





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه استخراج معدن

مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و

تعمیراتی ماشین‌های بارگیری و باربری

مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه

دانشجو: سید جواد حسینی کیاسری

اساتید راهنما:

پروفسور محمد عطائی

پروفسور رضا خالوکاکایی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲



شماره: ۴۸۴۲۱۲۶۳-۲  
تاریخ: ۹۲/۱۲/۴  
ویرایش:

باسمه تعالی



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 آقای سید جواد حسینی کیاسری رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین‌های بارگیری و باربری - مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول ( با درجه : خوب امتیاز: ۱۷)  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنما	دکتر رضا خالوکاکی	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر سید رحمان ترابی	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر حسین میرزایی	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر رضا قوامی ریایی  
امضاء

تقدیم بہ

پدر و مادر م

کہ اولین معلمان زندگی ام بودند و

علیرضا و سنا

## شکر و قدردانی

به رسم ادب می نویسم تا به یادگار بماند، امامی دانم که واژه ما جابزند.

پاسکزارم از زحمات استاد عزیزم، پروفور محمد عطایی که در طول این تحقیق صمیمانه راهنمای من بودند.

پروفور رضا خالوکا کاپی که مشوق و یار دل گرمی من بودند.

مهندس سجاد محمدی که در این تحقیق دلسوزانه همراه و راهنمای من بودند.

مهندس محمد جواد رحیم دل که راهنمای من بودند.

از زحمات بی دریغ آقای حسین شاه حسینی (مسئول دفتر دانشکده معدن) پاسکزارم.

کلید کارگران زحمت کش و پرسنل محترم معدن مس سرچشمه به ویژه آقایان مهندس سبزه علیان و مهندس خسرو جردی (امور تحقیق و توسعه) و

مهندس محمد مهدی صابری (سرپرست واحد مهندسی پروژه) به خاطر راهنمایی ها و همکاری های بی دریغشان.

و از خانواده ام، به خاطر دعای خیر و تشویقشان...

سید جواد حسینی کیا سیری

بهمن ۱۳۹۲

# تعهد نامه

اینجانب سیدجواد حسینی کیاسری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه تحت راهنمایی پروفیسور محمد عطایی و پروفیسور رضا خالوکاکایی متعهد می‌شوم .

- 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 می‌باشد 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 می‌گردد.
- 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 می‌باشد . 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 نمی‌باشد.

# فهرست عناوین

## فصل اول: مقدمه

- ۱-۱-۱-۱ معدن مس سرچشمه..... ۲
- ۱-۲-۱-۲ بیان مسئله و سوال اصلی تحقیق..... ۳
- ۱-۳-۱-۳ ضرورت انجام تحقیق..... ۵
- ۱-۴-۱-۴ اهداف تحقیق..... ۵
- ۱-۵-۱-۵ ساختار پایان نامه..... ۶

## فصل دوم: مفاهیم احتمال و مدلسازی در قابلیت اطمینان

- ۱-۲-۱-۱ مقدمه..... ۸
- ۱-۲-۲-۲ تاریخچه مهندسی قابلیت اطمینان..... ۸
- ۱-۳-۲-۳ مفاهیم اساسی احتمال..... ۹
- ۱-۳-۲-۱ تابع چگالی توزیع احتمال ( $f(t)$ )..... ۹
- ۱-۳-۲-۲ تابع توزیع تجمعی ( $F(t)$ )..... ۱۰
- ۱-۳-۲-۳ تابع قابلیت اطمینان ( $R(t)$ )..... ۱۰
- ۱-۴-۲-۴ تعاریف و مفاهیم قابلیت اطمینان..... ۱۱
- ۱-۴-۲-۱ قابلیت اطمینان..... ۱۱
- ۱-۴-۲-۲ خرابی یا شکست..... ۱۱
- ۱-۴-۲-۳ زمان خوابیدگی یا زمان خرابی..... ۱۱
- ۱-۴-۲-۴ تابع نرخ خرابی و یا نرخ شکست..... ۱۱
- ۱-۴-۲-۵ انواع نرخ خرابی..... ۱۲
- ۱-۴-۲-۱-۵ نرخ خرابی ثابت..... ۱۲



۱۲	..... نرخ خرابی صعودی
۱۲	..... نرخ خرابی نزولی
۱۴	..... میانگین زمان منجر به خرابی‌ها ( <i>MTTF</i> )
۱۴	..... متوسط زمان بین خرابی‌ها ( <i>MTBF</i> )
۱۴	..... زمان برای تعمیر ( <i>TTR</i> )
۱۵	..... توزیع‌های آماری متداول در مهندسی قابلیت اطمینان
۱۶	..... مدلسازی شبکه و قابلیت اطمینان سیستمها
۱۶	..... سیستمهای سری
۱۶	..... سیستم موازی
۱۷	..... سیستم ترکیبی
۱۸	..... سیستمهای $k$ از $n$
۱۸	..... سیستمهای آماده به کار
۱۹	..... روشهای ارزیابی قابلیت اطمینان
۱۹	..... روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آنها ( <i>FMEA</i> )
۲۰	..... روش تحلیل درخت خطا
۲۱	..... نمادها و علائم استاندارد در درختهای خطا
۲۳	..... روش مارکوف
۲۵	..... روش تحلیل آماری
۲۸	..... فرآیند قانون توان
۲۹	..... قابلیت اطمینان در مهندسی معدن
۳۱	..... جمع‌بندی

## فصل سوم: ماشین‌های بارگیری و باربری، مطالعه موردی؛ معدن مس سرچشمه

۳۴	..... مقدمه
۳۵	..... ماشین‌های بارگیری (شاول‌ها)

۳-۲-۲- ماشین‌های باربری (دامپ تراکها) ..... ۳۶

۳-۳- مدلسازی ناوگان ترابری ..... ۳۷

## فصل چهارم: مدلسازی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه

۴-۱- مقدمه ..... ۴۰

۴-۲- داده‌های خرابی ماشین ..... ۴۰

۴-۳- تحلیل پارتو ..... ۴۱

۴-۴- روند تحلیل خرابی و مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها ..... ۴۳

۴-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۱ ..... ۴۵

۴-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۲ ..... ۴۷

۴-۷- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۳ ..... ۴۹

۴-۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۴ ..... ۵۱

۴-۹- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۶ ..... ۵۳

۴-۱۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۷ ..... ۵۵

۴-۱۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۹ ..... ۵۷

۴-۱۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۱۰ ..... ۵۹

۴-۱۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ..... ۶۱

۴-۱۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۳۴ ..... ۶۳

۴-۱۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۳۷ ..... ۶۵

۴-۱۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۳۹ ..... ۶۷

۴-۱۷- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۰ ..... ۶۹

۴-۱۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۲ ..... ۷۱

۴-۱۹- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۳ ..... ۷۳

۴-۲۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۶ ..... ۷۵

۴-۲۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۷ ..... ۷۷

۲۲-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۰	۷۹
۲۳-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۲	۸۱
۲۴-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۳	۸۳
۲۵-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۴	۸۵
۲۶-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۵	۸۷
۲۷-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۶	۸۹
۲۸-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۷	۹۱
۲۹-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۸	۹۳
۳۰-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۹	۹۵
۳۱-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۰	۹۷
۳۲-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۱	۹۹
۳۳-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۲	۱۰۱
۳۴-۴	مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم باربری	۱۰۳
۳۵-۴	قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه	۱۰۵
۳۶-۴	جمع بندی	۱۰۷

## فصل پنجم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های ترابری معدن مس سرچشمه

۱-۵	مقدمه	۱۰۸
۲-۵	انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری	۱۰۸
۱-۲-۵	تعمیر و نگهداری پیشگیرانه	۱۰۹
۱-۱-۲-۵	تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت	۱۰۹
۲-۱-۲-۵	تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان	۱۱۰
۲-۲-۵	تعمیر و نگهداری اصلاحی	۱۱۱
۳-۵	تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر شرایط عملیاتی دستگاه	۱۱۲
۴-۵	انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های ترابری معدن مس سرچشمه	۱۱۳

- ۵-۵- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه ..... ۱۱۴
- ۵-۵-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان سیستم بارگیری ..... ۱۱۵
- ۵-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های سیستم باربری معدن مس سرچشمه ..... ۱۱۷
- ۵-۶-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان سیستم باربری ..... ۱۱۹
- ۵-۷- تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه ..... ۱۲۲
- ۵-۸- جمع‌بندی ..... ۱۲۳

## فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۶-۱- نتیجه‌گیری ..... ۱۲۶
- ۶-۲- پیشنهادات ..... ۱۲۷
- منابع و مراجع ..... ۱۲۹

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ - منحنی میزان نرخ حادثه در طول مدت عمر یک دستگاه (وان حمام)..... ۱۳
- شکل ۲-۲ - یک سیستم سری متشکل از سه زیر سیستم مستقل..... ۱۶
- شکل ۳-۲ - یک سیستم موازی متشکل از سه زیر سیستم مستقل..... ۱۷
- شکل ۴-۲ - یک سیستم سری - موازی..... ۱۷
- شکل ۵-۲ - نمونه‌ای از یک درخت خطا ..... ۲۱
- شکل ۶-۲ - چهار نماد و عملگر اصلی در روش تحلیل درخت خطا ..... ۲۲
- شکل ۷-۲ - روندنمای مربوط به تعیین نوع مدل‌سازی داده‌های آماری در روش آماری ..... ۲۷
- شکل ۱-۳ - بارگیری و باربری توسط شاول و کامیون..... ۳۵
- شکل ۲-۳ - ماشین بارگیری (شاول کابلی)..... ۳۶
- شکل ۳-۳ - ماشین باربری (دامپ تراک)..... ۳۷
- شکل ۴-۳ - سیکل ترابری با ماشین‌های بارگیری و باربری..... ۳۷
- شکل ۱-۴ - نمودار پارتو خرابی سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه..... ۴۲
- شکل ۲-۴ - نمودار پارتو خرابی سیستم باربری معدن مس سرچشمه..... ۴۲
- شکل ۳-۴ - مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۱..... ۴۶
- شکل ۴-۴ - مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۲..... ۴۸
- شکل ۵-۴ - مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۳..... ۵۰
- شکل ۶-۴ - مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۴..... ۵۲
- شکل ۷-۴ - مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۶..... ۵۴

- شکل ۴-۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۷.....۵۶
- شکل ۴-۹- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۹.....۵۸
- شکل ۴-۱۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۱۰.....۶۰
- شکل ۴-۱۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری.....۶۱
- شکل ۴-۱۲- منحنی قابلیت اطمینان سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه.....۶۲
- شکل ۴-۱۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۴.....۶۴
- شکل ۴-۱۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۷.....۶۶
- شکل ۴-۱۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۹.....۶۸
- شکل ۴-۱۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۰.....۷۰
- شکل ۴-۱۷- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۲.....۷۲
- شکل ۴-۱۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۳.....۷۴
- شکل ۴-۱۹- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۶.....۷۶
- شکل ۴-۲۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۷.....۷۸
- شکل ۴-۲۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۰.....۸۰
- شکل ۴-۲۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۲.....۸۲
- شکل ۴-۲۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۳.....۸۴
- شکل ۴-۲۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۴.....۸۶
- شکل ۴-۲۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۵.....۸۸
- شکل ۴-۲۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۶.....۹۰
- شکل ۴-۲۷- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۷.....۹۲
- شکل ۴-۲۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۸.....۹۴
- شکل ۴-۲۹- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۹.....۹۶
- شکل ۴-۳۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۶۰.....۹۸

- شکل ۴-۳۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۶۱..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۶۲..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۳- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۳۴- منحنی قابلیت اطمینان سیستم باربری معدن مس سرچشمه..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۵- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان دستگاه ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۲- منحنی قابلیت اطمینان سیستم بارگیری پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون آن..... ۱۱۷
- شکل ۵-۳- منحنی قابلیت اطمینان سیستم باربری پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون آن..... ۱۲۲
- شکل ۵-۴- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه..... ۱۲۳

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته..... ۱۵
- جدول ۲-۲- لیست تحقیقات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن..... ۲۹
- جدول ۱-۴- نمونه‌ای از فرم ثبت خرابی ماشین‌های ترابری..... ۴۰
- جدول ۱-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف بارگیری..... ۱۱۴
- جدول ۲-۵- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های سیستم بارگیری..... ۱۱۵
- جدول ۳-۵- تغییرات قابلیت اطمینان سیستم بارگیری در اثر عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه..... ۱۱۶
- جدول ۴-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری..... ۱۱۸
- جدول ۵-۵- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای ماشین‌های سیستم باربری..... ۱۱۹
- جدول ۶-۵- تغییرات قابلیت اطمینان سیستم باربری در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه..... ۱۲۰
- جدول ۷-۵- تغییرات قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه..... ۱۲۳



## چکیده

از کار افتادن سیستم‌ها، موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی شده و می‌تواند به عنوان تهدیدی برای جامعه تلقی گردد. از این رو کاربران انتظار دارند که سیستم‌ها، اطمینان‌بخش و ایمن باشند. برای تامین این انتظار، بررسی مقوله مهم قابلیت اطمینان در تمامی صنایع ضرورت دارد. در معدنکاری و صنایع معدنی، سیستم ترابری یکی از مهمترین واحدهای عملیاتی در معادن روباز بوده و از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها، می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و سودآوری معدن تلقی گردد. تاکنون تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما بررسی‌های صورت گرفته در مورد ماشین‌های بارگیری و باربری عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. به منظور جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش عملکرد ماشین‌های ترابری، اطلاع از شرایط کاری ماشین‌ها و کنترل آماری دقیق آن‌ها یکی از رهیافت‌های عملی به شمار می‌آید. یکی از تکنیک‌های توانمند برای پیش‌بینی خرابی‌ها و عملکرد مناسب دستگاه در یک زمان مشخص، ارزیابی آماری و احتمالاتی قابلیت اطمینان است. با استفاده از این رهیافت می‌توان احتمال عدم خرابی و عملکرد مطلوب دستگاه در یک بازه زمانی مشخص را تخمین زد. از این رو در پژوهش حاضر ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور این ناوگان متشکل از دو سیستم بارگیری و باربری و هر یک از دستگاه‌ها به عنوان زیر سیستم‌های آن‌ها در نظر گرفته شده است. پس از این تقسیم‌بندی، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از این سیستم‌ها که به تنهایی به صورت موازی هستند محاسبه شده است. بر این اساس قابلیت اطمینان برای سیستم بارگیری پس از ۱۰۰ ساعت از شروع به فعالیت آن ۵۰ درصد کاهش یافته و پس از طی ۲۰۰ ساعت به ۰/۲ و برای سیستم باربری پس از ۱۲۰ ساعت ۵۰ درصد کاهش یافته و پس از گذشت ۲۰۰ ساعت به ۰/۱۵ می‌رسد. سپس با در نظر

گرفتن ترکیب این دو سیستم که با یکدیگر به صورت سری ناوگان ترابری را تشکیل می‌دهند، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری پس از گذشت حدود ۶۵ ساعت از زمان شروع به کار ماشین‌ها، به ۸۰ درصد رسیده و پس از ۲۰۰ ساعت با شیب بسیار کمی به صفر نزدیک می‌شود. در مرحله‌ی آخر پژوهش، پس از تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌های بارگیری و باربری، با تاکید بر حفظ عملکرد هر یک از ماشین‌ها در قابلیت اطمینان ۸۰٪، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین‌های مختلف ناوگان ترابری پرداخته شده است. بر این اساس برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن را تا ۹۸٪ بهبود بخشیده است.

**کلمات کلیدی:** قابلیت اطمینان، مدلسازی قابلیت اطمینان، برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، ماشین-

های بارگیری و باربری، معدن مس سرچشمه.



# فصل اول:

## مقدمه

## ۱-۱- معدن مس سرچشمه

معدن مس سرچشمه با مختصات  $55^{\circ}52'20''$  طول شرقی و  $29^{\circ}56'40''$  عرض شمالی در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و ۵۰ کیلومتری رفسنجان قرار دارد. کانساری که مس سرچشمه در آن قرار دارد تقریباً در قسمت مرکزی یک زون متشکل از مواد آتشفشانی و رسوبی چین خورده که با جهت عمومی شمال غرب - جنوب شرقی از جنوب ترکیه شروع شده و تا بلوچستان ادامه دارد، واقع شده است. این کانسار، در یک توده پورفیری گرانودیوریتی بنام پورفیر سرچشمه متمرکز شده است. این توده نفوذی بطور قریب به یقین وابسته به یک مجموعه دیوریت کوارتزار می باشد که بیرون زدگی های مهمی در اطراف کانسار نشان می دهد (توده نفوذی کوه مامهزر). کانسار سرچشمه بشکل عمومی یک بیضی است که قطر بزرگ آن حدود ۲۰۰۰ متر و قطر کوچک آن حدود ۹۰۰ متر است. ذخیره نهشته روباز معدن ۷۴۰ میلیون تن با عیار ۰/۷۸٪ مس، ۰/۰۳٪ مولیبدن، ۰/۲۷ ppm طلا، ۱/۱۴ ppm نقره، ۱/۲ ppm نیکل و ۰/۹ ppm کبالت است و کل ذخیره زمین شناسی آن ۱/۲ میلیارد تن با عیار ۰/۶۹٪ مس می باشد. از این ذخیره، ۱۰۰ میلیون تن آن دارای عیار ۱/۵ درصد مس است که شامل یک بلوک غنی شده از کالکوسیت بوده و ضخامت متوسط آن به ۴۰ متر می رسد. ذخیره نهشته اکسیدی ۲۷ میلیون تن برآورد شده است. این زون با ضخامت ۲۶ متر شامل کانی های کوپریت، مالاکیت و آزوریت است. ذخیره احتمالی معدن نیز ۱۲۰۰۰۰۰ هزارتن و ذخیره قطعی آن ۸۲۶۵۰۰ هزار تن برآورد شده که بزرگترین معدن مس ایران و قابل مقایسه با معادن بزرگ دنیا چون چوکیکاماتا در شیلی و بینگهام در آمریکا است. بهره برداری از معدن مس سرچشمه به صورت روباز انجام می شود. شیب دیواره معدن ۳۰ درجه و حداکثر شیب جاده، ۸ درجه در نظر گرفته شده است. عرض و ارتفاع پله های معدن به ترتیب ۸/۷۵ و ۱۲/۵ متر است. بسته به استحکام سنگ معدن به ازاء هر ۴ تا ۸ یا ۱۲ پله، یک پله ایمنی ساخته شده که در اینصورت شیب معدن از ۳۰ درجه به ۳۷ درجه و بالاخره به

۴۱ درجه خواهد رسید. چالزنی با ماشین‌های حفاری دورانی و با سرمته‌های ۹ اینچی در شبکه-های ۹/۵×۷/۵ متری و آتشیاری با استفاده از آنفو انجام می‌شود. عمق چال‌ها بین ۱۴ تا ۱۴/۵ متر بوده و از انفجار هر چال حدود ۲۰۰۰ تن سنگ معدن استخراج می‌شود. بارگیری با شاول‌های ۹ و ۱۵ متر مکعبی و باربری توسط کامیون‌های ۱۲۰ و ۱۵۰ تنی انجام می‌گیرد. میزان متوسط استخراج روزانه معدن ۱۰۰۰۰۰ تن بوده که ۴۴۰۰۰ تن از آن به عنوان ماده معدنی با عیار ۱/۱۲٪ وارد سنگ‌شکن اولیه شده و بقیه به عنوان باطله در محل‌هایی که برای این منظور در نظر گرفته شده است، ذخیره می‌شود (گزارش زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه).

با توجه به اینکه سیستم ترابری در ارتباط مستقیم با میزان استخراج ماده معدنی هستند و از کار افتادن هر یک از آن‌ها به عنوان تهدیدی جدی در کاهش تولید و سودآوری معدن تلقی می‌گردد، بنابراین عملکرد صحیح و آگاهی از توقفات ناخواسته هر یک از آن‌ها ضرورت دارد.

## ۲-۱- بیان مسئله و سوال‌های اصلی تحقیق

سیستم‌های بارگیری و باربری در معادن روباز و زیرزمینی با یکدیگر متفاوت هستند. در معادن روباز ضمن به کارگیری حجم عظیمی از عملیات آتشیاری، از ماشین‌آلات غول‌پیکر بارگیری و باربری استفاده می‌شود اما در معادن زیرزمینی از عملیات آتشیاری به صورت محدود و کنترل شده استفاده می‌شود و بیشتر از ماشین‌آلات حفاری برای خردایش مواد معدنی استفاده می‌شود و از سیستم‌های ریلی و نوار نقاله برای باربری استفاده می‌شود. تقریباً در ۸۰ درصد معادن بزرگ دنیا که به روش روباز استخراج می‌شوند از شاول به عنوان ماشین بارگیری و از کامیون به عنوان ماشین باربری استفاده می‌شود.

سیستم ترابری یکی از مهمترین واحدهای عملیاتی در معادن روباز بوده که از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش سودآوری معدن تلقی گردد. بنابراین بررسی قابلیت اطمینان این گونه تجهیزات بسیار ضروری و مهم است. یکی از تکنیک‌های توانمند برای پیش‌بینی خرابی‌ها و عملکرد مناسب ماشین‌ها در یک زمان مشخص، ارزیابی قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری آن‌ها است. این کمیت‌ها امروزه در اکثر صنایع به عنوان یک پارامتر فنی و مدیریتی کمک شایانی به پیوستگی تولید و بهبود شرایط اقتصادی بنگاه‌های اقتصادی می‌کند.

هدف از این تحقیق، تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری آن‌ها است. بدین منظور، سعی خواهد شد تا با مدلسازی آماری قابلیت اطمینان، راهکار عملی برای کنترل عملیات و برنامه‌ریزی مناسب برای تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ارائه شود.

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

۱- ماشین‌های بارگیری و باربری شامل چه ماشین‌هایی هستند و نحوه ارتباط این ماشین‌ها چگونه است؟

۲- حساس‌ترین ماشین از نظر فراوانی خرابی‌ها کدام است؟

۳- رفتار خرابی هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری چگونه است؟

۴- منحنی‌های قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری و در نهایت ناوگان ترابری معدن به چه صورت است؟

۵- بهترین زمان تعمیر و نگهداری هر یک از ماشین‌ها کدام است و تاثیر برنامه تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری و نیز قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن به چه صورت خواهد بود؟

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

هرگونه خرابی دستگاه‌های ترابری باعث اتلاف سرمایه و بروز خسارات مالی به معدن خواهد شد. برنامه‌ریزی مناسب برای تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه، به مدیران و مهندسان معدن کمک می‌نماید تا با جلوگیری از خرابی‌های ناخواسته و توقف‌های طولانی، شرایط اقتصادی تولید معدن را به نحو مؤثری بهبود بخشند.

تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما بررسی‌های صورت گرفته در مورد ماشین‌های بارگیری و باربری عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. بر این اساس، در این تحقیق ضمن مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری در معدن مس سرچشمه، راهکارهایی برای بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی این ماشین‌ها ارائه شده است.

### ۱-۴- اهداف تحقیق

به دلیل اهمیت سیستم ترابری در معدنکاری روباز و ضررهای ناشی از کار افتادن آن‌ها در میزان سودآوری و تولید معدن، از این رو بررسی قابلیت اطمینان آن‌ها ضرورت دارد. اهدافی که در این پایان‌نامه دنبال می‌شود به شرح زیر است:

۱- تعیین شبکه قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری



۲- ارائه مدل قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری

۳- تعیین بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر ماشین و نیز کل سیستم ترابری

۴- حفظ پیوستگی تولید در معدن مس سرچشمه

#### ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در این تحقیق، پس از ارائه مفاهیم احتمال، تعاریف و مدلسازی قابلیت اطمینان در فصل دوم، به معرفی ماشین‌های بارگیری و باربری در فصل سوم پرداخته شده است. مدلسازی آماری قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری و نیز ناوگان ترابری معدن در فصل چهارم تحقیق ارائه شده است. و در نهایت، در فصل پنجم تحقیق، با تاکید بر حفظ عملکرد هر یک از ماشین‌ها در سطح قابلیت اطمینان ۸۰٪، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین‌های بارگیری و باربری پرداخته شده است. در فصل ششم به ارائه پیشنهادات و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## فصل دوم:

مفاهیم احتمال و مدلسازی قابلیت اطمینان

امروزه، مهندسی قابلیت اطمینان به عنوان ابزاری توانمند، در بسیاری از شاخه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این علم از نظر مبانی نظری بسیار گسترده بوده و دارای زیرشاخه‌های متعددی در سایر علوم است. در این فصل، پس از ارائه مفاهیم و تعاریف پایه در مهندسی قابلیت اطمینان، به معرفی روش‌های متداول در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی پرداخته شده است.

## ۲-۲- تاریخچه مهندسی قابلیت اطمینان

تاریخچه رشد مهندسی قابلیت اطمینان را می‌توان به سال‌های قبل از ۱۹۳۰ ارجاع داد. در آن زمان به علت نگرانی از عدم کارکرد صحیح تولیدات و وقوع حوادثی چون کشتی تایتانیک، مطالعه و تحقیقاتی در زمینه طراحی سیستم‌ها با اجزای موازی و یا ذخیره انجام گرفت. سپس در دهه ۱۹۳۰ همزمان با اختراع صنعت حمل و نقل هوایی، مطالعه و تحقیقاتی در خصوص کمی کردن قابلیت اعتماد انجام شد. در دهه ۱۹۴۰ با آغاز جنگ جهانی دوم و ساخت ابزارهای پیچیده نظامی، مبحث مدلسازی قابلیت اعتماد توسط لوسر<sup>۱</sup> و مورفی<sup>۲</sup> ارائه گردید. در دهه ۱۹۵۰ با به کارگیری سیستم‌های الکتریکی، گروه‌های مطالعاتی<sup>۳</sup> AGREE و<sup>۴</sup> IEEE تشکیل و استانداردهایی برای تولید قطعات با قابلیت اطمینان بالا معرفی شد. در دهه ۱۹۶۰ با پیشرفت صنایع هوایی و انگیزه ساختن آپولو، اولین کتاب در این زمینه توسط بازوسکی<sup>۵</sup> تالیف گردید. روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان از نظر تاریخچه پیدایش، ابتدا در ارتباط با صنایع هوایی و کاربردهای نظامی شکل گرفت،

---

<sup>1</sup> Lusser

<sup>2</sup> Murphy

<sup>3</sup> Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment

<sup>4</sup> Institute of Electrical and Electronic Engineers

<sup>5</sup> Bazovsky

ولی به سرعت توسط سایر صنایع مانند صنایع هسته‌ای که تحت فشار شدیدی برای تضمین ایمنی و قابلیت اعتماد رآکتورهای هسته‌ای در تامین انرژی الکتریکی هستند و یا صنایع فرآیندهای پیوسته مانند صنایع فولاد و صنایع شیمیایی که هر ساعت از توقف آن‌ها به علت وقوع معایب، می‌تواند موجب تحمیل خسارت‌های بزرگ مالی و جانی و آلودگی محیط زیست شود، مورد توجه قرار گرفت. حادثه هواپیمای چلنگر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۶، و حوادث هسته‌ای سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۷۶ و ۱۹۸۴، موجب توجه هر چه بیشتر به مفاهیم قابلیت اطمینان، ایمنی و احتمال خطر در این سال‌ها شده است (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

### ۲-۳- مفاهیم اساسی احتمال

برای مهندسين هیچگاه اظهار نظر دقیق و مشخص نسبت به زمان از کار افتادگی دستگاه‌ها مقدور نیست و به طور معمول تنها تعیین احتمال وقوع شکست‌ها امکان‌پذیر خواهد بود.

