش‌های تحلیل و مدل سازی قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفتند، در ادامه مطالعات انجام شده تحلیل و مدل سازی قابلیت اطمینان در حوزه معادن بیان شده است.

^۱. Failure truncated

۲-۷- پیشینه قابلیت اطمینان در مهندسی معدن

استفاده از روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن به‌طور خلاصه در جدول (۱-۲) آورده شده است. با توجه به جدول (۲-۱)، تاکنون تنها از روش FMEA در مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی استفاده نشده است. علاوه بر این، روش مدل‌سازی آماری که روش اصلی و عمومی تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌رود در حد بسیار مناسبی استفاده‌شده و پرکاربردترین روش در ماشین‌آلات معدنی به شمار می‌آید.

جدول ۲-۱- لیست تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن (اضافه شده به جدول حسینی، ۱۳۹۰)

نام محقق/محققان	زمینه مورد مطالعه
Levkovich & Chalenko (1966)	تخمین تعداد کارگاه‌های رزرو در روش جبهه کار طولانی بر مبنای قابلیت اطمینان تولید
Gimelshein & Nikeshein (1967)	سیستم‌های الکترومکانیکی در معادن (تهویه و ماشین‌آلات روباز)
Altshuler (1969)	سیستم ترابری اکسکواتور-کامیون
Makhinin (1969)	پمپ آب در معادن
Soldatov (1969)	تجهیزات آتش‌کاری
Ivko et al. (1973)	قابلیت اطمینان مکانیکی و عملیاتی نگه‌دارنده‌های قدرتی در معادن زغال‌سنگ
Rubinshtein (1975)	رهنمودهایی برای بررسی قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی
Freidina et al. (1975)	ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن روباز (شامل: اکسکواتور، کامیون و قطار)
Butorin & Gavrilenko (1976)	ماشین حفاری
Bondar & Meruov (1979)	سیستم نوار نقاله در معادن روباز عمیق
Haskayne & Farmer (1982)	نگهدارنده‌های قدرتی در معادن زغال‌سنگ
Walker (1982)	AFC در کارگاه جبهه کار طولانی
Mason (1983)	تجهیزات کارگاه جبهه کار طولانی
Singh & Tiwari (1984)	سیستم‌های ترابری در معادن زیرزمینی
Garakavi et al. (1984)	ارزیابی عملیات تعمیر و نگهداری و تولید معدن بر مبنای قابلیت اطمینان ماشین‌آلات
Petrov & Butorina (1986)	انواع آرایش‌ها و شبکه‌های مورد استفاده در سیستم تهویه معدن
Shpiganovich & Maslovskaya (1987)	موتور الکتریکی نوار نقاله و سیستم برقی ماشین معدنکاری
Kumar & Granholm (1988)	کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن
Mukhopadhyay (1988)	سیستم تولید در معادن روباز
Goodman (1988)	راه‌های فرار از معادن زغال‌سنگ
Stanek & Venkata (1988)	سیستم‌های برق معدن (ماشین شاتل، موتور ماشین معدنکاری پیوسته، سیستم برق تهویه)
Pavlovic (1989)	کتابی در مورد قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید در معادن
Kumar (1990)	ماشین LHD
Kumar et al. (1992)	سیستم انتقال برق LHDها
Kumar & Klefsjo (1992)	سیستم هیدرولیک LHDها
Kumar & Huang (1993)	سیستم تولید معادن زیرزمینی
Mandal & Banik (1996)	تجهیزات جبهه کار طولانی
Vagenas et al. (1997)	تعمیر و نگهداری LHDها

شاوول برقی در معادن زغال سنگ روباز	Samanta et al. (2001)
حفاری های معدنی زیرزمینی	Vagenas et al. (2003)
قابلیت اطمینان تجهیزات درآگلاین	Samanta et al. (2004)
سیستم ترمز هیدرولیکی لودرهای معدنی	Ghodrati & Kumar (2005a)
جک های هیدرولیکی ماشین LHD	Ghodrati & Kumar (2005b)
سیستم تولید معادن زیرزمینی	Kumral (2005)
شیرر در معادن جبهه کار طولانی	Gupta et al. (2006)
سیستم نوار نقاله در معادن زیرزمینی	Gupta & Bhattacharya (2007)
کارخانه فرآوری مواد معدنی	Barabady & Kumar (2007, 2008)
شبکه های تهویه معادن زغال سنگ	Dongpeng et al. (2008)
ماشین LHD در معادن با سنگ سخت	Vagenas & Xiangxi (2009)
سیستم تولید در معادن روباز	Sharma et al. (2009)
دستگاه درآگلاین	Uzgoren et al. (2010)
سیستم تهویه تونل های در حال ساخت	Jalali & Forouhandeh (2011)
ماشین تمیزکاری و لق گیری ^۱ در معادن زیرزمینی	Wijaya et al. (2011)
قابلیت اطمینان درام شیرر	Hosseyni et al. (2011)
قابلیت اطمینان تجهیزات درآگلاین	Kumar Behera. (2011)
قابلیت اطمینان ماشین حفاری در معدن روباز	Rahimdel et al. (2012)
قابلیت اطمینان ماشین LHD	Gustafson et al. (2013)
قابلیت اطمینان سیستم تخلیه و انباشت	Mouli et al. (2014)
قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل	Heydari noghabi et al. (2015)
بررسی قابلیت اطمینان در سیستم های خودکار معادن	Ghodrati, B., Hadi Hoseinie, S., & Garmabaki, A. H. S. (2015)
مدل سازی قابلیت اطمینان ، در دسترسی بودن و تعمیر و نگهداری لودر های تخلیه جانبی در معدن زیر زمینی	Sarkhel, S., & Dey, U. K. (2015)
تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، در دسترسی بودن و تعمیر و نگهداری TBM	Khoshalan, H. A., Torabi, S. R., & Maleki, D. (2015)
شبیه سازی مونت کارلو قابلیت اطمینان تجهیزات حفاری در معادن زیر زمینی	Al-Chalabi, H., Hoseinie, H., & Lundberg, J. (2016).

با توجه به جدول (۲-۱)، تمامی مطالعات انجام شده در ۴۵ سال اخیر را می توان به دو دسته عمده تقسیم بندی نمود:

(۱) مطالعاتی که مفاهیم و تحلیل قابلیت اطمینان را هدف قرار داده اند

(۲) مطالعاتی که به مدل سازی قابلیت اطمینان پرداخته اند.

اکثر مطالعات قدیمی به مفاهیم اولیه تحلیل قابلیت اطمینان پرداخته اند. اما باگذشت زمان و پیشرفت فناوری معدنکاری و ماشین آلات موجود در معادن، مطالعات به سمت مدل سازی سوق پیدا کرده است.

^۱. Scaling Machine

مهم‌ترین دلیل این موضوع را می‌توان هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری و نیز اهمیت میزان تولید در دهه اخیر دانست. با توجه به مطالعات انجام‌شده بر روی قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی، مدل‌سازی آماری روش پرکاربرد و مقبول در مطالعات قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی بوده است. در مطالعاتی که تحلیل‌های آماری مبنای تعیین قابلیت اطمینان بوده‌اند، هیچ نوع مدل ریاضی برای قابلیت اطمینان ماشین‌آلات ارائه نشده است. در این مطالعات، یک سری داده‌های آماری با استفاده از محاسبات بسیار ساده، برای تعیین نرخ خرابی و یا تعیین میانگین زمان بین خرابی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مطالعاتی که هدف آن‌ها مدل‌سازی قابلیت اطمینان بوده است، مطالعات دقیق‌تر و علمی‌تری بر روی ماشین‌آلات انجام شده است. در این میان، شاول هیدرولیکی، لودر خاک‌انداز، کامیون‌های زیرزمینی، سنگ‌شکن، سرند، نوار نقاله، خوراک دهنده و LHD ها به‌صورت کاملاً اصولی مدل‌سازی شده‌اند (جدول ۲-۲).

جدول ۲-۲- روش‌های مختلف به‌کاررفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی
(اضافه شده به جدول حسینی، ۱۳۹۰)

نام ماشین	روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان				
	FMEA	مارکوف	درخت خطا	تحلیل آماری	مدل‌سازی
شاول برقی				✓	
کامیون				✓	
نصب بولت				✓	
ماشین شاتل			✓		
سیستم‌های برقی			✓		
LHD					✓
سیستم هیدرولیک LHDها					✓
لاستیک کامیون‌ها					✓
ناو زنجیری زره دار (AFC)	✓			✓	
بارگیر مرحله‌ای				✓	
نوار نقاله				✓	
نگهداری قدرتی				✓	
شاول برقی			✓		
لودر خاک‌انداز					✓
کامیون‌های زیرزمینی					✓
سنگ‌شکن					✓
سرند					✓

	✓					نوار نقاله
	✓					خوراک دهنده به نوار نقاله
				✓		فن تهویه
	✓					ماشین لق گیر
✓	✓	✓				درام شیرر (حسینی، ۱۳۹۰)
✓	✓	✓				ماشین های حفاری (کیاسری، ۱۳۹۳)

چنانکه در جدول مشاهده می شود، از دو روش تحلیل آماری و مدل سازی در مطالعه قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی بسیار استفاده شده است. روش مدل سازی آماری روش اصلی و عمومی تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می رود و در حد بسیار مناسبی استفاده شده که پرکاربردترین روش در ماشین آلات معدنی به شمار می آید. با توجه به قابلیت های روش شبیه سازی، احساس می شود استفاده از این روش در مطالعات معدنی، افق جدیدی از این مطالعات در زمینه مهندسی معدن خواهد گشود.

۲-۸- نتیجه گیری

در این فصل، مفاهیم پایه مورد استفاده در قابلیت اطمینان معرفی شده و مورد بحث قرار گرفتند. روش و الگوریتم مدل سازی قابلیت اطمینان مورد استفاده در این پایان نامه معرفی و تشریح شد. در پایان فصل سابقه علمی مهندسی قابلیت اطمینان در مهندسی معدن و مروری بر مطالعات گذشته ارائه گردید. در فصل آینده زیرسیستم های عملیاتی و بخش های مختلف سیستم تولید در معدن زغال سنگ بزرگ طزره ارائه خواهند شد.

فصل سوم

سیستم تولید زغال سنگ،

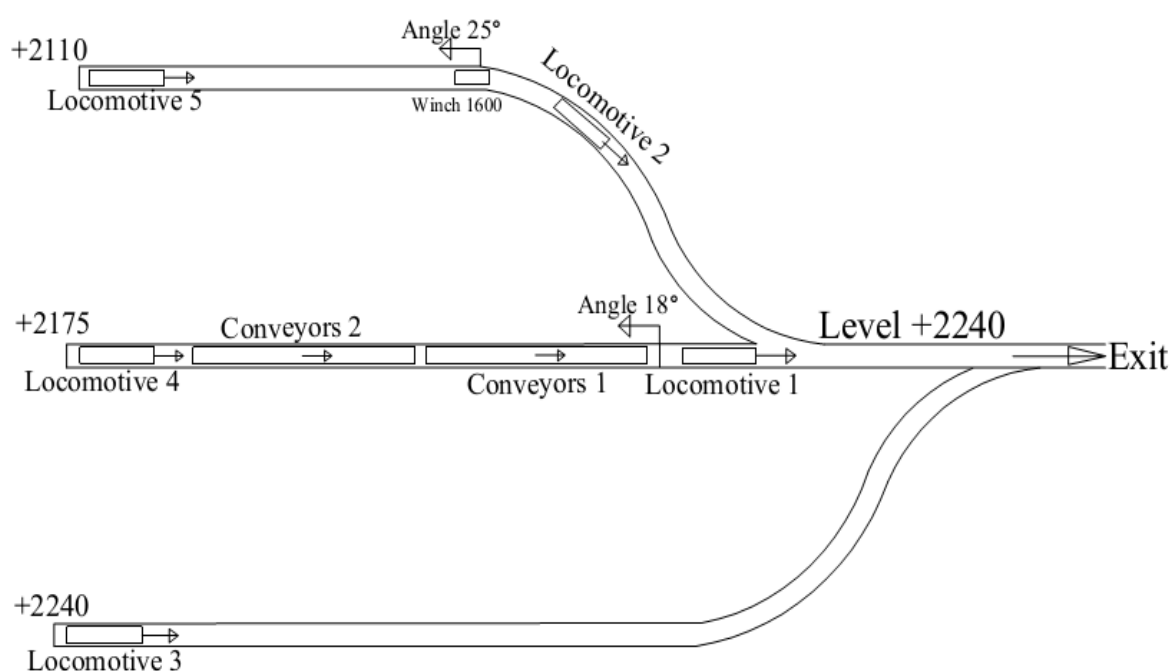
معدن بزرگ طزره

۳-۱- مقدمه

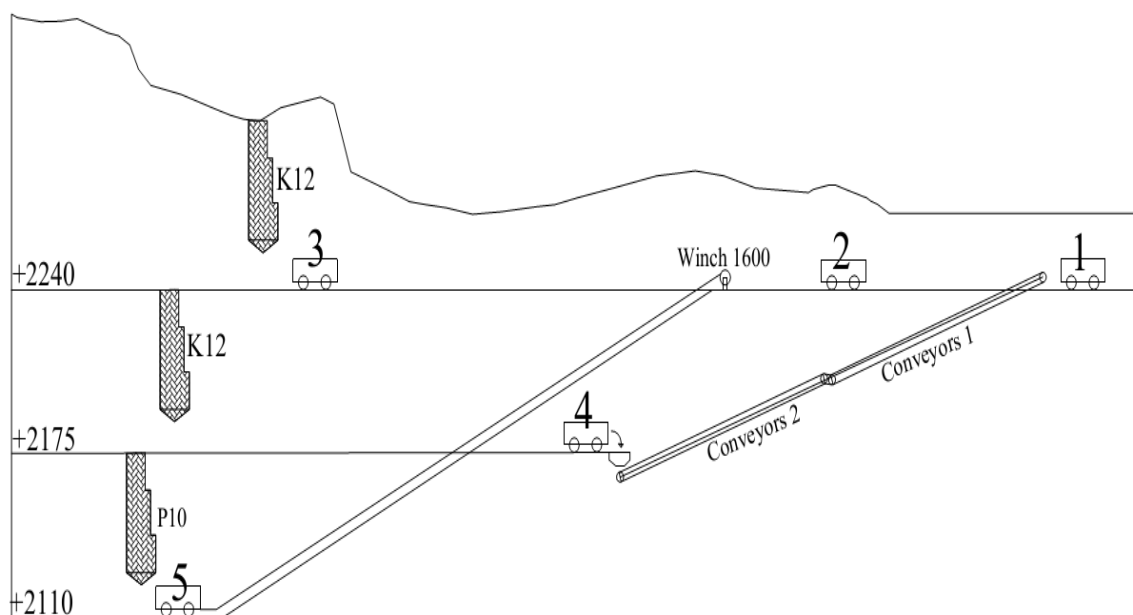
معدن بزرگ طزره با پشت سر گذاشتن ۴ دهه فعالیت مستمر جزء اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین مجموعه‌های معدنی البرز شرقی محسوب می‌شود. مطالعات اکتشافی معدن در سال ۱۳۴۸ توسط کارشناسان روسیه آغاز و تا سال ۱۳۵۱ به طول انجامید. پس از خاتمه عملیات اکتشافی، تعیین محل حفر دهانه اصلی و تأسیسات معدن، در سال ۱۳۵۲ عملیات حفر دهانه اصلی و پس از آن استخراج اولین لایه زغالی K5 آغاز شد. تونل اصلی معدن بزرگ به صورت عمود بر لایه‌های اکتشافی منطقه طراحی و اجرا شده است به طوری که دهانه این تونل در ارتفاع ۲۲۴۰+ از سطح دریا و به صورت جنوبی شمالی و با طول ۱۳۰۰ متر تمامی لایه‌ها از K3 تا K23 و در ادامه لایه‌های P را قطع کرده است. طراحی معدن برای ۵ افق ۲۲۴۰+، ۲۱۷۵+، ۲۱۱۰+، ۲۰۵۰+ و ۱۹۶۰+ انجام شده است اما تا این زمان فقط سه افق اول اجرا شده است و در آینده دو افق دیگر به بهره‌برداری خواهد رسید. افق ۲۲۴۰+ افق اصلی و گلوگاه معدن به شمار می‌آید و دو افق ۲۱۷۵+ و ۲۱۱۰+ از این افق منشعب می‌شود. افق ۲۱۷۵+ به نام افق اکلی نوار و افق ۲۱۱۰+ به نام افق اکلی وینچ نامیده می‌شوند.

مسیرهای معدنی فعال در معدن بزرگ طزره با سه مسیر A، B و C معرفی می‌شوند، در شکل‌های (۱-۳) و (۲-۳) نقشه شماتیک مسیرهای مذکور از دو پلان قائم و جانبی ترسیم شده است.

در افق +۲۲۴۰ مقطع مفید تونل در ۵۰۰ متر اول از ابتدای دهانه ورودی ۱۱/۲ مترمربع و در ادامه تا ۳۰۰ متر ۹/۲ مترمربع است، در مسیر اکلن وینچ و اکلن نوار نیز مقطع مفید ۱۱/۲ مترمربع و در اشتراک‌های فرعی به ۷/۲ مترمربع کاهش یافته است، سیستم نگهداری در راهروهای تونلی آرک فلزی و پرکننده‌های چوبی و در کارگاه‌های استخراج، ستون‌های چوبی به همراه جرزبندی است.



شکل ۱-۳- پلان قائم مسیرهای ترابری A، B و C در معدن بزرگ طزره



شکل ۳-۲- پلان جانبی مسیرهای ترابری A، B و C در معدن بزرگ طزره

۳-۲- سیستم تولید زغال سنگ در معدن بزرگ طزره

سیستم تولید زغال سنگ در معدن بزرگ طزره شامل ۴ بخش اصلی است که هر یک از این بخش ها به جهت اهمیتی که دارند به تفکیک توضیح داده می شود.

۳-۲-۱- تولید هوای فشرده

به دلیل مشکل استفاده از وسایل برقی در معادن زغال سنگ و نیز به جهت خطرات موجود از جمله انفجار گاز متان، اکثر تجهیزات در این معدن توسط هوای فشرده کار می کند. برای تهیه و تأمین هوای فشرده مورد نیاز در این معدن، در نزدیکی ورودی هر کدام از تونل های اصلی یک اتاق کمپرسور خانه تعبیه شده است. این دستگاه ها توسط برق سه فاز فشارقوی کار می کنند و قابلیت تولید هوایی با فشار معادل ۴۰۰ اتمسفر را دارا می باشند. برای انتقال هوای فشرده تولیدی، در صورت امکان و در مسیرهای مستقیم از لوله های چدنی استفاده می شود و در جاهایی که احتیاج به انعطاف پذیری است، از لوله های پلی اتیلنی با مقاومتهای بالا، در برابر ضربه و شکستن استفاده می شود. پیکورها،

پرفراتورها، بادبزن‌های موضعی، لودرهای برگردان تونلی و حتی پمپ‌ها از هوای فشرده تأمینی از این کمپرسورها تغذیه می‌کنند. علاوه بر این هوای خروجی از این دستگاه‌ها به کم شدن غلظت گازهای موجود هم کمک می‌کند.

تقسیم‌بندی کمپرسورها:

– از نظر عملکرد: به انواع (۱) رفت و برگشتی (متناوب و پیستونی)، (۲) پره دار، (۳) دوار

– از نظر تعداد مراحل تراکم: یک طبقه و چندطبقه

– از نظر ظرفیت: الف) کم ظرفیت، ب) ظرفیت متوسط، ج) ظرفیت بالا

– از نظر نسبت تراکم: اگر نسبت تراکم بین ۱ تا ۱/۱ باشد به آن‌ها بادبزن یا پروانه، اگر بین ۱/۱ تا

۴ باشد، دمنده و اگر از ۴ بالاتر باشد به آن‌ها کمپرسور گفته می‌شود.

کمپرسورهای پره دار به دو نوع عرضی و محوری تقسیم می‌گردند و همچنین کمپرسورهای دوار نیز به دو نوع پیچشی یا اسکرو و تیغه‌ای تقسیم می‌گردند. هوای فشرده معدن بزرگ طزره از کمپرسورخانه‌ای که در بالای دهانه ورودی معدن بزرگ وجود دارد تأمین می‌شود. در این کمپرسور خانه ۶ دستگاه کمپرسور از نوع پیچشی با دبی حجمی ۶۰ مترمکعب بر دقیقه از تولیدات شرکت اینگرسولند، مدل SSR-ML-350 که با مشارکت انگلستان و آمریکا ساخته شده است، وجود دارد که سرعت دوران آن‌ها ۱۴۷۳ دور بر دقیقه هست. از این ۶ دستگاه، ۴ دستگاه آن فعال است و دو دستگاه آن نیز به علت استفاده قطعات آن برای کمپرسورهای دیگر از کار افتاده می‌باشند. الکتروموتور این کمپرسورها ۶۰۰۰ ولت سه فاز با شدت جریان ۵۹/۲ آمپر است. گفتنی است که برق معدن از پست ۶۳ کیلوواتی که در اواخر سال ۱۳۵۸ و اوایل ۱۳۵۹ نصب شده است، تأمین می‌گردد. هرکدام از این کمپرسورها یک مدار فرمان دارند که این مدارهای فرمان با برق ۱۸۰ ولت کار می‌کنند. وزن هرکدام از مدار فرمان‌ها ۴۳۰ کیلوگرم و وزن هرکدام از کمپرسورها ۲۱۱۲ کیلوگرم است.

۳-۲-۲- سیستم تهویه شبکه تونلی

در ابتدای مسیر ورود به تونل با جریان هوای تندی در مدخل تونل مواجه می‌شویم که بعد از طی مسافتی به محض رسیدن به محل تغییر (کاهش) مقطع تونل این جریان کاهش می‌یابد. در داخل تونل جهت تهویه مجراهایی از کانال اصلی تهویه جدا شده و توسط لوله‌های فلزی با مقطع ۰/۶۵ مترمربع، مقدار معینی هوا وارد تونل می‌شود که این هوا به صورت فشرده توسط بادبزن‌هایی (ونتیلاتور) در بیرون از معدن به داخل تونل هدایت می‌شود. سه پارامتر جهت هوای لازم برای تهویه معدن مؤثر و دائماً اندازه‌گیری می‌شود:

۱- میانگین نفرات حاضر در معدن، اعم از کارگران، بازدیدکننده و... که داخل معدن فعالیت می‌کنند.

۲- مقدار مواد ناریه‌ای که روزانه مصرف می‌شود.

۳- گاز خیزی (میزان گازی که از طریق استخراج لایه‌های زغالی در داخل معدن تولیدی می‌شود).

با توجه به اینکه طول شبکه معدن بزرگ در حال حاضر حدود ۱۰ کیلومتر است و در هیچ حال نباید داخل تونل گاز داشته باشیم. لذا اگر در قسمت‌هایی از معدن گازی وجود داشته باشد توسط ونتیلاتورهای فرعی مقدار گاز به ۱٪ یا کمتر از ۱٪ ترقیق می‌یابد. در داخل معدن هر نفر به طور متوسط ۶ مترمکعب هوا لازم دارد. با این حساب اگر ۲۰۰ نفر داخل تونل باشند، تقریباً هزار و دویست مترمکعب هوا لازم است ($6 \times 200 = 1200$). در معدن بزرگ پره‌های ونتیلاتور روی ۲۵۰۰ مترمکعب تنظیم شده است و البته می‌تواند تا ۷۰۰۰ مترمکعب را نیز جوابگو باشد. در ضمن هوای خروجی از تجهیزاتی که با هوای فشرده کار می‌کنند از جمله لودرهای برگردان تونلی، پیکورها و... به تهویه شبکه تا حدی کمک می‌کند.

در معدن بزرگ طزره برای تهویه تونل اصلی از دو دستگاه بادبزن مدل VOD-21 استفاده شده است. بدین منظور ساختمانی مجزا در حدود ۵۰ متری ورودی تونل احداث شده است که در آن دو دستگاه

ونتیلاتور قرار دارد، که به صورت موازی به کانال اصلی تهویه معدن متصل و یکی از آنها به صورت رزرو و آماده به کار است (شکل ۳-۳). البته برای کم کردن فشار وارده بر روی ونتیلاتورها آنها را به صورت متناوب استفاده می کنند، زیرا با استفاده نوبتی (هر شیفت یکی) و سرویس مجدد در هر نوبت، فرسایش قطعات به حداقل خواهد رسید.



شکل ۳-۳ - اتاق ونتیلاتورهای معدن بزرگ طزره

ونتیلاتورهای مربوطه با برق ۶۰۰ ولت کار می کنند. این دستگاهها دارای دو پره می باشند و چون به صورت سری هستند، یکی از آنها متحرک بوده و کار انتقال هوا را بر عهده دارد و دیگری ثابت که فقط با باز و بسته شدن پره ها فشار هوای تولیدی را کنترل می کند. به عبارتی با زیاد شدن فشار پره ها باز می شوند و با کم شدن فشار پره ها بسته می شوند تا خلأ ایجاد شده باعث ورود گرد زغال نشود. پره های این ونتیلاتور از نوع محوری می باشند و با تغییر زاویه در این پره ها می توان میزان هوای انتقالی را تغییر داد. همچنین برای جلوگیری از انتقال آتش در مواقع آتش سوزی درهایی به ابعاد ۳×۳ متر به وزن ۳ الی ۳۵ تن با ضخامت زیاد در مسیر کانال اصلی تهویه هوا قرار داده اند. برای تغییر جهت جریان هوا (دهشی - مکشی) این ونتیلاتورها دو اتاق جداگانه احداث شده است. یکی از این اتاق ها از

هوای آزاد تغذیه می کند و برای تابستان کاربرد داشته ولی در اتاق دیگر، مسیر ورودی هوا، ۱۲ رادیاتور بسیار بزرگ قرار دارد که با گردش آب گرم در آن ها هوای عبوری گرم می شود و برای زمستان کاربرد دارد ولی در حال حاضر به علت نقص فنی و عدم امکان تولید آب گرم از مدار خارج شده است.

۳-۲-۳- عملیات استخراج و کندن زغال سنگ

استخراج زغال سنگ در معادن غیرمکانیزه و سنتی با حفر دوپیل از افق پایین به سمت افق بالا شروع می شود. پس از سوراخ شدن دوپیل و اتصال دو افق از طریق آن، حفر و کندن زغال سنگ به طرفین، دوپیل به کارگاه استخراج تبدیل می شود. اگر جهت حرکت جبهه کار زغالی به سمت سینه کار باشد کارگاه استخراج پیشرو و اگر جهت حرکت جبهه کار زغالی به سمت عکس حرکت سینه کار باشد پسرو نام گذاری می شود، اما عملیات کندن و استخراج زغال سنگ برجا توسط تجهیزاتی به نام پیکور هوای فشرده انجام می شود. پیکورها دارای مدل های برقی نیز می باشند که به جهت ممنوعیت استفاده از تجهیزات برقی در معادن زغال سنگ از مدل های کار با هوای فشرده استفاده می شود. پیکورهای هوای فشرده سیستم تقریباً ساده ای دارند که از یک سیلندر چدنی، یک عدد پیستون، دستگیره فرمان، اگزوز، مته فولادی، مته گیر، سوزن، شیر و توپک هواپند تشکیل شده است در (شکل ۳-۴) نمونه ای از پیکور مدل A7 و پرفراتور ۱۴ کیلویی در معدن بزرگ طزره نشان داده شده است. پیکورها به جهت ساختمان ساده ای که دارند به راحتی در ابتدای هر پست نظافت و رفع گیر می شوند. عملکرد پیکورهای هوای فشرده به این صورت است که پس از اتصال شیلنگ هوای فشرده به شیر هوای دستگاه، هوای فشرده پشت توپک محبوس شده و با فشار دستگیره فرمان سوزن پوپک را جابه جا و هوای فشرده وارد سیلندر چدنی شده و به پیستون فشار می آورد و آن را به سمت انتها هدایت می کند و با ضربه پیستون به مته، سبب حرکت مته می شود. با حرکت پیستون به سمت

انتهای سیلندر در قسمت اگزوز هوای فشرده خارج شده و مجدداً پیستون به سمت بالابر می گردد
تکرار این عمل باعث ضربات متوالی پیکور می گردد.



شکل ۳-۴- نمونه ای از پیکور مدل A7 و پرفراتور ۱۴ کیلویی در معدن بزرگ طزره

سیکل تولید پس از کنده شدن زغال سنگ از دیواره جبهه کار با انتقال مواد معدنی به سمت بونکر
(توسط نیروی ثقلی مواد و در جهت شیب واقعی لایه) ادامه می یابد و پس از تخلیه بونکر کارگران
نصب ستون ها و جرزه های چوبی نگهداری کارگاه را تأمین می کنند.

۳-۲-۴- سیستم ترابری معدن

زغال سنگ استخراج شده پس از جمع شدن درون بونکرهای کارگاه استخراج در واگن های فلزی
(موسوم به واگن های ۷۰۰ لیتری) بارگیری و توسط دستگاه هایی از قبیل لکوموتیوهای برقی روسی،
نوار نقاله های لاستیکی، بالابرهای تونلی (وینچ) به خارج معدن منتقل می شود. در ادامه تجهیزات
ناوگان ترابری به تفکیک توضیح داده شده است.

۳-۲-۴-۱- بالابرهای تونلی (وینچ ها)

در اکلن ها و مسیرهای شیب دار برای بالا آوردن واگن های سنگ، لیچه و زغال سنگ به دلیل شیب زیاد نمی توان از لکوموتیو استفاده کرد. اینجاست که اهمیت کار وینچ مشخص می شود. در معادن طزره تعداد وینچ های بسیاری وجود دارد اما بزرگ ترین آن ها در معدن بزرگ در مسیر اکلن شماره ۱ یک دستگاه وینچ ۱۶۰۰ است. در تمامی مسیر شیب دار، در فواصل معین و در محل های تغییر مسیر رولیک هایی به منظور حفاظت از سیم قرار دارند. همچنین جهت روان سازی و جلوگیری از فرسایش سریع سیم بکسل، روغن کاری می شود. طول هر دور سیم روی طبلک وینچ ۱۶۰۰، ۵/۵ متر است. سیم ابتدا ۳۰ متر را با شیب ۷۵ درجه به سمت بالا می رود و پس از طی ۷ متر مسیر افقی تا ۴۰۰ متر با شیب اکلن ۲۵ درجه پایین می رود (شکل ۳-۵). قطر سیم این وینچ نباید کمتر از ۲۲ میلی متر گردد و اگر به کمتر از آن کاهش یابد برای قطر سیم کوچک تر مانند وینچ ۱۲۰۰ به کار می رود و این روند برای بقیه وینچ ها نیز صادق است.



