

سَلَامٌ عَلَيْكُمْ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی  
ماشین‌های حفاری (مطالعه موردی؛ معدن مس سرچشمه)

محمد جواد رحیم‌دل

اساتید راهنما

پروفسور محمد عطائی

پروفسور رضا خالوکاکائی

استاد مشاور

دکتر سید هادی حسینی

شهریور ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :  
تاریخ :  
ویرایش :

### فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدجواد رحیم‌دل، رشته معدن گرایش استخراج تحت عنوان مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی دستگاه‌های حفاری، مطالعه موردی معدن مس سرچشمه که در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> عالی ( امتیاز ۱۹ )
--------------------------------	------------------------------------	--

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	پروفسور محمد عطایی	۱- استاد راهنما
	استاد	پروفسور رضا خالوکاکایی	
	استادیار	دکتر سید هادی حسینی	۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر حسین میرزایی نصیرآباد	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	۴- استاد ممتحن
	دانشیار	دکتر سید رحمان ترابی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده :

تقدیم به:

پدرم، مادرم، برادرم و خواهرانم



## تشکر و قدردانی

به رسم ادب می نویسم تا به یادگار بماند، اما می دانم که واژه‌ها عاجزند.

سپاسگزارم:

از زحمات استاد عزیزم، دکتر محمد عطایی که در طول این تحقیق مشوق و مایه دل‌گرمی من بودند.

دکتر رضا خالوکاکایی که صمیمانه راهنمای من بودند.

دکتر سیده‌ادی حسینی به عنوان مشاور که در این تحقیق دلسوزانه همراه و همگام من بودند.

کلیه کارگران زحمت‌کش و مسئولین محترم معدن مس سرچشمه بویژه آقایان مهندس صالحی نسب (سرپرست حفاری و انفجار)، مهندس عبداللهی (تعمیرگاه)، مهندس سبزه‌علیان و مهندس خسروجردی (امور تحقیق و توسعه) به خاطر راهنمایی‌ها و همکاری‌های بی‌دریغشان.

و از خانواده‌ام، تنها مأوای امن، به خاطر دعای خیر و تشویقشان...

محمدجواد رحیم‌دل

شهریور ۱۳۹۱

## تعهد نامه

اینجانب محمدجواد رحیم‌دل دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین‌های حفاری، مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه تحت راهنمایی پروفسور محمد عطایی و پروفسور رضا خالوکاکایی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 ۱۳۹۱/۶/۲۸



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 پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## 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، تجهیزات حفاری مهمترین واحد 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. اگرچه تاکنون تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما تجهیزات حفاری از این مقوله بی‌بهره بوده و بررسی‌های صورت گرفته در مورد این‌گونه تجهیزات عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. به منظور جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش عملکرد دستگاه‌های حفاری، اطلاع از شرایط کاری دستگاه‌ها 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. در این تحقیق، پس از ارائه مفاهیم احتمال، تعاریف و مدلسازی قابلیت اطمینان در فصل دوم، به معرفی دستگاه‌های حفاری دورانی در فصل سوم پرداخته شده است. در فصل چهارم تحقیق، به ارائه زیرسیستم‌های عملیاتی دستگاه‌های حفاری پرداخته شده است. بر این اساس، زیرسیستم‌های پنجگانه، هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت برای ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه ارائه گردیده است. مدلسازی قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری و نیز ناوگان حفاری معدن در فصل پنجم ارائه شده است. در فصل ششم تحقیق، با تاکید بر حفظ عملکرد هر یک از زیرسیستم‌ها در قابلیت اطمینان ۹۰٪، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری

پیشگیرانه زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری پرداخته شده است. بر اساس برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن تا ۹۸٪ بهبود خواهد یافت. در پایان، جزئیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر زیرسیستم به صورت مجزا ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** قابلیت اطمینان، مدلسازی قابلیت اطمینان، برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، ماشین‌های حفاری، معدن مس سرچشمه.

## مقالات مستخرج از پایان نامه

### مقاله پذیرفته شده در مجله علمی و پژوهشی

1- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Reliability Analysis of Drilling Operation in Open Pit Mines", Archive of Mining Science, (ISI).

### مقالات پذیرفته شده در کنفرانس

2- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Ghodrati, B., Hoseinie, S. H., "Reliability Modeling of Hydraulic System of Drill Machine, the Case Study: Sarcheshme Copper Mine", 21th Conference of Mining Planning and Equipment Selection, 2012, New Delhi, India.

3- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Research on Reliability of Rotary Drill Machines", the First National Conference of Mining Technology of Iran, 2012, Yazd, Iran.

### مقالات تحت داوری در مجلات بین‌المللی

4- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Reliability Maintenance-based Scheduling of Hydraulic System of Drilling Machines", International Journal of Mining Science and Technology.

5- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Reliability Modeling of Drilling System of Rotary Drilling Machine", Journal of Industrial Engineering International.

6- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Reliability and Maintainability Modeling of Electrical System of Rotary Drilling Machines", International Journal of Mining Science and Technology.

7- Rahimdel, M. J., Ataei, M., Kakaei, R., Hoseinie, S. H., "Reliability and Maintainability Modeling of Pneumatic System of Rotary Drilling Machines", International Journal of Mining and Mineral Engineering.

### مقالات تحت داوری در مجلات داخلی

۸- رحیم‌دل، م. ج.، عطایی، م.، خالوکاکایی، ر.، حسینی، س. ه.، "بررسی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری، مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه"، نشریه مدیریت صنعتی دانشگاه تهران.

۹- رحیم‌دل، م. ج.، عطایی، م.، خالوکاکایی، ر.، حسینی، س. ه.، "بررسی قابلیت اطمینان تامین هوای فشرده ماشین‌های حفاری"، مجله تکنولوژی بهره‌برداری از منابع معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود.

## فهرست عناوین

فصل اول: مقدمه	
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- معدن مس سرچشمه
۳	۳-۱- بیان مسئله و سوال اصلی تحقیق
۴	۴-۱- ضرورت انجام تحقیق
۵	۵-۱- اهداف تحقیق
۵	۷-۱- ساختار پایان نامه
فصل دوم: مفاهیم احتمال و مدل سازی در قابلیت اطمینان	
۷	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- تاریخچه مهندسی قابلیت اطمینان
۸	۳-۲- مفاهیم اساسی احتمال
۸	۱-۳-۲- تابع چگالی توزیع احتمال $(f(t))$
۹	۲-۳-۲- تابع توزیع تجمعی $(F(t))$
۹	۳-۳-۲- تابع قابلیت اطمینان $(R(t))$
۱۰	۴-۲- تعاریف و مفاهیم قابلیت اطمینان
۱۰	۱-۴-۲- قابلیت اطمینان
۱۰	۲-۴-۲- خرابی یا شکست
۱۰	۳-۴-۲- زمان خوابیدگی یا زمان خرابی
۱۰	۴-۴-۲- تابع نرخ مخاطره و یا نرخ شکست
۱۱	۵-۴-۲- انواع نرخ خرابی
۱۱	۱-۵-۴-۲- نرخ خرابی ثابت
۱۱	۲-۵-۴-۲- نرخ خرابی صعودی
۱۱	۳-۵-۴-۲- نرخ خرابی نزولی
۱۲	۶-۴-۲- میانگین زمان منجر به خرابی ها $(MTTF)$
۱۲	۷-۴-۲- متوسط زمان بین خرابی ها $(MTBF)$
۱۳	۸-۴-۲- زمان برای تعمیر $(TTR)$
۱۳	۵-۲- توزیع های آماری متداول در مهندسی قابلیت اطمینان
۱۴	۶-۲- مدل سازی شبکه و قابلیت اطمینان سیستم ها
۱۴	۱-۶-۲- سیستم های سری
۱۵	۲-۶-۲- سیستم موازی
۱۵	۳-۶-۲- سیستم ترکیبی
۱۵	۴-۶-۲- سیستم های $k$ از $n$
۱۶	۵-۶-۱- سیستم های آماده به کار
۱۶	۷-۱- روش های ارزیابی قابلیت اطمینان
۱۶	۱-۷-۲- روش تحلیل انواع خرابی ها و تأثیرات آن ها $(FMEA)$

۱۸	۲-۷-۲- روش تحلیل درخت خطا
۱۸	۲-۷-۱-۲- نمادها و علائم استاندارد در درخت‌های خطا
۲۱	۲-۷-۳- روش مارکوف
۲۲	۲-۷-۴- روش تحلیل آماری
۲۵	۲-۷-۴-۱- فرآیند قانون توان
۲۶	۲-۸- قابلیت اطمینان در مهندسی معدن
۲۷	۲-۹- جمع‌بندی
	<b>فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی؛ معدن مس سرچشمه</b>
۲۹	۳-۱- مقدمه
۲۹	۳-۲- اجزای ماشین‌های حفاری دورانی
۳۰	۳-۳- محل قرارگیری تجهیزات
۳۳	۳-۳-۱- تجهیزات مربوط به بخش پایین دستگاه
۳۳	۲-۳-۱-۱- اجزای چرخ‌های زنجیری
۳۷	۳-۳-۲- تجهیزات بخش بالایی دستگاه
۳۸	۳-۲-۱- بدنه اصلی
۳۸	۳-۲-۲- جک‌های تراز
۳۹	۳-۲-۳- منبع نیرو
۴۰	۳-۲-۴- کمپرسور
۴۰	۳-۲-۵- سیستم هیدرولیک
۴۱	۳-۲-۶- سیستم روغن‌کاری
۴۲	۳-۲-۷- محفظه ماشین
۴۲	۳-۲-۸- سیستم کنترل گرد و غبار
۴۲	۳-۲-۸-۱- کنترل مرطوب گرد و غبار
۴۳	۳-۲-۹- مبدل و قرقره کابل
۴۴	۳-۳- تجهیزات دکل
۴۵	۳-۳-۱- دکل
۴۵	۳-۳-۲- سیلندرهای بالابر و کابل‌های دکل
۴۶	۳-۳-۳- تعویض کننده لوله
۴۶	۳-۳-۳-۱- تعویض کننده کاروسل
۴۸	۳-۳-۴- سرچرخشی
۴۹	۳-۳-۵- مکانیزم تغذیه
۴۹	۳-۳-۶- وینچ کمکی
۴۹	۳-۳-۷- هم‌مرکز کننده
۵۱	۳-۳-۸- تثبیت کننده
۵۲	۳-۳-۹- ضربه گیر
۵۴	۳-۳-۴- اقلام خاص

۵۴	۳-۴-۱- شناساگر عمق
۵۵	۳-۴-۲- تهویه مطبوع
۵۵	۳-۴-۳- بخاری‌ها
۵۵	۳-۵-۵- تجهیزات مربوط به شرایط دمایی بسیار سرد
۵۵	۳-۵-۱- بخاری محفظه ماشین
۵۶	۳-۵-۲- بخاری کابین اپراتور
۵۶	۳-۵-۳- سایر بخاری‌ها
۵۷	۳-۴- جمع‌بندی
<b>فصل چهارم: زیرسیستم‌های ماشین حفاری دورانی؛ معدن مس سرچشمه</b>	
۵۸	۴-۱- مقدمه
۵۸	۴-۲- مشخصات فنی ماشین‌های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه
۵۹	۴-۳- زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه
۶۰	۴-۳-۱- زیرسیستم هیدرولیک
۶۱	۴-۳-۲- زیرسیستم الکتریک
۶۲	۴-۳-۳- زیرسیستم هوای فشرده
۶۴	۴-۳-۴- زیرسیستم حفاری
۶۴	۴-۳-۵- زیرسیستم حرکت
۶۵	۴-۴- جمع‌بندی
<b>فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه</b>	
۶۷	۵-۱- مقدمه
۶۷	۵-۲- داده‌های خرابی ماشین
۶۹	۵-۳- تحلیل پارتو
۶۹	۵-۴- روند تحلیل خرابی و مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها
۷۱	۵-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۷۱	۵-۵-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۷۲	۵-۵-۱-۲- تحلیل داده‌ها
۷۳	۵-۵-۱-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۷۴	۵-۵-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۷۵	۵-۵-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری
۷۶	۵-۵-۲-۲- تحلیل داده‌ها
۷۸	۵-۵-۲-۲- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۷۹	۵-۵-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۷۹	۵-۵-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۸۰	۵-۵-۳-۲- تحلیل داده‌ها
۸۱	۵-۵-۳-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی



۸۳	۴-۵-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۸۳	۱-۴-۵-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۸۴	۲-۴-۵-۵- تحلیل داده‌ها
۸۵	۳-۴-۵-۶- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۸۶	۵-۵-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱
۸۶	۱-۵-۵-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۸۷	۲-۵-۵-۵- تحلیل داده‌ها
۹۰	۳-۵-۵-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۹۱	۶-۵-۵- مدل‌سازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۹۳	۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۹۳	۱-۶-۵-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۹۳	۱-۶-۵-۱-۱- تحلیل داده‌ها
۹۴	۲-۱-۶-۵- تحلیل داده‌ها
۹۵	۳-۱-۶-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۹۷	۲-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۹۶	۱-۲-۶-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۹۷	۲-۲-۶-۵- تحلیل داده‌ها
۱۰۰	۳-۲-۶-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۱۰۱	۳-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۰۱	۱-۳-۶-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۱۰۲	۲-۳-۶-۵- تحلیل داده‌ها
۱۰۳	۳-۳-۶-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۱۰۴	۴-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۰۴	۱-۴-۶-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۱۰۵	۲-۴-۶-۵- تحلیل داده‌ها
۱۰۷	۳-۴-۶-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۱۰۸	۵-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۰۸	۱-۵-۶-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۱۰۹	۲-۵-۶-۵- تحلیل داده‌ها
۱۱۱	۳-۵-۶-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۱۱۲	۶-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۱۵	۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۱۵	۱-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۱۵	۱-۱-۷-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
۱۱۶	۲-۱-۷-۵- تحلیل داده‌ها
۱۱۷	۳-۱-۷-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

- ۱۱۸ ۲-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
- ۱۱۸ ۱-۲-۷-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۱۹ ۲-۲-۷-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۲۱ ۳-۲-۷-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۲۲ ۳-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
- ۱۲۲ ۱-۳-۷-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۲۳ ۲-۳-۷-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۲۵ ۳-۳-۷-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۲۶ ۴-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
- ۱۲۶ ۱-۴-۷-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۲۷ ۱-۴-۷-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۲۹ ۳-۴-۷-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۳۰ ۵-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
- ۱۳۰ ۱-۵-۷-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۳۱ ۲-۵-۷-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۳۳ ۳-۵-۷-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۳۴ ۶-۷-۵- مدل سازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
- ۱۳۷ ۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۳۷ ۱-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۳۷ ۱-۱-۸-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۳۷ ۲-۱-۸-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۳۹ ۳-۱-۸-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۴۰ ۲-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۴۰ ۱-۲-۸-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۴۱ ۲-۲-۸-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۴۲ ۳-۲-۸-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۴۴ ۳-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۴۴ ۱-۳-۸-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۴۵ ۲-۳-۸-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۴۷ ۳-۳-۸-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۴۸ ۴-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۴۸ ۱-۴-۸-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها
- ۱۴۹ ۲-۴-۸-۵- تحلیل داده‌ها
- ۱۵۱ ۳-۴-۸-۵- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
- ۱۵۲ ۵-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
- ۱۵۲ ۱-۵-۸-۵- آزمون روند داده‌ها

۱۵۳	۵-۸-۲- تحلیل داده‌ها
۱۵۴	۵-۸-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی
۱۵۳	۵-۸-۶- مدل سازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷
۱۵۵	۵-۹- قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه
۱۵۷	۵-۱۰- جمع‌بندی
	<b>فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه</b>
۱۵۹	۶-۱- مقدمه
۱۶۰	۶-۲- انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری
۱۶۰	۶-۲-۱- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه
۱۶۱	۶-۲-۱-۱- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت
۱۶۱	۶-۲-۱-۲- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان
۱۶۲	۶-۲-۲- تعمیر و نگهداری اصلاحی
۱۶۳	۶-۳- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر شرایط عملیاتی دستگاه
۱۶۴	۶-۴- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه
۱۶۵	۶-۵- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه
۱۶۵	۶-۵-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۱
۱۷۰	۶-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه
۱۷۲	۶-۶-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۳
۱۷۴	۶-۷- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه
۱۷۶	۶-۷-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۶
۱۷۸	۶-۸- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه
۱۸۰	۶-۸-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۷
۱۸۲	۶-۹- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه
۱۸۵	۶-۱۰- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستم‌ها
۱۸۵	۶-۱۰-۱- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم هیدرولیک
۱۸۶	۶-۱۰-۲- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم الکتریک
۱۸۶	۶-۱۰-۳- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم هوای فشرده
۱۸۷	۶-۱۰-۴- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم حفاری
۱۸۷	۶-۱۰-۵- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم حرکت
۱۸۸	۶-۱۱- جمع‌بندی
	<b>فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>
۱۹۱	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۹۲	۷-۲- پیشنهادات
۱۹۴	منابع و مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- منحنی میزان نرخ حادثه در طول مدت عمر یک دستگاه (وان حمام) ۱۲
- شکل ۲-۲- یک سیستم سری متشکل از سه زیر سیستم مستقل ۱۴
- شکل ۳-۲- یک سیستم موازی متشکل از سه زیر سیستم مستقل ۱۵
- شکل ۴-۲- یک سیستم سری- موازی ۱۵
- شکل ۵-۲- نمونه‌ای از یک درخت خطا ۱۹
- شکل ۶-۲- چهار نماد و عملگر اصلی در روش تحلیل درخت خطا ۱۹
- شکل ۷-۲- روندنمای مربوط به تعیین نوع مدل‌سازی داده‌های آماری در روش آماری ۲۵
- شکل ۱-۳- بخش‌های سه‌گانه ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه ۳۲
- شکل ۲-۳- اجزای ماشین حفاری دورانی ۳۳
- شکل ۳-۳- نمایی از چرخ زنجیری ۳۴
- شکل ۴-۳- موتور هیدرولیکی و جعبه دنده برای حرکت چرخ زنجیری ۳۵
- شکل ۵-۳- نمونه‌ای از کفشک‌های تک‌شیاری (شکل چپ) و سه‌شیاری (شکل راست) شنی ۳۶
- شکل ۶-۳- تصویری از جک تراز (جلوی ماشین حفاری) ۳۹
- شکل ۷-۳- توزیع انرژی در ماشین‌های حفاری الکتریکی- هیدرولیکی ۴۰
- شکل ۸-۳- کنترل مرطوب گرد و غبار ۴۳
- شکل ۹-۳- قرقره کابل ۴۴
- شکل ۱۰-۳- سیلندرهای بالابر دکل ۴۶
- شکل ۱۱-۳- تعویض کننده لوله کاروسل ۴۷
- شکل ۱۲-۳- نمای داخلی از سر چرخشی ۴۹
- شکل ۱۳-۳- تغذیه با چرخ دندانه‌دار همراه با زنجیر ۵۰
- شکل ۱۴-۳- هم‌مرکز کننده ۵۱
- شکل ۱۵-۳- تثبیت‌کننده ۵۲
- شکل ۱۶-۳- ضربه‌گیر خارجی ۵۴
- شکل ۱-۴- ارتباط بین زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۶۰
- شکل ۲-۴- زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری دورانی ۶۱
- شکل ۳-۴- زیرسیستم الکتریک دستگاه حفاری دورانی ۶۲
- شکل ۴-۴- کمپرسور اسکرو در ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه ۶۳
- شکل ۵-۴- زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری دورانی ۶۴
- شکل ۶-۴- زیرسیستم حفاری ماشین‌های حفاری ۶۴
- شکل ۱-۵- نمونه‌ای از فرم ثبت خرابی ماشین‌های حفاری ۶۸
- شکل ۲-۵- نمودار پارتو خرابی زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه ۷۰
- شکل ۳-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۱ ۷۲
- شکل ۴-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۷۵
- شکل ۵-۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۷۶
- شکل ۶-۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۱ ۷۶
- شکل ۷-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۷۹
- شکل ۸-۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۸۰

- شکل ۵-۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ۲۱۰۱ ۸۰
- شکل ۵-۱۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۸۳
- شکل ۵-۱۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۸۴
- شکل ۵-۱۲- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها ۸۴
- شکل ۵-۱۳- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۸۷
- شکل ۵-۱۴- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۸۸
- شکل ۵-۱۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۱ ۸۸
- شکل ۵-۱۶- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۹۱
- شکل ۵-۱۷- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۹۲
- شکل ۵-۱۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ ۹۳
- شکل ۵-۱۹- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه ۹۴
- شکل ۵-۲۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۳ ۹۷
- شکل ۵-۲۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۳ ۹۷
- شکل ۵-۲۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه ۹۹
- شکل ۵-۲۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۳ ۱۰۰
- شکل ۵-۲۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ ۱۰۱
- شکل ۵-۲۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه ۱۰۱
- شکل ۵-۲۶- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۳ ۱۰۴
- شکل ۵-۲۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۳ ۱۰۵
- شکل ۵-۲۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه ۱۰۵
- شکل ۵-۲۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۳ ۱۰۸
- شکل ۵-۳۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ ۱۰۹
- شکل ۵-۳۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری دستگاه حفاری شماره ۲ معدن مس سرچشمه ۱۰۹
- شکل ۵-۳۲- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۳ ۱۱۲
- شکل ۵-۳۳- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ ۱۱۲
- شکل ۵-۳۴- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه ۱۱۳
- شکل ۵-۳۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ ۱۱۴
- شکل ۵-۳۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه ۱۱۴
- شکل ۵-۳۷- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۶ ۱۱۵
- شکل ۵-۳۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۱۸
- شکل ۵-۳۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۱۹
- شکل ۵-۴۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها ۱۱۹
- شکل ۵-۴۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۲۲
- شکل ۵-۴۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۲۲

- شکل ۵-۴۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۶ ۱۲۳
- شکل ۵-۴۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۲۵
- شکل ۵-۴۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۲۶
- شکل ۵-۴۶- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۶ ۱۲۷
- شکل ۵-۴۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۲۹
- شکل ۵-۴۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۳۰
- شکل ۵-۴۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۶ ۱۳۰
- شکل ۵-۵۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۳۳
- شکل ۵-۵۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۳۳
- شکل ۵-۵۲- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۳۴
- شکل ۵-۵۳- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه ۱۳۵
- شکل ۵-۵۴- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۷ ۱۳۶
- شکل ۵-۵۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۳۸
- شکل ۵-۵۶- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۳۹
- شکل ۵-۵۷- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۷ ۱۳۹
- شکل ۵-۵۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۴۲
- شکل ۵-۵۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۴۳
- شکل ۵-۶۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۷ ۱۴۳
- شکل ۵-۶۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۴۶
- شکل ۵-۶۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۴۶
- شکل ۵-۶۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۷ ۱۴۷
- شکل ۵-۶۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۵۰
- شکل ۵-۶۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۵۱
- شکل ۵-۶۶- آزمون روند داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷ ۱۵۱
- شکل ۵-۶۷- آزمون گرافیکی تطابق داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷ با مدل قانون توان ۱۵۳
- شکل ۵-۶۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۵۳
- شکل ۵-۶۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۵۴
- شکل ۵-۷۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۵۵
- شکل ۵-۷۱- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه ۱۵۵
- شکل ۵-۷۱- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه ۱۵۷
- شکل ۶-۱- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان دستگاه ۱۶۳
- شکل ۶-۲- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین ۲۱۰۶ ۱۶۵
- شکل ۶-۳- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۱۶۶
- ۲۱۰۱
- شکل ۶-۴- منحنی قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۱ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات ۱۷۰

پیشگیرانه

- شکل ۵-۶- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین ۲۱۰۳ ۱۷۰
- شکل ۶-۶- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۳ ۱۷۱
- شکل ۷-۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۳ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه ۱۷۴
- شکل ۸-۶- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۶ ۱۷۴
- شکل ۹-۶- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۶ ۱۷۵
- شکل ۱۰-۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۶ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه ۱۷۸
- شکل ۱۱-۶- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷ ۱۷۸
- شکل ۱۲-۶- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷ ۱۸۰
- شکل ۱۳-۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۷ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه ۱۸۲
- شکل ۱۴-۶- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه ۱۸۴

## فهرست جدول‌ها

۱۳	جدول ۱-۲- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته
۲۷	جدول ۲-۲- روش‌های مختلف به کار رفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی
۳۰	جدول ۱-۳- قسمت‌های متداول در ماشین‌های حفاری دورانی به همراه وظیفه هر یک از آنها
۵۹	جدول ۱-۴- مشخصات فنی ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه
۷۰	جدول ۱-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۱
۷۳	جدول ۲-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱
۷۵	جدول ۳-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۱
۷۸	جدول ۴-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱
۸۱	جدول ۵-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ۲۱۰۱
۸۲	جدول ۶-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری ۲۱۰۱
۸۵	جدول ۷-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی
۸۶	جدول ۸-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱
۸۹	جدول ۹-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۱
۹۰	جدول ۱۰-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱
۹۴	جدول ۱۱-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی
۹۵	جدول ۱۲-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۹۸	جدول ۱۳-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۳
۹۹	جدول ۱۴-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۰۳	جدول ۱۵-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۳
۱۰۳	جدول ۱۶-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۰۶	جدول ۱۷-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۳
۱۰۷	جدول ۱۸-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۱۰	جدول ۱۹-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۳
۱۱۱	جدول ۲۰-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳
۱۱۵	جدول ۲۱-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۶
۱۱۷	جدول ۲۲-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۱۹	جدول ۲۳-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی
۱۲۰	جدول ۲۴-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۲۳	جدول ۲۵-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۶
۱۲۴	جدول ۲۶-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۲۸	جدول ۲۷-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی حفاری ماشین ۲۱۰۶
۱۳۱	جدول ۲۸-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۳۲	جدول ۲۹-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی
۱۳۶	جدول ۳۰-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶
۱۳۶	جدول ۳۱-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۷



- جدول ۳۲-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۳۷
- جدول ۳۳-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۷ ۱۴۰
- جدول ۳۴-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۴۱
- جدول ۳۵-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۷ ۱۴۳
- جدول ۳۶-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ ۱۴۵
- جدول ۳۷-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی حفاری ماشین ۲۱۰۷ ۱۴۹
- جدول ۳۸-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ ۱۵۰
- جدول ۳۹-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷ ۱۵۲
- جدول ۱-۶- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۱۶۵
- جدول ۲-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۱ ۱۶۶
- جدول ۳-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه در اثر عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۱۶۸
- جدول ۴-۶- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۳ ۱۷۰
- جدول ۵-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۳ ۱۷۱
- جدول ۶-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۳ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۱۷۳
- جدول ۷-۶- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۶ ۱۷۴
- جدول ۸-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۶ ۱۷۵
- جدول ۹-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۶ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۱۷۶
- جدول ۱۰-۶- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۷ ۱۷۸
- جدول ۱۱-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷ ۱۷۹
- جدول ۱۲-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۷ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۱۸۱
- جدول ۱۳-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۱۸۳

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

قابلیت اطمینان یک سیستم احتمال عملکرد سالم و بدون عیب آن برای مدتی مشخص و در شرایط معین و از پیش تعیین شده است. از کارافتادگی و اختلال در سیستم‌ها ممکن است صدمات جبران‌ناپذیری را به سیستم و یا مجموعه وارد سازد. از این رو، بحث قابلیت اطمینان به عنوان یک بحث مهم در بهره‌برداری از سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فصل، پس از معرفی معدن مس سرچشمه به ارائه ضرورت، اهداف تحقیق و ساختار پایان‌نامه پرداخته شده است.

## ۱-۲- 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. کانسار سرچشمه 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 می‌باشد که بیرون‌زدگی‌های مهمی در اطراف کانسار نشان می‌دهد (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 زمین‌شناسی آن ۱/۲ میلیارد تن با عیار ۰/۶۹٪ مس می‌باشد. 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 می‌رسد. ذخیره نهشته اکسیدی ۲۷ میلیون تن برآورد شده است. این زون با ضخامت ۲۶ متر شامل کانی‌های 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. بهره‌برداری از معدن مس سرچشمه به صورت روباز انجام می‌شود. شیب دیواره معدن ۳۰ درجه و حداکثر شیب جاده، ۸ درجه در نظر گرفته شده است. عرض و ارتفاع پله‌های 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. برنامه استخراج از معدن در مراحل روزانه، ماهانه، یک ساله، سه ساله، ۵ ساله، ۷ ساله، ۱۰ ساله، ۱۵ ساله و ۲۰ ساله تهیه شده است. چالزنی با ماشین‌های حفاری دورانی و با سرمته‌های ۹ اینچی در شبکه‌های 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 متر مکعبی (در حدود ۱۵ تن) و باربری توسط کامیون‌های ۱۲۰ 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. با توجه به اینکه ماشین‌های حفاری 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 توفقات ناخواسته هر یک از آن‌ها ضرورت دارد. در ادامه این فصل، ضرورت انجام تحقیق، اهداف و ساختار کلی آن و نیز مطالب ارائه شده در این فصول آینده مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۱-۳- بیان مسئله و سوال اصلی تحقیق

تجهیزات حفاری مهمترین واحد عملیاتی در معادن روباز بوده که از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و 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 حفاری 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- زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری چه بخش‌هایی هستند و نحوه ارتباط این زیرسیستم‌ها چگونه است؟

۲- حساس‌ترین زیرسیستم ماشین از نظر فراوانی خرابی‌ها کدام است؟

۳- رفتار خرابی هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری چگونه است؟

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

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

### ۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

هرگونه خرابی دستگاه‌های حفاری باعث توقف سایر دستگاه‌های مرتبط با تولید و در نهایت توقف عملیات در معدن می‌شود. این امر در نهایت 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.

اگرچه تاکنون تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما تجهیزات حفاری از این مقوله بی‌بهره بوده و بررسی‌های صورت گرفته

در مورد این گونه تجهیزات عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. بر این اساس، در این تحقیق ضمن مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری در معدن مس سرچشمه، راهکارهایی برای و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی این ماشین‌ها ارائه شده است.

## ۱-۵- اهداف تحقیق

تجهیزات حفاری مهم‌ترین واحد عملیاتی در معدنکاری روباز هستند. که از کار افتادن آن‌ها به عنوان تهدیدی در سوراخ‌آوری و میزان تولید معدن محسوب می‌شود. از این رو بررسی قابلیت اطمینان آن‌ها ضرورت دارد. اهدافی که در این پایان‌نامه دنبال می‌شود به شرح زیر است:

- ۱- تعیین زیرسیستم‌ها و شبکه قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری
- ۲- ارائه مدل قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری
- ۳- تعیین بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر زیرسیستم و نیز کل ماشین حفاری
- ۴- حفظ پیوستگی تولید در معدن مس سرچشمه

## ۱-۷- ساختار پایان‌نامه

در این تحقیق، پس از ارائه مفاهیم احتمال، تعاریف و مدلسازی قابلیت اطمینان در فصل دوم، به معرفی ماشین‌های حفاری دورانی در فصل سوم پرداخته شده است. در فصل چهارم تحقیق، به ارائه زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین‌های حفاری پرداخته شده است. مدلسازی آماری قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری و نیز ناوگان حفاری معدن در فصل پنجم تحقیق ارائه شده است. و در نهایت، در فصل ششم تحقیق، با تأکید بر حفظ عملکرد هر یک از زیرسیستم‌ها در سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری پرداخته شده است.

# فصل دوم:

مفاهیم احتمال و مدل سازی در قابلیت

اطمینان

## ۲-۱- مقدمه

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 دوره سال‌های قبل از ۱۹۳۰ ارجاع داد. در آن زمان به علت نگرانی از 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، 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

<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



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

<sup>۱</sup> Challenger

<sup>۲</sup> Failure Density Function

### 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 (حاج شیرمحمدی، 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 حیطة 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):

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

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.

<sup>1</sup> Failure Distribution Function

## ۲-۴- تعاریف و مفاهیم قابلیت اطمینان

### ۲-۴-۱- 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).

### ۲-۴-۲- 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).

### ۲-۴-۳- 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).

### ۲-۴-۴- 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 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 (۲-۴) قابل تعریف است (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

<sup>1</sup> Failure

<sup>2</sup> Down Time

<sup>3</sup> Failure Time

<sup>4</sup> Failure Rate

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

## 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 ماشین آلات در طول عمر خود دارای نرخ خرابی ثابتی هستند.

### ۲-۴-۵-۲- نرخ خرابی صعودی

در این حالت نرخ خرابی با گذشت زمان افزایش می یابد. ماشین آلاتی که وارد دوران فرسایش خود می شوند، دارای نرخ خرابی افزایشی هستند.

### ۲-۴-۵-۳- نرخ خرابی نزولی

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

تجربه نشان داده است که اکثر ماشین آلات و تجهیزات، در طول مدت بهره برداری، دارای تابع عمر مشخصی هستند. بدین ترتیب تابع عمر ماشین آلات به صورت منحنی شکل (۲-۱) خواهد بود که منحنی وان حمام<sup>۱</sup> نامیده می شود. در آغاز دوره بهره برداری (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 تنظیم شده ای به خود می گیرند. 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 لحظه ای دستگاه ثابت می ماند. پس از طی دوره عمر طبیعی و نزدیک شدن به دوران فرسایش (مرحله ۳) سرعت خرابی دستگاه،

<sup>۱</sup> Bath Tube

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

## 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.

<sup>۱</sup> Mean Time To Failure (TTR)

### ۷-۴-۲- متوسط زمان بین خرابی‌ها (MTBF)<sup>۱</sup>

میانگین زمان بین خرابی‌ها، متوسط زمان بین شکست‌های یک سیستم است. اختلاف اساسی بین  $MTTF$  و  $MTBF$  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 شکست‌ها استفاده می‌شود (Dhillon, 1999).

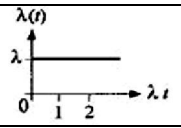
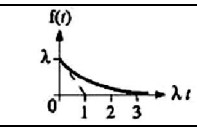
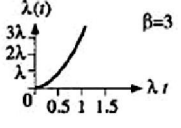
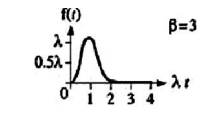
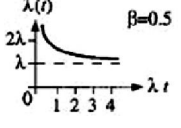
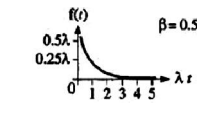
### ۸-۴-۲- زمان برای تعمیر (TTR)<sup>۲</sup>

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

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

مشخصات هر یک توابع توزیع رایج در مهندسی قابلیت اطمینان به صورت خلاصه در جدول (۱-۲) آورده شده است (Stapelberg, 2009; Smith, 2001).

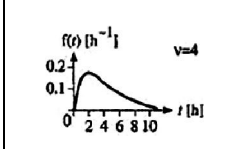
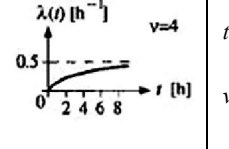
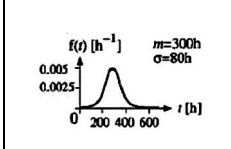
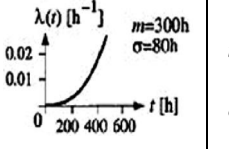
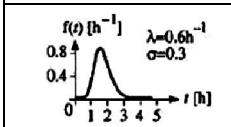
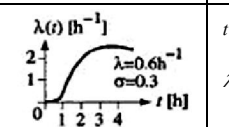
جدول ۱-۲- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته

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	$\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$	$\frac{\beta}{\lambda^2}$	$\frac{\beta}{\lambda}$	$t \geq 0, F(0) = 0$ $\lambda, \beta > 0$		

<sup>1</sup> Mean Time Between Failure (MTBF)

<sup>2</sup> Time To Repair (TTR)

ادامه جدول ۱-۲

		$t \geq 0, F(0) = 0$ $v = 1, 2, \dots$	$v$	$2v$	$\frac{\int_0^t x^{v-1} e^{-\frac{x}{2}} dx}{2^{v/2} \Gamma(v/2)}$	مربع چی
		$t, m < \infty$ $\sigma > 0$	$m$	$\sigma^2$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$	نرمال
		$t \geq 0, F(0) = 0$ $\lambda, \sigma > 0$	$\frac{e^{\sigma^2/2}}{\lambda}$	$\frac{e^{2\sigma^2} - e^{\sigma^2}}{\lambda^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{\ln(\lambda t)}{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$	لاگ نرمال

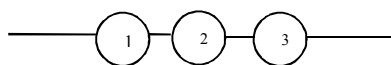
## ۲-۶- مدل سازی شبکه و قابلیت اطمینان سیستمها

یک سیستم که می تواند مکانیکی، الکتریکی و غیره باشد، از مجموعه ای 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. نمونه ای 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.

$$R_{System} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (۲-۶)$$



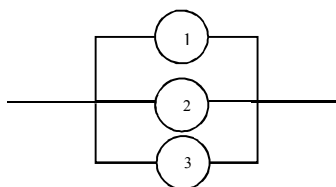
شکل ۲-۲- یک سیستم سری متشکل از سه زیر سیستم مستقل

<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.

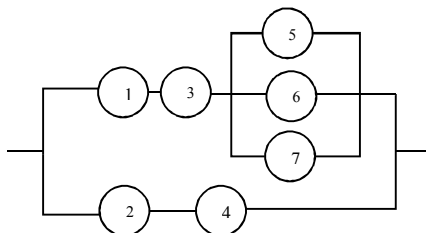
$$R_{System} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (7-2)$$



شکل ۳-۲- 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.



شکل ۴-۲- یک سیستم سری- موازی

<sup>1</sup> Parallel System



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.

$$R_{sb}(t) = \sum_{j=k}^m \left[ \left[ \int_0^t \lambda(t) dt \right]^j e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \right] / j \quad (۲-۹)$$

<sup>۱</sup> k out of n System

<sup>۲</sup> Standby System

## ۲-۷- 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:

### ۲-۷-۱- 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):

- ۱) تعریف و تعیین مرزهای سیستم و جزئیات مورد نیاز
  - ۲) تهیه لیست تمامی زیرسیستم‌ها و اجزای سیستم
  - ۳) شناسایی انواع خرابی‌های مربوط به هر زیرسیستم و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به آن‌ها
  - ۴) اختصاص احتمال یا نرخ خرابی به هر کدام از انواع خرابی‌ها
  - ۵) پیش‌بینی تأثیرات هر یک از انواع خرابی‌ها بر اجزاء مجاور، زیرسیستم‌های دیگر و یا کل سیستم
  - ۶) وارد کردن توضیحات و ملاحظات مناسب در اطلاعات مربوط به هر نوع خرابی
  - ۷) مرور تک‌تک 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

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

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 (رضاییان، ۱۳۹۰ و حسینی، ۱۳۹۱).

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

(۱) تعریف سیستم و تشریح رخدادهای نامطلوب در آن

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

(۳) ارزیابی کیفی درخت خطای تشکیل شده

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

(۵) ارزیابی کمی درخت خطا

(۶) پیشنهاد اقدامات لازم برای اصلاح و بهبود درخت

چنانچه 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>۲</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. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، این درخت برای تحلیل

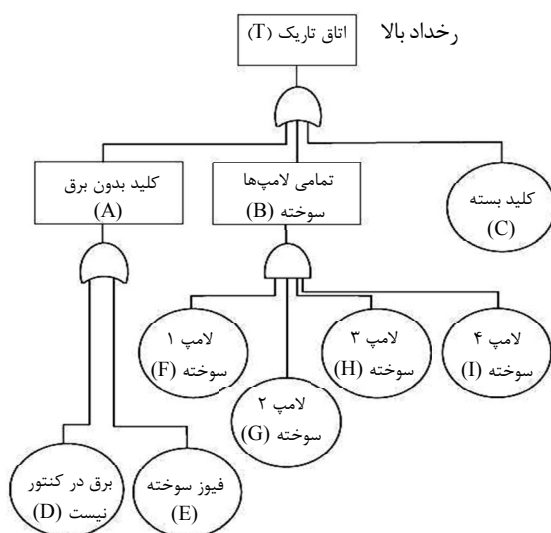
<sup>۱</sup> Fault Tree Analysis (FTA)

<sup>۲</sup> Top Event

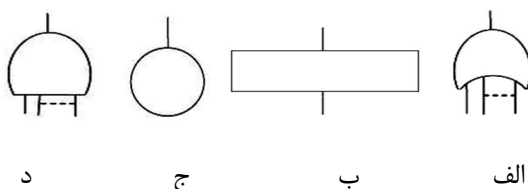
احتمال تاریک بودن یک اتاق تشکیل شده است. در این درخت از بالا به پایین، دلایل ممکن برای تاریک بودن یک اتاق به صورت شاخه شاخه ارائه شده است.