در ادامه به معرفی مطالب آماری مورد نیاز در بررسی قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری پرداخته شده است.

### 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 پیش‌آمده به دست آورد. در مهندسی قابلیت اطمینان، تابع چگالی احتمال به نام "تابع چگالی خرابی"<sup>۲</sup> خوانده می‌شود. در این محاسبات، "زمان بین خرابی‌ها" به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. از ویژگی‌های کلیه توابع چگالی این است که سطح زیر منحنی آن‌ها برابر با یک است. گفته فوق منطبق با این واقعیت است که احتمال رخداد هر

<sup>1</sup> Challenger

<sup>2</sup> Failure Density Function

حادثه حداکثر ۱۰۰ درصد یا یک است. توابع چگالی احتمال دارای تنوع و اشکال مختلفی هستند که در ادامه ارائه شده است (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۷).

### 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"<sup>۱</sup> خوانده می‌شود. رابطه این تابع با تابع چگالی احتمال به صورت رابطه (۱-۲) است (حاج‌شیرمحمدی، ۱۳۹۰):

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

که در آن،  $f(x)$ : تابع توزیع احتمال،  $F(x)$ : تابع توزیع تجمعی و  $t$ : زمان است.

با توجه به اینکه، زمان  $-\infty$  در مهندسی قابلیت اطمینان مفهوم و معنای واقعی ندارد، در این مورد تابع چگالی احتمال به صورت رابطه (۲-۲) بیان می‌شود:

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

### ۲-۳-۳- تابع قابلیت اطمینان $(R(t))$

تعریف ریاضی قابلیت اطمینان یک دستگاه یا سیستم به طور کلی به صورت زیر قابل ارائه است (Dhillon, 2008):

<sup>1</sup> Failure Distribution Function

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

این تابع در حالت ساده به صورت قابلیت اطمینان در زمان  $t$  خوانده می‌شود. همچنان که شرح داده شد این کمیت از جنس احتمال بوده و به صورت درصد بیان می‌شود.

#### ۴-۲- تعاریف و مفاهیم قابلیت اطمینان

##### ۴-۲-۱- قابلیت اطمینان

قابلیت سیستم در انجام و حفظ عملیات و کارکرد لازم تحت شرایط مشخص، بدون آنکه در طی دوره زمانی مشخص شده خرابی رخ ندهد را قابلیت اطمینان آن سیستم می‌گویند (رضاییان، ۱۳۹۰).

##### ۴-۲-۲- خرابی یا شکست<sup>۱</sup>

متوقف شدن و یا ناتوانی یک دستگاه برای انجام کار معین در فاصله زمانی مشخص را خرابی یا شکست می‌گویند (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

##### ۴-۲-۳- زمان خوابیدگی<sup>۲</sup> یا زمان خرابی<sup>۳</sup>

زمان خوابیدگی یک دستگاه، فاصله زمانی یک دستگاه از لحظه شکست تا زمانی که دستگاه عملکرد عادی خود را از سر گیرد، فرض می‌شود (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

##### ۴-۲-۴- تابع نرخ خرابی و یا نرخ شکست<sup>۴</sup>

نرخ خرابی، به صورت احتمال وقوع خرابی یک دستگاه در بازه زمانی  $[t, t+\Delta t]$  به شرط آنکه تا زمان  $t$  هنوز خرابی اتفاق نیفتاده باشد، تعریف می‌شود. نرخ خرابی هر دستگاه در هر لحظه از زمان

---

<sup>1</sup> Failure  
<sup>2</sup> Down Time  
<sup>3</sup> Failure Time  
<sup>4</sup> Failure Rate

را می‌توان نسبت تعداد دستگاه‌های از کار افتاده در یک فاصله زمانی به تعداد کل دستگاه‌های مورد بررسی در ابتدا آن فاصله زمانی، دانست. به این ترتیب نرخ خرابی دستگاه در زمان  $t$ ، عبارت است از چگالی احتمال خرابی دستگاه در فاصله زمان بعدی، به شرط صحت کارکرد دستگاه در ابتدای آن فاصله زمانی. عبارت فوق به زبان ریاضی به صورت رابطه (۴-۲) قابل تعریف است (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p\langle t < T < t + \Delta t | T > t \rangle}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t \cdot p(T \geq t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta t \cdot f(t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4-2)$$

۲-۴-۵- انواع نرخ خرابی

۲-۴-۵-۱- نرخ خرابی ثابت

در این حالت، زمان تاثیری بر نرخ خرابی نداشته و یا خرابی در طول زمان ثابت باشد. به عنوان مثال ماشین‌آلات در طول عمر طبیعی خود دارای نرخ خرابی ثابتی هستند.

۲-۴-۵-۲- نرخ خرابی صعودی

در این حالت نرخ خرابی با گذشت زمان افزایش می‌یابد. ماشین‌آلاتی که وارد دوران فرسایش خود می‌شوند، دارای نرخ خرابی افزایشی هستند.

۲-۴-۵-۳- نرخ خرابی نزولی

در این حالت، نرخ خرابی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. معمولاً دستگاه‌ها، در ابتدای عمر خود دارای خرابی‌های اولیه ناشی از مونتاژ و یا طراحی هستند که به مرور زمان کاهش می‌یابد.

تجربه نشان داده است که اکثر ماشین‌آلات و تجهیزات، در طول مدت بهره‌برداری، دارای تابع عمر مشخصی هستند. بدین ترتیب تابع عمر ماشین‌آلات به صورت منحنی شکل (۱-۲) خواهد بود که منحنی وان حمام<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در آغاز دوره بهره‌برداری (مرحله ۱)، دستگاه نیاز به تنظیم شدن و رفع نواقص و سازگار شدن با محیط اطراف را دارد. در این دوران با گذشت زمان دستگاه‌ها با محیط اطراف سازگار شده و حالت تنظیم‌شده‌ای به خود می‌گیرند. با گذراندن دوران طفولیت، دستگاه در دوران طبیعی عمر خود (مرحله ۲) قرار گرفته، و با توجه به آنچه گفته شد در این دوران سرعت خرابی لحظه‌ای دستگاه ثابت می‌ماند. پس از طی دوره عمر طبیعی و نزدیک شدن به دوران فرسایش (مرحله ۳) سرعت خرابی دستگاه، روندی افزایشی به خود گرفته و در نتیجه هر مقدار که از عمر دستگاه می‌گذرد، سرعت خرابی لحظه‌ای (احتمال خرابی) در آن بیشتر خواهد شد. نکته قابل توجه آن است که در آغاز دوره بهره‌برداری (دوران طفولیت)، اعمال عملیات پیشگیری شامل تعویض و نوسازی قطعات، نه تنها مفید نبوده بلکه احتمال و نرخ خرابی را افزایش می‌دهد (Dhillon, 1999).



شکل ۱-۲- منحنی میزان نرخ حادثه در طول مدت عمر یک دستگاه (وان حمام) (Dhillon, 1999)

<sup>1</sup> Bath Tube



## ۲-۴-۶- میانگین زمان منجر به خرابی‌ها ( $MTTF$ )<sup>۱</sup>

متوسط زمان منجر به از کار افتادگی‌های یک دستگاه را میانگین زمان منتهی به خرابی و یا به اختصار  $MTTF$  می‌گویند که به صورت رابطه (۲-۵) قابل تعریف است (Dhillon, 1999).

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (۲-۵)$$

که در آن،  $t$ : زمان،  $f(t)$ : تابع احتمال خرابی و،  $R(t)$ : تابع قابلیت اطمینان دستگاه است.

در مورد سیستم‌های تعمیرپذیر به جای متوسط زمان منجر به خرابی‌ها، از میانگین زمان بین خرابی‌ها استفاده می‌شود.

## ۲-۴-۷- متوسط زمان بین خرابی‌ها ( $MTBF$ )<sup>۲</sup>

میانگین زمان بین خرابی‌ها، متوسط زمان بین شکست‌های یک سیستم است. اختلاف اساسی بین  $MTBF$  و  $MTTF$  در موارد استفاده از آن‌ها است. متوسط زمان منجر به خرابی، برای اولین شکست و یا شکست غیرقابل تعمیر و متوسط زمان بین خرابی‌ها، برای زمان کارکرد بین شکست-ها استفاده می‌شود (Dhillon, 1999).

## ۲-۴-۸- زمان برای تعمیر ( $TTR$ )<sup>۳</sup>

زمان مورد نیاز برای رفع نقص و خرابی و یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه را "زمان برای تعمیر" می‌نامند (Dhillon, 1999).

<sup>1</sup> Mean Time To Failure (MTTR)

<sup>2</sup> Mean Time Between Failure (MTBF)

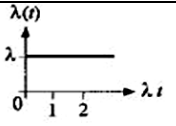
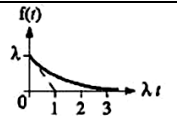
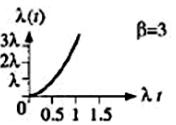
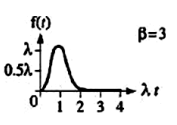
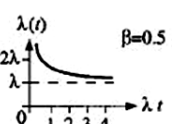
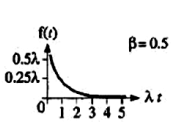
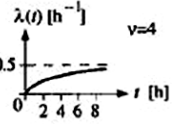
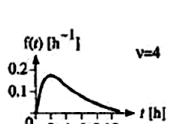
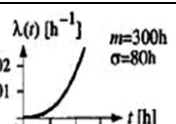
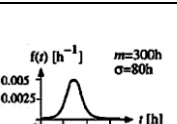
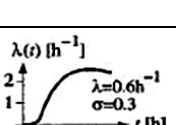
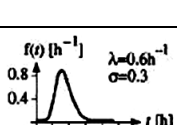
<sup>3</sup> Time To Repair (TTR)

## ۵-۲- توزیع‌های آماری متداول در مهندسی قابلیت اطمینان

مشخصات هر یک از توابع توزیع رایج در مهندسی قابلیت اطمینان به صورت خلاصه در جدول

(۱-۲) آورده شده است (Stapelberg, 2009; Smith, 2001).

جدول ۱-۲- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته

نام توزیع	تابع توزیع تجمعی ( $F(t)$ )	واریانس	میانگین	بازه پارامترها	نرخ خرابی ( $\lambda(t)=f(t)/(1-F(t))$ )	تابع چگالی ( $f(t)=dF(t)/dt$ )
نمایی	$1 - e^{-\lambda t}$	$1/\lambda^2$	$1/\lambda$	$t \geq 0$ $\lambda > 0$		
وایبول	$1 - e^{-(\lambda t)^\beta}$	$\frac{\Gamma(1+\frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\beta})}{\lambda}$	$\frac{\Gamma(1+\frac{1}{\beta})}{\lambda}$	$t \geq 0, F(0) = 0$ $\lambda, \beta > 0$		
گاما	$\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$	$\frac{\beta}{\lambda^2}$	$\frac{\beta}{\lambda}$	$t \geq 0, F(0) = 0$ $\lambda, \beta > 0$		
مربع چپ	$\frac{\int_0^{\lambda t} x^{\nu-1} e^{-\frac{x}{2}} dx}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)}$	$2\nu$	$\nu$	$t \geq 0, F(0) = 0$ $\nu = 1, 2, \dots$		
نرمال	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-m}{\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$	$\sigma^2$	$m$	$t, m < \infty$ $\sigma > 0$		
لاگ نرمال	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma} - \frac{x^2}{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$	$\frac{e^{2\sigma^2} - e^{\sigma^2}}{\lambda^2}$	$\frac{e^{\sigma^2/2}}{\lambda}$	$t \geq 0, F(0) = 0$ $\lambda, \sigma > 0$		

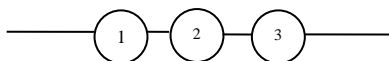
## ۲-۶- مدلسازی شبکه و قابلیت اطمینان سیستم‌ها

یک سیستم که می‌تواند مکانیکی، الکتریکی و غیره باشد، از مجموعه‌ای از زیرسیستم‌ها تشکیل شده است. برای تعیین قابلیت اطمینان یک سیستم لازم است که ارتباط بین هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل دهنده آن، مشخص باشد. در ادامه به ساختار انواع سیستم‌ها پرداخته شده است (Smith, 2001; Dhillon, 2008; Birolini, 2007).

### ۲-۶-۱- سیستم‌های سری<sup>۱</sup>

در صورتی که با از کار افتادن هر یک از زیرسیستم‌های یک دستگاه، سیستم از کار بیفتد، یک سیستم سری خواهد بود. نمونه‌ای از یک سیستم سری در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. در صورتی که یک سیستم از  $n$  زیرسیستم سری که قابلیت اطمینان هر کدام از آن‌ها  $R_i$  است تشکیل شده باشد، قابلیت اطمینان سیستم ( $R_{System}$ ) از رابطه (۲-۶) قابل محاسبه است.

$$R_{System} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2-6)$$



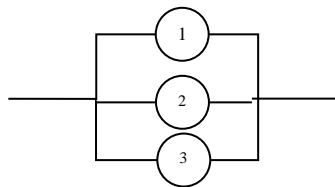
شکل ۲-۲- یک سیستم سری متشکل از سه زیر سیستم مستقل

<sup>1</sup> Series System

## ۲-۶-۲- سیستم موازی<sup>۱</sup>

در صورتی که عملکرد یک سیستم مستلزم عملکرد حداقل یکی از زیرسیستم‌های تشکیل دهنده آن باشد، سیستم موازی نامیده می‌شود. نمونه‌ای از یک سیستم با سه زیرسیستم موازی در شکل (۳-۲) آورده شده است. در صورتی که یک سیستم از  $n$  زیرسیستم موازی که قابلیت اطمینان هر کدام از آن‌ها  $R_i$  است تشکیل شده باشد، قابلیت اطمینان سیستم ( $R_{System}$ ) از رابطه (۷-۲) قابل محاسبه است.

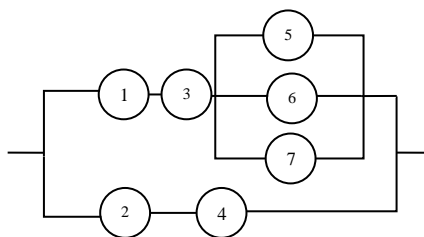
$$R_{System} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (۷-۲)$$



شکل ۲-۳- یک سیستم موازی متشکل از سه زیر سیستم مستقل

## ۲-۶-۳- سیستم ترکیبی

سیستم‌هایی که برخی از زیر سیستم‌های آن‌ها به صورت موازی و بعضی دیگر به صورت متوالی با یکدیگر در ارتباط هستند را سیستم‌های ترکیبی و یا سیستم‌های سری- موازی می‌نامند. شکل (۴-۲) نمونه‌ای از یک سیستم سری- موازی را نشان می‌دهد.



<sup>1</sup> Parallel System

## شکل ۲-۴- یک سیستم سری- موازی

روش کلی تحلیل سیستم‌های ترکیبی، کاستن تعداد عضوهای سیستم با جایگزین کردن زیرسیستم‌های سری و یا موازی با واحدهای منفرد معادل است.

### ۲-۶-۴- سیستم‌های $k$ از $n$ <sup>۱</sup>

گاهی اوقات سیستم‌های به کار رفته در صنعت، شکل‌های پیچیده‌ای نسبت به سیستم‌های سری، موازی و یا سری- موازی به خود می‌گیرند. یکی از انواع سیستم‌های معروف در قابلیت اطمینان سیستم‌های  $k$  از  $n$  است. سیستم متشکل از  $n$  زیرسیستم را سیستم  $k$  از  $n$  گویند در صورتی که عملکرد سیستم مستلزم عملکرد حداقل  $k$  زیرسیستم از  $n$  زیرسیستم باشد. قابلیت اطمینان چنین سیستم‌هایی از رابطه (۲-۸) قابل محاسبه است:

$$R_{System} = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \binom{n}{j} R^j (1-R)^{n-j} \quad (۲-۸)$$

### ۲-۶-۵- سیستم‌های آماده به کار<sup>۲</sup>

در این آرایش، سیستم از  $n+1$  زیرسیستم تشکیل شده که از این تعداد تنها یک زیرسیستم فعال بوده و سایر زیرسیستم‌ها در حالت انتظار به سر می‌برند. به محض خرابی و توقف بخش فعال، یکی از بخش‌های آماده به کار، وارد عمل شده و عملیات ادامه می‌یابد. در صورتی که  $\lambda(t)$  نرخ خرابی تابع زمان هر زیرسیستم و  $R_{sb}(t)$ ، قابلیت اطمینان سیستم آماده به کار در زمان  $t$  باشد، قابلیت اطمینان سیستم از رابطه (۲-۹) به دست می‌آید.

<sup>1</sup> k out of n System

<sup>2</sup> Standby System

$$R_{sb}(t) = \sum_{j=k}^m \left[ \int_0^t \lambda(t) dt \right]^j e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} / j \quad (9-2)$$

## ۷-۲- روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان

امروزه روش‌های متنوعی برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی و دستگاه‌ها ارائه شده است. در ادامه، پنج روش اصلی مورد استفاده در تحلیل‌های قابلیت اطمینان ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است:

### ۷-۲-۱- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA)<sup>۱</sup>

این روش یکی از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین روش‌های کیفی در تحلیل قابلیت اطمینان است. مراحل اجرای این روش از فاز طراحی دستگاه شروع شده و در تمامی مراحل عمر دستگاه ادامه می‌یابد. گام‌های پیاده‌سازی این روش به شرح زیر است (Stapelberg, 2009):

الف) تعریف و تعیین مرزهای سیستم و جزئیات مورد نیاز

ب) تهیه لیست تمامی زیرسیستم‌ها و اجزای سیستم

ج) شناسایی انواع خرابی‌های مربوط به هر زیرسیستم و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به آن‌ها

د) اختصاص احتمال یا نرخ خرابی به هر کدام از انواع خرابی‌ها

ه) پیش‌بینی تأثیرات هر یک از انواع خرابی‌ها بر اجزاء مجاور، زیرسیستم‌های دیگر و یا کل سیستم

<sup>۱</sup> Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

و) وارد کردن توضیحات و ملاحظات مناسب در اطلاعات مربوط به هر نوع خرابی

ز) مرور تک تک مدهای خرابی بحرانی و اتخاذ و اجرای تدابیر مناسب برای کاهش تأثیرات آنها

با استفاده از گام‌های هفت‌گانه روش FMEA، متخصصان تعمیر و نگهداری هر سیستم می‌توانند به یک پایگاه اطلاعاتی مناسب و قوی در مورد آن سیستم دست یابند. این امر در آینده، تشخیص و رفع خرابی‌ها را در هر سیستمی تسریع می‌بخشد. با دقت در گام‌های ارائه شده، اساس این روش کیفی بوده و هیچگونه بحث کمی در تحلیل‌ها وارد نشده است. به همین دلیل، یکی از بزرگترین نقاط ضعف و محدودیت‌های این روش، کیفی بودن آن است. زیرا با توجه به پیچیدگی روزافزون دستگاه‌های صنعتی، استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر بوده و با خطا همراه است.

## ۲-۷-۲- روش تحلیل درخت خطا<sup>۱</sup>

در این روش، در گام اول، تمامی دلایل خرابی و قطعات مربوط به هر دستگاه در یک ساختار از بالا به پایین که شبیه به درخت است مرتب شده و از این ساختار برای محاسبه احتمال خرابی یا سالم بودن یک دستگاه یا مجموعه استفاده می‌شود (رضایان، ۱۳۹۰ و حسینی، ۱۳۹۱).

این روش دارای شش گام اصلی برای تشکیل درخت خطاست که در زیر به طور خلاصه ارائه شده است:

الف) تعریف سیستم و تشریح رخداد‌های نامطلوب در آن

ب) ساخت درخت خطا با استفاده از منطق ریاضی و سایر علائم استاندارد

ج) ارزیابی کیفی درخت خطای تشکیل شده

---

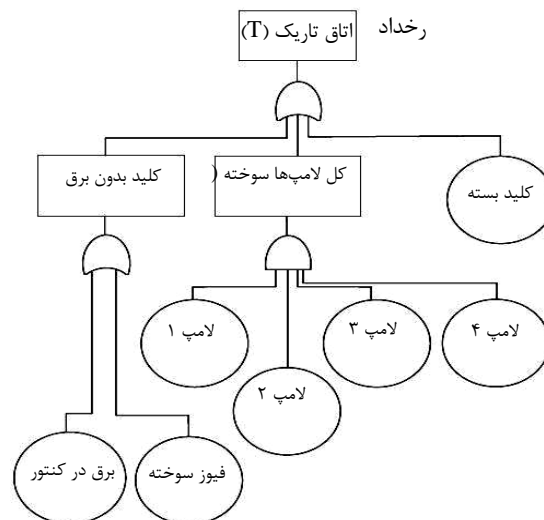
<sup>۱</sup> Fault Tree Analysis (FTA)

د) کسب و جمع‌آوری اطلاعات پایه شامل نرخ خرابی اجزاء مختلف و احتمال وقوع خرابی در آنها

ه) ارزیابی کمی درخت خطا

و) پیشنهاد اقدامات لازم برای اصلاح و بهبود درخت

همان طور که مشاهده می‌شود، روش درخت خطا یک روش کیفی و کمی بوده و به این دلیل به طور بسیار مناسبی شرایط فنی و خرابی‌های دستگاه را تحلیل می‌نماید. این روش با تعریف رخداد‌های نامطلوب به عنوان "رخداد بالا"<sup>1</sup> شروع شده و طرح این سوال که "این رخداد چگونه می‌تواند اتفاق بیافتد؟" مسئله را تحلیل نموده و ساختار درخت خطا را تا کوچکترین اجزای سیستم ادامه می‌دهد (Dhillon, 2008). شکل (۲-۵) یک نمونه درخت خطا نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، این درخت برای تحلیل احتمال تاریک بودن یک اتاق تشکیل شده است. در این درخت از بالا به پایین، دلایل ممکن برای تاریک بودن یک اتاق به صورت شاخه شاخه ارائه شده است.



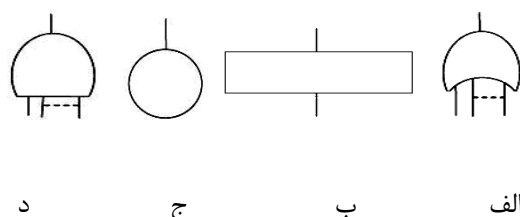
شکل ۲-۵- نمونه‌ای از یک درخت خطا (Dhillon, 2008)

<sup>1</sup> Top Event



## ۲-۷-۲-۱- نمادها و علائم استاندارد در درخت‌های خطا

در ترسیم ساختار درخت خطا معمولا از علائم و نمادهای استاندارد استفاده می‌شود که هر یک در محل خود تفسیر ویژه و عملکرد ریاضی منحصر به فردی دارند. تاکنون بیش از ۱۷ علامت و عملگر استاندارد پیشنهاد شده است. با این حال چهار علامت اصلی بیشتر از سایر علائم در تحلیل‌های عادی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این علائم در شکل (۲-۶) ارائه شده است.



شکل ۲-۶- چهار نماد و عملگر اصلی در روش تحلیل درخت خطا (Dhillon, 2008)

در شکل (۲-۶) نماد (الف) که "درگاه یا"<sup>۱</sup> نامیده می‌شود زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که رخداد خروجی وابسته به وقوع حداقل یک رخداد ورودی این درگاه باشد. نماد (ب) نشان دهنده رخداد یا رویداد میانی است. نماد (ج) نشان دهنده رخداد یا رویداد اساسی است. به عنوان مثال طبق شکل (۲-۵)، زمانی کلید بدون برق است که یا در کنترلر برق نباشد و یا فیوز سوخته باشد. مفهوم ریاضی این درگاه به صورت رابطه (۲-۱۰) می‌باشد (Dhillon, 2008).

$$P(X_0) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P(X_j)) \quad (2-10)$$

که در آن،  $m$ : تعداد رخداد‌های خرابی ورودی درگاه،  $P(X_0)$ : احتمال وقوع رخداد خروجی درگاه و  $P(X_j)$ : احتمال وقوع هر کدام از رخداد‌های خرابی ورودی به درگاه است.

<sup>1</sup> OR Gate

نماد (د) که به "درگاه و" شهرت یافته زمانی به کار می‌رود که خروجی درگاه به وقوع کلیه رخدادهای ورودی وابسته باشد. شکل (۲-۵) نشان می‌دهد که تمامی لامپ‌ها زمانی خاموش می‌شوند که لامپ ۱ و لامپ ۲ و لامپ ۳ و لامپ ۴، همگی سوخته و از کار افتاده باشند. مفهوم ریاضی این درگاه به صورت رابطه (۲-۱۱) می‌باشد (Dhillon, 2008).

$$P(X_A) = \prod_{j=1}^m P(X_j) \quad (2-11)$$

که در آن  $P(X_0)$ ، احتمال وقوع رخداد خروجی "درگاه و" است.

با توجه به مفاهیم نمادهای مختلف به کار رفته در درخت خطا، برای محاسبه احتمال وقوع رخداد اصلی (رخداد بالا) باید احتمال وقوع هر یک از خرابی‌های شاخه‌های مختلف معلوم باشد. با معلوم بودن احتمال هر شاخه می‌توان احتمالات مربوط به شاخه‌ها را از پائین به بالا محاسبه و احتمال رخداد اصلی را به دست آورد. روش درخت خطا، روشی بسیار توانمند و پرکاربرد در حوزه مهندسی قابلیت اطمینان است. با این وجود استفاده از داده‌های واقعی در محاسبه احتمال خرابی یک قطعه که در پایین‌ترین بخش یک شاخه وجود دارد، بسیار وقت‌گیر و مشکل است (Dhillon, 2006).

## ۲-۷-۳- روش مارکوف<sup>۲</sup>

روش مارکوف بر مبنای حالت‌های سیستم استوار بوده و با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌نماید (رضاییان، ۱۳۹۰). ویژگی دستگامی که در آن، وضعیت کنونی معلوم و وضعیت‌های گذشته هیچ تاثیری در وضعیت آینده آن نداشته باشند، ویژگی مارکوفی و دستگامی که دارای این ویژگی است را زنجیر مارکوف می‌نامند (Jalali &

<sup>1</sup> AND Gate

<sup>2</sup> Markov Theory

(Forohande, 2011). رشته آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها نظیر  $x_1, x_2, \dots, x_n$  دو ویژگی زیر را برآورده می‌سازند، فرآیند تصادفی زنجیر مارکوف نامیده می‌شود (جلالی و همکاران، ۱۳۸۸).

الف- هر نتیجه به مجموعه متناهی نتایج یعنی  $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  که فضای حالت دستگاه نامیده می‌شود، متعلق باشد. در این شرایط اگر نتیجه آزمایش  $n$  ام،  $a_i$  باشد آنگاه دستگاه در زمان  $n$  یا در مرحله  $n$  ام در حالت  $a_i$  قرار دارد.

ب- نتیجه هر آزمایش تنها به نتیجه آزمایش ماقبل آن وابسته باشد و از نتیجه آزمایش‌های ما قبل دیگر مستقل باشد. به عبارت دیگر برای هر زوج از حالت‌ها، نظیر  $(a_i, a_j)$  احتمال معینی مانند  $p_{ij}$  وجود داشته باشد به نحوی که  $a_j$  بلافاصله بعد از  $a_i$  رخ دهد.