شکل ۳-۵- دستگاه وینچ ۱۶۰۰ معدن بزرگ

سیستم خنک کننده دستگاه شامل ۳ تیغه است که بنا بر سرعت وینچ، تیغه‌ها داخل آب فرو می‌روند و برعکس آن هم صادق است. سیستم ترمز هیدرولیکی که شامل دو پمپ روغن و دو جک است. برق این دستگاه توسط چندین موتور ترانس در فاصله ۵۰ متری نصب شده‌اند تأمین می‌گردد و تعدادی پوسکاتیل هم کار تنظیم برق قسمت‌های مختلف را بر عهده دارند. این وینچ می‌تواند ۳ واگن سنگ و ۴ واگن زغال را بالا بکشد.

۳-۲-۴-۲- دستگاه نوار نقاله

نوار نقاله معدن بزرگ از نوع نوارهای تسمه‌ای است که از یک نوار قابل انحناء، دو موتور متحرک، شاسی نوار، رولیک‌های نگه‌دارنده بالا و پایین و تجهیزات کشنده نوار تشکیل شده است. قسمت بالا و پایین نوار به وسیله تکیه‌گاه‌های غلطکی بالایی و پایینی نگاه داشته می‌شود، وزنه‌ای روی تسمه قرار دارد که مرکب از یک دستگاه حمل بار و یک عضو کششی است. این وزنه همراه با تسمه به طرفین طبلیک حرکت می‌کند وقتی که تسمه از روی طبلیک عبور می‌کند وزنه از روی نوار نقاله پایین می‌افتد. تسمه به واسطه نیروی اصطکاکی مابین تسمه و طبلیک متحرک می‌چرخد، به منظور افزودن سطح تماس نوار نقاله‌ای که دارای یک طبلیک متحرک است طبلیک هرز گرد بکار برده می‌شود. در حال حاضر نوار نقاله‌های زیرزمینی مجهز به دو طبلیک متحرک می‌باشند. نوار نقاله‌های تسمه‌ای معمولاً در کارگاه‌های میانی، راهروهای اصلی، راهروهای شیب‌دار و نیز کارگاه‌های شیب‌دار بکار می‌رود. بکار بردن نوار نقاله‌ی تسمه‌ای در معادن صنعتی مخصوصاً در معادنی که مسافت حمل و نقل مواد معدنی زیاد می‌باشد سودمند است.

طبقه‌بندی نوار نقاله‌های تسمه‌ای:

- بر حسب محل تسمه فعال:

۱- نوار نقاله با تسمه فعال بالا

۲- نوار نقاله با تسمه فعال پایین

۳- نوار نقاله با دو تسمه فعال که به صورت صفحه افقی قرار دارند

- بر حسب شکل تسمه:

۱- نوار نقاله با تسمه پهن

۲- نوار نقاله با تسمه ناوک دار

- بر حسب نوع تسمه:

۱- نوار نقاله با تسمه لاستیکی نرم

۲- نوار نقاله با تسمه لاستیکی موج دار

۳- نوار نقاله با تسمه فولادی یکپارچه

۴- نوار نقاله با تسمه فولادی شبکه دار

- از نظر انجام کار:

۱- نوار نقاله های معادن افقی

۲- نوار نقاله های مسیرهای شیب دار

در معدن بزرگ طزره از نوار نقاله نوع مدل KA-150 استفاده شده است، این نوار نقاله دارای طبلک های متحرک دوجانبه است. موتورهای الکتریکی فلانژدار آنها از طریق کلاچ توربینی هیدرولیکی به گیربکس سه مرحله ای متصل می گردد. برای کار کردن موتور این نوار نقاله ها ترمز و آهنربای الکتریکی طراحی شده است و زمان کار کردن در راهروهای شیب دار دارای دستگاه متوقف کننده تسمه می باشند. این نوع نوار نقاله مجهز به یک دستگاه مکانیکی برای تمیز کردن می باشند. در جدول (۳-۱) برخی اطلاعات فنی و کاربردی نوار نقاله KA-150 بیان شده است. لازم به ذکر است با توجه به کاهش تولید زغال در سال های اخیر نوار نقاله معدن بزرگ با حداقل توان ممکن در حال کار

می باشد. در شکل (۳-۶) نمایی از نوار نقاله های مدل KA-150 و نحوه اتصال سری دو نوار دیده می شود.

جدول ۳-۱ اطلاعات فنی نوار نقاله مدل KA-150 معدن بزرگ:

مشخصات	پارامترها
راندمان متوسط زغال (تن بر ساعت)	۱۵۰
زاویه نصب نوار نقاله (درجه)	۰ - ۱۸
طول نوار نقاله باراندمان متوسط (متر)	۱۰۰ - ۱۵۰
سرعت تسمه (متر بر ثانیه)	۱/۸۷



شکل ۳-۶ نمایی از نوارهای نقاله معدن بزرگ طزره

۳-۲-۴-۳- لکوموتیوهای برقی معدن بزرگ

لکوموتیو ضد انفجار با باتری مخصوص مدل CDXT-5 یکی از تجهیزات کلیدی جهت حمل بار در معادن دارای متان بالا و ذرات زغال سنگ قابل انفجار است. از آن برای کشیدن و حمل و نقل مواد معدنی، سنگ، باطله و نیز جابجایی افراد استفاده می شود.

مشخصات لکوموتیو:

الف: مشخصات ابعادی:

فاصله خطوط ریلی (مرکز به مرکز دوریل)	۶۰۰ میلی متر
طول شافت چرخ	۹۰۰ میلی متر
قطر چرخ	۵۲۰ میلی متر
حداقل شعاع ریل سرپیچ ها	۶/۵ متر
حداقل فاصله بدنه از زمین	۶۰ میلی متر
ابعاد دستگاه	(ارتفاع = ۱۵۵۰ میلی متر، عرض = ۹۹۴ میلی متر، طول = ۳۲۲۵ میلی متر)

ب: مشخصات کششی

وزن خالص:	۵ تن
قدرت کشش:	۷۲۴۰ نیوتن
سرعت میانگین:	۷ کیلومتر بر ساعت
در شکل (۳-۷) یکی از لکوموتیوهای روسی ۵ تن فعال در معدن بزرگ طزره دیده میشود.	
لکوموتیوهای برقی چنانچه از نظر فنی و سیستم برقی دچار نقص شوند جهت تعمیر به کارگاه فنی معدن منتقل شده و از تعمیرات آنها در داخل تونل جلوگیری می شود.	

ج: مواردی که در زمان کار با دستگاه باید مد نظر باشد (در طی هر شیفت):

- ۱- کنترل اجزاء برقی و مکانیکی قبل از حرکت
- ۲- بازدید اتصالات برقی، باتری‌ها و محافظ‌های لاستیکی
- ۳- لکوموتیو با کمترین سرعت ممکنه شروع به حرکت کرده و به تدریج سرعت آن اضافه گردد
- ۴- اهرم عملگر باید انعطاف‌پذیر باشد و به درستی عمل نماید
- ۵- لامپ‌ها و دستگاه‌های هشداردهنده باید درست کار کند
- ۶- سیستم نگاه‌دارنده ترمزها به خوبی عمل نماید و سرپیچ‌ها با سرعت مطمئنه حرکت کند
- ۷- درجه حرارت یاتاقان‌ها و بلبرینگ‌ها کنترل و از ۶۰ درجه تجاوز ننماید
- ۸- هیچ‌گونه نشتی و یا لقی در باتری‌ها و سایر قطعات مجاز نیست



شکل ۳-۷ نمایی از لکوموتیوهای معدن بزرگ طزره

۳-۳- مسیرهای ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره

۳-۳-۱- مسیر A

مسیر A از افق ۲۲۴۰+ و دهانه ورودی معدن شروع و پس عبور از اکلن نوار تا زیر کارگاه K12 افق ۲۱۷۵+ ادامه دارد. تجهیزات این مسیر شامل لکوموتیو شماره ۱، نوار نقاله شماره ۱، نوار نقاله شماره ۲ و لکوموتیو شماره ۴ است که با یک ترکیب سری ترابری و حمل مواد معدنی تا خارج معدن را بر عهده دارند.

۳-۳-۲- مسیر B

مسیر B از افق ۲۲۴۰+ و دهانه ورودی معدن شروع و پس عبور از اکلن وینچ تا زیر کارگاه P10 افق ۲۱۱۰+ ادامه دارد. تجهیزات این مسیر شامل لکوموتیو شماره ۲، وینچ ۱۶۰۰ روسی و لکوموتیو شماره ۴ می باشد که با یک ترکیب سری ترابری و حمل مواد معدنی تا خارج معدن را بر عهده دارند.

۳-۳-۳- مسیر C

مسیر C از افق ۲۲۴۰+ و دهانه ورودی معدن شروع تا زیر کارگاه K12 افق ۲۲۴۰+ ادامه دارد. تجهیزات این مسیر فقط لکوموتیو شماره ۳ می باشد که امر ترابری و حمل مواد معدنی تا خارج معدن را بر عهده دارد.

۳-۴- نتیجه گیری

چنانچه در شکل (۳-۱) و شکل (۳-۲) دیده می شود هر یک از مسیرهای A، B و C دارای ماشین آلاتی هستند که با ترکیب سری در حال کار بوده و در نهایت سه مسیر باهم ترکیب موازی دارند. پس برای مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری تونل بزرگ ابتدا قابلیت اطمینان و نرخ

خرابی هر دستگاه محاسبه و پس از آن قابلیت اطمینان هر مسیر و درنهایت قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری معدن محاسبه خواهد شد.

فصل چهارم

مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان

سیستم تولید، معدن بزرگ طزره

۴-۱- مقدمه

تعیین زیرسیستم‌های عملیات تولید و استخراج مواد معدنی در معادن، مرحله مهمی از مطالعه قابلیت اطمینان آن است. عملکرد کلی یک سیستم ترکیبی متشکل از چند جزء، نتیجه ترکیب و برآیند عملکرد بخش‌های مختلف آن است و بنابراین قابلیت اطمینان سیستم تولید نیز از ترکیب قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های آن قابل محاسبه است. تعیین زیرسیستم‌های عملیات تولید ماده معدنی نیازمند شناخت کامل بخش‌های مختلف، تسلط کامل بر طراحی سیستم تولید، آشنایی با نحوه ایجاد عملکرد نهایی و نیز شناخت روابط درونی بخش‌های مختلف است. هرگونه ضعف در شناخت اجزای مختلف سیستم تولید، تمامی قضاوت‌ها و محاسبات بعدی را دچار مشکل نموده و باعث بروز خطا می‌شود. اهمیت تعیین زیرسیستم‌های مناسب در تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد آن، تعمیر و نگهداری و مدیریت ماشین‌آلات نیز به شدت به نحوه تعیین زیرسیستم‌های مجموعه وابسته است. برنامه‌ریزی صحیح و پویا برای ارتقاء عملکرد و بهبود قابلیت اطمینان، معمولاً بر اساس زیرسیستم‌های دستگاه و رفتار خرابی آن‌ها انجام می‌شود. لذا، تعیین مناسب و دقیق زیرسیستم‌ها، زمینه‌ساز تحلیل و مدیریت مناسب دستگاه است.

در این فصل، برای اولین بار زیرسیستم های عملیاتی تولید زغال سنگ در تونل بزرگ طزره با استفاده از مشخصات فنی دستگاه ها و تجهیزات مرتبط با تولید زغال سنگ به روش زیرزمینی و با تکیه بر تحلیل رفتار هر یک از دستگاه های موجود از جمله عملکرد دستگاه های تولید هوای فشرده، سیستم تهویه و ترقیق گاز و گرد و غبار، استخراج و کندن زغال سنگ و سیستم ترابری در معدن تعیین شده و سپس وظیفه هر بخش و ارتباطات داخلی زیرسیستم های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار خواهند گرفت. با توجه به اینکه در این مقاله هدف مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید، تجهیزات و ماشین آلات آن است لذا در ادامه بحث بجای واژه زیرسیستم از کلمه ماشین و بجای تعمیرات دوره ای از سرویس دوره ای استفاده خواهد شد.

۴-۲- قابلیت اطمینان تجهیزات تولید هوای فشرده

در معدن بزرگ طزره تعداد چهار دستگاه کمپرسور اینگرسولند مدل SSR-ML-350 وجود دارد که هر دستگاه قادر به تولید ۶۰ مترمکعب در دقیقه، هوای فشرده است. در حال حاضر با محاسبات انجام شده توسط دفتر فنی معدن، هوای فشرده مصرفی مورد نیاز شبکه تونلی ۹۰ مترمکعب در دقیقه است. با توجه به نیاز فعلی معدن دو دستگاه در حال کار و دو دستگاه به حالت رزرو است. برای جلوگیری از فرسودگی و خرابی برخی قطعات چهار دستگاه، هر یک به حالت چرخشی وارد مدار تولید هوای فشرده می شوند. طی بررسی های انجام شده و نیز مطالعه سوابق ۱۰ سال گذشته، در این معدن حتی در زمان سرویس های دوره ای توقفی در سیستم تولید هوای فشرده ثبت نشده است، لذا در معدن بزرگ در بحث تولید هوای فشرده احتمال توقف و خرابی بسیار کم و قابلیت اطمینان به میزان ۱۰۰٪ در نظر گرفته می شود.

۴-۳- قابلیت اطمینان سیستم تهویه شبکه زیرزمینی

معدن بزرگ طزره با داشتن حدود ۱۰۰۰۰ متر شبکه تونل زیرزمینی از جمله معادن مهم شرکت البرز شرقی است که سیستم تهویه این تونل مجهز به دو دستگاه ونتیلاتور روسی VOD-۲۱ بوده که

به صورت موازی به کانال تهویه معدن متصل هستند. از دو دستگاه ونتیلاتور موجود در اتاق تهویه یک دستگاه به حال رزرو و دستگاه دیگر به صورت ۲۴ ساعته در حال کار است. به جهت قدمت این تونل، وجود کارگاه های استخراج قدیمی و مسدود کردن حفرات تخریبی، تهویه کل شبکه معدنی باراندمان کار ۳۰ تا ۴۰ درصدی تنها با یک دستگاه ونتیلاتور فعال تأمین می شود. با توجه به بررسی های انجام شده و مطالعه سوابق خرابی ونتیلاتورهای VOD-21 در سال های اخیر، و نیز به جهت کاربری چرخشی از آن ها و نیز وجود یک دستگاه رزرو احتمال توقف و خرابی همزمان دو دستگاه بسیار کم و می توان قابلیت اطمینان تجهیزات سیستم تهویه را به میزان ۱۰۰٪ در نظر گرفت، اما در بخش تهویه موضعی برای دویل های فعال و سینه کارها به جهت کاهش فعالیت های معدنی در چند سال اخیر و وجود دستگاه های تهویه موضعی زیاد در انبار فنی معدن به محض بروز کوچک ترین نقص در هریک از ونتیلاتور های موضعی تعویض انجام شده و لذا در این بخش نیز قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ است.

۴-۴- قابلیت اطمینان تجهیزات استخراج و کندن زغال سنگ

در معادن زغال سنگ زیرزمینی نیمه مکانیزه و سنتی پیکور هوای فشرده از جمله مهم ترین و رایج ترین تجهیزات در مجموعه عملیات معدنکاری شامل استخراج و کندن زغال سنگ، پیشروی، آماده سازی، تعمیرات تونلی و... محسوب می شود. در سال های اخیر شرکت های ساخت تجهیزات معدنی مدل های مختلفی از پیکورهای هوای فشرده را به بازار عرضه نموده اند که در این میان پیکور مدل A7 از جمله قدیمی ترین و پرکاربرد ترین مدل ها است. این پیکور به جهت ساختمان ساده و قیمت مناسب با استقبال زیادی روبه رو است، از طرفی وسعت شبکه تونلی و طولانی بودن مسیرهای فعلی در معدن بزرگ طزره سبب برخی مشکلات بوده که می توان به نقص و خرابی دستگاه ها اشاره نمود. مدیران معادن با به کارگیری تمهیدات لازم در خصوص تأمین و تهیه برخی تجهیزات معدنکاری کم قیمت برای کارگران این امور را تسهیل بخشیده اند، از آن جمله برای تمامی کارگاه های استخراج تعداد ۲ تا ۳ عدد پیکور اختصاص داده اند که در زمان خرابی و هرگونه نقص سریعاً جایگزینی انجام شود و نیاز به مراجعه کارگران جهت رفع نقص و یا تهیه پیکور از بیرون معدن نباشد. با این حال

مسئول و تعمیرکار این بخش با سرکشی دائم در مسیرها تونلی احتمال بروز توقف تولید ناشی از خرابی این دستگاهها را کاهش می دهد. با مطالعه و بررسی سنوات گذشته در چند سال اخیر موردی در خصوص توقف سیستم تولید ناشی از خرابی و نقص این دستگاه مشاهده نشده است لذا قابلیت اطمینان تجهیزات کندن و استخراج زغال برابر ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- قابلیت اطمینان سیستم ترابری

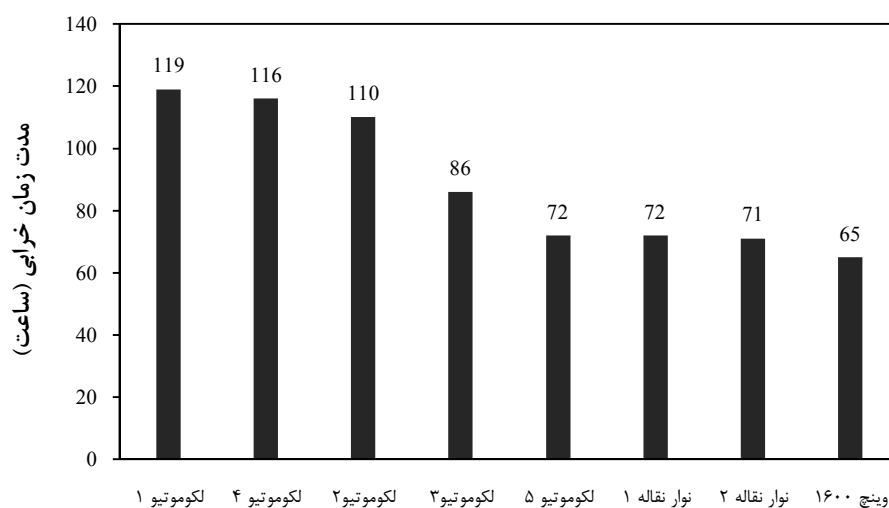
۴-۵-۱- داده های خرابی ماشین

داده های خرابی مهم ترین ابزار در تحلیل قابلیت اطمینان هستند. در این تحقیق، جهت جمع آوری اطلاعات مربوط به خرابی هر یک از دستگاهها، دفاتر یادداشتی با متن اطلاعات مورد نیاز از جمله: تاریخ و زمان خرابی، شکل و نوع خرابی، ساعت شروع و اعلام خرابی، مدت زمان خرابی و تعمیر در اختیار تعمیرگاه معدن قرار داده شد و پس از توجیه سرپرستان کارگاه های ذی ربط اطلاعات مربوطه به مدت ۷ ماه فعالیت معدن، از ابتدای اسفند ماه ۱۳۹۳ تا آخر شهریور ۱۳۹۴، ثبت شده است. نمونه ای از فرم جمع آوری داده های خرابی در جدول (۴-۱) آورده شده است.

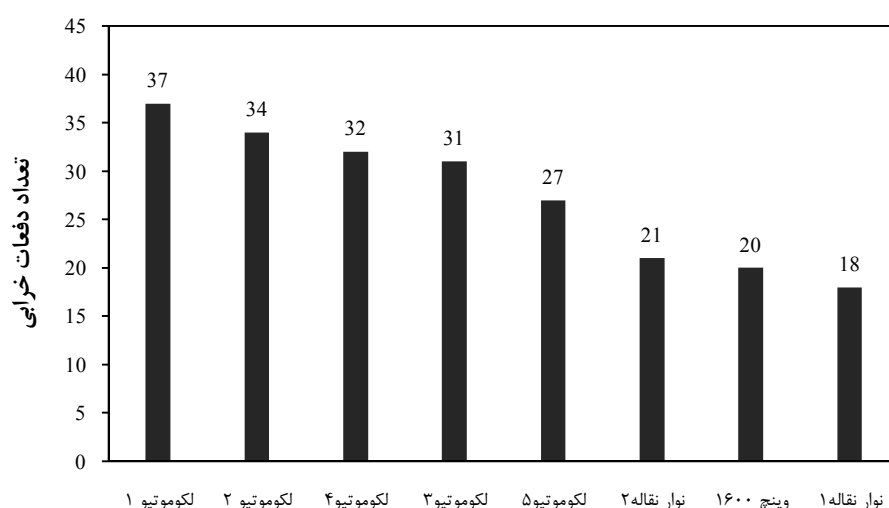
ردیف	تاریخ	دپارتمان	عیب و علت توقف دستگاه	شیفت ۱			زمان بین دو توقف TBF
				زمان شروع توقف	مدت زمان توقف TTR	زمان شروع به کار	
۱	۱۳۹۳/۱۲/۲	تعمیرات فنی و مکانیک	تعویض واسکازین چرخ جلو	۱۲	۱	۱۳	
۲	۱۳۹۳/۱۲/۵	بازدید و سرویس دوره ای	سرویس کاری و بازدید جعبه باطری	۸/۵	۲/۵	۱۱	۲۵/۵
۳	۱۳۹۳/۱۲/۷	تعمیرات سیستم برقی	قطع بست باطری	۹/۵	۰/۵	۱۰	۱۸/۵
۴	۱۳۹۳/۱۲/۱۱	تعمیرات فنی و مکانیک	تعویض دستگیره	۸	۵	۱۳	۳۹
۵	۱۳۹۳/۱۲/۱۴	بازدید و سرویس دوره ای	سرویس کاری و بازدید جعبه باطری	۹	۲	۱۱	۲۷
۶	۱۳۹۳/۱۲/۲۰	تعمیرات فنی و مکانیک	جوشکاری و تراشکاری چرخ جلو	۸	۵	۱۳	۵۰
۷	۱۳۹۳/۱۲/۲۱	تعمیرات فنی و مکانیک	جوشکاری و تراشکاری چرخ جلو	۸	۵	۱۳	۵
۸	۱۳۹۳/۱۲/۲۳	تعمیرات سیستم برقی	تعویض مفت باطری	۸	۱	۹	۱۲

در معدن بزرگ روزانه دو شیفت کاری وجود دارد. شیفت یک از ساعت ۸ صبح شروع و در ساعت ۱۳ خاتمه می یابد و شیفت ۲ از ساعت ۱۶ شروع و در ساعت ۲۱ خاتمه می یابد لازم به ذکر است در محاسبه زمان بین خرابی زمان هایی مانند شیفت ۳ که معدن تعطیل است از زمان بین خرابی ها کسر شده است. بیشتر فعالیت های انجام شده در این مرحله شامل بررسی و جداسازی اطلاعات هر یک از ماشین ها، و نیز تفکیک داده های خرابی مربوط به هر یک از ماشین ها، تعیین زمان بین خرابی ها (TBF) و زمان برای تعمیر (TTR)، هر ماشین بوده است.

به منظور تعیین بحرانی ترین ماشین، هر یک از مسیرهای ترابری معدن از تحلیل پارتو استفاده شده است. با توجه به این روش، پس از جمع آوری و طبقه بندی داده های خرابی، درصد خرابی هر ماشین، مربوط به مسیرهای معدن نسبت به تمام خرابی ها محاسبه شده و نمودار ستونی فراوانی خرابی ماشین آلات، به ترتیب از بیشترین مقدار فراوانی به کمترین مقدار به حالت نزولی رسم شده است. به این ترتیب امکان تعیین بحرانی ترین ماشین وجود خواهد داشت. نمودار ستونی تحلیل پارتو برای کل ماشین های ترابری تونل بزرگ در شکل (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نمودار پارتو خرابی کل سیستم ترابری تونل بزرگ برحسب مدت زمان خرابی



شکل ۴-۲ نمودار پارتو خرابی کل سیستم ترابری تونل بزرگ بر حسب تعداد دفعات خرابی

۴-۵-۲- روند تحلیل خرابی و مدل سازی قابلیت اطمینان ماشین ها

در تحلیل قابلیت اطمینان هر ماشین از روند نمای ارائه شده در شکل (۲-۵) استفاده شده است.

جزئیات مراحل مدل سازی در ادامه توضیح داده می شود:

الف) ارائه داده های خرابی برای هر ماشین

خرابی های هر ماشین به ترتیب وقوع مرتب و زمان های بین خرابی (TBF) و زمان تعمیر هر یک از

خرابی ها (TTR) محاسبه می شود.

ب) آزمون های مستقل و مانا بودن داده ها

آزمون های روند و همبستگی سری به صورت گرافیکی و تحلیلی، بر روی داده ها انجام شده و با توجه به

نتایج، بهترین روش مدل سازی قابلیت اطمینان انتخاب می شود.

ج) تحلیل داده ها

در این قسمت، محاسبات مربوط به تعیین بهترین تابع چگالی احتمال خرابی و تخمین پارامترهای

مدل بر روی داده ها انجام شده، و با توجه به شرایط و تعداد داده های مورد استفاده، از روش

کلموگروف-اسمیرنوف برای انتخاب بهترین تابع چگالی خرابی استفاده می شود. همچنین، تطابق

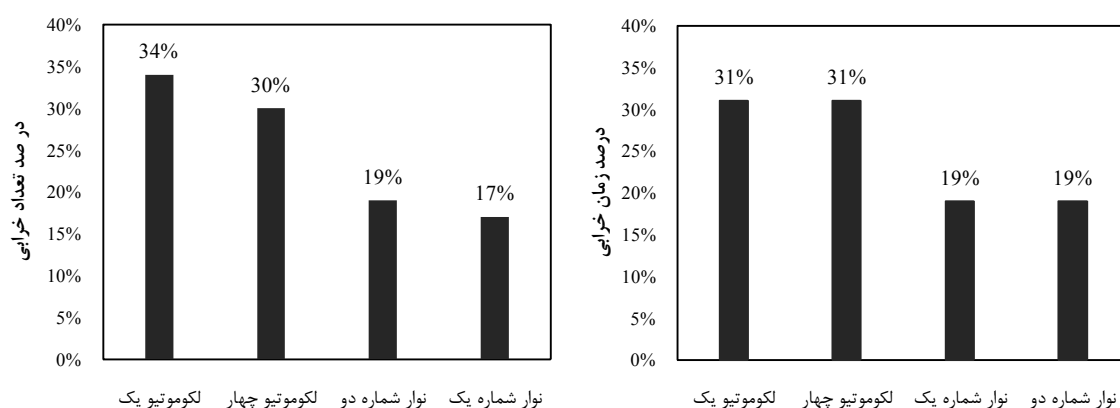
ظاهری توابع مورد بررسی با هیستوگرام داده‌ها و نیز نمودار P-P (برای کنترل اختلاف احتمال پیش‌بینی شده با تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی)، به‌عنوان شاخص‌های کمکی، برای انتخاب بهترین توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماری Easyfit-5.5 (MathWave, 2010) استفاده می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار امکان برازش بهترین تابع توزیع بر داده‌های خرابی وجود دارد. گرچه درمجموع تعداد ۶۳ توزیع آماری در این نرم‌افزارها مورد بررسی قرار می‌گیرند، با این حال در این تحقیق فقط شش تابع اصلی شامل توابع نمایی، گاما، گامای تعمیم‌یافته، لاگ‌نرمال، وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری به‌عنوان توابع شناخته‌شده و پرکاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

د) محاسبه و ترسیم مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی:

در این مرحله تابع قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی محاسبه و منحنی‌های آن‌ها رسم شده، سپس منحنی‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به‌دست‌آمده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته، در ادامه به مدل‌سازی قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های سیستم ترابری به‌صورت مجزا پرداخته شده است.

۴-۶- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر A

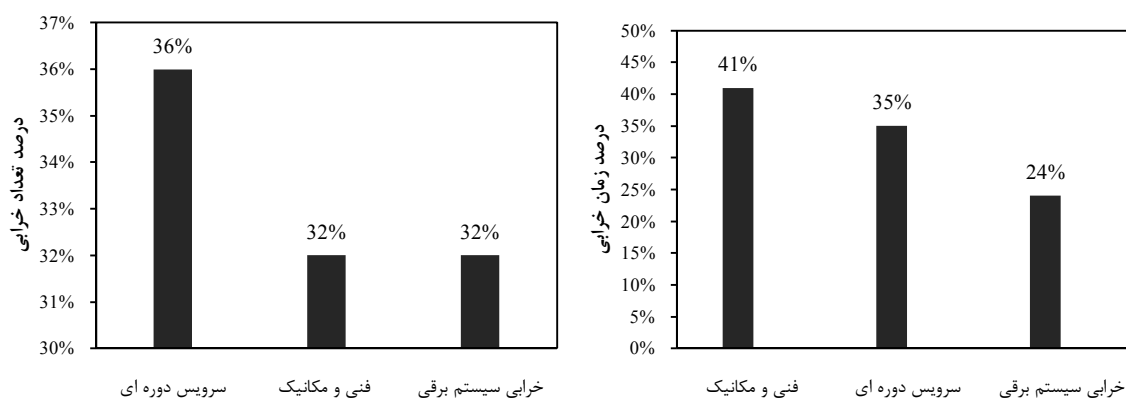
نمودار ستونی تحلیل پارتو، برای سیستم ترابری مسیر A در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-۴)، لکوموتیو شماره یک با بیشترین فراوانی زمان خرابی و تعداد خرابی در مسیر A بحرانی‌ترین ماشین محسوب شده است؛ و نوار شماره یک کمترین فراوانی زمان خرابی و تعداد خرابی را در مسیر A داراست.



شکل ۴-۳ نمودار پارتو خرابی برای ماشین های مسیر A

۴-۶-۱- مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱

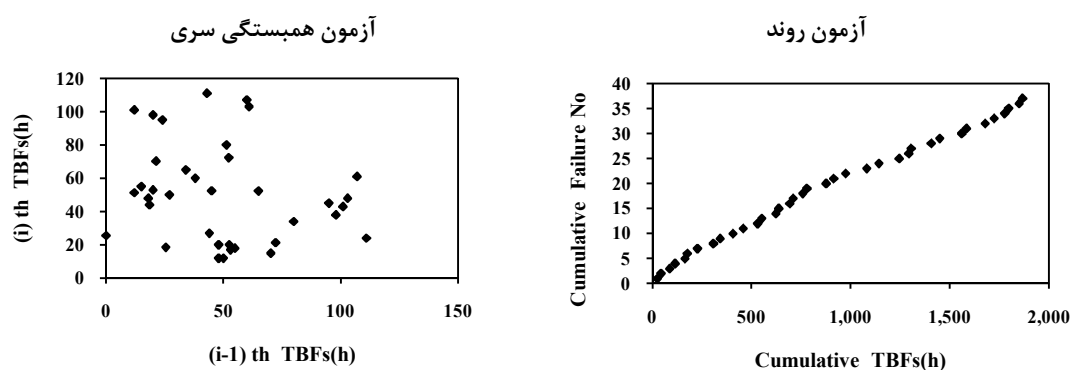
همان طور که در شکل (۴-۴) نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۱ دیده می شود بالاترین نرخ زمان خرابی مربوط به نقص قسمت فنی و مکانیک این دستگاه است اما از نظر تعداد دفعات توقف دستگاه، تعمیرات و سرویس دوره ای بالاترین نرخ را به خود اختصاص داده است.