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

در ترسیم ساختار درخت خطا معمولاً 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 ۲-۵- نمونه‌ای از یک درخت خطا (Dhillon, 2008)



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

در شکل (۶-۲) نماد (الف) نشان دهنده رخداد برآیند است که از ادغام رخدادهای خرابی ورودی به آن حاصل می‌شود. نماد (ب) نشان دهنده رخداد یا یک خرابی است که به صورت مستقل و بدون داشتن زیرشاخه یا رخداد وابسته در درخت قرار می‌گیرد. نماد (ج) 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. به عنوان مثال طبق شکل (۵-۲)، زمانی کلید بدون برق است که یا در کنتور برق نباشد و یا فیوز سوخته باشد. مفهوم ریاضی این درگاه به صورت رابطه (۱۰-۲) می‌باشد (Dhillon, 2008).

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

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

نماد (د) که به "درگاه و"<sup>۲</sup> شهرت یافته زمانی به کار می‌رود که خروجی درگاه به وقوع کلیه رخدادهای ورودی وابسته باشد. شکل (۵-۲) 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 (۱۱-۲) می‌باشد (Dhillon, 2008).

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

که در آن  $P(X_{\theta})$ ، 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

<sup>1</sup> OR Gate

<sup>2</sup> AND Gate

دست می‌آورند. 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>۱</sup>

روش مارکوف بر مبنای حالت‌های سیستم استوار بوده و با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌نماید (رضاییان، ۱۳۹۰). ویژگی دستگاہی که در آن، وضعیت کنونی معلوم و وضعیت‌های گذشته هیچ تأثیری در وضعیت آینده آن نداشته باشند، ویژگی مارکوفی و دستگاہی که دارای این ویژگی است را زنجیر مارکوف می‌نامند (Jalali & 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 دستگاہ نامیده می‌شود، متعلق باشد. در این شرایط اگر نتیجه آزمایش  $n$  ام،  $a_i$  باشد آنگاه دستگاہ 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 ماقبل 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).

<sup>۱</sup> Markov Theory

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

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 است، ماتریس تصادفی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. یکی از مهمترین ویژگی‌های ماتریس تصادفی این است که هر ماتریس تصادفی منظم مثل  $P$  دارای یک بردار ثابت<sup>۵</sup> یکتا<sup>۶</sup>، مثل  $t$  است که ضرب ماتریس تصادفی از راست، مقدار آن را تغییر نمی‌دهد. به عبارت دیگر برای این ویژگی می‌توان روابط (۱۲-۲) 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>۷</sup> زنجیر مارکوف گویند (جلالی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین، با محاسبه توزیع ماندگار زنجیره مارکوف در حالاتی از سیستم که مطلوب نیستند، امکان محاسبه قابلیت اعتماد سیستم در حالات مذکور وجود خواهد داشت.

<sup>1</sup> Transition Probability

<sup>2</sup> Transition Matrix

<sup>3</sup> Probability Vector

<sup>4</sup> Stochastic Matrix

<sup>5</sup> Fixed Vector

<sup>6</sup> Unique

<sup>7</sup> Stationary Distribution

## 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 کامل ترین و جامع ترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می آید. چنانچه در رابطه (۲-۳) دیده شد، تابع توزیع احتمال زمان بین خرابی ها به عنوان اصلی ترین پارامتر در محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است. لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده ها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان است. سپس با استفاده از رابطه (۲-۳) معادله تابع زمان قابلیت اطمینان به دست می آید. از آنجایی که تنها در روش تحلیل آماری می توان به یک معادله تابع زمان دست یافت، لذا این روش "مدل سازی قابلیت اطمینان" نامیده شده و سایر روش ها بیشتر به نام تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می شوند. نکته بسیار مهم در مورد مدل سازی قابلیت اطمینان، دقت در نوع داده های جمع آوری شده است. اگر داده ها از نظر آماری "مستقل بوده و به طور یکسان توزیع شده"<sup>۱</sup> باشند برای مدل سازی، از آمار کلاسیک و توابع توزیع چگالی معمولی استفاده می شود. اما اگر داده ها این شرط را نداشته باشند از تکنیک های غیر آماری استفاده خواهد شد. دو تکنیک عمده برای تشخیص نوع داده ها وجود دارد (Ascher & Feingold, 1984; Klefsjö & Kumar, 1992):

**الف - آزمون روند<sup>۲</sup>:** برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در داده ها روش های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله این روش ها می توان به "آزمون لاپلاس"<sup>۳</sup>، "آزمون هندبوک نظامی"<sup>۴</sup> و روش گرافیکی اشاره کرد. در میان این روش ها روش گرافیکی به دلیل سادگی و سرعت عملکرد از کاربرد بیشتری برخوردار است. اگر در اثر این آزمون ها معلوم شود که داده ها دارای روند هستند، برای مدل سازی از روش های خانواده "فرآیند پواسون غیرهمگن"<sup>۵</sup> مثل "فرآیند قانون توان"<sup>۱</sup> استفاده می شود. در آزمون

<sup>۱</sup> independent and identically distributed (iid)

<sup>۲</sup> Trend Test

<sup>۳</sup> Laplace

<sup>۴</sup> Military Hand book

<sup>۵</sup> Non-Homogeneous Poisson Process



هندبوک نظامی، ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری ( $U$ ) (رابطه ۲-۱۳) انجام می‌شود (MIL-HDBK-189, 1984).

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n / T_i) \quad (2-13)$$

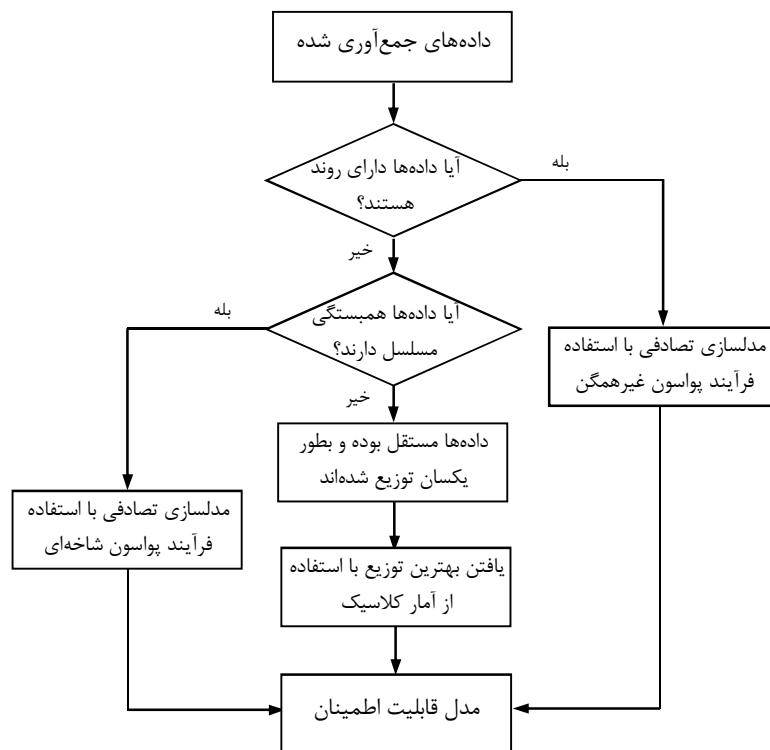
که در آن،  $n$  تعداد خرابی،  $T_n$  زمان آخرین خرابی،  $T_i$  زمان خرابی  $i$ ام است. در این روش، فرض صفر این است که داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن تبعیت نمی‌کنند. بر مبنای این فرض، شاخص  $U$  دارای توزیع کای ( $\chi^2$ ) با درجه آزادی  $2(n-1)$  است. برای کنترل صحت فرض صفر، پس از محاسبه  $U$  برای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

**ب) آزمون همبستگی مسلسل<sup>۲</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>۳</sup> یا فرآیندهای تصادفی مشابه استفاده خواهد شد (Ascher & Feingold, 1984). شکل (۲-۷) روندنمای مربوط به تعیین نوع مدل‌سازی داده‌های آماری را نشان می‌دهد. در فصل پنجم این تحقیق، به مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و همچنین ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه پرداخته شده است.

<sup>1</sup> Power Law Process

<sup>2</sup> Serial Correlation Test

<sup>3</sup> Branching Poisson Process



شکل ۲-۷- روندنامی مربوط به تعیین نوع مدل‌سازی داده‌های آماری در روش آماری (Ascher & Feingold, 1984)

### ۲-۷-۵- فرآیند قانون توان

فرآیند قانون توان یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های مطالعه قابلیت اطمینان دستگاه‌های تعمیرپذیر به شمار می‌آید. 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 می‌باشند که طبق پیشنهاد کرو، می‌توان این پارامترها را با استفاده از روش تخمین نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۱</sup> و روابط زیر محاسبه نمود:

<sup>۱</sup> Maximum likelihood

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

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

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.

## ۲-۸- 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 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.

## فصل دوم: مفاهیم احتمال و مدل سازی در قابلیت اطمینان

جدول ۲-۲- روش های مختلف به کار رفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی (حسینی، ۱۳۹۰)

روش های تحلیل قابلیت اطمینان					نام ماشین
شبه سازی	مدل سازی	تحلیل آماری	درخت خطا	FMEA	
		✓			شاوول برقی
		✓			کامیون
		✓			نصب بولت
			✓		ماشین شاتل
			✓		سیستم های برقی
	✓				LHD
	✓				سیستم هیدرولیک LHDها
	✓				لاستیک کامیون ها
✓	✓	✓		✓	درام شیرر
		✓		✓	ناو زنجیری زره دار (AFC)
		✓			بارگیر مرحله ای
		✓			نوار نقاله
		✓			نگهداری قدرتی
			✓		شاوول برقی
		✓			دارگلاین
	✓				شاوول هیدرولیکی
	✓				لودر خاک انداز
	✓				کامیون های زیرزمینی
	✓				سنگ شکن
	✓				سرنده
	✓				نوار نقاله
	✓				خوراک دهنده به نوار نقاله
				✓	فن تهویه
	✓				ماشین لق گیر

### ۲-۹- جمع بندی

در این فصل، مفاهیم پایه مورد استفاده در قابلیت اطمینان ارائه و مورد بحث قرار گرفت. سپس به معرفی روش های مدل سازی قابلیت اطمینان پرداخته شد. در پایان، استفاده از روش های یاد شده در حوزه مهندسی معدن، به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفت. در فصل آینده، به معرفی ماشین های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه پرداخته شده است.

فصل سوّم:

ماشین های حفاری دورانی، مطالعه

موردی؛ معدن مس سرچشمه

### ۳-۱- مقدمه

عصر پیشرفت در صنعت معدنکاری و استخراج سنگ‌های ساختمانی با شروع حفاری‌های چرخشی در دهه ۱۹۴۰ آغاز شد. پس از آن در دهه ۱۹۵۲ با عرضه ماشین حفاری دورانی R45 از شرکت روسی Bucyrus تقریباً تا سال ۱۹۶۰ اکثر معادن به سمت حفاری دورانی پیش رفتند. در این دوران حفاری چرخشی در معادن سطحی و در معادن سنگ ساختمانی بزرگ برای حفر چال‌های قطور در سنگ‌های نرم تا نسبتاً سخت، رواج یافت. در اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰، اکثر تولیدکنندگان تجهیزات و ماشین‌آلات معدنی به سمت تولید ماشین‌های بزرگ معدن 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 و امکان حفاری چال‌های با قطر بیش از ۳۸۱ میلی‌متر در سازندهای سخت به راحتی فراهم آمد. امروزه ماشین‌های حفاری غول‌پیکر مانند Bucyrus R59 یا R49 و P&H 120A و PV 351 اطلس کوپکو در حفاری چال‌های با قطر بیش از ۴۰۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماشین‌ها قادر به حفر چال‌های عمیق با عمق بیش از ۲۰ متر با یک لوله حفاری هستند. در ادامه به بررسی اجزای مختلف ماشین‌های حفاری دورانی پرداخته شده است (Bhalchandra, 2011).

### ۳-۲- اجزای ماشین‌های حفاری دورانی

ماشین‌های حفاری دورانی از اجزای متعددی تشکیل شده است. این اجزاء دارای تعدادی قطعات کوچکتر هستند که لازم است به گونه‌ای طراحی شوند که عمر بالایی داشته باشند. انتخاب و طراحی هر یک از این قطعات به دقت و خلاقیت مهندسان طراح نیازمند است. اجزای مختلف ماشین‌های حفاری در جدول (۳-۱) ارائه شده است.

## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی؛ معدن مس سرشهر

جدول ۳-۱- قسمت‌های متداول در ماشین‌های حفاری دورانی به همراه وظیفه هر یک از آن‌ها (Bhalchandra, 2011)

بخش دستگاه	هدف از به کار گیری
شنی <sup>۱</sup>	شنی امکان جابجایی دستگاه را از یک چال به چال دیگر و یا از یک پله به پله دیگر فراهم می‌آورد.
بدنه اصلی <sup>۲</sup>	تمامی تجهیزات دستگاه حفاری (بجز شنی) بر روی این بخش قرار می‌گیرد و به همین دلیل بدنه اصلی دستگاه نامیده می‌شود.
جک‌های تراز <sup>۳</sup>	جک‌های تراز به بدنه اصلی متصل بوده و وظیفه تراز کردن دستگاه پس از استقرار در محل مورد نظر برای حفاری را بر عهده دارد.
محرک اصلی <sup>۴</sup>	این بخش منبع اصلی تولید انرژی برای دستگاه است. تمام بخش‌های دستگاه نیروی خود را از این واحد دریافت می‌کنند. در اکثر ماشین‌های حفاری این بخش یک موتور دیزل است. اما در دستگاه‌های حفاری دورانی بزرگ نیروی الکتریکی تامین کننده قطعات متحرک دستگاه است.
کمپرسور <sup>۵</sup>	کمپرسور وظیفه فشرده‌سازی هوا به منظور خروج خرده‌های حفاری را بر عهده دارد.
کابین اپراتور <sup>۶</sup>	کابین اپراتور در بخش انتهایی دستگاه قرار داشته و کنترل تمامی بخش‌های دستگاه را در حین حفاری بر عهده دارد.
کابین راننده <sup>۷</sup>	در مورد دستگاه‌های حفاری که بر کامیون سوار شده‌اند، جانمایی کابین اپراتور در بخش انتهایی دستگاه، برای جابجایی دستگاه در مسافت‌های طولانی و ناهموار مناسب نیست. در این موارد تعبیه کابین راننده در قسمت جلوی دستگاه ضرورت دارد.
دکل <sup>۸</sup>	قرار گرفتن موتور دورانی و مکانیزم تامین نیروی تغذیه بر دکل امکان حفاری پیوسته چال را فراهم می‌آورد. با قرار گرفتن دکل به صورت زاویه‌دار و قائم امکان حفاری چال در راستای معین فراهم می‌آید.
سر چرخشی <sup>۹</sup>	سر چرخشی با اعمال نیروی چرخشی با سرعت و گشتاور معین، حرکت دورانی میله حفاری را تامین می‌کند.
قرقره کمکی <sup>۱۰</sup>	اکثر دستگاه‌های حفاری به وینچ (قرقره) مجهز هستند. حلقه‌ها و زنجیرها متصل به وینچ، امکان نگه داشتن قطعات سنگین بخش حفاری را فراهم می‌آورد.
سیستم هیدرولیک <sup>۱۱</sup>	تنها نیرویی که به قادر به بالا و پایین بردن دکل و جک‌های تراز می‌باشد، نیروی هیدرولیکی و استفاده از سیلندرهای هیدرولیکی است. تمام چالزن‌ها دارای سیستم هیدرولیکی هستند. علاوه بر این، در اکثر ماشین‌های حفاری از فشار هیدرولیک روغن برای به کار انداختن موتورهای هیدرولیکی و ایجاد حرکت دورانی استفاده می‌شود.
تجهیزات کنترل گرد و غبار <sup>۱۲</sup>	در حین عملیات حفاری، حجم بسیار زیادی از ذرات بسیار خرد شده در ته چال بوجود می‌آید. این ذرات با استفاده از جریان هوای فشرده به سر چال انتقال می‌یابند. برای جمع‌آوری گرد و غبار مکنده گرد و غبار <sup>۱۳</sup> بر دهانه چال قرار داده می‌شود. بنا به دلایل متعددی استفاده از مکنده گرد و غبار به تنهایی کافی نبوده و استفاده از سایر تجهیزات کنترل گرد و غبار ضرورت دارد. برای این منظور دو راه وجود دارد: ۱: پاشیدن آب، ۲: کنترل گرد و غبار به صورت خشک.
محفظه ماشین <sup>۱۴</sup>	محفظه ماشین اکثر تجهیزات را از گرما، سرما، گرد و غبار، باران و پرتاب سنگ، محفوظ نگه می‌دارد. این بخش از دستگاه محلی امن برای تعویض و تعمیر قطعات دستگاه است.

<sup>1</sup> Undercarriage

<sup>2</sup> Main Frame

<sup>3</sup> Leveling Jack

<sup>4</sup> Main Mover

<sup>5</sup> Compressor

<sup>6</sup> Operator Cab

<sup>7</sup> Driver Cab

<sup>8</sup> Mast

<sup>9</sup> Rotary Head

<sup>10</sup> Auxiliary Winch

<sup>11</sup> Hydraulic System

<sup>12</sup> Dust Control Equipment

<sup>13</sup> Dust Hood

<sup>14</sup> Machinery House

### ۳-۳- محل قرارگیری تجهیزات

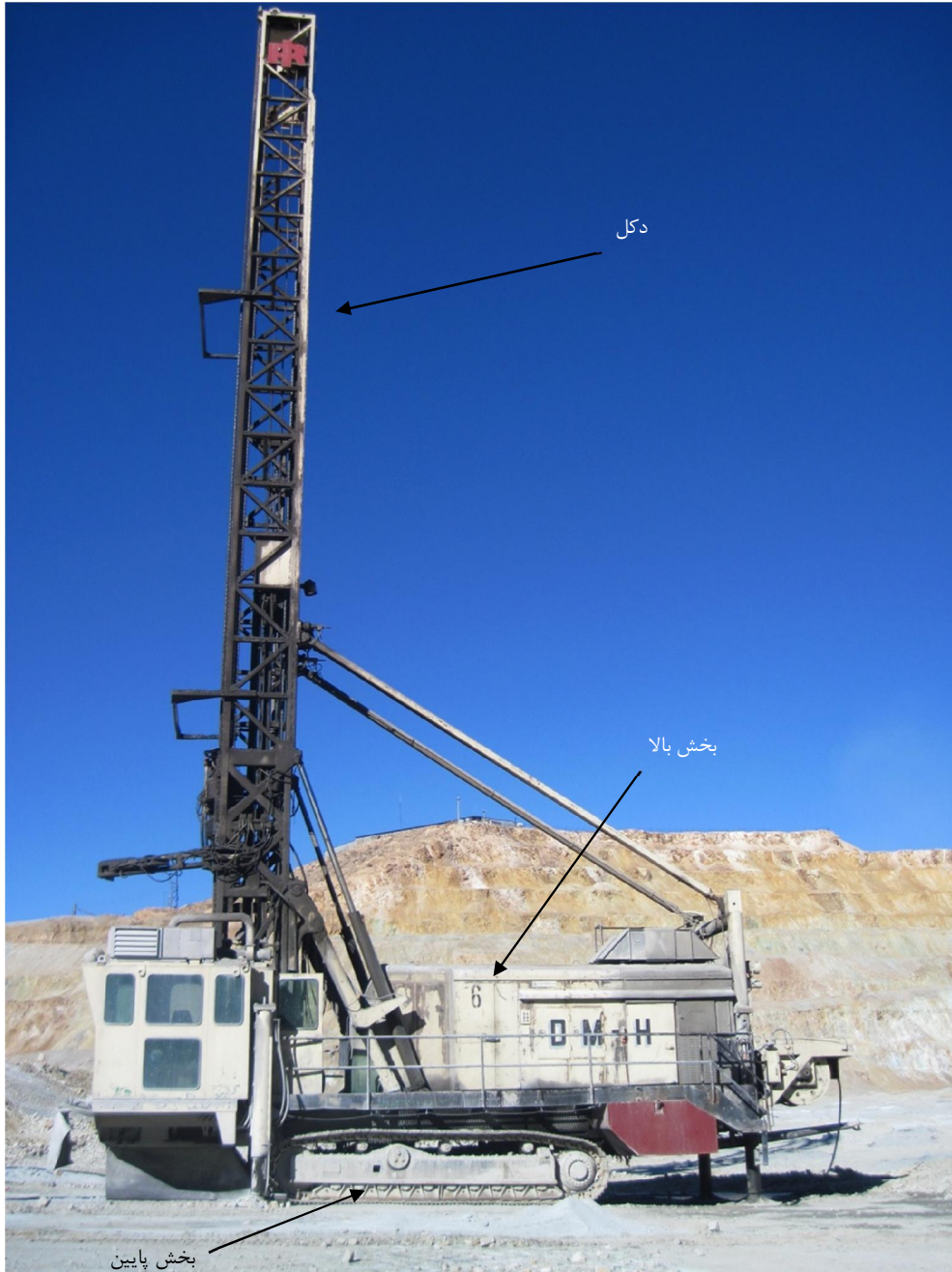
تمامی تجهیزات ماشین‌های حفاری در سه گروه بخش پایینی، بخش بالایی و دکل تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. اجزای بخش پایین به قطعاتی که در پایین‌ترین بخش دستگاه قرار دارند، اطلاق می‌گردد. این بخش از دستگاه، تجهیزات نگهدارنده<sup>۱</sup>، بدنه اصلی، شنی و سایر بخش‌های متحرک بدنه را در بر می‌گیرد. بخش بالایی که بر بدنه اصلی دستگاه قرار دارد، اجزای بسیار مهم دستگاه را از جمله جک‌های تراز، کمپرسور، کابین اپراتور، راهروها اجزای سیستم هیدرولیک، تجهیزات جمع‌آوری گرد و غبار، محفظه ماشین (در صورت وجود)، سیستم تعویض میله مته، آچارهای کوبلینگ، زنجیرهای کمکی و ... شامل می‌شود. دکل نیز سازه برج مانندی است که به وسیله بدنه اصلی ماشین نگه داشته می‌شود. اجزای اصلی این بخش شامل سامانه نیروی تغذیه<sup>۲</sup>، تعویض لوله‌ها، آچارهای باز و بسته کردن میله‌مته، آچارهای کمکی و غیره است. هر یک از اجزای ماشین در ادامه توضیح داده شده است (Bhalchandra, 2011).

---

<sup>1</sup> Support

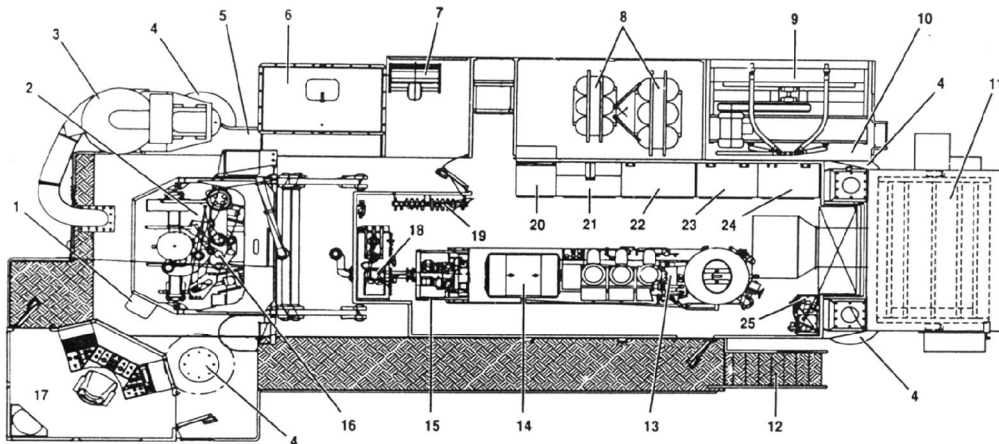
<sup>2</sup> Feed Force Mechanism





شکل ۳-۱- بخش‌های سه‌گانه ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه (DMH; XL 1800-Ingersoll Rand)

آرایش بخش‌های مختلف این ماشین به صورت شماتیک در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



۱- دریچه بازدید سرمته (هیدرولیکی)، ۲- آچار توقف هیدرولیکی، ۳- محفظه کنترل خشک گردوغبار، ۴- چک‌های تراز (هیدرولیکی)، ۵- صفحه سرویس، ۶- سیستم پاشش آب برای کنترل گردوغبار، ۷- خنک کننده روغن هیدرولیک، ۸- ترانسفورماتور، ۹- خنک کننده روغن کمپرسور، ۱۰- عایق حرارتی خنک کننده، ۱۱- قرقره کابل، ۱۲- پله کان، ۱۳- کمپرسور اصلی، ۱۴- موتور محرک کمپرسور، ۱۵- پمپ هیدرولیکی و جعبه دنده، ۱۶- آچار لوله گیر، ۱۷- کلبین اپراتور، ۱۸- مخزن روغن هیدرولیک، ۱۹- سوپاپ‌های الکتروهیدرولیکی، ۲۰- کمپرسور، ۲۱- موتور مرکزی ولتاژ پایین، ۲۲- کنترل کننده، ۲۳- جعبه کنترل حرکت دورانی، ۲۴- محفظه کنترل بالا و پایین بردن دکل، ۲۵- سیستم گریس کاری هیدرولیک

شکل ۳-۲- اجزای ماشین حفاری دورانی (Bhalchandra, 2011)

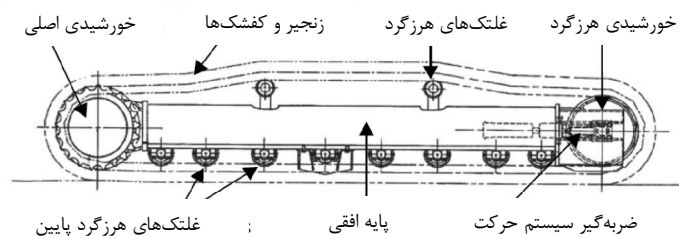
### ۳-۳-۱- تجهیزات مربوط به بخش پایین دستگاه

این بخش از دستگاه، بخش حرکت<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که تکیه‌گاه تجهیزات فوقانی، دکل و تجهیزات حرکت ماشین را در بر می‌گیرد. چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری دو نمونه از این بخش است که با توجه به اینکه در ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه از نوع چرخ زنجیری است، این سامانه در ادامه توضیح داده شده است (Bhalchandra, 2011):

### ۳-۳-۱-۱- اجزای چرخ‌های زنجیری

با وجود افزایش نیاز به تجهیزات و قطعات چرخ‌زنجیری‌ها، کارخانجات اندکی اقدام به تولید چرخ‌های زنجیری نموده‌اند. این شنی‌ها، قادر به تحمل وزن‌های حدود ۱۲۰ تن بوده که برای اکثر ماشین‌های حفاری، قابل استفاده هستند. در صورتی که وزن ماشین حفاری از حد معمول بیشتر باشد، از شنی‌های مخصوصی استفاده می‌شود. اجزای هر یک از شنی‌ها در شکل (۳-۳) نشان داده شده و در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته شده است.

<sup>1</sup> Under Carriage



شکل ۳-۳- نمایی از چرخ زنجیری

### الف - پایه افقی<sup>۱</sup>

پایه افقی عموماً از تیرآهن‌های با مقطع مربعی که جوش کاری شده است، تشکیل شده است. در موارد خاص برای افزایش وزن و صلبیت دستگاه، پایه‌ها را از نوع خاصی بتن مسلح به الیاف‌های فولادی (برای جلوگیری از خوردگی) پر می‌کنند. این بخش از چرخ زنجیری در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

### ب - هرزگرد و غلطک‌ها<sup>۲</sup>

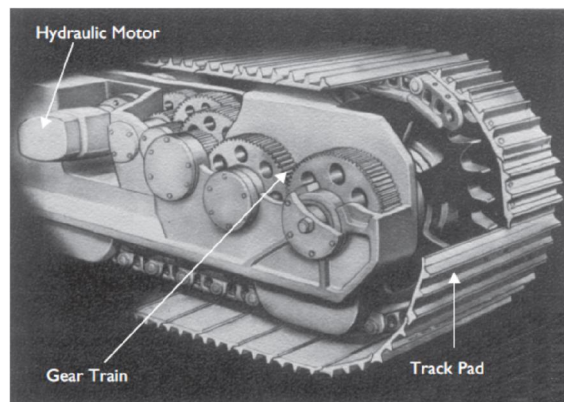
بخش فوقانی پایه فلزی به وسیله تعداد اندکی از هرزگردها نگه داشته می‌شود. این غلتک‌های هرزگرد امکان چرخش غلتک‌های شنی را در بخش‌های پایین فراهم می‌آورند. به طور کلی غلتک‌های هرزگرد حرکت ملایم و روی خط مستقیم زنجیر شنی را باعث می‌شوند.

<sup>1</sup> Track Beam

<sup>2</sup> Idler and Load Roller

### ج- چرخ‌دنده<sup>۱</sup>

خوشبیدی در یک طرف پایه فلزی قرار گرفته و دارای دندانه‌های زیادی است. این دندانه‌ها در زنجیر شنی قفل می‌شوند. با چرخش چرخ‌دنده، نیروی لازم برای حرکت زنجیر شنی تامین می‌شود. و به این صورت چرخ زنجیری حرکت می‌کند. در چرخ زنجیری‌های جدیدتر، نیروی محرک خوشبیدی در هر شنی، به کمک گشتاور بالایی که توسط یک موتور هیدرولیکی (موتور پیش‌رانش<sup>۲</sup>) تولید می‌شود و به کمک جعبه‌دنده به خوشبیدی منتقل می‌شود، تامین می‌شود. این نوع حرکت در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- موتور هیدرولیکی و جعبه دنده برای حرکت چرخ زنجیری (Bhalchandra, 2011)

### د- خوشبیدی‌های هرزگرد<sup>۳</sup>

خوشبیدی‌های هرزگرد در طرف دیگر پایه فلزی قرار گرفته است. که همانند غلتک‌ها و مجموعه چرخ‌دنده‌ها، وظیفه نگهداری پایه فلزی را بر عهده دارند. علاوه بر این، خوشبیدی‌های هرزگرد به فنرهایی مجهز هستند که آن‌ها در برابر نیروی فشاری محافظت می‌کند.

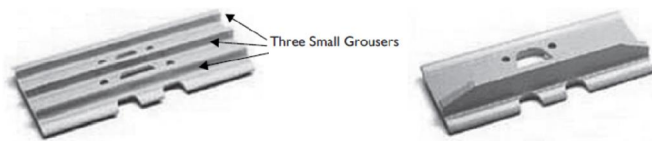
<sup>1</sup> Sprocket

<sup>2</sup> Propel Motor

<sup>3</sup> Idler Tumbler

## ه- قطعات شیاردار شنی (کفشک‌ها)<sup>۱</sup>

این قطعات با اتصال به یکدیگر، شکل شنی را به خود می‌گیرند. نمونه‌ای از این کفشک‌ها که در شنی شاول‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شکل (۳-۵) نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- نمونه‌ای از کفشک‌های تک‌شیاری (شکل چپ) و سه‌شیاری (شکل راست) شنی (Bhalchandra, 2011)

این قطعات توسط پین به یکدیگر متصل می‌شوند. یاتاقان‌هایی که در فواصل قطعات شیاردار قرار می‌گیرد، شنی را کاملاً صلب و محکم می‌کند. اکثر کارخانجات برای این منظور از زنجیرهای شیاردار استفاده می‌کنند. زنجیرهای تک‌شیاری، دو شیاری و سه شیاری نمونه‌ای از این کفشک‌ها هستند که در شکل (۳-۵)، نمونه‌ای از آن‌ها نشان داده شده است. نوع تک‌شیاری به دلیل سبک بودن و مقاومت خمشی پایین، بهترین تطبیق را با زمین دارد. این نوع بیشتر در بولدوزرهایی که در زمین‌های نرم کار می‌کنند، استفاده می‌شود. در مورد چالزن‌های دورانی، بالا بودن مقاومت خمشی هر یک از کفشک‌ها نسبت به انطباق شنی با نوع زمین از اهمیت بالاتری برخوردار است. به همین دلیل در اکثر ماشین‌های حفاری دورانی، از کفشک‌های سه شیاری استفاده شده است. تعداد ردیف قطعات در هر شنی با توجه به شرایط زمین به نحوی تعیین می‌گردد که فشار وارد بر زمین کم‌تر از ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال باشد. این امر موجب کاهش سرویس‌های تعمیر و نگهداری اکثر یاتاقان‌ها و غلتک‌ها شده و آب‌بندی و روغن‌کاری آن‌ها را سهولت می‌بخشد.

سرعت اکثر چرخ زنجیری‌ها در حدود ۱ تا ۴ کیلومتر بر ساعت است. سرعت‌های بالاتر، انتقال دستگاه از یک پله به پله دیگر را تسریع می‌بخشد، اما سرعت بالاتر از ۳ کیلومتر بر ساعت پیشنهاد نمی‌شود.

<sup>۱</sup> Track Pad

زیرا سرعت‌های بالاتر بسیار خطرناک بوده و پایداری دکل را به خطر می‌اندازد. چالزن‌های با دکل‌های بزرگتر، سرعت تحرک پایین‌تری دارند.

### ۳-۳-۲- تجهیزات بخش بالایی دستگاه

تمامی تجهیزات فوقانی دستگاه بر روی بدنه‌ای قرار می‌گیرد که بدنه اصلی<sup>۱</sup> دستگاه نامیده می‌شود. دکل و تجهیزات آن نیز بر روی بدنه اصلی دستگاه قرار می‌گیرند. مهمترین تجهیزات مربوط به بخش فوقانی ماشین در ادامه آورده شده است (Bhalchandra, 2011):

۱- بدنه اصلی

۲- جک‌های تراز<sup>۲</sup>

۳- محرک اصلی<sup>۳</sup>

۴- کمپرسور

۵- سیستم هیدرولیک

۶- سیستم خودکار روغن‌کاری

۷- رادیاتور و خنک‌کننده‌های روغن

۸- محفظه ماشین

۹- سیستم کنترل گرد و غبار

۱۰- کابین اپراتور

۱۱- کابین راننده

در ماشین‌های حفاری دورانی، برخی از تجهیزات با جریان الکتریکی متناوب عملکرد بهتری دارند، در حالی که برخی دیگر نیازمند جریان مستقیم هستند. موتورهای با قدرت پایین به منبع ضعیف‌تری از برق نیاز دارند که در این صورت به ترانسفورماتور و مبدل جریان الکتریکی مجهز هستند. به همین

<sup>1</sup> Main Frame

<sup>2</sup> Leveling Jacks

<sup>3</sup> Prime Mover

دلیل ریل‌های مربوط به هدایت کابل‌های برق در قسمت فوقانی ماشین تعبیه شده است. هر یک از تجهیزات بخش فوقانی دستگاه در ادامه توضیح داده شده است (Bhalchandra, 2011):

### ۳-۳-۱- بدنه اصلی

در جریان عملیات حفاری، وزن هر سه گروه از تجهیزات دستگاه (بخش‌های بالا، پایین و دکل) توسط بدنه اصلی تحمل شده و به کمک جک‌های تراز به زمین منتقل می‌شود. با توجه به اینکه بدنه اصلی لرزش‌های ناشی از حفاری را تحت کنترل در می‌آورد، بنابراین علاوه بر مقاوم بودن، باید کاملاً صلب باشد تا در برابر انحرافات ایجاد شده حین حفاری مقاومت کند. بدنه اصلی معمولاً از دو قطعه تیرآهن I شکل تشکیل شده که توسط دو ستون ضربدری به یکدیگر جوش داده شده است. عضوهای افقی که دکل، جک‌های هیدرولیکی، محفظه دستگاه، کابین کنترل و ... را نگه می‌دارد، مستقیماً به بدنه اصلی جوش داده شده است. بدنه اصلی ماشین دارای راهروهای فلزی است که امکان دسترسی به قسمت‌های مختلف ماشین را فراهم می‌آورد. صفحات ضد اسید و ضخیم به عنوان کفپوش این راهروها مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۳-۲- جک‌های تراز

در زمان حفاری، نیروی زیادی به عنوان نیروی تغذیه به بخش حفار ماشین وارد می‌شود. چرخ زنجیری قادر به تحمل نیروی عکس‌العمل ناشی از حفاری نیست. علاوه بر این، افقی بودن ماشین در حین حفاری و در زمین‌های ناهموار، بسیار مشکل است. این در حالی است که افقی بودن ماشین در حین حفاری بسیار مهم و ضروری است. جک‌های تراز، بدنه دستگاه را در حالت افقی قرار می‌دهند. ماشین‌های حفاری مجهز به چهار جک هستند که دو جک در جلوی ماشین و دو جک در انتهای آن قرار گرفته است. جک‌های تراز به صورت هیدرولیکی کار می‌کنند. تجهیزات کنترل جک‌های هیدرولیکی در کابین کنترل تعبیه شده که جریان هیدرولیک لازم را برای تنظیم جک‌ها در تراز دلخواه کنترل می‌کند. در پیچه هیدرولیک این جک‌ها به طور خودکار عمل می‌کند و در صورت کاهش



## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه

جریان هیدرولیک مانع از خروج روغن از جک شده و جک را در همان وضعیت قبل نگه می‌دارد. طول جک‌های تراز به گونه‌ای طراحی شده که دستگاه را در شیب ۱۰ درصد پایدار نگه می‌دارد. قطر جک نیز به گونه‌ای طراحی شده که مقدار نیروی وارد بر زمین در محدوده ۲۰۰ تا ۳۵۰ کیلوپاسکال باشد. برای جلوگیری از فرو رفتن جک در زمین یک صفحه فلزی دایره‌ای در انتهای جک جوش داده شده است (Bhalchandra, 2011). نمونه‌ای از جک‌های تراز در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.

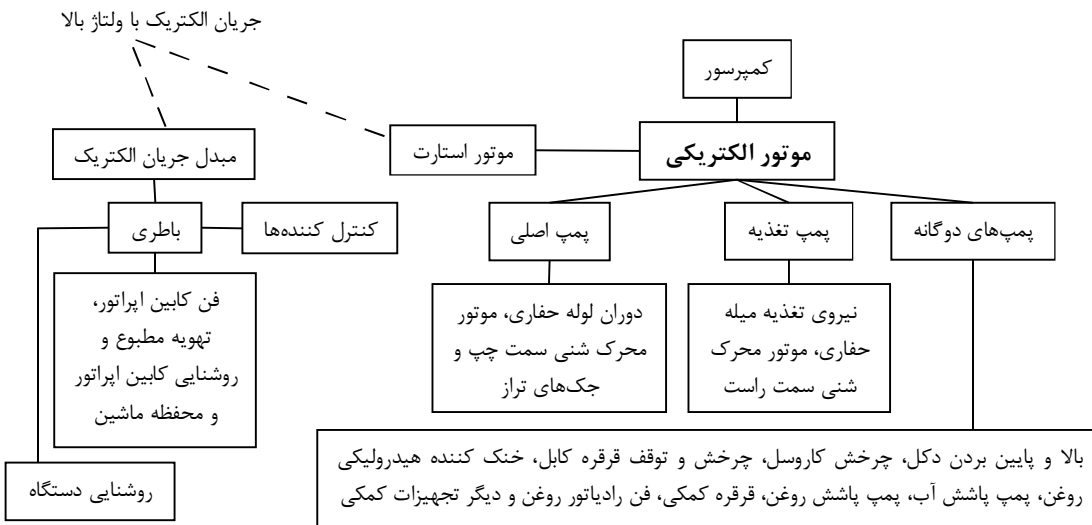


شکل ۳-۶- تصویر از جک تراز (جلوی ماشین حفاری)

### ۳-۳-۲-۳- منبع نیرو

بسته به اندازه و نوع ماشین‌های حفاری، جریانی بین ۲۰۰ تا ۱۳۰۰ کیلووات لازم است. هر چهار ماشین حفاری مورد استفاده در معدن مس سرچشمه از نوع الکتریکی-هیدرولیکی هستند. منبع و نحوه انتقال قدرت برای ماشین الکتریکی-هیدرولیکی با چرخ زنجیری به صورت شماتیک در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.