اعداد  $p_{ij}$  بنام احتمال انتقال<sup>۱</sup> خوانده می‌شوند و به صورت ماتریسی که به نام ماتریس انتقال<sup>۲</sup> موسوم است، آرایش می‌یابند. در زیر ماتریس انتقال  $P$  که هر یک از درایه‌های آن احتمال انتقال  $p_{ij}$  را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود (Jalali & Ftohande, 2011).

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{pmatrix}$$

بدین ترتیب به هر حالت  $a_i$ ، سطر  $i$ ام ماتریس انتقال  $P$ ، یعنی  $(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im})$  متناظر می‌شود. اگر دستگاه در حالت  $a_i$  باشد، آنگاه این سطر برداری، همه نتایج محتمل در آزمایش بعدی را ارائه خواهد داد. از آنجا که این بردار نامنفی و مجموع درایه‌های آن برابر با یک است، آن را بردار احتمال<sup>۳</sup> می‌نامند. به همین ترتیب ماتریس انتقال  $P$  که هر سطر آن یک بردار احتمال

<sup>1</sup> Transition Probability

<sup>2</sup> Transition Matrix

<sup>3</sup> Probability Vector

است، ماتریس تصادفی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. یکی از مهمترین ویژگی‌های ماتریس تصادفی این است که هر ماتریس تصادفی منظم مثل  $P$  دارای یک بردار ثابت<sup>۲</sup> یکتا<sup>۳</sup>، مثل  $t$  است که ضرب ماتریس تصادفی از راست، مقدار آن را تغییر نمی‌دهد. به عبارت دیگر برای این ویژگی می‌توان روابط (۲-۱۲) را تعریف نمود (Jalali et al., 2008).

$$t \times P = t, \quad \sum_{i=1}^n t_i = 1 \quad (12-2)$$

اگر ماتریس انتقال  $P$  در زنجیر مارکوف، یک ماتریس تصادفی منظم باشد، آنگاه برای زمان طولانی احتمال اینکه حالت  $a_j$  رخ دهد تقریباً با مولفه  $t_j$  از بردار احتمال یکتای  $t$  ماتریس  $P$  برابر است. به این حالت توزیع ماندگار<sup>۴</sup> زنجیر مارکوف گویند (جلالی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین، با محاسبه توزیع ماندگار زنجیره مارکوف در حالتی از سیستم که مطلوب نیستند، امکان محاسبه قابلیت اعتماد سیستم در حالات مذکور وجود خواهد داشت.

## ۲-۷-۴- روش تحلیل آماری

با توجه به تعاریف ارائه شده، قابلیت اطمینان یک کمیت آماری و مبتنی بر تئوری احتمالات است. بنابراین، روش تحلیلی آماری کامل‌ترین و جامع‌ترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌آید. همان طور که در رابطه (۲-۳) دیده شد، تابع توزیع احتمال زمان بین خرابی‌ها به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است. لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان است. سپس با استفاده از رابطه (۲-۳) معادله تابع زمان قابلیت اطمینان به دست می‌آید. از آنجایی که تنها در روش تحلیل آماری

<sup>1</sup> Stochastic Matrix

<sup>2</sup> Fixed Vector

<sup>3</sup> Unique

<sup>4</sup> Stationary Distribution

می‌توان به یک معادله تابع زمان دست یافت، لذا این روش "مدل‌سازی قابلیت اطمینان" نامیده شده و سایر روش‌ها بیشتر به نام تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می‌شوند. نکته بسیار مهم در مورد مدل‌سازی قابلیت اطمینان، دقت در نوع داده‌های جمع‌آوری شده است. اگر داده‌ها از نظر آماری "مستقل بوده و به طور یکسان توزیع شده"<sup>۱</sup> باشند برای مدل‌سازی، از آمار کلاسیک و توابع توزیع چگالی معمولی استفاده می‌شود. اما اگر داده‌ها این شرط را نداشته باشند از تکنیک‌های غیر آماری استفاده خواهد شد. دو تکنیک عمده برای تشخیص نوع داده‌ها وجود دارد (Ascher & Feingold, 1984; Klefsjö & Kumar, 1992):

**الف- آزمون روند<sup>۲</sup>:** برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله این روش‌ها می‌توان به "آزمون لاپلاس"<sup>۳</sup>، "آزمون هندبوک نظامی"<sup>۴</sup> و روش گرافیکی اشاره کرد. در میان این روش‌ها روش گرافیکی به دلیل سادگی و سرعت عملکرد از کاربرد بیشتری برخوردار است. اگر در اثر این آزمون‌ها معلوم شود که داده‌ها دارای روند هستند، برای مدل‌سازی از روش‌های خانواده "فرآیند پواسون غیرهمگن"<sup>۵</sup> مثل "فرآیند قانون توان"<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در آزمون هندبوک نظامی، ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری ( $U$ ) (رابطه ۲-۱۳) انجام می‌شود (MIL-HDBK-189, 1984).

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n / T_i) \quad (۲-۱۳)$$

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

<sup>1</sup> independent and identically distributed (iid)

<sup>2</sup> Trend Test

<sup>3</sup> Laplace

<sup>4</sup> Military Hand book

<sup>5</sup> Non-Homogeneous Poisson Process

<sup>6</sup> Power Law Process

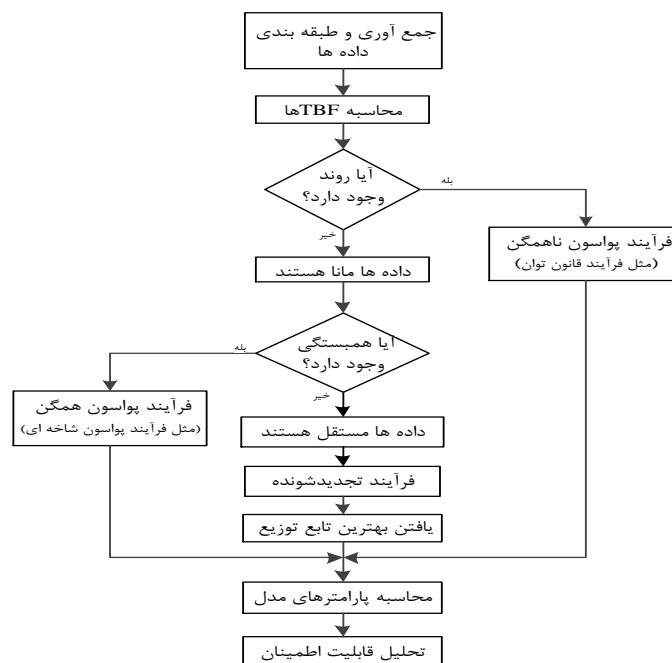
این فرض، شاخص  $U$  دارای توزیع کای ( $\chi^2$ ) با درجه آزادی  $2(n-1)$  است. برای کنترل صحت فرض صفر، پس از محاسبه  $U$  برای داده‌ها، از جدول استاندارد توزیع  $\chi^2$  استفاده می‌شود. اگر  $U$  از عدد بحرانی قرائت شده از جدول استاندارد بزرگتر باشد فرض پایه صفر پذیرفته می‌شود. در صورتی که فرض موجود 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.

(ب) **آزمون همبستگی مسلسل**<sup>۱</sup>: 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 در فضای رسم شده دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد در این حالت گفته می‌شود که داده‌های مسلسل یا پی‌درپی دارای همبستگی نیستند و در این حالت از روش آمار کلاسیک برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. اما اگر داده‌ها دارای همبستگی باشند، برای مدل‌سازی از روش "فرآیند پواسون شاخه‌ای"<sup>۲</sup> یا فرآیندهای تصادفی مشابه استفاده خواهد شد (Ascher & Feingold, 1984). شکل (۷-۲) روندنمای مربوط به تعیین نوع مدل‌سازی داده‌های آماری را نشان می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Serial Correlation Test

<sup>2</sup> Branching Poisson Process



شکل ۲-۷- روندنمای مربوط به تعیین نوع مدل سازی داده های آماری در روش آماری (Ascher & Feingold, 1984)

(Feingold, 1984)

## ۲-۷-۵- فرآیند قانون توان

فرآیند قانون توان یکی از شناخته شده ترین روش های مطالعه قابلیت اطمینان دستگاه های تعمیرپذیر 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:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (2-14)$$

که در آن  $\theta$ ، پارامتر مقیاس و  $\beta$ ، پارامتر شکل می باشند که طبق پیشنهاد کرو، می توان این

پارامترها را با استفاده از روش تخمین نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۱</sup> و روابط زیر محاسبه نمود:

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n-1} \ln(t_n / t_i)} \quad (15-2)$$

$$\hat{\theta} = \frac{t_n}{n^{1/\beta}} \quad (16-2)$$

که در این روابط،  $t_i$ ، زمان پیشامد  $i$ امین خرابی،  $t_n$ ، زمان کل عملکرد دستگاه و  $n$ ، تعداد کل خرابی دستگاه می‌باشد. تابع چگالی خرابی و قابلیت اطمینان فرآیند قانون توان به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (17-2)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (18-2)$$

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

## ۸-۲- قابلیت اطمینان در مهندسی معدن

استفاده از روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن به طور خلاصه در جدول (۲-۲) آورده شده است. با توجه به جدول (۲-۲)، تاکنون تنها از روش FMEA در مطالعه قابلیت

<sup>۱</sup> Maximum likelihood



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 استفاده شده و پرکاربردترین روش در ماشین‌آلات معدنی به شمار می‌آید.

جدول ۲-۲- لیست تحقیقات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن (تغییر یافته جدول حسینی، ۱۳۹۰)

نام محقق/محققان	زمینه مورد مطالعه
Levkovich & Chalenko (1966)	تخمین تعداد کارگاه‌های رزرو در روش جبهه‌کار طولانی بر مبنای قابلیت اطمینان تولید
Gimelshein & Nikeshin (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 جبهه‌کار طولانی
Mason (1983)	تجهیزات کارگاه جبهه‌کار طولانی
Singh & Tiwarl (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 معدنکار
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 معدنکار 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 معدن زیرزمینی
Dey et al. (1994)	لاستیک کامیون‌های معدنی
Mandal & Banik (1996)	تجهیزات جبهه‌کار طولانی
Vagenas et al. (1997)	تعمیر و نگهداری LHDها
Samanta et al. (2001)	شاول برقی در معادن زغال‌سنگ روباز

دراکلاین	Townson (2002)
شاول هیدرولیکی در معادن روباز	Hall & Daneshmend (2003a)
ماشین‌آلات ترابری در معادن زیرزمینی (LHD و کامیون)	Hall & Daneshmend (2003b)
حفاری‌های معدنی زیرزمینی	Vagenas et al. (2003)
سیستم ترمز هیدرولیکی لودرهای معدنی	Ghodrati & Kumar (2005a)
چک‌های هیدرولیکی ماشین LHD	Ghodrati & Kumar (2005b)
سیستم تولید معادن زیرزمینی	Kumral (2005)
شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی	Gupta et al. (2006)
سیستم نوار نقاله در معادن زیرزمینی	Gupta & Bhattacharya (2007)
کارخانه فرآوری مواد معدنی	Barabady & Kumar (2007, 2008)
شبکه‌های تهویه معادن زغال‌سنگ	Dongpeng et al. (2008)
سیستم تولید معادن جبهه‌کار طولانی	Bing-Yuan et al. (2009)
ماشین LHD در معادن با سنگ سخت	Vagenas & Xiangxi (2009)
سیستم تولید در معادن روباز	Sharma et al. (2009)
سیستم تهویه تونل‌های در حال ساخت	Jalali & Forouhandeh (2011)
ماشین تمیزکاری و لقی‌گیری <sup>۱</sup> در معادن زیرزمینی	Wijaya et al. (2011)
قابلیت اطمینان درام شیرر	Hosseyini et al. (2011)
قابلیت اطمینان ماشین حفاری	Rahimdel et al. (2012)

## ۲-۹- جمع‌بندی

در این فصل، مفاهیم پایه مورد استفاده در قابلیت اطمینان ارائه و مورد بحث قرار گرفت. سپس به معرفی روش‌های مدل‌سازی قابلیت اطمینان پرداخته شد. در پایان، استفاده از روش‌های یاد شده در حوزه مهندسی معدن، به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفت. در فصل آینده، به معرفی ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه پرداخته شده است.

<sup>۱</sup>. Scaling Machine



فصل سوم:

ماشین های بارگیری و باربری، مطالعه موردی؛

معدن مس سرچشمه

### ۳-۱- مقدمه

عصر پیشرفت و تحول در صنعت معدنکاری و استخراج در اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ اتفاق افتاد، در آن سالها اکثر تولیدکنندگان تجهیزات و ماشین‌آلات معدنی به سمت تولید ماشین‌های بزرگ معادن سطحی نظیر شاول، دراگلاین و کامیون‌های بزرگ روی آوردند. در این دوران ساخت ماشین‌های بزرگ معدنی توسط شرکت‌های Joy, Marion, Bucyrus و Gardner Denver توسعه یافت. در این فصل ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### ۳-۲- ماشین‌های بارگیری و باربری

سیستم‌های بارگیری و باربری در معادن روباز و زیر زمینی با یکدیگر متفاوت هستند. در معادن روباز ضمن به کارگیری حجم عظیمی از عملیات آتشباری، از ماشین‌آلات غول پیکر بارگیری و باربری استفاده می‌شود اما در معادن زیرزمینی از عملیات آتشباری به صورت محدود و کنترل شده استفاده می‌شود و بیشتر از ماشین‌آلات حفاری برای خریدایش مواد معدنی استفاده می‌شود و از سیستم‌های ریلی و نوار نقاله برای باربری استفاده می‌شود. تقریباً در ۸۰ درصد معادن بزرگ دنیا که به روش روباز استخراج می‌شوند از شاول به عنوان ماشین بارگیری و از کامیون به عنوان ماشین باربری استفاده می‌شود (شکل (۳-۱)). بارگیری و باربری آخرین مرحله سیکل استخراج مواد معدنی می‌باشد. پس از اجرای عملیات آتشباری و خریدایش اولیه توده سنگ‌های معدنی، بار فرآهم شده باید از محل معدن به سنگ شکن یا دپوهای ماده معدنی و باطله منتقل می‌شود. حتی نوع عملیات آتشباری نیز تا حدی وابسته به وسایل بارگیری و باربری می‌باشد (گزارش دفتر فنی معدن مس سرچشمه).



شکل ۳-۱- بارگیری و باربری توسط شاول و کامیون

### ۳-۲-۱- ماشین‌های بارگیری

شاول نوعی از مجموعه بیل مکانیکی است (شکل ۳-۲) که برای بارگیری سنگ‌های سخت (واستثنائاً خاکها) و اغلب در فضای باز (معادن روباز) مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاول‌ها توانایی کندن و بارگیری مواد واقع در سطح ایستایی ماشین یا بالاتر از آن را دارند. بطور کلی عملیات شاول شامل حرکات ذیل می‌باشد (گزارش دفتر فنی معدن مس سرچشمه):

۱- نفوذ کردن در سینه کار و پرکردن صندوقه به وسیله بازوی جام<sup>۱</sup>

۲- بالا آوردن صندوقه و جدا کردن آن از سینه کار<sup>۲</sup>

۳- دور زدن به محل تخلیه<sup>۳</sup>

۴- تخلیه صندوقه به وسیله بازکردن دریچه بیل<sup>۴</sup>

۵- چرخش مجدد به طرف سینه کار جهت شروع چرخه بعدی<sup>۵</sup>

۶- در صورت نیاز حرکت به محل بارگیری جدید به وسیله چرخ زنجیری<sup>۶</sup>

<sup>1</sup> crowding

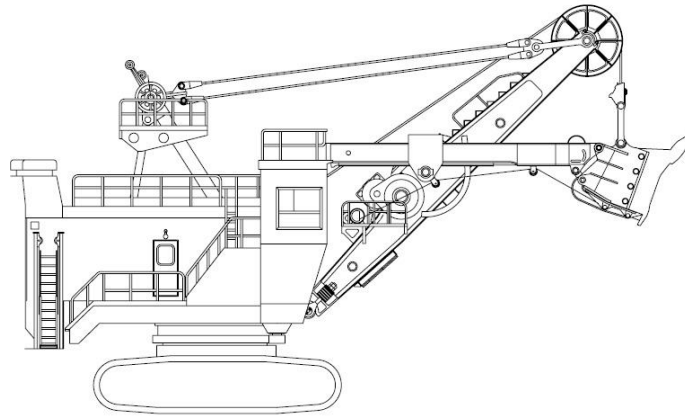
<sup>2</sup> hoisting

<sup>3</sup> swining

<sup>4</sup> dumping

<sup>5</sup> swining

<sup>6</sup> propelling



شکل ۳-۲- ماشین بارگیری (شاول کابلی)

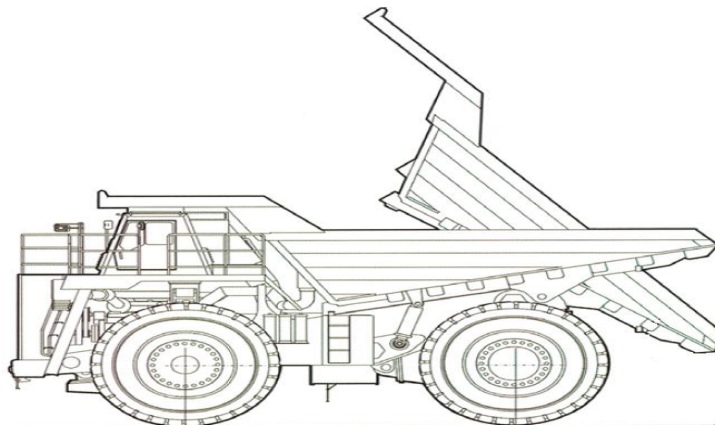
### ۳-۲-۲- ماشین های باربری

دامپ تراک کامیون غول پیکر معدنی است که قابلیت جابه جایی ۹۰ تا ۳۰۰ تن بار را دارا است (شکل ۳-۳)). منبع تغذیه دامپ تراک نیروی دیزلی و الکتریکی است. موتور های دیزل اگر چه ۷۰ درصد انرژی را تلف می کنند ولی ذخیره انرژی (سوخت یا گازوئیل) بسیار راحت تر و ارزان تر است. موتورهای الکتریکی برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی ۳۰ درصد انرژی تلف می کنند ولی باید این را در نظر گرفت که خود انرژی الکتریکی نهایتاً توسط یک ژنراتور که نیرو را از سوخت تهیه کرده و خود آن ژنراتور هم ۳۰ درصد اتلاف انرژی داشته تا تبدیل به انرژی الکتریکی شود و در انتقال هم ۱۰ درصد را از دست می دهد. با استفاده از نیروی الکتریکی می توان با هر گشتاوری که رو محور موتور اعمال شود موتور را راه اندازی کرد.

اگر ظرفیت دامپ تراک بالاتر از ۳۰۰ تن باشد اولویت با موتورهای الکتریکی است و در صورت لزوم باید در هر چرخ یک موتور الکتریکی استفاده کرد. به منظور طول عمر بیشتر و زمان بین تعمیرات بیشتر، چاره ای جزء استفاده از موتورهای الکتریکی در هر محور یا حتی در هر چرخ نیست (گزارش دفتر فنی معدن مس سرچشمه).

لاستیک دامپ تراک به دلیل استفاده از آنها در جاده های ناهموار به طور معمول توخالی و بادی

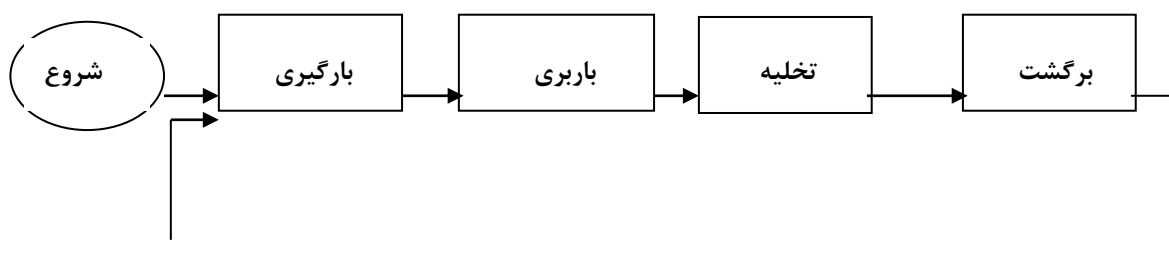
طراحی می‌شوند برای اینکه بتوانند براحتی بر روی سنگ‌ها و ناهمواری‌ها حرکت کنند. لاستیک توپر فقط برای مواردی خاص می‌تواند روی چرخ‌های عقب نصب شود.



شکل ۳-۳- ماشین باربری (دامپ تراک)

### ۳-۳- مدلسازی ناوگان ترابری

برای مدلسازی قابلیت اطمینان، ناوگان ترابری به دو سیستم بارگیری و باربری تقسیم شده است که سیستم بارگیری توسط شاول و سیستم باربری توسط دامپ‌تراک انجام می‌شود. رابطه این دو سیستم همان‌طور که در شکل (۳-۴) مشخص شده است به صورت سری می‌باشد.



شکل ۳-۴- سیکل ترابری با ماشین‌های بارگیری و باربری

سیستم بارگیری از ۸ شاول تشکیل شده است که هر شاول یک زیرسیستم محسوب می‌شود که به صورت موازی در ارتباط با یکدیگر هستند.



شاول‌های موجود در معدن مس سرچشمه همگی از نوع کابلی بوده و منبع تغذیه آن‌ها الکتریکی است. شاول‌های ۲۲۰۱، ۲۲۰۲، ۲۲۰۳، ۲۲۰۴، ۲۲۰۶ و ۲۲۰۷ ساخت کارخانه P&H بوده و ظرفیت جام آن‌ها ۹/۵ مترمکعب است و شاول‌های ۲۲۰۹ و ۲۲۱۰ نیز ساخت کارخانه P&H بوده ولی ظرفیت جام آن‌ها ۱۵ مترمکعب است.

سیستم باربری از ۲۰ کامیون تشکیل شده است که هر کامیون یک زیرسیستم محسوب می‌شود که به صورت موازی در ارتباط با یکدیگر هستند. دامپ‌تراک‌های ۲۳۳۴، ۲۳۳۷، ۲۳۳۹، ۲۳۴۰، ۲۳۴۲، ۲۳۴۳، ۲۳۴۶، ۲۳۴۷، ۲۳۵۰ و ۲۳۵۲ ساخت کارخانه‌ی Dresser بوده و ظرفیت آن‌ها ۱۲۰ تن است و دامپ‌تراک‌های ۲۳۵۳، ۲۳۵۴، ۲۳۵۵، ۲۳۵۶، ۲۳۵۷، ۲۳۵۸، ۲۳۵۹، ۲۳۶۰، ۲۳۶۱ و ۲۳۶۲ ساخت کارخانه Belaz بوده و ظرفیت آن‌ها ۱۵۰ تن است.

## فصل چهارم:

مدلسازی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن

مس سرچشمه

#### ۴-۱- مقدمه

در فصل سوم به معرفی سیستم‌ها و زیرسیستم‌های ناوگان ترابری پرداخته شد. در این فصل پس از بررسی داده‌های خرابی هر ماشین و با در نظر گرفتن هر ماشین به عنوان یک زیرسیستم و با بهره‌گیری از روش‌های آماری، به مدلسازی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه پرداخته شده است. سپس، با توجه به ارتباط بین زیرسیستم‌ها، مدل قابلیت اطمینان سیستم بارگیری و سیستم باربری و در نهایت ناوگان ترابری معدن ارائه و بحث شده است.

#### ۴-۲- داده‌های خرابی ماشین

داده‌های خرابی مهم‌ترین ابزار در تحلیل قابلیت اطمینان هستند. در این تحقیق، از اطلاعات خرابی موجود در تعمیرگاه معدن به مدت ۱۲ ماه، از فروردین‌ماه ۱۳۹۱ تا اسفندماه ۱۳۹۱، استفاده شده است. نمونه‌ای از فرم جمع‌آوری داده‌های خرابی در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱- نمونه‌ای از فرم ثبت خرابی ماشین‌های ترابری

شماره	عیب	دپارتمان	نوع دستگا ه	ملاحظات	تاریخ ورود	ساعت ورود	تاریخ خروج	ساعت خروج
2210	رفع عیب کابل	مکانیک شاول	شاول	کابل تریپ پاره	91/12/29	14:10	91/12/29	14:25
2340	رفع عیب چرخ	مکانیک وابکو	کامیون	روغن ریزی	91/01/01	14:30	91/01/03	14:00
2206	رفع شیشه	جوشکاری	شاول	شیشه شکسته	91/12/29	16:00	91/12/29	16:00
2337	سرویس ۱۲۵	سرویس	کامیون		91/01/01	16:00	91/01/01	21:00
2358	رفع عیب	موتوری	کامیون	جوش آورده	91/01/01	16:20	91/01/01	17:10
2206	عیب پروپل	مکانیک شاول	شاول	پروپل ضعیف	91/12/30	17:25	91/12/30	17:55
2203	رفع عیب پاکت	مکانیک شاول	شاول	باز میشود	91/12/29	2:30	91/12/29	2:50
2206	رفع عیب	مکانیک شاول	شاول	باز نمیشود	91/12/29	21:05	91/12/29	21:15

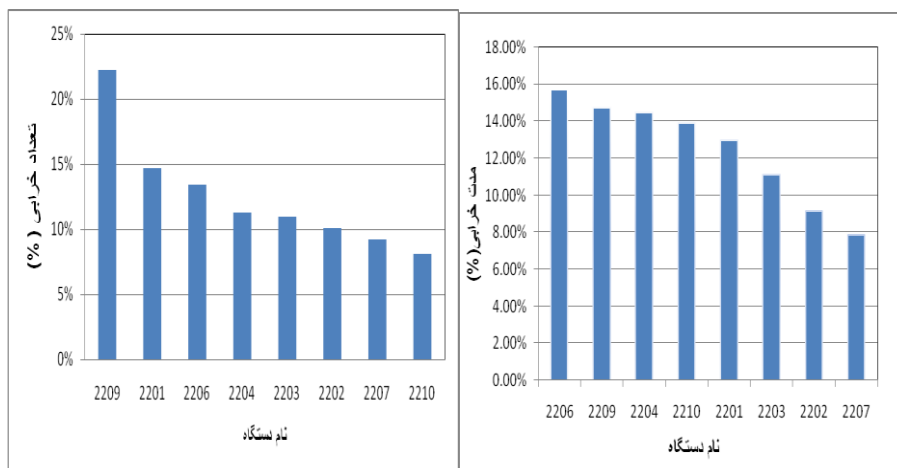
بیشتر فعالیت‌های انجام شده در این مرحله شامل بررسی و جداسازی اطلاعات هر یک از ماشین‌ها، تفکیک داده‌های خرابی مربوط به هر یک از ماشین‌ها، تعیین زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان برای تعمیر (TTR) و اقدامات انجام شده در جهت رفع خرابی‌ها بوده است.