شکل ۴-۴ نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۱

۴-۶-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده ها

ابتدا داده های خرابی لکوموتیو شماره ۱ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده ها، آزمون های گرافیکی و تحلیلی به طور همزمان بر روی داده ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۵) و جدول (۴-۲) ارائه شده است.



شکل ۴-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱

جدول ۴-۲- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱

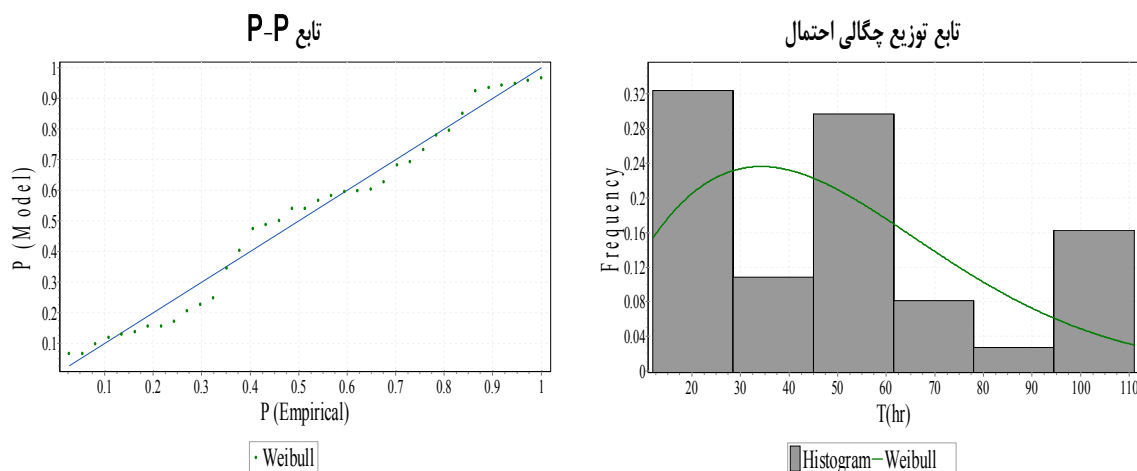
نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
لکوموتیو ۱	۳۷	۷۲	۶۷/۶۵	$U > ۵۳/۴۶$	فرایند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند در روش گرافیکی شکل (۴-۵)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی نیز با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی ۵۳/۴۶، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۲). در آزمون همبستگی سری نیز شکل (۴-۵)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج به دست آمده از آزمون‌های روند و همبستگی سری دلیل بر درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱، فرایند تجدید شونده است.

۴-۶-۱-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال

پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱، طبق شکل (۴-۶) و با توجه به مقدار بدست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، $0/0945$ و نیز مقدار میانگین واقعی $50/49$ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است (پیوست ۱: شکل ۱ و شکل ۲). همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. حال با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱، در نظر گرفته شده است. مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، وایبول دو پارامتری $\alpha = 1/7536$ ، $\beta = 55/438$ ، $\gamma = 0$ و مقدار میانگین تابع $49/368$ است.

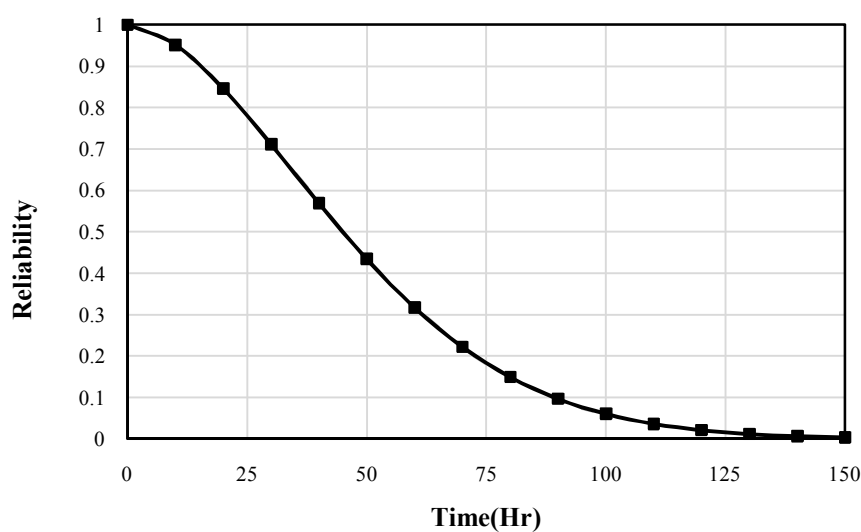


شکل ۴-۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۱، به صورت روابط (۴-۱) و (۴-۲) در زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) آورده شده است.

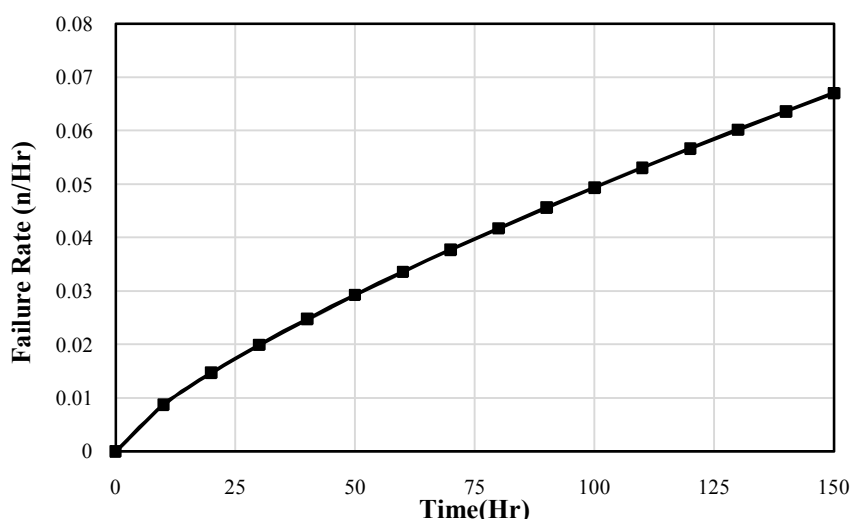
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{55.43}\right)^{1.75}\right) \quad (۱-۴)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0316 \left(\frac{t}{55.43}\right)^{0.75} \quad (۲-۴)$$



شکل ۴-۷- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۷) نشان می دهد که قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱ پس از حدود ۱۵۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب متوسط کاهش می یابد و پس از ۲۳ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۱، پس از حدود ۴۵ ساعت به نصف کاهش می یابد.



شکل ۴-۸- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۸)، لکوموتیو شماره ۱ دارای رفتار خرابی روبه زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۲۰ ساعت (پس از سه شیفت کاری)، با سرعت متوسط افزایش یافته و به مقدار ۰/۰۱۴ رسیده است. با گذشت حدود ۱۵۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۲۰۰۰ ساعت به مقدار ۰/۰۴۷ می‌رسد. بر اساس این منحنی، لکوموتیو شماره ۱ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۶-۲- مدل سازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱

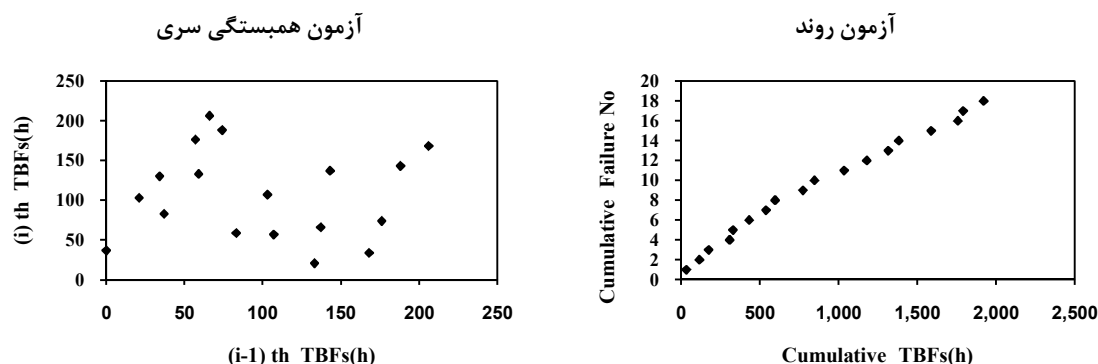
همان طور که در شکل (۴-۹) نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۱ دیده می‌شود، بالاترین نرخ مدت زمان خرابی و تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به خرابی قسمت فنی و مکانیک نوار شماره ۱ است.



شکل ۴-۹ نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۱

۴-۶-۲-۱-آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

ابتدا داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۱ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده‌ها، آزمون‌های گرافیکی و تحلیلی به طور همزمان بر روی داده‌ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۱۰) و جدول (۴-۳) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۰-آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها نوار نقاله شماره ۱

جدول ۴-۳- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۱

نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
نوار شماره ۱	۱۸	۳۴	۲۶/۱۲	$U > ۲۱/۶۶$	فرایند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۱۰)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک

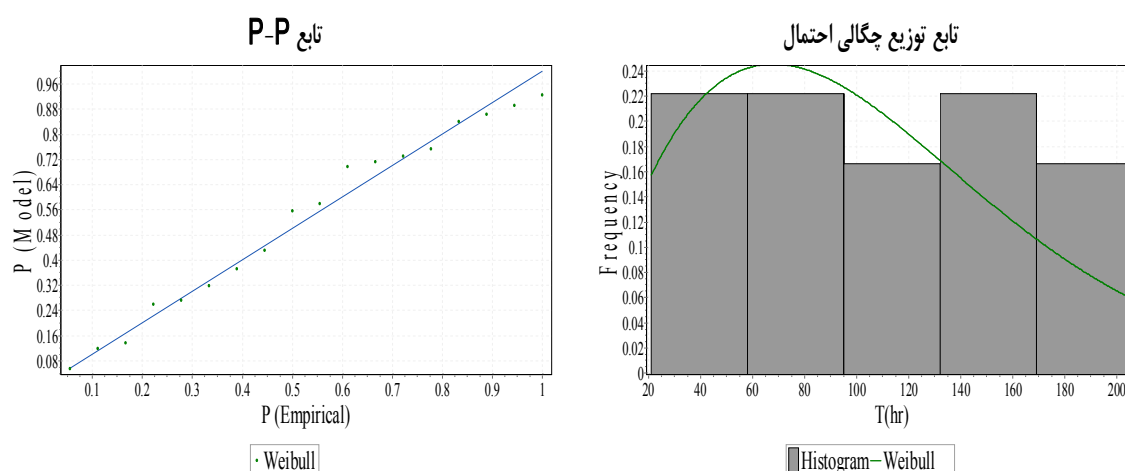
بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ تر بودن

مقدار U از شاخص بحرانی $21/66$ ، فرض صفر رد نمی شود جدول (۴-۳). در آزمون همبستگی سری نیز شکل (۴-۱۰)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج به دست آمده از آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱، فرآیند تجدید شونده است.

۴-۶-۲- تحلیل داده ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان های بین خرابی ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پر کاربرد شرح داده شده، با داده های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده های خرابی نوار نقاله شماره ۱، طبق شکل (۴-۱۱) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، $0/1413$ و مقدار میانگین واقعی $106/78$ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. حال با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، وایبول دو پارامتری $\alpha = 1/6744$ ، $\beta = 116/95$ ، $\gamma = 0$ و مقدار میانگین تابع $104/46$ است.

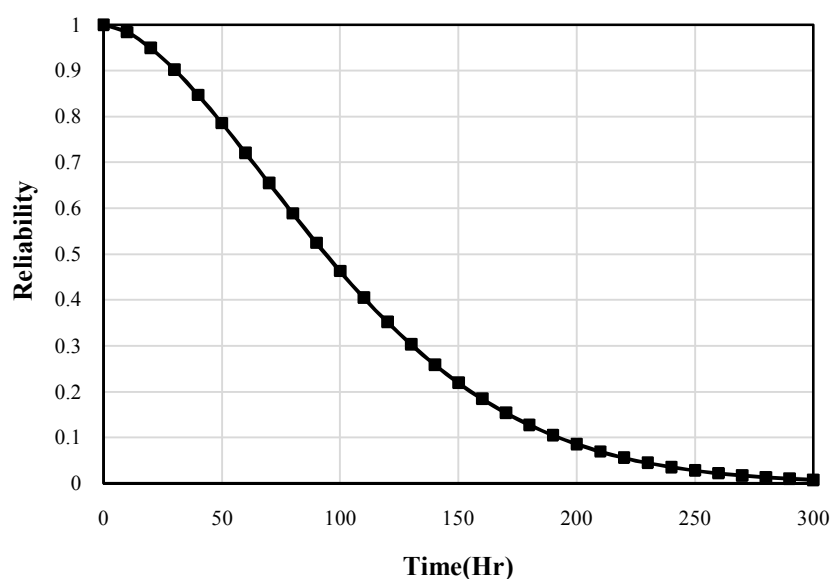


شکل ۴-۱۱- نتایج تحلیل داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۱

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۱، به صورت روابط (۳-۴) و (۴-۴) در زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) آورده شده است.

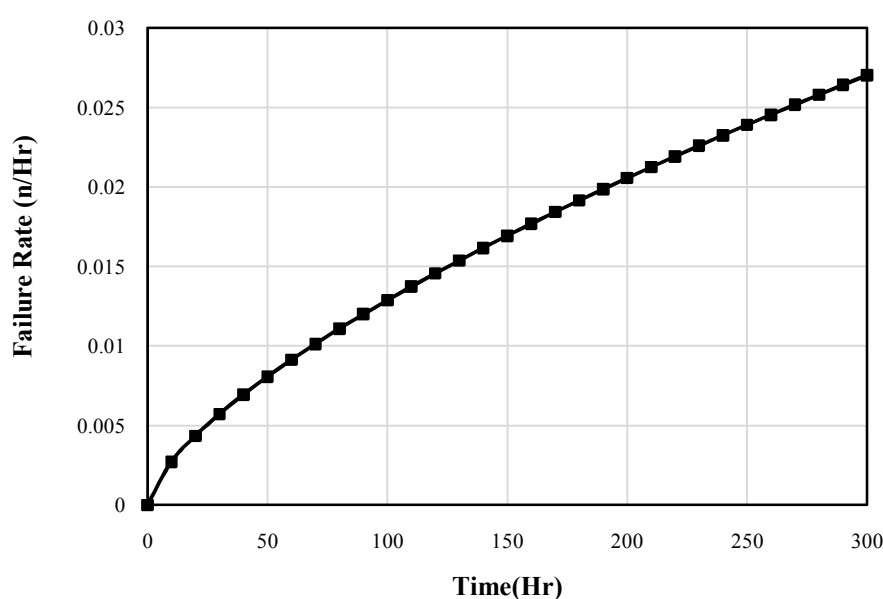
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{116.95}\right)^{1.67}\right) \quad (3-4)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0142 \left(\frac{t}{116.95}\right)^{0.67} \quad (4-4)$$



شکل ۴-۱۲- نمودار قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۱۲) نشان می دهد که قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱ پس از حدود ۳۰۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب متوسط کاهش می یابد و پس از حدود ۴۸ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۱، پس از حدود ۸۴ ساعت به نصف کاهش می یابد.

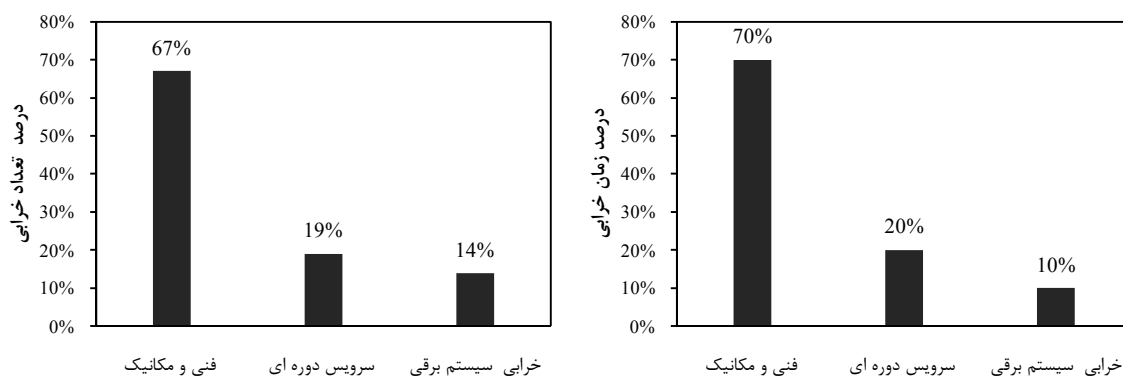


شکل ۴-۱۳- نمودار نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۱۳)، نوار نقاله شماره ۱ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت (پس از اولین شیفت کاری)، با سرعت متوسط افزایش یافته و به مقدار ۰/۰۰۲۷ می رسد. با گذشت حدود ۷۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۲۰۰۰ ساعت به مقدار ۰/۰۹۷ می رسد. بر اساس این منحنی، نوار نقاله شماره ۱ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۶-۳- مدل سازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲

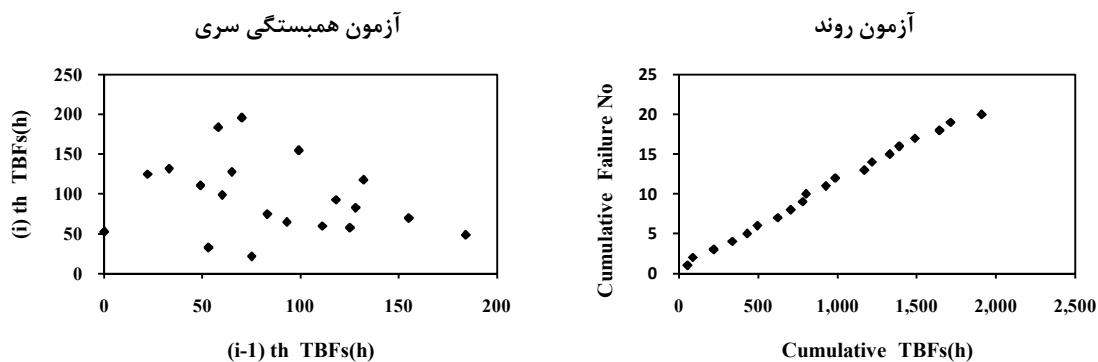
همان طور که در شکل (۴-۱۴) نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۲ دیده می شود بالاترین نرخ مدت زمان خرابی و تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به خرابی قسمت فنی و مکانیک نوار شماره ۲ است.



شکل ۴-۱۴ نمودار پارتو خرابی نوار نقاله شماره ۲

۴-۶-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده ها

ابتدا داده های خرابی نوار نقاله شماره ۲ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده ها، آزمون های گرافیکی و تحلیلی به طور همزمان بر روی داده ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۱۵) و جدول (۴-۴) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۵- آزمون روند و همبستگی سری داده های نوار نقاله شماره ۲

جدول ۴-۴- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۲

نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
نوار شماره ۲	۲۰	۳۸	۳۲/۹۶	$U > ۲۴/۸۸$	فرایند تجدید شونده

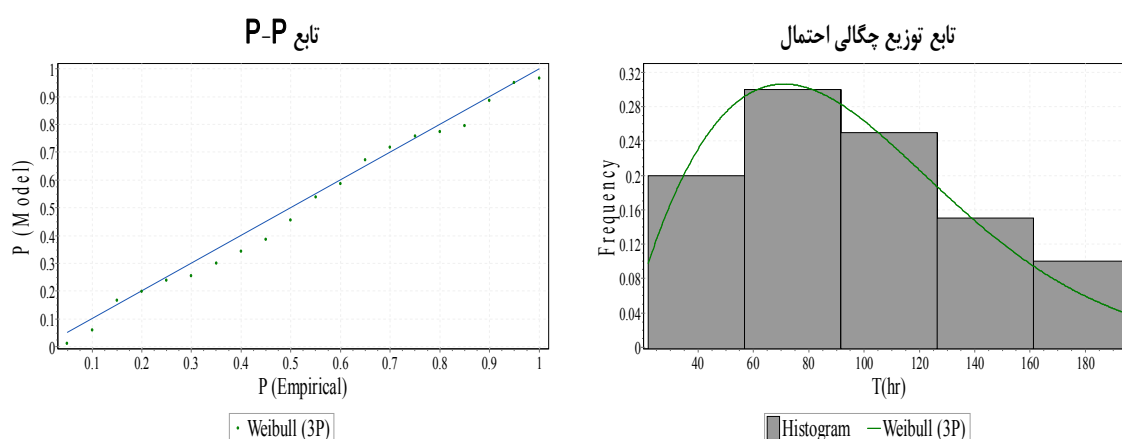
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۱۵)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی ۲۴/۸۸، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۴). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری نیز شکل (۴-۱۵)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان‌دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲، فرایند تجدید شونده است.

۴-۶-۳-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی نوار نقاله شماره ۲، طبق شکل (۴-۱۶) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، ۰/۰۷۲ و مقدار میانگین واقعی ۹۵/۴۵ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط

نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این وجود با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، وایبول ۳ پارامتری $\alpha = 1/7611$ ، $\beta = 90/432$ ، $\gamma = 14/80$ و مقدار میانگین تابع ۹۵/۳۱۴ است.

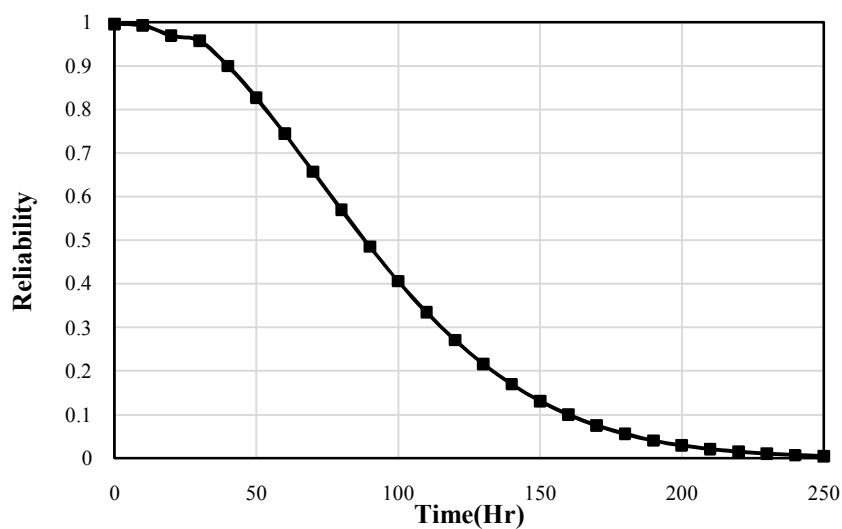


شکل ۴-۱۶- نتایج تحلیل داده های خرابی نوار نقاله شماره ۲

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۲، به صورت روابط (۴-۵) و (۴-۶) زیر ارائه شده است. منحنی های معادل با این روابط به ترتیب در شکل های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) آورده شده است.

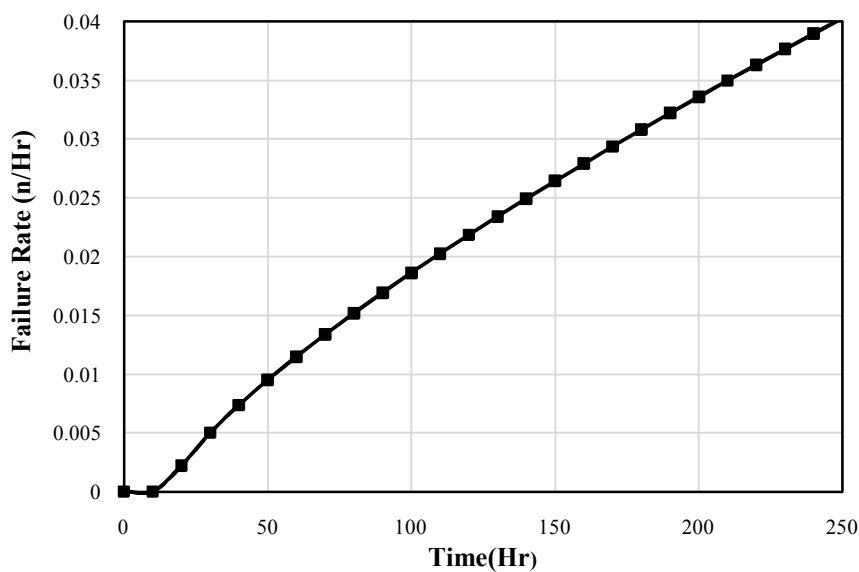
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-14.80}{90.43}\right)^{1.76}\right) \quad (4-5)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0194 \left(\frac{t-14.80}{90.43}\right)^{0.76} \quad (4-6)$$



شکل ۴-۱۷- نمودار قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۱۷) نشان می دهد که قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲ پس از حدود ۲۵۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب متوسط کاهش می یابد و پس از حدود ۵۴ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان نوار نقاله شماره ۲، پس از حدود ۸۸ ساعت به نصف کاهش می یابد



شکل ۴-۱۸- نمودار نرخ خرابی نوار نقاله شماره ۲

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۱۸)، نوار نقاله شماره ۲ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت (پس از اولین شیفت کاری)، همچنان نرخ خرابی صفر بوده است اما پس از گذشت اولین شیفت کاری نرخ خرابی با شیب متوسط افزایش یافته بطوریکه با گذشت ۲۰ ساعت از شروع کار به مقدار ۰/۰۰۲۲ می‌رسد. با گذشت حدود ۷۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک‌روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۲۵۰ ساعت به مقدار ۰/۰۴ می‌رسد. بر اساس این منحنی، نوار نقاله شماره ۲ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۶-۴- مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴

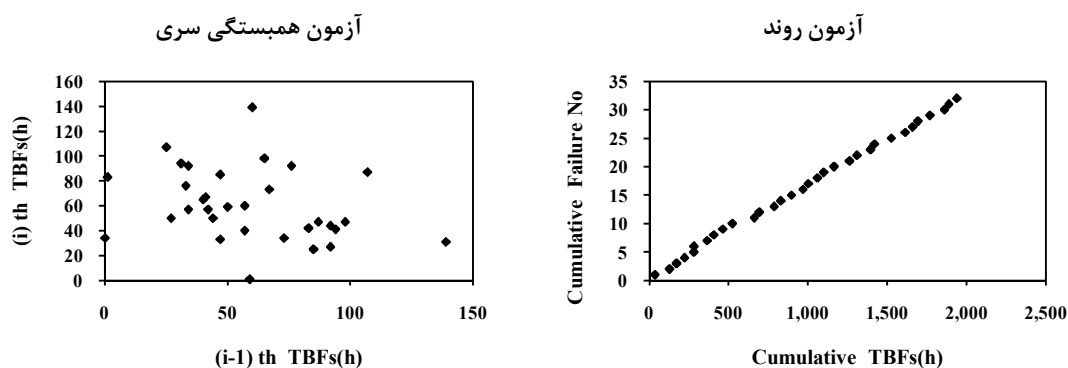
همان‌طور که در شکل (۴-۱۹) نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۴ دیده می‌شود بالاترین نرخ مدت زمان خرابی و تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به خرابی قسمت فنی و مکانیک نوار شماره ۲ است.



شکل ۴-۱۹- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۴

۴-۶-۴-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

ابتدا داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۴ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده‌ها، آزمون‌های گرافیکی و تحلیلی به‌طور همزمان بر روی داده‌ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۲۰) و جدول (۴-۵) ارائه شده است.



شکل ۴-۲۰- آزمون روند و همبستگی سری داده های لکوموتیو شماره ۴

جدول ۴-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی لکوموتیو شماره ۴

نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
لکوموتیو ۴	۳۲	۶۲	۶۱/۳۵	$U > ۴۴/۸۸$	فرایند تجدید شونده

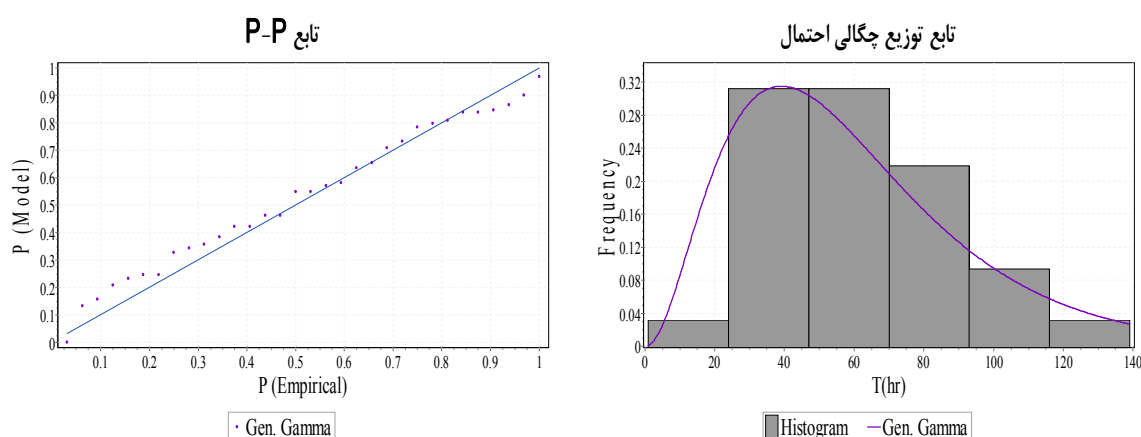
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۲۰)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی ۴۴/۸۸، فرض صفر رد نمی شود جدول (۴-۵). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری شکل (۴-۲۰)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴، فرایند تجدید شونده است.

۴-۶-۲- تحلیل داده ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان های بین خرابی ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق

کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۴، طبق شکل (۴-۲۱) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، ۰/۱۱۲ و مقدار میانگین واقعی ۶۰/۵۳ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این وجود با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، گامای تعمیم یافته $\alpha = 3/6439$ ، $\beta = 13/902$ ، $k = 0/895$ و مقدار میانگین تابع ۵۹/۹۲۷ است.