شکل ۳-۷- توزیع انرژی در ماشین‌های حفاری الکتریکی- هیدرولیکی (Bhalchandra, 2011)

### ۳-۳-۲-۴- کمپرسور

کمپرسورهائی که در ماشین‌های حفاری معدن سرچشمه تعبیه شده است، از نوع اسکرو<sup>۱</sup> و الکتروهیدرولیکی است. کمپرسور همانطوری که در شکل (۳-۷) نشان داده شده، مستقیماً به یک طرف موتور الکتریکی ماشین کوپل شده و با ولتاژ بالا تغذیه می‌شود. دیگر اجزای مرتبط با کمپرسورهای هیدرولیکی، جدا کننده روغن از هوا<sup>۲</sup> و خنک کننده<sup>۳</sup> کمپرسور است که هر دو آن‌ها به طور جداگانه بر بدنه اصلی دستگاه قرار می‌گیرند (Bhalchandra, 2011).

### ۳-۳-۲-۵- سیستم هیدرولیک

تمام دستگاه‌های حفاری مجهز به سیستم هیدرولیک هستند. مخازن هیدرولیک، فیلترها، پمپ‌ها، دریچه‌ها، موتورها و سیلندرها از اقلام اصلی سیستم هیدرولیک هستند. پمپ‌ها و موتورهای سیستم‌های هیدرولیک، جانمایی متنوعی دارند. پمپ‌های هیدرولیک مستقیماً به موتور الکتریکی اصلی ماشین کوپل هستند. در بسیاری از موارد، پمپ‌های رانشی به جای پمپ‌های دوگانه و یا

<sup>1</sup> Screw Type

<sup>2</sup> Air-Oil Separator

<sup>3</sup> Oil Cooler

سه‌گانه<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. ماشین‌های حفاری دورانی موجود در معدن مس سرچشمه دارای پنج پمپ هیدرولیکی هستند: پمپ اصلی (دو عدد)، پمپ تغذیه<sup>۲</sup> (یک عدد) و پمپ‌های دوگانه<sup>۳</sup> (دو عدد) که وظیفه هر یک از آن‌ها به صورت شماتیک در شکل (۳-۷) نشان داده شده است (Bhalchandra, 2011).

### ۳-۳-۲-۶- سیستم روغن کاری<sup>۴</sup>

سرمت‌های سه‌مخروطی که در ماشین‌های حفاری دورانی استفاده می‌شود، دو نوع هستند: یا با جریان هوا خنک می‌شوند<sup>۵</sup> و یا از نوع یاتاقانی آب‌بندی شده<sup>۶</sup> هستند. سرمت‌هایی که با جریان هوای فشرده خنک می‌شوند، در صورت استفاده از هوای فشرده، امکان روغن کاری آن‌ها وجود نخواهد داشت. بنابراین در نظر گرفتن سیستم روغن کاری سرمت در این نوع ماشین‌ها ضرورت دارد. انواع متداول سیستم‌های روغن کاری دارای اجزایی چون مخزن روغن و پمپ شارژ برای پاشیدن روغن به هوای فشرده از طریق نازل‌ها هستند. روغن کاری تمام بخش‌های ماشین حفاری در صورت استفاده از پمپ دستی، کار خسته‌کننده‌ای است. حتی در مورد روغن کاری قطعات حفاری، امری بسیار مشکل است. علاوه بر این برای روغن کاری دستی لازم است دستگاه متوقف شود. برای غلبه بر چنین مشکلاتی بسیاری از دستگاه‌ها دارای سیستم روغن کاری خودکار هستند. نمایشگرهای مربوط به سیستم روغن کاری در کابین اپراتور قرار داده شده که وضعیت سیستم و فشار روغن را با تعبیه حسگرهایی بر مسیر روغن کاری، نشان می‌دهد. در صورت مناسب نبودن فشار روغن، این حالت توسط اپراتور به صورت زنگ هشدار، اخطار داده می‌شود. تعداد نقاطی که به صورت خودکار روغن کاری می‌شوند، به طراحی ماشین بستگی دارد که در بسیاری از ماشین‌های حفاری تعداد این نقاط به بیش از ۱۰۰ نقطه می‌رسد (Bhalchandra, 2011).

<sup>1</sup> Double or Triple Pumps

<sup>2</sup> Feed Pump

<sup>3</sup> Double Pumps

<sup>4</sup> Lubrication System

<sup>5</sup> Air Cooled

<sup>6</sup> Sealed Bearing

ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه مجهز به سیستم خنک‌کننده روغن هیدرولیک کمپرسور هستند. این سیستم، از یک فن هیدرولیکی تشکیل شده و برای اطمینان از انتقال گرما به کمک رادیاتور و کولر هر دو آن‌ها بر لبه بدنه اصلی قرار قرار گرفته است.

### ۳-۲-۷- محفظه ماشین<sup>۱</sup>

محفظه ماشین وظیفه حفاظت از تجهیزات ماشین حفاری در شرایط نامناسب جوی و نواحی مرتفع، بر عهده دارد. دیواره‌ها و بخش فوقانی بدنه محفظه به صورت صفحاتی دو لایه بوده و هوای بین این دو لایه نقش عایق حرارتی را ایفا می‌کند. محفظه ماشین در اصطلاح موتورخانه نامیده می‌شود که مجهز به بخاری و تهویه مطبوع است (Bhalchandra, 2011).

### ۳-۲-۸- سیستم کنترل گرد و غبار<sup>۲</sup>

خروج خرده‌ها و گرد و غبار ناشی از حفاری در حین عملیات ماشین‌های حفاری دورانی با استفاده از هوای فشرده انجام می‌شود. در صورتی که خرده‌های حفاری وارد هوای آزاد شوند، موجب آلودگی هوا می‌شوند. این آلودگی ایجاد شده برای سلامتی بسیار مضر بوده و میزان آن با جمع و افزایش گرد و غبار، افزایش می‌یابد. برای به حداقل رساندن این آلودگی‌ها، استفاده از سیستم کنترل گرد و غبار خصوصاً در دستگاه‌های دورانی به دلیل تولید حجم بسیار بالایی از ذرات ریز، ضرورت دارد (Bhalchandra, 2011). سیستم‌های کنترل مرطوب گرد و غبار از متداولترین سیستم‌های کنترل گرد و غبار است که در ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه مورد استفاده قرار گرفته و در ادامه توضیح داده شده است.

### ۳-۲-۸-۱- کنترل مرطوب گرد و غبار

این سیستم، افشانه آب یا فوم نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این سیستم در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. سیستم مرطوب جمع‌آوری گرد و غبار از یک پمپ آب و یک مخزن تشکیل شده که بر بدنه

<sup>1</sup> Machinery House

<sup>2</sup> Dost Control System

## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی با معدن مس سرچشمه

اصل ماشین حفاری نصب شده است. آب و یا کف توسط پمپ آب بر خطوط هوای فشرده پاشیده شده و با حرکت خود در خطوط هوای فشرده، پس از رسیدن به انتهای چال از روزنه میانی سرمته به سمت بالا جریان می‌یابد. ذرات خردایش یافته در هوای فشرده و با وجود رطوبت و کف به صورت یک محلول سوسپانسیون لخته می‌شوند که پس از خروج از چال در محفظه مکنده گرد و غبار جمع‌آوری می‌شوند. بدین ترتیب از ورود ذرات معلق به هوا جلوگیری می‌شود.



شکل ۳-۸- کنترل مرطوب گرد و غبار

### ۳-۳-۲-۹- مبدل و قرقره کابل<sup>۱</sup>

تمام دستگاه‌های حفاری الکتریکی دارای چندین موتور الکتریکی هستند که با ولتاژهای مختلف و با جریان‌های مستقیم و یا متناوب کار می‌کنند. منبع اصلی جریان برق موجود در معادن، جریان متناوب با ولتاژ بین ۴۱۶۰ تا ۶۶۰۰ ولت است. موتورهای جریان مستقیم عموماً با ۴۷۵ ولت و موتورهای با جریان متناوب با ولتاژ ۴۴۰ تا ۴۶۰ ولت کار می‌کنند. جریان متناوب با ۱۲۰ تا ۲۴۰ ولت نیز برای سیستم تهویه مطبوع و چراغ‌های روشنایی دستگاه لازم است. بنابراین تمام دستگاه‌های حفاری الکتریکی به یک یا دو مبدل جریان الکتریکی نیاز دارند. قرقره کابل همانطور که در شکل (۳-۹) نشان داده شده در قسمت انتهایی ماشین قرار می‌گیرد. وجود این وسیله در ماشین‌های الکتریکی کاملاً ضروری است. در حالی که در سایر ماشین‌ها به عنوان یک قطعه جانبی خواهد بود.

<sup>۱</sup> Transformer and Cable Reel

## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی: معدن مس سرشهر

قرقره کابل در ماشین‌های هیدرولیکی و الکتریکی به صورت خودکار عمل کرده و برق مورد نیاز دستگاه را در حین جابجایی آن از یک چال به چال دیگر، از منبع اصلی برق معدن به دستگاه منتقل می‌کند.



شکل ۳-۹- قرقره کابل

### ۳-۳-۳- تجهیزات دکل

تجهیزاتی که بر دکل حفاری نصب می‌شود، شامل موارد زیر است (Bhalchandra, 2011):

۱- دکل

۲- سیلندرهای بالابر دکل

۳- نردبان دکل<sup>۱</sup>

۴- تعویض کننده لوله<sup>۲</sup>

۵- تجهیزات مربوط به حفاری چال‌های زاویه‌دار

۶- سر چرخشی

۷- مکانیزم تغذیه<sup>۳</sup>

۸- وینچ کمکی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Mast Ladder

<sup>۲</sup> Pipe Changer

<sup>۳</sup> Feed Mechanism

۹- ابزار نگهدارنده دکل

۱۰- هم‌مرکز کننده<sup>۲</sup>

۱۱- تثبیت‌کننده<sup>۳</sup>

### ۳-۳-۱- دکل

دکل، مهمترین بخش یک دستگاه حفاری است. این بخش از دستگاه تمامی تنش‌های ناشی از حفاری را کنترل می‌کند. در انواع دستگاه‌های حفاری پیشرفته، عمده تغییرات اساسی در بخش دکل حفاری و سر چرخنده انجام شده است. بدنه دکل از لوله‌های فولادی با مقطع مربع یا مستطیل ساخته شده است. مقطع عرضی دکل به شکل مستطیل است. اما در برخی از دستگاه‌های حفاری به صورت مثلثی یا دوزنقه‌ای است.

### ۳-۳-۲- سیلندرهای بالابر و کابل‌های دکل

دکل توسط دو سیلندر هیدرولیک بالا و پایین می‌شود. در پیمودن مسافت‌های طولانی مثلاً فاصله بین دو پله، دکل پایین آورده می‌شود تا با تغییر مرکز جرم، دستگاه سریع‌تر جابه‌جا شود. برای مسافت‌های کوتاه مثلاً فاصله بین چال‌ها، برای صرفه‌جویی در وقت وضعیت قائم دکل تغییری نمی‌کند. برخی از دستگاه‌های حفاری برای حفر چال‌های عمیق با یک لوله حفاری (حفاری در یک مرحله) دکل‌های بسیار بلندی دارند. دکل‌های بسیار بلند برای تقویت خود به تجهیزات اضافی نیاز دارند. نگه‌دارنده‌های دکل عمدتاً به صورت هیدرولیکی کشیده شده و به صورت مکانیکی قفل می‌شوند. بنابراین برافراشتن دکل به صورت مطمئن و ایمنی انجام می‌شود. در استقرار زاویه‌دار دکل از سیلندرهای اضافی استفاده می‌شود (Bhalchandra, 2011). نمایی از سیلندرهای بالابر دکل در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Auxiliary Winch

<sup>2</sup> Centralizer

<sup>3</sup> Stabilizer



شکل ۳-۱۰- سیلندرهای بالابر دکل

### ۳-۳-۳-۳- تعویض کننده لوله

تعویض کننده لوله در اکثر موارد تحت عناوینی چون تعویض کننده لوله<sup>۱</sup> و کاروسل<sup>۲</sup> شناخته شده است. پس از حفر چال تا عمق مورد نظر، لازم است که لوله حفاری تعویض و جایگزین شود. به هر حال برای حفر چال‌های عمیق، لوله‌های حفاری متعددی استفاده می‌شود. برای این منظور، در بسیاری از ماشین‌های حفاری، میله‌های حفاری به صورت مکانیکی به یکدیگر متصل می‌شوند و به این ترتیب طول لوله حفاری افزایش می‌یابد. این مکانیزم، مکانیزم تعویض لوله نامیده می‌شود. تعویض کننده‌های لوله در ماشین‌های حفاری مختلف، متفاوت بوده و بیشتر از نوع تک لوله‌ای<sup>۳</sup> یا کاروسل است (Bhalchandra, 2011). تعویض کننده لوله در ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه از نوع کاروسل بوده که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۳-۳-۳-۳-۱- تعویض کننده کاروسل

این تعویض کننده بر عضوهای اصلی<sup>۴</sup> دکل در طرف مخالف کابین کنترل قرار گرفته است. در تعویض کننده‌های کاروسل همانطوری که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است، لوله‌های حفاری در

<sup>1</sup> Rod Changer

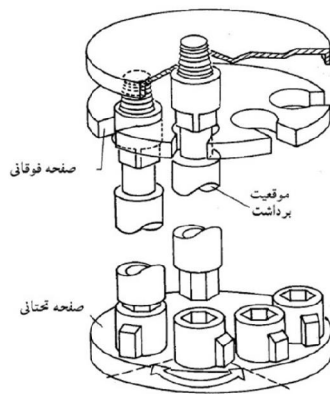
<sup>2</sup> Carousel

<sup>3</sup> Single Pipe

<sup>4</sup> Main Members

## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی: معدن مس سرشهر

محفظه دوک ماندنی ذخیره می‌شوند. که در قسمت بالا و پایین خود به ترتیب دارای دو و یک صفحه حفره‌دار است. پس از عبور لوله از شکاف صفحه میانی در حفره صفحه بالایی قرار می‌گیرد. هنگامی که لوله در بخش انتهایی دستگاه قرار می‌گیرد به کمک پلیت فوقانی به طرف بالا کشیده می‌شود. با توجه به کوچک بودن قطر لوله نسبت به قطر شکاف امکان بیرون آمدن لوله از شکاف وجود ندارد. بنابراین لوله در صفحه پایین پلیت فوقانی قفل می‌شود. صفحه بالایی پلیت فوقانی از بالا قابلیت باز شدن را دارد. لوله حفاری از طریق این مجرا به بیرون رانده می‌شود (Jimeno, 1995).



شکل ۳-۱۱- تعویض کننده لوله کاروسل (Jimeno, 1995)

مراحل افزودن لوله در ادامه آورده شده است (Bhalchandra, 2011):

- ۱- زمانی که حفاری چال توسط یک لوله حفاری به پایان می‌رسد، لازم است که لوله جدیدی اضافه شود. با استفاده از آچاری که در بخش پایین دکل قرار دارد، انتهای لوله حفاری باز می‌شود.
- ۲- سر چرخشی در جهت مخالف دوران کرده و لوله حفاری باز می‌شود. در برخی ماشین‌های حفاری این عمل توسط آچار هیدرولیکی انجام می‌شود.
- ۳- سر چرخشی به طرف بالا حرکت می‌کند.
- ۴- تعویض کننده کاروسل توسط سیلندر هیدرولیکی از موقعیت فعلی خود، به سمت مرکز دکل تغییر مکان می‌دهد.



## فصل سوم: ماشین‌های حفاری دورانی، مطالعه موردی؛ معدن مس سرچشمه

۵- صفحه زیرین پللیت بالایی کاروسل چرخیده و پللیت پایینی لوله حفاری را در راستای مورد نظر قرار می‌دهد. سپس لوله حفاری توسط آچار نگه داشته می‌شود.

۶- سر چرخنده به طرف پایین حرکت کرده و میله حفاری را به سمت راست می‌چرخاند. بنابراین لوله حفاری در کاروسل کوپل می‌گردد.

۷- سر چرخشی به آرامی به طرف بالا حرکت کرده و در موقعیتی قرار می‌گیرد که بخش شکاف انتهایی لوله در شکاف کاروسل قرار گیرد.

۸- پس از قرار گرفتن لوله در موقعیت مناسب، کاروسل به وضعیت قبلی خود (طرف چپ دکل) بر می‌گردد. در این حالت لوله اضافه شده در تراز اصلی خود قرار گرفته و تعویض‌کننده لوله نیز به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد. در برخی از چال‌های شیب‌دار لازم است که لوله جدید اضافه شده با استفاده از بازوی دیگری در تراز مناسب قرار گیرد.

۹- سر چرخشی به لوله جدید کوپل شده و سپس به طرف پایین حرکت می‌کند. زمانی که سر چرخشی به طرف راست چرخیده می‌شود، لوله جدید اضافه شده به لوله قبل، کوپل شده و آچار در موقعیت مناسب قرار می‌گیرد.

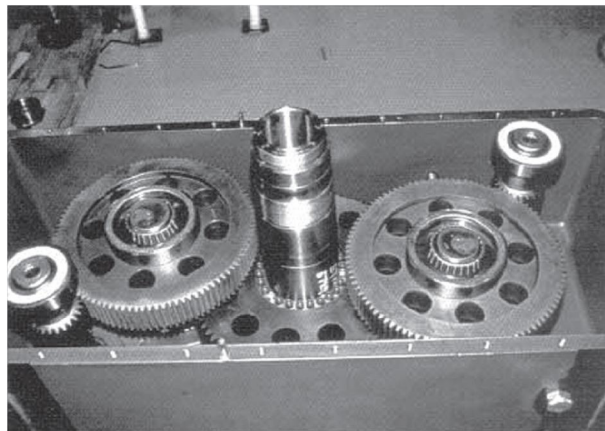
۱۰- آچار به محل قبلی خود باز می‌گردد. در این حالت امکان چرخش آزادانه لوله حفاری و آغاز مجدد حفاری فراهم می‌آید.

گام‌هایی که در بالا برشمرده شد، به طور متناوب تکرار شد و حفاری ادامه می‌یابد. مکانیزم یاد شده، فرآیند ساده‌ای است اما مستلزم دقت زیادی است. زیرا کوچکترین انحراف، مشکلات جبران‌ناپذیری را به بار می‌آورد. این مشکلات در حفاری‌های زاویه‌دار اهمیت بیشتری دارند. افزودن تعداد زیادی لوله حفاری، از مزایای استفاده از این سیستم تعویض لوله است.

### ۳-۳-۴- سر چرخشی

سر چرخشی، قطعات مربوط به حفاری چال را به گردش درآورده و نیروی تغذیه پشت سرمته را نیز تامین می‌کند. در ماشین‌های حفاری دورانی، سر چرخشی به صورت جعبه‌ای است که متشکل از

چندین چرخ‌دنده فولادی است. نیروی لازم برای دوران این قطعه از دو موتور هیدرولیکی تامین می‌شود. چرخش چرخ‌دنده‌ها، خورشیدی اصلی را با سرعتی پایین و گشتاوری بالا به دوران درمی‌آورد. میله حفاری در قسمت پایین و در انتهای خورشیدی قرار گرفته است. نمای داخلی از یک سر چرخشی همراه با چرخ‌دنده‌های انتقال قدرت در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است (Bhalchandra, 2011).

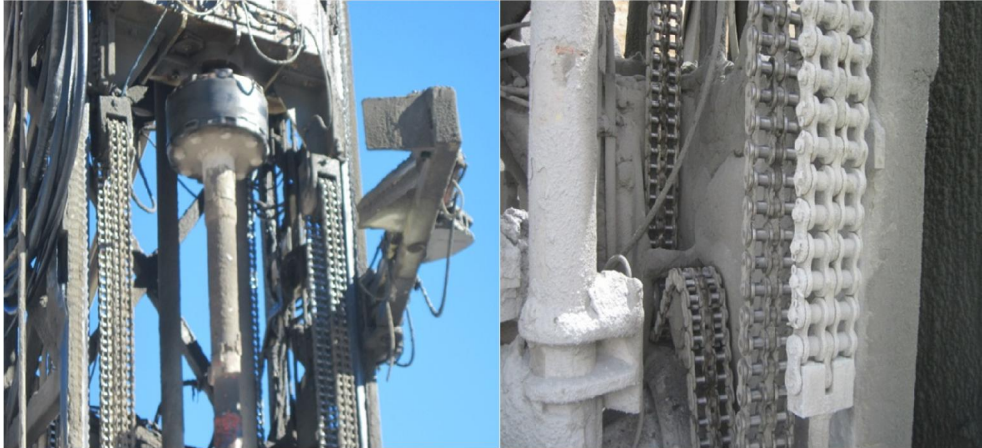


شکل ۳-۱۲- نمای داخلی از سر چرخشی

### ۳-۳-۳-۵- مکانیزم تغذیه<sup>۱</sup>

این مکانیزم در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است. در این مکانیزم، دو چرخ دندانه‌دار در قسمت بالایی عضوهای اصلی دکل به یکدیگر جوش داده شده است. هر دو چرخ دندانه‌دار از بالا تا پایین دکل کشیده شده و سرچرخنده بین این دو چرخ بالا یا پایین می‌رود. چهار خورشیدی در این مکانیزم وجود دارد که با چرخ دندانه‌دار در تماس هستند که توسط یک موتور هیدرولیکی می‌چرخند. با چرخیدن این خورشیدی‌ها، سر چرخنده به طرف بالا یا پایین حرکت می‌کند. زنجیر از مقاومت و عمر بالایی برخوردار است. اما سختی خورشیدی‌ها پایین بوده و ممکن است در مدت زمان طولانی تغییر حالت دهند. این مکانیزم در چالزهای با دکل بلند قابل استفاده است (Bhalchandra, 2011).

<sup>1</sup> Feed Mechanism



شکل ۳-۱۳- تغذیه با چرخ دندانه‌دار همراه با زنجیر

### ۳-۳-۳-۶- وینچ کمکی

تقریباً تمام تجهیزات جانبی که در دستگاه‌های حفاری استفاده می‌شوند، سنگین بوده و به سختی جابجا می‌شوند. به همین دلیل تقریباً تمام ماشین‌های چالزنی مجهز به یک قرقره (وینچ) کمکی و کابل هستند. قرقره نیروی خود را از یک جعبه دنده که خود توسط یک موتور هیدرولیکی عمل می‌کند، دریافت می‌کند. وینچ می‌تواند به بدنه اصلی و قسمت پایینی دکل متصل باشد. بسته به اندازه دکل و وزن قطعات جانبی، نیروی کششی وینچ از ۱۵ تا ۵۰ کیلو نیوتن متغیر است. قطر و عرض طبلک وینچ به قطر و طول کابل بستگی داشته و چرخش طبلک نیز به ارتفاع دکل و حداکثر نیروی کششی وینچ بستگی دارد.

### ۳-۳-۳-۷- هم‌مرکز کننده<sup>۱</sup>

این قطعه در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده و از یک بازو که در ارتفاع میانی قرار گرفته، تشکیل شده است. در ماشین‌های حفاری، به دلیل قطر کم لوله حفاری، لوله حفاری در قسمت‌های میانی تمایل به خم شدن دارد. این پدیده در مورد حفاری‌های جهت‌دار بسیار شدیدتر است. خمیدگی لوله حفاری مشکلات بسیار زیادی را در جریان حفاری بوجود می‌آورد. این امر احتمال آسیب‌های وارد بر لوله

<sup>۱</sup> Centralizer

حفاری و حتی پارگی کابل را افزایش می‌دهد. استفاده از هم‌مرکز کننده، لوله حفاری را در راستای محور حفاری قرار داده و از احتمال پارگی کابل و آسیب‌های وارد بر لوله می‌کاهد.



شکل ۳-۱۴- هم‌مرکز کننده

### ۳-۳-۳-۸- تثبیت کننده<sup>۱</sup>

در صورتی که عمق چال کم باشد، شکل چال به صورت یکنواخت نخواهد بود و این عامل به حفره‌ها، ترک‌ها و مقاومت فشاری سنگ بستگی دارد. دلایل عمده انحراف چال در ادامه آورده شده است (Bhalchandra, 2011):

- ۱- نامناسب بودن نری و مادگی در قسمت اتصال لوله‌های حفاری
- ۲- نازک بودن بیش از حد لوله حفاری
- ۳- زیاد بودن فضای خالی بین لوله حفاری و دیواره چال که با اعمال نیروی زیاد بر لوله حفاری موجب خمیدگی آن خواهد شد.
- ۴- لرزش ناشی از عدم تعادل بین اجزای حفاری
- ۵- طولی که در برابر انحراف چال به طور مؤثری مقاومت دارد، حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر طول سرمته باشد.

<sup>1</sup> Stabilizer

به منظور کاهش انحرافات در حفاری‌های دورانی از تثبیت‌کننده‌ها استفاده می‌شود. نمایی از یک تثبیت‌کننده در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. تثبیت‌کننده دقیقاً بالای سرمته نصب می‌شود. با توجه به این‌که قطر خارجی تثبیت‌کننده اندکی از قطر سرمته کم‌تر است، تثبیت‌کننده و تجهیزات کمکی آن، از جنس صلب و مقاومی خواهد بود. به همین دلیل طول بخشی از چال که در برابر انحرافات مقاومت می‌کند، طول بزرگتری خواهد بود. جنس تثبیت‌کننده در بیشتر موارد از آلیاژهای سری ANSI 4145H یا فولاد غیرمغناطیس است. تثبیت‌کننده‌های دکمه‌ای تعویض پذیر<sup>۱</sup>، تثبیت‌کننده‌هایی تیغه‌ای جوش کاری شده<sup>۲</sup> و تثبیت‌کننده‌های غلتکی<sup>۳</sup> نمونه‌هایی از تثبیت‌کننده‌ها هستند (Bhalchandra, 2011).



شکل ۳-۱۵- تثبیت‌کننده

### ۳-۳-۳-۹- ضربه‌گیر<sup>۴</sup>

با قرار گرفتن سرمته در نواحی خردایش یافته و در مناطق شکاف‌دار، احتمال انحراف چال و خارج شده سرمته از راستای اصلی خود افزایش می‌یابد. در این حالت امواج ضربه‌ای زیادی در طول رشته

<sup>1</sup> Replaceable Sleeve Stabilizer

<sup>2</sup> Welded Blade Stabilizer

<sup>3</sup> Roller Stabilizer

<sup>4</sup> Shock Absorber

حفاری بوجود آمده که عمدتاً به دلیل افزایش در نیروی تغذیه و گشتاور خواهد بود. این امواج در ماشین‌های حفاری دورانی با سرمته‌های سه مخروطی بیشتر خواهد بود.

ضربه‌گیرها قطعاتی هستند که انتقال امواج ضربه به سرچرخشی و دیگر اجزای حفاری را کاهش می‌دهند. مزایای استفاده از ضربه‌گیرها در ادامه آورده شده است (Bhalchandra, 2011):

۱- افزایش عمر اجزای چرخشی به دلیل کاهش امواج ضربه‌ای

۲- افزایش نرخ نفوذ سرمته

۳- کاهش در میزان تعمیرات و نگهداری

۴- افزایش در عمر لوله حفاری و سرمته به دلیل کاهش در میزان ارتعاشات

۵- امکان استفاده از سرمته‌های سنگین‌تر با سرعت دورانی بالاتر به منظور افزایش نرخ نفوذ

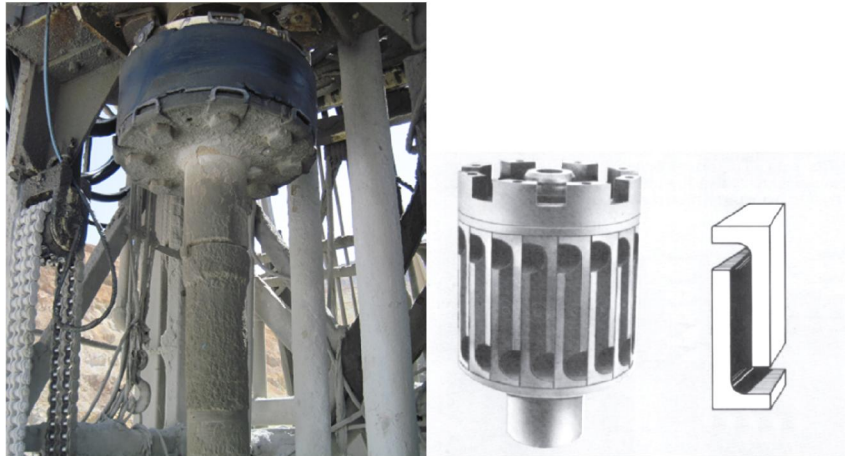
۶- کاهش در میزان سر و صدا

ضربه‌گیر خارجی<sup>۱</sup> و ضربه‌گیر درون چال<sup>۲</sup> دو نمونه از ضربه‌گیرها هستند. ضربه‌گیرهای داخلی در انتهای چال و در پشت سرمته قرار می‌گیرند که عمدتاً در حفاری چاه‌های نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه ضربه‌گیرهای خارجی مورد بحث قرار گرفته است.

این ضربه‌گیر دقیقاً در زیر سرچرخشی قرار می‌گیرد و همانطوری که در شکل (۳-۱۶) نشان داده شده است، از قطعات لاستیکی تشکیل شده است. در این نوع ضربه‌گیر، ضربات محوری ناشی از تنش‌ها و کرنش‌های محوری ایجاد شده در حین حفاری، در قطعات لاستیکی جذب و توسعه می‌یابد. به منظور جذب ضربات عمود بر محور حفاری، قطعات لاستیکی تحت تنش و کشش‌های فشاری قرار می‌گیرند. این قطعات لاستیکی در صورت آسیب دیدن، کارایی خود را از دست نداده و پس از اتمام حفاری قابل تعویض هستند. این قطعات قادر به جذب هر چهار نوع ضربه ایجاد شده هستند.

<sup>1</sup> External Shock Absorber

<sup>2</sup> In The Hole Shock Absorber



شکل ۳-۱۶- ضربه‌گیر خارجی

### ۳-۳-۴- اقلام خاص<sup>۱</sup>

برخی از قطعات ماشین‌های حفاری در موارد خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسیاری از این قطعات با عناوین مختلفی شناخته شده که در ادامه به معرفی برخی از آنها پرداخته شده است (Bhalchandra, 2011):

### ۳-۳-۴-۱- شناساگر عمق<sup>۲</sup>

ماشین‌های موجود در معدن مس سرچشمه به سیستم حفاری کامپیوتری، مجهز نیستند. با این وجود دارای نمایشگرهای عددی عمق چال هستند. این نمایش عددی قضاوت در مورد بخش حفاری ماشین را با نظارت و تجربیات کاری امکان‌پذیر می‌سازد. بسیاری از دستگاه‌های حفاری امروزی، به جای استفاده از سیستم مکانیکی کابلی و اندازه‌گیری موقعیت سر حفار در دکل، به شناساگرهای الکترونیکی که عمق حفاری را پس از افزودن میله حفاری جدید نیز برآورد می‌کند، مجهز هستند.

<sup>1</sup> Special Purpose Items

<sup>2</sup> Deep Indicator

### ۳-۳-۲- تهویه مطبوع<sup>۱</sup>

کابین اپراتور و محفظه ماشین در اکثر موارد به سیستم تهویه مطبوع مجهز است. این سیستم یکی از انواع سیستم‌های تهویه مطبوع است که در اتوبوس‌های مسافربری استفاده می‌شود. منبع الکتریکی مورد نیاز در سیستم‌های تهویه مطبوع در ماشین‌های الکتریکی به کمک یک ترانسفورماتور تامین می‌شود.

### ۳-۳-۳- بخاری‌ها<sup>۲</sup>

در شرایطی که دستگاه حفاری در آب و هوای سرد کار می‌کند، مجهز بودن آن به بخاری ضرورت دارد. علاوه بر کابین اپراتور و محفظه ماشین، جعبه دنده سر چرخشی و موتور پیش‌رانش نیز به بخاری مجهز است. بخاری بیشتر از نوع مادون قرمز<sup>۳</sup> یا سیم‌پیچ<sup>۴</sup> است. در اکثر موارد، به عنوان مثال در کابین اپراتور، محفظه ماشین، فضای بسته مربوط به جعبه دنده‌ها و ...، در نزدیکی بخاری یک پنکه تعبیه شده که جریان هوای گرم را به فضای اطراف پراکنده می‌کند.

### ۳-۳-۵- تجهیزات مربوط به شرایط دمایی بسیار سرد<sup>۵</sup>

در مناطق مرتفع و شرایط دمایی بسیار سرد، عمدتاً از تجهیزاتی که در ادامه آورده شده است، استفاده می‌شود.

### ۳-۳-۱- بخاری محفظه ماشین<sup>۶</sup>

تجهیز نمودن محفظه ماشین به بخاری برای گرم کردن هوای فضای محفظه، خصوصاً در شرایط هوای سرد و مناطق مرتفع، ضرورت دارد. این بخاری در بیشتر موارد از نوع سیم‌پیچ و یا القایی بوده و دارای

<sup>1</sup> Air Conditioner

<sup>2</sup> Heaters

<sup>3</sup> Infrared

<sup>4</sup> Coil

<sup>5</sup> Extreme Cold Operation Devices

<sup>6</sup> Machinery House Heater



یک پنکه برای پخش جریان هوا به اطراف است. بسته به دمای هوا و اندازه محفظه، توان باطری این بخاری‌ها می‌تواند تا ۵۰ کیلووات باشد.

### ۳-۳-۲- بخاری کابین اپراتور<sup>۱</sup>

کابین اپراتور ماشین‌های حفاری مجهز به بخاری است. در بیشتر موارد بیش از یک بخاری در کابین اپراتور وجود دارد. نرخ مصرف انرژی هر یک از بخاری‌های اضافی می‌تواند تا ۱۰ کیلووات هم باشد. این بخاری‌ها در تابستان و یا شرایط آب و هوایی مساعد استفاده نمی‌شوند. با توجه به اینکه بخاری کابین اپراتور نسبت به سایر بخاری‌ها گران‌تر است، تنها در موارد معدودی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۳-۳- سایر بخاری‌ها<sup>۲</sup>

علاوه بر موارد ذکر شده، تجهیزات بسیار زیاد دیگری در ماشین‌های حفاری وجود دارند که آب و روغن در آن‌ها جریان دارد. این تجهیزات در محفظه ماشین قرار ندارند با این وجود در شرایط نه چندان سرد، عایق‌کاری آن‌ها مؤثر خواهد بود. اما در شرایط بسیار سرد، استفاده از بخاری یا محفظه‌ای سر پوشیده، ضرورت دارد. برخی از این تجهیزات در ادامه آورده شده است:

- مخزن آب<sup>۳</sup>

- مخزن روغن هیدرولیک<sup>۴</sup>

- جعبه دنده موتور رانشی<sup>۵</sup>

- سر چرخشی

---

<sup>1</sup> Operator Cab Heater

<sup>2</sup> Other Enclosure and Heater

<sup>3</sup> Water Tank

<sup>4</sup> Hydraulic Oil Tank

<sup>5</sup> Propel Gear Case

### ۳-۴- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی قسمت‌های مختلف ماشین‌های حفاری دورانی با تکیه بر ماشین‌های معدن موجود در مس سرچشمه، پرداخته شد. شناخت کافی و صحیح از بخش‌های مختلف یک ماشین، زمینه را برای بررسی و تعیین زیرسیستم‌های آن که مهم‌ترین گام در تحلیل قابلیت اطمینان ماشین است، فراهم می‌آورد. در فصل بعد، زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری دورانی، برای اولین بار، تعیین و مورد بحث قرار گرفته است.

فصل چهارم:

زیر سیستم های ماشین حفاری دورانی؛

معدن مس سرچشمه

#### ۴-۱- مقدمه

تعیین زیرسیستم‌های عملیاتی یک ماشین مرحله مهمی از مطالعه قابلیت اطمینان آن است. تعیین زیرسیستم‌های یک ماشین به ویژه ماشین‌های پیچیده، نیازمند شناخت کامل بخش‌های مختلف، تسلط کامل بر طراحی دستگاه، آشنایی با نحوه عملکرد نهایی دستگاه و نیز شناخت روابط درونی بخش‌های مختلف آن است. علاوه بر اهمیت تعیین زیرسیستم‌های مناسب در تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد ماشین‌ها، تعمیر، نگهداری و مدیریت آن‌ها نیز به شدت به نحوه تعیین زیرسیستم‌ها وابسته است. لذا، تعیین مناسب و دقیق زیرسیستم‌ها، زمینه‌ساز تحلیل و مدیریت مناسب ماشین می‌باشد. در این فصل، با توجه به مطالب ارائه شده در فصل گذشته، به ارائه زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین‌های حفاری دورانی پرداخته شده است.

#### ۴-۲- مشخصات فنی ماشین‌های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه

مجتمع معدنی مس سرچشمه دارای چهار دستگاه حفاری دورانی بوده که با کدهای ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ نامگذاری شده‌اند. ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۳ محصول سال ۱۹۷۵ شرکت Busyrus، و ماشین‌های ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ محصول سال ۱۹۹۲ شرکت Ingersoll-Rand هستند. مشخصات فنی ماشین‌های ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ که از جدیدترین ماشین‌های حفاری معدن هستند، در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات فنی ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

مشخصات فنی		موتور الکتریکی اصلی	
۲۰۰	حداکثر سرعت دورانی سرمه (RPM)	۶۶۰۰±/۱۰	ولتاژ (V)
۱/۶	حداکثر سرعت در زمین هموار (Km/h)	۱۵۰±/۵	فرکانس (Hz)
۱/۶	حداکثر سرعت در شیب ۳۰ درجه (Km/h)	۳	تعداد فاز
۳۰	حداکثر شیب حرکت (٪)	۴	تعداد قطب
	ابعاد	۱/۱۵	ضریب نگهداری
۸۸	طول (Ft)	۶۰۰	قدرت (HP)
۲۶/۳	ارتفاع در حالت خوابیده بودن دکل (Ft)	۱۵۰۰	سرعت (RPM)
۱۰۱	ارتفاع در حالت بالا بودن دکل (Ft)	۱۶	کوپلینگ جعبه دنده (Ft.lbs)
۲۴/۳	عرض (Ft)	۹۰۰	حداکثر ارتفاع کاری (Ft)
۱۱/۶	فاصله داخلی بین شنی‌ها (Ft)	۱۶- تا ۵۶	محدوده درجه حرارت کاری (°C)
۱۷	فاصله خارجی بین شنی‌ها (Ft)		موتور استارت
۱۶	طول شنی (Ft)	۷۲۰۰	ولتاژ (V)
	پمپ‌های هیدرولیکی	۶۰-۵۰	فرکانس (Hz)

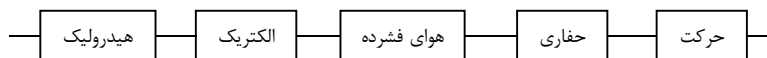
ادامه جدول ۱-۴

		۳	تعداد فاز
۵	تعداد پمپ های هیدرولیکی	۳۶۰۰	حداکثر ارتفاع کاری (Ft)
۳۰۰۰	حداکثر فشار پشت منته (Psi)	۲۰ تا ۱۲۵	محدوده درجه حرارت کاری (°F)
۴۰۰	حداکثر فشار خطوط هیدرولیک (Psi)		کمپرسور
۳۲۰۰-۳۰۰۰	سرعت دورانی موتور هیدرولیکی غبارگیر (RPM)	۱۱۵۰-۲۴۰۰	ظرفیت کمپرسور اسکرو (CFM)
۵۰-۴۰	فشار پمپ آب (Psi)	۱۱۰	فشار هوای فشرده (Psi <sub>g</sub> )
		۴۰۰	حداکثر فشار خطوط هوای فشرده (Psi)

#### ۴-۳- زیرسیستم های ماشین های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه

تمامی ماشین آلات معدنی و راهسازی عموماً دارای ساختارهای مشابه و طراحی های یکسانی بوده و تفاوت های آن ها معمولاً به توان عملیاتی و ظرفیت تولید مربوط می شود. لذا، زیرسیستم ها و شبکه قابلیت اطمینان تعریف شده برای یک دستگاه خاص مثل لودرهای معدنی، عمومیت کلی خود را حفظ نموده و برای انواع مختلف آن دستگاه با ابعاد و توان تولید مختلف، کارآیی دارد.