#### ۳-۴- تحلیل پارتو<sup>۱</sup>

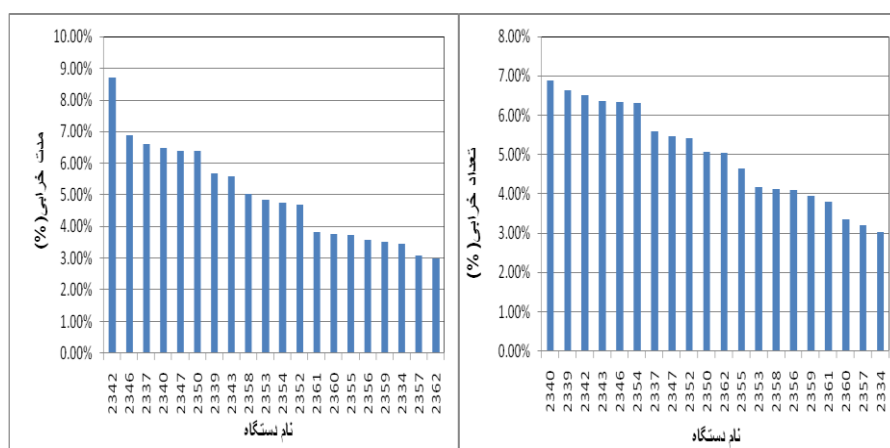
به منظور تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم از تحلیل پارتو استفاده شده است. با توجه به این روش، پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی، درصد تعداد خرابی و درصد مدت خرابی هر زیرسیستم نسبت به تمام خرابی‌ها محاسبه شده و نمودار ستونی فراوانی خرابی زیرسیستم‌ها، به ترتیب از بیشترین مقدار فراوانی به کمترین مقدار رسم شده است. به این ترتیب امکان تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم وجود خواهد داشت. نمودار ستونی تحلیل پارتو برای زیرسیستم‌های مختلف هر یک از سیستم‌های ترابری در شکل (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-۱)، زیرسیستم ۲۲۰۹ با بیشترین درصد تعداد خرابی، بحرانی‌ترین زیرسیستم در سیستم بارگیری است. همچنین زیرسیستم ۲۲۰۶ با بیشترین درصد مدت خرابی، بحرانی‌ترین زیرسیستم در سیستم بارگیری است. با توجه به شکل (۴-۲)، زیرسیستم ۲۳۴۰ با بیشترین درصد تعداد خرابی، بحرانی‌ترین زیرسیستم در سیستم باربری است. همچنین زیرسیستم ۲۳۴۲ با بیشترین درصد مدت خرابی، بحرانی‌ترین زیرسیستم در سیستم باربری است. علاوه بر این زیرسیستم ۲۲۱۰ از نظر تعداد و زیرسیستم ۲۲۰۷ از نظر مدت در سیستم بارگیری و همچنین زیرسیستم ۲۳۳۴ از نظر تعداد و زیرسیستم ۲۳۶۲ از نظر مدت در سیستم باربری، دارای کمترین خرابی در مقایسه با سایر زیرسیستم‌ها هستند.

---

<sup>۱</sup> Parto Analysis



شکل 4-1- نمودار پارتو خرابی سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه



شکل 4-2- نمودار پارتو خرابی سیستم باربری معدن مس سرچشمه

#### 4-4- روند تحلیل خرابی و مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستمها

در تحلیل قابلیت اطمینان هر زیرسیستم از روندنمای ارائه شده در شکل (2-7) استفاده شده

است. جزئیات مراحل مدلسازی در ادامه توضیح داده می‌شود:

الف) ارائه داده‌های خرابی برای هر زیرسیستم

در این بخش، خرابی‌های هر زیرسیستم به ترتیب وقوع مرتب و زمان‌های بین خرابی (TBF) و

زمان تعمیر هر یک از خرابی‌ها (TTR) محاسبه شده است.

ب) آزمون‌های مستقل و مانا بودن داده‌ها

در این بخش آزمون‌های روند و همبستگی متوالی به صورت گرافیکی و تحلیلی، بر روی داده‌ها انجام شده است و با توجه به نتایج، بهترین روش مدل‌سازی قابلیت اطمینان انتخاب شده است.

ج) تحلیل داده‌ها

در این قسمت، محاسبات مربوط به تعیین بهترین تابع چگالی احتمال خرابی و تخمین پارامترهای مدل بر روی داده‌ها انجام شده است. با توجه به شرایط و تعداد داده‌های مورد استفاده، از روش کلموگروف-اسمیرنوف برای انتخاب بهترین تابع چگالی خرابی استفاده شده است. 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)، به عنوان شاخص‌های کمکی، برای انتخاب بهترین توزیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماري Easyfit-5.5 (MathWave, 2010) استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار امکان برآزش بهترین تابع توزیع بر داده‌های خرابی وجود دارد. در این مرحله، زمان‌های بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرم‌افزار شده و میزان مطابقت هشت تابع پرکاربرد شرح داده شده، با داده‌های موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام 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. گرچه در مجموع تعداد ۶۳ توزیع آماری در این نرم‌افزارها مورد بررسی قرار می‌گیرند، با این حال در این تحقیق فقط هشت تابع اصلی شامل توابع نمایی، گاما، گامای تعمیم یافته، نرمال، لاگ‌نرمال، وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری و ارلانگ به عنوان توابع شناخته شده و پرکاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار گرفته است.

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 است. سپس، منحنی‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به دست آمده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه به مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری به صورت مجزا پرداخته شده است.

#### ۴-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۱

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی (شکل (۳-۴))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۳-۴))، نقاط دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۳-۴) ارائه شده است. مقدار  $K-S$  تابع نمایی، کمینه است. با توجه به نمودار  $P-P$  ترسیم شده اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از تابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز  $X-Y$  نزدیک است. مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط در شکل (۳-۴) آورده شده است.

$$R(t) = (-0.02685(t - 0.08333))$$

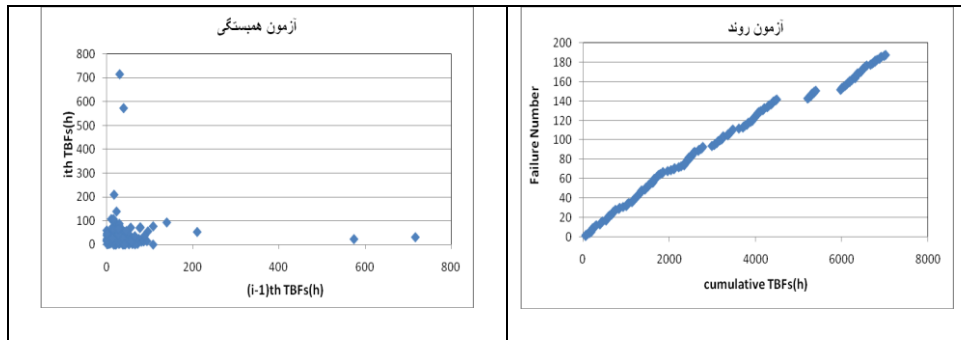
$$\lambda(t) = 0.02685$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۳)) نشان می‌دهد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد. بنابراین برای پرهیز از توقفات ناخواسته، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد.

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۴-۳) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، زیرسیستم ۲۲۰۱ سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت در تمام مدت فعالیت خود است. با مقایسه این منحنی با منحنی وان حمام، مشخص می‌شود که زیرسیستم ۲۲۰۱ در دوره عمر طبیعی خود به سر می‌برد.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

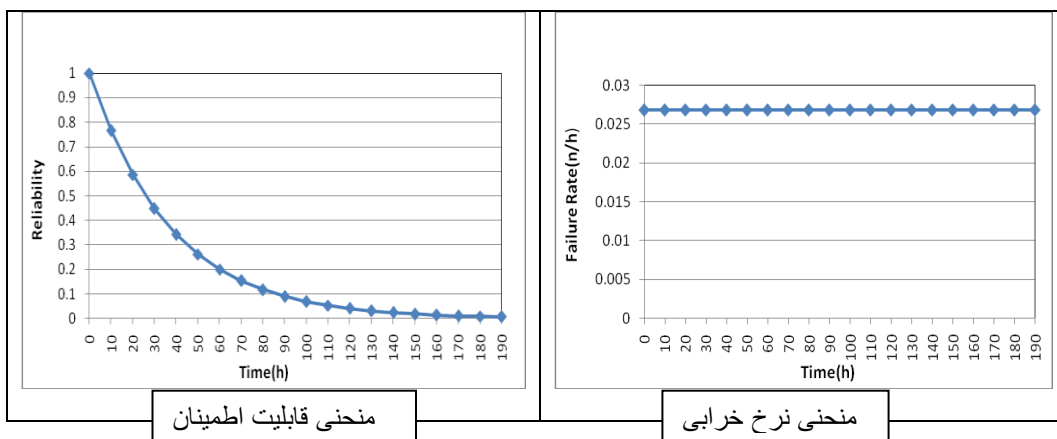


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	محاسبه شده U	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۰.۹۵	روش مدل سازی انتخابی
۱۸۸	۳۷۴	۴۴۸	رد نمی شود ( $U > ۳۳۰$ )	فرآیند تجدید شونده

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	PP نمودار	آزمون میانگین K-S (ساعت)
Exponential			0.09714
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=0.02685$ $\gamma=0.08333$		MTBF واقعی: 37 ساعت	



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۳- مدل سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۱

#### ۴-۶- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۲

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۴))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده است بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۲، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، نشان می‌دهد 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 در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ‌نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۲، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۲ به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی - های معادل با این روابط در شکل (۴-۴) آورده شده است.

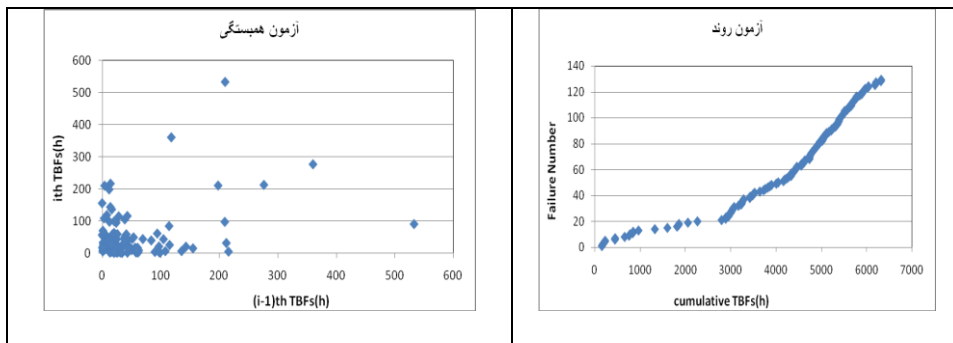
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - 3.6818}{0.91905} \right)^2 \right]$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left( -(\ln(t) - 3.6818)^2 \right)}{2t(0.91905)^2 \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left( \frac{-(\ln(x) - 3.6818)^2}{2(0.91905)^2} \right) dx}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۴)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۲ پس از حدود ۱۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تقریباً تند کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۴))، زیرسیستم ۲۲۰۲ دارای نرخ خرابی نزولی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

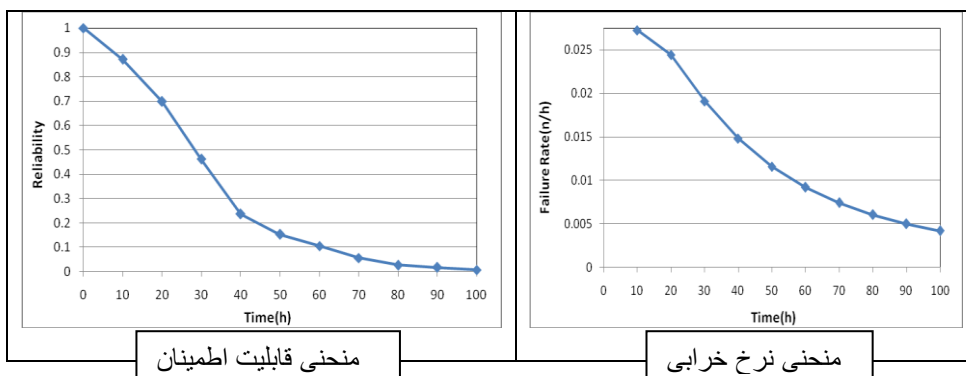


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 220$ )	۲۴۰	۲۵۶	۱۲۹

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			0.08036	48
پارامترهای بهترین توزیع: $\sigma=0.91905$ $\mu=3.6818$		MTBF واقعی: 48 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۴- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۲

#### ۴-۷- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۳

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۳ در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۵) در ادامه آورده شده است.

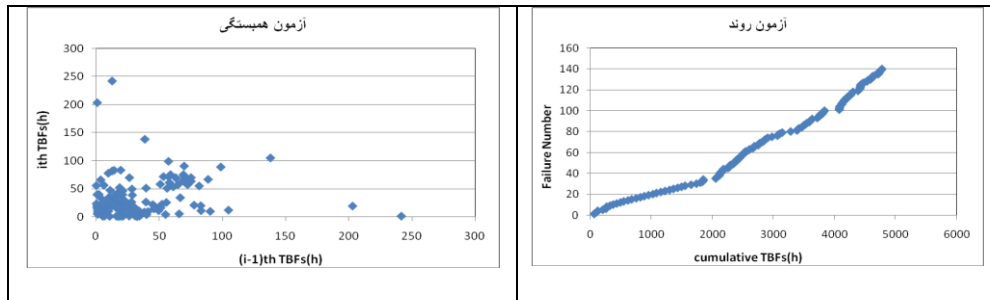
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{42.456}\right)^{0.87303}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{0.87303}{42.456} \left(\frac{t}{42.456}\right)^{0.87303-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۵))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم

۲۲۰۳، پس از حدود ۲۸۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. برای پرهیز از توقفات ناخواسته، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۵))، زیرسیستم ۲۲۰۳ دارای نرخ خرابی نزولی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

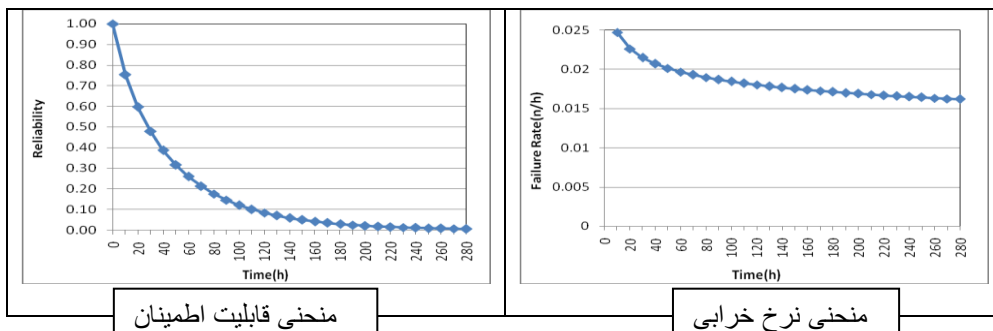


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 240$ )	۲۷۳	۲۷۸	۱۴۰

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Weibull	<p>پارامترهای بهترین توزیع: <math>\alpha=0.87303</math> <math>\beta=42.456</math></p>		37	0.10218
		MTBF واقعی: 34 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۵- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۳

۴-۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۴  
 با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۶))، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه  
 بر این در روش تحلیلی (شکل (۴-۶))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۲۴۹)،  
 فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۶))، نقاط به صورت  
 نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از  
 یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۴،  
 فرآیند تجدید شونده است.

با توجه به شکل (۴-۶)، مقادیر K-S در توابع بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در  
 نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-  
 S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۴، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، به صورت روابط

زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط در شکل (۴-۶) آورده شده است.

$$R(t) = (-0.02939(t - 0.08333))$$

$$\lambda(t) = 0.02939$$

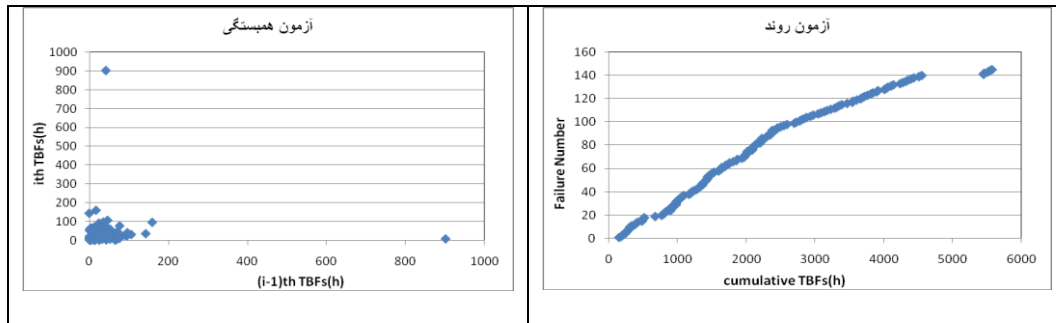
نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۶))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم

۲۲۰۴، پس از حدود ۱۸۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۴-۶) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی،

زیرسیستم ۲۲۰۴ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت و برابر با ۰/۰۲۹ خرابی در ساعت  
 در تمام مدت فعالیت خود است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

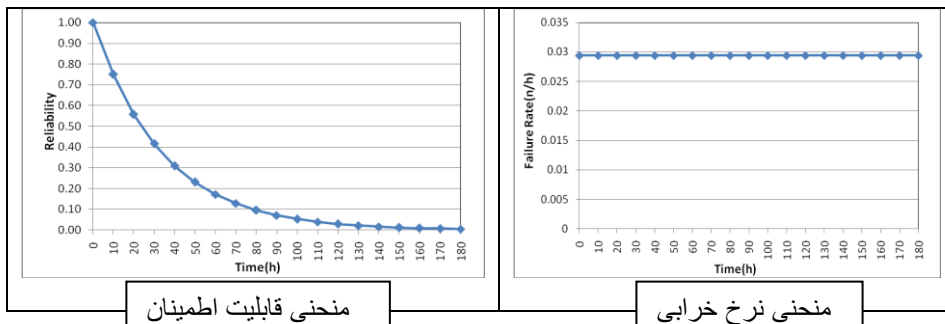


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۳۰۵	۲۸۸	۱۴۵
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 249$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

میانگین آزمون (ساعت)	K-S	P-P نمودار	تابع توزیع چگالی احتمال	نام
34	0.0495			Exponential
MTBF واقعی: 38 ساعت			پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=0.02939$ $\gamma=0.08333$	



شکل ۴-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۴

#### ۹-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۶

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۷-۴))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۶، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۷-۴) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۶، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۷-۴) آورده شده است.

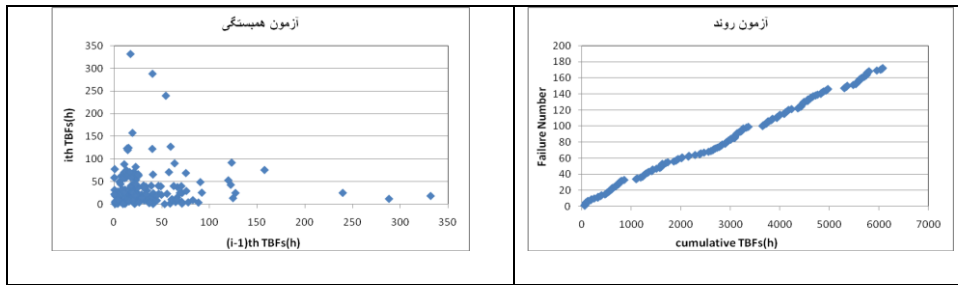
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{35.571}\right)^{1.0906}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0906}{35.571} \left(\frac{t}{35.571}\right)^{1.0906-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۷-۴))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۶، پس از حدود ۱۶۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۷-۴))، زیرسیستم ۲۲۰۶ دارای نرخ خرابی صعودی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با صفر خرابی در ساعت است.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

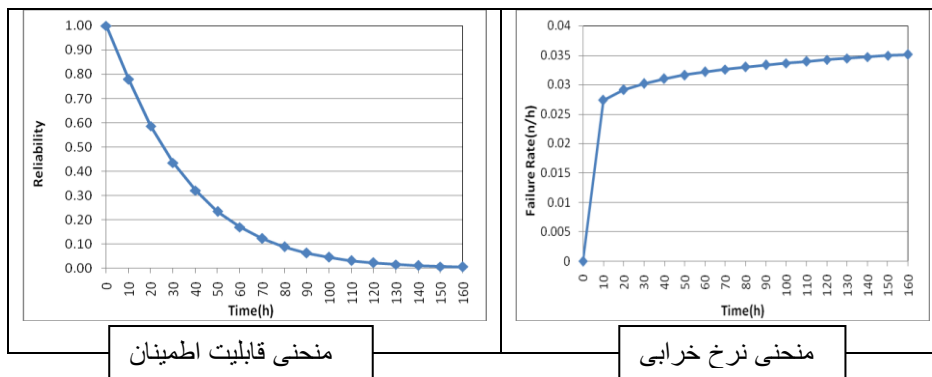


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 3.00$ )	۳۹۸	۳۴۲	۱۷۲

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Weibull			35	0.06174
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0906$ $\beta=35.571$		MTBF واقعی: 35.29 ساعت		



شکل ۴-۷- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۶

#### ۴-۱۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۷

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۸))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۷، فرآیند تجدید شونده است.

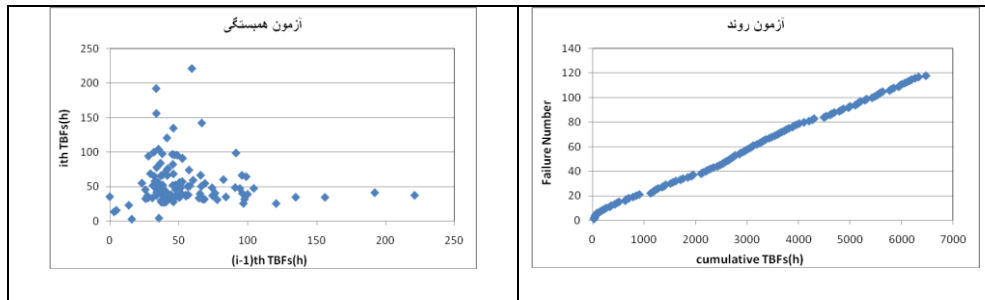
با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۷، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۸) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{34.36}\right)^{0.98262}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{0.98262}{34.36} \left(\frac{t}{34.36}\right)^{0.98262-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۸))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۷، پس از حدود ۱۶۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین، این شاول به طور قطع متوقف خواهد شد. با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۸))، زیرسیستم ۲۲۰۷ دارای نرخ خرابی نزولی است بر اساس این منحنی، زیرسیستم ۲۲۰۷، دارای تابع نرخ خرابی نزولی بوده و پس از ۱۰۰ ساعت با روند بسیار ملایمی کاهش می‌یابد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

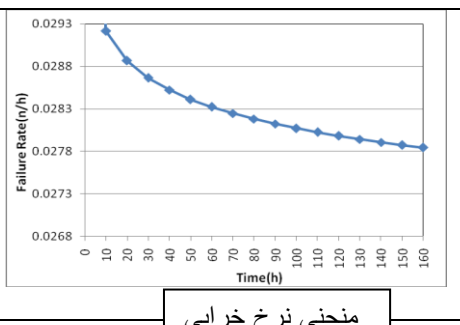
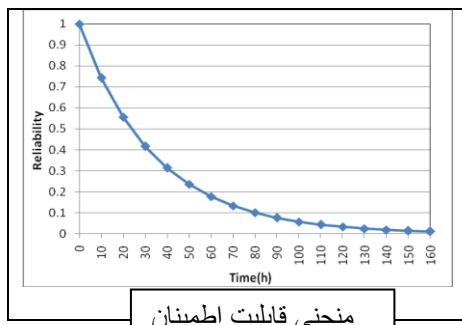


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 199$ )	۲۴۲	۲۳۴	۱۱۸

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Weibull			58	0.08042
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.98262$ $\beta=34.36$		MTBF واقعی: 54.85 ساعت		



شکل ۴-۸- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۷

#### ۴-۱۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۰۹

علاوه بر آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۹))، در روش تحلیلی با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۵۱۴)، فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۹))، 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 نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۹) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ‌نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۹، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۰۹، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط در شکل (۴-۹) آورده شده است.

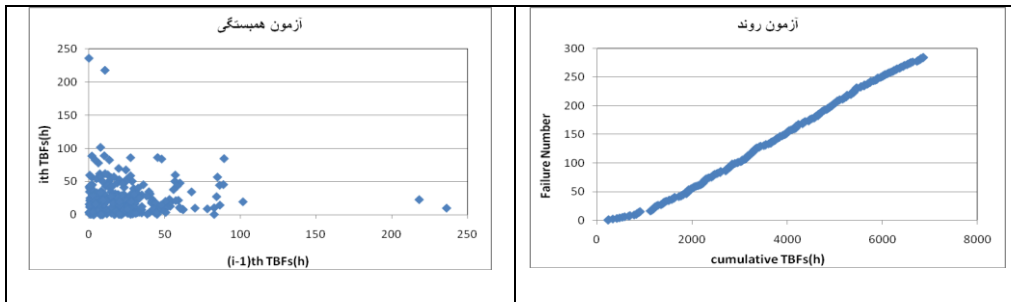
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - 3.8566}{0.56749} \right)^2 \right]$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left( -(\ln(t) - 3.8566)^2 \right)}{2t(0.56749)^2 \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left( \frac{-(\ln(x) - 3.8566)^2}{2(0.56749)^2} \right) dx}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۹))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۰۹، پس از حدود ۱۰۰ ساعت به زیر ۰,۱ می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۹))، زیرسیستم ۲۲۰۹ دارای نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی پس از حدود تنها ۲۰ ساعت، به مقدار ۰/۱۱ می‌رسد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

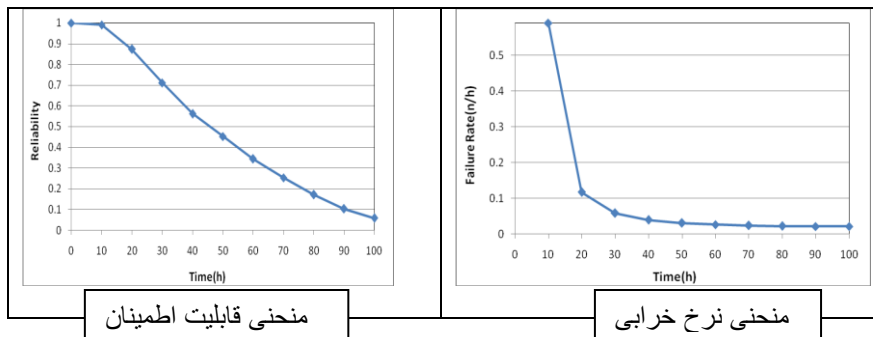


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۶۱۸	۵۶۸	۲۸۵
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۵۱۴$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)
lognormal			0.12543
پارامترهای بهترین توزیع: $\sigma=0.56749$ $\mu=3.8566$		MTBF واقعی: 24.06 ساعت	



شکل ۴-۹- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۰۹

#### ۴-۱۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم بارگیری ۲۲۱۰

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۰))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۱۰، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۱۰) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۱۰، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۲۱۰، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۰) آورده شده است.

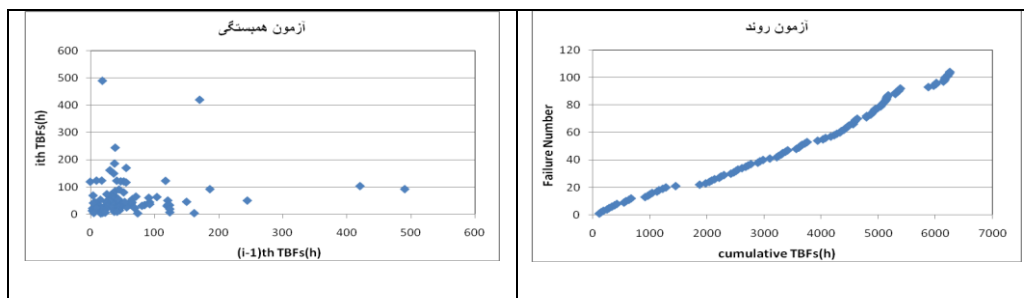
$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{28.781}\right)^{1.0876} (0.87125)\right)}{\Gamma(0.87125)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1.0876 \left(t^{1.0876(0.87125)-1}\right)}{28.781^{1.0876(0.87125)} \Gamma(0.87125)} \exp\left(-\left(\frac{t}{28.781}\right)^{1.0876}\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{28.781}\right)^{1.0876} (0.87125)\right)}{\Gamma(0.87125)}}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۰))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۲۱۰، پس از حدود ۱۲۰ ساعت به زیر ۰٫۲ می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۱۰))، زیرسیستم ۲۲۱۰ دارای نرخ خرابی نزولی است.

### آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

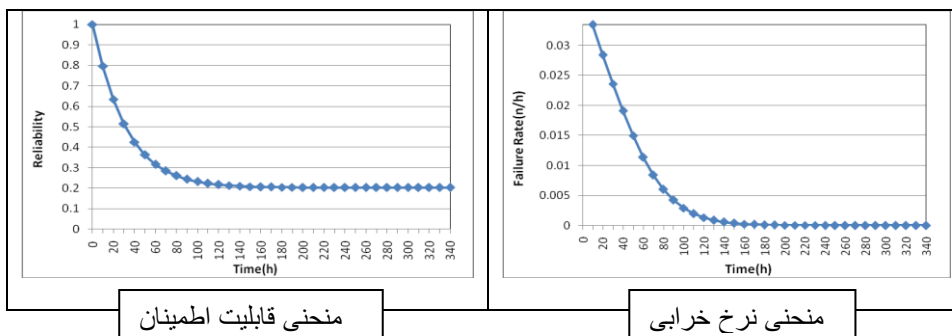


### نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	رد نمی‌شود ( $U > 173$ )	۱۸۵	۲۰۶	۱۰۴

### نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

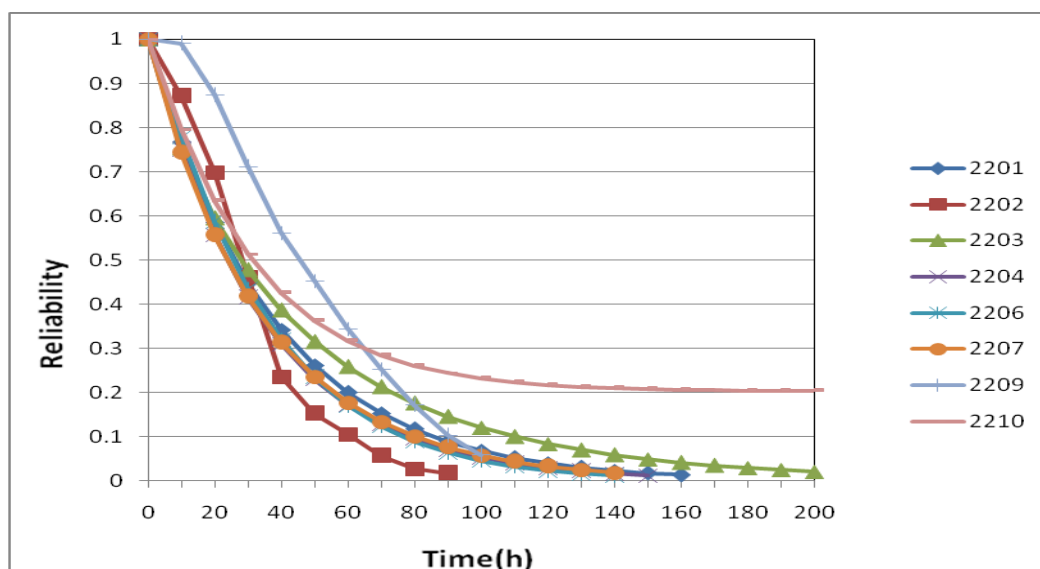
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
gen.gamma			61	0.05825
پارامترهای بهترین توزیع: $k=1.0876 \quad \alpha=0.87125 \quad \beta=28.781$		MTBF واقعی: 60.05 ساعت		



شکل ۴-۱۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم بارگیری ۲۲۱۰

#### ۱۳-۴- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم بارگیری

برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه، در شکل (۴-۱۱) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم‌های ۲۲۰۹ و ۲۲۰۲ تا قبل از ۲۰ ساعت، به ترتیب قابل اعتمادترین زیرسیستم‌ها بوده و پس از این زمان زیرسیستم ۲۲۰۹، نسبت به سایر زیرسیستم‌ها تا زمان ۶۵ ساعت، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود. علاوه بر این با توجه به شکل (۴-۱۱)، زیرسیستم‌های ۲۲۰۱، ۲۲۰۴، ۲۲۰۶ و ۲۲۰۷ سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه رفتار مشابهی دارند. زیرسیستم‌های ۲۲۰۲ و ۲۲۰۳ به ترتیب پس از ۹۰ و ۲۰۰ ساعت متوقف خواهند شد. زیرسیستم ۲۲۱۰ نیز پس از ۲۰ ساعت با قابلیت اطمینان ۰,۲ به فعالیت خود ادامه خواهد داد.

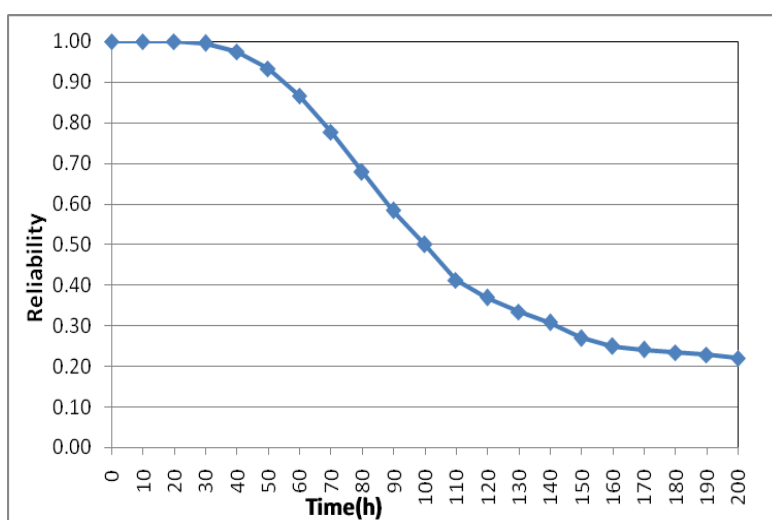


شکل ۴-۱۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات سیستم بارگیری به صورت موازی تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل ماشین را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۷) محاسبه



نمود. با استفاده از رابطه (۷-۲)، قابلیت اطمینان سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۴-۱۲) ارائه شده است. با توجه به منحنی قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه پس از طی ۲۰۰ ساعت تقریباً به ۰,۲ می‌رسد و با این مقدار به فعالیت خود ادامه می‌دهد. قابلیت اطمینان سیستم بارگیری، پس از ۱۰۰ ساعت از شروع به فعالیت آن، ۵۰ درصد کاهش یافته و به حدود ۵۰ درصد می‌رسد.



شکل ۴-۱۲- منحنی قابلیت اطمینان سیستم بارگیری معدن مس سرچشمه

#### ۱۴-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۳۴

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۳))، نقاط دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۴-۱۳) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۴، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۳۴، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۳) آورده شده است.

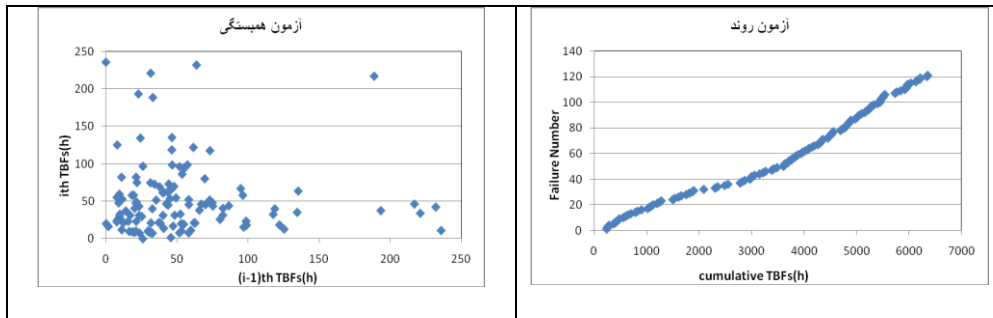
$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{43.769}\right)^{1.0627} (1.2574)\right)}{\Gamma(1.2574)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1.0627 \left(t^{1.0627(1.2574)-1}\right)}{43.769^{1.0627(1.2574)} \Gamma(1.2574)} \exp\left(-\left(\frac{t}{43.769}\right)^{1.0627}\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{43.769}\right)^{1.0627} (1.2574)\right)}{\Gamma(1.2574)}}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۳)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۴ پس از ۱۰۰ ساعت به صفر می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۱۳))، زیرسیستم ۲۳۳۴ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

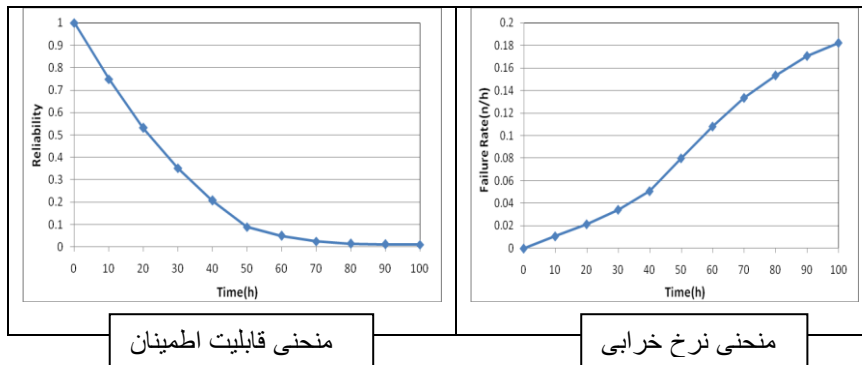


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵	۲۲۷	۲۴۰	۱۲۱
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۲.۰۵$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

میانگین (ساعت)	آزمون K-S	P-P نمودار	تابع توزیع چگالی احتمال	نام
53	0.07108			Gen-gamma
MTBF واقعی: 52.45 ساعت			پارامترهای بهترین توزیع: $k=1.0627 \quad \alpha=1.2574 \quad \beta=43.769$	



شکل ۴-۱۳- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۴

#### ۴-۱۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۳۷

علاوه بر آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۱۴))، در روش تحلیلی با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۳۹۴)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۴))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است.

با توجه به شکل (۴-۱۴)، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۷، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۳۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۴) آورده شده است.

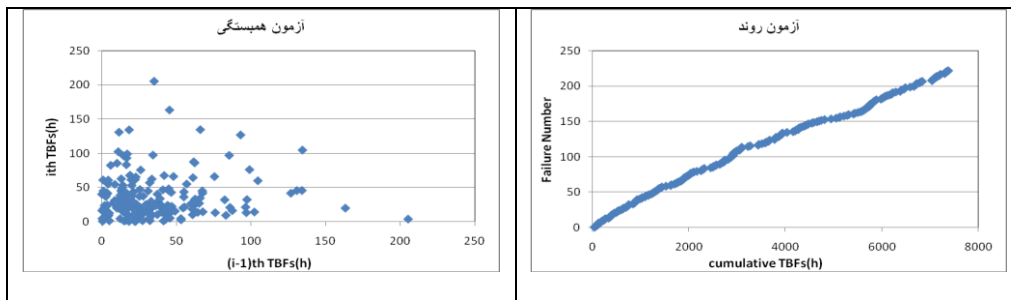
$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{27.733}\right)^{1.0249} (1.2125)\right)}{\Gamma(1.2125)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1.0249 \left(t^{1.0249(1.2125)-1}\right)}{27.733^{1.0249(1.2125)} \Gamma(1.2125)} \exp\left(-\left(\frac{t}{27.733}\right)^{1.0249}\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{27.733}\right)^{1.0249} (1.2125)\right)}{\Gamma(1.2125)}}$$

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۴))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک پس از حدود ۷۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۱۴))، زیرسیستم ۲۳۳۷ دارای رفتار خرابی رو به زوال و نرخ خرابی صعودی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

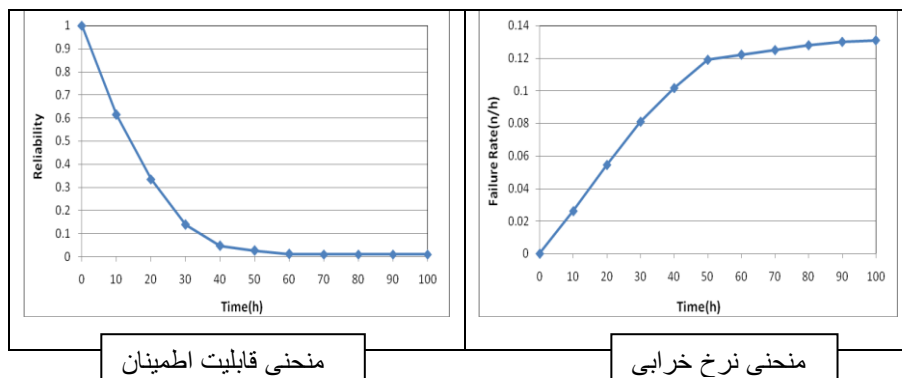


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵٪	۵۴۰	۴۴۲	۲۲۲
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 394$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Gengamma			40	0.07479
پارامترهای بهترین توزیع: $k=1.0249 \quad \alpha=1.2125 \quad \beta=27.733$		MTBF واقعی: 33.19 ساعت		



شکل ۴-۱۴- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۷

#### ۴-۱۶- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۹

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۵))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۹، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم ۲۳۳۹، در شکل (۴-۱۵) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۹، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۳۹، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۵) آورده شده است.

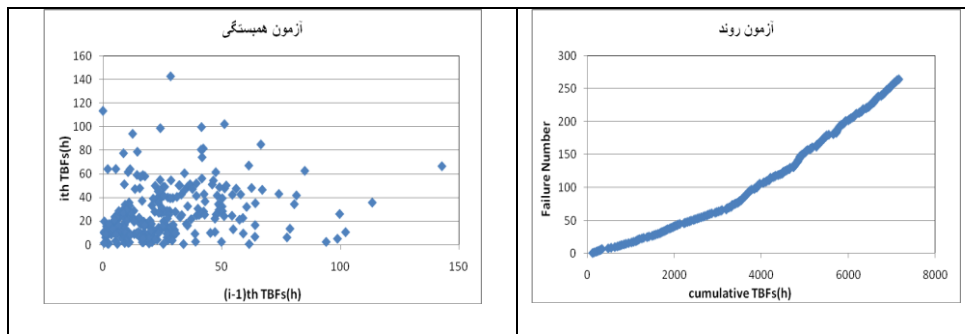
$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{18.41^{1.4731} \Gamma(18.41)} s^{1.4731-1} e^{-\frac{s}{18.41}} ds$$

$$\lambda(t) = \frac{t^{1.4731-1} e^{-\frac{t}{18.41}}}{18.41^{1.4731} \Gamma(1.4731) \left[ 1 - \Gamma\left(\frac{t}{18.41}; 1.4731\right) \right]}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۵))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۳۹ پس از حدود ۱۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۱۵)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۳۵ می‌رسد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

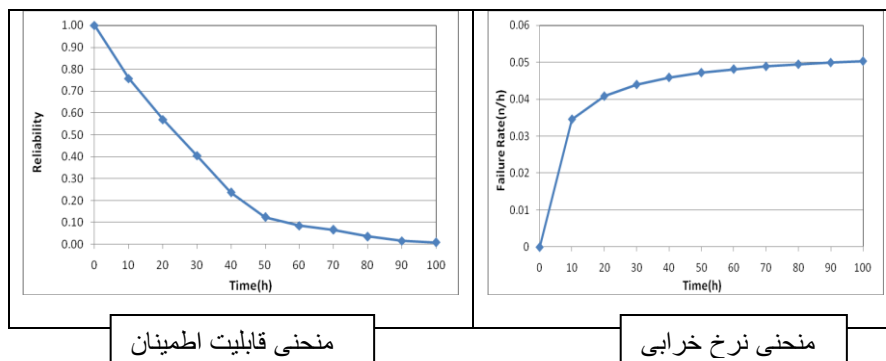


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵٪	۵۹۰	۵۲۶	۲۶۴
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 474$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Gamma			30	0.03802
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.4731$ $\beta=18.41$		MTBF واقعی: 27.12 ساعت		



شکل ۴-۱۵- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۳۹

#### ۴-۱۷- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۰

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۱۶))، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (شکل (۴-۱۶)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۴۹۳)، فرض صفر رد نمی‌شود. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم ۲۳۴۰، در شکل (۴-۱۶) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۰، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۰، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۶) آورده شده است.

$$R(t) = (-0.03723(t - 0.08333))$$

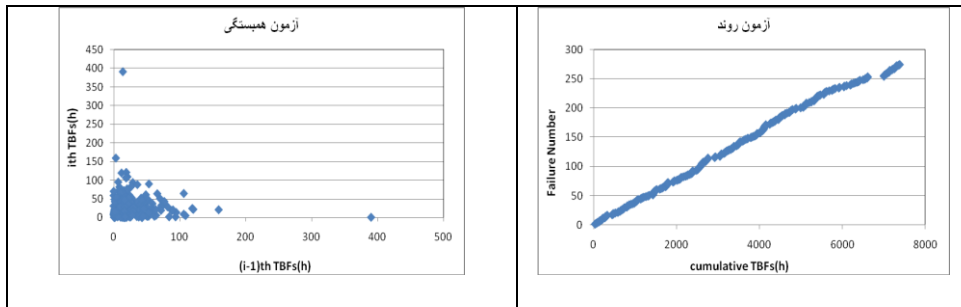
$$\lambda(t) = 0.03723$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۶))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۰ پس از حدود ۱۵۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۴-۱۶) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، زیرسیستم ۲۳۴۰ سیستم باربری معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت و برابر با ۰/۰۳۸، خرابی در ساعت در تمام مدت فعالیت خود است. با مقایسه این منحنی با منحنی وان حمام، مشخص می‌شود که زیرسیستم ۲۳۴۰ در دوره عمر طبیعی خود به سر می‌برد.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

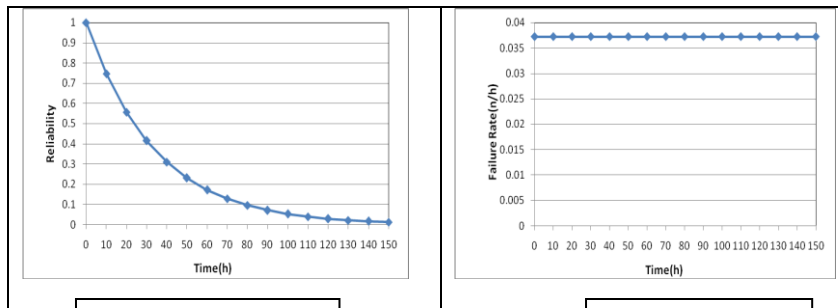


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 493$ )	۶۳۰	۵۴۶	۲۷۴

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین K-S (ساعت)
Exponential			29
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=0.03723$ $\gamma=0.08333$		MTBF واقعی: 26.94 ساعت	



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۱۶- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۰

#### ۴-۱۸- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۲

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط بسیار به حالت خطی نزدیک است. علاوه بر این، با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۴۱))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم ۲۳۴۲، در شکل (۴-۱۷) ارائه شده است با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۲، در نظر گرفته شده است.

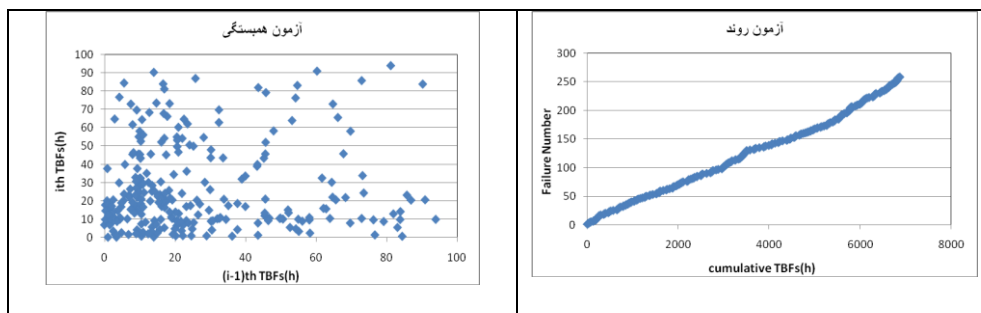
مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۲، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۷) آورده شده است.

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 0.22748}{27.013} \right)^{1.0748} \right]$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0748}{27.013} \left[ \frac{t - 0.22748}{27.013} \right]^{1.0748 - 1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۷))، بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۱۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۱۷)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۲۴ می‌رسد.

### آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

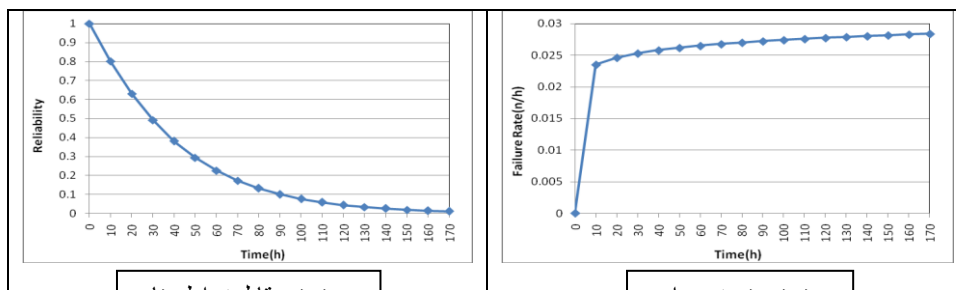


### نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۵۹۱	۵۱۶	۲۵۹
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 464$ )			

### نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull-3p			31	0.05279
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0748 \quad \beta=27.013 \quad \gamma=0.22748$		MTBF واقعی: 26.52 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۱۷- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۲

#### ۴-۱۹- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۳

با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۸))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۳، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۱۸) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۳، در نظر گرفته شده است.

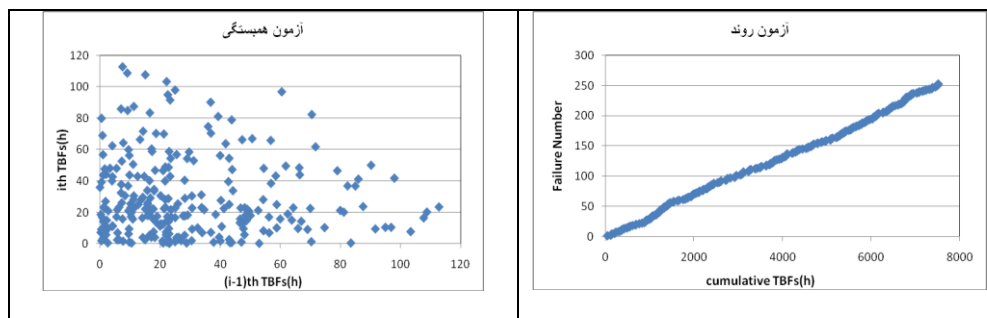
مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۸) آورده شده است.

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 0.22653}{30.113} \right)^{1.0653} \right]$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0653}{30.113} \left[ \frac{t - 0.22653}{30.113} \right]^{1.0653-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۸))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۳ پس از حدود ۱۲۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۳ پس از حدود ۲۱ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۱۸)، نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۳ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار است.

### آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

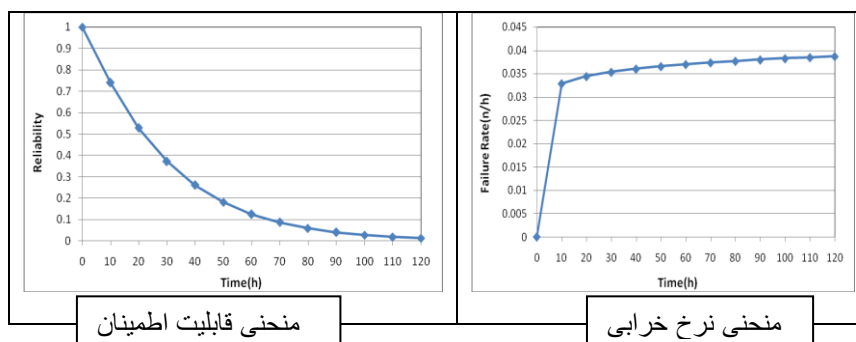


### نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵		۵۰۴	۲۵۳
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۴۵۲$ )	۴۷۷		

### نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	میانگین (ساعت)
weibull-3p			K-S	31
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0653 \quad \beta=30.113 \quad \gamma=0.22653$		MTBF واقعی: 29.67 ساعت		



شکل ۴-۱۸- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۳

#### ۴-۲۰- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۴۶

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۱۹))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۱۹) ارائه شده است. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع ویبول با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۲۸) برابر است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۶، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۱۹) آورده شده است.

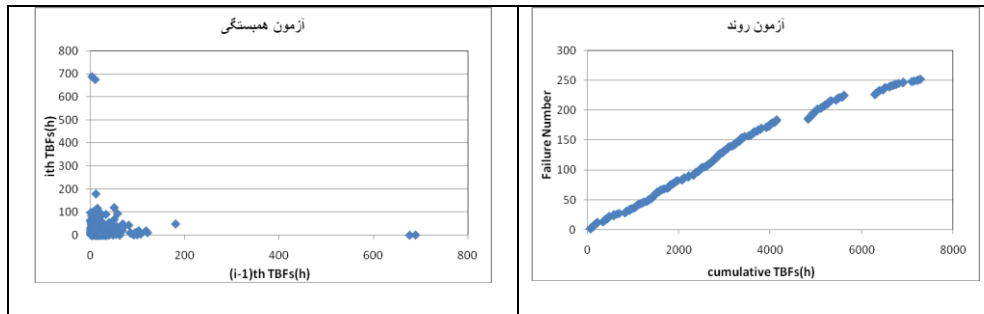
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{24.277}\right)^{0.98383}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{0.98383}{24.277} \left(\frac{t}{24.277}\right)^{0.98383-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۱۹))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم

۲۳۴۶ پس از حدود ۱۶۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۱۹))، زیرسیستم ۲۳۴۶ دارای رفتار خرابی نزولی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

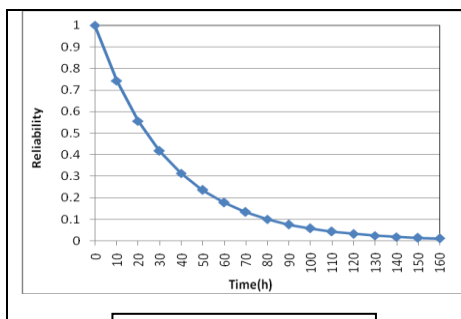


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

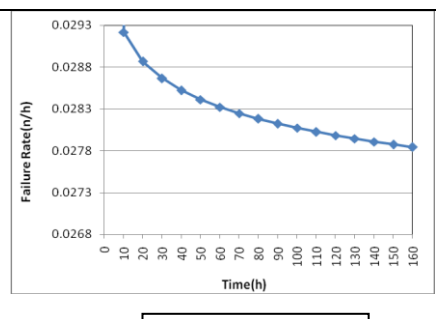
روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵٪	۵۶۱	۵۰۲	۲۵۲
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 451$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull			28	0.04657
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.98383$ $\beta=24.277$		MTBF واقعی: 28.93 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان



منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۱۹- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۶

#### ۴-۲۱- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۷

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۲۰))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. 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 داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۷، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۰) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۷، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۴۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۰) آورده شده است.