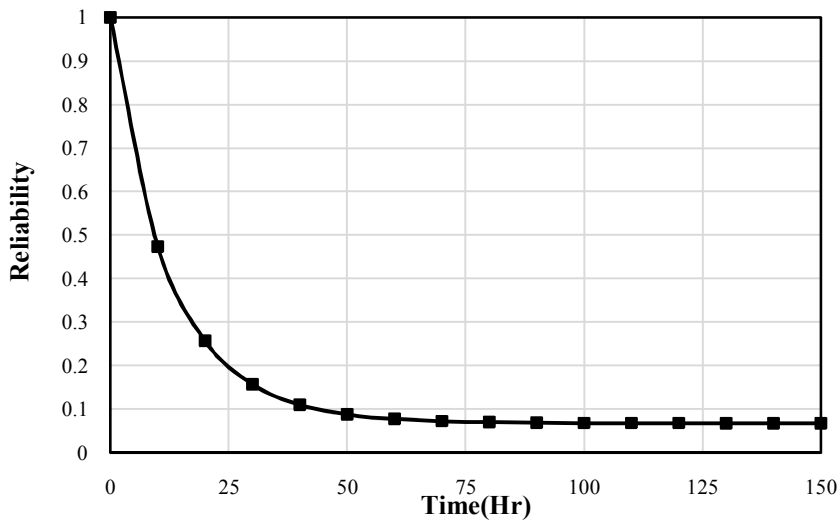


شکل ۴-۲۱- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۴

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۴، به صورت روابط (۴-۷) و (۴-۸) زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) آورده شده است.

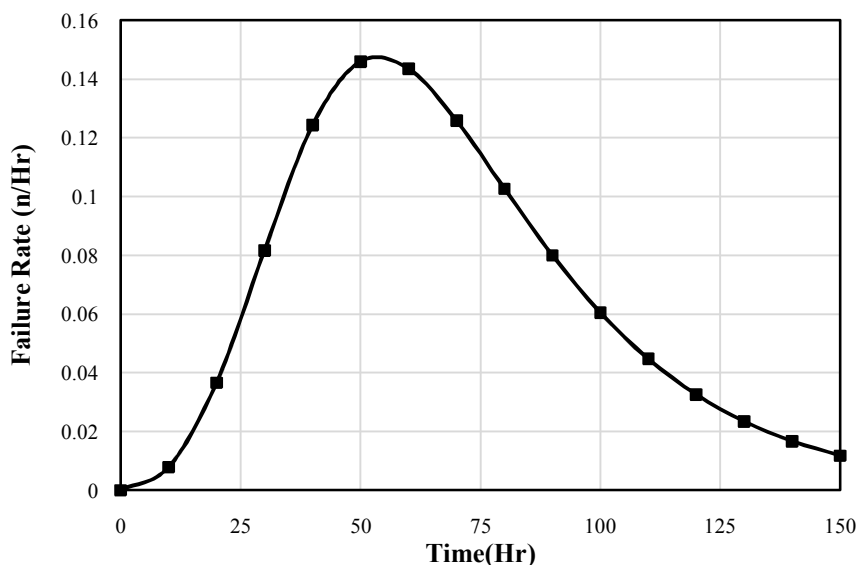
$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k (\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{13.90}\right)^{0.89} (3.64)}{\Gamma(3.64)} \quad (۷-۴)$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{k \left(\frac{t}{\beta}\right)^{k-1}}{\beta^k \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^k\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k (\alpha)}{\Gamma(\alpha)}} = \frac{\frac{0.8953 \left(\frac{t}{13.90}\right)^{2.26}}{13.90^{3.26} \Gamma(3.64)} \exp\left(-\left(\frac{t}{13.90}\right)^{0.89}\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{13.90}\right)^{0.89} (3.64)}{\Gamma(3.64)}} \quad (۸-۴)$$



شکل ۴-۲۲- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان (شکل ۴-۲۲) نشان می دهد که قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴ پس از حدود ۱۰۰ ساعت به حدود ۰/۰۶ می رسد و در همین حد باقی می ماند. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب تند کاهش می یابد و پس از حدود ۳/۵ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۴، پس از حدود ۹/۵ ساعت به نصف کاهش می یابد.

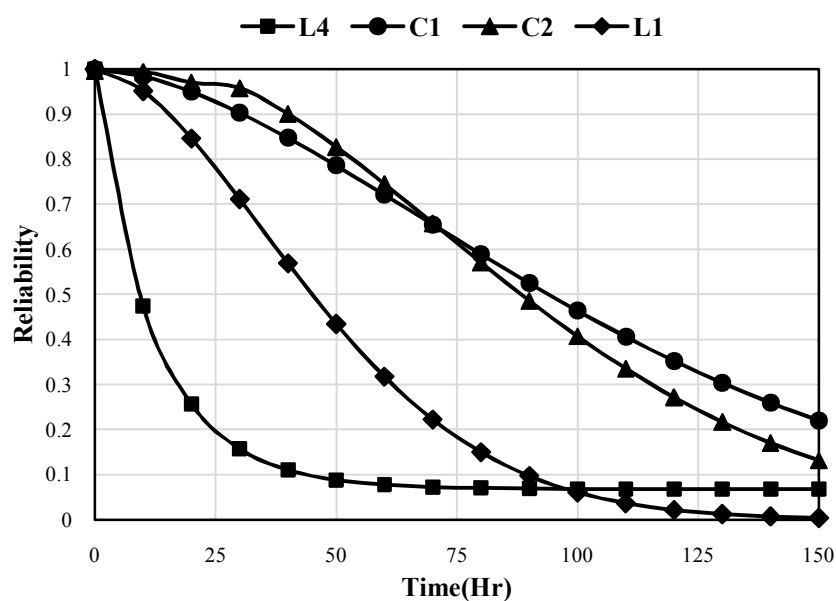


شکل ۴-۲۳- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۴

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۲۳)، لکوموتیو شماره ۴ از زمان شروع به کار (زمان صفر) تا ۵۰ ساعت اول دارای رفتار خرابی رو به زوال داشته و نرخ خرابی صعودی است. اما در ادامه فعالیت از بعد از گذشت ۵۰ ساعت اول نرخ خرابی حالت بهبود پیدا کرده و به حالت نزولی درآمده است و پس از گذشت ۱۵۰ ساعت نرخ خرابی به ۰/۰۱۱ کاهش یافته است.

۴-۶-۵- قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر A

برای بررسی ارتباط قابلیت اطمینان تمامی ماشین‌های مسیر ترابری A، منحنی‌های قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر A، در شکل (۴-۲۴) آورده شده است. در شکل (۴-۲۴) جهت سهولت در بیان اسامی ماشین‌ها لکوموتیو شماره ۱ با (L1)، نوار نقاله شماره ۱ با (C1)، نوار نقاله شماره ۲ با (C2) و لکوموتیو شماره ۴ با (L4) نمایش داده شده است. چنانچه، مشاهده می‌شود لکوموتیو شماره ۱، نوار نقاله شماره ۱، نوار نقاله شماره ۲ و لکوموتیو شماره ۴ به ترتیب پس از ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۱۰۰ ساعت، متوقف خواهند شد. با این وجود، نوار شماره ۱ در تمام مدت فعالیت، نسبت سایر ماشین‌ها، از قابلیت اطمینان بسیار بالاتری برخوردار است. علاوه بر این قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌ها، لکوموتیو شماره ۱، نوار نقاله شماره ۱، نوار نقاله شماره ۲ و لکوموتیو شماره ۴، به ترتیب پس از ۲۳، ۴۸، ۵۴ و ۳/۵ ساعت، پس از شروع فعالیت ماشین به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

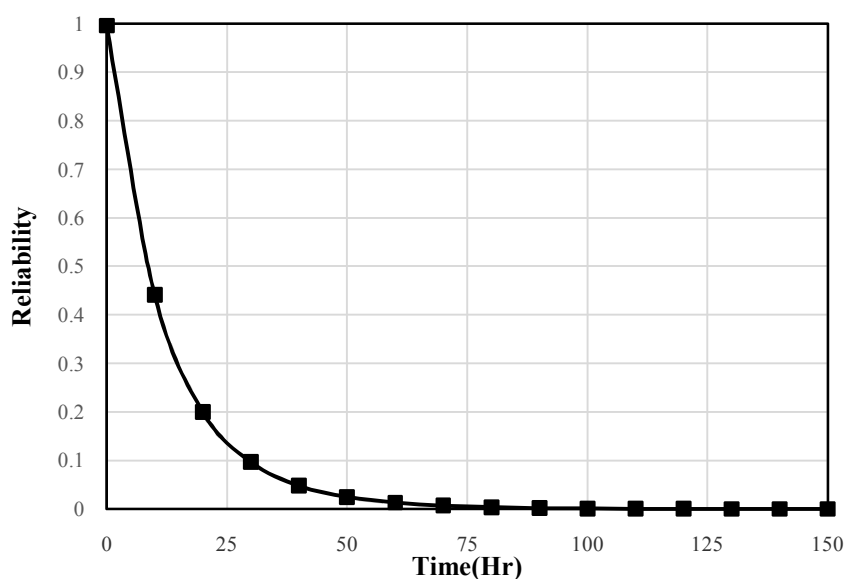


شکل ۴-۲۴ نمودار قابلیت اطمینان تمامی ماشین‌های مسیر A

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان مسیر ترابری A به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۹) محاسبه نمود.

$$R_{system}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4-9)$$

که در آن، R_{system} نشان‌دهنده قابلیت اطمینان کل دستگاه در زمان t ، $R_i(t)$ قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در زمان t و n ، تعداد زیرسیستم‌ها است. با استفاده از رابطه فوق، قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر A محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل ۴-۲۵ ارائه شده است.

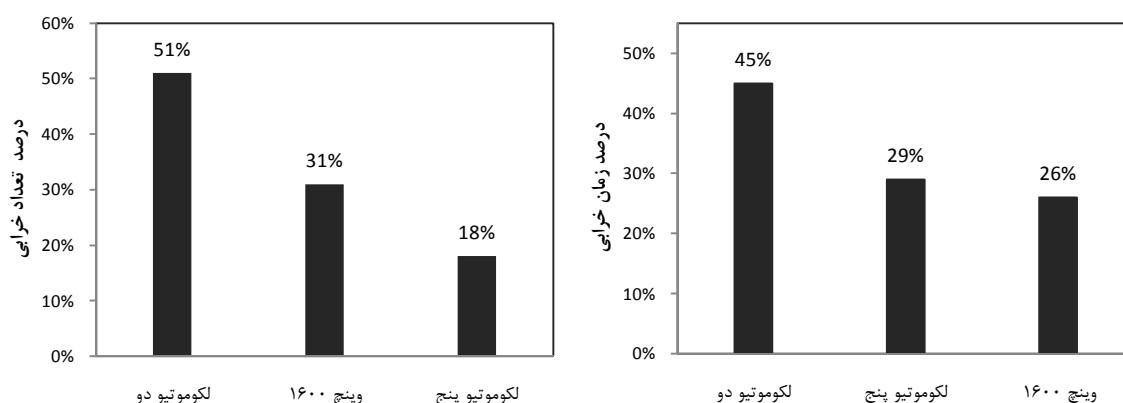


شکل ۴-۲۵ نمودار قابلیت اطمینان کل تجهیزات مسیر A

چنانکه در شکل دیده می شود، قابلیت اطمینان کل مسیر A پس از طی ۱۰۰ ساعت تقریباً به صفر می رسد. قابلیت اطمینان کل مسیر در طی ۳/۵ ساعت اول، ۲۰ درصد کاهش یافته و به ۸۰ درصد می رسد و پس از ۹ ساعت، احتمال خرابی و کارکرد مناسب دستگاه برابر می شود یعنی قابلیت اطمینان به ۵۰ درصد مقدار خود می رسد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان دستگاه مشخص می شود که در ۱۰ ساعت اول به طور میانگین در هر ساعت پنج درصد از قابلیت اطمینان دستگاه کاسته می شود.

۴-۷- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر B

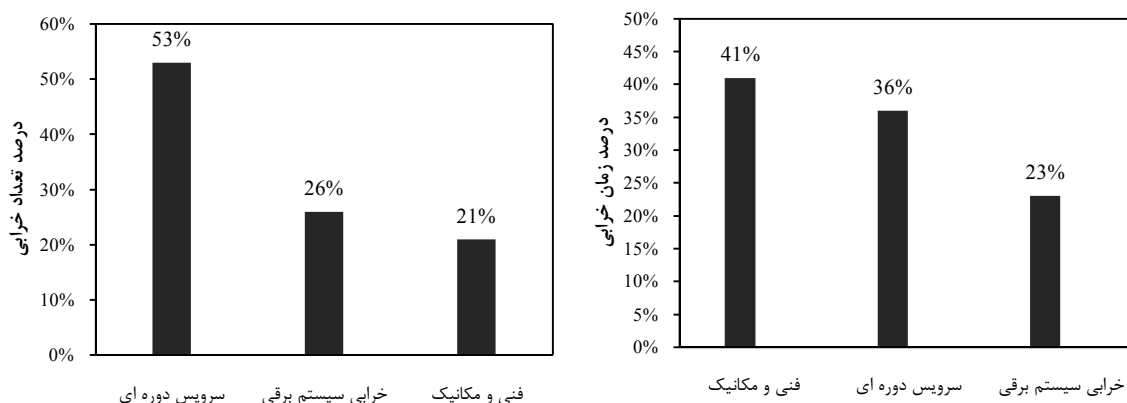
نمودار ستونی تحلیل پارتو، برای ماشین های ناوگان ترابری مسیر B در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-۲۶)، لکوموتیو شماره ۲ با بیشترین فراوانی زمان خرابی و تعداد خرابی در مسیر B بحرانی ترین زیرسیستم محسوب شده است. وینچ ۱۶۰۰ کمترین فراوانی زمان خرابی و لکوموتیو ۵ کمترین فراوانی تعداد دفعات خرابی را در مسیر B دارا هستند.



شکل ۴-۲۶- نمودار پارتو خرابی ماشین آلات سیستم ترابری مسیر B

۴-۷-۱- مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲

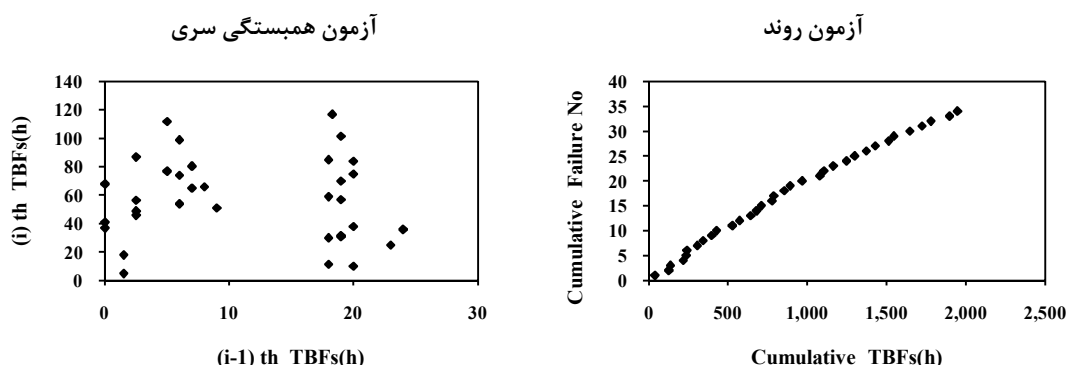
نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۲ (شکل ۴-۲۷) بیانگر بالاترین نرخ زمان خرابی در بخش فنی و مکانیک و بالاترین فراوانی دفعات خرابی، مربوط به سرویس دوره ای لکوموتیو شماره ۲ است.



شکل ۴-۲۷- نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۲

۴-۷-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده ها

ابتدا داده های خرابی لکوموتیو شماره ۲ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده ها، آزمون های گرافیکی و تحلیلی به طور همزمان بر روی داده ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۲۸) و جدول (۴-۶) ارائه شده است.



شکل ۴-۲۸- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۲

جدول ۴-۶- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۲

نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
لکوموتیو ۲	۳۴	۶۶	۶۳/۶۵	$U > ۴۸/۳۰$	فرایند تجدید شونده

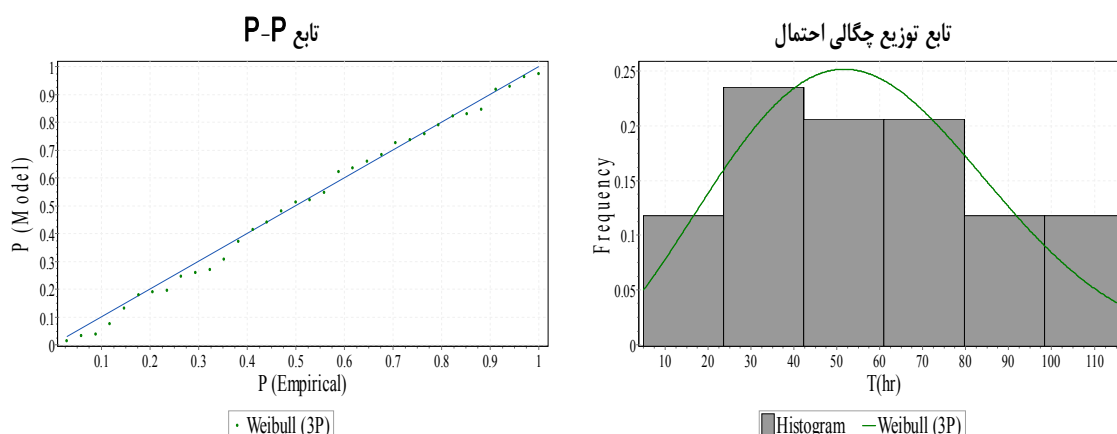
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۲۸)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی $۴۸/۳۰$ ، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۶). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری شکل (۴-۲۸)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان‌دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲، فرایند تجدید شونده است.

۴-۷-۱-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال

پیش بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده های خرابی لکوموتیو شماره ۲، طبق شکل (۴-۲۹) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، 0.0645 و مقدار میانگین واقعی $57/28$ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این وجود با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول ۳ پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، وایبول ۳ پارامتری $\alpha = 2/4765$ ، $\beta = 74/341$ ، $\gamma = -8/6288$ و مقدار میانگین تابع $57/316$ است.

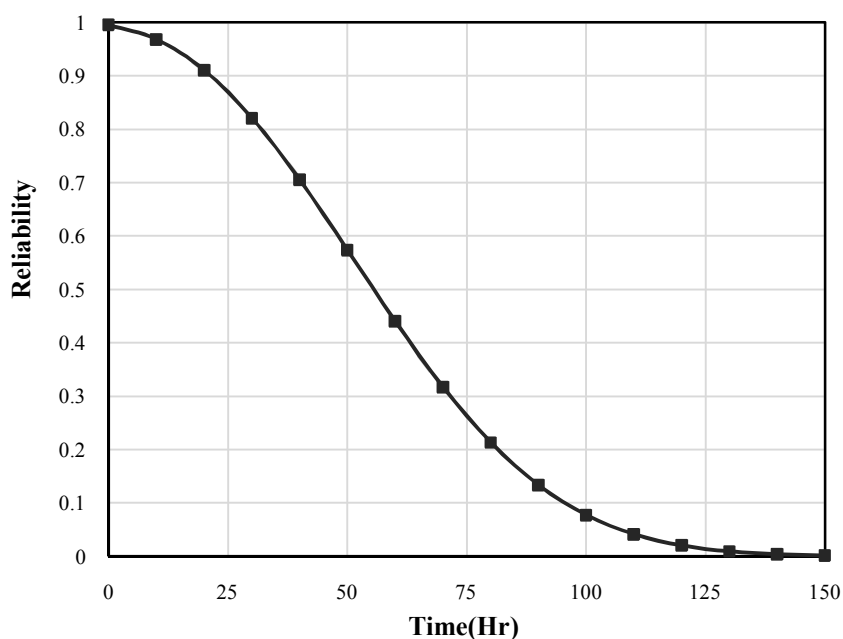


شکل ۴-۲۹- نتایج تحلیل داده های خرابی لکوموتیو شماره ۲

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۲، به صورت روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) در زیر ارائه شده است. منحنی های معادل با این روابط به ترتیب در شکل های (۴-۳۰) و (۴-۳۱) آورده شده است.

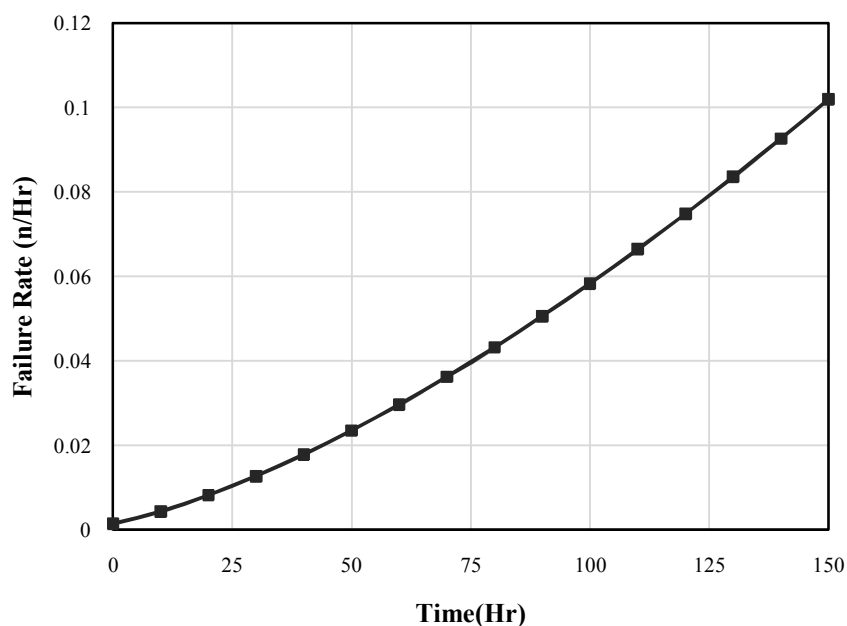
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t+8.62}{74.341}\right)^{2.47}\right) \quad (4-10)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0333 \left(\frac{t+8.62}{74.34}\right)^{1.47} \quad (4-11)$$



شکل ۴-۳۰- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۳۰) نشان می دهد که قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲ پس از حدود ۱۴۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب متوسط کاهش می یابد و پس از حدود ۳۲ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۲، پس از حدود ۵۵/۵ ساعت به نصف کاهش می یابد.

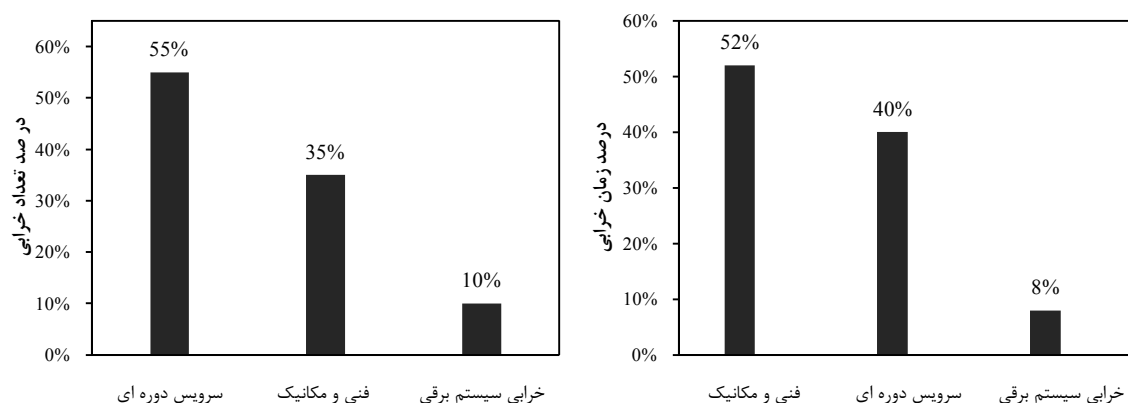


شکل ۴-۳۱- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۲

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۳۱)، لکوموتیو شماره ۲ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت (پس از اولین شیفت کاری)، نرخ خرابی ۰/۰۰۴ رسیده است اما پس از گذشت دومین شیفت کاری نرخ خرابی با شیب متوسط افزایش یافته بطوریکه با گذشت ۲۰ ساعت از شروع کار به مقدار ۰/۰۰۸ می‌رسد. با گذشت حدود ۷۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک‌روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۱۵۰ ساعت به مقدار ۰/۱ می‌رسد. بر اساس این منحنی، لکوموتیو شماره ۲ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۷-۲- مدل سازی قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰

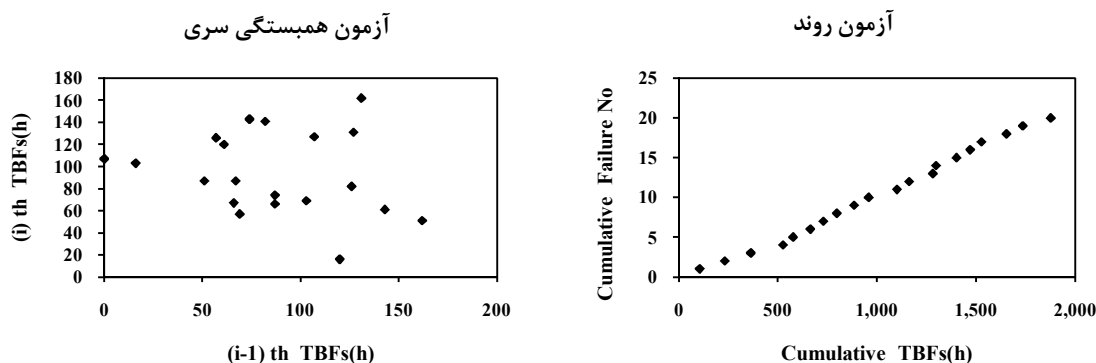
همان‌طور که در شکل (۴-۳۲) نمودار پارتو خرابی دستگاه وینچ ۱۶۰۰ دیده می‌شود بالاترین نرخ مدت زمان خرابی مربوط به بخش فنی و مکانیک بوده، درحالی‌که بالاترین فراوانی تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به سرویس دوره‌ای دستگاه وینچ ۱۶۰۰ بوده است.



شکل ۴-۳۲- نمودار پارتو خرابی وینچ ۱۶۰۰

۴-۷-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

ابتدا داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده‌ها، آزمون‌های گرافیکی و تحلیلی به‌طور همزمان بر روی داده‌ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۳۳) و جدول (۴-۷) ارائه شده است.



شکل ۴-۳۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰

جدول ۴-۷- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰

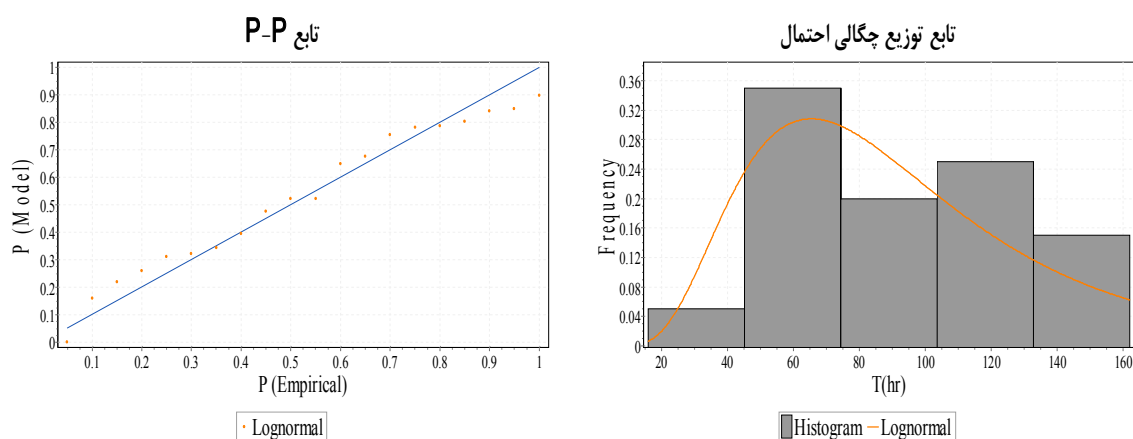
نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
وینچ ۱۶۰۰	۲۰	۳۸	۳۸/۱۰	$U > ۲۴/۸۸$	فرایند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۳۳)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی $۲۴/۸۸$ ، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۷). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری شکل (۴-۳۳)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان‌دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰، فرآیند تجدید شونده است.

۴-۷-۲-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰، طبق شکل (۴-۳۴) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، $۰/۱۱۷۸$ و مقدار میانگین واقعی $۹۳/۸۵$ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این حال با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ‌نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، لاگ‌نرمال $\mu=۴/۴۳۹$ ، $\sigma=۰/۵۰۷۹$ و مقدار میانگین تابع $۹۶/۳۴۸$ است.

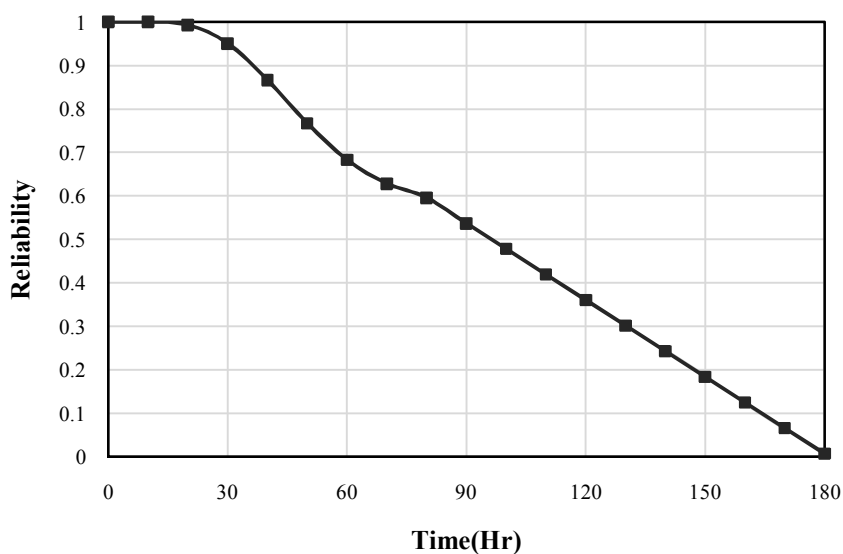


شکل ۴-۳۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی وینچ ۱۶۰۰

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی وینچ ۱۶۰۰، به صورت روابط (۴-۱۲) و (۴-۱۳) در زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۳۵) و (۴-۳۶) آورده شده است.