در تعریف زیرسیستم های یک ماشین معمولاً سعی می شود تا با کمترین تعداد زیرسیستم، بهترین ارزیابی حاصل شود. در این مطالعه با استفاده از کاتالوگ ها و نقشه های فنی موجود ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه مطالعه جامعی بر روی ساختار عملیاتی این ماشین ها انجام گردیده و با تکیه بر جمع آوری اطلاعات و بازدیدهای صحرائی و مشاوره با مهندسين مکانیک و مکانیک های معدن، زیرسیستم های عملیاتی ماشین از میان اجزای پیچیده دستگاه تعریف شده است. در نهایت در این تحقیق، برای اولین بار پنج زیرسیستم، هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت، برای ماشین های حفاری هیدرولیکی-الکتریک تعریف شده که برای تمامی ماشین های مشابه موجود در بازار قابل استفاده است. با توجه به اینکه هر گونه خرابی در زیرسیستم های ماشین های حفاری باعث توقف ماشین و قطع عملیات می شود، لذا شبکه قابلیت اطمینان ماشین، به صورت سری در نظر گرفته شده و در شکل (۱-۴) آورده شده است. در ادامه به معرفی هر یک از زیرسیستم ها پرداخته شده است.

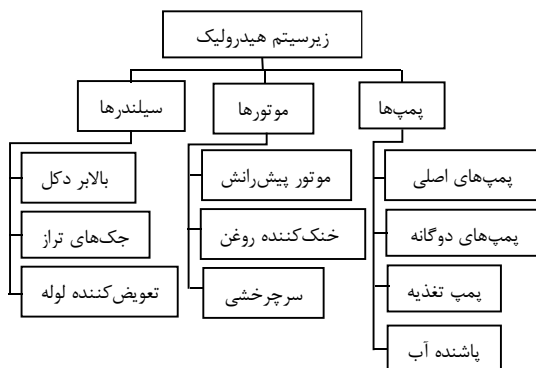


شکل ۱-۴- ارتباط بین زیرسیستم های ماشین حفاری

#### ۴-۳-۱- زیرسیستم هیدرولیک

زیرسیستم هیدرولیک یکی از مهم‌ترین زیرسیستم‌های ماشین‌آلات و دستگاه‌های متحرک پیشرفته در اکثر صنایع به شمار می‌آید. در ماشین‌آلات معدنی و راه‌سازی نیز زیرسیستم هیدرولیک از جایگاه ویژه و تعیین‌کننده‌ای برخوردار است. اکثر عملیات بارگیری و تخلیه در ماشین‌آلات معدنی توسط زیرسیستم هیدرولیک مدیریت می‌شود.

اجزای اصلی زیرسیستم هیدرولیک ماشین‌های حفاری موجود در معدن مس سرچشمه در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری دورانی

ماشین‌های حفاری موجود در معدن مس سرچشمه دارای پنج پمپ هیدرولیکی هستند: پمپ‌های اصلی<sup>۱</sup> (دو عدد)، پمپ‌های دوگانه<sup>۲</sup> (دو عدد) و پمپ تغذیه<sup>۳</sup> (یک عدد). انرژی هر یک از پمپ‌های هیدرولیکی از طریق موتور الکتریکی اصلی ماشین تامین می‌شود. دوران لوله حفاری، تامین قدرت موتور محرک شنی سمت چپ و نیروی لازم در بالا و پایین بردن جک‌های تراز، توسط پمپ‌های اصلی ماشین تامین می‌شود. پمپ تغذیه وظیفه تامین نیروی تغذیه میله حفاری و موتور محرک شنی سمت راست را برعهده دارند. پمپ‌های دوگانه نیز وظیفه تامین نیروی لازم برای بالا و پایین بردن دکل، چرخش کاروسل، چرخش و توقف قرقره کابل، خنک‌کننده هیدرولیکی روغن، پمپ پاشش آب، پمپ پاشش روغن، قرقره کمکی، فن

<sup>1</sup> Main Hydraulic Pump

<sup>2</sup> Double Pumps

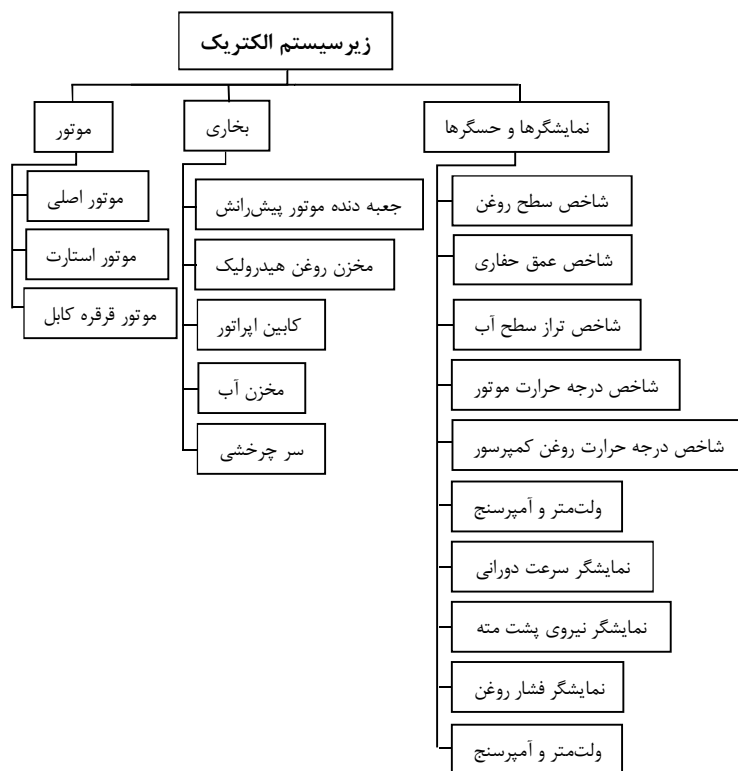
<sup>3</sup> Feed Pumps

## فصل چهارم: زیر سیستم های ماشین حفاری دورانی؛ معدن مس سرچشمه

رادیاتور روغن و دیگر تجهیزات کمکی را برعهده دارند. وظایف یاد شده برای پمپ های دوگانه، عمدتاً توسط پمپ اصلی ماشین انجام می شود و پمپ های دوگانه به عنوان پمپ کمکی وارد زیرسیستم هیدرولیک دستگاه می شوند. نکته جالب توجه در مورد موتور هیدرولیک شنی و موتور هیدرولیک سرچرخشی آن است که با توقف ماشین، جریان هیدرولیک در خطوط موتور پیش رانش شنی قطع شده و همزمان با قطع این جریان، خطوط هیدرولیک موتور سرچرخشی فعال می شوند. به عبارت دیگر، مسیر هیدرولیک این دو موتور یکی بوده و امکان عملکرد سرچرخشی و موتور پیش رانش شنی توأم با یکدیگر وجود ندارد. از دیگر موتورهای هیدرولیکی دستگاه می توان به موتور خنک کننده روغن هیدرولیک کمپرسور که متشکل از یک پمپ هیدرولیکی و خطوط انتقال جریان هیدرولیک است، موتور پمپ آب و موتور مکنده گرد و غبار اشاره کرد.

### ۴-۳-۲- زیرسیستم الکتریک

امروزه انرژی الکتریکی تقریباً در تمام ماشین های معدنی و عمرانی مورد استفاده قرار می گیرد. زیرسیستم الکتریک حیاتی ترین زیرسیستم در هر ماشین الکتریکی بوده که در حقیقت محرک اصلی پمپ ها، موتورها و حتی تجهیزات هیدرولیکی آن است. ماشین های حفاری موجود در معدن مس سرچشمه از نوع الکتریکی - هیدرولیکی هستند. واژه اول به معنای منبع تولید انرژی و واژه دوم به معنای منبع توزیع انرژی است. بنابراین زیرسیستم الکتریک منبع اصلی تولید انرژی در این ماشین ها است. زیرسیستم الکتریک متشکل از یک موتور الکتریک اصلی است که برق مورد نیاز آن از شبکه اصلی برق معدن تامین می شود. موتور الکتریکی اصلی دستگاه از یک طرف به کمپرسور کوپل بوده و طرف دیگر نیز به پمپ های هیدرولیکی کوپل شده است و انرژی مورد نیاز برای تحرک آن ها را فراهم می آورد. علاوه بر این، برق شبکه اصلی معدن با عبور از یک مبدل جریان الکتریکی به ولتاژهای پایین تر رسیده و انرژی الکتریکی سایر قسمت های ماشین را از جمله، فن کابین اپراتور، تهویه مطبوع و روشنایی کابین اپراتور و محفظه ماشین را تامین می کند. اجزای اصلی زیرسیستم الکتریک دستگاه در شکل (۴-۳) آورده شده است.



شکل ۴-۳- زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری دورانی

#### ۴-۳-۳- زیرسیستم هوای فشرده

در یک حفاری کارآمد لازم است که انتهای چال همواره تمیز نگه داشته شود. این کار با خروج خرده‌های حفاری (فلاشینگ)، بلافاصله پس از تشکیل آن‌ها انجام گیرد. در غیر این صورت مقدار قابل توجهی از انرژی، صرف خردایش مجدد این قطعات شده و در نهایت با سایش سرمته، نرخ نفوذ آن به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در بسیاری از ماشین‌های حفاری دورانی، روغن‌کاری خودکار بخش‌های مختلف ماشین به کمک پمپاژ پنوماتیکی روغن انجام می‌گیرد. در ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه، هوای فشرده لازم برای خروج خرده‌های حفاری، توسط یک کمپرسور اصلی تامین می‌شود. کمپرسور اصلی از نوع اسکرو بوده و نیروی لازم برای به کار انداختن آن از موتور الکتریکی اصلی دستگاه تامین می‌شود. در این نوع کمپرسورها، عمل تراکم بین دو حلزونی و در مرحله درهم‌رفتگی صورت می‌گیرد. نمایی از این روتورها در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. روتورها در اصطلاح به دو شکل نری و مادگی ساخته می‌شوند. روتور نری

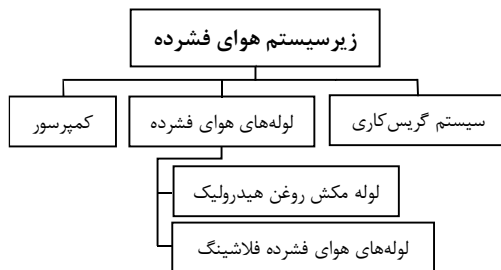


## فصل چهارم: زیرسیستم های ماشین حفاری دورانی؛ معدن مس سرچشمه

دارای گوشواره محدب و روتور مادگی به صورت معقر است. نحوه کار این نوع کمپرسورها به این صورت است که در مرحله مکش، هوا وارد فضای مقعر روتور هلزون مادگی شده و آن را پر می کند. در مرحله تراکم، قسمت محدب روتور نری، فضای تقعر روتور مادگی را پر کرده و با کاهش حجم هوای جمع شده در آن، فشار هوا را افزایش می دهد. با بیشتر شدن فشار هوا از فشار خط دهش، هوای متراکم شده به سمت لوله دهش رانده شده و عمل تخلیه انجام می شود. با تکرار این فرایند، عمل تراکم به طور پیوسته انجام می شود. اجزای اصلی زیرسیستم هوای فشرده ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه را می توان به صورت شکل (۴-۵) نشان داد.



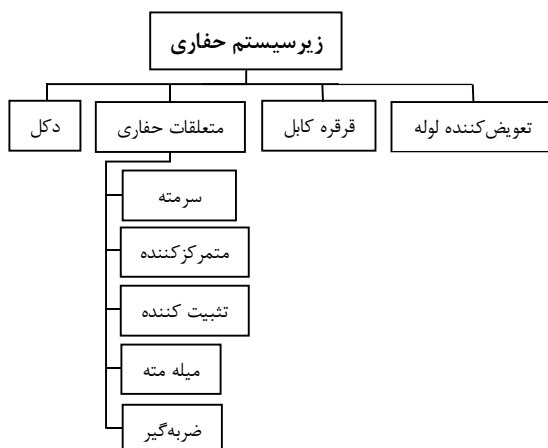
شکل ۴-۴- کمپرسور اسکرو در ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۴-۵- زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری دورانی

#### ۴-۳-۴- زیرسیستم حفاری

با توجه به اینکه، سرمته، میله مته و سایر متعلقات حفاری در ارتباط مستقیم با حفاری چال هستند، زیرسیستم حفاری مهم ترین زیرسیستم در هر ماشین حفاری است. اجزای اصلی این زیرسیستم در شکل (۴-۶) نشان داده شده که به طور مفصل در بخش (۳-۳-۳) مورد بحث قرار گرفت.



شکل ۴-۶- زیرسیستم حفاری ماشین حفاری

#### ۴-۳-۵- زیرسیستم حرکت

زیرسیستم حرکت ماشین های حفاری، وظیفه اصلی جابجایی دستگاه را بر عهده داشته و تمامی بدنه ماشین بر روی این بخش قرار می گیرد. این زیرسیستم در دو نوع چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری است که هر چهار ماشین حفاری دورانی معدن مس سرچشمه به چرخ زنجیری مجهز هستند. زیرسیستم حرکت با چرخ زنجیری از دو شنی تشکیل شده که هر شنی دارای یک موتور پیش رانش هیدرولیکی هستند. موتور

## فصل چهارم: زیرسیستم های ماشین حفاری دورانی؛ معدن مس سرچشمه

پیش رانش نیروی لازم برای چرخش خورشیدی بزرگ تامبلر را فراهم می آورد. خورشیدی تامبلر در ارتباط مستقیم با کفشک ها بوده و با حرکت خود، سایر خورشیدی های هرزگرد در قسمت های بالا و پایین شنی و در نهایت کل ماشین را به حرکت می کنند. بخش های اصلی این زیرسیستم در بخش (۳-۳-۱) ارائه و بررسی شده است.

### ۴-۴- جمع بندی

تعیین زیرسیستم های عملیاتی یک دستگاه مهم ترین مرحله از مطالعه قابلیت اطمینان آن است. علاوه بر اهمیت تعیین زیرسیستم های مناسب در تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد دستگاه، تعمیر، نگهداری و مدیریت ماشین آلات نیز به شدت به نحوه تعیین زیرسیستم های آن ها وابسته است. در این فصل، به ارائه زیرسیستم های عملیاتی ماشین های حفاری دورانی معدن مس سرچشمه پرداخته شد. ماشین های حفاری الکتریکی- هیدرولیکی، به پنج زیرسیستم هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت قابل تفکیک بوده که در این فصل به تشریح هر یک از آن ها پرداخته شد.

# فصل پنجم:

مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های

حفاری و ناوگان حفاری معدن مس

سرچشمه

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

### ۵-۱- مقدمه

در فصل سوم به معرفی زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری پرداخته شد. در این فصل پس از بررسی داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها و با بهره‌گیری از روش‌های آماری، به مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه پرداخته شده است. سپس، با توجه به ارتباط بین زیرسیستم‌ها، مدل قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری و در نهایت ناوگان حفاری معدن ارائه و بحث شده است.

### ۵-۲- داده‌های خرابی ماشین

داده‌های خرابی مهم‌ترین ابزار در تحلیل قابلیت اطمینان هستند. در این تحقیق، از اطلاعات خرابی موجود در تعمیرگاه معدن به مدت ۲۰ ماه، از فروردین‌ماه ۱۳۸۸ تا آبان‌ماه ۱۳۹۰، استفاده شده است. نمونه‌ای از فرم جمع‌آوری داده‌های خرابی در شکل (۵-۱) آورده شده است.

شماره	عیب	دپارتمان	نوع دستگاه	ملاحظات	شیفت	گروه	تاریخ ورود	ساعت ورود	تاریخ خروج	ساعت خروج
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از تسمه کمربرسور	مکانیک	دریل	تسمه افتاده	A	۲	۸۸/۱۰/۰۱	۱۰:۲۰	۸۸/۱۰/۰۲	۱۱:۱۵
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از قطعی برقی	برقی شاول	دریل		A	۱	۸۸/۱۰/۰۲	۱۲:۴۰	۸۸/۱۰/۰۲	۱۲:۴۵
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از راد ساپورت	مکانیک	دریل	چک راد ساپورت شکسته	A	۱	۸۸/۱۰/۰۳	۱۴:۵۵	۸۸/۱۰/۰۶	۱۵:۲۰
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از کمربرسور	مکانیک	دریل	لشکال دارد	B	۲	۸۸/۱۰/۰۳	۱۷:۱۵	۸۸/۱۰/۰۶	۹:۰۰
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از پاورهد	برقی شاول	دریل	دور روژوری قط	B	۱	۸۸/۱۰/۰۵	۱۶:۲۰	۸۸/۱۰/۰۵	۱۷:۰۰
۲۱۰۶	جوشکاری	جوشکاری	دریل	جوش کاری استایلیزر	B	ب	۸۸/۱۰/۰۵	۲۲:۳۰	۸۸/۱۰/۰۶	۱۰:۰۰
۲۱۰۷	بررسی و رفع عیب از پاورهد	مکانیک	دریل	پاورهد اب روغن قاطی کرده	A	۲	۸۸/۱۰/۰۶	۸:۲۰	۸۸/۱۰/۰۶	۹:۰۰
۲۱۰۶	جوشکاری	جوشکاری	دریل	جوشکاری استایلیزر	A	۲	۸۸/۱۰/۰۷	۹:۰۰	۸۸/۱۰/۰۷	۱۴:۳۵
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از پاورهد	مکانیک	دریل	لشکال پینین پاورهد	A	۲	۸۸/۱۰/۰۷	۱۲:۳۰	۸۸/۱۰/۱۵	۱۵:۱۵
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از پاورهد	مکانیک	دریل	اب روغن قاطی کرده	A	۱	۸۸/۱۰/۰۸	۱۱:۱۵	۸۸/۱۰/۰۹	۱۰:۴۵
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از رادیاتور	مکانیک	دریل	آبریزی دارد	A	۱	۸۸/۱۰/۰۸	۱۴:۲۵	۸۸/۱۰/۱۵	۱۵:۱۵
۲۱۰۷	بررسی و رفع عیب از پاورهد	مکانیک	دریل	اب روغن قاطی کرده	A	۱	۸۸/۱۰/۰۹	۱۴:۰۰	۸۸/۱۰/۰۹	۲۲:۲۰
۲۱۰۷	بررسی و رفع عیب	برقی شاول	دریل	دور لوله قطع است	B	۲	۸۸/۱۰/۱۲	۱۷:۱۰	۸۸/۱۰/۱۲	۱۷:۲۵
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از شنی	مکانیک	دریل	پین کشک شکسته	A	۱	۸۸/۱۰/۱۵	۱۰:۰۰	۸۸/۱۰/۱۵	۱۴:۴۵
۲۱۰۶	جوشکاری	جوشکاری	دریل	لشکالیزر	A	۲	۸۸/۱۰/۱۶	۸:۲۰	۸۸/۱۰/۱۶	۱۲:۴۰
۲۱۰۲	بررسی و رفع روغن ریزی هیدرولیک	مکانیک	دریل	سینک مربوط به چک پاره شده	A	۲	۸۸/۱۰/۱۶	۸:۱۰	۸۸/۱۰/۱۶	۱۱:۱۵
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از آبریزی	مکانیک	دریل		A	۲	۸۸/۱۰/۱۷	۷:۵۰	۸۸/۱۰/۱۷	۸:۳۰
۲۱۰۲	بررسی و رفع عیب از رادیاتور	مکانیک	دریل	آبریزی دارد	B	۱	۸۸/۱۰/۱۷	۱۶:۵۰	۸۸/۱۰/۱۸	۹:۰۰
۲۱۰۷	بررسی و رفع عیب از سیستم پرویل	مکانیک	دریل	پرویل ندارد	A	۲	۸۸/۱۰/۱۹	۹:۱۰	۸۸/۱۰/۲۷	۹:۳۵
۲۱۰۶	بررسی و رفع عیب از پاورهد	مکانیک	دریل	آب روغن قاطی کرده	A	۱	۸۸/۱۰/۲۰	۱۱:۳۰	۸۸/۱۰/۲۰	۱۴:۲۵

شکل ۵-۱- نمونه‌ای از فرم ثبت خرابی ماشین‌های حفاری

بیشتر فعالیت‌های انجام شده در این مرحله شامل بررسی و جداسازی اطلاعات هر یک از ماشین‌ها، تفکیک داده‌های خرابی مربوط به هر یک از زیرسیستم‌ها، تعیین زمان بین خرابی‌ها

(TBF) و زمان برای تعمیر (TTR)، علت خرابی‌ها و اقدامات انجام شده در جهت رفع خرابی‌ها بوده است.

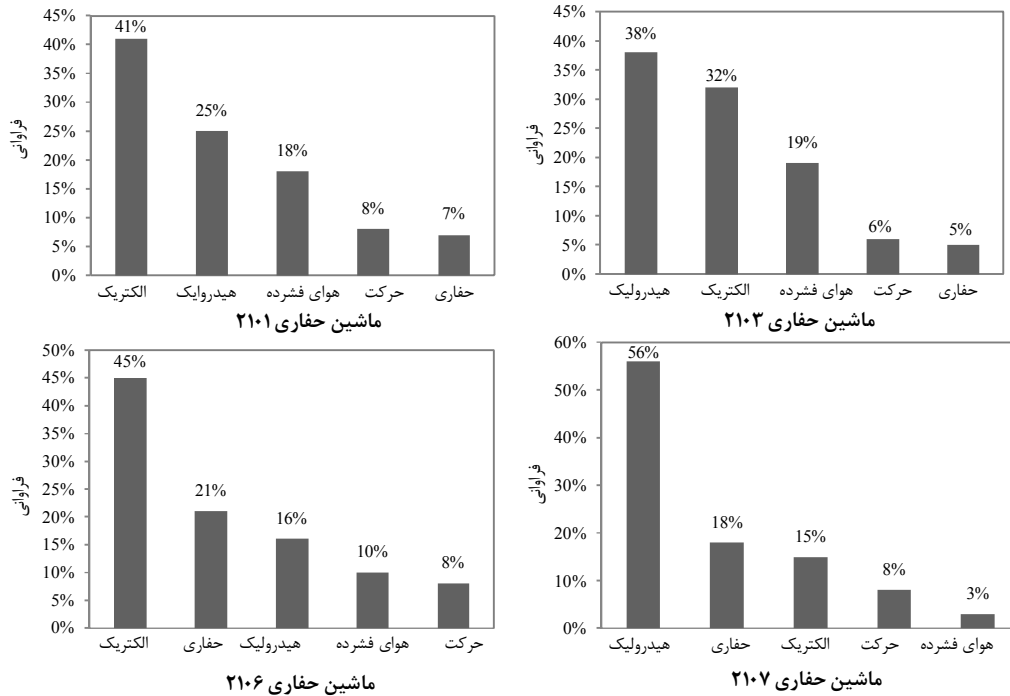
### ۵-۳- تحلیل پارتو<sup>۱</sup>

به منظور تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم از تحلیل پارتو استفاده شده است. با توجه به این روش، پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی، درصد 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 می‌شود. به این ترتیب امکان تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم وجود خواهد داشت. نمودار ستونی تحلیل پارتو برای زیرسیستم‌های مختلف هر یک از ماشین‌های حفاری در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۲)، زیرسیستم هیدرولیک با بیشترین درصد خرابی در ماشین‌های ۲۱۰۳ و ۲۱۰۷، بحرانی‌ترین زیرسیستم در این ماشین‌ها است. در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۶ نیز زیرسیستم الکتریک دارای بیشترین خرابی بوده و بحرانی‌ترین زیرسیستم محسوب شده است. علاوه بر این زیرسیستم حفاری در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۳ و همچنین زیرسیستم‌های حرکت و هوای فشرده به ترتیب در ماشین‌های ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷، دارای کم‌ترین خرابی در مقایسه با سایر زیرسیستم‌ها هستند.

---

<sup>۱</sup> Parto Analysis

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۵-۲- نمودار پارتو خرابی زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

### ۵-۴- روند تحلیل خرابی و مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها

در تحلیل قابلیت اطمینان هر زیرسیستم از روندنمای ارائه شده در شکل (۲-۱۰) استفاده شده است. جزئیات مراحل مدلسازی در ادامه توضیح داده شده است:

#### 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

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

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 آماری Easyfit-5.5 (MathWave, 2010) استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار امکان برازش بهترین تابع توزیع بر داده‌های خرابی وجود دارد. گرچه در مجموع تعداد 63 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:

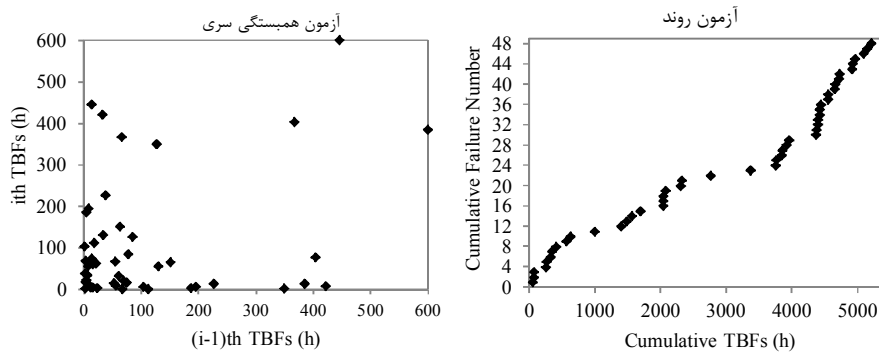
در این مرحله تابع قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی محاسبه و منحنی‌های آن‌ها رسم شده است. سپس، منحنی‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به دست آمده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه به مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های هر یک از ماشین‌های حفاری به صورت مجزا پرداخته شده است.



## ۵-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

### ۵-۵-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

#### ۵-۵-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۱

جدول ۵-۱- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۱

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 72/63$ )	۱۲۶/۳۶	۹۴	۴۸

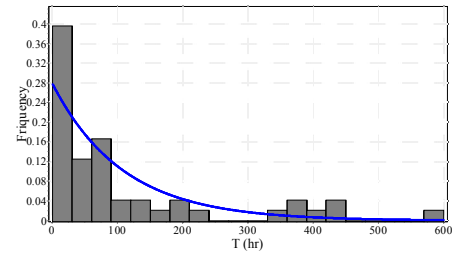
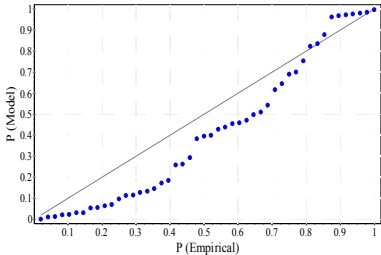
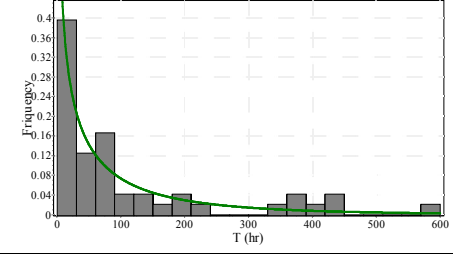
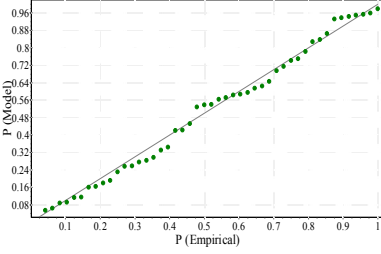
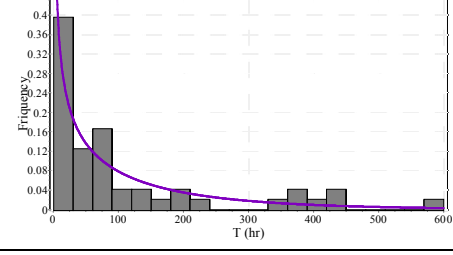
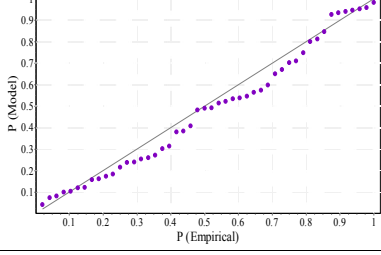
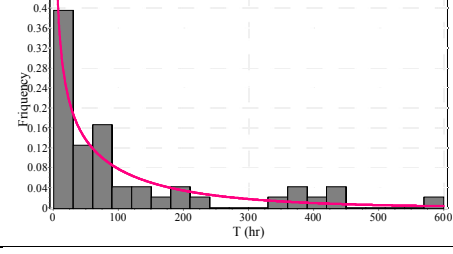
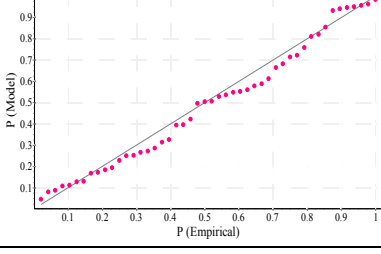
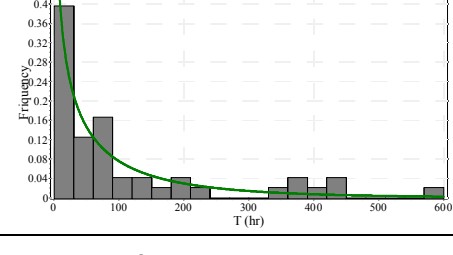
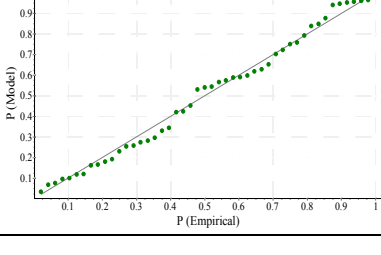
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۳))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۷۲/۶۳)، فرض صفر رد نمی‌شود (جدول (۵-۱)). علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۳))، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۱، فرآیند تجدید شونده است.

#### ۵-۱-۲- تحلیل داده‌ها

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. نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۲-۵) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲-۵)، شکل توزیع تمامی پنج تابع مذکور بسیار شبیه به هم بوده و همچنین مقادیر K-S در تمامی توابع بجز تابع نمایی، بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. اما، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۱۰۸/۶) برابر و دارای اختلاف جزئی با سایر توابع توزیع است. با این وجود با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۱، در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۲- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

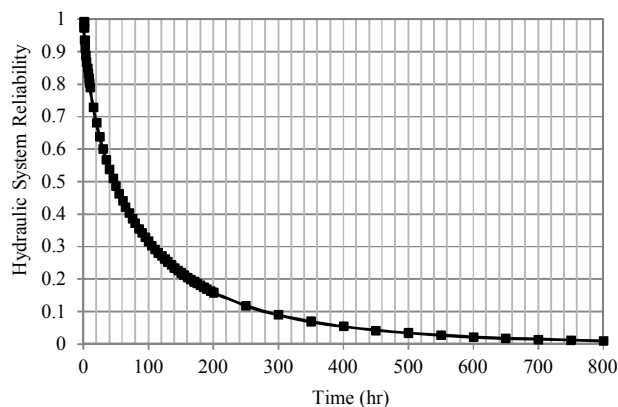
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون میانگین (ساعت) K-S
Exponential			۰/۲۱۱ ۱۰۸/۲
Weibull-۳P			۰/۰۷۷۶ ۱۰۶/۳
Gen. Gamma			۰/۰۹۲۳ ۱۱۳/۴
Gamma			۰/۰۷۸۷ ۱۰۸/۶
Weibull-۳P			۰/۰۸۵۹ ۱۰۱/۸
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0/6706$ $\beta=79/98$ $\gamma=0/625$		MTBF واقعی: ۱۰۸/۶ ساعت	

### ۵-۱-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.0625}{79.98}\right)^{0.6706}\right)$$

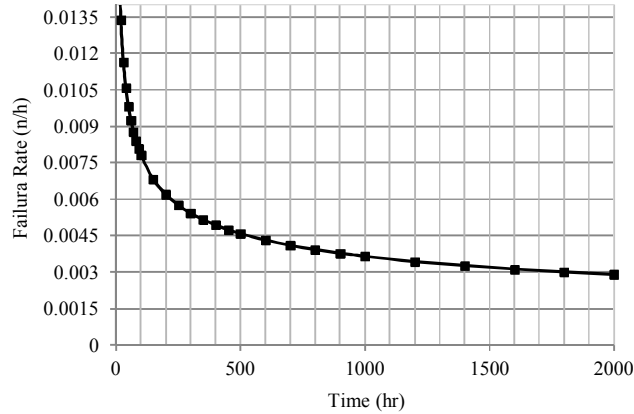
$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0084 \left(\frac{t-0.625}{79.98}\right)^{-0.33}$$



شکل ۵-۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۱

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴-۵)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک پس از حدود ۸۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است 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. قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۱، پس از حدود ۴۵ ساعت به نصف کاهش می‌یابد. بنابراین برای پرهیز از توقفات ناخواسته، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

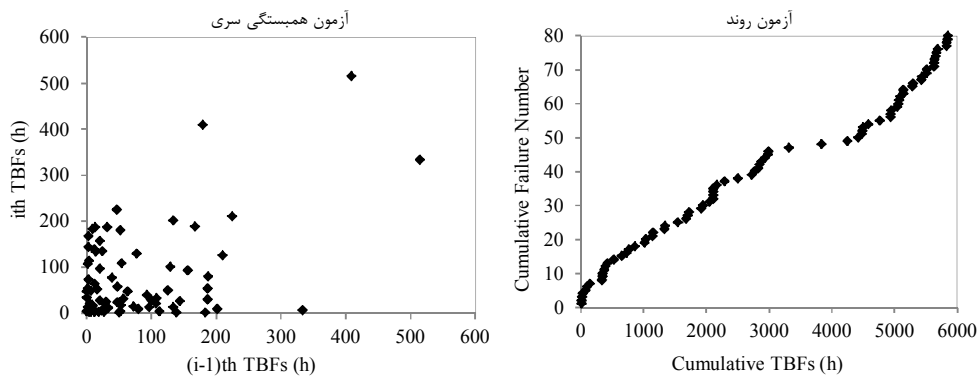


شکل ۵-۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل ۵-۵)، زیرسیستم هیدرولیک دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با  $0/014$  خرابی در ساعت بوده و پس از ۱۶ ساعت (پس از دو شیفت کاری)، به سرعت کاهش و به مقدار  $0/0135$  می‌رسد. با گذشت حدود ۳۰۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی با یک روند ملامترو کاهش یافته و در زمان ۸۰۰ ساعت به مقدار  $0/004$  می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری ۲۱۰۱ دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۵-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

#### ۵-۵-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری



شکل ۵-۶- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۱

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۳- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۱

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۸۱	۱۶۰	۲۳۳/۷۴	رد نمی‌شود ( $U > ۱۳۰/۲۵$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۶))، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۳)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۳۰/۲۵)، فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۶))، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک دستگاه حفاری ۲۱۰۱، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۵-۲-۱- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۴)، شکل توزیع تمامی پنج تابع مذکور بسیار شبیه به هم هستند. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۱۰۸/۶) برابر است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک دستگاه حفاری ۲۱۰۱، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۴-۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱

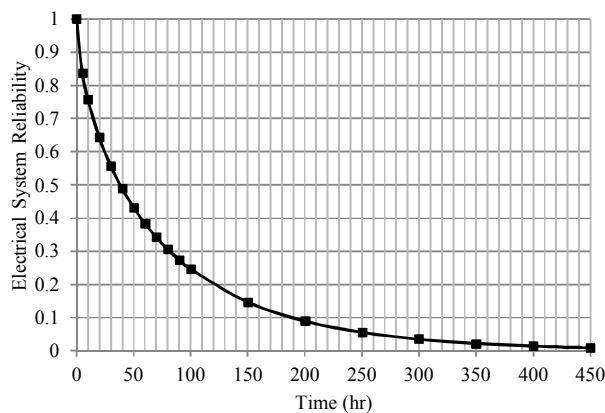
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۱۶۲ ۷۲/۳۸
Weibull-۳P			۰/۰۹۶۵ ۶۳/۲۴
Gen. Gamma			۰/۰۶۷۹ ۷۴/۹۲
Gamma			۰/۰۵۵۹ ۷۲/۶۵
Weibull-۲P			۰/۰۶۸۳ ۶۸/۸۱
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.16$ $\beta=121$		MTBF واقعی: ۷۲/۶۲ ساعت	

### ۵-۲-۲- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱ به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۷-۵) و (۸-۵) آورده شده است.

$$R(t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{t \beta^{\alpha} \Gamma(\beta)} s^{\alpha-1} e^{-\frac{s}{\beta}} ds = \int_0^{\infty} \frac{0.056}{t \Gamma(121)} s^{-0.4} e^{-0.0083s} ds$$

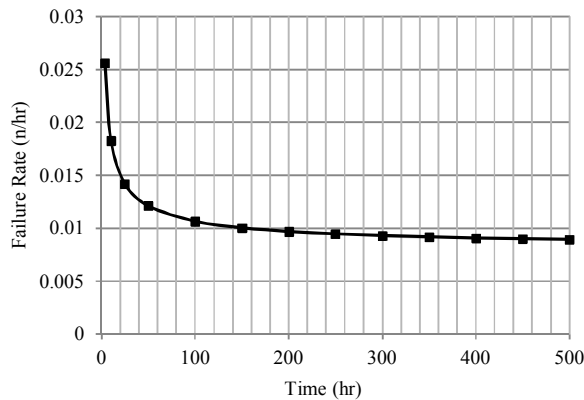
$$\lambda(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha) [1 - \Gamma(\frac{t}{\beta}; \alpha)]} = \frac{t^{-0.4} e^{-\frac{t}{121}}}{17.77 [1 - \Gamma(\frac{t}{121}; 0.6)]}$$



شکل ۷-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۷-۵)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک پس از حدود ۴۵۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۸ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین پس از حدود ۴۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد. بنابراین برای پرهیز از توقفات ناخواسته، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد.



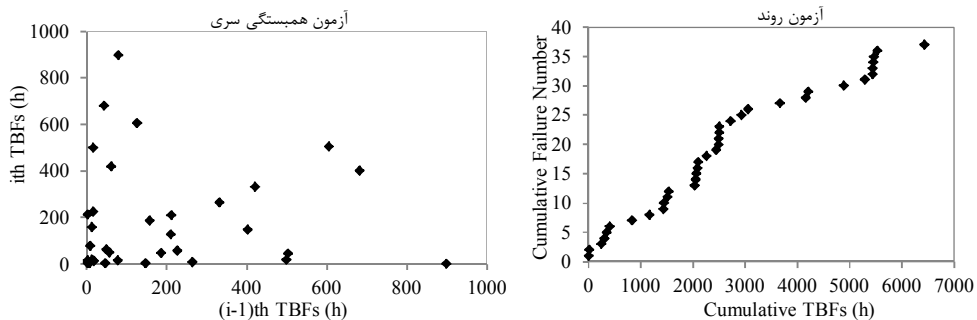


شکل ۵-۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۸))، زیرسیستم الکتریک دارای نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با  $0.027$  خرابی در ساعت بوده و پس از حدود ۲۵ ساعت، به سرعت کاهش و به مقدار  $0.014$  می‌رسد. با گذشت حدود ۱۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی با یک روند ملامت‌تر کاهش یافته و در زمان ۱۵۰ ساعت به مقدار  $0.01$  می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۱، دارای تابع نرخ خرابی نزولی است. به طوری که تا قبل از ۱۰۰ ساعت از شروع به فعالیت زیرسیستم به سرعت کاهش یافته و پس از این زمان با روندی تقریباً ثابت، کاهش خواهد یافت.