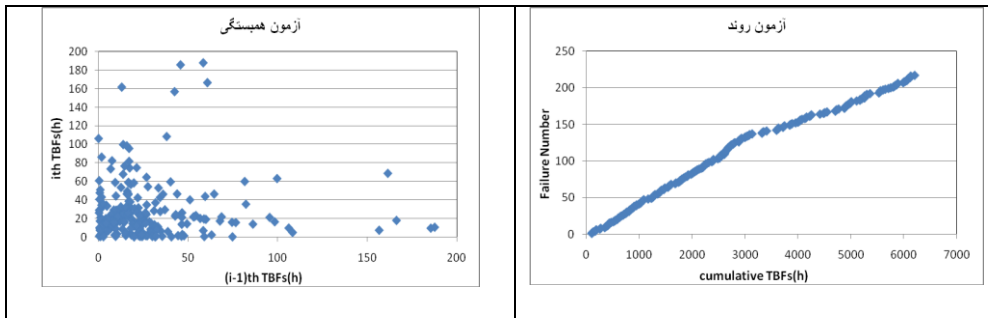
$$R(t) = (-0.03531(t - 0.25))$$
$$\lambda(t) = 0.03531$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۰))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۴۷ پس از حدود ۱۳۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۴-۲۰) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، زیرسیستم ۲۳۴۷ سیستم باربری معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت و برابر با ۰/۰۳۵ خرابی در ساعت در تمام مدت فعالیت خود است.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

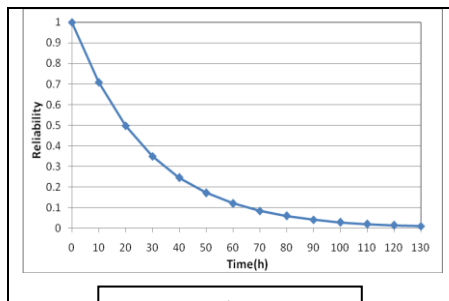


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

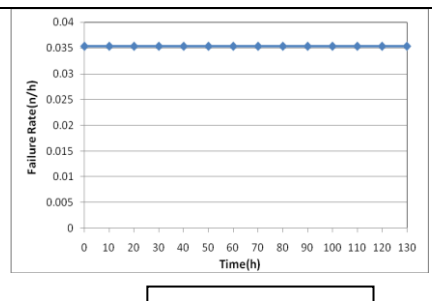
روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۳۸۴$ )	۳۹۴	۴۳۲	۲۱۷

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین K-S
Exponential			0.06213
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=0.03531$ $\gamma=0.25$		MTBF واقعی: 28.57 ساعت	



منحنی قابلیت اطمینان



منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۲۰- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۴۷

#### ۴-۲۲- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باری ۲۳۵۰

با توجه به آزمون روند به روش تحلیلی (شکل (۴-۲۱)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $U$  از شاخص بحرانی (۳۵۶)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۱))، 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 نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

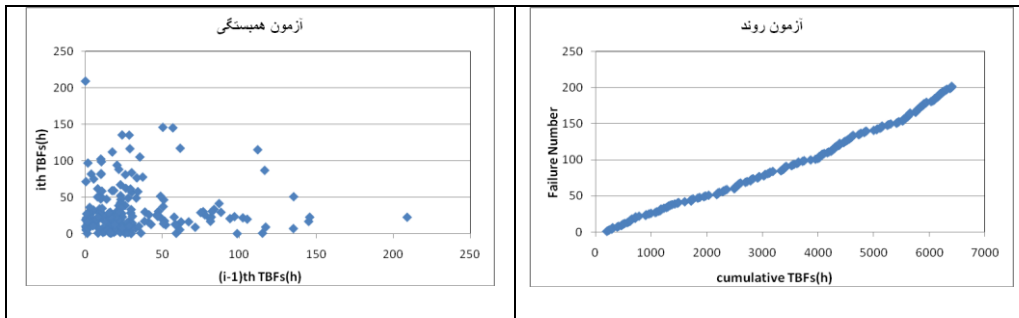
نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۱) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۰، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۰، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۱) آورده شده است.

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 0.08333}{30.962} \right)^{0.96701} \right]$$
$$\lambda(t) = \frac{0.96701}{30.962} \left[ \frac{t - 0.08333}{30.962} \right]^{0.96701-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۱))، نشان می‌دهد قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ۶ ساعت از شروع به فعالیت ماشین به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۰ پس از حدود ۲۱ ساعت به ۵۰ کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۲۱))، زیرسیستم ۲۳۵۰ دارای رفتار خرابی نزولی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

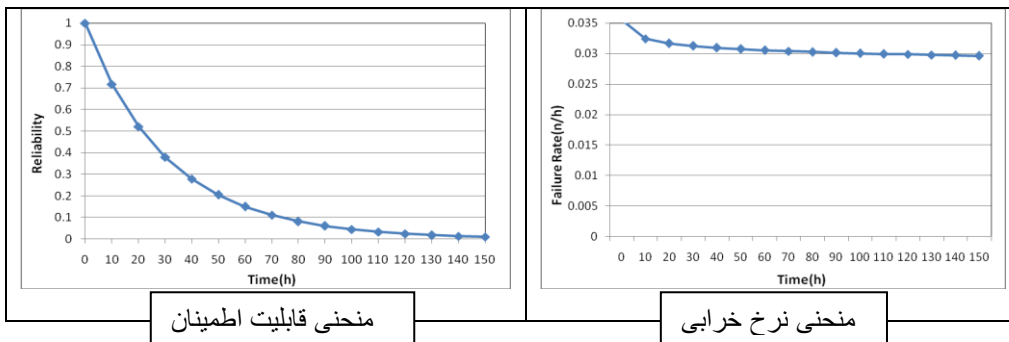


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۵۴۵	۴۰۲	۲۰۲
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۳۵۶$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull-3p			39	0.08212
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.96701 \quad \beta=30.962 \quad \gamma=0.08333$		MTBF واقعی: 31.71 ساعت		



شکل ۴-۲۱- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۰

#### ۲۳-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۲

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۲۲))، نحوه قرارگیری نقاط تقریباً به حالت خطی نزدیک است. علاوه بر این، با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری (شکل (۴-۲۲))، نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۲) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۲، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۲، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۲) آورده شده است.

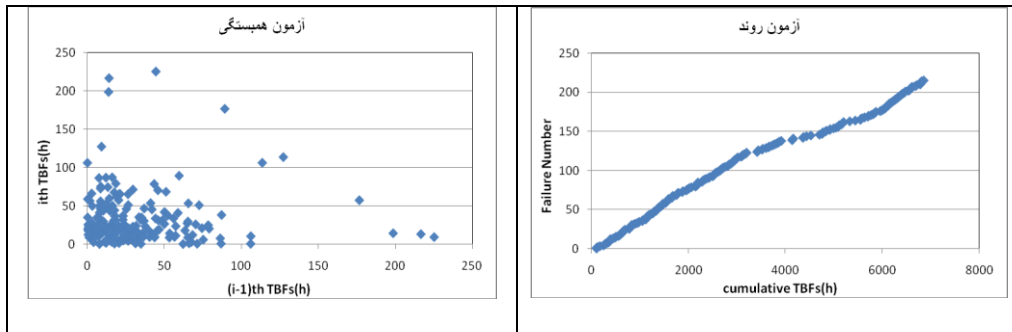
$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{35.429}\right)^{1.0893} (0.94596)\right)}{\Gamma(0.94596)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1.0893 \left(t^{1.0893(0.94596)-1}\right)}{35.429^{1.0893(0.94596)} \Gamma(0.94596)} \exp\left(-\left(\frac{t}{35.429}\right)^{1.0893}\right)}{1 - \frac{\Gamma\left(\left(\frac{t}{35.429}\right)^{1.0893} (0.94596)\right)}{\Gamma(0.94596)}}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۲)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۲ به صفر نمی‌رسد.

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۴-۲۲))، زیرسیستم ۲۳۵۲ دارای رفتار خرابی نزولی است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

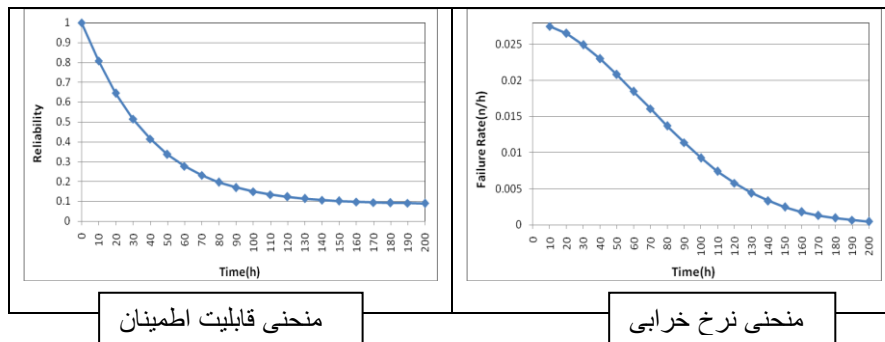


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۴۱۹	۴۲۸	۲۱۵
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۳۸۰$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
gen_gamma			36	0.06877
پارامترهای بهترین توزیع: $k=1.0893$ $\alpha=0.94596$ $\beta=35.429$		MTBF واقعی: 31.85 ساعت		



شکل ۴-۲۲- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۲

#### ۲۴-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۳

با توجه به آزمون روند به روش تحلیلی (شکل (۴-۲۳))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $U$  از شاخص بحرانی (۲۸۸)، فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۳))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۳، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۳) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۳، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۳) آورده شده است.

$$R(t) = (-0.02159(t - 0.25))$$

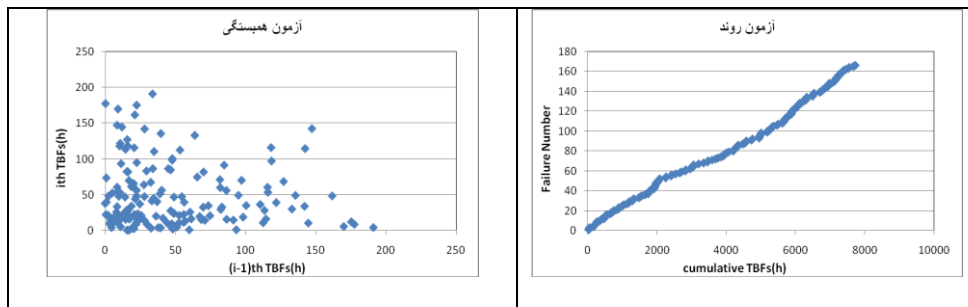
$$\lambda(t) = 0.02159$$

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۳))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۱۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد.

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۴-۲۳) است. با مقایسه این منحنی با منحنی

وان حمام، مشخص می‌شود که زیرسیستم ۲۳۵۳ در دوره عمر طبیعی خود به سر می‌برد

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

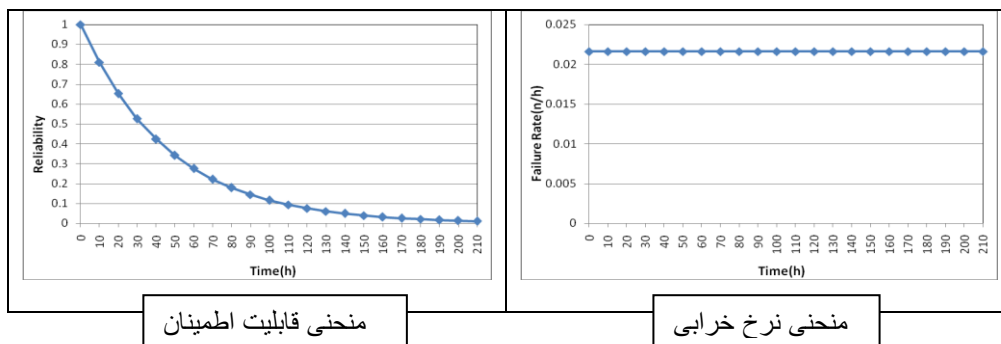


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 288$ )	۳۳۶	۳۳۰	۱۶۶

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Exponential			46	0.05475
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=0.02159$ $\gamma=0.25$		MTBF واقعی: 46.55 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۲۳- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۳

#### ۲۵-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۴

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۴))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده و داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۴) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۴، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۴، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۴) آورده شده است.

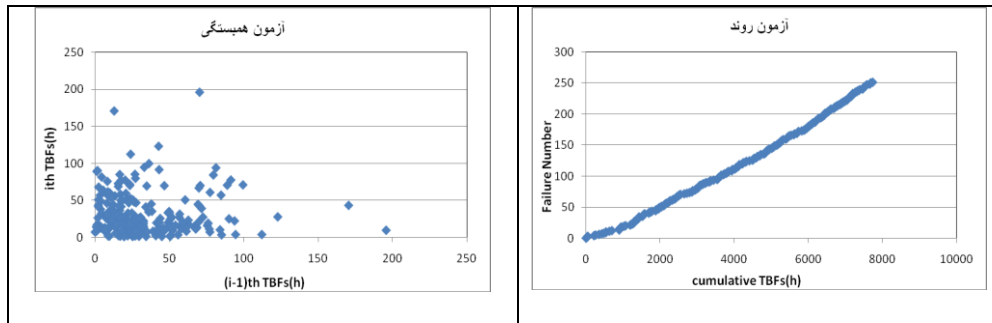
$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 0.81296}{31.027} \right)^{1.0904} \right]$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0904}{31.027} \left[ \frac{t - 0.81296}{31.027} \right]^{1.0904-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۴))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار ماشین، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۸ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۲۴)، نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۴ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار است.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

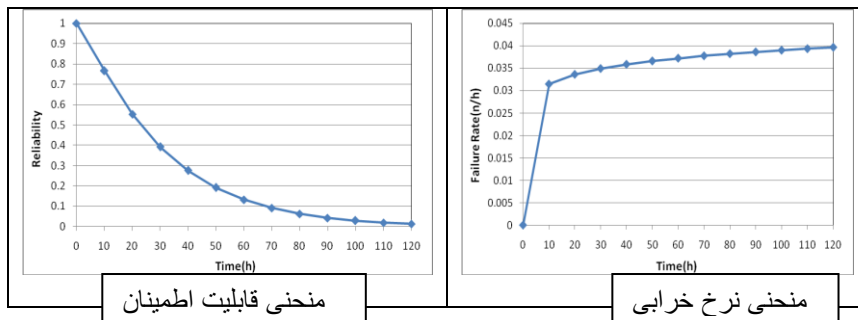


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۴۹۴	۵۰۰	۲۵۱
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 494$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull-3p			36	0.05411
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0904 \quad \beta=31.027 \quad \gamma=0.81296$		MTBF واقعی: 30.85 ساعت		



شکل ۴-۲۴- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۴

#### ۲۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۵

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۲۵))، نحوه قرارگیری نقاط حالت خطی دارد، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۵))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۵، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۵) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۵، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۵، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۵) آورده شده است.

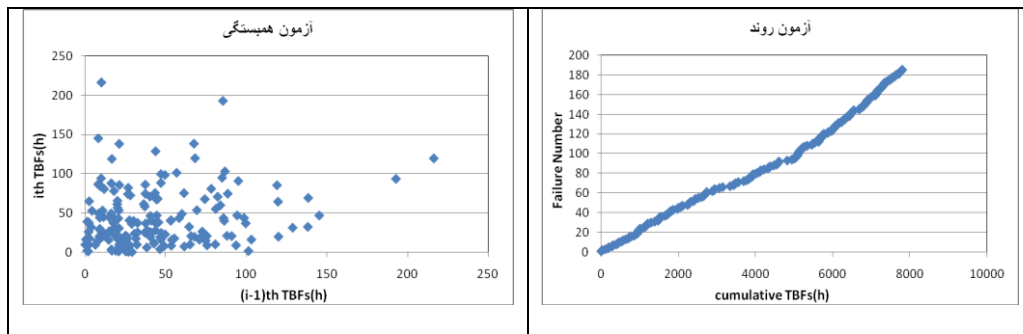
$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{30.879^{1.3658} \Gamma(30.879)} s^{1.3658-1} e^{-\frac{s}{30.879}} ds$$

$$\lambda(t) = \frac{t^{1.3658-1} e^{-\frac{t}{30.879}}}{30.879^{1.3658} \Gamma(1.3658) \left[ 1 - \Gamma\left(\frac{t}{30.879}; 1.3658\right) \right]}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۵))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۵ پس از حدود ۱۰۰ ساعت به صفر نزدیک می‌شود.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۲۵)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۳۵ می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم ۲۳۵۵ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

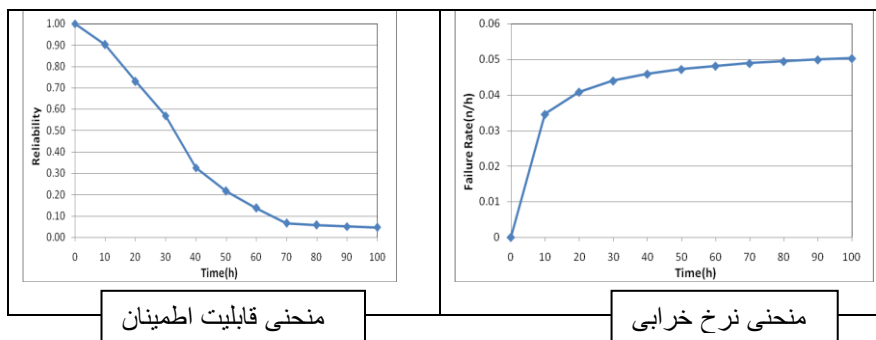


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 324$ )	۳۴۰	۳۶۸	۱۸۵

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
Gamma			47	0.04279
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.3658$ $\beta=30.879$		MTBF واقعی: 42.17 ساعت		



شکل ۴-۲۵- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۵

#### ۴-۲۷- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۶

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۲۶))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۶) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۶، در نظر گرفته شده است.

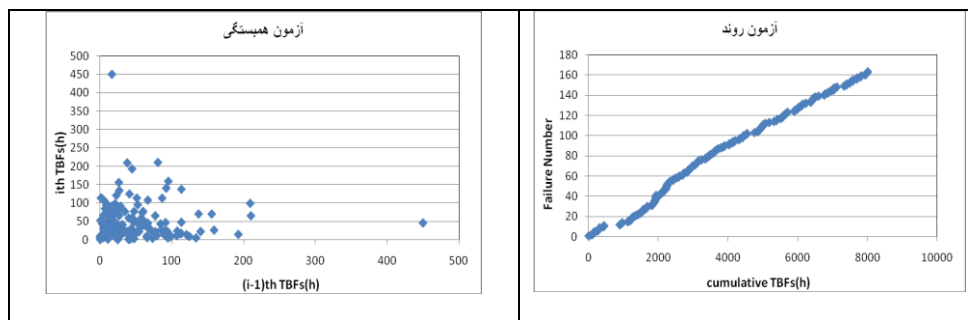
مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۶) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{49.689}\right)^{1.0799}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0799}{49.689} \left(\frac{t}{49.689}\right)^{1.0799-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۶))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۶، پس از حدود ۲۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۲۶)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۱۸ می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم ۲۳۵۶ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

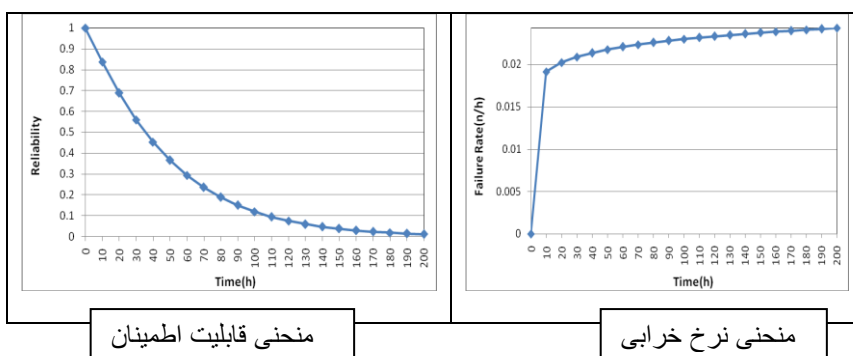


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 2.83$ )	۳۷۷	۳۲۴	۱۶۳

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین K-S (ساعت)
weibull			0.05009
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0799$ $\beta=49.689$		MTBF واقعی: 49.12 ساعت	



شکل ۴-۲۶- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باری ۲۳۵۶

#### ۴-۲۸- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۷

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۷، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۷) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۷، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۷) آورده شده است.

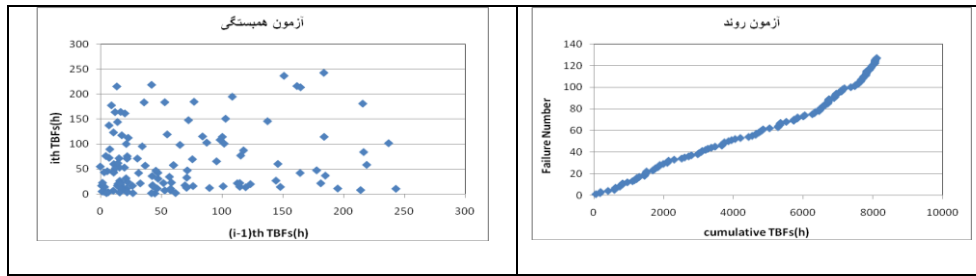
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - 3.5683}{1.2354} \right)^2 \right]$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left( -(\ln(t) - 3.5683)^2 \right)}{2t(1.2354)^2 \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left( \frac{-(\ln(x) - 3.5683)^2}{2(1.2354)^2} \right) dx}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۷))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد.

منحنی نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۴-۲۷) است.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

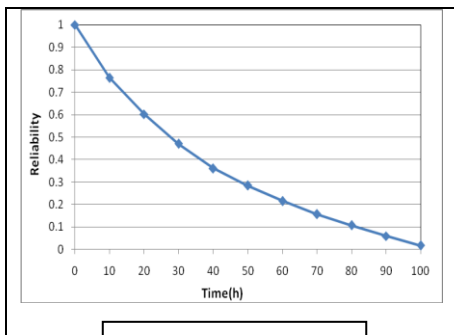


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

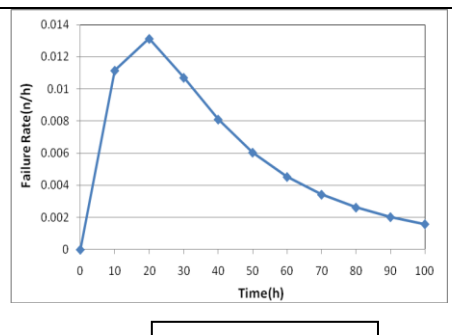
روش مدل سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 216$ )	۲۳۹	۲۵۲	۱۲۷

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
lognormal			65	0.08273
پارامترهای بهترین توزیع: $\sigma=1.2354$ $\mu=3.5683$		MTBF واقعی: 63.89 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان



منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۲۷- مدل سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۷

#### ۲۹-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۵۸

با توجه به آزمون روند به روش تحلیلی (شکل (۴-۲۸))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $U$  از شاخص بحرانی، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۸))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۸) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون  $K-S$ ، تابع ویبول به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۸، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۸، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۸) آورده شده است.

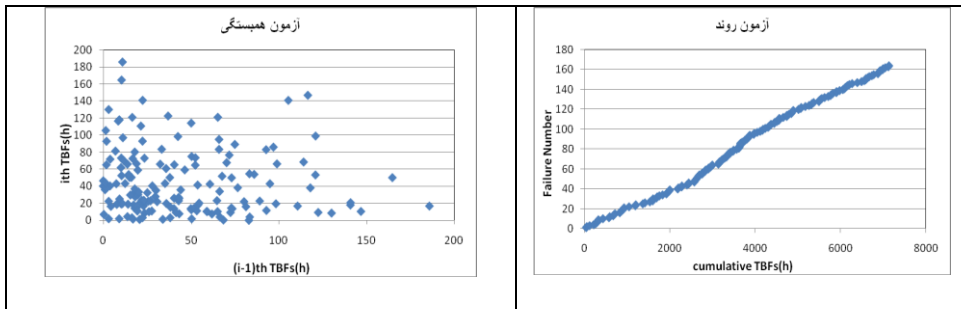
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{46.079}\right)^{1.0311}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0311}{46.079} \left(\frac{t}{46.079}\right)^{1.0311-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۸))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۸ پس از حدود ۲۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۲۸)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۲۲ می‌رسد.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

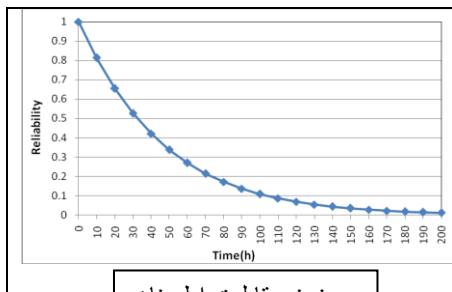


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

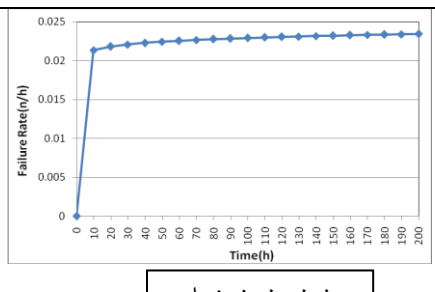
روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵٪			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 285$ )	۴۱۷	۳۲۶	۱۶۴

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull			37	0.05838
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0311$ $\beta=46.079$		MTBF واقعی: 43.48 ساعت		



منحنی قابلیت اطمینان



منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۲۸- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۸

#### ۴-۳۰- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۹

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۲۹))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۲۹))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۹، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۲۹) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۵۹، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۵۹، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۲۹) آورده شده است.

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 0.08373}{53.022} \right)^{1.194} \right]$$
$$\lambda(t) = \frac{1.194}{53.022} \left[ \frac{t - 0.08373}{53.022} \right]^{1.194-1}$$

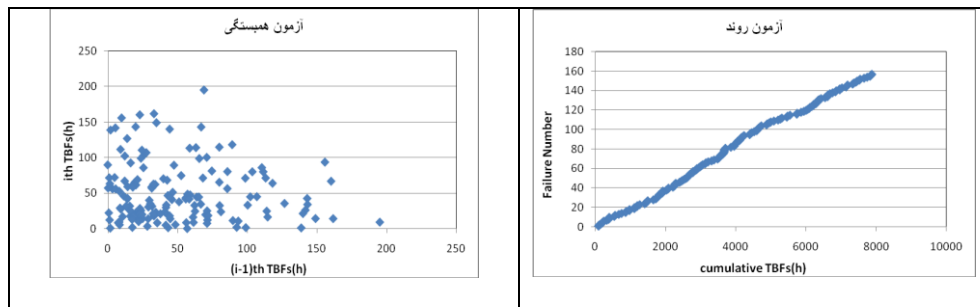
نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۲۹))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم

۲۳۵۹ پس از حدود ۱۹۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۲۹)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً

برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۱۷ می‌رسد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

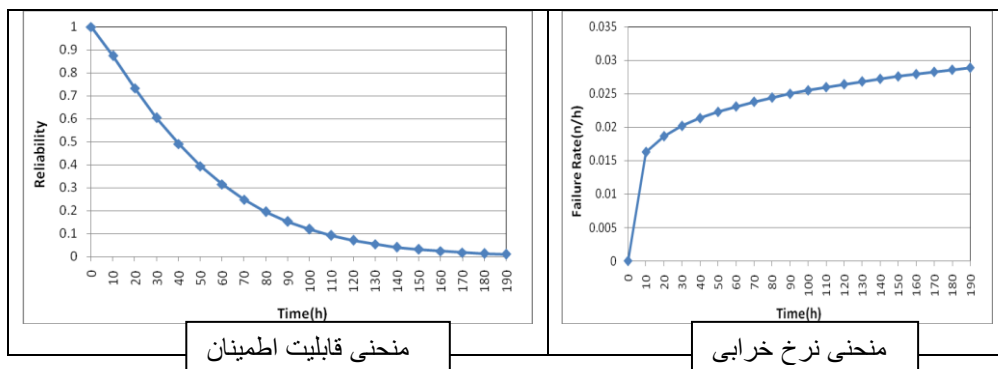


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	رد نمی‌شود ( $U > 272$ )	۳۹۴	۳۱۲	۱۵۷

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین K-S (ساعت)
Weibull-3P			0.03761
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.194$ $\beta=53.022$ $\gamma=0.08373$		MTBF واقعی: 50.11 ساعت	



شکل ۴-۲۹- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۵۹

#### ۴-۳۱- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۰

با توجه به آزمون روند به روش تحلیلی (شکل (۴-۳۰)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $U$  از شاخص بحرانی (۲۲۷)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۳۰))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۳۰) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۰، در نظر گرفته شده است.