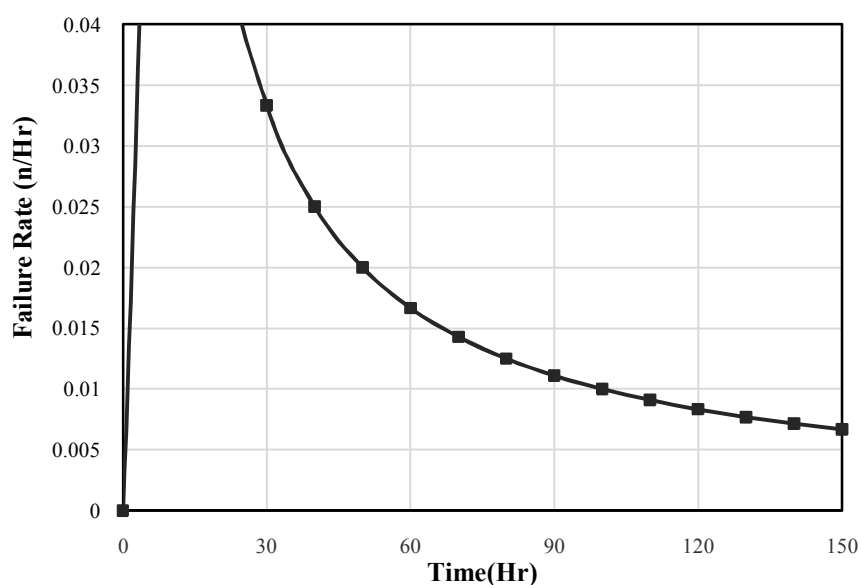
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 4.439}{0.5079} \right)^2 \right] \quad (4-12)$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left(-(\ln(t) - \mu)^2 \right)}{2t\sigma^2 \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left(\frac{-(\ln(x) - \mu^2)}{2\sigma^2} \right) dx} = \frac{\exp \left(-(\ln(t) - 4.439)^2 \right)}{0.5159t \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left(\frac{-(\ln(x) - 19.70)}{0.5159} \right) dx} \quad (4-13)$$



شکل ۳۵-۴- نمودار قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۳۵-۴) نشان می دهد که قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰ پس از ۱۸۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب بسیار کم کاهش می یابد و پس از حدود ۴۶/۵ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان وینچ ۱۶۰۰، پس از حدود ۹۵ ساعت به نصف کاهش می یابد.



شکل ۳۶-۴- نمودار نرخ خرابی وینچ ۱۶۰۰

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۳۶)، وینچ ۱۶۰۰ در ۱۰ ساعت اول شروع به کار دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت (پس از اولین شیفت کاری)، نرخ خرابی به ۰/۱ رسیده است اما پس از گذشت ۲۰ ساعت و سه شیفت کاری نرخ خرابی با شیب تقریباً زیاد کاهش یافته بطوریکه باگذشت ۳۰ ساعت از شروع کار به مقدار ۰/۰۳۳ می‌رسد. باگذشت حدود ۸۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک‌روند تقریباً ثابت کاهش یافته و در زمان ۱۵۰ ساعت به مقدار ۰/۰۰۶ می‌رسد. بر اساس این منحنی، لکوموتیو شماره ۲ در ساعات اولیه شروع به کار دارای نرخ صعودی به سمت بی‌نهایت و پس از گذشت ۲ شیفت کاری به حالت نزولی تغییر یافته است.

۴-۷-۳- مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵

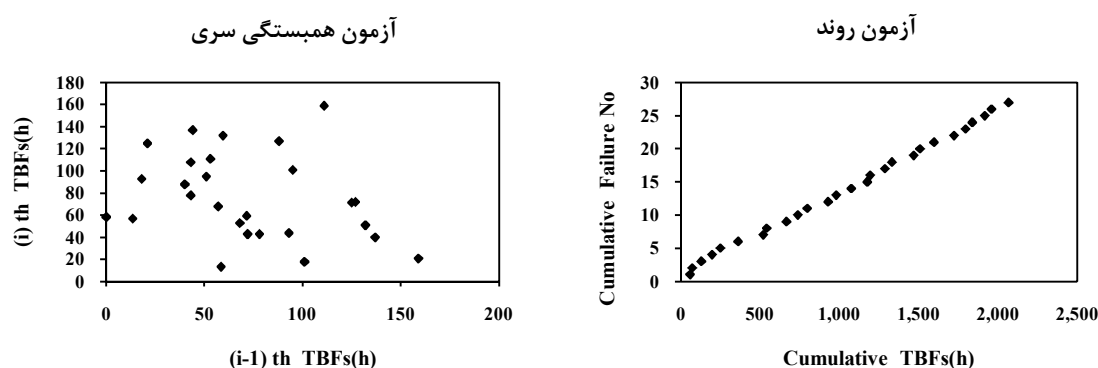
همان‌طور که در شکل (۴-۳۷) نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۵ دیده می‌شود بالاترین فراوانی مدت زمان توقف و همچنین بالاترین تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به سرویس دوره‌ای لکوموتیو شماره ۵ بوده است.



شکل ۴-۳۷ نمودار پارتو خرابی لکوموتیو شماره ۵

۴-۷-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

ابتدا داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۵ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده‌ها، آزمون‌های گرافیکی و تحلیلی به‌طور همزمان بر روی داده‌ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۳۸) و جدول (۴-۸) ارائه شده است.



شکل ۴-۳۸- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۵

جدول ۴-۸- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۵

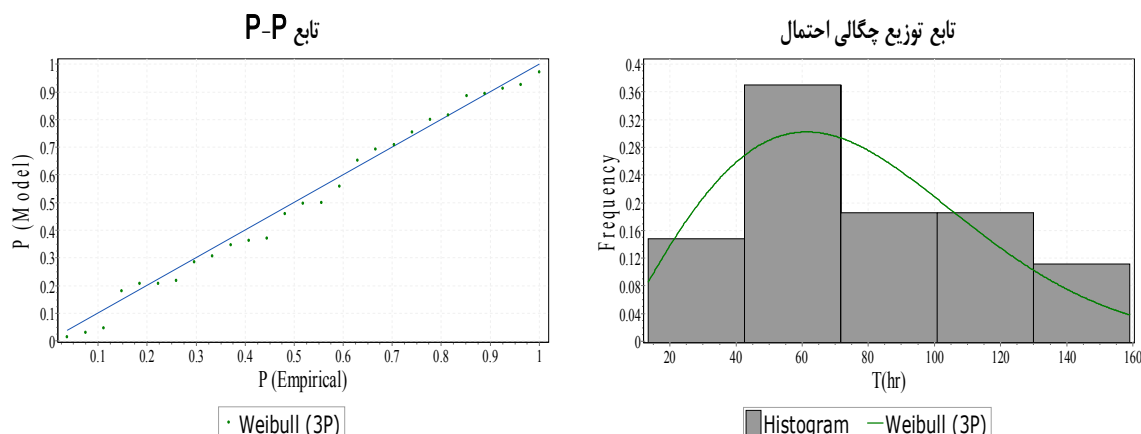
نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
لکوموتیو ۵	۲۷	۵۲	۵۱/۲۹	$U > ۳۶/۴۳$	فرایند تجدیدشونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۳۸)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی ۳۶/۴۳، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۸). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری شکل (۴-۳۸)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان‌دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵، فرایند تجدید شونده است.

۴-۷-۳-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به‌عنوان داده اصلی وارد نرم‌افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده‌شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به‌منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی‌شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده‌شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۵، طبق شکل (۴-۳۹) و با توجه به مقدار به دست‌آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، 0.0726 و مقدار میانگین واقعی $76/56$ بدین‌صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به‌جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم‌شده نیز قابل‌مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست‌آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این‌وجود با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول ۳ پارامتری به‌عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به‌دست‌آمده برای تابع برگزیده، وایبول ۳ پارامتری $\alpha = 1/9835$ ، $\beta = 82/174$ ، $\gamma = 3/6451$ و مقدار میانگین تابع $76/48$ است.

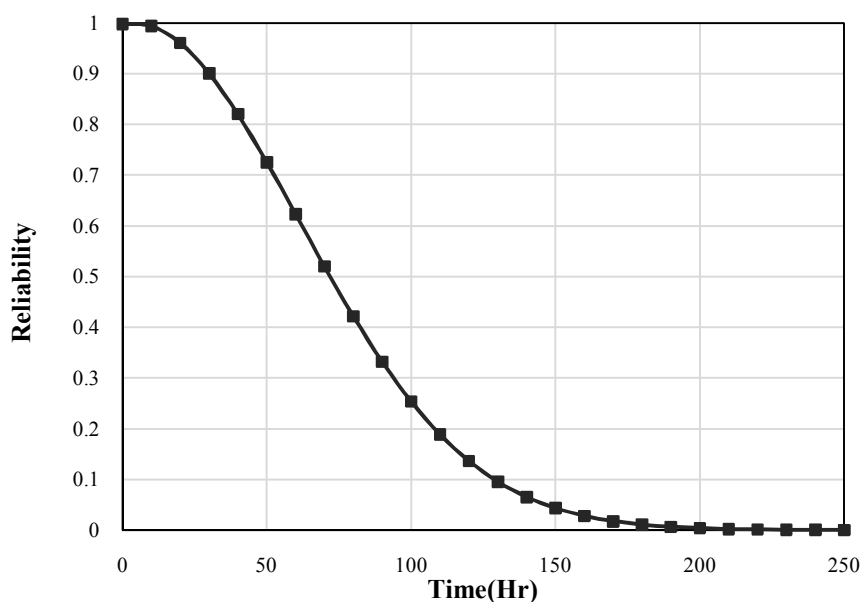


شکل ۴-۳۹- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۵

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۵، به صورت روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵) در زیر ارائه شده است. منحنی های معادل با این روابط به ترتیب در شکل های (۴-۴۰) و (۴-۴۱) آورده شده است.

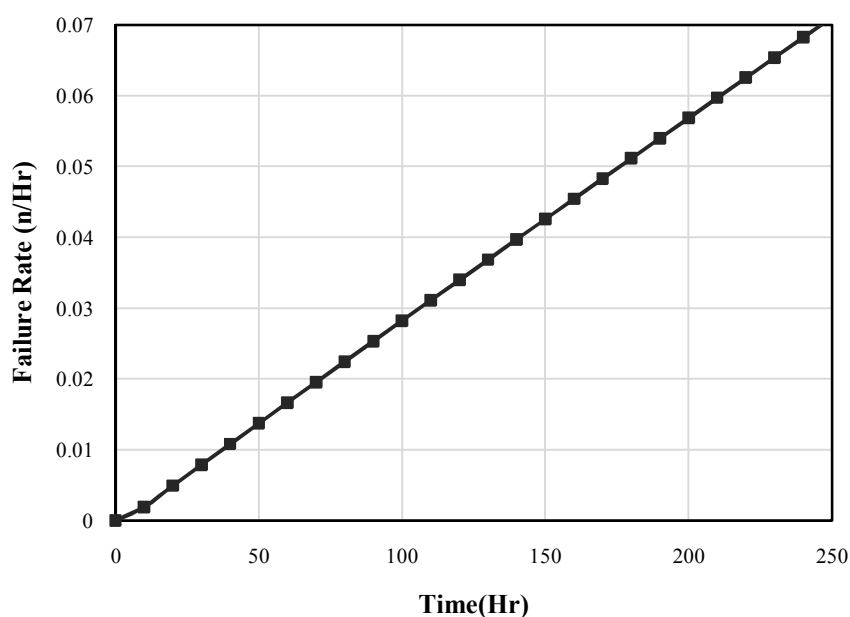
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-3.64}{82.17}\right)^{1.98}\right) \quad (4-14)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0241 \left(\frac{t-3.64}{82.17}\right)^{0.98} \quad (4-15)$$



شکل ۴-۴۰- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۴۰) نشان می دهد که قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵ پس از حدود ۲۰۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب کم کاهش می یابد و پس از حدود ۴۲ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۵، پس از حدود ۷۱ ساعت به نصف کاهش می یابد.



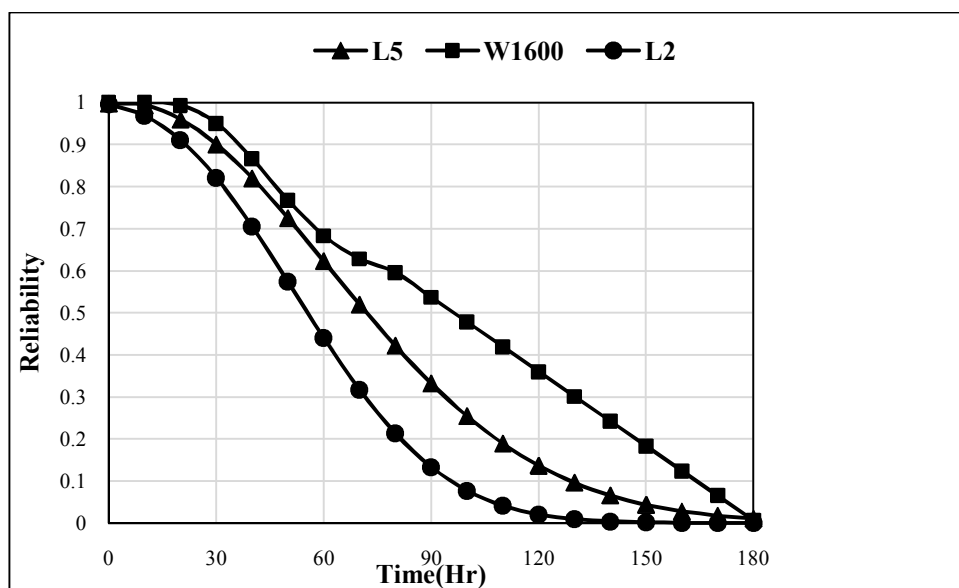
شکل ۴-۴۱- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۵

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۴۱)، لکوموتیو شماره ۵ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت (پس از اولین شیفت کاری)، نرخ خرابی ۰/۰۰۱۹ رسیده است اما پس از گذشت دومین شیفت کاری نرخ خرابی با شیب متوسط افزایش یافته بطوریکه با گذشت ۴۰ ساعت از شروع کار به مقدار ۰/۰۱ می‌رسد. با گذشت حدود ۲۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک‌روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۲۵۰ ساعت به مقدار ۰/۰۷ می‌رسد. بر اساس این منحنی، لکوموتیو شماره ۵ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۷-۴- قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر B

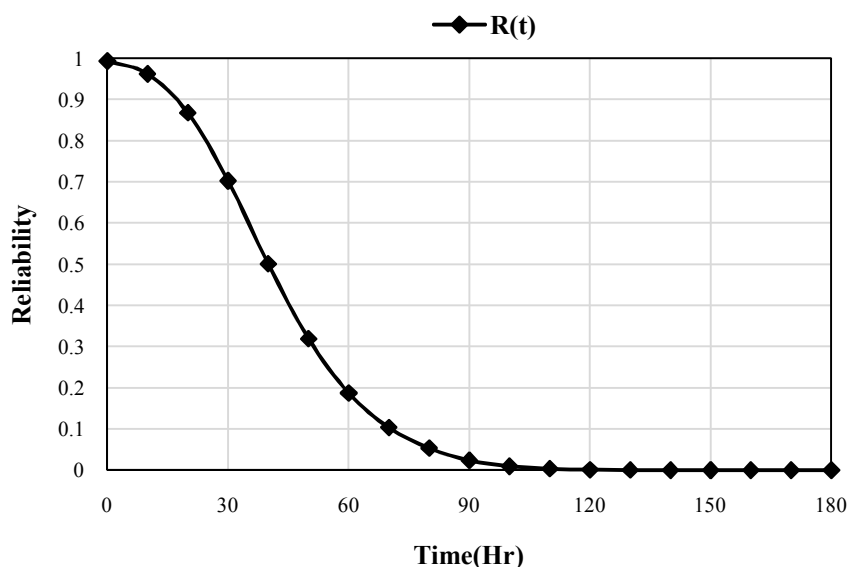
برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان تمامی ماشین‌های مسیر ترابری B، منحنی‌های قابلیت اطمینان تمامی ماشین‌های مسیر B، در شکل (۴-۴۲) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که لکوموتیو شماره ۲، وینچ ۱۶۰۰ و لکوموتیو شماره ۵ به ترتیب پس از ۱۴۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ ساعت، متوقف خواهند شد. در شکل (۴-۴۲) جهت سهولت در بیان اسامی ماشین‌ها لکوموتیو شماره ۲ با (L2)، وینچ ۱۶۰۰ با (W1600) و لکوموتیو شماره ۵ با (L5) نمایش داده شده است.

بالین وجود، وینچ ۱۶۰۰ در تمام مدت فعالیت، نسبت به سایر ماشین‌ها، از قابلیت اطمینان بسیار بالاتری برخوردار است. به طوری که قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌ها، لکوموتیو شماره ۲، وینچ ۱۶۰۰ و لکوموتیو شماره ۵، به ترتیب پس از ۳۲، ۴۶/۵ و ۴۲ ساعت پس از شروع فعالیت ماشین، به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴۲- نمودار قابلیت اطمینان تجهیزات سیستم ترابری مسیر B

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان مسیر ترابری B به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۹) محاسبه نمود. با استفاده از رابطه (۴-۹)، قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر B محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل ۴-۴۳ ارائه شده است.

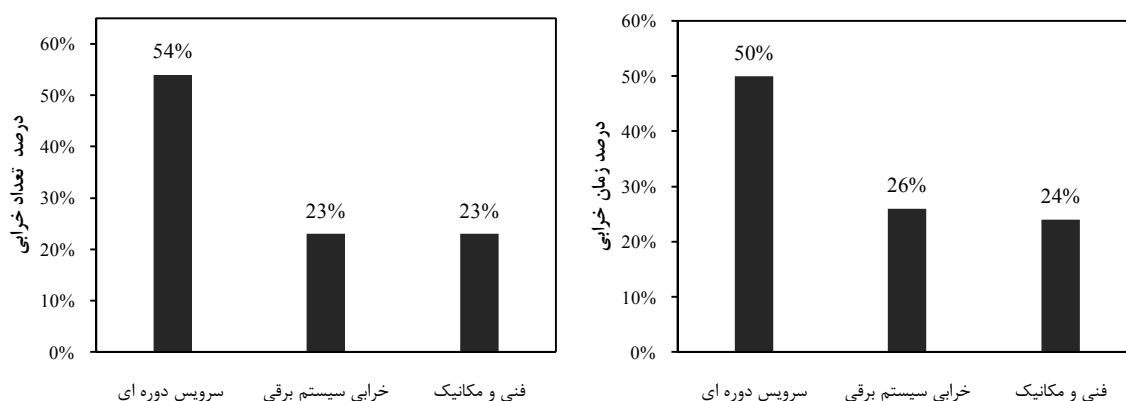


شکل ۴-۴۳- نمودار قابلیت اطمینان کل سیستم ترابری مسیر B

چنانکه در شکل دیده می‌شود، قابلیت اطمینان کل مسیر B پس از طی ۱۰۰ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان کل مسیر در طی ۲۴ ساعت اول، ۲۰ درصد کاهش یافته و به ۸۰ درصد می‌رسد و پس از ۴۰ ساعت، احتمال خرابی و کارکرد مناسب دستگاه برابر می‌شود یعنی قابلیت اطمینان به ۵۰ درصد مقدار خود می‌رسد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان دستگاه مشخص می‌شود که در ۴۰ ساعت اول به‌طور میانگین در هر ساعت ۱/۲۵ درصد از قابلیت اطمینان دستگاه کاسته می‌شود.

۴-۸- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری مسیر C

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در مسیر C تنها لکوموتیو شماره ۳ تردد می‌نماید لذا نمودار تحلیل پارتو کل مسیر و لکوموتیو شماره ۳ یکسان بوده لذا برای آشنایی با مدت زمان توقف و نیز تعداد توقف‌ها از نمودار تحلیل پارتو لکوموتیو شماره ۳ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۴۴) دیده می‌شود بالاترین فراوانی مدت زمان توقف و همچنین بالاترین فراوانی تعداد دفعات توقف دستگاه، مربوط به سرویس دوره‌ای لکوموتیو شماره ۳ بوده است. علاوه بر این قابلیت اطمینان کل مسیر C، با قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ یکسان و منطبق است.

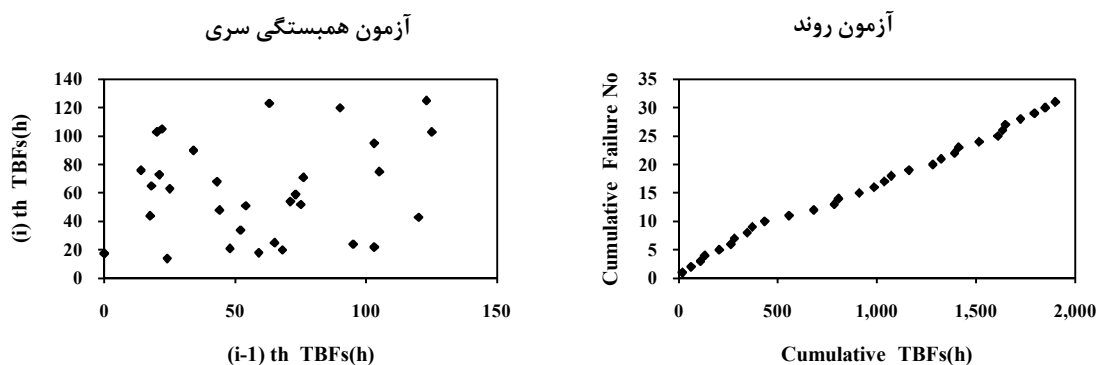


شکل ۴-۴ نمودار پارتو خرابی مسیر C و لکوموتیو شماره ۳

۴-۸-۱- مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳

۴-۸-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

ابتدا داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۳ از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقیق نوع داده‌ها، آزمون‌های گرافیکی و تحلیلی به‌طور همزمان بر روی داده‌ها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل (۴-۴۵) و جدول (۴-۹) ارائه شده است.



شکل ۴-۴۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های لکوموتیو شماره ۳

جدول ۴-۹- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۳

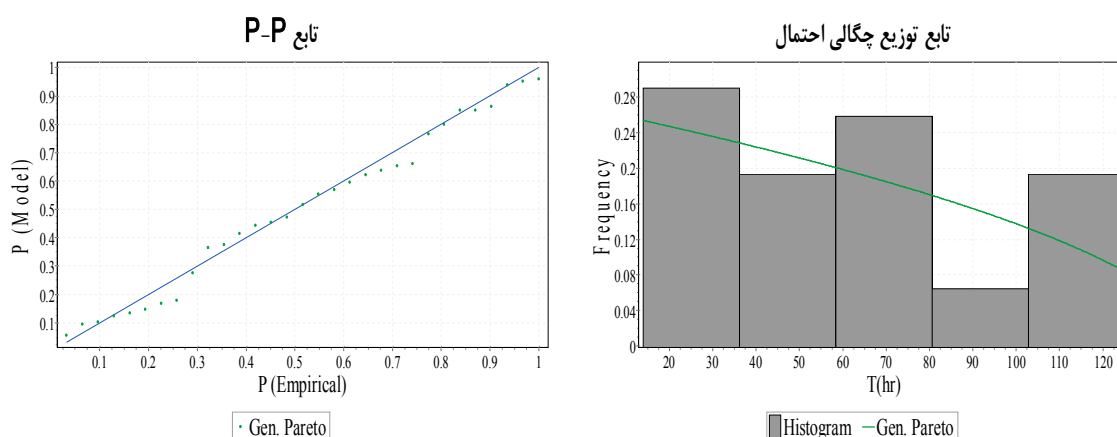
نام دستگاه	تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
لکوموتیو ۳	۳۱	۶۰	۶۱/۷۹	$U > ۴۳/۱۸$	فرایند تجدیدشونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی شکل (۴-۴۵)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار U از شاخص بحرانی $۴۳/۱۸$ ، فرض صفر رد نمی‌شود جدول (۴-۹). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری شکل (۴-۴۵)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان‌دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است؛ بنابراین بهترین روش در مدل سازی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳، فرآیند تجدیدشونده است.

۴-۸-۱-۲- تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم افزار شده و میزان مطابقت شش تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با نمودار ستونی داده‌ها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردیده است. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی، از نمودار P-P استفاده شده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۳، طبق شکل (۴-۴۶) و با توجه به مقدار به دست آمده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف، $۰/۰۹۳۴$ و مقدار میانگین واقعی $۶۱/۳۴$ بدین صورت است که شکل توزیع تمامی پنج تابع اول بسیار شبیه به هم بوده و در تمامی توابع به جز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با این وجود با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول ۲ پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده برای تابع برگزیده، وایبول ۲ پارامتری $\alpha = ۱/۷۲۰۴$ ، $\beta = ۶۷/۷۵۸$ ، $\gamma = ۰$ و مقدار میانگین تابع $۶۰/۴۰۹$ است.

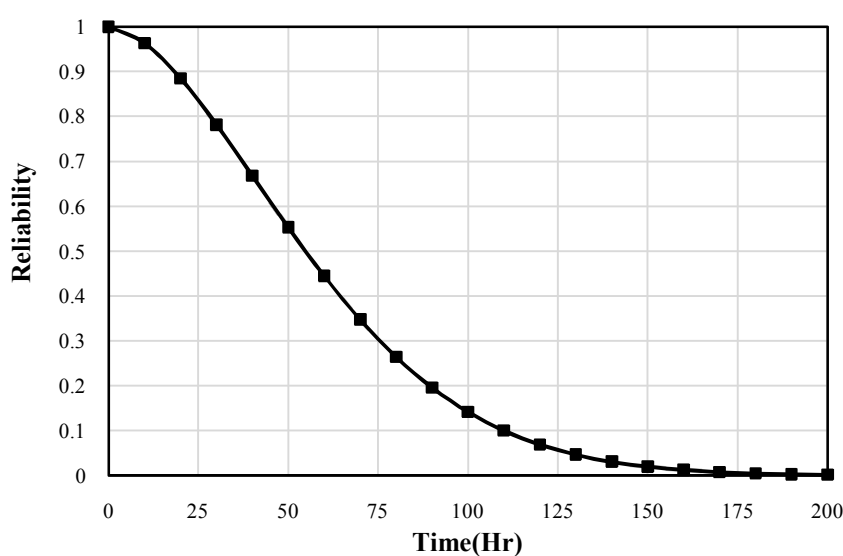


شکل ۴-۴۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۳

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی وینچ لکوموتیو شماره ۳، به صورت روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) در زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۴۷) و (۴-۴۸) آورده شده است.

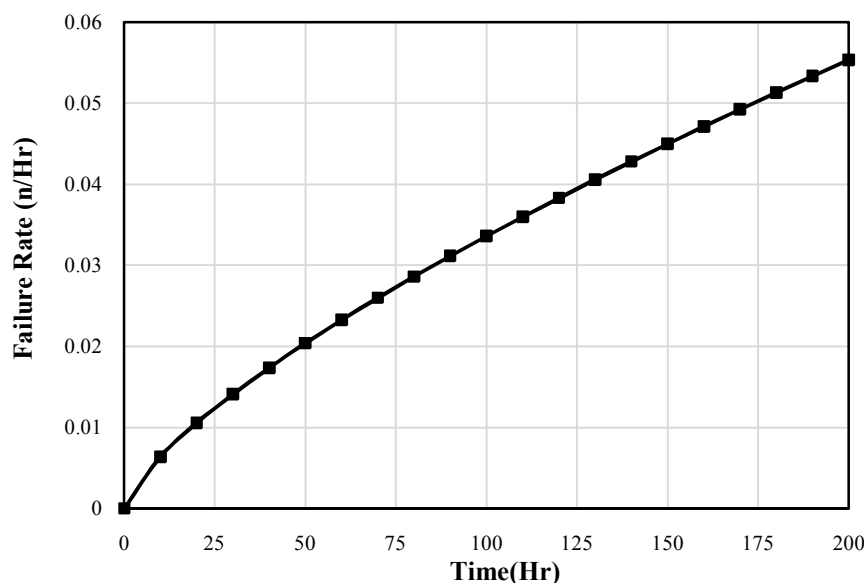
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{67.75}\right)^{1.72}\right) \quad (4-16)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0253 \left(\frac{t}{67.75}\right)^{0.72} \quad (4-17)$$



شکل ۴-۴۷- نمودار قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان شکل (۴-۴۷) نشان می دهد که قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ پس از حدود ۱۸۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این دستگاه از ساعات اولیه کار، با شیب کم کاهش می یابد و پس از حدود ۲۸ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان لکوموتیو ۳، پس از حدود ۵۵ ساعت به نصف کاهش می یابد.

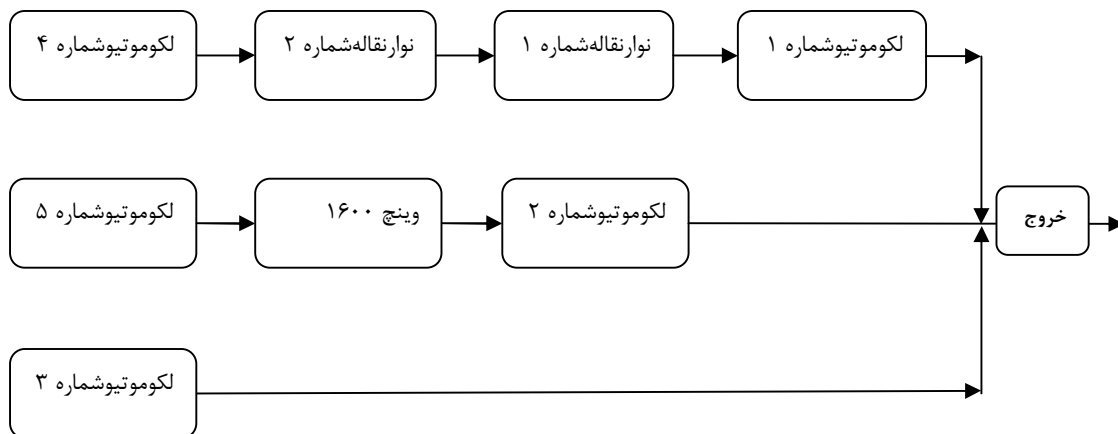


شکل ۴-۴۸- نمودار نرخ خرابی لکوموتیو شماره ۳

با توجه به نمودار نرخ خرابی شکل (۴-۴۸)، لکوموتیو شماره ۳ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت، نرخ خرابی ۰/۰۰۶ رسیده است اما پس از گذشت دومین شیفت کاری نرخ خرابی با شیب متوسط افزایش یافته بطوریکه با گذشت ۳۰ ساعت از شروع کار به مقدار ۰/۰۱۴ می رسد. با گذشت حدود ۲۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی تقریباً با یک روند تقریباً ثابت افزایش یافته و در زمان ۳۰۰ ساعت به مقدار ۰/۰۷ می رسد. بر اساس این منحنی، لکوموتیو شماره ۳ دارای نرخ خرابی صعودی است.