### ۵-۵-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱

#### ۵-۵-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۱

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرپوش

جدول ۵-۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۱

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
۳۷	۷۲	۱۱۰/۵۵	رد نمی شود ( $U > ۵۳/۴۳$ )	فرآیند تجدید شونده

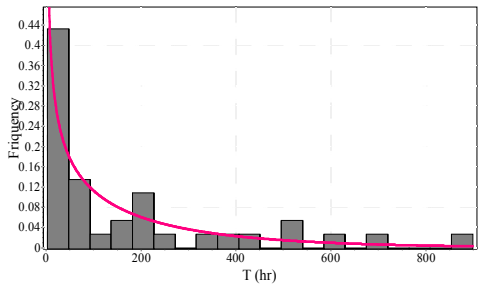
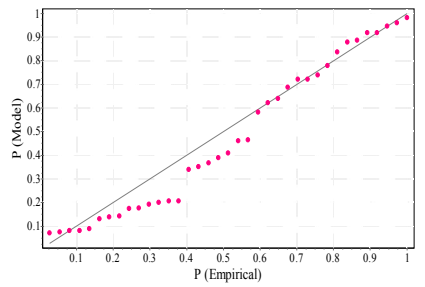
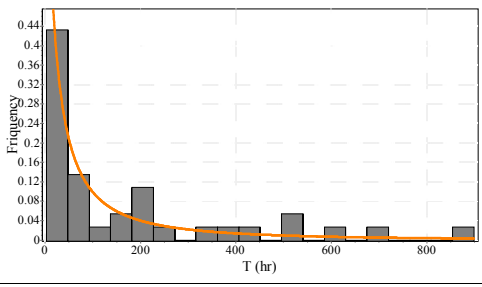
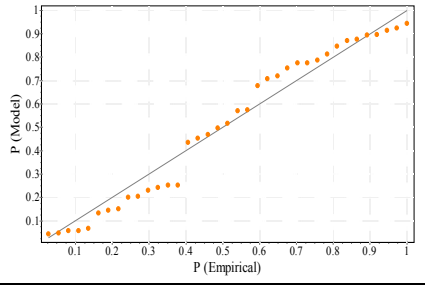
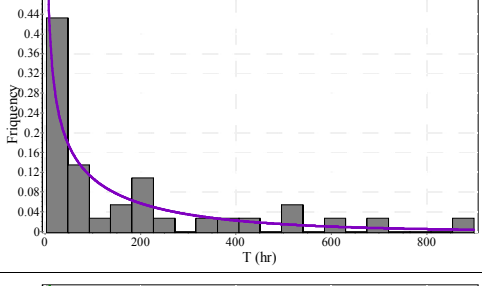
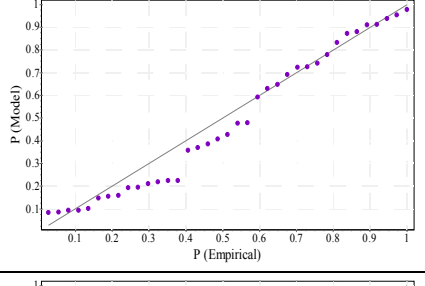
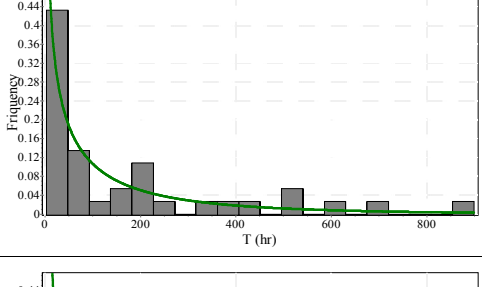
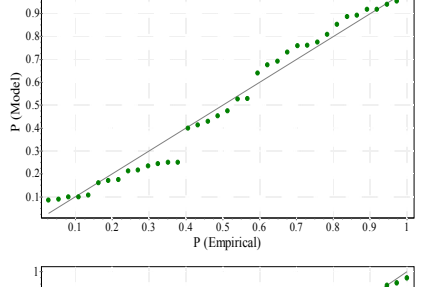
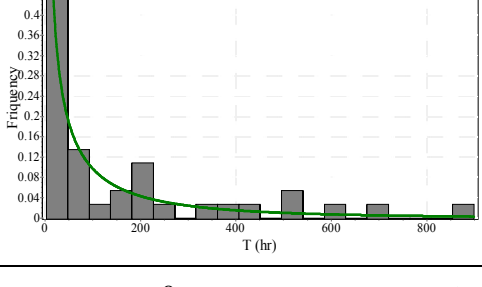
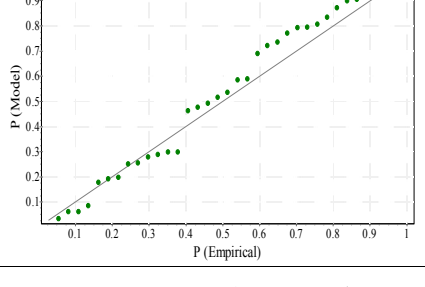
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۹)، داده ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۵۳/۴۳)، فرض صفر رد نمی شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۹)، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری شماره ۱، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۵-۳-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۶) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۶)، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۱۷۴) برابر است. اما، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرششم

جدول ۵-۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری ۲۱۰۱

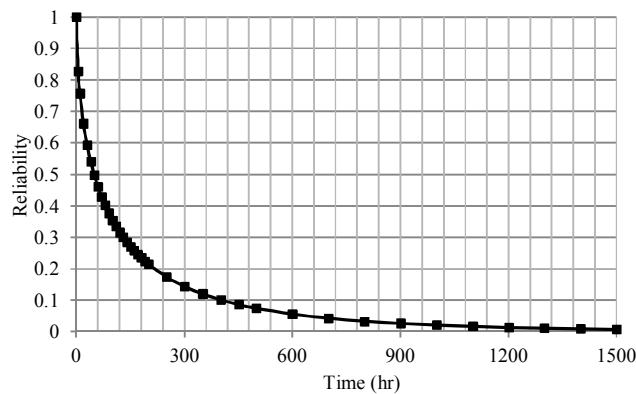
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Gamma			۰/۱۷۲ ۱۷۴
Lognormal			۰/۱۲۶۸ ۲۵۴/۳
Gen. Gamma			۰/۱۵۳۷ ۱۴۰/۶
Weibull-۲P			۰/۱۲۷۶ ۱۶۷/۲
Weibull-۳P			۰/۱۲۶۷ ۱۵۴/۵
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۰/۵۷۰۴$ $\beta=۹۳/۹۴$ $\gamma=۳/۰$		MTBF واقعی: ۱۷۴ ساعت	

### ۳-۳-۵-۶- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) در ادامه آورده شده است.

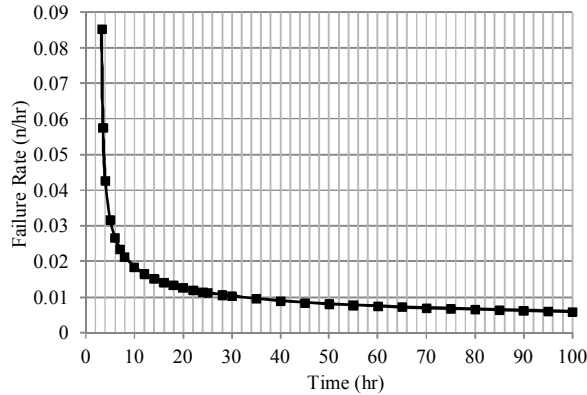
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-3}{93.94}\right)^{0.5704}\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0061 \left(\frac{t-3}{93.94}\right)^{-0.43}$$



شکل ۵-۱۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۱۰))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری شماره ۱، پس از حدود ۱۵۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. به عبارت دیگر، پس از حدود ۱۵۰۰ ساعت از شروع به فعالیت دستگاه حفاری، زیرسیستم هوای فشرده به طور قطع متوقف خواهد شد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۴ ساعت (در اواسط شیفت)، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین پس از حدود ۵۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد. بنابراین برای پرهیز از توقفات ناخواسته، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد.

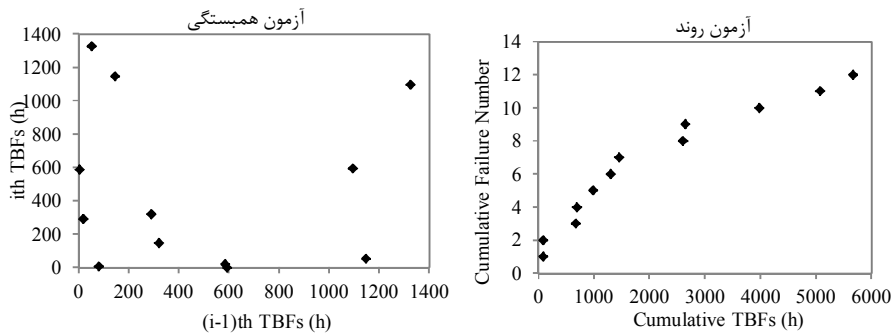


شکل ۵-۱۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۱۱))، زیرسیستم هوای فشرده دارای نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با  $0/7$  خرابی در ساعت بوده و پس از حدود تنها  $3/5$  ساعت، به سرعت کاهش و به مقدار  $0/057$  می‌رسد. با گذشت حدود ۲۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی با یک روند ملامت‌تر کاهش یافته و در زمان ۶۰ ساعت به مقدار  $0/007$  می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۱، دارای تابع نرخ خرابی نزولی است. به طوری که تا قبل از ۲۰ ساعت، نرخ خرابی به سرعت کاهش یافته و پس از این زمان با روندی تقریباً ثابت، کاهش خواهد یافت.

#### ۵-۵-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

#### ۵-۵-۴-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۱۲- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۱

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۷- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۱

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل‌سازی انتخابی
۱۲	۲۲	۴۳/۶	رد نمی‌شود ( $U > ۱۲/۳$ )	فرآیند تجدید شونده

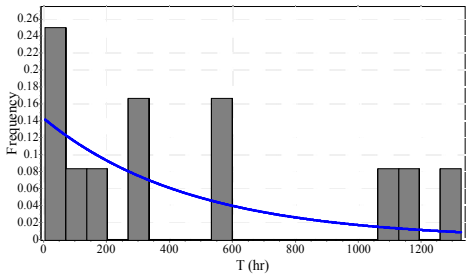
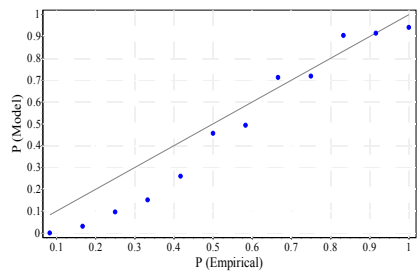
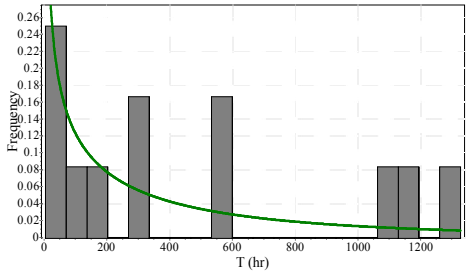
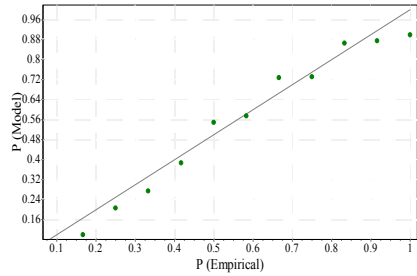
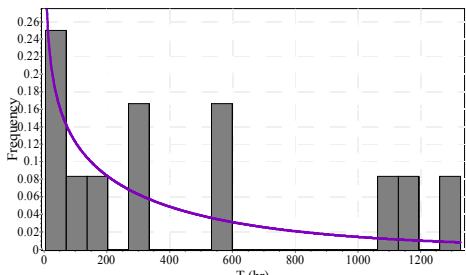
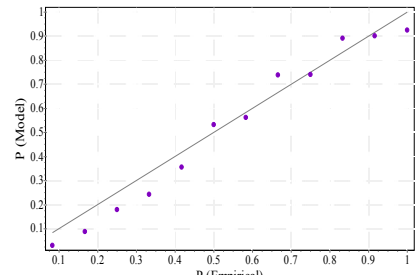
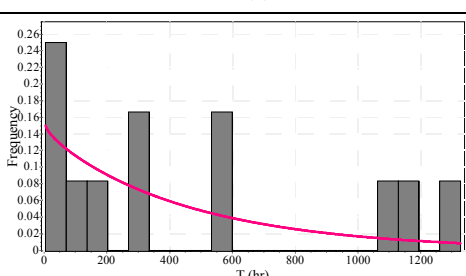
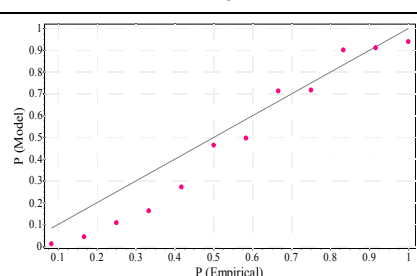
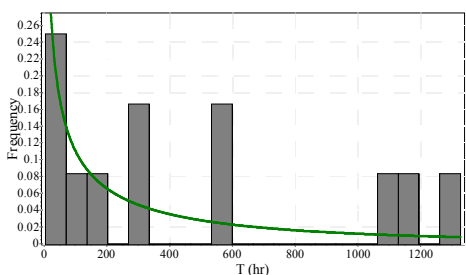
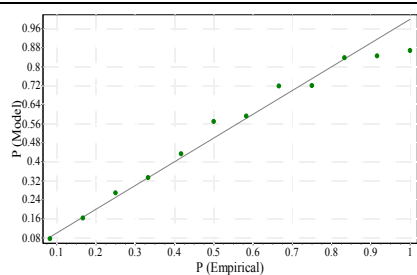
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۱۲))، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۷))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۲/۳)، فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۱۲))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۴-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۸) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۸)، شکل توزیع تمامی پنج تابع مورد استفاده بسیار شبیه به هم بوده و همچنین مقادیر K-S در تمامی توابع بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. اما، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۴۷۲) برابر است. با این وجود، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبون سه پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

جدول ۵-۸- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱

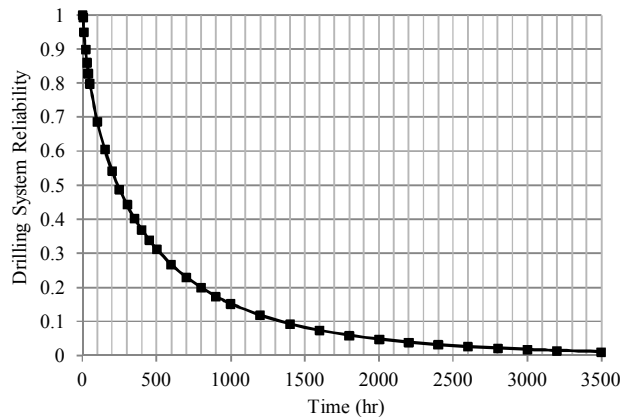
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P
Exponential		
Weibull-۳P		
Gen. Gamma		
Gamma		
Weibull-۲P		
<p>پارامترهای بهترین توزیع: <math>\alpha=0/689</math> <math>\beta=398/0</math> <math>\gamma=4/688</math></p>		<p>MTBF واقعی: ۴۷۲ ساعت</p>

### ۶-۵-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۳) و (۵-۱۴) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-4.688}{398}\right)^{0.689}\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0017 \left(\frac{t-4.688}{398}\right)^{-0.311}$$

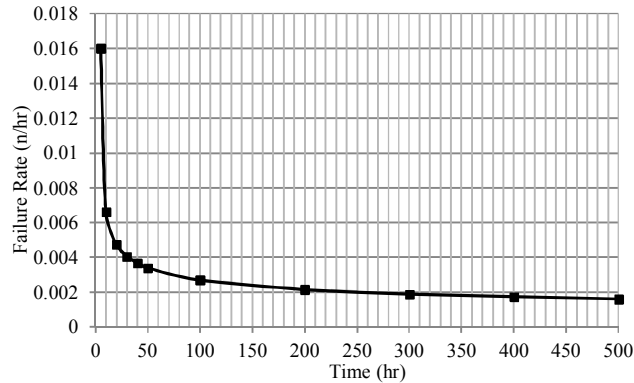


شکل ۵-۱۳- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۱۳))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، پس از حدود ۳۵۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. به عبارت دیگر، پس از حدود ۳۵۰۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین، زیرسیستم حفاری به طور قطع متوقف خواهد شد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۵۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین پس از حدود ۲۵۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.



## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

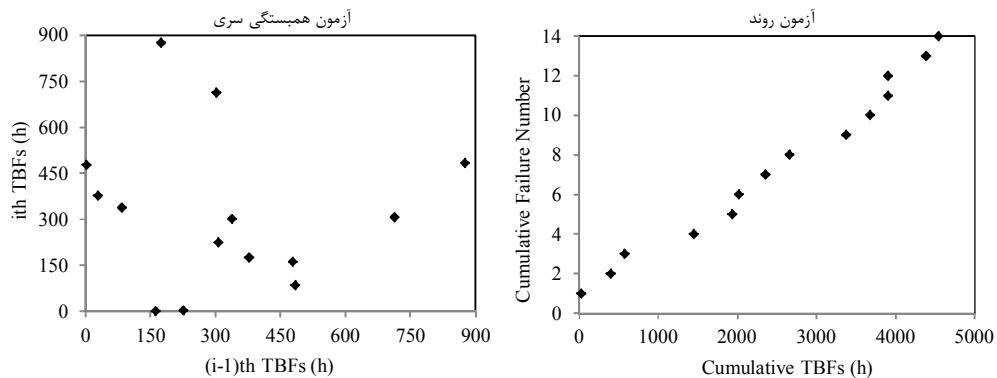


شکل ۵-۱۴- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۱۴))، زیرسیستم حفاری دارای نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با ۰/۰۱۷ خرابی در ساعت بوده و پس از حدود تنها ۱۰ ساعت، به سرعت کاهش و به مقدار ۰/۰۰۷ می‌رسد. با گذشت حدود ۱۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی با یک روند ملامت‌تر کاهش یافته و به مقدار ۰/۰۰۲۷ می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۱، دارای تابع نرخ خرابی نزولی است. به طوری که تا قبل از ۱۰۰ ساعت از شروع به فعالیت زیرسیستم به سرعت کاهش یافته و پس از این زمان با روندی تقریباً ثابت، کاهش خواهد یافت.

### ۵-۵-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱

#### ۵-۵-۵-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۱۵- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۱

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

جدول ۵-۹- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۱

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۱۴	۲۶	۴۰/۵۸	رد نمی شود ( $U > ۱۵/۴$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۱۵))، داده ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۵/۴)، فرض صفر رد نمی شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۱۵))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۵-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۱۰) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۱۰)، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۳۲۴/۸) برابر است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱، در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

جدول ۵-۱۰- نتایج تحلیل داده های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱

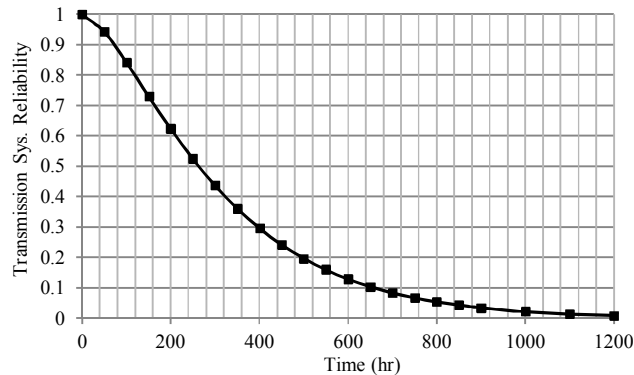
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۱۷۶۴ ۳۲۴/۸
Weibull-۳P			۰/۱۹۸۹ ۳۴۰/۷
Log-normal			۰/۲۴۹۸ ۵۶۷/۹
Gamma			۰/۱۳۷۷ ۳۲۴/۸
Weibull-۲P			۰/۲۳۵ ۵۴۱/۴
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۱۶۸۳$ $\beta=۱۹۳/۰$		MTBF واقعی: ۳۲۴/۹ ساعت	

### ۵-۵-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۶) و (۵-۱۷) آورده شده است.

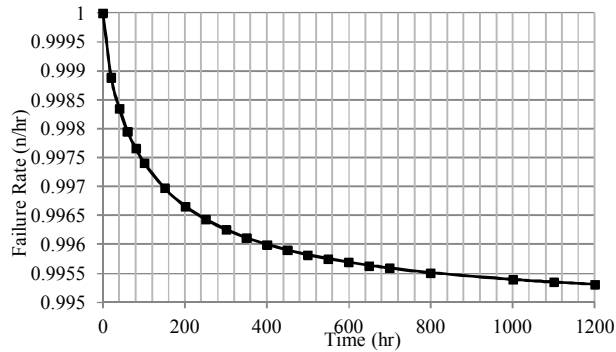
$$R(t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{t \beta^{\alpha} \Gamma(\beta)} s^{\alpha-1} e^{-\frac{s}{\beta}} ds = \int_0^{\infty} \frac{0.00014}{t \Gamma(193)} s^{0.683} e^{-\frac{s}{193}} ds$$

$$\lambda(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha) [1 - \Gamma(\frac{t}{\beta}; \alpha)]} = \frac{t^{0.683} e^{-\frac{t}{193}}}{7024.14 [1 - \Gamma(\frac{t}{193}; 1.683)]}$$



شکل ۵-۱۶- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۱۶))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱، پس از حدود ۱۲۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. به عبارت دیگر، پس از حدود ۱۲۰۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین، زیرسیستم حرکت به طور قطع متوقف خواهد شد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۱۶۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین پس از حدود ۲۶۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۱۷- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱

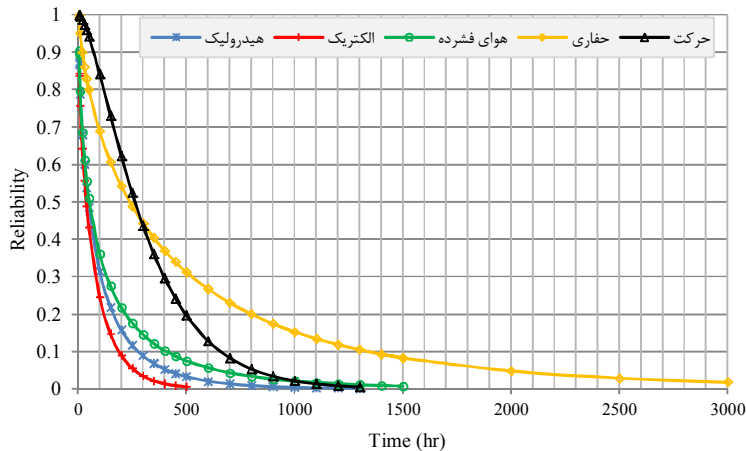
با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۱۷))، زیرسیستم حرکت دارای نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با یک خرابی در ساعت بوده و پس از حدود تنها ۲۰ ساعت، به مقدار ۰/۹۹۷ می‌رسد. با گذشت حدود ۴۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی به مقدار ۰/۹۹۶ کاهش می‌یابد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۱، دارای تابع نرخ خرابی نزولی بوده و با روند بسیار ملایمی کاهش می‌یابد.

#### ۵-۵-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه، در شکل (۵-۱۸) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم‌های حفاری و حرکت تا قبل از ۴۰۰ ساعت، به ترتیب قابل اعتمادترین زیرسیستم‌های ماشین بوده و پس از این زمان زیرسیستم حفاری، نسبت به سایر زیرسیستم‌های ماشین، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود. علاوه بر این با توجه به شکل (۵-۱۸)، زیرسیستم‌های هیدرولیک، الکتریک و هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه دارای رفتار مشابهی بوده و نسبت به دو زیرسیستم دیگر ماشین، قابلیت اطمینان پایین‌تری دارند. زیرسیستم‌های هیدرولیک، الکتریک،

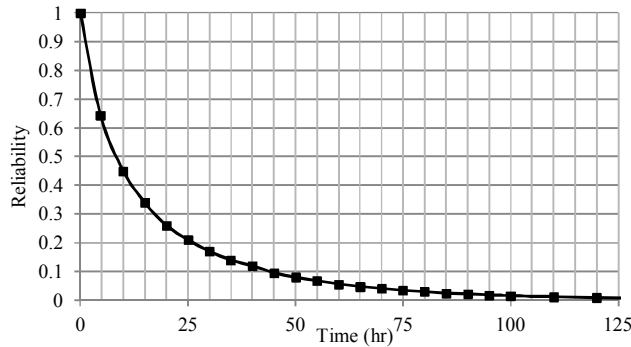
## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

هوای فشرده، حفاری و حرکت این ماشین به ترتیب پس از ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۱۳۰۰، ۱۵۰۰ و ۴۵۰۰ ساعت متوقف خواهند شد.



شکل ۵-۱۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات ماشین حفاری به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل ماشین را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه نمود. با استفاده از رابطه (۲-۶)، قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۵-۱۹) ارائه شده است. با توجه به منحنی قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه پس از طی ۱۲۵ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان ماشین، پس از ۸ ساعت از شروع به فعالیت آن (یعنی در پایان شیفت)، ۵۵ درصد کاهش یافته و به حدود ۴۵ درصد می‌رسد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان ماشین، مشخص می‌شود که به طور میانگین در هر ساعت ۰/۸٪ از قابلیت اطمینان آن کاسته می‌شود.

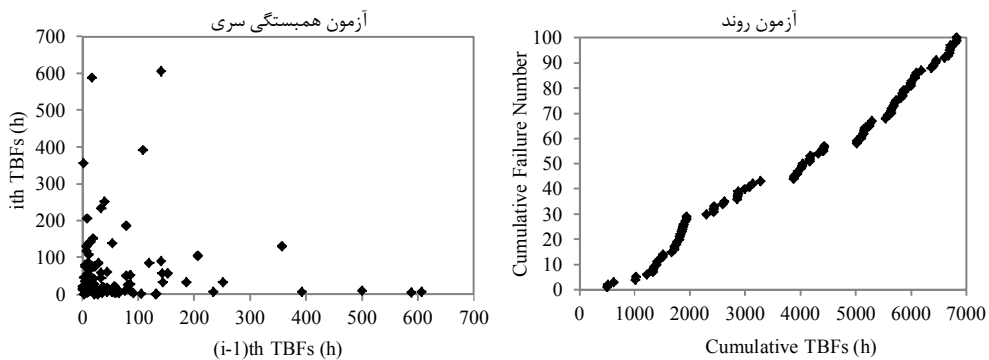


شکل ۵-۱۹- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه

### ۵-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

#### ۵-۶-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

#### ۵-۶-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده ها



شکل ۵-۲۰- آزمون روند و همبستگی سری داده های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۳

جدول ۵-۱۱- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۳

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی شود ( $U > ۱۶۳/۴۲$ )	۲۲۰/۶۲	۱۹۸	۱۰۰

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۲۰)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول ۵-۱۱)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۶۳/۴۲)، فرض صفر رد

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

نمی شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۲۰))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۶-۱-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۱۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۱۲)، میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۶۸/۲۹) برابر و دارای اختلاف جزئی با سایر توابع توزیع است. با این وجود، با در نظر گرفتن کم ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در نظر گرفته شده است.

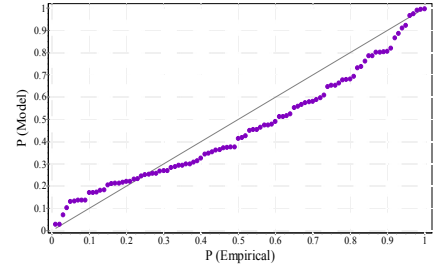
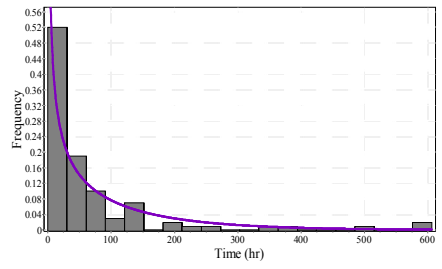
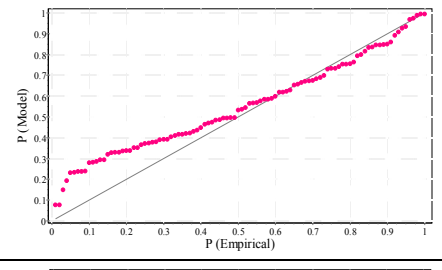
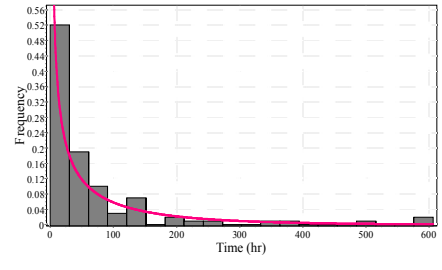
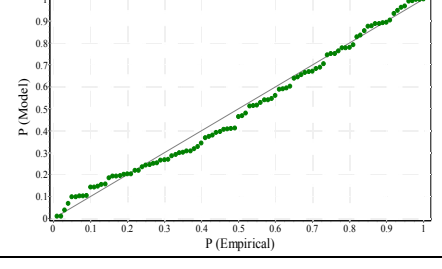
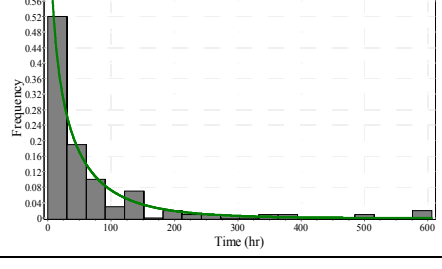
جدول ۵-۱۲- نتایج تحلیل داده های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۰۵۲۶	۷۶/۷۶
Weibull-۳P			۰/۰۸۴۸	۷۰/۷۸



فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۵-۱۲

۸۳/۱۱	۰/۱۲۴۳			Gen. Gamma
۶۸/۳	۰/۱۹۱۹			Gamma
۵۸/۷۲	۰/۰۷۸۶			Weibull-۲P
		MTBF واقعی: ۶۸/۲۹ ساعت		پارامترهای بهترین توزیع: $\sigma=۱/۵۸$ $\mu=۳/۲۱۵$

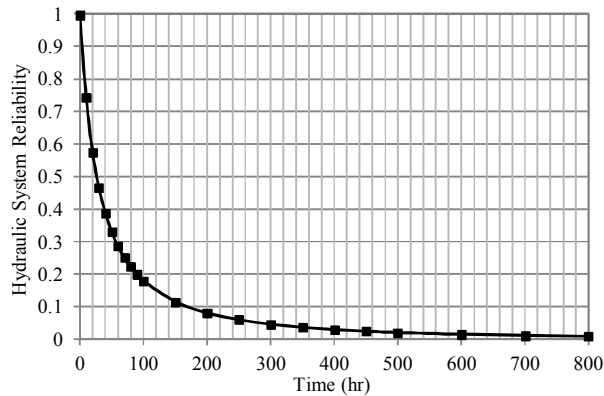
۵-۶-۱-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۲۱) و (۵-۲۲) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 3.125}{1.58}\right)^2\right)$$

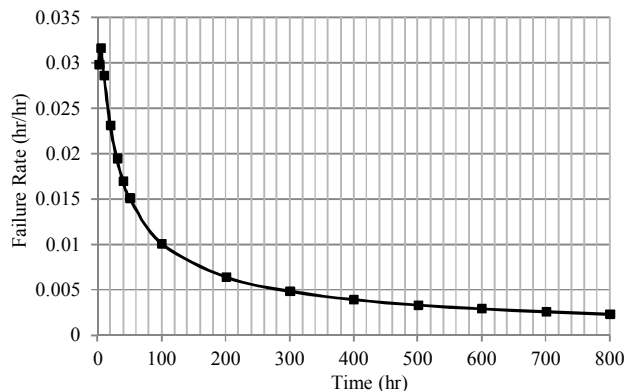
$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \frac{1}{\exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2)} dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 3.125)^2)}{4.99t \int_0^t \frac{1}{\exp(-(\ln(x) - 3.125)^2 / 4.99)} dx}$$

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۵-۲۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۳

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۲۱)) نشان می دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک پس از حدود ۸۰۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که، قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می یابد و پس از ۵ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۳، پس از حدود ۲۵ ساعت به ۵۰٪ کاهش می یابد.



شکل ۵-۲۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

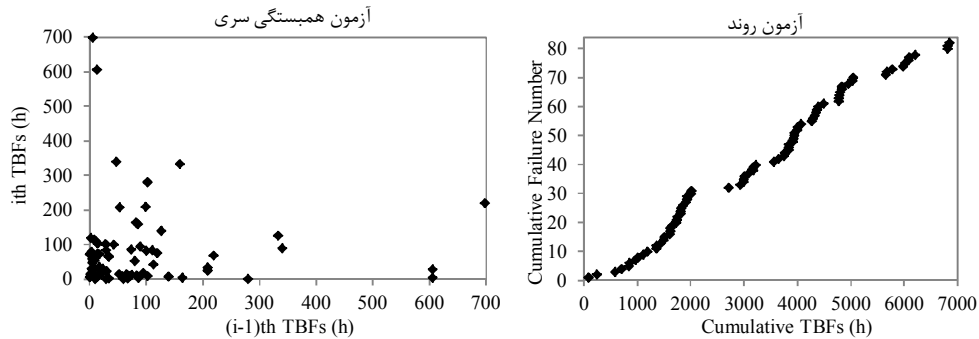
با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۲۲))، زیرسیستم هیدرولیک دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با ۰/۰۳۳ خرابی در ساعت بوده و پس از ۲۰ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار ۰/۰۲۳ می رسد. با گذشت حدود ۳۰۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی با یک روند ملامت کاهش یافته به مقدار ۰/۰۰۵

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۶-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

#### ۵-۶-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۲۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۳

جدول ۵-۱۳- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۳

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 132$ )	۲۱۵/۲۲	۱۶۲	۸۲

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۲۳)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول ۵-۱۳)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۳۲)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۲۳)، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

۵-۶-۲- تحلیل داده‌ها

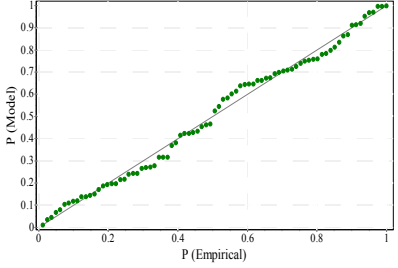
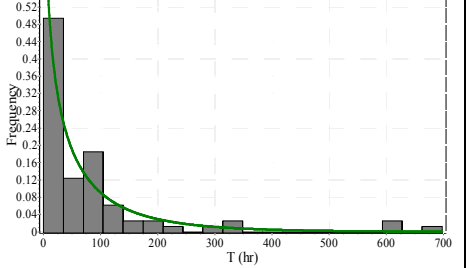
نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در جدول (۵-۱۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۱۴)، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۳، در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۱۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۱۸۱۸	۸۴/۱۶
Weibull-۲P			۰/۰۶۲۵	۸۴/۷۱
Gen. Gamma			۰/۱۲۲۶	۹۷/۱۲
Gamma			۰/۰۷۹۶	۸۳/۱۸

## فصل پنجم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

ادامه جدول ۵-۱۴

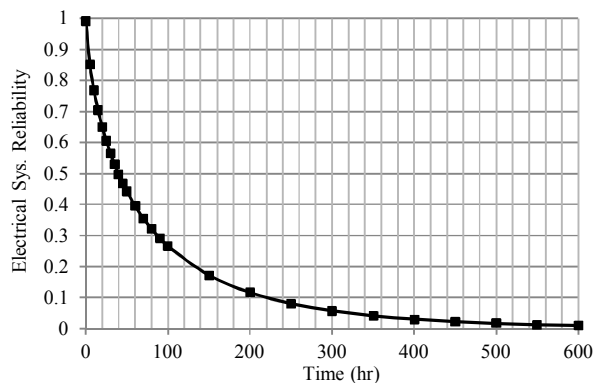
۷۶/۲۷	۰/۰۶۹۴		
		MTBF واقعی: ۸۴/۴۷ ساعت	پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۰/۶۹۸۲$ $\beta=۶۶/۶۶$ $\gamma=۰/۱۱۲۵$

### ۵-۲-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری ۲۱۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۲۴) و (۵-۲۵) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.125}{66.66}\right)^{0.698}\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.01 \left(\frac{t-0.125}{66.66}\right)^{-0.302}$$

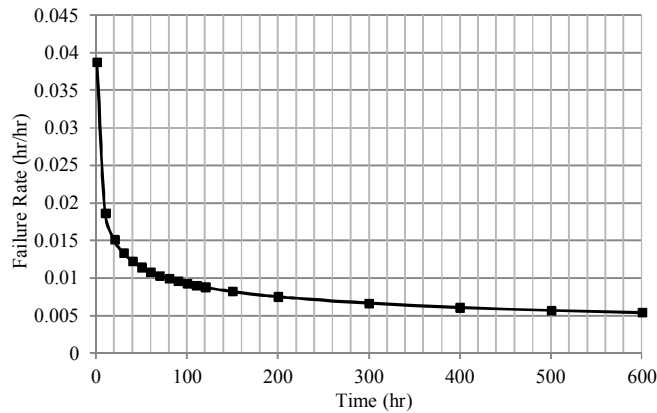


شکل ۵-۲۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۲۴))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک پس از حدود ۶۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۸ ساعت

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

و یا در پایان شیفت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین پس از حدود ۴۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

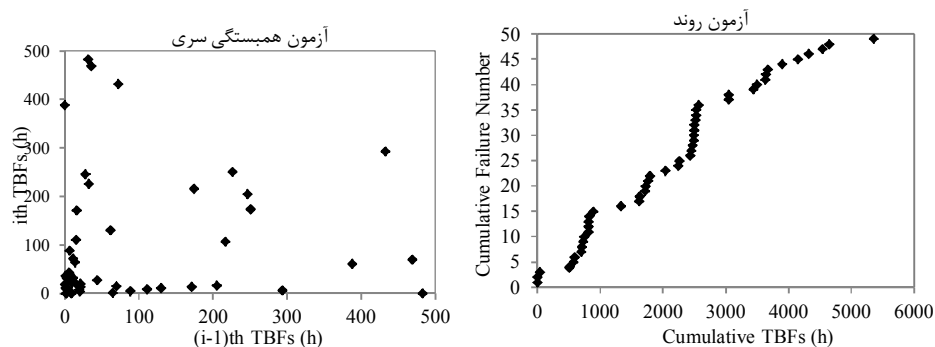


شکل ۵-۲۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل ۵-۲۵)، زیرسیستم الکتریک دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با ۰/۰۴ خرابی در ساعت بوده و پس از ۸ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار ۰/۰۱ می‌رسد. با گذشت حدود ۹۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک آن با یک روند ملامت‌تر کاهش یافته و به مقدار ۰/۰۰۹۵ می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۶-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

### ۵-۶-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۲۶- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۳

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۱۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۳

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۴۹	۹۶	۱۳۵/۸۵	رد نمی‌شود ( $U > ۷۴/۳۸$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۲۶))، داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۱۵)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۷۴/۳۸)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۲۶))، 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 هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۶-۳-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در جدول (۵-۱۶) ارائه شده است. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۱۰۹/۲) برابر است. با این وجود با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۳، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

جدول ۵-۱۶- نتایج تحلیل داده های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون میانگین K-S (ساعت)
Lognormal			۰/۰۷۵۶ ۱۹۹/۲
Weibull-r-P			۰/۱۱۴۴ ۱۲۹/۲
Gen. Gamma			۰/۱۳۳۴ ۱۱۶/۲
Gamma			۰/۱۳۵۱ ۱۰۹/۲
Weibull-r-P			۰/۰۷۹۹ ۱۴۸/۸
پارامترهای بهترین توزیع: $\mu=3/457$ $\sigma=1/917$		MTBF واقعی: ۱۰۹/۲ ساعت	

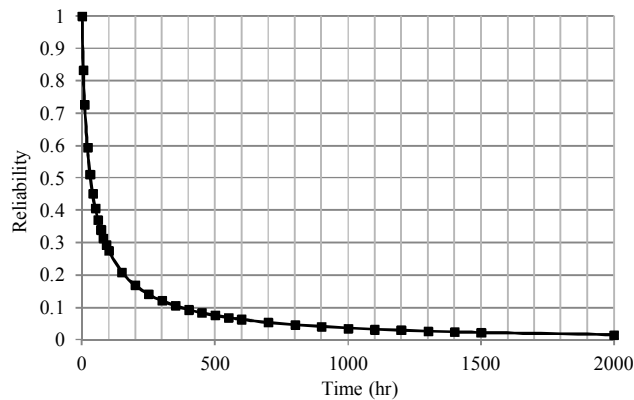


### ۵-۶-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری ۲۱۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۲۷) و (۵-۲۸) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 3.457}{1.917}\right)^2\right)$$

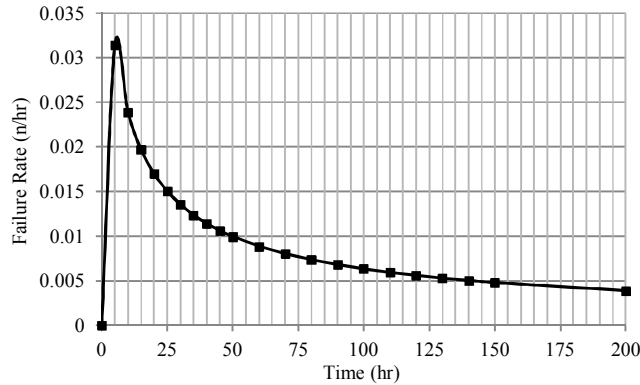
$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2) dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 3.457)^2)}{7.35t \int_0^t \exp(-(\ln(x) - 3.457)^2 / 7.35) dx}$$



شکل ۵-۲۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۳

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۲۷))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده پس از حدود ۲۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار ماشین، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۸ ساعت و یا در پایان شیفت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین پس از حدود ۳۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

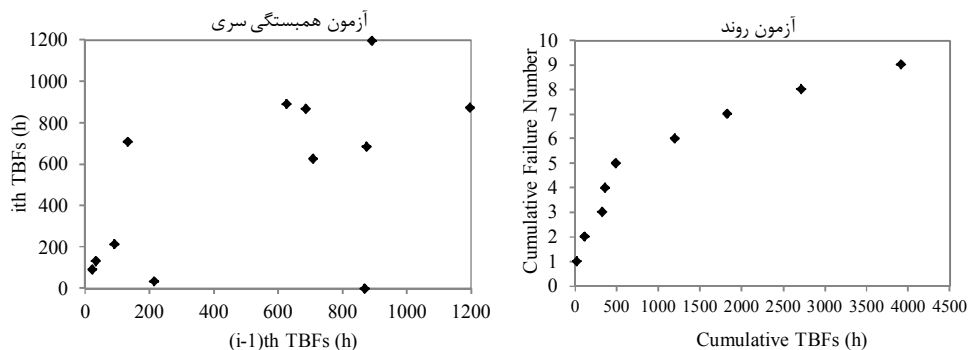


شکل ۵-۲۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۵-۲۸) 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 ۵ ساعت از فعالیت آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۳۳ می‌رسد. پس از این زمان، نرخ خرابی به صورت نمایی کاهش یافته در زمان ۵۰ ساعت، به ۰/۰۱ خرابی در ساعت می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار و نرخ خرابی کاهشی شدید پس از حدود ۵ ساعت است.