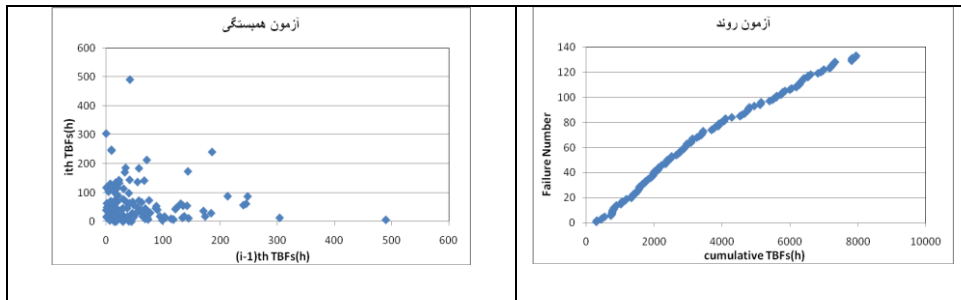
مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۶۰، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۳۰) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{57.484}\right)^{0.95717}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{0.95717}{57.484} \left(\frac{t}{57.484}\right)^{0.95717-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۳۰))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ۱۱ ساعت از شروع به فعالیت ماشین به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۰ پس از حدود ۳۲ ساعت به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۳۰)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت به ۰/۰۲۲ می‌رسد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

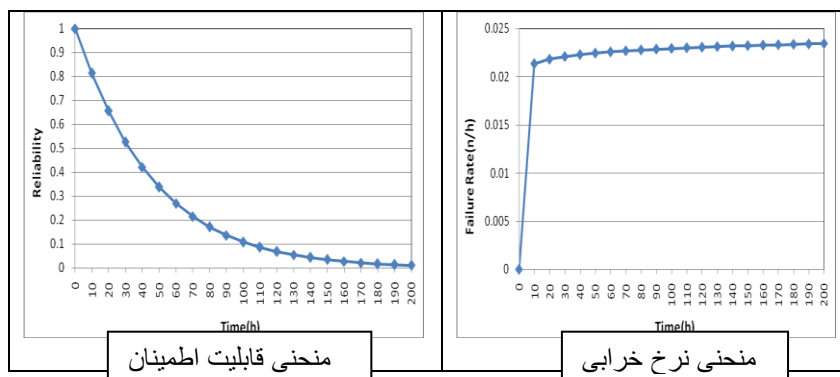


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۹۵٪	۲۴۴	۲۶۴	۱۳۳
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 227$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین (ساعت)	K-S
weibull			42	0.06355
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.95717$ $\beta=57.484$		MTBF واقعی: 59.68 ساعت		



شکل ۴-۳- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۶۰

#### ۳۲-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۱

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۴-۳۱))، نحوه قرارگیری نقاط تقریباً به حالت خطی نزدیک است. علاوه بر این، با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری، 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 (شکل (۴-۳۰))، نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۳۰) ارائه شده است. با این وجود، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع گامای تعمیم یافته به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۱، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۶۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۳۰) آورده شده است.

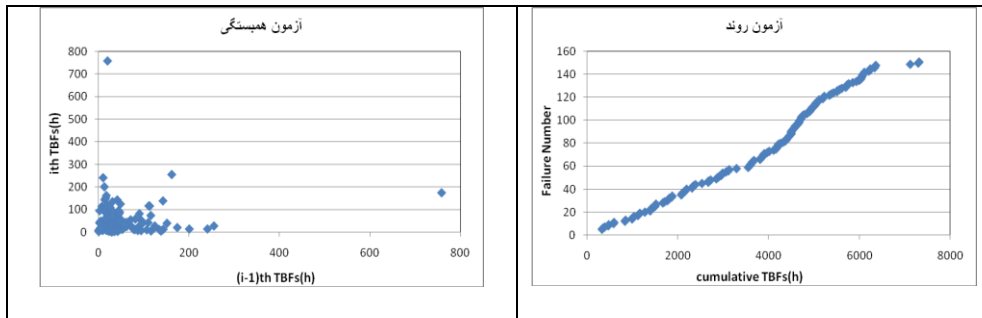
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 3.2927}{1.1048}\right)^2\right]$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left(-(\ln(t) - 3.2927)^2\right)}{2t(1.1048)^2 \int_0^t \frac{1}{x} \exp\left(\frac{-(\ln(x) - 3.2927)^2}{2(1.1048)^2}\right) dx}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۳۰)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۱ پس از ۱۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۴-۳۰) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و از گذشت ۱۵ ساعت از فعالیت آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۲۵ می‌رسد.

آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

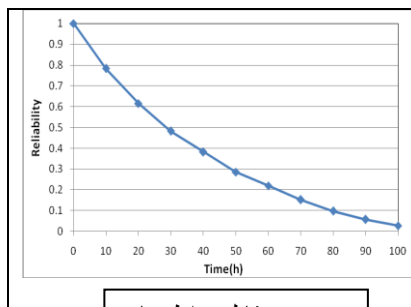


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

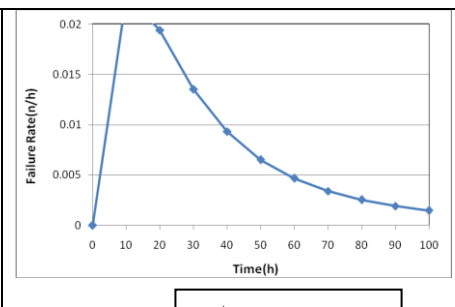
روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده U	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵			
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۲۶۰$ )	۳۰۴	۳۰۰	۱۵۱

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین
lognormal			۴۹
پارامترهای بهترین توزیع: $\mu=3.2927$ $\sigma=1.1048$		MTBF واقعی: ۴۸.۳۹ ساعت	۰.۰۴۵۱۵



منحنی قابلیت اطمینان



منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۳۱- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باربری ۲۳۶۱

#### ۴-۳۳- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیر سیستم باربری ۲۳۶۲

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی و تحلیلی، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۴-۳۲))، داده‌ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۲، فرآیند تجدید شونده است.

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در شکل (۴-۳۲) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۲، در نظر گرفته شده است.

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم ۲۳۶۲، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی-های معادل با این روابط در شکل (۴-۳۲) آورده شده است.

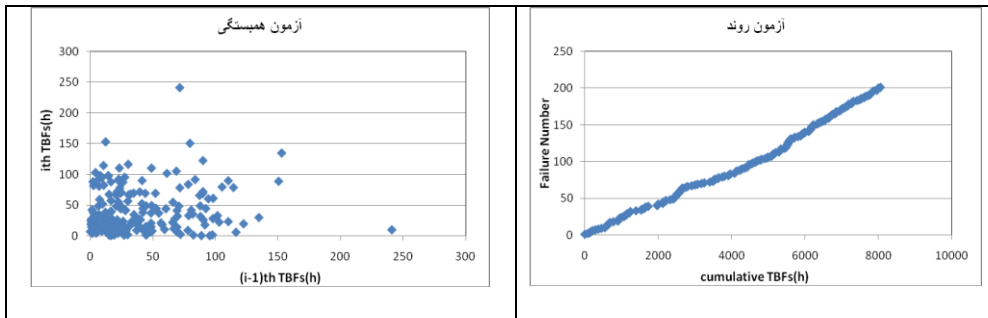
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{41.292}\right)^{1.0666}\right)$$
$$\lambda(t) = \frac{1.0666}{41.292} \left(\frac{t}{41.292}\right)^{1.0666-1}$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۳۲))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم ۲۳۶۲ پس از حدود ۱۷۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد.

با توجه به منحنی نرخ خرابی شکل (۴-۳۲)، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۰ ساعت به ۰/۰۲۳ می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم ۲۳۶۲ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار است.



آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم

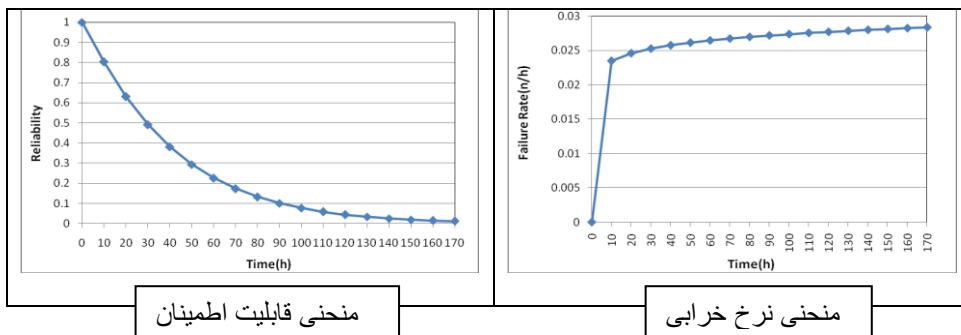


نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم

روش مدل‌سازی	رد فرض صفر در	محاسبه شده $U$	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
انتخابی	سطح اعتماد ۰.۹۵	۳۶۸	۴۰۰	۲۰۱
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۳۵۴$ )			

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	P-P نمودار	آزمون میانگین K-S
weibull			0.05028
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=1.0666$ $\beta=41.292$		MTBF واقعی: 40.11 ساعت	



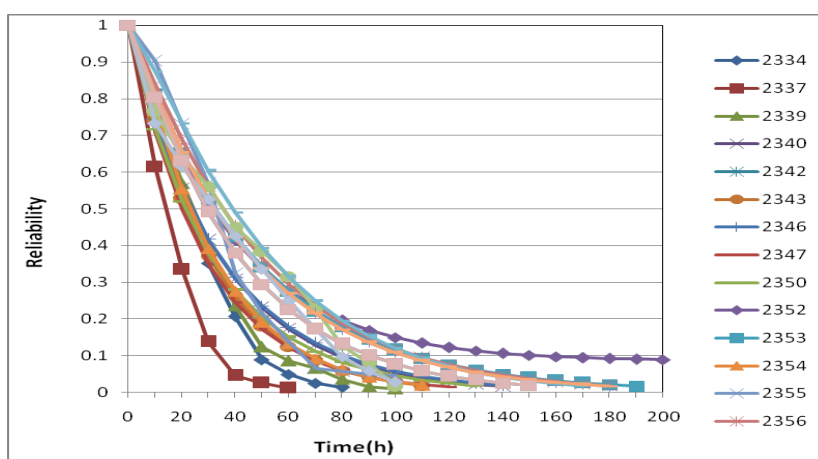
منحنی قابلیت اطمینان

منحنی نرخ خرابی

شکل ۴-۳۲- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم باری ۲۳۶۲

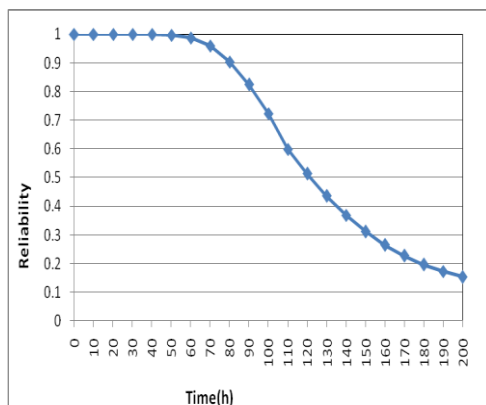
#### ۳۴-۴- مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم باربری

برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری معدن مس سرچشمه، در شکل (۳۳-۴) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم ۲۳۳۷ پس از ۶۰ ساعت، متوقف خواهد شد. همچنین زیرسیستم ۲۳۵۲ در تمام مدت فعالیت سیستم باربری، نسبت به سایر زیرسیستم‌ها، از قابلیت اطمینان بسیار بالاتری برخوردار است. قابلیت اطمینان همه زیرسیستم‌ها تا قبل از ۳۰ ساعت فعالیت به کمتر از ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۳۳-۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان سیستم باربری به صورت موازی تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل سیستم باربری را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۷) محاسبه نمود. با استفاده از رابطه (۲-۷)، قابلیت اطمینان سیستم باربری معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۳۴-۴) ارائه شده است.



شکل ۴-۳۴- منحنی قابلیت اطمینان سیستم باربری معدن مس سرچشمه

با توجه به منحنی قابلیت اطمینان (شکل ۴-۳۴)، قابلیت اطمینان سیستم باربری معدن مس سرچشمه پس از گذشت ۲۰۰ ساعت به ۰,۱۵ می‌رسد. قابلیت اطمینان سیستم باربری پس از حدود ۹۰ ساعت از شروع به فعالیت آن، ۲۰ درصد کاهش یافته و به حدود ۸۰ درصد می‌رسد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان مشخص می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم باربری معدن مس سرچشمه پس از حدود ۱۲۰ ساعت، به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

#### ۴-۳۵- قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه

در بخش‌های قبل، قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری به طور جداگانه بررسی و مدلسازی شد. در این بخش قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه، مدلسازی و ارائه شده است.

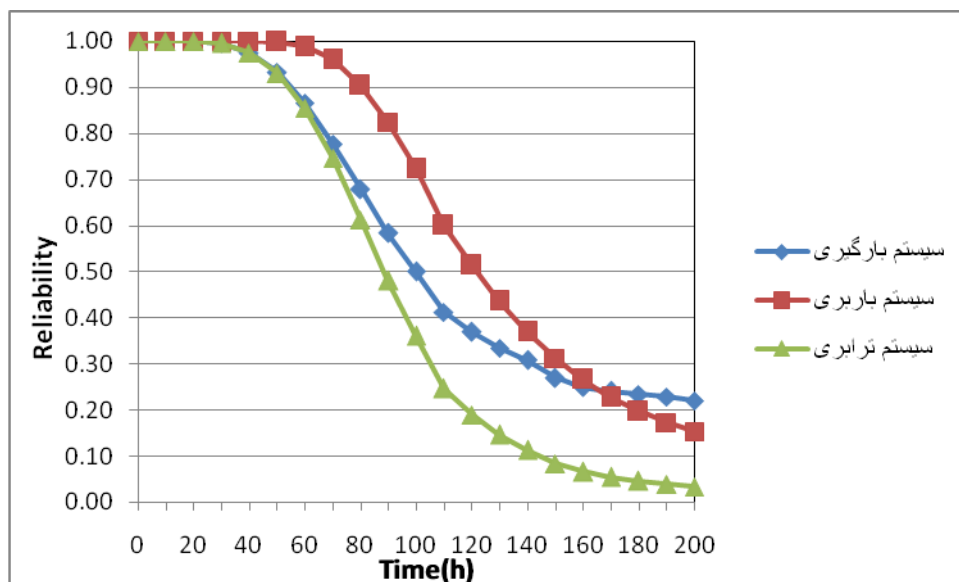
با توجه به اینکه عملکرد ناوگان ترابری معدن، مستلزم عملکرد یکی از ماشین‌های سیستم بارگیری به همراه یکی از ماشین‌های سیستم باربری است و تنها در صورت توقف هر یک از سیستم‌های بارگیری یا باربری، ناوگان ترابری به طور کامل متوقف می‌شود، بنابراین ارتباط بین

سیستم بارگیری و باربری به صورت سری بوده و قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_{System} = \prod_{i=1}^n R_i$$

که در آن،  $R_i$  قابلیت اطمینان سیستم  $i$ ام،  $n$  تعداد سیستم‌ها و  $R_{System}$  قابلیت اطمینان کل سیستم است.

منحنی قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری به همراه منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری در شکل (۴-۳۵) آورده شده است.



شکل ۴-۳۵- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه

با توجه به شکل (۴-۳۵)، پس از گذشت حدود ۶۵ ساعت از زمان شروع به کار ماشین‌ها، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های

بارگیری و باربری به ترتیب در زمان‌های ۱۰۰ و ۱۲۰ ساعت پس از شروع به فعالیت آن‌ها به ۵۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان کل ناوگان ترابری پس از ۲۰۰ ساعت با شیب بسیار کمی به صفر نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر پس از ۲۰۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین‌ها، ناوگان ترابری معدن به متوقف شدن نزدیک خواهد شد.

#### ۴-۳۶- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به بررسی وجود روند و همبستگی متوالی بین داده‌های خرابی مربوط به هر یک از زیرسیستم‌ها، پرداخته شد. سپس با بهره‌گیری از آزمون‌ها و نرم‌افزار آماری، قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های سیستم بارگیری و باربری به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت، با توجه به ارتباط موازی بین هر یک از زیرسیستم‌ها، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری مورد مدلسازی و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، با توجه به ارتباط سری بین سیستم بارگیری با سیستم باربری، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مورد بحث و تحلیل قرار گرفت.

# فصل پنجم:

## تعمیر و نگهداری ماشین های ترابری معدن مس

سرچشمه

## 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 ماشین‌های ترابری معدن مس سرچشمه مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مدل‌های ارائه شده، امکان تعیین زمان توقف هر یک از زیرسیستم 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 معرفی روش‌های تعمیر و نگهداری، استراتژی مناسب برای تعمیر و نگهداری ماشین‌های ترابری معدن مس سرچشمه ارائه شده و در نهایت به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری و تاثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان هر ماشین و در نهایت ناوگان ترابری معدن پرداخته شده است.

## ۵-۲- انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری

در حالت کلی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری به دو نوع عمده تقسیم می‌شوند: تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM)<sup>۱</sup> و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)<sup>۲</sup> (حاج شیر محمدی، ۱۳۹۰). هر یک از این روش‌ها خود به زیرمجموعه‌هایی از استراتژی‌های مختلف تقسیم می‌شوند.

---

<sup>۱</sup> Corrective Maintenance

<sup>۲</sup> Preventive Maintenance

## ۵-۲-۱- 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). تعمیر و نگهداری مبتنی بر پایش وضعیت<sup>۱</sup> و تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان<sup>۲</sup>، دو روش عمده در تعمیر و نگهداری پیش-گیرانه بوده که در ادامه توضیح داده شده است.

## ۵-۲-۱-۱- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت، به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌گردد که جهت تعیین شرایط فنی کارکرد دستگاه (اندازه‌گیری میزان فرسایش اجزاء) در حین بهره‌برداری انجام شده 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 عبارتند از (Dhillon, 2006):

الف) اندازه‌گیری شرایط دستگاه با استفاده از ابزار توسط انسان: در این روش در فواصل زمانی مشخص و در حین کارکرد ماشین، شرایط اجزاء دستگاه توسط متخصص پایش وضعیت و با استفاده از ابزار ویژه، اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده با محدوده کارکرد مجاز اجزاء مورد مقایسه قرار گرفته و با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، تصمیم‌گیری در مورد ادامه کار ماشین و یا توقف آن جهت انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه انجام می‌شود. از جمله

<sup>۱</sup> Condition Based Maintenance (CBM)

<sup>۲</sup> Time Based Maintenance (TBM)



پارامترهای مورد مطالعه در این روش می‌توان به اندازه‌گیری ارتعاش، حرارت و آنالیز روغن اشاره نمود.

ب) بازرسی و اندازه‌گیری پیوسته توسط ابزار: در این روش شرایط و پارامترهای عملکرد اجزای دستگاه به صورت پیوسته و اتوماتیک توسط ابزارهای مخصوص ارزیابی و اندازه‌گیری می‌شوند و داده‌های جمع‌آوری شده به صورت متمرکز طبقه‌بندی می‌گردند. در صورت بروز هرگونه حالت غیرعادی در شرایط دستگاه، عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در همان زمان بر روی بخش مورد نظر انجام می‌گیرد. حسگرهای تعیین زمان دقیق تعویض فیلترها، حسگرهای حرارتی برای تعیین زمان دقیق روانسازی یاتاقان‌ها و حسگرهای حرارت و فشار، نمونه‌هایی از سیستم‌های پایش پیوسته وضعیت دستگاه‌ها هستند که امروزه به طور گسترده در تمامی صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۵-۲-۱-۲- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان

تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان را شاید بتوان به عنوان شناخته‌شده‌ترین و رایج‌ترین نوع تعمیر و نگهداری نامید. در این روش، دستگاه صرف نظر از شرایطی که در آن است، در بازه‌های زمانی مشخص به عنوان مثال هر ۱۰۰ ساعت یکبار مورد بازرسی، سرویس یا تعمیرات پیشگیرانه قرار می‌گیرد. برای تعیین بهترین فاصله زمانی تعمیرات سه رهیافت عمده به شرح زیر وجود دارد (Barabady & Kumar, 2008):

الف) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان: 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.

ب) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر نرخ خرابی: 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 نگه داشته شود.

ج) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر حداقل هزینه: در این روش بهترین زمان تعمیر و نگهداری به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هزینه کل تعمیرات اعم از اصلاحی یا پیشگیرانه به حداقل برسد.

## ۵-۲-۲- تعمیر و نگهداری اصلاحی

این نوع تعمیر و نگهداری پس از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک بخش یا کل دستگاه به حالت عملیاتی به کار برده می‌شود. طی این عملیات قطعات معیوب تعمیر گردیده و یا با یک قطعه جدید (یا کارکرده) جایگزین می‌شود. این روش بر خلاف روش‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، بدون برنامه‌ریزی بوده و پس از خرابی دستگاه انجام می‌شود. عملیات تعمیر و نگهداری اصلاحی بسته به سطح بحرانی بودن خرابی و نیز بسته به شرایط عملیات، می‌تواند به صورت اضطراری<sup>۱</sup> یا معوقه<sup>۲</sup> 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. تعمیرات معوقه زمانی انجام می‌شوند که خرابی

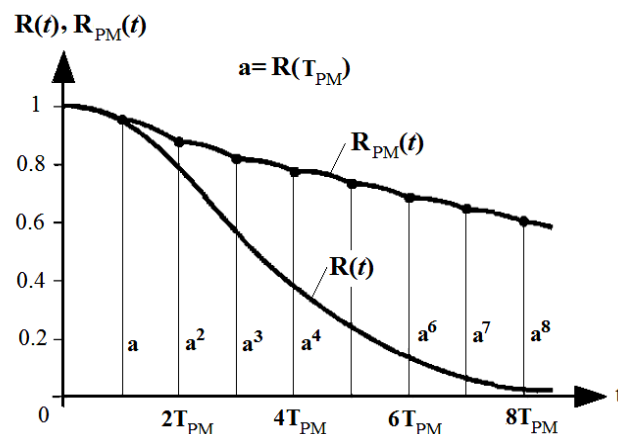
<sup>۱</sup> Emergency/Immediate maintenance

<sup>۲</sup> Deferred maintenance

دستگاه به صورت محدود و جزئی بوده و روند عملیات را دچار توقف ننماید. بنابراین، می‌توان تعمیرات این بخش را تا آخر شیفت کاری یا هر زمان مناسب دیگری به تعویق انداخت (Blischke & Murthy, 2003).

### ۵-۳- تاثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر شرایط عملیاتی دستگاه

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به صورت مستقیم باعث افزایش قابلیت اطمینان دستگاه نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری می‌شود. اگر فرض کنیم که تعمیرات پیشگیرانه در بازه‌های زمانی  $T_{PM}$  بر روی دستگاه انجام شود، قابلیت اطمینان به صورتی که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، دچار تغییر می‌گردد. با توجه به شکل (۵-۱)، قبل از انجام اولین PM، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقا مشابه هم هستند، اما پس از انجام اولین دوره تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تاثیر آن به وضوح آشکار می‌گردد و قابلیت اطمینان دستگاه تا حد چشمگیری افزایش می‌یابد. میزان این تغییر با استفاده از روابط (۵-۱) قابل محاسبه است (Hoseinie et al., 2011).



شکل ۵-۱- تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان دستگاه (Hoseinie et al., 2011)

(1-5)

$$R_{PM}(t) = \begin{cases} R(t) & 0 < t \leq T_{PM} \\ R^n(T_{PM})R(t - nT_{PM}) & nT_{PM} \leq t < (n+1)T_{PM}, n \geq 1 \end{cases}$$

که در این روابط،  $R(t)$ : قابلیت اطمینان در زمان  $t$ ،  $R(T_{PM})$ : قابلیت اطمینان در زمان  $T_{PM}$  (بازه زمانی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه)،  $n$ : تعداد تعمیر و نگهداری انجام شده است.

## ۵-۴- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های ترابری معدن

### مس سرچشمه

با دقت در مباحث ارائه شده، 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 تحمیل شده 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 زیرسیستم‌های ناوگان ترابری موجب کاهش راندمان ترابری معدن می‌شود، انتخاب استراتژی مناسب در اجرای تعمیرات و نگهداری زیر-سیستم‌های مختلف ماشین ضرورت دارد. بنابراین حفظ شرایط 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 سیستم‌های بارگیری و باربری 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 ترابری در معدن مس سرچشمه، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر

قابلیت اطمینان به عنوان استراتژی اصلی برای ناوگان ترابری معدن انتخاب شده است. با در نظر گرفتن منحنی‌های قابلیت اطمینان ارائه شده برای زیرسیستم‌های مختلف، امکانات اجرایی موجود در معدن و تخصص تعمیرکاران، قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، به عنوان حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستم‌های در نظر گرفته شده است. بنابراین، زمانی که هر زیرسیستم به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد می‌رسد، به عنوان دوره تعمیرات پیشگیرانه آن زیرسیستم انتخاب شده است. در ادامه به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ماشین‌های بارگیری و باربری در معدن پرداخته شده است.

## ۵-۵- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های سیستم بارگیری معدن

### مس سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری، در جدول (۵-۱) محاسبه و نشان داده شده است.

جدول ۵-۱- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف سیستم بارگیری

زیرسیستم	۲۲۰۱	۲۲۰۲	۲۲۰۳	۲۲۰۴	۲۲۰۶	۲۲۰۷	۲۲۰۹	۲۲۱۰
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ (ساعت)	۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰	۱۰

با توجه به جدول (۵-۱)، زیرسیستم‌های ۲۲۰۱، ۲۲۰۳، ۲۲۰۴، ۲۲۰۶، ۲۲۰۷ و ۲۲۱۰ با کوتاهترین زمان و زیرسیستم ۲۲۰۲ و ۲۲۰۹ با طولانی‌ترین زمان در بین سایر زیرسیستم‌ها، به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد خواهند رسید. 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، زیرسیستم‌های ۲۲۰۱، ۲۲۰۳، ۲۲۰۴، ۲۲۰۶، ۲۲۰۷ و ۲۲۱۰ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ده ساعت یکبار انجام می‌شوند و زیرسیستم‌های ۲۲۰۲ و ۲۲۰۹ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر بیست ساعت یکبار انجام می‌شوند. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۵-۲) نشان داده شده است.