۴-۹- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ترابری تونل بزرگ طزره

در بخش های قبلی قابلیت اطمینان هر یک از تجهیزات ترابری معدن بزرگ محاسبه شد و پس از آن قابلیت اطمینان تجهیزات هر مسیر که به صورت سری با هم در ارتباط بودن محاسبه شده، مسیرهای A، B و C در تونل بزرگ به شکل موازی نسبت به یکدیگر قرار دارند. در سیستم های موازی، ارتباط زیرسیستم ها به گونه ای است که فعالیت حداقل یکی از آنها هم می تواند عدم رکود در سیستم را تضمین کند و تنها در صورتی که کل زیرسیستم ها غیرفعال شوند در سیستم کل رکود ایجاد می شود. در شکل (۴-۴۹) سیستم ترابری معدن بزرگ طزره نشان داده شده است.



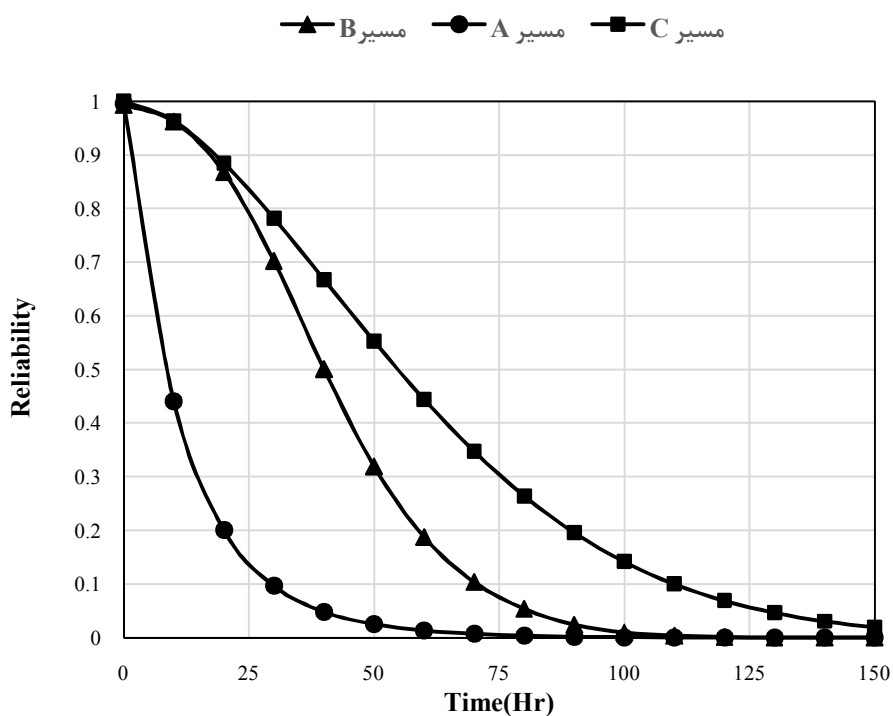
شکل ۴-۴۹- سیستم موازی مسیرهای A، B و C در تونل بزرگ طزره

قابلیت اطمینان کل در این دستگاه ها از رابطه (۴-۱۸) و به صورت زیر محاسبه می شود:

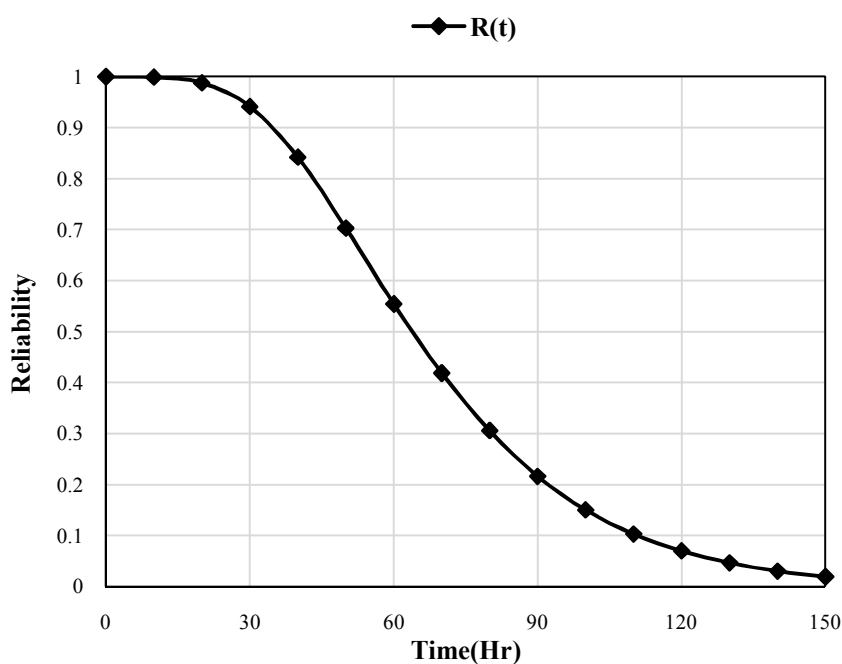
$$R_{\text{system}} = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times \dots \times (1 - R_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (4-18)$$

در شکل (۴-۵۰) نمودار قابلیت اطمینان سه مسیر A، B و C در یک صفحه مختصات ارائه شده است.

همانطور که در شکل دیده می شود مسیر C دارای بالاترین قابلیت اطمینان، بعد مسیر B و مسیر A در مقایسه با دو مسیر دیگر کمترین قابلیت اطمینان را دارا است.



شکل ۴-۵۰- منحنی قابلیت اطمینان مسیرهای ترابری تونل بزرگ طزره



شکل ۴-۵۱- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری تونل بزرگ طزره

با توجه به شکل (۴-۵۱)، پس از گذشت حدود ۴۳ ساعت از زمان شروع به کار ماشین‌ها، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان هر یک از مسیرهای A، B و مسیر C به ترتیب در زمان‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ ساعت پس از شروع به فعالیت آن‌ها به صفر

می‌رسد. به عبارت دیگر پس از ۱۲۵ ساعت از شروع فعالیت ماشین‌ها، ماشین‌های مسیرهای A و B از فعالیت بازمانده و از این زمان به بعد، تنها ماشین مسیر C (لکوموتیو شماره ۳) با قابلیت اطمینان پایین (کمتر از ۵ درصد) فعال است. قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن در این لحظه تقریباً برابر با ۱۰ درصد ($0.0975 = 1 - ((1 - 0.05) \times (1 - 0.05))$) است. با گذشت ۲۵ ساعت دیگر (۱۵۰ ساعت پس از شروع فعالیت ماشین‌ها)، لکوموتیو شماره ۳ نیز آستانه توقف قرار می‌گیرد. قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری پس از ۱۸۰ ساعت به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر پس از ۱۸۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین‌ها، ناوگان ترابری معدن به طور کامل متوقف خواهد شد.

۴-۱۰- جمع بندی

در این فصل، ابتدا به بررسی وجود روند و همبستگی متوالی بین داده‌های خرابی مربوط به هر یک از ماشین‌های مسیرهای ترابری، پرداخته شد. سپس با بهره‌گیری از آزمون‌ها و نرم‌افزار آماری، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های ناوگان ترابری به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت، با توجه به ارتباط سری بین هر یک از ماشین‌های هر مسیر، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از مسیرهای ترابری مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که قابلیت اطمینان مسیرهای A، B و C به ترتیب پس از ۱۰۰، ۱۸۰ و ۱۰۰ ساعت به صفر خواهد رسید. علاوه بر این، با توجه به ارتباط موازی بین هر یک از مسیرهای ترابری، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اینکه قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن تنها پس از گذشت ۴۳ ساعت (حدود ۵ شیفت)، ۲۰٪ کاهش می‌یابد، ارائه برنامه تعمیر و نگهداری برای هر یک از ماشین‌های ترابری ضرورت دارد.

فصل پنجم

ارائه برنامه تعمیر و نگهداری ماشین‌های

ناوگان ترابری، معدن بزرگ طزره

۵-۱- مقدمه

در جامعه صنعتی امروز، تعمیر و نگهداری به عنوان یکی از ارکان مهم تمامی صنایع، نقش تعیین کننده‌ای در میزان راندمان تولید و اقتصاد صنایع ایفا می‌کند. ماشین‌آلات و دستگاه‌ها، به عنوان سرمایه اصلی هر صنعت، پیکره و ساختار تولید را تشکیل داده و کیفیت عملکرد آن‌ها، تعیین کننده کیفیت نهایی محصول است. تعمیر و نگهداری، یک رهیافت عملی برای حفظ کیفیت دستگاه‌ها و دستیابی به تولید طراحی شده به حساب می‌آید. در فصل قبل، قابلیت اطمینان سیستم تولید معدن زغال سنگ بزرگ طزره مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مدل‌های ارائه شده، امکان تعیین زمان توقف هر یک از ماشین‌ها در سطح معینی از قابلیت اطمینان وجود داشته که به عنوان یک منبع اطلاعاتی پایه در مدیریت تعمیر و نگهداری آن‌ها، قابل استفاده است. در این فصل، پس از بیان اهمیت تعمیر و نگهداری و معرفی روش‌های تعمیر و نگهداری، استراتژی مناسب برای تعمیر و نگهداری ماشین‌های سیستم تولید ارائه شده است لذا با توجه به اینکه در سایر بخش‌ها به جزء ناوگان ترابری شرایط موجود ماشین‌ها به نحوی است که با داشتن قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ نیاز به برنامه تعمیر و نگهداری ضرورتی ندارد بنابراین برنامه تعمیر و نگهداری و تأثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان تنها برای

ماشین‌های ناوگان ترابری و درنهایت کل ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره پرداخته شده است.

۵-۲- اهمیت تعمیر و نگهداری^۱ ماشین‌آلات معدنی

اقتصاد رقابتی جهان امروز، شرکت‌های معدنی را وادار می‌سازد تا از طریق انجام مطالعات مستمر بر روی سیستم تولید و مدیریت صحیح آن، عملیات معدنی را در جهت افزایش تولید و کاهش هزینه‌های جاری هدایت نماید. از طرف دیگر ماشین‌آلات معدنی روز به روز پیچیده‌تر گشته و هزینه‌های آن‌ها به شدت رو به افزایش است. به منظور دستیابی به تولید بالا، هزینه کمتر و راندمان بیشتر، شرکت‌های معدنی به طور فزاینده‌ای مفاهیم مدیریت ماشین‌آلات و مهندسی تعمیر و نگهداری را مورد توجه قرار داده‌اند. با مروری بر گزارش‌ها و تجربیات ارائه شده در زمینه تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات معدنی، اهمیت بنیادین این موضوع بیش از پیش آشکار می‌شود (Dhillon, 2008). با جمع‌آوری آمار مربوط به صنایع معدنی کشورهای مختلف، واقعیت‌های جالبی را به شرح زیر گزارش نموده است:

- به طور کلی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات (در تمامی صنایع) از ۲۰ الی ۳۵ درصد کل هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود؛ اما در ماشین‌آلات معدنی هزینه‌های تعمیر و نگهداری به ۴۰ الی ۵۰ درصد هزینه‌های تولید می‌رسد (Dhillon, 2008).

- در معادن زغال‌سنگ استرالیا که بزرگ‌ترین کشور صادرکننده زغال‌سنگ جهان به حساب می‌آید، ۱۰ درصد زمان تولید، توسط تعمیرات برنامه‌ریزی نشده از دست می‌رود (Clark, 1990).

- در معادن روباز شیلی و اندونزی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ۶۰ درصد هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود (Hall & Daneshmend, 2000).

- به طور کلی با مطالعه صحیح سیستم‌های مهندسی می‌توان زمان تعمیرات و توقف‌های ناخواسته تولید را بسته به نوع هر صنعت از ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش داد (Unger & Conway, 1994).

^۱ Maintenance

- هزینه تعمیرات و نگهداری ۴۰ الی ۵۰ درصد هزینه عملیات معدن را شامل می‌شود (Forsman & Kumar, 1992).

لذا با توجه به این ارقام، مطالعه تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات معدنی و بررسی راهکارهای ممکن برای بهینه‌سازی آن، می‌تواند مدیران صنایع معدنی را در بهبود شرایط اقتصادی و قیمت تمام‌شده محصولات یاری نماید.

۵-۳- تعمیر و نگهداری

عملکرد یک دستگاه علاوه بر طراحی و شرایط محیط کار، به میزان سرویس و تعمیر و نگهداری انجام‌شده در طی عمر عملیاتی دستگاه بستگی کامل دارد. سرویس‌کاری مطلوب مثل تعویض روغن به‌موقع، تعمیر یا تعویض مناسب قطعات خراب‌شده و نگهداری دستگاه در محل مناسب در ساعات غیر کاری، ازجمله عواملی هستند که باعث افزایش عمر مفید دستگاه می‌شوند (Blischke & Murthy, 2003).

به هر عملیاتی (غیر از سرویس‌کاری عادی مثل تعویض روغن یا سوخت‌گیری) که به‌منظور حفظ یک دستگاه در شرایط عملیاتی موجود یا بازگرداندن دستگاه به شرایط قبل از خرابی انجام گیرد، تعمیر و نگهداری گفته می‌شود (Blischke & Murthy, 2003). اهداف اصلی تعمیر و نگهداری عبارت‌اند از:

- افزایش دوره عمر مفید دستگاه
 - افزایش قابلیت اطمینان
 - افزایش کارایی
 - کاهش تعمیرات اتفاقی
 - کاهش هزینه توقف‌های تولید و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از خرابی‌های دستگاه
- در هر پروژه صنعتی بسته به اهداف پروژه و مشخصات مهندسی ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده، هر یک از اهداف مذکور می‌تواند پررنگ‌تر و یا کم اهمیت‌تر باشد. در حالت کلی، افزایش طول عمر

دستگاه، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های توقف‌های تولید، معمولاً سه هدف عمده تعمیر و نگهداری در تمامی صنایع به شمار می‌آیند. در این میان، کاهش هزینه به‌عنوان یک هدف بالادستی، دو هدف دیگر را نیز پوشش می‌دهد. لذا در بهترین حالت، برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان ماشین، حداقل نمودن هزینه‌ها نیز باید موردتوجه قرار گیرد، اما در برخی دستگاه‌ها و فرآیندهای مهندسی، گاهی به دلیل وجود محدودیت‌های بسیار جدی در منابع در دسترس، مهندسين مجبور به پذیرش هزینه بالای یک استراتژی به‌جای یک استراتژی کم‌هزینه‌تر می‌شوند. لذا، تعیین هدف تعمیر و نگهداری، تعیین‌کننده بسیاری از خط و مشی‌های اجرایی در مدیریت ماشین‌آلات است (رحیم دل، ۱۳۹۱).

۵-۴- انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری

پس از تعیین هدف تعمیر و نگهداری یک دستگاه، مرحله بعدی انتخاب استراتژی یا سیاست تعمیر و نگهداری^۱ مناسب با شرایط دستگاه، هدف و امکانات موجود است. در حالت کلی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری به دو نوع عمده تقسیم می‌شوند: تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM)^۲، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)^۳. هر یک از این روش‌ها خود به زیرمجموعه‌هایی از استراتژی‌های مختلف تقسیم می‌شوند. در این پایان‌نامه برنامه تعمیر نگهداری بر اساس نوع پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه شده است. لذا در خصوص تعمیر و نگهداری اصلاحی تنها به تعاریف اولیه اکتفا شده است.

۵-۴-۱- تعمیر و نگهداری اصلاحی

این نوع تعمیر و نگهداری پس از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک بخش یا کل دستگاه به حالت عملیاتی به‌کار برده می‌شود. طی این عملیات قطعات معیوب تعمیر گردیده یا با یک قطعه جدید

^۱. Maintenance policy

^۲. Corrective Maintenance

^۳. Preventive Maintenance

(کارکرده) جایگزین می‌شود (Blischke & Murthy, 2003). این روش کاملاً برخلاف روش‌های PM بدون برنامه‌ریزی بوده و پس از خرابی دستگاه انجام می‌شود. عملیات CM بسته به سطح بحرانی بودن خرابی و نیز بسته به شرایط عملیات، می‌تواند به صورت اضطراری^۱ یا معوقه^۲ انجام شود. تعمیرات اضطراری زمانی انجام می‌شوند که خرابی، بسیار بحرانی بوده و باعث توقف ۱۰۰ درصد عملیات گردد. در این حالت تعمیر و رفع عیب در همان لحظه انجام شده و عملیات پس از رفع عیب مجدداً آغاز می‌شود. رفع پنچری لاستیک خودرو مثالی برای این تعمیرات است. تعمیرات معوقه زمانی انجام می‌شوند که خرابی دستگاه به صورت محدود و بخشی بوده و روند عملیات را دچار توقف ننماید. لذا، می‌توان تعمیرات این بخش را تا آخر شیفت کاری یا هر زمان مناسب دیگری به تعویق انداخت. ترک خوردن شیشه جلوی خودرو و تعویض آن، نمونه‌ای از این نوع تعمیرات است.

۵-۴-۲- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه عبارت است از یک برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دقیق برای انجام فعالیت‌های نگهداری مورد نیاز با هدف جلوگیری از فرسایش غیرعادی اجزای ماشین و کاهش توقف‌های اضطراری. در این روش، دستگاه در بازه‌های زمانی خاص و بر اساس زمان‌بندی مشخصی مورد بازرسی و عیب‌یابی و یا تعمیر قرار می‌گیرد (Dhillon, 2006). به عبارتی، این استراتژی بیان‌کننده مجموعه‌ای از عملیات برنامه‌ریزی شده بازرسی، سرویس و تعمیرات برای حفظ شرایط مطلوب کارکرد دستگاه و پیشگیری از خرابی جدی آن است (Pham, 2003). برنامه‌ریزی و تعیین زمان مناسب این تعمیرات به دو طریق عمده انجام می‌گیرد: (۱) تعمیر و نگهداری مبتنی برپایش وضعیت^۳ (۲) تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان^۴.

^۱ Emergency/Immediate maintenance

^۲ Deferred maintenance

^۳ Condition Based Maintenance (CBM)

^۴ Time Based Maintenance (TBM)

۵-۴-۱- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت (C.B.M)^۱

این نوع تعمیر و نگهداری به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌گردد که جهت تعیین شرایط فنی کارکرد دستگاه (اندازه‌گیری میزان فرسایش اجزاء) در حین بهره‌برداری انجام‌شده و بر اساس نتایج حاصل از آن، زمان و نوع فعالیت تعمیر پیشگیرانه مورد نیاز تعیین می‌گردد. فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت عبارت‌اند از (IEC-60300-3-14):

الف) اندازه‌گیری شرایط دستگاه با استفاده از ابزار توسط انسان (آزمون عملکرد)

ب) بازرسی و اندازه‌گیری پیوسته توسط ابزار (پایش وضعیت و بازرسی)

۵-۴-۲- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان (T.B.M)^۲

تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان را، شاید بتوان شناخته شده‌ترین و رایج‌ترین نوع تعمیر و نگهداری نامید. در این روش، دستگاه صرف‌نظر از شرایطی که در آن است، در بازه‌های زمانی مشخص به‌عنوان مثال هر ۱۰۰ ساعت یک‌بار مورد بازرسی، سرویس یا تعمیرات پیشگیرانه قرار می‌گیرد. برای تعیین بهترین فاصله زمانی تعمیرات^۳ سه رهیافت عمده به شرح زیر وجود دارد:

الف) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان^۴: در این مورد با توجه به شرایط حاکم بر فرآیند تولید و نیز مشخصات طراحی دستگاه، یک سطح حداقل برای قابلیت اطمینان هر دستگاه یا زیرسیستم‌های آن تعیین می‌شود و لذا قابلیت اطمینان دستگاه نباید از این حد پائین‌تر بیاید (Barabady & Kumar, 2008). تعمیرات پیشگیرانه در بازه‌های زمانی معادل با این حد قابلیت اطمینان انجام می‌گیرند؛ بنابراین، در این مورد هدف از تعمیر و نگهداری پیشگیرانه افزایش قابلیت اطمینان است.

^۱. Condition Based Maintenance

^۲. Time Based Maintenance

^۳. Maintenance interval

^۴. Reliability-based maintenance scheduling

ب) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر نرخ خرابی^۱: در این مورد نیز همچون مورد بالا، با توجه به سطح طراحی و نیز استانداردهای عملیاتی و ایمنی موجود در هر دستگاه، یک حد بیشینه برای نرخ خرابی دستگاه تعیین می‌شود. عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازه‌های زمانی که این دستگاه به نرخ مذکور می‌رسد بر روی دستگاه اجرا می‌شود تا از این طریق نرخ خرابی دستگاه بهبود یافته و در یک حد تقریباً ثابتی نگه‌داشته شود (Ghodrati, 2010). هدف تعمیرات پیشگیرانه در این مورد، کاهش نرخ خرابی دستگاه خواهد بود.

ج) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر حداقل هزینه^۲: در این روش بهترین زمان تعمیر و نگهداری طوری انتخاب می‌شود که هزینه کل تعمیرات اعم از اصلاحی یا پیشگیرانه به حداقل برسد. این روش که "بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری" نیز نامیده می‌شود، قطعی‌ترین و مناسب‌ترین روش تعیین تعمیرات پیشگیرانه به حساب می‌آید (Campbell et al., 2001) اما باید توجه نمود در برخی دستگاه‌ها با توجه به شرایط عملیاتی موجود، شاید روش مبتنی بر قابلیت اطمینان یا نرخ خرابی تنها راهکار باشد گرچه ممکن است از نظر هزینه این روش‌ها بهینه نباشند.

در مجموع، هر یک از استراتژی‌های PM که برای یک دستگاه انتخاب شوند، یک سری فعالیت‌های پیشگیرانه استاندارد انجام می‌گیرند که به‌طور خلاصه عبارت‌اند از (Campbell et al., 2001):

الف) فعالیت‌هایی برای جلوگیری از فرسایش غیرعادی اجزاء ماشین شامل تمیزکاری، آچارکشی و روان‌سازی (روغن‌کاری و گریس‌کاری)

ب) بازرسی فنی برای کشف خرابی‌های نهفته یا خرابی‌های محتمل در آینده

ج) فعالیت‌هایی برای کاهش توقف‌های اضطراری شامل تعمیر و تعویض‌های دوره‌ای مطابق با برنامه زمانی از پیش تعیین‌شده

^۱. Failure-rate-based maintenance scheduling

^۲. Cost-effective maintenance scheduling

شایان ذکر است، روش و تجهیزاتی که برای PM انتخاب می‌شوند و یا محدوده زمانی که سیستم PM می‌تواند گسترش و ارتقاء یابد، تماماً به نوع صنعت و ماشین‌آلات مربوطه بستگی دارد. برای مثال، شاید در یک واحد صنعتی بازرسی‌های متکی بر حواس انسانی توسط تکنسین‌ها کافی و اقتصادی بوده ولی تجهیز واحد فنی به سیستم‌های پایش مثل ارتعاش سنجی مقرون به صرفه نباشد، برای چنین صنعتی وجود سیستم PM در همان حد اولیه مؤثر است ولی این سیستم به هیچ وجه برای یک واحد صنعتی خاص با ماشین‌آلات ویژه، مؤثر و کارآمد نخواهد بود.

۵-۵- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های ناوگان ترابری معدن

بزرگ طزره

با دقت در مباحث ارائه‌شده، مشخص می‌شود که انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب برای یک دستگاه امری پیچیده بوده و تصمیم‌گیری چندمعیاره به حساب می‌آید. علاوه بر این، وجود برخی محدودیت‌ها و پارامترهای تحمیل‌شده به دستگاه، تصمیم‌گیری و گزینه‌های پیش رو را محدودتر می‌کند و لذا نمی‌توان مراحل انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری را به صورت نظام‌مند پیش برد. با توجه به اینکه از کارافتادگی هر یک از ماشین‌های ناوگان ترابری موجب توقف آن و درنهایت توقف سیستم تولید معدن می‌شود، انتخاب استراتژی مناسب در اجرای تعمیرات و نگهداری تجهیزات مختلف ماشین‌ها ضرورت دارد؛ بنابراین حفظ شرایط عملیات تولید معدن در سطح مشخصی از قابلیت اطمینان از اهداف مهم تعمیر و نگهداری محسوب می‌شود. با توجه به اینکه در تعمیر و نگهداری اصلاحی، تعمیر و نگهداری تنها در صورت وقوع خرابی صورت می‌گیرد، لذا استفاده از این استراتژی در تثبیت هر یک از ماشین‌های سیستم تولید در سطح معینی از قابلیت اطمینان در تناقض است؛ بنابراین، در این تحقیق از استراتژی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به منظور ارائه برنامه تعمیر و نگهداری استفاده شده است. از طرف دیگر با توجه به عدم وجود هرگونه سیستم پایش وضعیت ناوگان تولید در معدن تونل بزرگ طزره، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان به عنوان

استراتژی اصلی برای ناوگان تولید معدن انتخاب شده است.

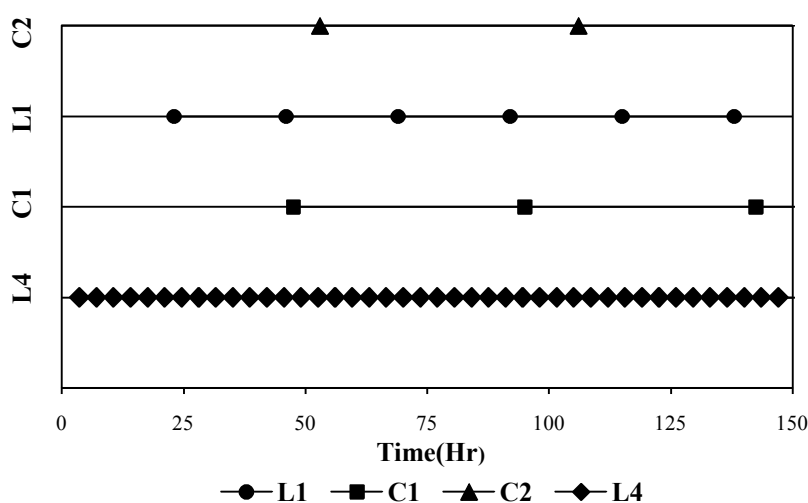
با در نظر گرفتن منحنی‌های قابلیت اطمینان ارائه شده برای ماشین‌های مختلف، امکانات اجرایی موجود در معدن و تخصص تعمیرکاران، قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، به‌عنوان حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی ماشین‌های ناوگان ترابری در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، زمانی که هر زیرسیستم به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد برسد، به‌عنوان دوره تعمیرات پیشگیرانه آن زیرسیستم انتخاب شده است. در ادامه به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌های ناوگان ترابری معدن پرداخته شده است.

۵-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های مسیر A معدن بزرگ طزره

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای ماشین‌های مسیر A، در جدول (۱-۵) و شکل (۱-۵) آورده شده است.

جدول ۱-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مختلف مسیر A

زیرسیستم	لکوموتیو ۱ (L1)	نوار نقاله ۱ (C1)	نوار نقاله ۲ (C2)	لکوموتیو ۴ (C4)
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ (ساعت)	۲۳	۴۷	۵۳	۴

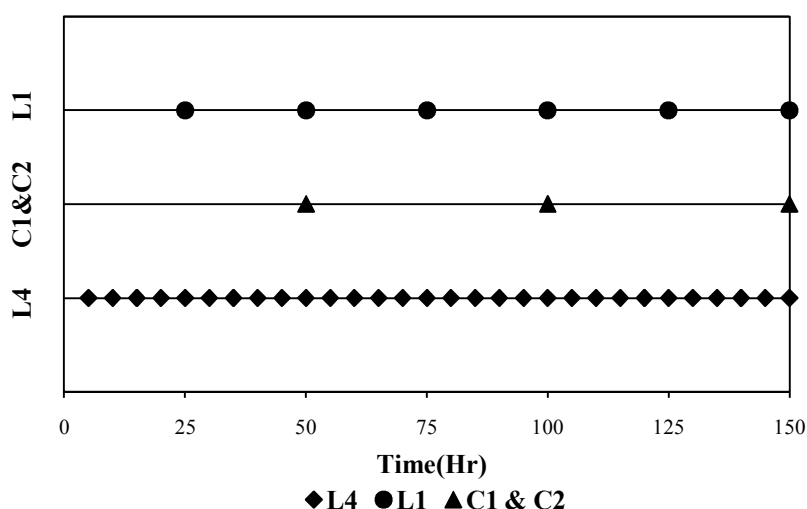


شکل ۱-۵- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مسیر A

با توجه به جدول (۵-۱)، لکوموتیو شماره ۴، با کوتاه‌ترین زمان و نوار نقاله شماره ۲ با طولانی‌ترین زمان در بین سایر ماشین‌ها، به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد خواهند رسید. به‌منظور سهولت در اجرای تعمیر و نگهداری، می‌توان تعمیراتی که دوره زمانی نزدیک به هم دارند را با هم ترکیب و طی یک عملیات واحد تعمیر و نگهداری انجام داد. برای این منظور، نوار نقاله شماره ۱ و نوار نقاله شماره ۲ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۵۰ ساعت یک‌بار انجام می‌شوند. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری لکوموتیو شماره ۱ و لکوموتیو شماره ۴ به ترتیب پس از ۲۵ و ۵ ساعت انجام خواهد گرفت. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۵-۲) و شکل (۵-۲) نشان داده شده است. با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می‌شود که در پایان هر شیفت (۸ ساعت)، لکوموتیو شماره ۴، یک بار مورد بازرسی و تعمیر پیشگیرانه قرار خواهد گرفت.