### ۵-۶-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

#### ۵-۶-۴-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۲۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۳

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرپوش

جدول ۵-۱۷- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۳

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۱۲	۲۲	۵۵/۷۱	رد نمی شود ( $U > ۱۲/۳$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۲۹)، نحوه قرارگیری نقاط به دو محدوده قابل تفکیک است: محدوده قبل از ۵۰۰ ساعت و محدوده پس از ۱۲۰۰ ساعت. نحوه قرارگیری نقاط در دو محدوده یاد شده، بسیار به حالت خطی نزدیک است. با این وجود، برای رفع ابهام روش تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش تحلیلی (جدول ۵-۱۷)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۲/۳)، فرض صفر رد نمی شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۲۹)، داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۶-۴-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در جدول (۵-۱۸) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۱۸)، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۵۲۸/۴) برابر است. با این وجود، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۳، در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۵-۱۸- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

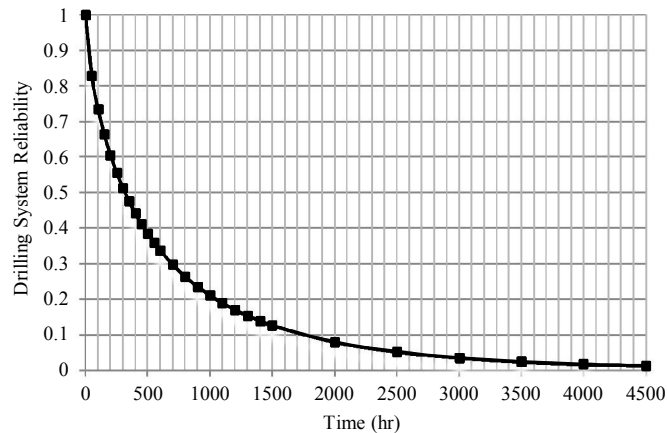
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۲۷۹۵	۵۲۱/۷
Weibull-۲P			۰/۳۴۲	۶۶۶/۳
Gen. Gamma			۰/۲۹۱۷	۵۱۸/۷
Gamma			۰/۲۶۸۱	۵۲۸/۳
Log-normal			۰/۲۹۶	۷۱۷
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۰/۷۰۷۵$ $\beta=۵۳۰/۴$		MTBF واقعی: ۵۲۸/۴ ساعت		

### ۶-۴-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۳۰) و (۵-۳۱) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{530.4}\right)^{0.706}\right)$$

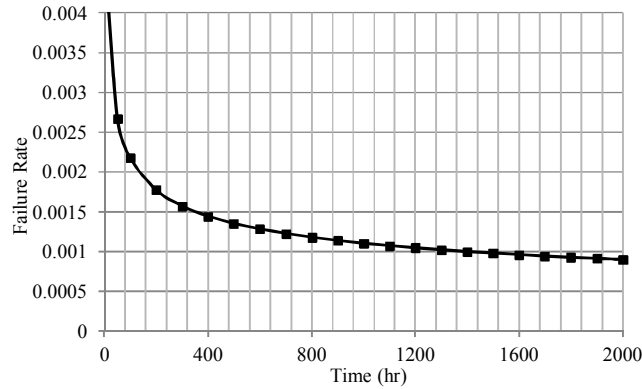
$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0013 \left(\frac{t}{530.4}\right)^{-0.294}$$



شکل ۵-۳۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۳۰))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین پس از حدود ۴۵۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۵۵ ساعت و یا در پایان شیفت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین، پس از حدود ۳۰۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

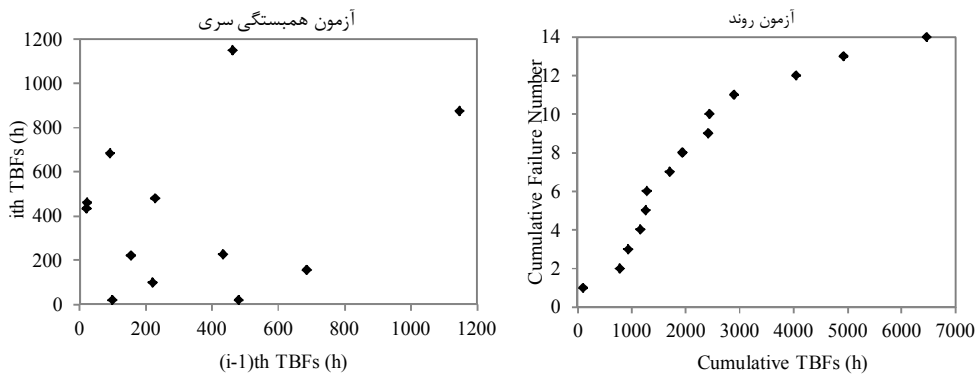


شکل ۵-۳۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۳۱))، زیرسیستم حفاری دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) تقریباً برابر با  $0/0042$  خرابی در ساعت بوده و پس از ۵۵ ساعت (سطح قابلیت اطمینان ۸۰ درصد)، به سرعت کاهش و به مقدار  $0/003$  می‌رسد. با گذشت حدود ۴۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی با یک روند ملایم‌تر کاهش می‌یابد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۶-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

#### ۵-۶-۵-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۳۲- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۳

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۱۹- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۳

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۱۴	۲۶	۴۷/۶۷	رد نمی‌شود ( $U > ۱۵/۴$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۳۲))، نحوه قرارگیری نقاط بسیار به حالت خطی نزدیک است. با این وجود، با بهره‌گیری از روش تحلیلی (جدول (۵-۱۹))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۵/۴)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این، با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۳۲))، 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 حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۶-۵-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در جدول (۵-۲۰) ارائه شده است. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۵۲۸/۴) برابر است. با این وجود، با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع ویبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۵-۲۰- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۱۲۵۸	۵۰۸
Weibull-۲P			۰/۱۶۹۸	۵۷۱/۹
Log-normal			۰/۰۸۶۱	۵۱۳/۵
Gamma			۰/۱۲۴۳	۵۰۴/۲
Weibull-۲P			۰/۱۰۷۸	۴۴۳/۹
پارامترهای بهترین توزیع: $\mu=۵/۸۹۹$ $\sigma=۰/۸۲۷۳$		MTBF واقعی: ۵۰۴/۴ ساعت		

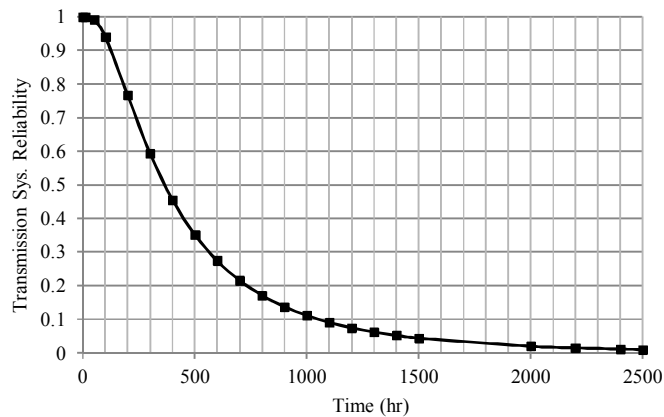


۵-۶-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی های معادل با این روابط به ترتیب در شکل های (۳۳-۵) و (۳۴-۵) آورده شده است.

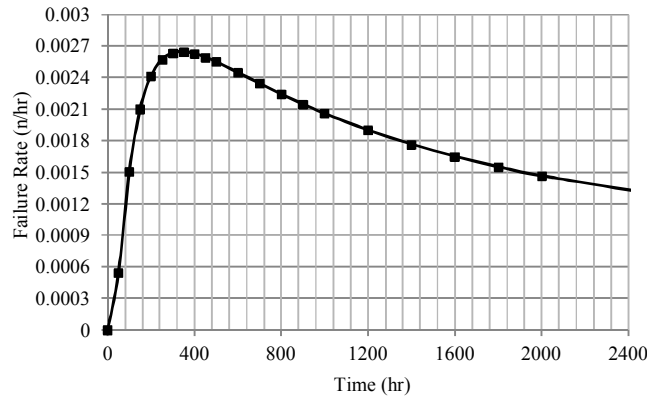
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 5.899}{0.8273}\right)^2\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2) dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 5.899)^2)}{1.369t \int_0^t \exp(-(\ln(x) - 5.899)^2 / 1.369) dx}$$



شکل ۳۳-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان (شکل (۳۳-۵))، نشان می دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت پس از حدود ۲۵۰۰ ساعت به حدود صفر می رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می یابد و پس از ۱۶۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۳، پس از حدود ۳۶۰ ساعت، ۵۰٪ کاهش می یابد.



شکل ۵-۳۴- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

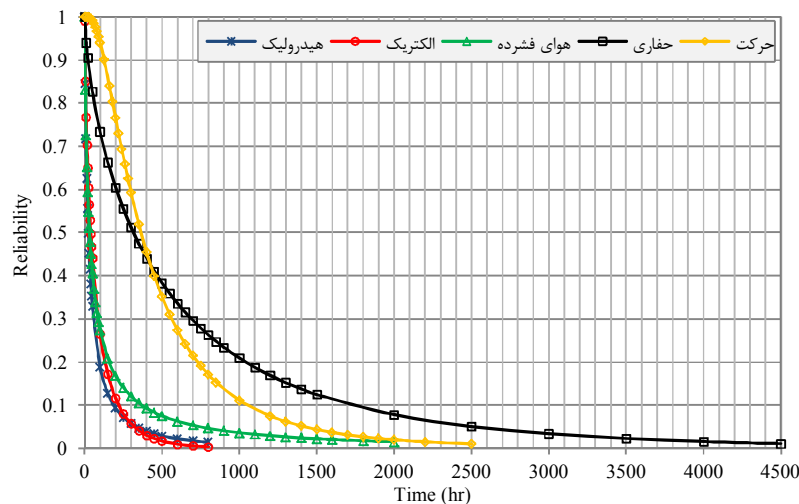
منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۵-۳۴) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین تقریباً برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و از گذشت ۱۰۰ ساعت از فعالیت آن به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۰۱۵ می‌رسد. پس گذشت ۳۵۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین، نرخ خرابی به صورت نمایی کاهش یافته در زمان ۶۰۰ ساعت، به ۰/۰۰۲۴ خرابی در ساعت می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید در زمان شروع به کار و نرخ خرابی کاهشی شدید پس از حدود ۳۵۰ ساعت از شروع به فعالیت آن است.

### ۵-۶-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه، در شکل (۵-۳۵) آورده شده است. با توجه به شکل، مشخص می‌شود که زیرسیستم‌های الکتریک، هیدرولیک و هوای فشرده دارای رفتار مشابهی در قابلیت اطمینان هستند. زیرسیستم‌های هیدرولیک و الکتریک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه پس از حدود ۸۰۰ ساعت متوقف خواهد شد. در حالی که زیرسیستم هوای فشرده، پس از ۲۰۰۰ ساعت متوقف

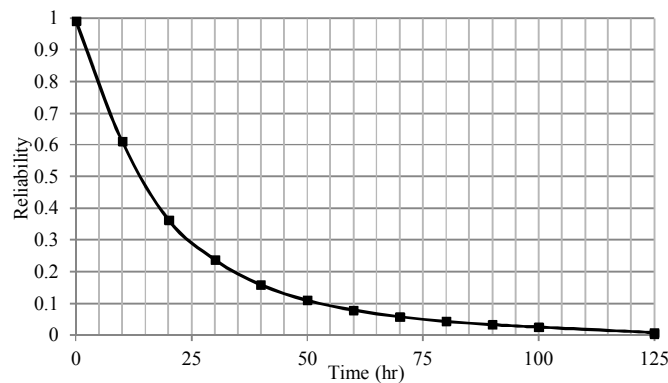
## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

می‌شود. زیرسیستم حرکت دستگاه تا قبل از ۴۵۰ ساعت، دارای بالاترین قابلیت اطمینان نسبت به سایر زیرسیستم‌ها است. در این زمان (۴۵۰ ساعت)، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های حرکت و حفاری دستگاه به ۴۰ درصد کاهش یافته و از این زمان به بعد، زیرسیستم حفاری دستگاه، قابل اعتمادترین زیرسیستم دستگاه خواهد بود.



شکل ۵-۳- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات دستگاه حفاری به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه نمود. با استفاده از این رابطه، قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۵-۳۶) ارائه شده است.



شکل ۵-۳۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

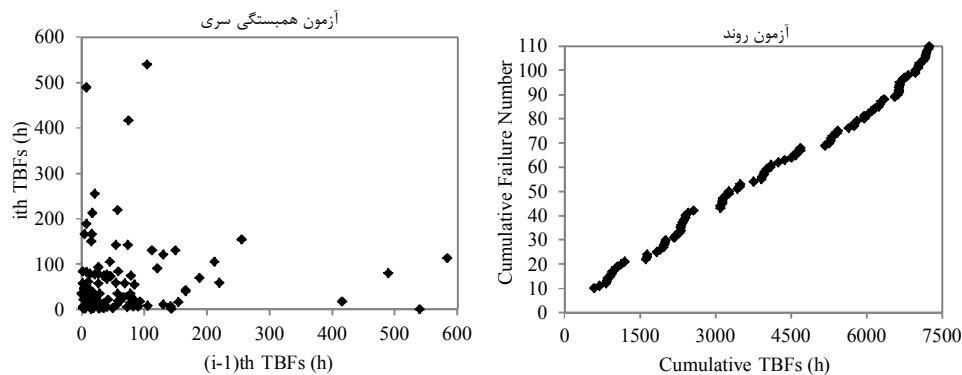
## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

با توجه به منحنی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۳۶))، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه پس از طی ۱۲۵ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۳، پس از ۴ ساعت از شروع به فعالیت آن (یعنی در اوسط شیفت)، ۲۰ درصد کاهش یافته و به حدود ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان این ماشین، با گذشت حدود ۱۴ ساعت به ۵۰٪ کاهش می‌یابد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان، مشخص می‌شود که به طور میانگین در هر ساعت ۰/۸ درصد از قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه کاسته می‌شود.

### ۵-۷- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

#### ۵-۷-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

#### ۵-۷-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۳۷- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۶

جدول ۵-۲۱- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی ماشین ۲۱۰۶

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 78/74$ )	۲۷۰/۲۲	۲۰۰	۱۰۱

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۳۷))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

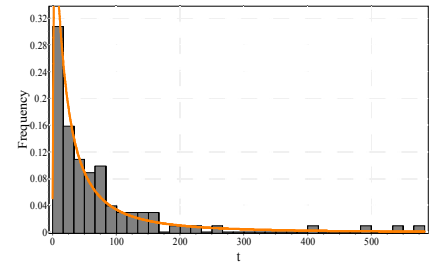
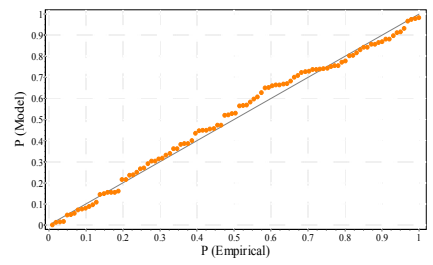
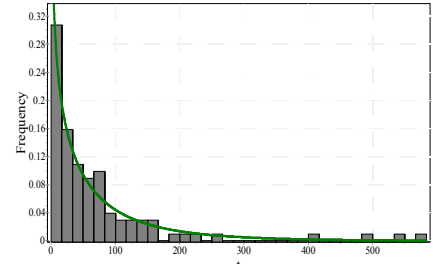
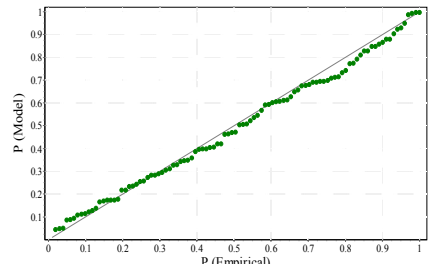
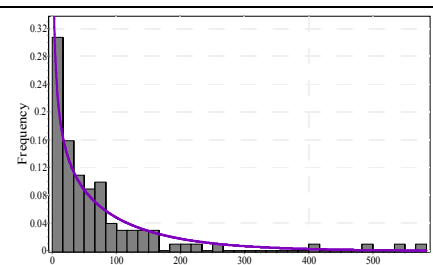
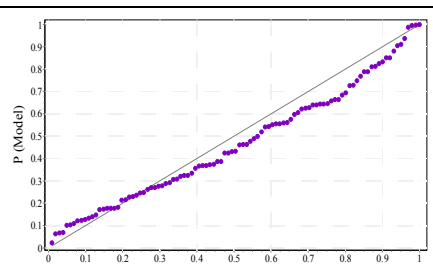
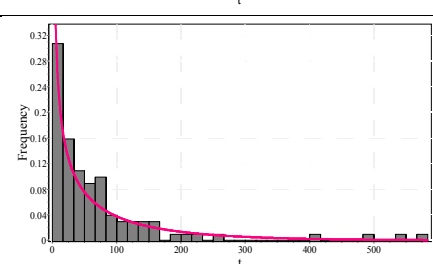
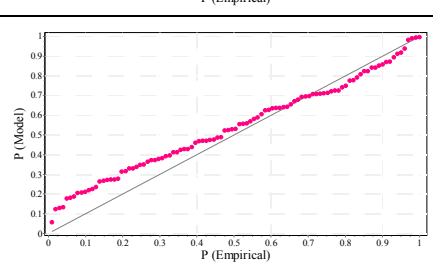
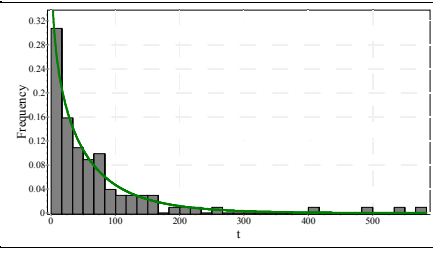
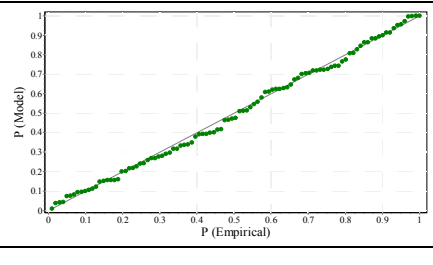
جدول (۵-۲۱)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۷۸/۷۴)، فرض صفر رد نمی شود. با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۶-۳۷))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۷-۱-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۲۲) ارائه شده است. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۷۱/۶۹) برابر و دارای اختلاف جزئی با سایر توابع توزیع است. با این وجود با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶، در نظر گرفته شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۵-۲۲- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶

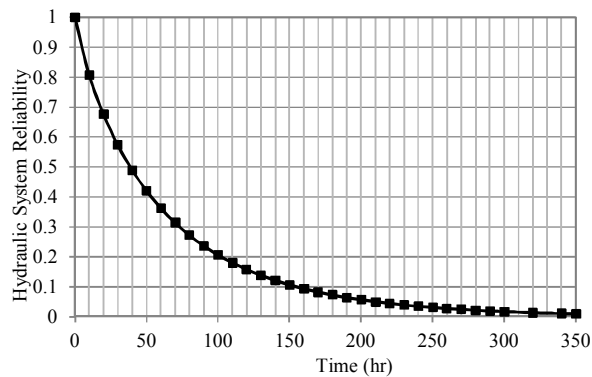
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۰۷۵۲	۸۵/۸۵
Weibull-۳P			۰/۰۶۹۴	۷۳/۴۸
Gen. Gamma			۰/۱۲۰۳	۸۱/۹
Gamma			۰/۱۳۷۹	۷۱/۶۹
Weibull-۲P			۰/۰۴۸۹	۶۳/۵۱
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۰/۸۶۵۵$ $\beta=۵۹/۰۲$		MTBF واقعی: ۷۱/۶۹ ساعت		

### ۵-۷-۱-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۳۸) و (۵-۳۹) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{59.02}\right)^{0.8655}\right)$$

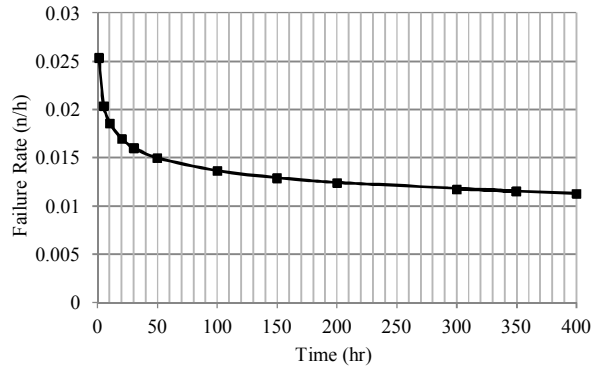
$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0146 \left(\frac{t}{59.02}\right)^{-0.1345}$$



شکل ۵-۳۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۳۸))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک پس از حدود ۳۵۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است 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. قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین پس از حدود ۴۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

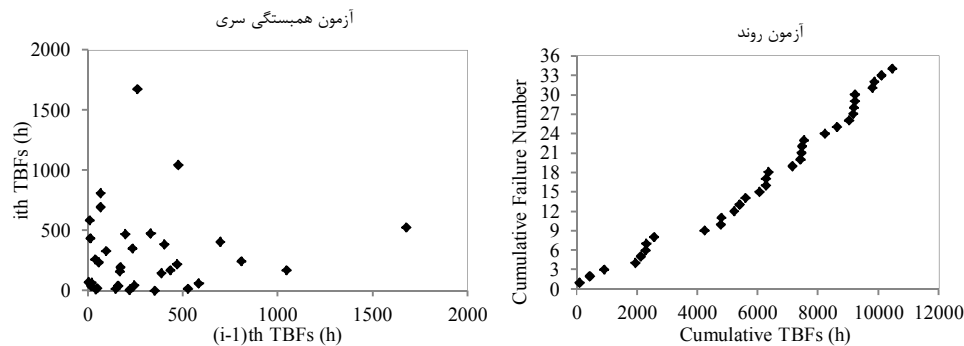


شکل ۵-۳۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۳۹))، زیرسیستم هیدرولیک دارای رفتار خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با  $0/026$  خرابی در ساعت بوده و پس از ۳۰ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار  $0/016$  می‌رسد. با گذشت حدود ۱۰۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی با یک روند ملامت‌تر کاهش یافته به مقدار  $0/014$  می‌رسد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۷-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

#### ۵-۷-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۴۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها

جدول ۵-۲۳- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 21/82$ )	۵۵/۱۹	۶۶	۳۴

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۴۰))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی



## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۲۳))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۲۱/۸۲)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۴۰))، 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 الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، فرآیند تجدید شونده است.

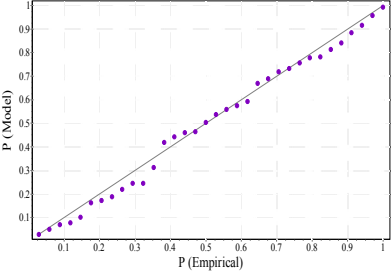
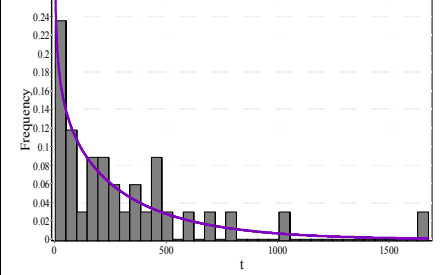
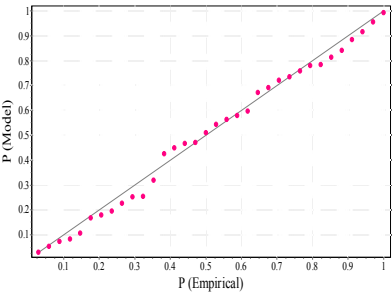
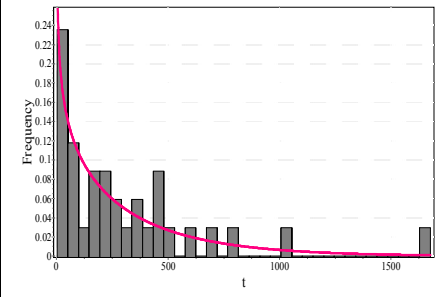
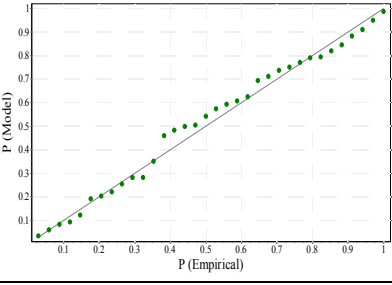
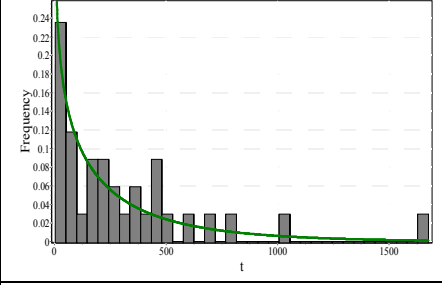
### ۵-۷-۲-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۲۴) ارائه شده است. با توجه به میزان MTBF، مشاهده می‌شود که میانگین زمان خرابی‌های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۳۰۷/۳) برابر است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶، در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۲۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۱۴۳۵	۴۱۶/۶
Weibull-۳P			۰/۰۹۵۴	۳۲۰/۶

ادامه جدول ۵-۲۴

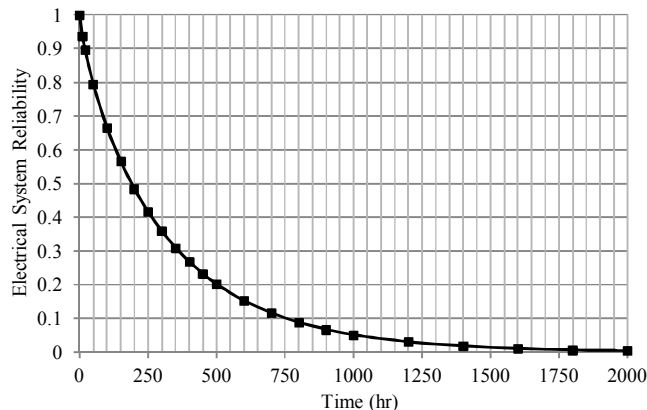
۳۰۸/۷	۰/۰۷۸			Gen. Gamma
۳۰۷/۳	۰/۰۷۱۷			Gamma
۳۰۵	۰/۱۰۵			Weibull-p
		پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=۰/۷۷۵۱$ $\beta=۳۹۶/۵$		
		MTBF واقعی: ۳۰۷/۳ ساعت		

### ۵-۷-۲-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۴۱) و (۵-۴۲) آورده شده است.

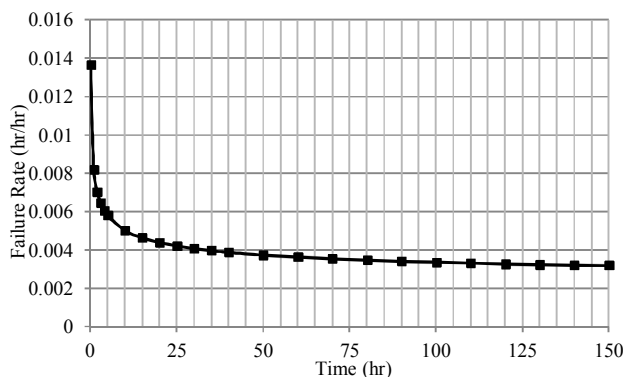
$$R_{Electrical}(t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{t \beta^{\alpha} \Gamma(\beta)} s^{\alpha-1} e^{-\frac{s}{\beta}} ds = \int_0^{\infty} \frac{0.097}{t \Gamma(396.5)} s^{-0.225} e^{-\frac{s}{396.5}} ds$$

$$\lambda_{Electrical}(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha) [1 - \Gamma(\frac{t}{\beta}; \alpha)]} = \frac{t^{-0.4} e^{-\frac{t}{396.5}}}{103.25 \Gamma(0.7751) [1 - \Gamma(\frac{t}{396.5}; 0.7751)]}$$



شکل ۴۱-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۴۱))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک پس از حدود ۲۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ۵۰ ساعت از شروع به فعالیت دستگاه به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین پس از حدود ۱۸۰ ساعت به ۵۰ کاهش می‌یابد.



شکل ۴۲-۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

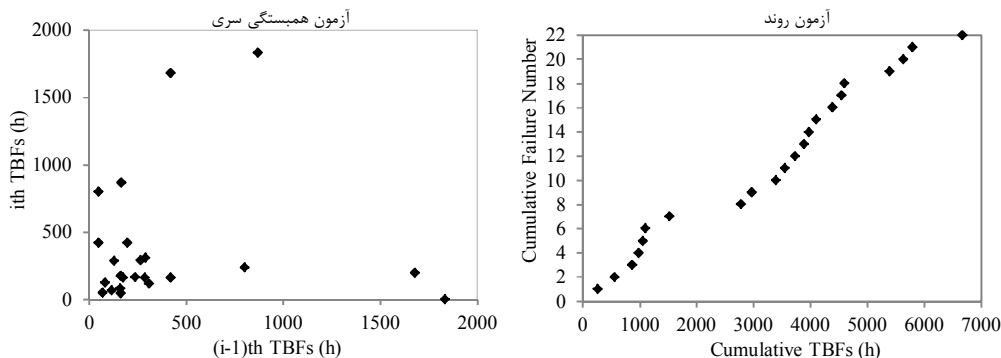
با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۴۲))، زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ دارای رفتار خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با ۰/۰۱۴ خرابی در ساعت بوده و پس از ۵ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار ۰/۰۰۶ می‌رسد. با گذشت حدود ۲۵ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی با یک روند ملام‌تر کاهش یافته می‌یابد. بر اساس این

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

منحنی، زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۷-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

#### ۵-۷-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۴۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۶

جدول ۵-۲۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۶

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۳۱/۴۸$ )	۶۶/۵۱	۴۶	۲۴

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۴۳)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول ۵-۲۵)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۳۱/۴۸)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۴۳)، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، فرآیند تجدید شونده است.

۵-۷-۳-۲- تحلیل داده‌ها

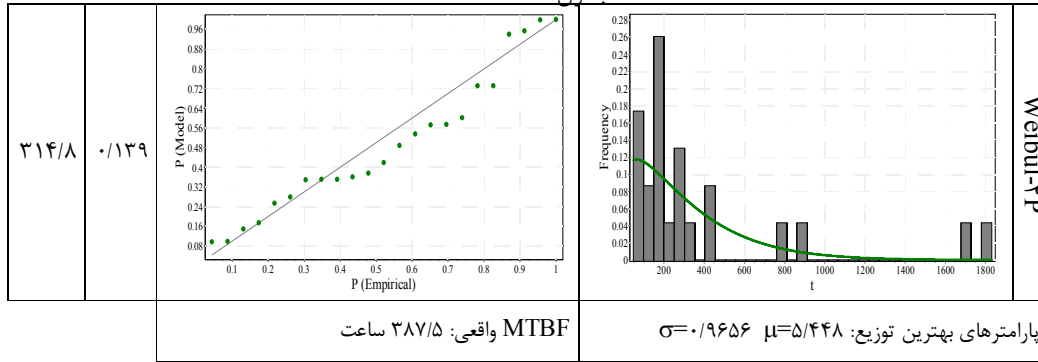
نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۶-۲۶) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ‌نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۲۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۱۲۴	۳۷۰/۳
Weibull-۳P			۰/۱۸۷۴	۴۲۳/۷
Gen. Gamma			۰/۲۳۰۴	۴۳۳/۷
Gamma			۰/۲۰۶۲	۳۸۷/۴

فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۵-۲۶

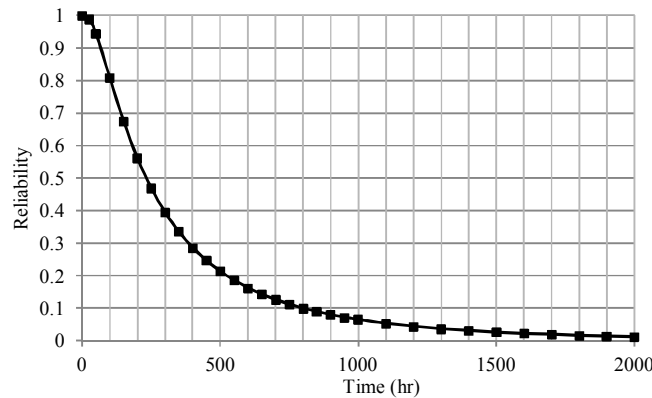


۵-۷-۳-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۴۴-۵) و (۴۵-۵) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 5.448}{0.9656}\right)^2\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2) dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 5.448)^2)}{1.865t \int_0^t \exp(-(\ln(x) - 5.448)^2 / 1.865) dx}$$

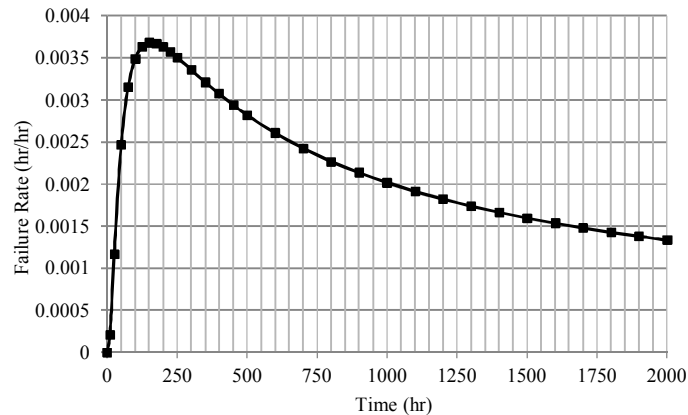


شکل ۴۴-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۴۴-۵))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده پس از حدود ۲۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

اطمینان این زیرسیستم پس از ۱۰۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین پس از حدود ۲۲۰ ساعت به ۵۰ کاهش می‌یابد.

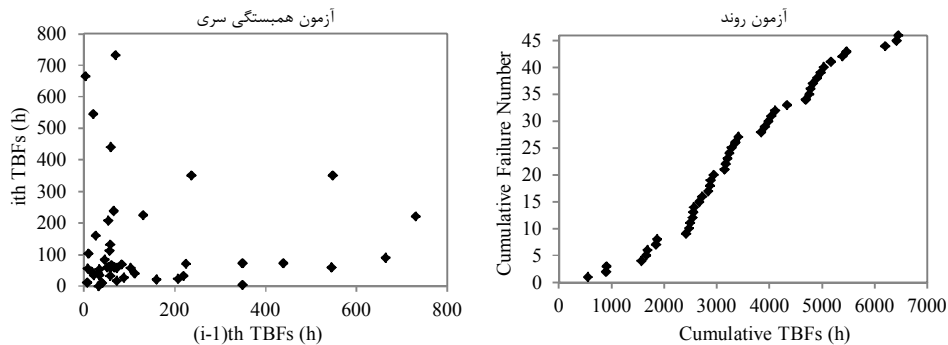


شکل ۵-۴۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۵-۴۵) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار دستگاه برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و از گذشت ۲۵ ساعت از فعالیت دستگاه به طور ناگهانی افزایش و به ۰/۰۰۱۱ می‌رسد. در زمان ۱۲۵ ساعت پس از شروع به فعالیت ماشین، نرخ خرابی به حداکثر مقدار خود یعنی ۰/۰۰۳۶ افزایش می‌یابد. پس از این زمان، نرخ خرابی به صورت نمایی کاهش یافته در زمان ۵۰۰ ساعت، به ۰/۰۰۲۸ خرابی در ساعت می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید تا ۱۲۵ ساعت پس از شروع به فعالیت بوده و پس از این زمان، به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

۵-۷-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

۵-۷-۴-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۴۶- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۶

جدول ۵-۲۷- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی حفاری ماشین ۲۱۰۶

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۶۹/۱$ )	۱۱۸/۲۵	۹۰	۴۶

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۴۶)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول ۵-۲۷) با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی ( $۶۹/۱$ )، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۴۶)، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، فرآیند تجدید شونده است.