جدول ۵-۲- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های سیستم بارگیری

۲۲۰۹+۲۲۰۲	۲۲۱۰+۲۲۰۷+۲۲۰۶+۲۲۰۴+۲۲۰۳+۲۲۰۱	زیرسیستم
۲۰	۱۰	دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)

## ۵-۵-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان سیستم

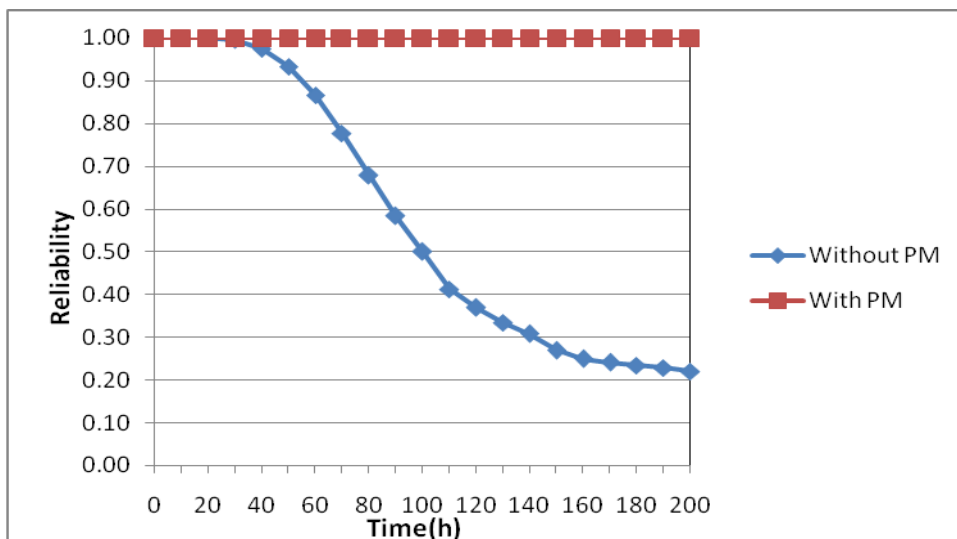
### بارگیری

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، به طور 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 هشت ماشین سیستم بارگیری مس سرچشمه، 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 سیستم‌ها انجام می‌شود، سیستم از نظر عملکرد و قابلیت اطمینان، تجدید شده و قابلیت اطمینان هر زیرسیستم پس از هر تعمیر پیشگیرانه به ۱۰۰ درصد باز می‌گردد (Acher & Feingold, 1984; Rausand & Hoyland, 2004).

با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل سیستم بارگیری و زیرسیستم‌های آن به شرح جدول (۳-۵) 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.

جدول ۳-۵- تغییرات قابلیت اطمینان سیستم بارگیری در اثر عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان	قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها								قابلیت اطمینان سیستم بارگیری
	2201	2202	2203	2204	2206	2207	2209	2210	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.766	0.870	0.753	0.75	0.778	0.742	0.99	0.796	1
10.01	1	0.870	1	1	1	1	0.99	1	1
20	0.766	0.698	0.753	0.75	0.778	0.742	0.785	0.796	0.999989
20.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	0.766	0.870	0.753	0.75	0.778	0.742	0.99	0.796	1
30.01	1	0.870	1	1	1	1	0.99	1	1
40	0.766	0.698	0.753	0.75	0.778	0.742	0.785	0.796	0.999989
40.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	0.766	0.870	0.753	0.75	0.778	0.742	0.99	0.796	1
50.01	1	0.870	1	1	1	1	0.99	1	1
60	0.766	0.698	0.753	0.75	0.778	0.742	0.785	0.796	0.999989
60.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	0.766	0.870	0.753	0.75	0.778	0.742	0.99	0.796	1
70.01	1	0.870	1	1	1	1	0.99	1	1
80	0.766	0.698	0.753	0.75	0.778	0.742	0.785	0.796	0.999989
80.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	0.766	0.870	0.753	0.75	0.778	0.742	0.99	0.796	1
90.01	1	0.870	1	1	1	1	0.99	1	1
100	0.867	0.698	0.753	0.75	0.778	0.742	0.785	0.796	0.999994
100.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1



شکل ۵-۲- منحنی قابلیت اطمینان سیستم بارگیری پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به شکل (۴-۵)، تا زمان ۳۰ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان تقریباً بر هم منطبق است. پس از این زمان تاثیر تعمیرات پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان محسوس است به طوری که قابلیت اطمینان سیستم بارگیری به ۹۹٪ بهبود می‌یابد. با گذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت 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.

## ۵-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های سیستم باربری معدن مس

### سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای ماشین‌های سیستم باربری، در جدول (۴-۵) آورده شده است.



جدول ۵-۴- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف سیستم باربری

زیرسیستم	زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰٪ (ساعت)
۲۳۳۴	۱۰
۲۳۳۷	۱۰
۲۳۳۹	۱۰
۲۳۴۰	۱۰
۲۳۴۲	۲۰
۲۳۴۳	۲۰
۲۳۴۶	۱۰
۲۳۴۷	۱۰
۲۳۵۰	۱۰
۲۳۵۲	۲۰
۲۳۵۳	۲۰
۲۳۵۴	۱۰
۲۳۵۵	۲۰
۲۳۵۶	۲۰
۲۳۵۷	۱۰
۲۳۵۸	۲۰
۲۳۵۹	۲۰
۲۳۶۰	۲۰
۲۳۶۱	۱۰
۲۳۶۲	۲۰

با توجه به جدول (۵-۴)، زیرسیستم‌های ۲۳۳۴، ۲۳۳۷، ۲۳۳۹، ۲۳۴۰، ۲۳۴۶، ۲۳۴۷، ۲۳۵۰،

۲۳۵۴، ۲۳۵۷ و ۲۳۶۱ با کوتاهترین زمان و زیرسیستم‌های ۲۳۴۲، ۲۳۴۳، ۲۳۵۲، ۲۳۵۳، ۲۳۵۵،

۲۳۵۶، ۲۳۵۸، ۲۳۵۹، ۲۳۶۰ و ۲۳۶۲ با طولانی‌ترین زمان در بین سایر زیرسیستم‌ها، 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 زیرسیستم‌های ۲۳۳۴، ۲۳۳۷، ۲۳۳۹، ۲۳۴۰، ۲۳۴۶، ۲۳۴۷، ۲۳۵۰، ۲۳۵۴، ۲۳۵۷ و ۲۳۶۱ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۱۰ ساعت یکبار و زیرسیستم‌های ۲۳۴۲، ۲۳۴۳، ۲۳۵۲، ۲۳۵۳، ۲۳۵۵، ۲۳۵۶، ۲۳۵۸، ۲۳۵۹، ۲۳۶۰ و ۲۳۶۲ با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۲۰ ساعت یکبار انجام می‌شوند. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۵-۵) نشان داده شده است.

جدول ۵-۵- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای ماشین‌های سیستم باربری

$+2352 + 2343 + 2342$ $+2356 + 2355 + 2353$ $+2359 + 2358$ $2362 + 2360$	$+2337 + 2334$ $+2346 + 2340 + 2339$ $+2350 + 2347$ $2361 + 2357 + 2354$	زیرسیستم
۲۰	۱۰	دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)

## ۵-۶-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان سیستم

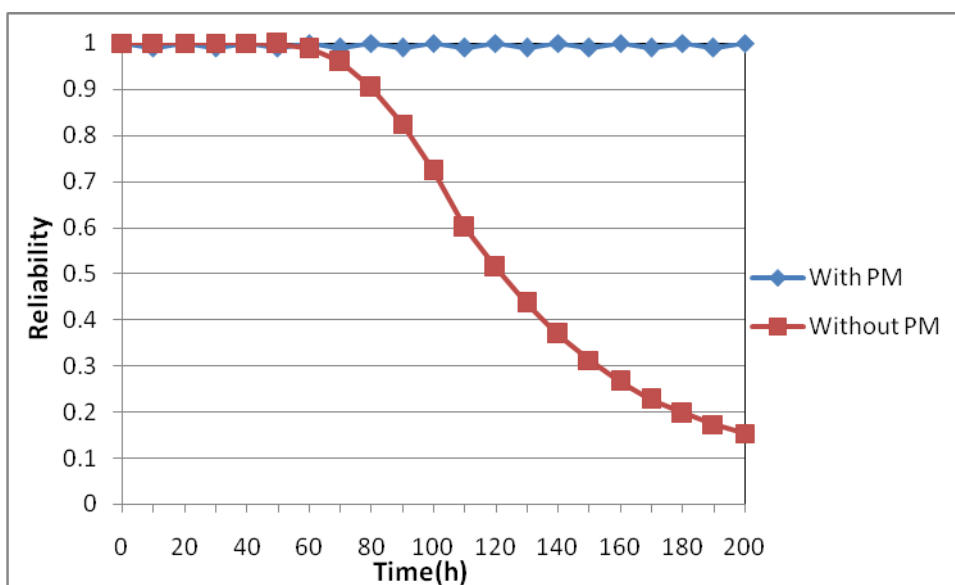
### باربری

در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان سیستم باربری و زیرسیستم‌های آن به شرح جدول (۵-۶) 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.

جدول ۵-۶- تغییرات قابلیت اطمینان سیستم باربری در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان(ساعت)	2334	2337	2339	2340	2342	2343	2346	2347	2350	2352	قابلیت اطمینان سیستم باربری
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.74	0.61	0.75	0.74	0.81	0.73	0.74	0.7	0.71	0.81	0.99
10.01	1	1	1	1	0.81	1	1	1	1	0.81	1
20	0.74	0.61	0.75	0.74	0.63	0.73	0.74	0.7	0.71	0.64	0.99
20.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	0.74	0.61	0.75	0.74	0.81	0.73	0.74	0.7	0.71	0.81	0.99
30.01	1	1	1	1	0.81	1	1	1	1	0.81	1
40	0.74	0.61	0.75	0.74	0.63	0.73	0.74	0.7	0.71	0.64	0.99
40.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	0.74	0.61	0.75	0.74	0.81	0.73	0.74	0.7	0.71	0.81	0.99
50.01	1	1	1	1	0.81	1	1	1	1	0.81	1
60	0.74	0.61	0.75	0.74	0.63	0.73	0.74	0.7	0.71	0.64	0.99
60.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	0.74	0.61	0.75	0.74	0.81	0.73	0.74	0.7	0.71	0.81	0.99
70.01	1	1	1	1	0.81	1	1	1	1	0.81	1
80	0.74	0.61	0.75	0.74	0.63	0.73	0.74	0.7	0.71	0.64	0.99
80.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	0.74	0.61	0.75	0.74	0.81	0.73	0.74	0.7	0.71	0.81	0.99
90.01	1	1	1	1	0.81	1	1	1	1	0.81	1
100	0.74	0.61	0.75	0.74	0.63	0.73	0.74	0.7	0.71	0.64	0.99
100.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
زمان(ساعت)	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	قابلیت اطمینان سیستم باربری
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.82	0.76	0.91	0.83	0.76	0.81	0.87	0.81	0.78	0.81	0.99
10.01	0.82	1	0.91	0.83	1	0.81	0.87	0.81	1	0.81	1
20	0.65	0.76	0.73	0.68	0.76	0.65	0.73	0.65	0.78	0.63	0.99
20.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	0.82	0.76	0.91	0.83	0.76	0.81	0.87	0.81	0.78	0.81	0.99
30.01	0.82	1	0.91	0.83	1	0.81	0.87	0.81	1	0.81	1
40	0.65	0.76	0.73	0.68	0.76	0.65	0.73	0.65	0.78	0.63	0.99
40.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	0.82	0.76	0.91	0.83	0.76	0.81	0.87	0.81	0.78	0.81	0.99
50.01	0.82	1	0.91	0.83	1	0.81	0.87	0.81	1	0.81	1
60	0.65	0.76	0.73	0.68	0.76	0.65	0.73	0.65	0.78	0.63	0.99

60.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	0.82	0.76	0.91	0.83	0.76	0.81	0.87	0.81	0.78	0.81	0.99
70.01	0.82	1	0.91	0.83	1	0.81	0.87	0.81	1	0.81	1
80	0.65	0.76	0.73	0.68	0.76	0.65	0.73	0.65	0.78	0.63	0.99
80.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	0.82	0.76	0.91	0.83	0.76	0.81	0.87	0.81	0.78	0.81	0.99
90.01	0.82	1	0.91	0.83	1	0.81	0.87	0.81	1	0.81	1
100	0.65	0.76	0.73	0.68	0.76	0.65	0.73	0.65	0.78	0.63	0.99
100.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



شکل ۵-۳- منحنی قابلیت اطمینان سیستم باربری پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به شکل (۵-۷)، تا زمان ۵۰ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان تقریباً بر هم منطبق است. پس از این زمان با توجه به نمودار تاثیر تعمیرات پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان محسوس است به طوری که قابلیت اطمینان سیستم باربری به ۹۹٪ بهبود می‌یابد. با گذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت 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.

## ۵-۷- تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر ناوگان ترابری معدن مس

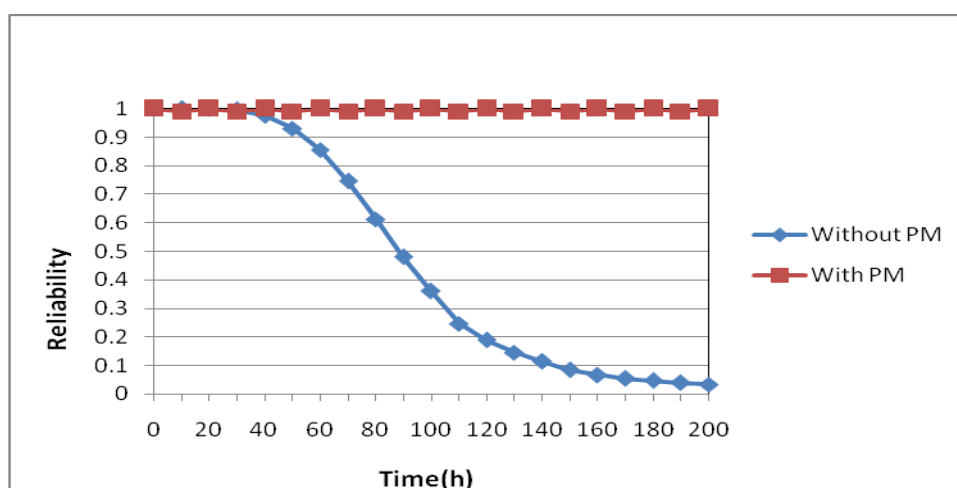
### سرچشمه

در بخش‌های گذشته به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه و تاثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری پرداخته شد. در این بخش با در نظر گرفتن تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بهبود قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری، به بررسی تاثیر برنامه‌های نگهداری ارائه شده بر قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن پرداخته می‌شود. در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری و ناوگان ترابری معدن به شرح جدول (۵-۷) تغییر می‌کند. شکل (۵-۸)، منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه را پس از اعمال تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه نشان می‌دهد. با اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن در حد فاصل ۹۷٪ تا ۱۰۰٪ و به طور متوسط ۹۸٪ افزایش خواهد یافت.

جدول ۵-۷- تغییرات قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان سیستم بارگیری	قابلیت اطمینان سیستم باربری	قابلیت اطمینان ناوگان ترابری
0	1	1	1
10	0.999	0.99	0.989
10.01	1	1	1
20	0.999	0.99	0.989
20.01	1	1	1

30	0.999	0.99	0.989
30.01	1	1	1
40	0.999	0.99	0.989
40.01	1	1	1
50	0.999	0.99	0.989
50.01	1	1	1
60	0.999	0.99	0.989
60.01	1	1	1
70	0.999	0.99	0.989
70.01	1	1	1
80	0.999	0.99	0.989
80.01	1	1	1
90	0.999	0.99	0.989
90.01	1	1	1
100	0.999	0.99	0.989
100.01	1	1	1



شکل ۵-۴- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن مس سرچشمه پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه

#### ۵-۸- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی انواع روش‌های تعمیر و نگهداری سامانه‌های مهندسی پرداخته شد. سپس استراتژی مناسب برای ارائه برنامه تعمیر و نگهداری ماشین‌های بارگیری و باربری معدن مس سرچشمه معرفی شدند. در استراتژی انتخاب شده، با تاکید بر رسیدن قابلیت اطمینان

زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های ترابری به سطح ۸۰٪، به ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای هر یک از زیرسیستم‌ها پرداخته شد. پس از ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ماشین‌های بارگیری و همچنین ماشین‌های سیستم باربری، به بررسی تاثیر برنامه نگهداری بر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و نیز قابلیت اطمینان ناوگان ترابری پرداخته شد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن نیز به طور متوسط به اندازه ۹۸٪ افزایش پیدا کرده است.

## فصل ششم:

## نتیجہ گیری و پیشہادات



## ۶-۱- نتیجه‌گیری

از کار افتادن سیستم‌ها، موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی شده و می‌تواند به عنوان تهدیدی برای جامعه تلقی گردد. از این رو کاربران انتظار دارند که سیستم‌ها، اطمینان‌بخش و ایمن باشند. برای تامین این انتظار، بررسی مقوله مهم قابلیت اطمینان در تمامی صنایع ضرورت دارد. در معدنکاری و صنایع معدنی، سیستم ترابری یکی از مهمترین واحدهای عملیاتی در معادن روباز بوده و از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها، می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و سودآوری معدن تلقی گردد. یکی از تکنیک‌های توانمند برای پیش‌بینی خرابی‌ها و عملکرد مناسب دستگاه در یک زمان مشخص، ارزیابی قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دستگاه است. با استفاده از این رهیافت‌ها می‌توان احتمال عدم خرابی و عملکرد مطلوب دستگاه در یک بازه زمانی را تخمین زد. این کمیت‌ها امروزه در اکثر صنایع به عنوان یک پارامتر فنی و مدیریتی کمک شایانی به پیوستگی تولید و بهبود شرایط اقتصادی بنگاه‌های اقتصادی می‌کنند.

تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما بررسی‌های صورت گرفته در مورد ماشین‌های بارگیری و باربری عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. بر این اساس در این تحقیق، ضمن مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های ترابری در معدن مس سرچشمه، راهکارهایی برای بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی آن‌ها ارائه شده است. برای این منظور، در فاز اول تحقیق، کلیه خرابی‌ها و توقف‌های تولید ناشی از خرابی دستگاه‌های ترابری مورد تحلیل قرار گرفت. در فاز دوم تحقیق، داده‌های خرابی هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های بارگیری و باربری، به تفکیک مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله از تحقیق، با بهره‌گیری از روش‌های آماری، تابع قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های ترابری محاسبه و با توجه به ارتباط موازی بین ماشین‌های هر یک از سیستم‌ها، قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های بارگیری و باربری معدن،

مورد مدلسازی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مدل‌های قابلیت اطمینان ماشین‌های بارگیری و باربری مختلف، مدل قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن ارائه گردید. در فاز سوم (فاز نهایی) تحقیق، با استفاده از مدل‌های قابلیت اطمینان ارائه شده برای هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌های سیستم ترابری معدن پرداخته شد. با توجه به برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان ناوگان ترابری معدن، ۹۸٪ بهبود خواهد یافت.

## ۶-۲- پیشنهادات

تحلیل قابلیت اطمینان هر ماشین، مهم‌ترین مقوله در بررسی عملکرد ایمن و اطمینان بخش آن است. در این تحقیق، پس از بررسی و شناخت ماشین‌های مختلف ترابری، به مدلسازی قابلیت اطمینان و ارائه برنامه تعمیر و نگهداری هر یک از آن‌ها پرداخته شد. با تکیه بر نتایج حاصل از این تحقیق، موارد زیر به عنوان پیشنهادات ارائه می‌شود:

- شبیه‌سازی قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌هایی همچون شبیه‌سازی مونت کارلو و مقایسه نتایج با مدلسازی‌های انجام شده.

- اجرای برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده در این تحقیق و مقایسه هزینه‌های تعمیراتی ناشی از اجرا و عدم اجرای تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه.

- بررسی تاثیر برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهاد شده در کاهش نرخ خرابی هر یک از ماشین‌های بارگیری و باربری.

- استفاده از زمان‌های تعمیر هر یک از ماشین‌های ترابری در بررسی قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین‌های ترابری.

- انتخاب هر ماشین به عنوان یک سیستم و مشخص کردن زیرسیستم‌های هر ماشین و محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های انجام شده.

## منابع و مراجع

بلینتون، ر.، آلن، ر.، (1390)، "قابلیت اطمینان سیستمهای مهندسی"، ترجمه: محسن رضاییان، چاپ دوم: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، 512 صفحه.

جلالی، س. م. ا.، حسینی، س. م. ع.، نجفی، م.، (1388)، "بر آورد تعداد کارگاه های استخراج ذخیره در معدنکاری زیرزمینی با استفاده از فرآیند های تصادفی"، نشریه علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شماره 70، صفحات، 45-52.

حاج شیر محمدی، ع.، (1390)، "برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات (مدیریت فنی در صنایع)"، علی حاج شیر محمدی، چاپ شانزدهم، انتشارات دانشگاه تهران، 487 صفحه.

حسینی، س. ه.، (1390)، "مدلسازی و شبیه سازی قابلیت اطمینان شیرر؛ مطالعه موردی: معدن زغالسنگ طبس"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رحیم دل، م. ج.، (1391)، "مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری؛ مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه"، پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کرباسیان، م.، طباطبایی، ل.، (1388)، "آشنایی با قابلیت اطمینان"، چاپ اول، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول، 150 صفحه.

معدن مس سرچشمه، (1375)، "گزارشات زمین شناسی"، دفتر فنی، بخش زمین شناسی.

نعمت الهی، ن.، (1387)، "آمار و احتمالات مهندسی"، چاپ نهم، انتشارات دالفک 337 صفحه.

Ascher H., Feingold H., (1984), "Repairable System Reliability". New York: Dekker.

Barabady J., Kumar U., (2007), "Reliability characteristics based maintenance scheduling: a case study of a crushing plant", International Journal of Performability Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 319 – 328.

Barabady J., Kumar U., (2008), "Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, 647–653.

Birolini A., (2007), "Reliability Engineering, Theory and Practice", 5th edition, Springer, pp: 588.

Blichke W. R., Murthy D. N. P., (2003), "Case Studies in Reliability and Maintenance", John Wiley & Sons, pp. 620.

Bondar S. A., Meruov V. V., (1979), "Operational Reliability of Conveyer Lines with Intermediate Storage Capacity", Soviet Mining Science, Vol. 15, No. 3, pp. 268-270.

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.
- 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.
- Dongpeng Y., Jinlin L., Lun R., (2008), "Research on Reliability of Complex Coal Mine Ventilation Networks", IEEE Transactions on Reliability, 978-1-4244-2108-4, 2008.
- Duane J. T., (1964), "Learning curve approach to reliability monitoring". IEEE Trans. Aerospace, AS-2:563-566.
- Freidina E. V., Kovalenko A. S., Rudenko O. A., (1975), "Effect of Mine Transport Equipment Reliability on the Productivity of a Quarry System", Soviet Mining Science, Vol. 11, No.1, pp. 50-54.
- Garakavi A. L., Manevich I. Z., Merklin V. E., (1984), "Technological Reliability and its Safeguards in Mining Operation", Soviet Mining Science, Vol. 20, No. 6, pp. 49-55.
- Ghodrati B., Kumar U. (2005b), "Operating environmental-based spare parts forecasting and logistic; a case study, International Journal of Logistic; Research and Application, Vol. 8, No. 2, pp. 95-105.
- Hall R., Daneshmend L. K., (2003b), "Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment", CIM Bulletin; 96, Jun/Jul, pp. 159-165.
- Haskayne I. D., Farmer S. D., (1982), "The Reliability Problems of Powered Supports", Mining Technology, Vol. 64, No. 6, pp. 84-87.
- 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.
- Jalali S. E., Forouhandeh S. F., (2011), "Reliability estimation of auxiliary ventilation

- systems in long tunnels during construction", *Safety Science*, Vol. 49: 664–669.
- Jalali, S. M. E., Hoseinie, S. A., Najafi, M., Ameri, M., (2008), "Prediction of Confidence Interval for the Availability of the Reserve Stops in the Underground Mining Using Markov Chains", Presented in 5<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea, Sweden, PP. 285-290.
- Kumar U., (1990), "Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines", Ph.D thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Kumar U., Granholm S., (1988), "Reliability Technique: A Powerful Tool for Mine Operator", *Mineral Resource 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.
- 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.
- 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.
- Rausand M., Hsyland A., (2004), "System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications", 2nd edition, Wiley & Sons, pp. 644.
- Samanta B., Sarkar B., Mukherjee S. K., (2001), "Reliability centered maintenance (RCM) for heavy earth-moving machinery in an open cast coal mine", *CIM Bull.* Nov- Dec, pp. 104–108.
- Smith, R., and Mobley, R. K., (2008), "Rules of thumb for maintenance and reliability engineers", chapter 1, Elsevier Inc.
- Stapelberg, R. F., (2009), "Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design", Springer-Verlag London Limited.
- Soldatov A. N., (1969), "Reliability of Blasting Equipment", *Soviet Mining Science*, Vol.5, No.5, pp. 518-523.
- Stanek E. K., Venkata S. S., (1988), "Mine Power System Reliability", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 24, No. 5.
- Vesley W. E., Goldberg F. F., Roberts N. H., Haasal D. F., (1981), "Fault Tree Handbook", Report No. NUREG-0492, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, pp. 209.
- Wang H., Pham H., (2006), "Reliability and Optimal Maintenance", Springer, pp: 352.

Wang H., Pham H., (1997), "Survey of reliability and availability evaluation of complex networks using Monte Carlo techniques", *Microelectron. Reliab.*, Vol. 31, No. 2, pp. 187-209.

Wijaya A., Lundberg Y., Kumar U., (2011), "Downtime analysis of a scaling machine", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Forthcoming article, available online 5 Aug. 2011.

## Abstract

Failures of systems make distortions in different levels and it can be considered as a threat to society. So, users expect that systems be reliable and safe. To achieve this goal, research on reliability of systems in all of industries are essential. In mining operation and industries, transferring systems is one of the most important units of surface mines and failure of a part or all of them can be threatened as reduction in production and mining profitability. As yet, many important researches were done on reliability and availability of engineering systems throughout the world, but these researches in loading and caring operation and equipment area were based on engineering judgment. To avoid from unpredicted failures and improvements of transferring operation, awareness of machines operating conditions and statistical control of them was considered as a practical approaches. Statistic and probabilistic evaluations are one of the powerful techniques for prediction of failures and making a safe operation of machines. Estimation of probability of failures and safety operation of machines in determined time domain will be possible with using these approaches. So, in this research the transferring fleet of Sarcheshme copper mine, has been considered. This fleet includes loading and caring system and machinery is a subsystems. After this stage, reliability and failure rate of these systems that working parallel, has been calculated. The results show that reliability for loading system after 100 hours from starting 50% reduces and during 200 hours achieves to 0.2. Also reliability for caring system after 120 hours 50% reduces and during 200 hours achieved to 0.15. Then by considering syntax of these systems that working together series and made transferring fleet, reliability of transferring after about 65 hours from start to working achieved to 80% and during 200 hours slowly attend to 0. In the last step of this research after determining reliability of loading and caring systems, scheduling of preventive maintenance for subsystems of drilling machines has been done base on keeping reliability of subsystems at 80% and based on this presented maintenance scheduling, reliability of transferring fleet of Sarcheshme copper mine will be improved by 98%. Finally, details of preventive maintenance schedules have been presented for any of subsystems.

**Keywords:** Reliability, Reliability Modeling, Preventive Maintenance Scheduling, Loading and Caring Machinery, Sarcheshme Copper Mine.