جدول ۵-۲- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای تجهیزات مسیر A

زیرسیستم	لکوموتیو ۴	لکوموتیو ۱	نوار نقاله ۱- نوار نقاله ۲
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۵	۲۵	۵۰

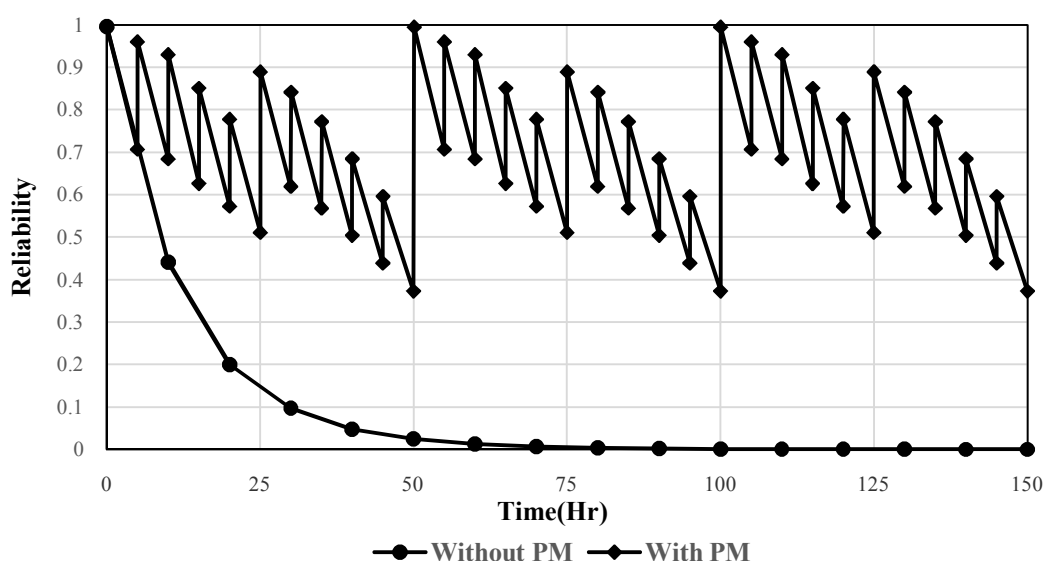


شکل ۵-۲- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای تجهیزات مسیر A

۵-۶-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر A

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به دلیل جبران خرابی و بهبود شرایط عملیاتی دستگاه، باعث افزایش قابلیت اطمینان نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری می‌شود. میزان بهبود در قابلیت اطمینان، به‌طور مستقیم به رفتار خرابی و قابلیت اطمینان دستگاه و زیرسیستم‌های آن بستگی دارد. با توجه به نتایج تحلیل داده‌های خرابی، مشخص گردید که داده‌های خرابی هر چهار ماشین ناوگان ترابری معدن تونل بزرگ طزره، از نظر آماری مستقل و مانا بوده و قابلیت اطمینان آن‌ها از فرآیند تجدیدشونده پیروی می‌کنند. پیروی کردن این زیرسیستم‌ها از فرآیند تجدیدشونده بدین معنی است که با هر تعمیری که بر روی این دستگاه‌ها انجام می‌شود، سیستم از نظر عملکرد و قابلیت اطمینان، تجدید شده و قابلیت اطمینان هر ماشین پس از هر تعمیر پیشگیرانه به ۱۰۰ درصد بازمی‌گردد (Ascher & Feingold, 1984; Rausand & Hoyland, 2004).

با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل مسیر A و ماشین‌های آن به شرح جدول (۱) پیوست ۲ تغییر می‌کند. شکل (۵-۴) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- منحنی قابلیت اطمینان تجهیزات مسیر A پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

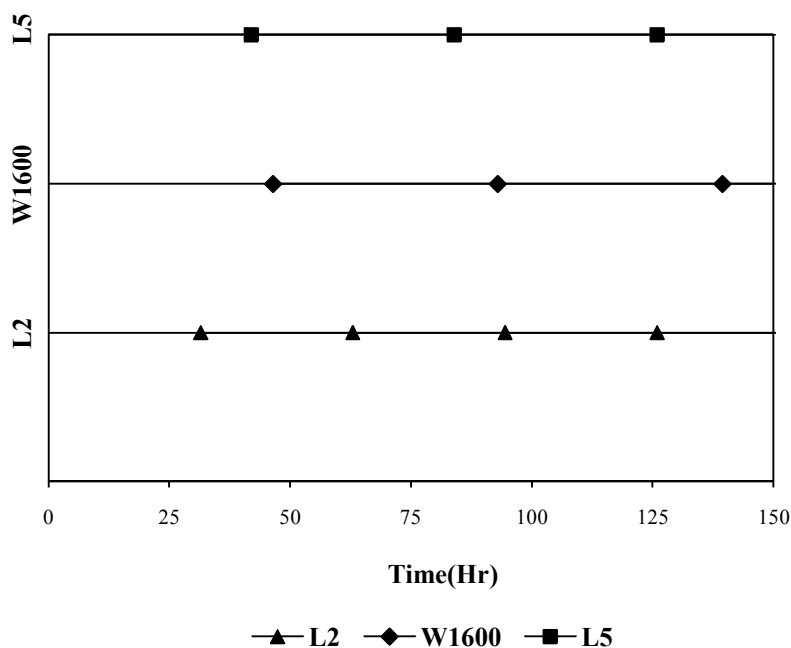
با توجه به شکل (۴-۵)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق است. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان دستگاه دچار جهش شده و از مقدار ۰/۷۰ به ۰/۹۶ افزایش می‌یابد. باگذشت زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و دستگاه در زمان ۱۰ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان، سه ماشین لکوموتیو شماره ۱، نوار نقاله شماره ۱ و نوار نقاله شماره ۲ به‌طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند، بنابراین، با توجه به افزایش همزمان قابلیت اطمینان این سه ماشین، قابلیت اطمینان کل ناوگان مسیر A به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در زمان ۲۵ ساعت که ماشین‌های لکوموتیو شماره ۱ و لکوموتیو شماره ۴ تحت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار می‌گیرند، قابلیت اطمینان دستگاه از ۵۱٪ به ۸۸/۹٪ بهبود می‌یابد. باگذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به‌صورت دوره‌ای ادامه می‌یابد. با این وجود، با دقت در منحنی مشخص می‌شود که روند کاهش قابلیت اطمینان پس از انجام تعمیرات، بسیار کندتر از منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیرات پیشگیرانه است. همچنین، شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر A ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره را در حدفاصل ۳۷٪-۹۹٪ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان ماشین در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی ماشین بوده و به‌شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک می‌کند.

۵-۷- برنامه تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های مسیر B معدن بزرگ طزره

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای ماشین‌های ناوگان ترابری، در جدول (۳-۵) و شکل (۵-۵) آورده شده است.

جدول ۳-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های ناوگان ترابری مسیر B

زیرسیستم	لکوموتیو ۲	وینچ ۱۶۰۰	لکوموتیو ۵
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ (ساعت)	۳۱/۵	۴۶/۵	۴۲



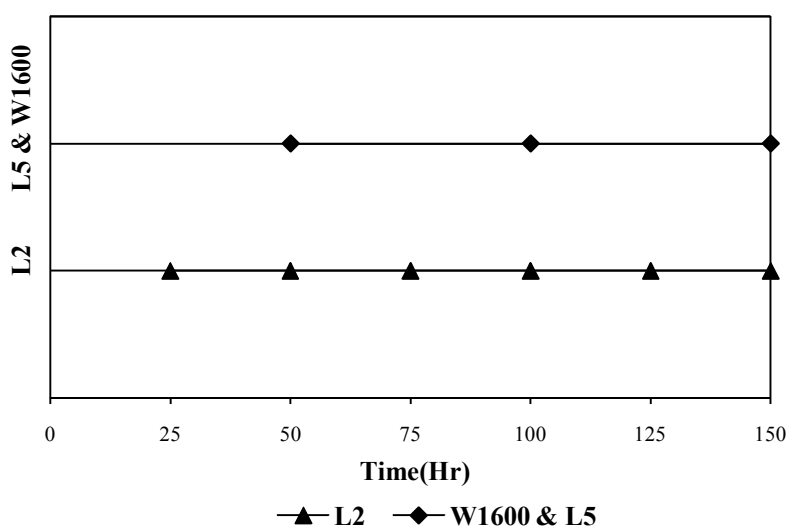
شکل ۵-۴- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های مسیر B

با توجه به جدول (۵-۳)، لکوموتیو شماره ۲، با کوتاه‌ترین زمان و وینچ ۱۶۰۰ با طولانی‌ترین زمان در بین سایر ماشین‌ها، به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد می‌رسند. به منظور سهولت در اجرای تعمیر و نگهداری، می‌توان تعمیراتی که دوره زمانی نزدیک به هم دارند را با هم ترکیب و طی یک عملیات واحد تعمیر و نگهداری انجام داد. برای این منظور ماشین‌های وینچ ۱۶۰۰ و لکوموتیو شماره ۵ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۵۰ ساعت یکبار انجام می‌شوند. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری لکوموتیو شماره ۲ پس از ۲۵ ساعت انجام خواهد شد. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۵-۴) و شکل (۵-۶) نشان داده شده است.

با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می‌شود که در پایان هر ۳ شیفت (۸ ساعت)، لکوموتیو شماره ۲، یکبار مورد بازرسی و تعمیر پیشگیرانه قرار گرفته است.

جدول ۵-۴- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای ماشین‌های مسیر B

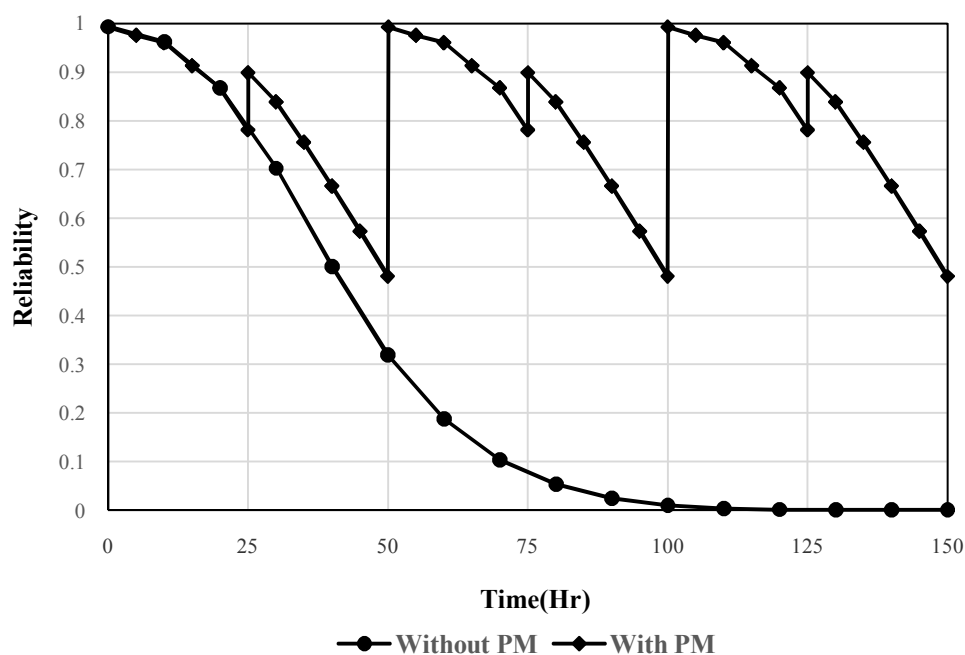
زیرسیستم	لکوموتیو ۲	وینچ ۱۶۰۰ + لکوموتیو ۵
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۲۵	۵۰



شکل ۵-۵- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ماشین‌های مسیر B

۵-۷-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر B

در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری مسیر B و ماشین‌های آن به شرح جدول (۲) پیوست ۲ تغییر می‌کند. شکل (۵-۷) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر B پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

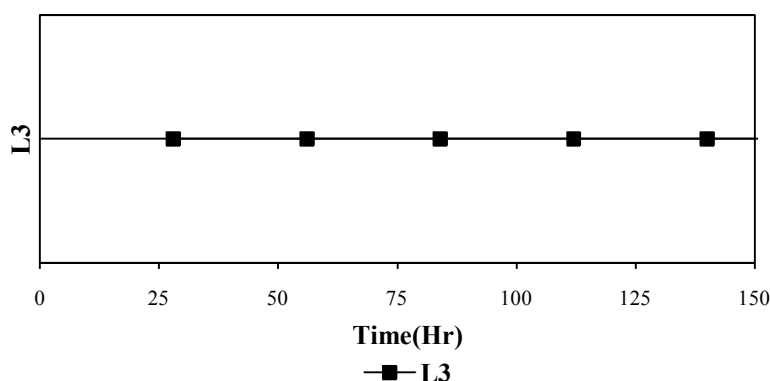
با توجه به شکل (۵-۷)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۲۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق می‌باشند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان ماشین دچار جهش شده و از مقدار $0/78$ به $0/88/9$ افزایش می‌یابد. باگذشت زمان، قابلیت اطمینان ماشین کاهش یافته و دستگاه در زمان ۵۰ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان همه ماشین‌ها به‌طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند. لذا، با توجه به افزایش توأم قابلیت اطمینان این سه زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل دستگاه به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در این زمان قابلیت اطمینان ماشین به $99/2\%$ بهبود می‌یابد. باگذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت دوره‌ای ادامه می‌یابد. شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین‌های ناوگان ترابری مسیر B معدن بزرگ طزره را در حفاصل $48\% - 99\%$ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان دستگاه در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی دستگاه بوده و به شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک می‌کند.

۵-۸- برنامه تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های مسیر C معدن بزرگ طزره

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای تنها ماشین ترابری مسیر C، در جدول (۵-۵) و شکل (۵-۸) آورده شده است.

جدول ۵-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین‌های ناوگان ترابری مسیر C

لکومتیو ۳	زیرسیستم
۲۸	زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ (ساعت)

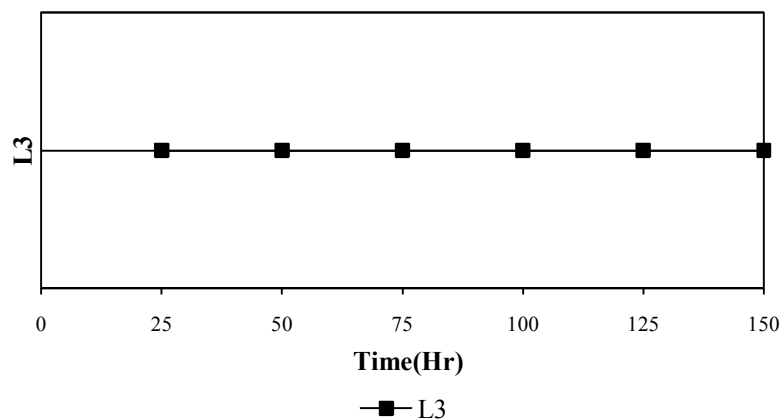


شکل ۵-۷- دوره تعمیرات برای قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای ماشین مسیر C

با توجه به جدول (۵-۵)، لکوموتیو شماره ۳، پس از گذشت ۲۸ ساعت از شروع کار به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد می‌رسد. اما نظر به اینکه لکوموتیو شماره ۳ تنها ماشین مسیر C است و در مسیرهای دیگر در ۲۵ ساعت برنامه تعمیرات وجود دارد با این علت عملیات تعمیر و نگهداری لکوموتیو شماره ۳ را نیز برای پس از ۲۵ ساعت انجام تغییر می‌دهیم. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۴-۵) و شکل (۹-۵) نشان داده شده است. با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می‌شود که در پایان هر ۳ شیفت لکوموتیو شماره ۳ یک بار مورد بازرسی و تعمیر پیشگیرانه قرار گرفته است.

جدول ۵-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبودیافته برای لکوموتیو شماره ۳ مسیر C

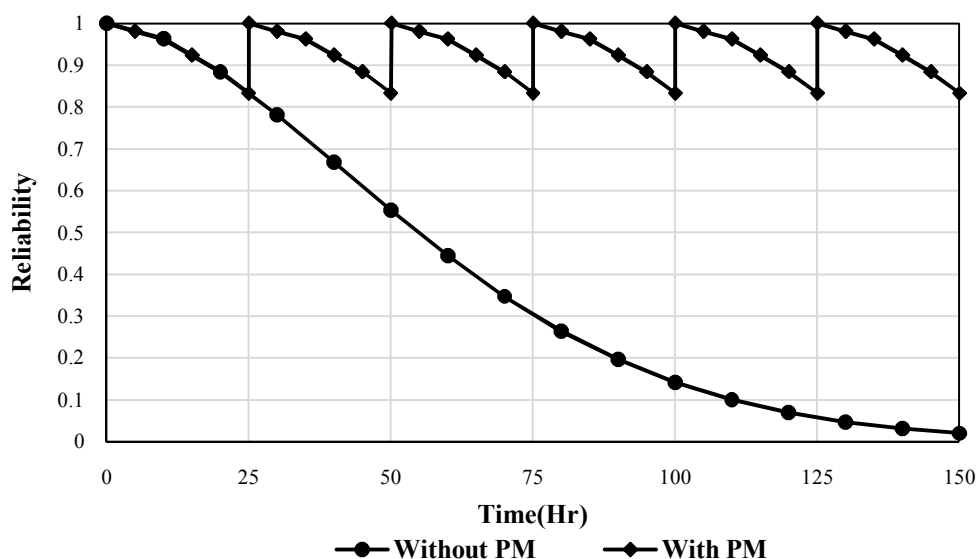
لکوموتیو ۳	زیرسیستم
۲۵	دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)



شکل ۵-۸- طرح بهبودیافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای لکوموتیو شماره ۳ مسیر C

۵-۸-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیر C

در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ مسیر C به شرح جدول (۳) پیوست ۲ تغییر می‌کند. شکل (۵-۱۰) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.



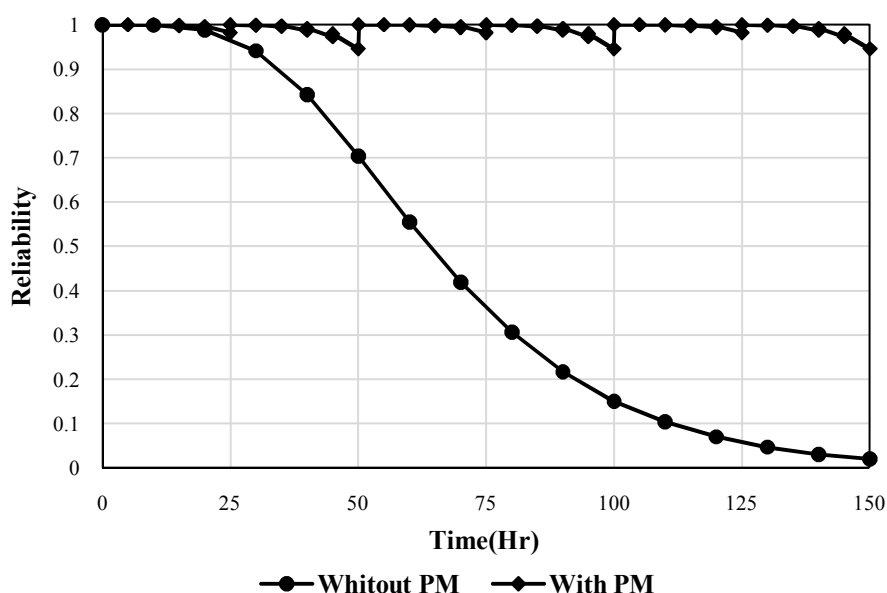
شکل ۵-۹- منحنی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ مسیر C پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به شکل (۵-۱۰)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۲۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق می‌باشند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳ دچار جهش شده و از مقدار 0.83 به 1 افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان ماشین کاهش یافته و دستگاه در زمان ۵۰ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. لذا، با توجه به افزایش توأم قابلیت اطمینان لکوموتیو شماره ۳، قابلیت اطمینان کل مسیر C به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در این زمان قابلیت اطمینان ماشین به 100% بهبود می‌یابد. با گذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت دوره‌ای ادامه می‌یابد. شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین ناوگان ترابری مسیر C (لکوموتیو شماره ۳) معدن بزرگ طزره را در حدفاصل

۸۸٪ - ۱۰۰٪ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان دستگاه در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی دستگاه بوده و به شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک می‌کند.

۵-۹- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر ناوگان ترابری تونل بزرگ طزره

در بخش‌های گذشته به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌های مسیر A، B و C ناوگان ترابری تونل بزرگ طزره و تأثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان هر یک از مسیرها پرداخته شد. در این بخش با در نظر گرفتن تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بهبود قابلیت اطمینان ماشین‌های ترابری، به بررسی تأثیر برنامه‌های نگهداری ارائه شده بر قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری معدن پرداخته شده است. در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های ناوگان ترابری معدن به شرح جدول (۴) پیوست ۲ تغییر می‌کند. شکل (۵-۱۱)، منحنی قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری معدن بزرگ طزره را پس از اعمال تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه نشان می‌دهد. با اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن در حداصل ۹۷٪ تا ۱۰۰٪ افزایش خواهد یافت.



شکل ۵-۱۰- منحنی قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری معدن تونل بزرگ طزره پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه

۵-۱۰- نتیجه‌گیری:

در این فصل با استفاده از نتایج تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان ترابری و منحنی‌های قابلیت اطمینان به دست آمده در فصل قبل، استراتژی تعمیر و نگهداری دستگاه انتخاب گردید. علاوه بر عوامل فوق، حفظ پیوستگی تولید و جلوگیری از خرابی‌های متعدد دستگاه نیز به عنوان عوامل تأثیرگذار در انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مدنظر قرار گرفتند. با تکیه بر موارد مذکور، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به عنوان گزینه اصلی برای بهبود قابلیت اطمینان و دستیابی به حفظ پیوستگی در فرایند تولید، به عنوان استراتژی اجرایی انتخاب گردید. هدف آرمانی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دستگاه، دستیابی به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای تمامی ماشین‌ها، در نظر گرفته شد و برای رسیدن به این هدف، برنامه جامعی برای تعمیرات پیشگیرانه دستگاه پیشنهاد گردید. طبق برنامه پیشنهادی، الف: لکوموتیو شماره ۴ هر پنج ساعت یک بار ب: لکوموتیو شماره ۱، لکوموتیو شماره ۲ و لکوموتیو شماره ۳ هر بیست و پنج ساعت یک بار ج: نوار شماره ۱، نوار شماره ۲، وینچ ۱۶۰۰ و لکوموتیو شماره ۵ هر ۵۰ ساعت یک بار مورد بازرسی و تعمیرات پیشگیرانه قرار گیرند. همچنین، با توجه به آمار خرابی‌های هر ماشین، توصیه می‌شود که در عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تنها نقاط حساس و با آمار خرابی بالا مورد بازرسی و تعمیر قرار گیرند تا زمان تعمیرات پیشگیرانه به حداقل برسد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه‌گیری

دستیابی به تولید بالا و حفظ پیوستگی تولید، یکی از اهداف آرمانی در معادن به شمار می‌آید. به دلیل وجود هزینه‌های سرمایه‌گذاری و همچنین هزینه‌های جاری زیاد در معادن بخصوص معادن زیرزمینی، اهمیت تولید از دست رفته در این معادن، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این پایان‌نامه، قابلیت اطمینان سیستم تولید زغال‌سنگ در معدن بزرگ طزره مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. ابتدا تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حوزه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی که در ۴۹ سال اخیر ارائه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. با آگاهی از نکات ضعف و قوت مطالعات پیشین، چارچوب اصلی تحقیق تعیین گردید.

در فاز اول این پایان‌نامه، برای اولین بار، ماشین‌های عملیاتی تولید زغال‌سنگ در معادن طزره تعیین و معرفی گردیدند. برای این منظور، از اطلاعات موجود در دفتر فنی و طراحی معدن زغال‌سنگ بزرگ طزره و نیز مشخصات و ساختار اجرایی معدن استفاده شد. برای دستیابی به یک مرزبندی شفاف میان ماشین‌های مختلف تولید، اطلاعات دقیق در مورد ماشین‌ها و اجزای مهم موجود در سیستم تولید مورد بحث قرار گرفته و نحوه ارتباطات این اجزاء برای دستیابی به عملکرد اصلی هر بخش مورد تحلیل و معرفی قرار گرفتند. در ادامه به‌منظور آشنایی کامل با جزئیات عملکرد و نیز تحلیل رفتار خرابی‌های

ماشین آلات معدن بزرگ طزره در مدت ۷ ماه اقدام به ثبت و جمع آوری اطلاعات شده است. در این پایان نامه، برای تحلیل قابلیت اطمینان از روش تحلیل آماری و مدل سازی استفاده شد.

نتایج کلی حاصل از این تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل می باشد:

۱- مطالعه تحقیقات گذشته نشان داد، اگرچه تاکنون مطالعاتی در مورد قابلیت اطمینان سیستم تولید و تجهیزات مرتبط با آن در روش استخراج زیرزمینی غیرمکانیزه گزارش گردیده، اما در ایران تاکنون در رابطه با این موضوع مطالعه علمی صورت نگرفته است. همچنین به رغم اهمیت بسیار پیوستگی تولید معدن، قابلیت اطمینان این دستگاه ها به صورت اساسی مورد ارزیابی قرار نگرفته است و مطالعات انجام شده، متناسب با اهمیت این دستگاه و نقش انکارناپذیر آن در تولید زغال سنگ در کشور نمی باشد. لذا، انجام یک مطالعه پایه ای برای تحلیل قابلیت اطمینان آن ها، به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان کل سیستم تولید الزامی است.

۲- به منظور تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید ماشین های معرفی شده، همانند تمامی مطالعات قابلیت اطمینان، نیاز به یک مطالعه موردی برای جمع آوری داده می باشد. برای این منظور، معدن بزرگ طزره به عنوان مطالعه موردی این پایان نامه انتخاب گردید. اطمینان از کیفیت و صحت داده ها، حضور مستمر در معدن، زمان جمع آوری داده ها و آشنایی کامل با سیستم تولید معدن، سه عامل مهم برای انتخاب معدن بزرگ طزره بودند.

۳- نتایج جمع آوری، طبقه بندی و بررسی داده های خرابی ماشین های سیستم تولید نشان داد که سه سیستم تولید هوای فشرده، تهویه فضاها و زیرزمینی و کندن و استخراج زغال سنگ به جهت شرایط موجود دارای قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ بوده و تولید معدن هیچ گاه به جهت نقص در این قسمت ها متوقف نخواهد شد.

۴- بخش ناوگان ترابری، لکوموتیو شماره ۱ در مسیر A از نظر تعداد دفعات خرابی و مدت زمان خرابی دارای بیشترین فراوانی بوده است. اما این ماشین در خصوص نواقص فنی و مکانیک بالاترین فراوانی زمان خرابی و در بخش سرویس دوره ای بالاترین فراوانی تعداد دفعات خرابی را به خود اختصاص داده

است. در مسیر A نوار نقاله شماره ۲ کمترین فراوانی مدت زمان خرابی و نوار نقاله ۱ کمترین فراوانی تعداد دفعات خرابی را به خود اختصاص داده‌اند.

۵- در مسیر B لکوموتیو شماره ۲ از نظر مدت زمان خرابی و تعداد دفعات خرابی بالاترین فراوانی را داشته و همچنین در این ماشین بالاترین فراوانی زمان خرابی مربوط به نواقص فنی و مکانیک و بالاترین فراوانی تعداد دفعات خرابی مربوط به سرویس‌های دوره‌ای بوده است اما وینچ ۱۶۰۰ در بحث مدت زمان خرابی و لکوموتیو شماره ۵ در بحث تعداد دفعات خرابی کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند

۶- در مسیر C تنها ماشین این مسیر لکوموتیو شماره ۳ است که در این ماشین سرویس دوره‌ای بالاترین فراوانی مدت زمان خرابی و تعداد دفعات خرابی را به خود اختصاص داده است.

۷- هدف اصلی این پایان‌نامه تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید بوده است. برای محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم، قابلیت اطمینان هر ماشین محاسبه شده و با توجه به عملکرد سری ماشین‌های هر مسیر قابلیت اطمینان مسیرها به‌طور مجزا محاسبه شد و در نهایت با در نظر گرفتن عملکرد موازی سه مسیر، قابلیت اطمینان کل محاسبه شد. منحنی قابلیت اطمینانی که در این پایان‌نامه ارائه شده است، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری پس از ۱۸۰ ساعت عملکرد، تقریباً به صفر می‌رسد، باگذشت ۴۳ ساعت به ۸۰٪ و پس از ۶۴ ساعت، احتمال خرابی و کارکرد مناسب دستگاه برابر می‌شود. بررسی نشان می‌دهد به‌طور میانگین، در هر ساعت نیم درصد از قابلیت اطمینان ناوگان ترابری کاسته می‌شود.

۸- در آخرین بخش این پایان‌نامه، به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری ماشین‌های ناوگان ترابری پرداخته شد. در این بخش سعی شد تا با استفاده از مشخصات و رفتار خرابی ماشین‌های مختلف، برنامه زمانی مناسب برای تعمیر و نگهداری پیشنهاد گردد. با توجه به اهمیت تولید پیوسته در معادن، در این مطالعه حفظ قابلیت اطمینان هر ماشین در سطح ۸۰٪، به‌عنوان هدف آرمانی تحقیق انتخاب شد. بر طبق این هدف‌گذاری، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به‌عنوان استراتژی تعمیرات

ماشین‌ها انتخاب گردید. با در نظر گرفتن منحنی قابلیت اطمینان هر ماشین، زمان مناسب دوره تعمیرات هر کدام از آن‌ها محاسبه شد. به‌منظور پرهیز از توقف‌های متعدد و جلوگیری از کاهش قابلیت دسترسی، دوره‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌های مختلف باهم ادغام‌شده و بسته‌های عملیاتی تعمیر و نگهداری برای ترکیبی از ماشین‌ها پیشنهاد گردید. برای این منظور، پیشنهاد می‌شود، لکوموتیو شماره ۴ هر پنج ساعت یکبار، لکوموتیو شماره ۱، لکوموتیو شماره ۲ و لکوموتیو شماره ۳ هر ۲۵ ساعت یکبار، لکوموتیو شماره ۵، نوار نقاله شماره ۱ و شماره ۲ هر ۵۰ ساعت یکبار مورد بازرسی و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرند. در این حالت هر ۵۰ ساعت یکبار، تمامی ماشین‌ها به‌طور یکجا مورد تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرند.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری اشاره شده بر روی ماشین‌های ناوگان ترابری، روند کاهش قابلیت اطمینان پس از انجام تعمیرات، بسیار کندتر از منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیرات پیشگیرانه می‌شود. همچنین شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان داد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی در این پایان‌نامه، می‌توان قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری را در حداقل ۹۷٪-۱۰۰٪ حفظ کرد.

در این پایان‌نامه سعی شد تا فرآیند انتخاب استراتژی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری ناوگان ترابری، به‌صورت نظام‌مند و مرحله‌ای انجام‌شده و ساختار کلی این فرآیند به‌خوبی تبیین شود. با توجه به اینکه تاکنون، برنامه تعمیر و نگهداری مشابهی برای این تجهیزات ارائه نشده است، رهیافت ارائه‌شده در این پایان‌نامه می‌تواند به‌عنوان یک الگوی پایه مبنای تصمیم‌گیری‌های آینده برای سایر معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مطرح باشد.