۵-۷-۴-۱- تحلیل داده‌ها

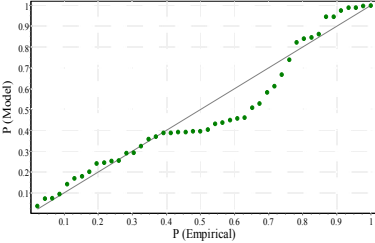
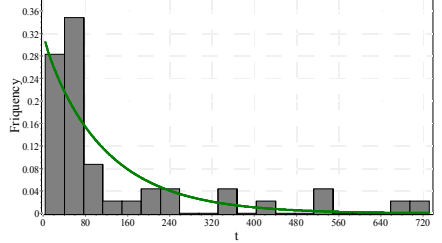
نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۲۸) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶، در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۲۸- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۱۲۶۴	۱۴۳/۸
Weibull-۲P			۰/۱۶۵۸	۱۵۰/۵
Gen. Gamma			۰/۲۱۱۹	۱۵۴/۶
Gamma			۰/۱۴۶۶	۱۴۰/۲

## فصل پنجم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۵-۲۸

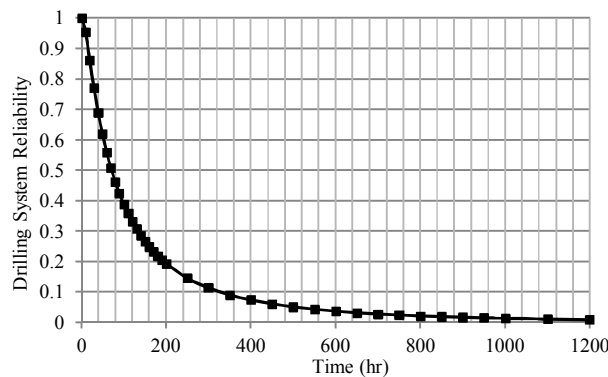
۱۲۰	۰/۱۷۰۳		
		MTBF واقعی: ۱۴۰/۲ ساعت	پارامترهای بهترین توزیع: $\mu=4/278$ $\sigma=1/175$

### ۵-۷-۴-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۴۷) و (۵-۴۸) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 4.278}{1.175}\right)^2\right)$$

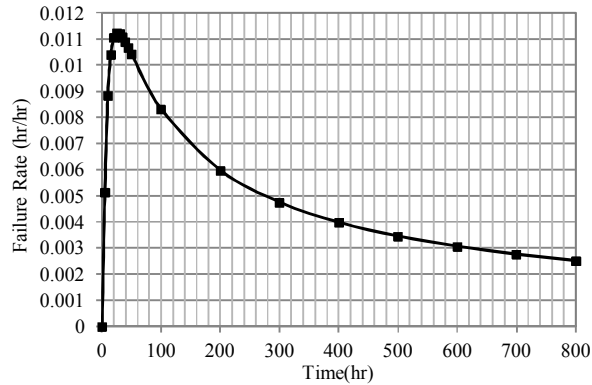
$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2) dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 4.278)^2)}{2.761t \int_0^t \exp(-(\ln(x) - 4.278)^2 / 2.761) dx}$$



شکل ۵-۴۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۴۷))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری پس از حدود ۱۲۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ۲۵ ساعت از شروع به فعالیت ماشین به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین پس از حدود ۷۰ ساعت به ۵۰ کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

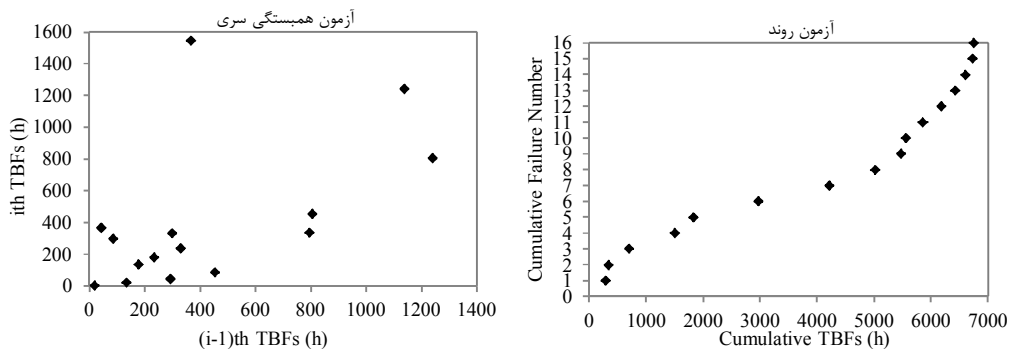


شکل ۵-۴۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۵-۴۸) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار دستگاه برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و از گذشت ۱۰ ساعت از فعالیت دستگاه به طور ناگهانی افزایش و به  $0.0088$  می‌رسد. در زمان ۲۵ ساعت و یا در شرایطی که قابلیت اطمینان این زیرسیستم به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد، نرخ خرابی به حداکثر مقدار خود یعنی  $0.011$  افزایش می‌یابد. پس از این زمان، نرخ خرابی به صورت نمایی کاهش یافته و در زمان ۲۰۰ ساعت، به  $0.006$  خرابی در ساعت می‌رسد. به این ترتیب زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید تا ۲۵ ساعت پس از شروع به فعالیت بوده و پس از این زمان به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

### ۵-۷-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

#### ۵-۷-۵-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۴۹- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۶

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۲۹- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۶

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۱۶	۳۰	۲۷	رد نمی‌شود ( $U > ۱۸/۵$ )	فرآیند تجدید شونده

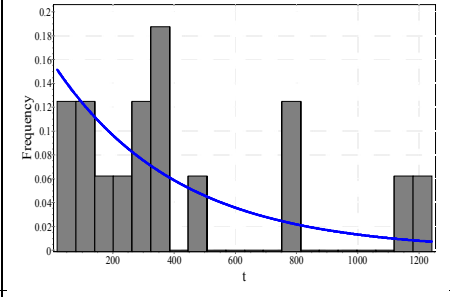
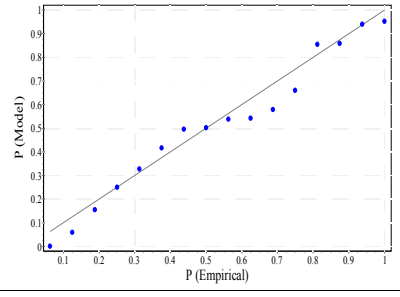
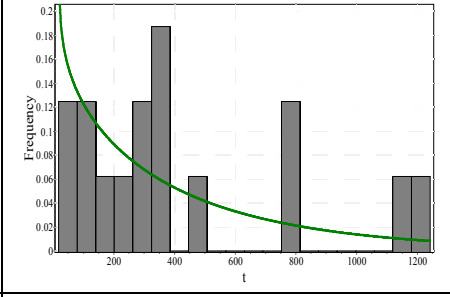
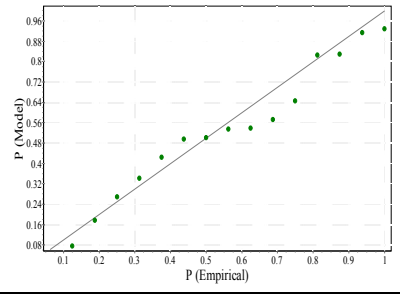
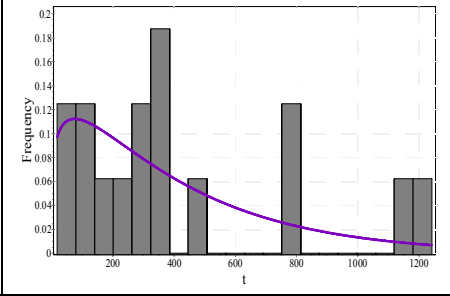
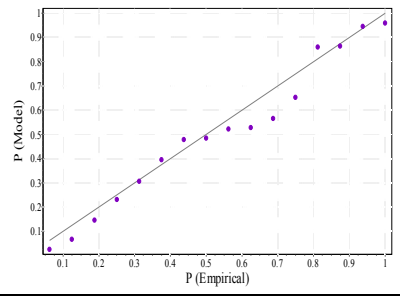
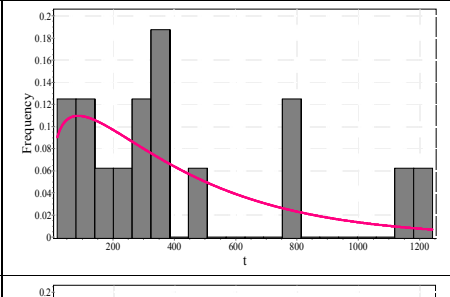
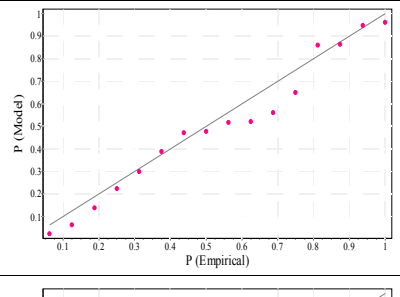
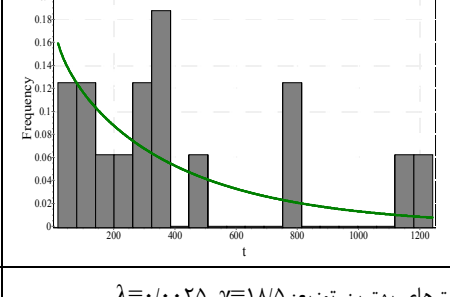
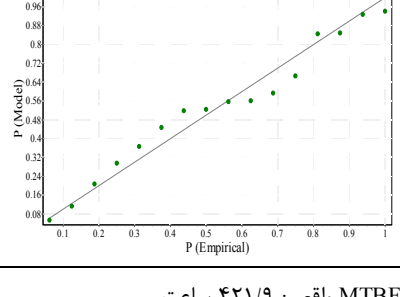
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۴۹))، نحوه قرارگیری نقاط تقریباً به حالت خطی نزدیک است. با این وجود برای اطمینان و رفع ابهام آزمون تحلیلی مورد ملاک قرار گرفته است. در روش تحلیلی (جدول (۵-۲۹))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۸/۵)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این، با توجه 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 (۵-۴۹))، نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده‌ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۷-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۳۰) ارائه شده است. با این وجود، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، در نظر گرفته شده است.

فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۵-۳۰- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

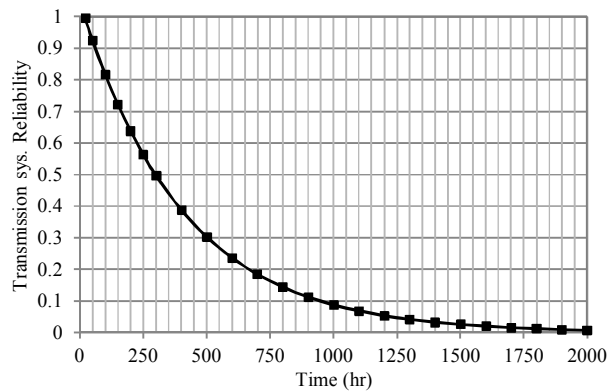
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۱۱۹۲	۴۱۸/۵
Weibull-۳P			۰/۱۲۰۵	۴۵۷/۶
Gen. Gamma			۰/۱۲۲۲	۴۱۹/۹
Gamma			۰/۱۲۷۸	۴۴۲
Weibull-۲P			۰/۱۴۲۵	۴۲۲/۵
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=۰/۰۰۲۵$ $\gamma=۱۸/۵$		MTBF واقعی: ۴۲۱/۹ ساعت		

### ۵-۷-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۵) و (۵-۵۱) آورده شده است.

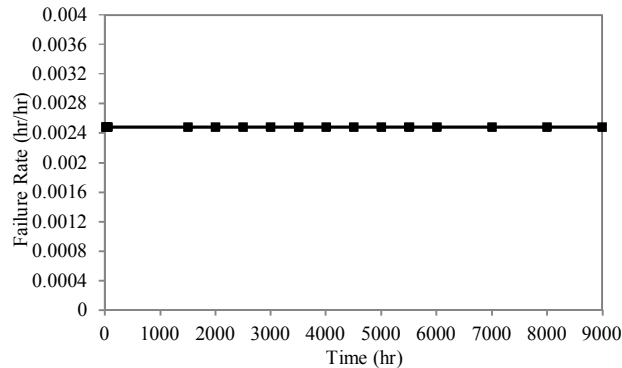
$$R(t) = \exp(-\lambda(t - \gamma)) = \exp(-0.0025(t - 18.5))$$

$$\lambda(t) = \lambda = 0.0025$$



شکل ۵-۵۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۵)) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت پس از حدود ۲۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان این زیرسیستم پس از ۱۱۰ ساعت از شروع به فعالیت دستگاه به ۸۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت، پس از حدود ۳۰۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

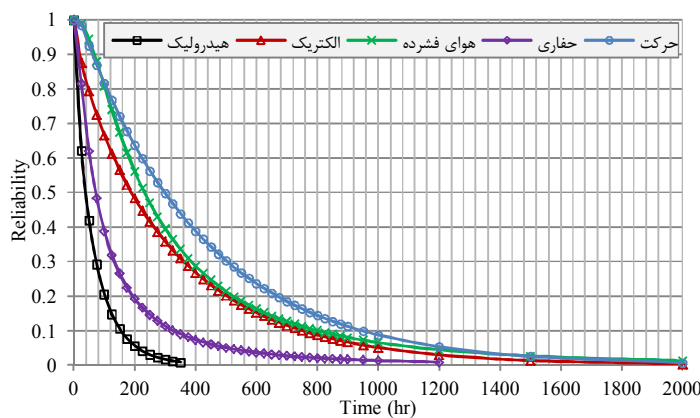


شکل ۵-۵۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۵-۵۱) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت و برابر با  $0.0025$  خرابی در ساعت در تمام مدت فعالیت خود است. با مقایسه این منحنی با منحنی وان حمام، مشخص می‌شود که زیرسیستم حرکت این ماشین در دوره عمر طبیعی خود به سر می‌برد.

#### ۵-۷-۶- مدلسازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

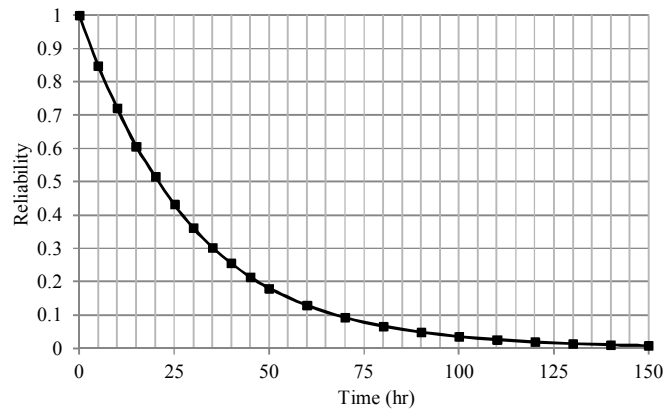
برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه، در شکل (۵-۵۲) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم‌های حرکت، هوای فشرده و الکتریک، دارای رفتار مشابهی در قابلیت اطمینان بوده و پس از ۲۰۰۰ ساعت، متوقف خواهند شد. با این وجود، زیرسیستم حرکت نسبت به دو زیرسیستم الکتریک و هوای فشرده از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است. زیرسیستم‌های هیدرولیک و حفاری نسبت به سایر زیرسیستم‌های ماشین، قابلیت اطمینان پایین‌تری داشته و به ترتیب پس از ۳۵۰ و ۱۲۰۰ ساعت متوقف می‌شوند.



شکل ۵-۵۲- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات دستگاه حفاری به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه نمود. با استفاده از رابطه (۲-۶)، قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۵-۵۳) ارائه شده است.



شکل ۵-۵۳- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

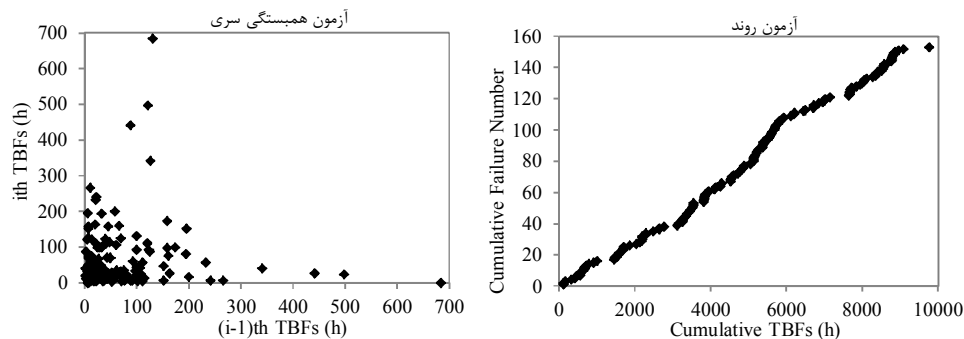
با توجه به منحنی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۵۳))، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه پس از گذشت ۱۵۰ ساعت به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان دستگاه پس از حدود ۸ ساعت از شروع به فعالیت آن (یعنی در پایان شیفت)، ۲۰ درصد کاهش یافته و به حدود ۸۰ درصد می‌رسد. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان دستگاه مشخص می‌شود قابلیت اطمینان دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه پس از حدود ۱۱ و ۱۹ ساعت، به ترتیب به ۷۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابند. علاوه بر این، به طور میانگین در هر ساعت ۰/۷ درصد از قابلیت اطمینان ماشین کاسته می‌شود.



## ۵-۸- مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

### ۵-۸-۱- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

#### ۵-۸-۱-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۵۴- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۷

جدول ۵-۳۱- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین ۲۱۰۷

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > 124/14$ )	۲۹۶/۵۶	۳۰۴	۱۵۳

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۵۴)، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این با توجه به روش تحلیلی (جدول ۵-۳۱)، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۱۲۴/۱۴)، فرض صفر رد نمی‌شود. با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل ۵-۵۴)، 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 هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، فرآیند تجدید شونده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

### ۵-۸-۱-۲- تحلیل داده ها

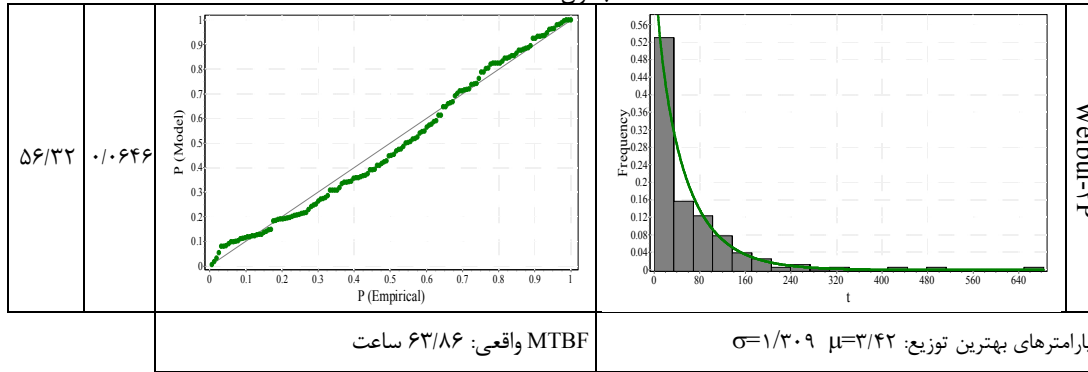
نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۳۲) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع لاگ نرمال به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۳۲- نتایج تحلیل داده های خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۰۴۶۶ ۷۲/۰۱
Weibull-۳P			۰/۰۷۵۷ ۶۴/۹۶
Gen. Gamma			۰/۰۱۰۷ ۷۲/۹۸
Gamma			۰/۱۷۲۵ ۶۳/۸۶

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۵-۳۲

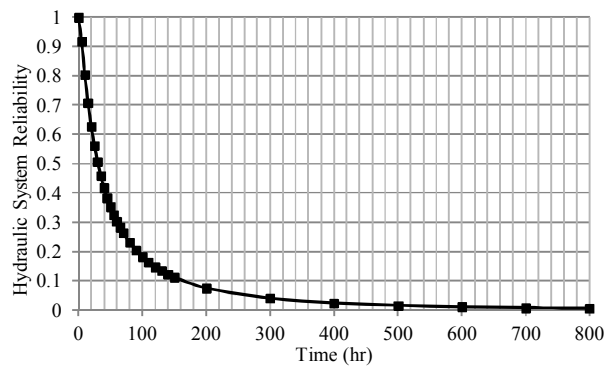


### ۵-۸-۱-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۵۵) و (۵-۵۶) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - 3.42}{1.309}\right)^2\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{\exp(-(\ln(t) - \mu)^2)}{2t\sigma^2 \int_0^t \exp(-(\ln(x) - \mu)^2 / 2\sigma^2) dx} = \frac{\exp(-(\ln(t) - 3.42)^2)}{3.427t \int_0^t \exp(-(\ln(x) - 3.42)^2 / 3.427) dx}$$

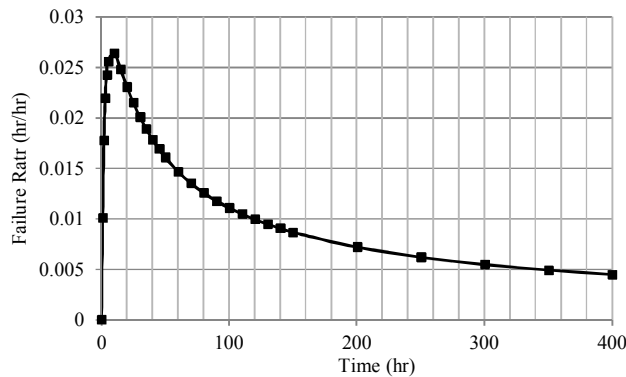


شکل ۵-۵۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل ۵-۵۵)، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک پس از حدود ۸۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۱۰

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک دستگاه پس از حدود ۳۰ ساعت به نصف کاهش می یابد.

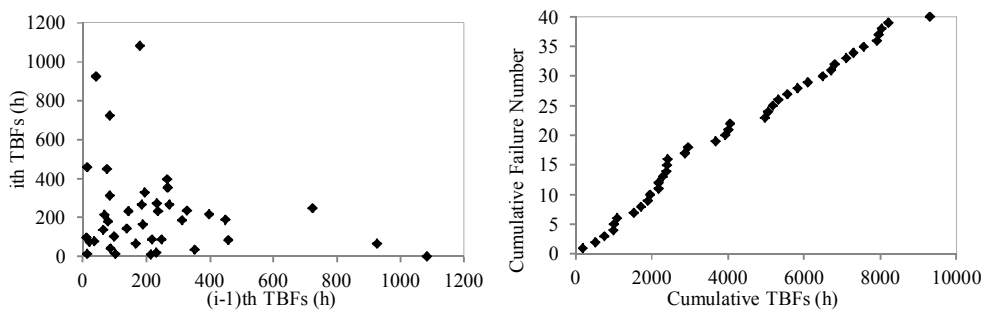


شکل ۵-۵۶- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

منحنی معمول نرخ خرابی توزیع لاگ نرمال به صورت شکل (۵-۵۶) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، نرخ خرابی در لحظه شروع به کار ماشین برابر با صفر خرابی در ساعت بوده و از گذشت تنها ۱۰ ساعت از فعالیت ماشین به طور ناگهانی افزایش و به بیشترین مقدار خود یعنی ۰/۰۲۶ می رسد. پس از این زمان، نرخ خرابی به صورت نمایی کاهش یافته در زمان ۶۰ ساعت، به ۰/۰۱۵ خرابی در ساعت می رسد. به این ترتیب، زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی افزایشی شدید تا قبل از ۱۰ ساعت و نرخ خرابی کاهشی نمایی پس از این زمان است.

### ۵-۸-۲- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

#### ۵-۸-۲-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده ها



شکل ۵-۵۷- آزمون روند و همبستگی سری داده های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۷

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۳۳- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین ۲۱۰۷

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۴۰	۷۸	۸۵/۴۸	رد نمی‌شود ( $U > ۲۶/۵$ )	فرآیند تجدید شونده

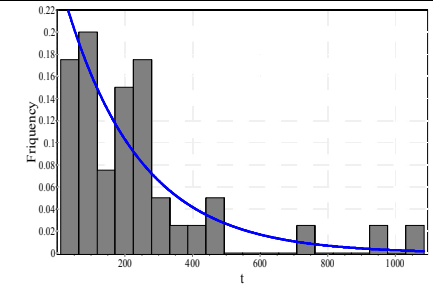
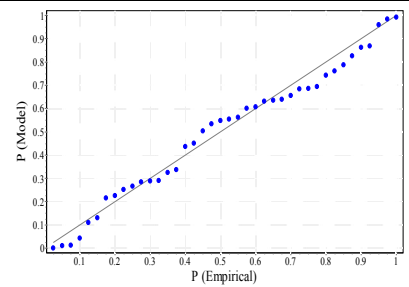
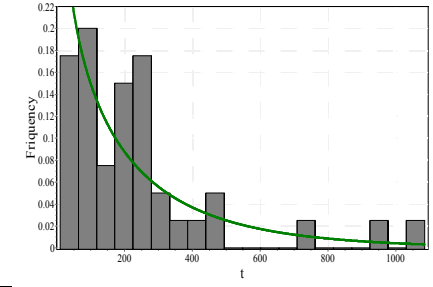
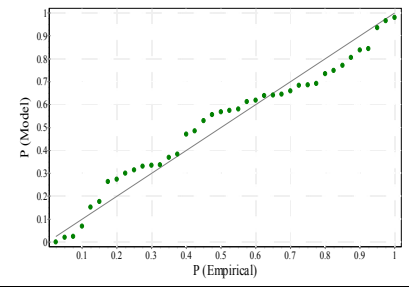
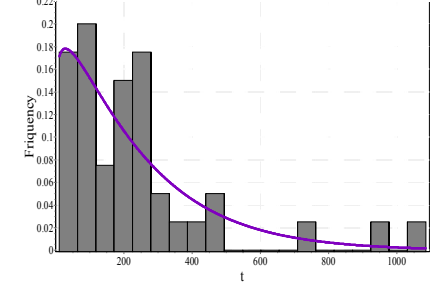
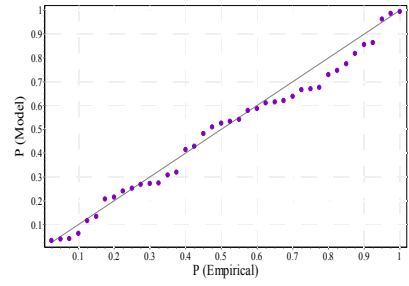
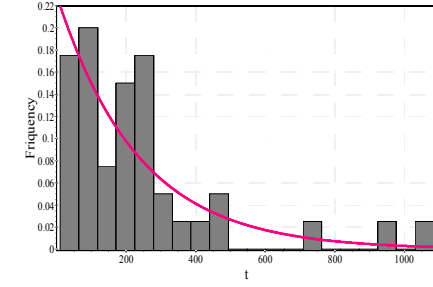
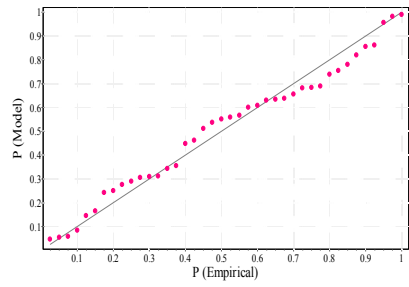
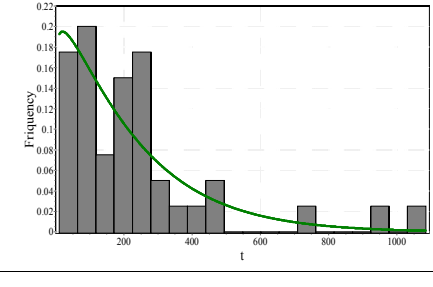
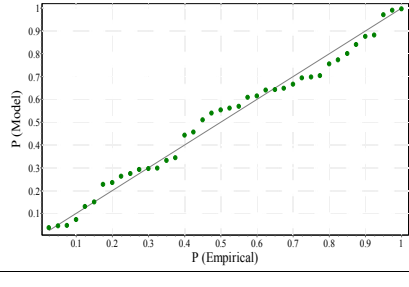
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۵۷))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۳۳))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۲۶/۵)، فرض صفر رد نمی‌شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۵۷))، 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. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۸-۲-۲- تحلیل داده‌ها

نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۳۴) ارائه شده است. با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار در آزمون K-S، تابع نمایی به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۳۴- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

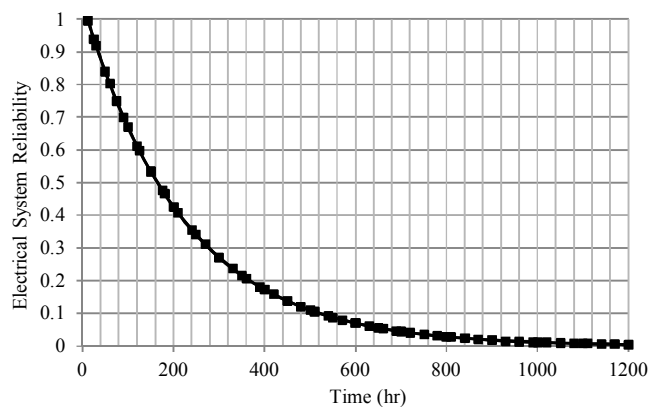
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Exponential			۰/۰۸۲۷	۲۳۳/۳
Weibull-r-P			۰/۱۱۴۷	۲۴۷/۶
Gen. Gamma			۰/۰۹۹۳	۲۳۷/۱
Gamma			۰/۰۹۲۶	۲۳۲/۷
Weibull-r-P			۰/۰۸۹۱	۲۲۱
پارامترهای بهترین توزیع: $\lambda=۰/۰۰۴۵$ $\gamma=۱۱/۱۲$		MTBF واقعی: ۲۳۲/۶ ساعت		

### ۵-۸-۲-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵۸-۵) و (۵۹-۵) آورده شده است.

$$R(t) = \exp(-\lambda(t - \gamma)) = \exp(-0.0045(t - 11.12))$$

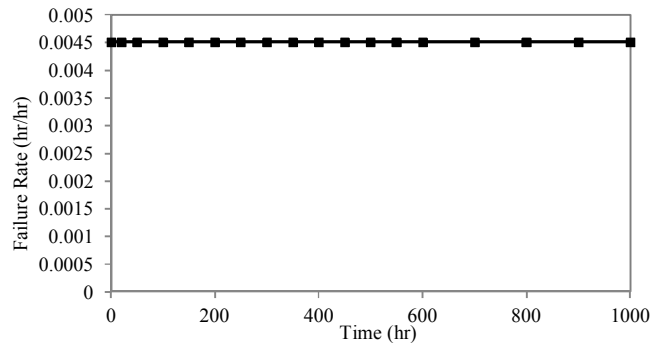
$$\lambda(t) = \lambda = 0.0045$$



شکل ۵-۵۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵۸-۵))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک پس از حدود ۱۲۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار ماشین، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۶۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم الکتریک ماشین پس از حدود ۱۷۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

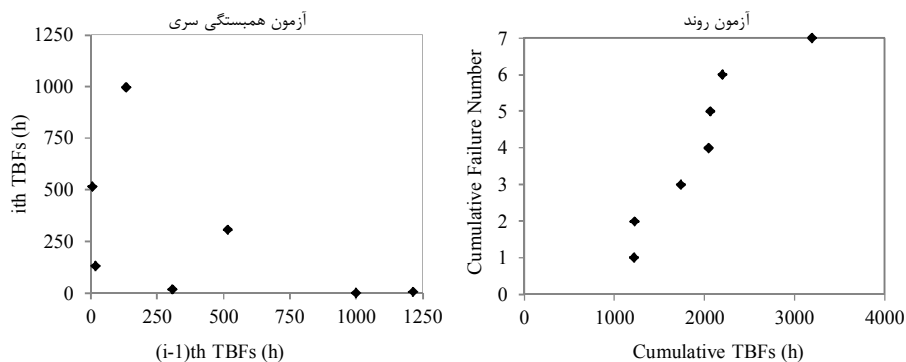


شکل ۵-۵۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

منحنی نرخ خرابی تابع نمایی به صورت شکل (۵-۵۹) است. با توجه به منحنی نرخ خرابی، زیرسیستم الکتریک ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه دارای نرخ خرابی ثابت و برابر با  $0.0045$  خرابی در ساعت در تمام مدت فعالیت خود است.

### ۵-۸-۳- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم هوای فشرده ماشین حفاری ۲۱۰۷

#### ۵-۸-۳-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۶۰- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۷

جدول ۵-۳۵- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین ۲۱۰۷

روش مدل‌سازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمی‌شود ( $U > ۶/۵۷$ )	۲۲/۲۹	۱۴	۸

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۶۰))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده‌ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی



## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

(جدول (۵-۳۵))، با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۶/۵۷)، فرض صفر رد نمی شود. علاوه بر این با توجه به آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۶۰))، داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۸-۳-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۳۶) ارائه شده است. با توجه به مقدار MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۴۵۵/۶) برابر است. با این وجود، با در نظر گرفتن کمترین مقدار در آزمون K-S، تابع جین گاما به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

جدول ۵-۳۶- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶

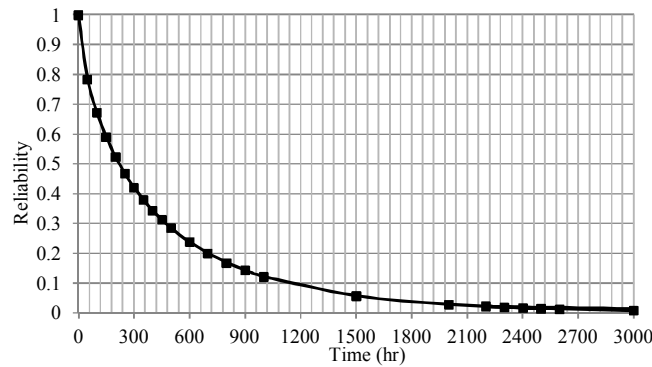
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون میانگین K-S (ساعت)
Lognormal			۰/۲۰۷۳ ۹۶۵/۷
Weibull-rP			۰/۳۳۸۳ ۲۷۷/۲
Gen. Gamma			۰/۱۷۵۸ ۴۳۶
Gamma			۰/۲۳۶۵ ۴۵۵/۶
Weibull-rP			۰/۲۰۳۴ ۸۱۱/۹
پارامترهای بهترین توزیع: $k=۰/۸۳۲$ $\alpha=۰/۷۹۷$ $\beta=۵۰۹/۵$		MTBF واقعی: ۴۵۵/۶ ساعت	

### ۵-۸-۳-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۶۱) و (۵-۶۲) آورده شده است.

$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma_{(t/\beta)^k}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = 1 - \frac{\Gamma_{(t/509.5)^{0.8325}}(0.797)}{\Gamma(0.797)}$$

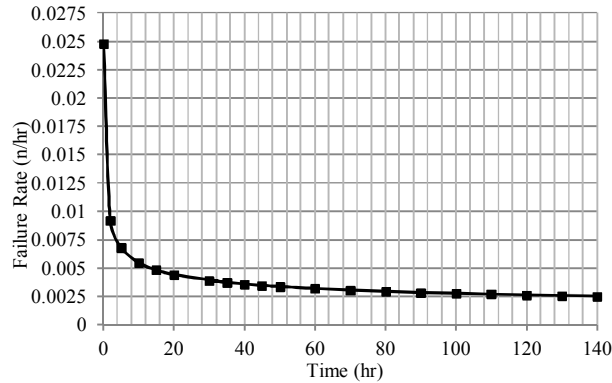
$$\lambda(t) = \frac{\frac{k(t^{k\alpha-1})}{\beta^{k\alpha} \Gamma(\alpha)} \exp(-(t/\beta)^k)}{1 - \frac{\Gamma_{(t/\beta)^k}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}} = \frac{0.0136t^{-0.336} \exp(-(t/509.5)^{0.8325})}{\Gamma(0.797) \left(1 - \frac{\Gamma_{(t/509.5)^{0.8325}}(0.797)}{\Gamma(0.797)}\right)}$$



شکل ۵-۶۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۶۱))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده پس از حدود ۳۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار ماشین، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۴۵ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه، پس از حدود ۲۲۰ ساعت به نصف کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

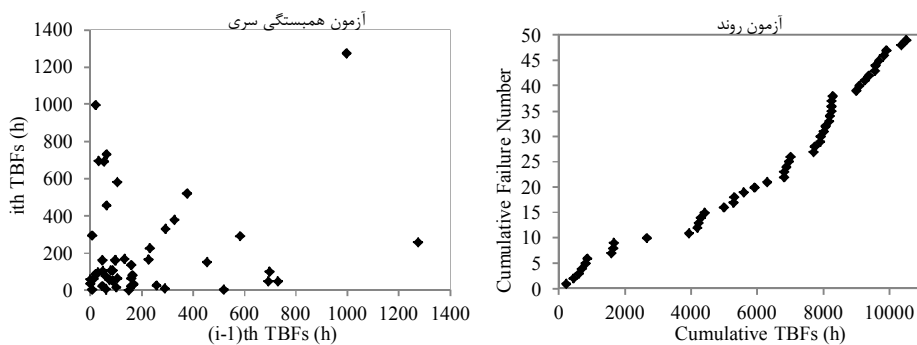


شکل ۵-۶۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

با توجه به نمودار نرخ خرابی (۵-۶۲)، این زیرسیستم دارای رفتار خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با ۰/۰۲۵ خرابی در ساعت بوده و پس از ۵ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار ۰/۰۰۷ می‌رسد. با گذشت حدود ۳۰ ساعت از شروع به کار دستگاه، نرخ خرابی به ۰/۰۰۴ کاهش یافته و از این زمان به بعد، نرخ خرابی با روندی ملامت‌تر کاهش می‌یابد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۸-۴- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

#### ۵-۸-۴-۱- آزمون روند و همبستگی سری داده‌ها



شکل ۵-۶۳- آزمون روند و همبستگی سری داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین ۲۱۰۷

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرشهر

جدول ۵-۳۷- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی حفاری ماشین ۲۱۰۷

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدلسازی انتخابی
۴۹	۹۶	۷۸/۱۹	رد نمی شود ( $U > ۷۴/۴$ )	فرآیند تجدید شونده

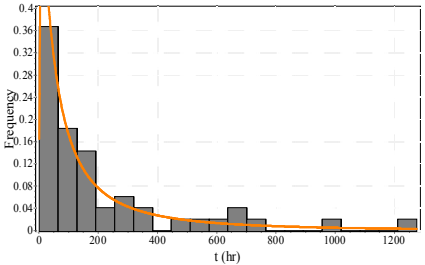
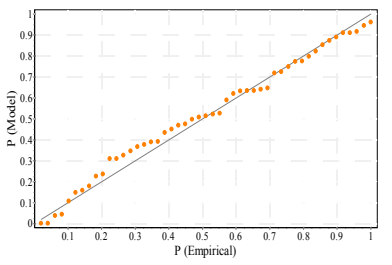
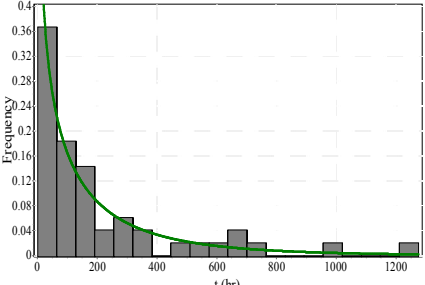
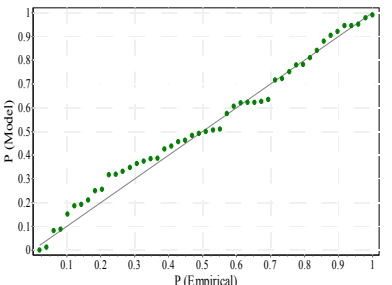
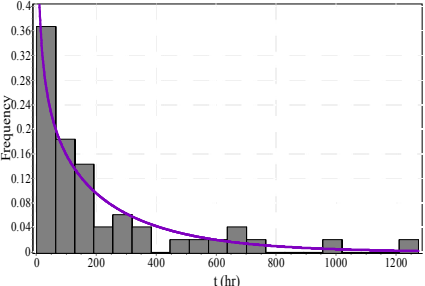
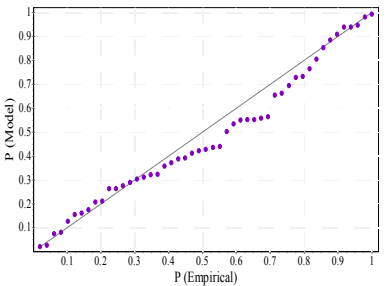
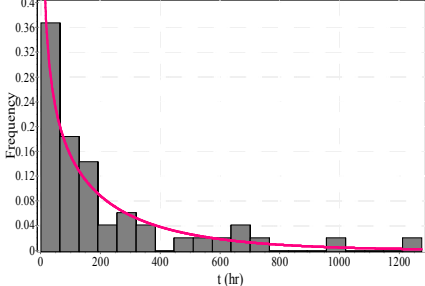
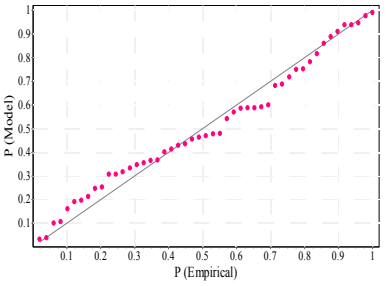
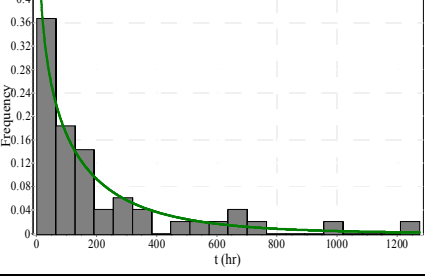
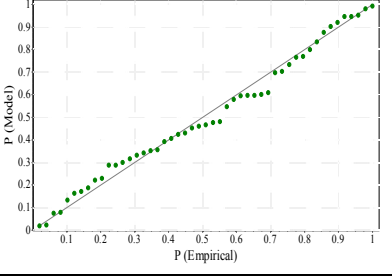
با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل (۵-۶۳))، نحوه قرارگیری نقاط به حالت خطی نزدیک بوده، بنابراین داده ها مستقل از روند هستند. علاوه بر این در روش تحلیلی (جدول (۵-۳۷)) با توجه به بزرگتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۷۴/۴)، فرض صفر رد نمی شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در آزمون همبستگی سری (شکل (۵-۶۳))، نقاط به صورت نامنظم پراکنده شده و دارای نظم و ترتیب خاصی نیستند، بنابراین داده ها به صورت مستقل از یکدیگر توزیع شده است. نتایج آزمون های روند و همبستگی سری نشان دهنده درست بودن فرض مستقل و مانا بودن داده ها است. بنابراین بهترین روش در مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، فرآیند تجدید شونده است.