۶-۲- پیشنهادها

مطالعه قابلیت اطمینان، اولین و اساسی‌ترین مرحله در مطالعه عملکرد و قابلیت تولید یک دستگاه است. خروجی‌های تحلیل قابلیت اطمینان، به‌عنوان ورودی بسیاری از تحلیل‌های مهم دیگر مطرح بوده و موردنیاز می‌باشند. لذا، تحلیل قابلیت اطمینان، بستر بسیار مناسب و پایه علمی برای شناخت

مشخصات مهم دستگاه و برنامه ریزی تعمیر و نگهداری را فراهم می سازد؛ بنابراین، نتایج حاصل از این پایان نامه می توانند سرآغاز بسیار خوبی برای تحقیقات عمیق تر در مورد سیستم تولید زغال سنگ در معادن زیرزمینی باشد. به طور خلاصه، موارد ذیل برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شوند:

۱- تحلیل قابلیت دسترسی ماشین های ناوگان ترابری: با استفاده از داده های خرابی جمع آوری شده در این پایان نامه می توان قابلیت دسترسی را محاسبه نموده و سپس با محاسبه تولید واقعی معدن، برنامه کوتاه مدت و میان مدت معدن را بازبینی و واقعی نمود.

۲- تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری (تعمیر پذیری)^۱: برای این منظور ابتدا باید زمان توقف مربوط به هر خرابی (زمان تعمیر) از پایگاه داده اصلی معدن استخراج شود. سپس داده های زمان های تعمیر به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و سپس تحلیل آماری بر روی این داده ها انجام شود. نتیجه این تحقیق بیانگر این موضوع خواهد بود که با چه احتمالی می توان عملیات تعمیر و نگهداری یک ماشین را در کمتر از یک زمان مشخص (مثلاً نیم ساعت) به اتمام رساند.

۳- مدل سازی و بهینه سازی هزینه های تعمیر و نگهداری ماشین ها: خروجی این تحقیق کمک خواهد کرد تا بهترین زمان ممکن برای انجام تعمیر و نگهداری ماشین ها را با حداقل هزینه محاسبه نمود. به عنوان مثال برای یافتن بهترین زمان تعویض بلبرینگ چرخ لکوموتیو، می توان مدل قابلیت اطمینان آن را محاسبه و با تشکیل مدل هزینه عملیات تعمیر و نگهداری، دوره زمانی تعویض با کمترین هزینه را انجام داد.

۴- از ساختار کلی و الگوی تصمیم گیری ارائه شده در این پایان نامه می توان به راحتی برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولید سایر معادن زیرزمینی (زغالی، فلزی و غیرفلزی) که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته اند، استفاده نمود.

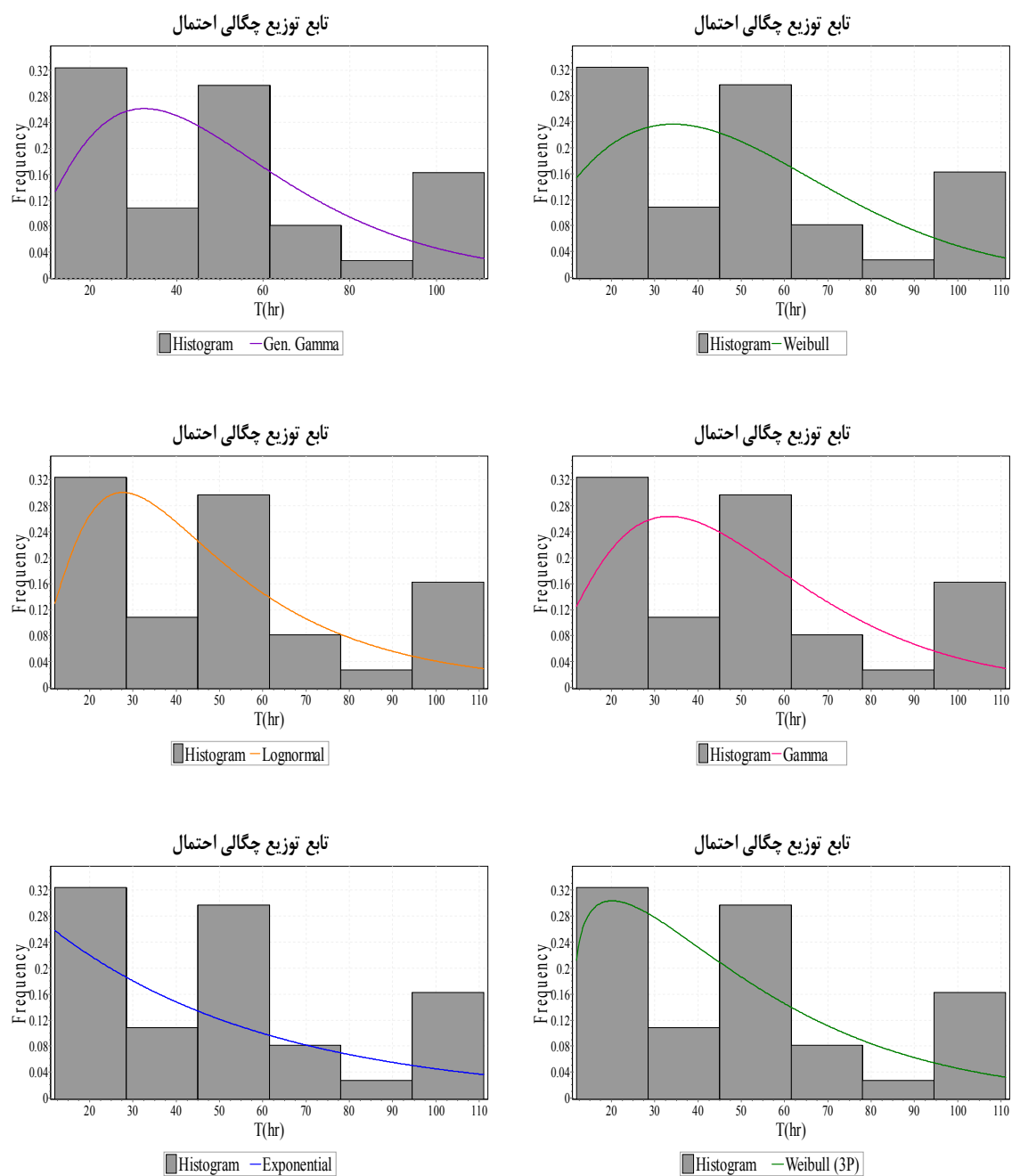
شایان ذکر است هر یک از عناوین مذکور، نیاز به یک پژوهش مستقل و جامع داشته و در چهارچوب یک طرح پژوهشی و یا پایان نامه جداگانه می توانند مطرح شوند.

^۱. Maintainability

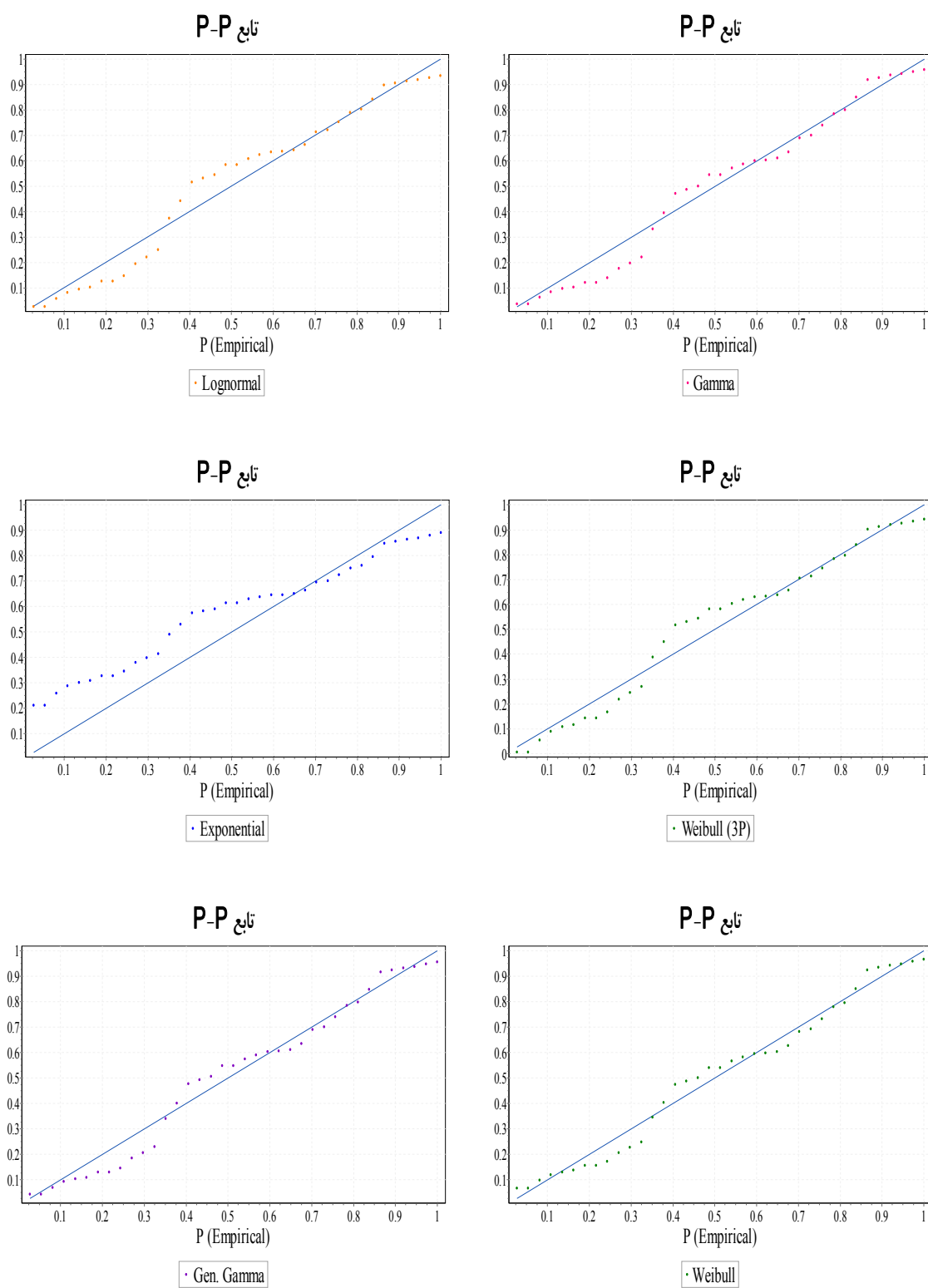
پیوست‌ها

پیوست ۱

**شکل تابع توزیع چگالی و نمودار P-P داده‌های خرابی
ماشین‌های ناوگان ترابری معدن بزرگ (لکوموتیو ۱)**



شکل ۱- نمودار تابع توزیع چگالی برای تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱



شکل ۲- نمودار P-P برای تحلیل داده‌های خرابی لکوموتیو شماره ۱

پیوست ۲

جداول داده های زمانبندی اصلاحی در مسیر های ترابری

جدول ۱- جدول قابلیت اطمینان با زمان بندی اصلاحی تعمیرات برای ماشین های مسیر A

Time(Hr)	مسیر A				
	لکوموتیو ۱	نوار ۱	نوار ۲	لکوموتیو ۴	قابلیت اطمینان کل
0	1	1	0.995	1	0.995
5	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
5.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
10	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
10.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
15	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
15.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
20	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
20.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
25	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
25.01	1	0.924	0.963	1	0.890
30	0.975	0.902	0.957	0.736	0.619
30.01	0.975	0.902	0.957	1	0.842
35	0.952	0.874	0.928	0.736	0.568
35.01	0.952	0.874	0.928	1	0.772
40	0.898	0.847	0.9	0.736	0.504
40.01	0.898	0.847	0.9	1	0.685
45	0.846	0.816	0.863	0.736	0.438
45.01	0.846	0.816	0.863	1	0.596
50	0.779	0.786	0.827	0.736	0.373
50.1	1	1	0.995	1	0.995
55	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
55.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
60	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
60.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
65	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
65.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
70	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
70.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
75	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
75.01	1	0.924	0.963	1	0.890
80	0.975	0.902	0.957	0.736	0.619
80.01	0.975	0.902	0.957	1	0.842
85	0.952	0.874	0.928	0.736	0.568
85.01	0.952	0.874	0.928	1	0.772
90	0.898	0.847	0.9	0.736	0.504
90.01	0.898	0.847	0.9	1	0.685
95	0.846	0.816	0.863	0.736	0.438
95.01	0.846	0.816	0.863	1	0.596
100	0.779	0.786	0.827	0.736	0.373
100.01	1	1	0.995	1	0.995
105	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707

Time(Hr)	مسیر A				
	لکوموتیو ۱	نوار ۱	نوار ۲	لکوموتیو ۴	قابلیت اطمینان کل
0	1	1	0.995	1	0.995
5	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
5.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
10	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
10.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
15	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
15.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
20	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
20.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
25	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
25.01	1	0.924	0.963	1	0.890
30	0.975	0.902	0.957	0.736	0.619
30.01	0.975	0.902	0.957	1	0.842
35	0.952	0.874	0.928	0.736	0.568
35.01	0.952	0.874	0.928	1	0.772
40	0.898	0.847	0.9	0.736	0.504
40.01	0.898	0.847	0.9	1	0.685
45	0.846	0.816	0.863	0.736	0.438
45.01	0.846	0.816	0.863	1	0.596
50	0.779	0.786	0.827	0.736	0.373
50.1	1	1	0.995	1	0.995
55	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
55.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
60	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
60.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
65	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
65.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
70	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
70.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
75	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
75.01	1	0.924	0.963	1	0.890
105.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
110	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
110.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
115	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
115.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
120	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
120.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
125	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
125.01	1	0.924	0.963	1	0.890
130	0.975	0.902	0.957	0.736	0.619
130.01	0.975	0.902	0.957	1	0.842
140	0.952	0.874	0.928	0.736	0.568
140.01	0.952	0.874	0.928	1	0.772

	مسیر A				
Time(Hr)	لکوموتیو ۱	نوار ۱	نوار ۲	لکوموتیو ۴	قابلیت اطمینان کل
0	1	1	0.995	1	0.995
5	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
5.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
10	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
10.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
15	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
15.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
20	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
20.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
25	0.779	0.925	0.963	0.736	0.511
25.01	1	0.924	0.963	1	0.890
30	0.975	0.902	0.957	0.736	0.619
30.01	0.975	0.902	0.957	1	0.842
35	0.952	0.874	0.928	0.736	0.568
35.01	0.952	0.874	0.928	1	0.772
40	0.898	0.847	0.9	0.736	0.504
40.01	0.898	0.847	0.9	1	0.685
45	0.846	0.816	0.863	0.736	0.438
45.01	0.846	0.816	0.863	1	0.596
50	0.779	0.786	0.827	0.736	0.373
50.1	1	1	0.995	1	0.995
55	0.975	0.991	0.994	0.736	0.707
55.01	0.975	0.991	0.994	1	0.960
60	0.952	0.984	0.993	0.736	0.684
60.01	0.952	0.984	0.993	1	0.930
65	0.898	0.966	0.981	0.736	0.626
65.01	0.898	0.966	0.981	1	0.851
70	0.846	0.949	0.969	0.736	0.573
70.01	0.846	0.949	0.969	1	0.778
140	0.898	0.847	0.9	0.736	0.504
140.01	0.898	0.847	0.9	1	0.685
145	0.846	0.816	0.863	0.736	0.438
145.01	0.846	0.816	0.863	1	0.596
150	0.779	0.786	0.827	0.736	0.373

جدول ۲- جدول قابلیت اطمینان با زمان بندی اصلاحی تعمیرات برای ماشین های مسیر B

Time(Hr)	مسیر شماره B			
	لکوموتیو ۲	وینچ ۱۶۰۰	لکوموتیو ۵	قابلیت اطمینان کل
0	0.995	1	0.997	0.992
10	0.968	0.999	0.993	0.960
20	0.91	0.993	0.96	0.867
25	0.865	0.971	0.93	0.781
25.01	0.995	0.971	0.93	0.899
30	0.981	0.95	0.9	0.839
40	0.939	0.865	0.82	0.666
50	0.865	0.767	0.725	0.481
50.1	0.995	1	0.997	0.992
60	0.968	0.999	0.993	0.960
70	0.91	0.993	0.96	0.867
75	0.865	0.971	0.93	0.781
75.01	0.995	0.971	0.93	0.899
80	0.981	0.95	0.9	0.839
90	0.939	0.865	0.82	0.666
100	0.865	0.767	0.725	0.481
100.01	0.995	1	0.997	0.992
110	0.968	0.999	0.993	0.960
120	0.91	0.993	0.96	0.867
125	0.865	0.971	0.93	0.781
125.01	0.995	0.971	0.93	0.899
130	0.981	0.95	0.9	0.839
140	0.939	0.865	0.82	0.666
150	0.865	0.767	0.725	0.481
150.01	0.995	1	0.997	0.992

جدول ۳- جدول قابلیت اطمینان با زمان بندی اصلاحی تعمیرات برای ماشین های مسیر C

Time(Hr)	مسیر C	
	لکوموتیو ۳	قابلیت اطمینان
0	1	1
10	0.963	0.963
20	0.884	0.884
25	0.833	0.833
25.01	1	1
30	0.981	0.981
40	0.924	0.924
50	0.833	0.833
50.1	1	1
60	0.963	0.963
70	0.884	0.884
75	0.833	0.833
75.01	1	1
80	0.981	0.981
90	0.924	0.924
100	0.833	0.833
100.01	1	1
110	0.963	0.963
120	0.884	0.884
125	0.833	0.833
125.01	1	1
130	0.981	0.981
140	0.924	0.924
150	0.833	0.833

جدول ۴- جدول قابلیت اطمینان با زمان بندی اصلاحی تعمیرات سه مسیر برای کل ناوگان ترابری

Time(Hr)	R(A)	1-R(A)	R(B)	1-R(B)	R(C)	1-R(C)	ضرب (1-R) سه مسیر	قابلیت اطمینان کل
0	0.995	0.005	0.992015	0.007985	1	0	0	1
5	0.706875	0.293125	0.975119	0.024881	0.981	0.019	0.000138572	0.999861
5.01	0.960428	0.039572	0.975119	0.024881	0.98	0.019	1.87075E-05	0.999981
10	0.684341	0.315659	0.960263	0.039737	0.96	0.037	0.00046410	0.999536
10.01	0.930211	0.069789	0.960263	0.039737	0.963	0.037	0.00010261	0.999897
15	0.626326	0.373674	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.002476467	0.997524
15.01	0.850986	0.149014	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.000987566	0.999012
20	0.572535	0.427465	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.00657089	0.993429
20.01	0.777901	0.222099	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.003414055	0.996586
25	0.510721	0.489279	0.781121	0.218879	0.833	0.167	0.017884536	0.982115
25.01	0.889812	0.110188	0.898515	0.101485	1	0	0	1
30	0.619442	0.380558	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.001165897	0.998834
30.01	0.841634	0.158366	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.00048518	0.999515
35	0.568051	0.431949	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.003901363	0.996099
35.01	0.772141	0.227859	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.002058027	0.997942
40	0.503825	0.496175	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.012593663	0.987406
40.01	0.684545	0.315455	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.008006716	0.991993
45	0.438443	0.561557	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.027798349	0.972202
45.01	0.59571	0.40429	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.020013248	0.979987
50	0.372686	0.627314	0.481005	0.518995	0.833	0.167	0.054370657	0.945629
50.1	0.995	0.005	0.992015	0.007985	1	0	0	1
55	0.706875	0.293125	0.975119	0.024881	0.981	0.019	0.000138572	0.999861
55.01	0.960428	0.039572	0.975119	0.024881	0.981	0.019	1.87075E-05	0.999981
60	0.684341	0.315659	0.960263	0.039737	0.963	0.037	0.000464107	0.999536
60.01	0.930211	0.069789	0.960263	0.039737	0.963	0.037	0.00010261	0.999897
65	0.626326	0.373674	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.002476467	0.997524
65.01	0.850986	0.149014	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.000987566	0.999012
70	0.572535	0.427465	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.00657089	0.993429
70.01	0.777901	0.222099	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.003414055	0.996586
75	0.510721	0.489279	0.781121	0.218879	0.833	0.167	0.017884536	0.982115
75.01	0.889812	0.110188	0.898515	0.101485	1	0	0	1
80	0.619442	0.380558	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.001165897	0.998834
80.01	0.841634	0.158366	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.00048518	0.999515
85	0.568051	0.431949	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.003901363	0.996099
85.01	0.772141	0.227859	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.002058027	0.997942
90	0.503825	0.496175	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.012593663	0.987406
90.01	0.684545	0.315455	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.008006716	0.991993
95	0.438443	0.561557	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.027798349	0.972202
95.01	0.59571	0.40429	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.020013248	0.979987
100	0.372686	0.627314	0.481005	0.518995	0.833	0.167	0.054370657	0.945629
100.01	0.995	0.005	0.992015	0.007985	1	0	0	1
105	0.706875	0.293125	0.975119	0.024881	0.981	0.019	0.000138572	0.999861
105.01	0.960428	0.039572	0.975119	0.024881	0.981	0.019	1.87075E-05	0.999981

110	0.684341	0.315659	0.960263	0.039737	0.963	0.037	0.000464107	0.999536
110.01	0.930211	0.069789	0.960263	0.039737	0.963	0.037	0.00010261	0.999897
115	0.626326	0.373674	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.002476467	0.997524
115.01	0.850986	0.149014	0.912798	0.087202	0.924	0.076	0.000987566	0.999012
120	0.572535	0.427465	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.00657089	0.993429
120.01	0.777901	0.222099	0.867485	0.132515	0.884	0.116	0.003414055	0.996586
125	0.510721	0.489279	0.781121	0.218879	0.833	0.167	0.017884536	0.982115
125.01	0.889812	0.110188	0.898515	0.101485	1	0	0	1
130	0.619442	0.380558	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.001165897	0.998834
130.01	0.841634	0.158366	0.838755	0.161245	0.981	0.019	0.00048518	0.999515
135	0.568051	0.431949	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.003901363	0.996099
135.01	0.772141	0.227859	0.755892	0.244108	0.963	0.037	0.002058027	0.997942
140	0.503825	0.496175	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.012593663	0.987406
140.01	0.684545	0.315455	0.666033	0.333967	0.924	0.076	0.008006716	0.991993
145	0.438443	0.561557	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.027798349	0.972202
145.01	0.59571	0.40429	0.573256	0.426744	0.884	0.116	0.020013248	0.979987
150	0.372686	0.627314	0.481005	0.518995	0.833	0.167	0.054370657	0.945629

منابع و مراجع

- چینلار ا.، (۱۳۸۰)، "آشنایی با فرآیندهای تصادفی"، ترجمه شاهکار غلام حسین. و ابوالقاسم بزرگنیا، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۵۲۲ صفحه.
- حاج شیر محمدی، ع.، (۱۳۹۰)، "برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (مدیریت فنی در صنایع)"، علی حاج شیر محمدی، چاپ شانزدهم، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ صفحه.
- حسینی، س. ه.، (۱۳۹۰)، "مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان شیر؛ مطالعه موردی: معدن زغالسنگ طبس"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- رحیم دل، م. ج.، (۱۳۹۱)، "مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری؛ مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرباسیان، م.، طباطبایی، ل.، (۱۳۸۸)، "آشنایی با قابلیت اطمینان"، چاپ اول، انتشارات ارکان دانش، ۱۵۰ صفحه.
- معدن زغالسنگ البرز شرقی، (۱۳۷۸)، "گزارشات زمین‌شناسی"، دفتر فنی، بخش زمین‌شناسی.
- Al-Chalabi, H., Hoseinie, H., & Lundberg, J. (2016). Monte Carlo reliability simulation of underground mining drilling rig. In *Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety*. Springer International Publishing (pp. 633-643).
- Ascher H., Feingold H., (1984), "Repairable System Reliability". New York: Dekker.
- Birolini A., (2007), "Reliability Engineering, Theory and Practice", 5th edition, Springer, pp: 588.
- Blischke W. R., Murthy D. N. P., (2003), "Case Studies in Reliability and Maintenance", John Wiley & Sons, pp. 620.
- Campbell J. D., Jardine A., Marcel Dekker A. G., (2001), "Maintenance excellence; optimizing the equipment life-cycle decisions", New York. US, pp. 516.
- Clark D., (1990), "Tribology – its applications to equipment reliability and maintainability design in the underground coal mining industry". In: *Proceedings of the Institution of Engineers Australia Tribology Conference*, pp. 38–44.
- Crow L. H., (1974), "Reliability analysis for complex repairable systems". *Reliability and Biometry*, Proschan F. and Serfling R.J. eds. Philadelphia, SIAM. pp. 379-410.
- Countinho J.C., (1964), "Failure effect analysis", *Trans. N.Y. Acad. Sci.* 26, 564–584.
- Dhillon B. S., (2006), "Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers", CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 221.
- Dhillon B. S., (2007), "Applied reliability and quality; fundamentals, methods and applications", (Springer series in reliability engineering), Springer-Verlag London Limited.

- Dhillon B. S., (2008), "Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety", Springer, pp. 209.
- Duane J. T., (1964), "Learning curve approach to reliability monitoring". IEEE Trans. Aerospace, AS-2:563-566.
- Ebeling C. E., (2009), "An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering", 2nd Edition, Waveland Press Inc. Illinois, USA, pp. 550.
- Finkelstein M., (2008), "Failure Rate Modeling for Reliability and Risk", Springer-Verlag London Limited, pp. 296.
- Forsman B., Kumar U., (1992), "Surface mining equipment and maintenance trends in the Scandinavian countries". J. Mines Minerals Fuels August/September, 266–269.
- Gendenka B., Ushakov I., (1995), "Probabilistic Reliability Engineering", Jone Wiely & Sons, pp: 537.
- Ghodrati, B. (2010), "Applied Reliability Engineering", PhD Course Booklet, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Ghodrati, B., Hadi Hoseinie, S., & Garmabaki, A. H. S. (2015). Reliability considerations in automated mining systems. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 29(5), 404-418.
- Gupta A. K., Zeng W., Wu Y., (2010), "Probability and Statistical Models Foundations for Problems in Reliability and Financial Mathematics", Springer Science, New York, USA. pp. 278.
- Hall R., Daneshmend L. K., (2000b), "Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment", CIM Bulletin; 96, Jun/Jul, pp. 159-165.
- Hoseinie S.H., Khalokakaie, R., and Ataei, M., Kumar, U., (2011), "Reliability-based maintenance scheduling of haulage system of drum shearer", Int. J. Mining and Mineral Engineering, Vol. 3, No. 1, PP. 26-37.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, M., Kumar, U., (2011), "Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum Shearers", Journal of Coal Science and Engineering, Vol.17 No. 2, PP. 192-197.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Kumar, U., (2011), "Reliability modeling of water system of longwall shearer machine", Arch. Min. Sci., Vol. 56, No 2, PP. 291–302.
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Kumar, U., (2011), "Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model", International Journal of Mining, Reclamation and Environment.
- Kececiyoglu D. B., (2002), "Reliability Engineering Handbook" Vol. 1, DEStech Publication, USA, pp: 721.
- Khoshalan, H. A., Torabi, S. R., & Maleki, D. (2015). RAM Analysis of Hydraulic System of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine. Indian Journal of Science and Technology, 8(28).

- Klefsjö B., Kumar U., (1992), "Goodness-of-fit tests for the power-law process based on the TTT-plot", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 41, Dec., pp. 593-598.
- Kumar U., (1990), "Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines", Ph.D thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Kumar U., Granholm S., (1989), "Reliability Technique: A Powerful Tool for Mine Operator", Mineral Ressource Engineering, Vol. 1: 13-28.
- Kumar U., Klefsjö B., (1992), "Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model", Reliability Engineering and System Safety 35; 217-224.
- Kvaløy J. T., Lindqvist B., (1996), "An area based test for trend in repairable systems data". Available online at: <http://www.math.ntnu.no/preprint/statistics/1996>.
- MathWave Technologies (2010), EasyFit Profesional, Version 5.5 (2010), <http://www.mathwave.com>.
- MIL-HDBK-189, (1981), "Reliability growth management". Headquarters, US Army Communication Research and Development Command, AITN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ.
- Misra K. B., (2011), "Principle of Reliability Engineering", RAMS Consultants, India, pp. 454.
- Modarres M., (2006), "Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trend". NW: Taylor & Francis.
- NIST (2011), "Sematech e-Handbook of Statistical Methods", <http://www.itl.nist.gov>.
- Rausand M., Hsyland A., (2004), "System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications", 2nd edition, Wiely & Sons, pp. 644.
- Ridgon S. E., Basu A. P., (2000), "Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems", John Wiley & Sons, (INC), pp. 281.
- Sarkhel, S., & Dey, U. K. Reliability Modelling of Side Discharge Loader for Availability Estimation and Maintenance Planning in Underground Coal Mines
- Unger R.L., Conway K., (1994), "Impact of maintainability design on injury rates and maintenance costs for underground mining equipment". In: Improving Safety at Small Underground Mines, compiled by R.H. Peters, Special Publication Report No. 18-94, US Bureau of Mines, Washington, DC, pp. 140-167.
- Wang H., Pham H., (2007), "Reliability and Optimal Maintenance", Springer, pp: 352.
- World Coal Association (2011), Uses of coal, www.Worldcoal.org

Abstract

Reliability as an engineering index has many applications in operations control and productivity of machinery. With regard to the high volume of operations in mines, keeping the production power and machinery management are instances which may seriously affect the economical and operational situation of the mine. The production reliability of each mine depends directly on reliability of active machinery in that mine. In a mechanized underground coal mines, the production and equipment includes four main systems: compressed air production, ventilation underground network, excavation and extraction equipment, and mine transportation.

Afterward, during a case study in coal mines of Eastern Alborz and Tazareh big mine, failure data and production pauses for seven months have been used to model and analyze the machinery reliability. The subsystems, comprising compressed air production, ventilation of mine network, excavation and extraction of coal, have 100% reliability, and modeling and analysis of reliability are only carried out for mine transportation navy. After collection and classification of failure data, relating to transportation navy equipments, the calculations of reliability were done by statistical analysis. The results showed that failure behavior of locomotive 1, conveyor belt 1, and locomotive 3 follow Weibull 2 parameter, conveyor belt 2, locomotive 2, and locomotive 5 follow Weibull 3 parameter, Vinch 1600 follow Lognormal and locomotive 4 follow generalized Gamma distribution.

In the next stage, with regard to the statistical analysis and considering series combination for machines in each transportation route reliability of each route was calculated. Having considered the parallel combination of routes, reliability of the mine transportation navy was calculated. The result showed that the reliability of transportation navy reduced to zero after 180 hours, to 80% after 43 hours, and to 50% after 64 hours.

Finally, by using results obtained from reliability analysis, a preventive maintenance plan based on reliability to improve performance of transportation navy in Tazreh big mine was proposed. According to this plan, the reliability changes between 97% and 100%.

Keywords: Reliability, Coal, Transportation Navy, Maintenance, Tazreh big mine



Shahrood University of Technology

Faculty of Kharazmi Campus

Reliability modeling and maintenance planning in underground Coal Mines - case study: Tazareh Coal Mine

Sayed Mostafa Tabatabaee

Supervisor(s):

Prof. M. Ataie

Prof. R. Kakaie

Advisor:

Eng. S. Mohammadi

January 2016