### ۵-۸-۴-۲- تحلیل داده ها

نتایج تحلیل داده های خرابی این زیرسیستم، در جدول (۵-۳۸) ارائه شده است. با توجه به جدول (۵-۳۸)، شکل توزیع تمامی پنج تابع مذکور بسیار شبیه به هم بوده و همچنین مقادیر K-S در تمامی توابع بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود نداشته و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. اما، با توجه به میزان MTBF، مشاهده می شود که میانگین زمان خرابی های محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (۲۱۴/۶) برابر است. با این وجود با در نظر گرفتن کم ترین مقدار در آزمون K-S، تابع وایبول دو پارامتری به عنوان بهترین تابع قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، در نظر گرفته شده است.

# فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

جدول ۵-۳۸- نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

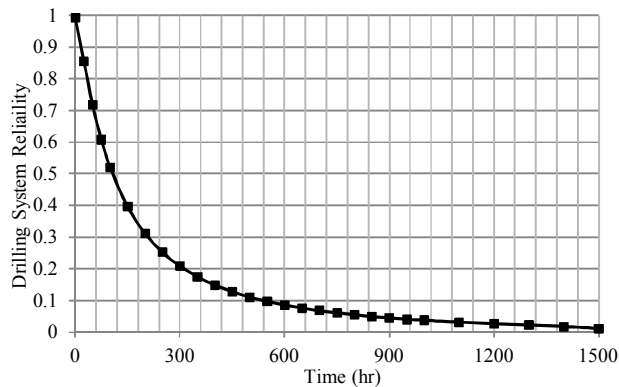
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			۰/۱۰۶۳	۲۸۵/۶
Weibull-۳P			۰/۱۱۳۸	۲۰۰/۶
Gen. Gamma			۰/۱۳۰	۲۲۵/۷
Gamma			۰/۱۰۲۲	۲۱۴/۶
Weibull-۷P			۰/۱۰۸۵۶	۲۰۸/۳
پارامترهای بهترین توزیع: $\alpha=0.798$ $\beta=182.4$		MTBF واقعی: ۲۱۴/۶ ساعت		

### ۵-۸-۴-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، به صورت روابط زیر ارائه شده است. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۶۴) و (۵-۶۵) آورده شده است.

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{182.4}\right)^{0.798}\right)$$

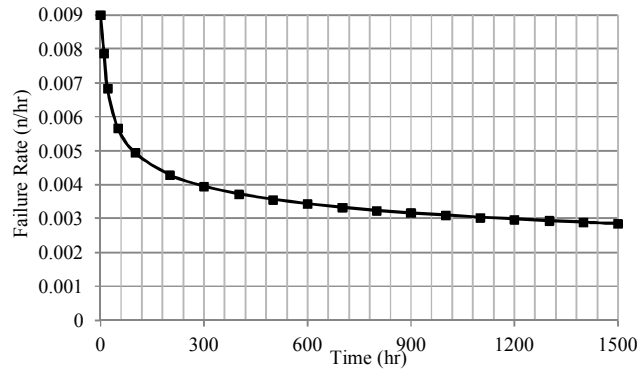
$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0044 \left(\frac{t}{182.4}\right)^{-0.202}$$



شکل ۵-۶۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۵-۶۴))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری، پس از حدود ۱۵۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار، با شیب تند کاهش می‌یابد و پس از ۳۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده دستگاه پس از حدود ۵۰ ساعت، به ۷۰٪ کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

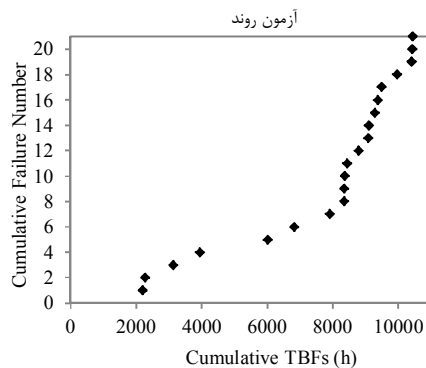


شکل ۵-۶۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حفاری ماشین حفاری ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل (۵-۶۵))، این زیرسیستم دارای رفتار خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با  $0/009$  خرابی در ساعت بوده و پس از ۲۰ ساعت به سرعت کاهش و به مقدار  $0/0068$  می‌رسد. با گذشت حدود ۳۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی به  $0/004$  کاهش یافته و از این زمان به بعد، نرخ خرابی با روندی ملامتری کاهش می‌یابد. بر اساس این منحنی، زیرسیستم حفاری ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه دارای تابع نرخ خرابی نزولی است.

### ۵-۸-۵- مدلسازی قابلیت اطمینان زیر سیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

#### ۵-۸-۵-۱- آزمون روند داده‌ها



شکل ۵-۶۶- آزمون روند داده‌های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷



## فصل پنجم: مدل سازی قابلیت اطمینان ماشین های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرخشم

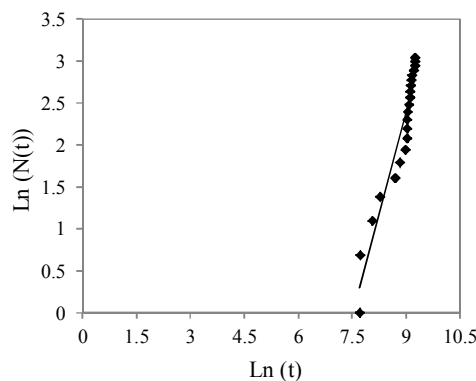
جدول ۵-۳۹- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد ۹۵٪	روش مدل سازی انتخابی
۲۱	۴۰	۱۶/۴۱	رد نمی شود ( $U < ۲۶/۵$ )	فرآیند تجدید شونده

با توجه به آزمون روند به روش گرافیکی (شکل ۵-۶۶)، نحوه قرارگیری نقاط به صورت غیر خطی است. علاوه بر این، در روش تحلیلی (جدول ۵-۳۹)، با توجه به کوچکتر بودن مقدار U از شاخص بحرانی (۲۶/۵)، فرض صفر رد می شود. بنابراین، بدون نیاز به آزمون همبستگی سری، مستقل و مانا بودن داده ها به طور قطع رد می شود. بنابراین، روش فرآیند پواسون ناهمگن بهترین روش برای مدل سازی قابلیت اطمینان این سیستم است. روش فرآیند قانون توان که یکی از روش های پرکاربرد فرآیند پواسون ناهمگن است، برای مدل سازی این زیرسیستم مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۵-۸-۲- تحلیل داده ها

برای ارزیابی تطابق داده ها با مدل قانون توان، آزمون گرافیکی بر روی داده ها انجام شده است (شکل ۵-۶۶). با توجه به شکل (۵-۶۷)، از آنجایی که داده های خرابی این سیستم از حالت خطی مناسبی برخوردار هستند، بنابراین، مشخص می شود که داده ها تطابق خوبی با مدل قانون توان دارند.



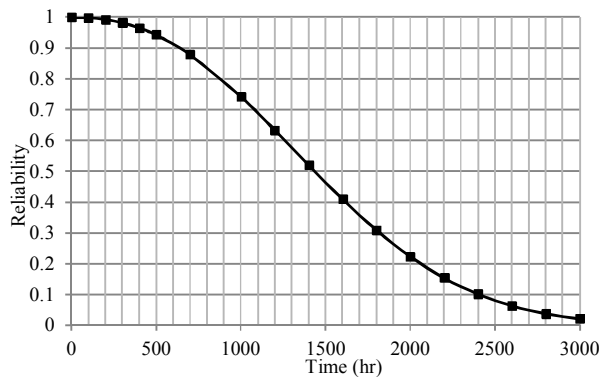
شکل ۵-۶۷- آزمون گرافیکی تطابق داده های خرابی زیرسیستم حرکت ماشین ۲۱۰۷ با مدل قانون توان

### ۵-۸-۳- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

پارامترهای فرآیند پواسون با استفاده از روابط (۲-۱۴) و (۲-۱۵) محاسبه شده است. نتایج محاسبات نشان داد که پارامتر مقیاس برابر با  $1680.319$  ( $\eta=1680.319$ ) بوده و پارامتر شکل  $2/33$  ( $\beta=2/33$ ) است. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۷، به صورت روابط زیر حاصل می‌شوند. منحنی‌های معادل با این روابط به ترتیب در شکل‌های (۵-۶۶) و (۵-۶۷) ارائه شده است.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{1680.319}\right)^{2.33}\right]$$

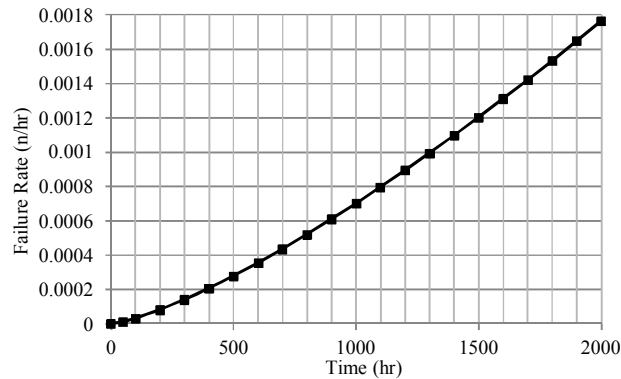
$$\lambda(t) = 0.0014\left[\left(\frac{t}{1680.319}\right)^{1.33}\right]$$



شکل ۵-۶۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان (شکل (۶-۶۸))، نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان زیرسیستم حفاری، پس از حدود ۳۰۰۰ ساعت به حدود صفر می‌رسد. علاوه بر این، قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب ملایم کاهش یافته و پس از حدود ۹۰۰ ساعت، قابلیت اطمینان آن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه پس از حدود ۱۱۰۰ ساعت به ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

## فصل پنجم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۵-۶۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم حرکت ماشین حفاری ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

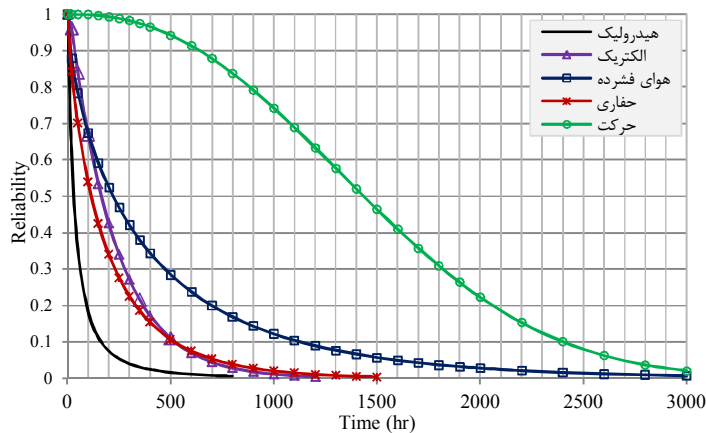
با توجه به نمودار نرخ خرابی (شکل ۵-۶۹)، این زیرسیستم دارای رفتار خرابی صعودی و رو به زوال است. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر صفر بوده و پس از ۱۰۰ ساعت به سرعت افزایش و به مقدار  $0.0003$  می‌رسد. با گذشت حدود ۴۰۰ ساعت از شروع به کار ماشین، نرخ خرابی به  $0.0002$  افزایش یافته و از این زمان به بعد، نرخ خرابی با روندی تقریباً خطی افزایش می‌یابد. به طوری در بازه زمانی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت به ترتیب به  $0.00035$  و  $0.0007$  خواهد رسید. بر اساس این منحنی، زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه دارای تابع نرخ خرابی صعودی است.

### ۵-۸-۶- مدل‌سازی قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه، در شکل (۵-۷۰) آورده شده است. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم‌های هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت، به ترتیب پس از ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۰۰۰ ساعت، متوقف خواهند شد. با این وجود، زیرسیستم حرکت در تمام مدت فعالیت ماشین، نسبت سایر زیرسیستم‌ها، از قابلیت اطمینان بسیار بالاتری برخوردار است. به طوری که قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت، به

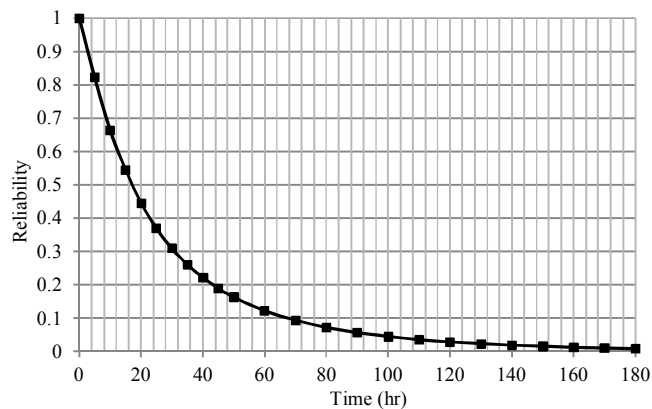
## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

ترتیب پس از ۱۰، ۶۰، ۴۵، ۳۰ و ۹۰۰ ساعت پس از شروع به فعالیت ماشین به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه حفاری شماره ۲۱۰۷

با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات دستگاه حفاری به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه نمود. با استفاده از رابطه (۲-۶)، قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۵-۷) ارائه شده است.



شکل ۵-۷۱- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه

با توجه به منحنی قابلیت اطمینان (شکل (۶-۷۱))، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه پس از گذشت ۱۸۰ ساعت به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان ماشین

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

پس از حدود ۵ 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 ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه پس از حدود ۲۱ ساعت، به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به طور میانگین در هر ساعت ۰/۶ درصد از قابلیت اطمینان این ماشین کاسته می‌شود.

### ۵-۹- قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

در بخش‌های قبل، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری شماره ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ بررسی و مدلسازی شد. در این بخش قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه، مدلسازی و ارائه شده است.

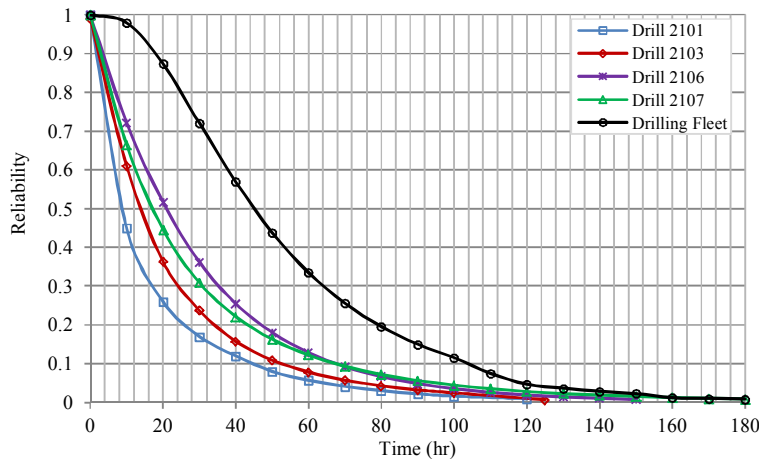
با توجه به اینکه عملکرد ناوگان حفاری معدن، مستلزم عملکرد تنها یکی از ماشین‌های حفاری بوده و تنها در صورت توقف هر چهار ماشین حفاری، ناوگان حفاری به طور کامل متوقف می‌شود، بنابراین ارتباط بین هر یک از ماشین‌های حفاری به صورت موازی بوده و قابلیت اطمینان سامانه حفاری معدن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

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

منحنی قابلیت اطمینان هر چهار ماشین حفاری به همراه منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری در شکل (۵-۷۲) آورده شده است.

## فصل پنجم: مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۵-۷۲- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

با توجه به شکل (۵-۷۲)، پس از گذشت حدود ۲۵ ساعت از زمان شروع به کار ماشین‌ها، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن به ۸۰ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ به ترتیب در زمان‌های ۱۲۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۸۰ ساعت پس از شروع به فعالیت آن‌ها به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر پس از ۱۲۵ ساعت از شروع فعالیت ماشین‌ها، ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۳ از فعالیت بازمانده و از این زمان به بعد، تنها ماشین‌های ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ با قابلیت اطمینان پایین (کم‌تر از ۵ درصد) فعال هستند. قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن در این لحظه تقریباً برابر با ۱۰ درصد  $(0.0975 = (1 - ((1 - 0.05) \times (1 - 0.05)))$  است. با گذشت ۲۵ ساعت دیگر (۱۵۰ ساعت پس از شروع فعالیت ماشین‌ها)، ماشین ۲۱۰۶ نیز متوقف شده و ماشین ۲۱۰۷ نیز در آستانه توقف قرار می‌گیرد. قابلیت اطمینان کل ناوگان حفاری پس از ۱۸۰ ساعت به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر پس از ۱۸۰ ساعت از شروع به فعالیت ماشین‌ها، ناوگان حفاری معدن به طور کامل متوقف خواهد شد.

## ۵-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به بررسی وجود روند و همبستگی متوالی بین داده‌های خرابی مربوط به هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری، پرداخته شد. سپس با بهره‌گیری از آزمون‌ها و نرم‌افزار آماری، قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت، با توجه به ارتباط سری بین هر یک از زیرسیستم‌ها، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از ماشین‌های حفاری مورد مدلسازی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ به ترتیب پس از ۱۲۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۸۰ ساعت به صفر خواهد رسید. علاوه بر این، با توجه به ارتباط موازی بین هر یک از ماشین‌های حفاری، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اینکه قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن تنها پس از گذشت ۲۵ ساعت (حدود ۳ شیفت)، ۲۰٪ کاهش می‌یابد، ارائه برنامه تعمیر و نگهداری برای هر یک از ماشین‌های حفاری ضرورت دارد.

# فصل هشتم:

تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری

معدن مس سرچشمه



## ۶-۱- 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 حفاری معدن مس سرچشمه مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مدل‌های ارائه شده، امکان تعیین زمان توقف هر یک از زیرسیستم‌های ماشین حفاری 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 حفاری 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 حفاری معدن پرداخته شده است.

## ۶-۲- 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

#### ۶-۲-۱- 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>۳</sup> و تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان<sup>۴</sup>، دو روش عمده در تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بوده که در ادامه توضیح داده شده است.

#### ۶-۲-۱-۱- 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 پارامترهای مورد مطالعه

<sup>3</sup> Condition Based Maintenance (CBM)

<sup>4</sup> Time Based Maintenance (TBM)

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

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 یا تاقان‌ها 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.

### ۶-۲-۱-۲- 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

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

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.

### ۶-۲-۲- تعمیر و نگهداری اصلاحی

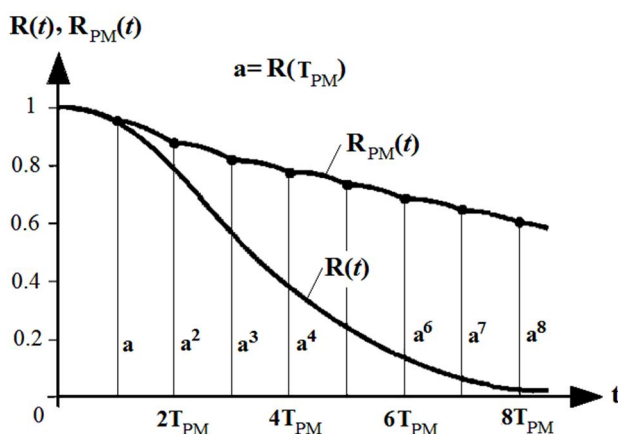
این نوع تعمیر و نگهداری پس از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک بخش یا کل دستگاه به حالت عملیاتی به کار برده می‌شود. طی این عملیات قطعات معیوب تعمیر گردیده و یا با یک قطعه جدید (یا کارکرده) جایگزین می‌شود. این روش بر خلاف روش‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، بدون برنامه‌ریزی بوده و پس از خرابی دستگاه انجام می‌شود. عملیات تعمیر و نگهداری اصلاحی بسته به سطح بحرانی بودن خرابی و نیز بسته به شرایط عملیات، می‌تواند به صورت اضطراری<sup>۵</sup> یا معوقه<sup>۶</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 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).

<sup>۵</sup> Emergency/Immediate maintenance

<sup>۶</sup> Deferred maintenance

### ۳-۶- 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 (۱-۶) نشان داده شده است، دچار تغییر می‌گردد. با توجه به شکل (۱-۶)، 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 (۱-۶) قابل محاسبه است (Hoseinie at al., 2011).



شکل ۱-۶- تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان دستگاه (Hoseinie at al., 2011)

$$R_{PM}(t) = \begin{cases} R(t) & 0 < t \leq T_{PM} \\ R^n(T_{PM})R(t - nT_{PM}) & nT_{PM} \leq t < (n+1)T_{PM}, n \geq 1 \end{cases} \quad (1-6)$$

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.

## ۴-۶- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای ماشین‌های حفاری 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 ماشین‌های حفاری موجب توقف آن و در نهایت توقف ناوگان حفاری معدن می‌شود، انتخاب استراتژی مناسب در اجرای تعمیرات و نگهداری زیرسیستم‌های مختلف ماشین ضرورت دارد. بنابراین حفظ شرایط عملیات حفاری معدن در سطح مشخصی از قابلیت اطمینان از اهداف مهم تعمیر و نگهداری محسوب می‌شود. با توجه به اینکه در تعمیر و نگهداری اصلاحی، تعمیر و نگهداری تنها در صورت وقوع خرابی صورت می‌گیرد، لذا استفاده از این استراتژی در تثبیت هر یک از ماشین‌های حفاری 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 حفاری در معدن مس سرچشمه، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان به عنوان استراتژی اصلی برای ناوگان حفاری 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 ۹۰ درصد، به عنوان حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری در نظر گرفته شده است. بنابراین، زمانی که هر

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

زیرسیستم به قابلیت اطمینان ۹۰ درصد می‌رسد، به عنوان دوره تعمیرات پیشگیرانه آن زیرسیستم انتخاب شده است. در ادامه به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های هر یک از ماشین‌های حفاری معدن پرداخته شده است.

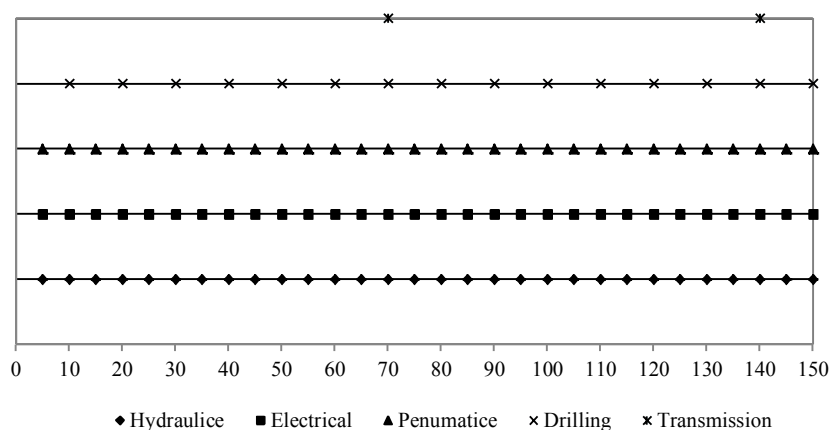
### ۵-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۱ معدن

#### مس سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱، در جدول (۶-۱) و شکل (۶-۲) آورده شده است.

جدول ۶-۱- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۱

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ (ساعت)	۵	۵	۵	۱۰	۷۰



شکل ۶-۲- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین ۲۱۰۶

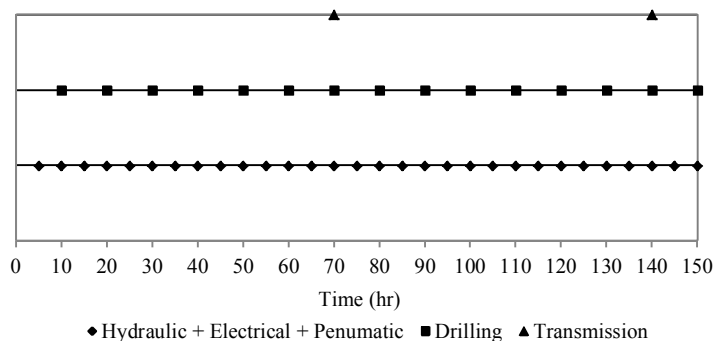
با توجه به جدول (۶-۱)، زیرسیستم‌های هیدرولیک، الکتریک و هوای فشرده با کوتاهترین زمان و زیرسیستم حرکت با طولانی‌ترین زمان در بین سایر زیرسیستم‌ها، به قابلیت اطمینان ۹۰ درصد

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرخشم

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 هیدرولیک، الکتریک و هوای فشرده با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر پنج ساعت یکبار انجام می‌شوند. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های حفاری و حرکت به ترتیب پس از ۱۰ و ۷۰ ساعت انجام خواهد گرفت. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۲-۶) و شکل (۳-۶) نشان داده شده است. با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می‌شود که در پایان هر شیفت (۸ ساعت)، هر یک از زیرسیستم‌های این ماشین حفاری بجز زیرسیستم حرکت، یکبار مورد بازرسی و تعمیر پیش‌گیرانه قرار خواهد گرفت.

جدول ۲-۶- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۱

زیرسیستم	هیدرولیک + الکتریک + هوای فشرده	حفاری	حرکت
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۵	۱۰	۷۰



شکل ۳-۶- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین ۲۱۰۱

### ۶-۵-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۱

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



## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

نتایج تحلیل داده‌های خرابی، مشخص گردید که داده‌های خرابی هر پنج زیرسیستم ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن 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 ماشین حفاری ۲۱۰۱ و زیرسیستم‌های آن به شرح جدول (۳-۶) تغییر می‌کند. شکل (۴-۶) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.

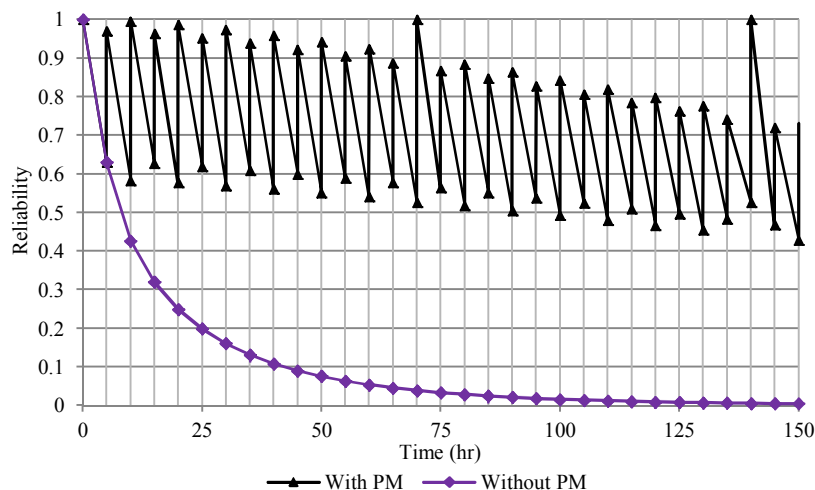
جدول ۳-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه در اثر عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان	قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها					قابلیت اطمینان ماشین
	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت	
0	1	1	1	1	1	1
5	0.867	0.837	0.895	0.972	0.998	0.630
5.01	1	1	1	0.971	0.998	0.970
10	0.867	0.837	0.895	0.9	0.996	0.582
10.01	1	1	1	1	0.995	0.996
15	0.867	0.837	0.895	0.972	0.992	0.626
15.01	1	1	1	0.971	0.992	0.963
20	0.867	0.837	0.895	0.9	0.986	0.577
20.01	1	1	1	1	0.986	0.986
25	0.867	0.837	0.895	0.97	0.981	0.618
25.01	1	1	1	0.97	0.981	0.951
30	0.867	0.837	0.895	0.9	0.974	0.569
30.01	1	1	1	1	0.974	0.974
35	0.867	0.837	0.895	0.97	0.967	0.609
35.01	1	1	1	0.97	0.967	0.938
40	0.867	0.837	0.895	0.9	0.959	0.561
40.01	1	1	1	1	0.959	0.959
45	0.867	0.837	0.895	0.97	0.951	0.599
45.01	1	1	1	0.97	0.9510	0.922

فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۳-۶

50	0.867	0.837	0.895	0.9	0.942	0.551
50.01	1	1	1	1	0.942	0.942
55	0.867	0.837	0.895	0.97	0.933	0.588
55.01	1	1	1	0.97	0.933	0.905
60	0.867	0.837	0.895	0.9	0.924	0.540
60.01	1	1	1	1	0.924	0.924
65	0.867	0.837	0.895	0.97	0.915	0.576
65.01	1	1	1	0.97	0.915	0.887
70	0.867	0.837	0.895	0.9	0.9	0.526
70.01	1	1	1	1	1	1
75	0.867	0.837	0.895	0.97	0.895	0.564
75.01	1	1	1	0.97	0.895	0.868
80	0.867	0.837	0.895	0.9	0.884	0.517
80.01	1	1	1	1	0.884	0.884
85	0.867	0.837	0.895	0.97	0.874	0.551
85.01	1	1	1	0.97	0.874	0.848
90	0.867	0.837	0.895	0.9	0.863	0.504
90.01	1	1	1	1	0.863	0.863
95	0.867	0.837	0.895	0.97	0.853	0.537
95.01	1	1	1	0.97	0.853	0.827
100	0.867	0.837	0.895	0.9	0.842	0.492
100.01	1	1	1	1	0.842	0.841
105	0.867	0.837	0.895	0.97	0.831	0.523
105.01	1	1	1	0.97	0.831	0.806
110	0.867	0.837	0.895	0.9	0.819	0.479
110.01	1	1	1	1	0.819	0.819
115	0.867	0.837	0.895	0.97	0.809	0.509
115.01	1	1	1	0.97	0.809	0.784
120	0.867	0.837	0.895	0.9	0.798	0.466
120.01	1	1	1	1	0.798	0.798
125	0.867	0.837	0.895	0.97	0.787	0.496
125.01	1	1	1	0.97	0.787	0.763
130	0.867	0.837	0.895	0.9	0.776	0.453
130.01	1	1	1	1	0.776	0.775
135	0.867	0.837	0.895	0.97	0.764	0.482
135.01	1	1	1	0.97	0.764	0.741
140	0.867	0.837	0.895	0.9	0.9	0.526
140.01	1	1	1	1	1	1
145	0.867	0.837	0.895	0.97	0.742	0.468
145.01	1	1	1	0.97	0.742	0.719
150	0.867	0.837	0.895	0.9	0.731	0.427



شکل ۴-۶- منحنی قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۱ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به شکل (۴-۶)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق است. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان دستگاه دچار جهش شده و از مقدار  $0.63$  به  $0.97$  افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و دستگاه در زمان ۱۰ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان، سه زیرسیستم هیدرولیک، الکتریک و هوای فشرده به طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند. بنابراین، با توجه به افزایش همزمان قابلیت اطمینان این سه زیرسیستم از ماشین، قابلیت اطمینان کل ماشین به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در زمان ۲۰ ساعت که تمامی زیرسیستم‌های ماشین غیر از زیرسیستم حرکت تحت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار می‌گیرند، قابلیت اطمینان دستگاه به  $98.6\%$  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. همچنین، شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه

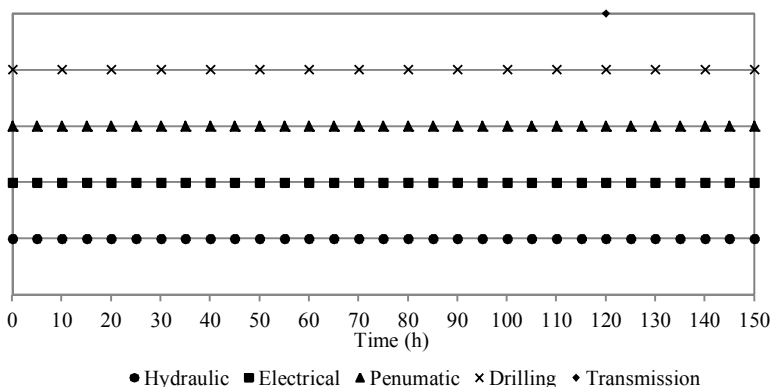
پیشنهادی، می توان قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه را به طور متوسط در حد فاصل ۰.۷۵-۰.۵۵٪ و حداقل ۰.۴۳٪ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان ماشین در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی ماشین بوده و به شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک می کند.

### ۶-۶- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۳ معدن مس سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۰ درصد، زمان های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای زیرسیستم های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۳، در جدول (۷-۴) و شکل (۷-۵) آورده شده است.

جدول ۶-۴- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۳

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ (ساعت)	۵	۵	۵	۱۰	۱۲۰



شکل ۶-۵- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم های ماشین ۲۱۰۳

با توجه به جدول (۶-۴)، زیرسیستم های هیدرولیک، الکتریک و هوای فشرده با کوتاهترین زمان و زیرسیستم حرکت با طولانی ترین زمان در بین سایر زیرسیستم ها، به قابلیت اطمینان ۹۰ درصد می رسند. به منظور سهولت در اجرای تعمیر و نگهداری، می توان تعمیراتی که دوره زمانی نزدیک به

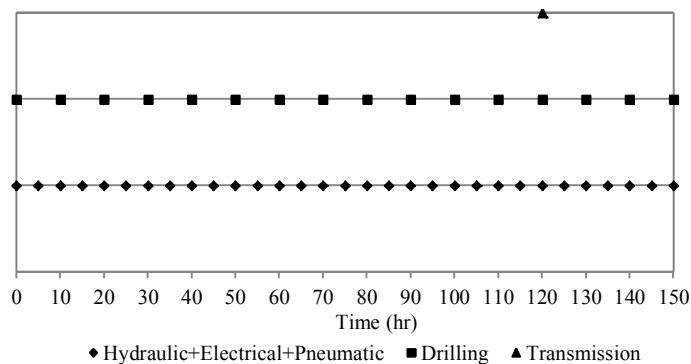
## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرخشم

هم دارند را با هم ترکیب و طی یک عملیات واحد تعمیر و نگهداری انجام داد. برای این منظور زیرسیستم های هیدرولیک، الکتریک و هوای فشرده با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۵ ساعت یکبار انجام می شوند. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم های حفاری و حرکت به ترتیب پس از ۱۰ و ۱۲۰ ساعت انجام خواهد شد. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۵-۶) و شکل (۶-۶) نشان داده شده است.

با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می شود که در پایان هر شیفت (۸ ساعت)، هر یک از زیرسیستم های این ماشین حفاری بجز زیرسیستم های حفاری و حرکت، یکبار مورد بازرسی و تعمیر پیش گیرانه قرار گرفته اند.

جدول ۵-۶- دوره های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۳

زیرسیستم	هیدرولیک + الکتریک + هوای فشرده	حفاری	حرکت
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۵	۱۰	۱۲۰



شکل ۶-۶- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم های ماشین ۲۱۰۳

### ۶-۶-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۳

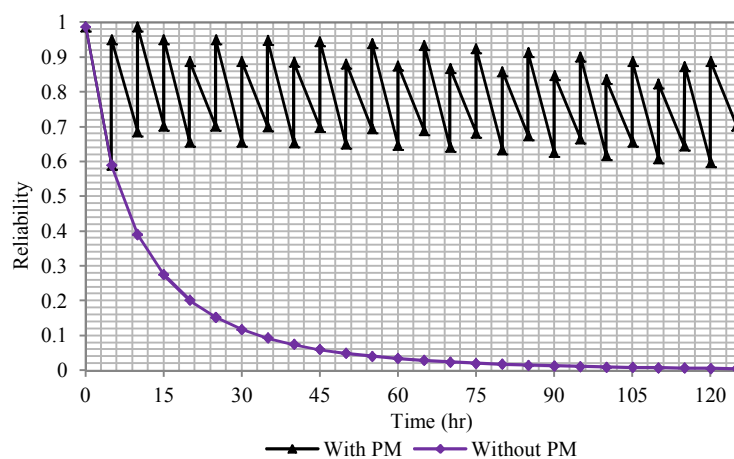
در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری ۲۱۰۳ و زیرسیستم‌های آن به شرح جدول (۶-۶) تغییر می‌کند. شکل (۶-۷) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.

جدول ۶-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۳ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها					قابلیت اطمینان ماشین
	هیدرولیک	الکترونیک	هوای فشرده	حفاری	حرکت	
0	0.997	0.990	1.000	1.000	1.000	0.987
5	0.865	0.851	0.832	0.963	1.000	0.590
5.01	0.997	0.990	1.000	0.963	1.000	0.951
10	0.900	0.900	0.900	0.941	1.000	0.686
10.01	0.997	0.990	1.000	1.000	1.000	0.987
15	0.900	0.900	0.900	0.963	1.000	0.702
15.01	0.997	0.990	1.000	0.963	1.000	0.950
20	0.900	0.900	0.900	0.900	1.000	0.656
20.01	0.997	0.990	1.000	0.900	1.000	0.888
25	0.900	0.900	0.900	0.963	0.999	0.702
25.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.999	0.950
30	0.900	0.900	0.900	0.900	0.999	0.655
30.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.999	0.887
35	0.900	0.900	0.900	0.963	0.998	0.700
35.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.998	0.948
40	0.900	0.900	0.900	0.900	0.996	0.654
40.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.996	0.885
45	0.900	0.900	0.900	0.963	0.994	0.698
45.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.994	0.945
50	0.900	0.900	0.900	0.900	0.992	0.651
50.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.992	0.881
55	0.900	0.900	0.900	0.963	0.989	0.694
55.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.989	0.940
60	0.900	0.900	0.900	0.900	0.985	0.647
60.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.985	0.875
65	0.900	0.900	0.900	0.963	0.981	0.689
65.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.981	0.933
70	0.900	0.900	0.900	0.900	0.977	0.641
70.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.977	0.868
75	0.900	0.900	0.900	0.963	0.972	0.682
75.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.972	0.924
80	0.900	0.900	0.900	0.900	0.967	0.634
80.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.967	0.859
85	0.900	0.900	0.900	0.963	0.961	0.675
85.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.961	0.913
90	0.900	0.900	0.900	0.900	0.955	0.626

ادامه جدول ۶-۶

90.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.955	0.848
95	0.900	0.900	0.900	0.963	0.948	0.666
95.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.948	0.901
100	0.900	0.900	0.900	0.900	0.941	0.617
100.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.941	0.836
105	0.900	0.900	0.900	0.963	0.934	0.656
105.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.934	0.888
110	0.900	0.900	0.900	0.900	0.926	0.608
110.01	0.997	0.990	1.000	0.900	0.926	0.823
115	0.900	0.900	0.900	0.963	0.919	0.645
115.01	0.997	0.990	1.000	0.963	0.919	0.873
120	0.900	0.900	0.900	0.900	0.910	0.597
120.01	0.997	0.990	1.000	0.900	1.000	0.888
125	0.900	0.900	0.900	0.963	1.000	0.702



شکل ۶-۷- منحنی قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۳ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به شکل (۶-۷)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق می‌باشند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان ماشین دچار جهش شده و از مقدار  $0/59$  به  $0/95$  افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان ماشین کاهش یافته و دستگاه در زمان ۱۰ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان همه زیرسیستم‌های ماشین بجز زیرسیستم حرکت به طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند. لذا، با توجه به افزایش توأم قابلیت اطمینان این چهار زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل دستگاه به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در این زمان قابلیت اطمینان ماشین به  $98/7\%$

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه

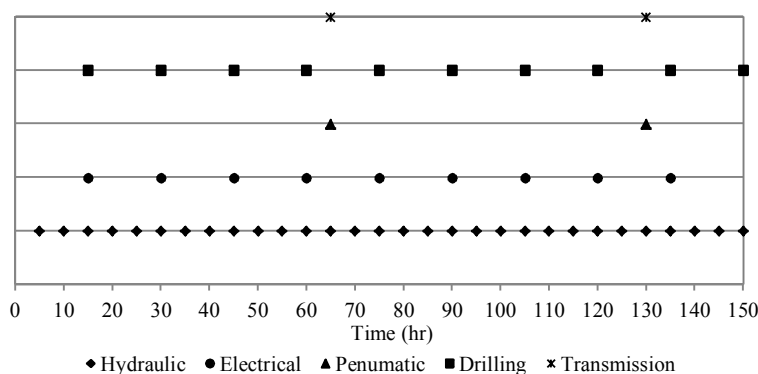
بهبود می یابد. با گذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت دوره ای ادامه می یابد. شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می دهد که با اعمال برنامه زمان بندی پیشنهادی، می توان قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۱ معدن مس سرچشمه را به طور متوسط در حد فاصل ۷۵٪-۸۵٪ و حداقل ۵۹/۷٪ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان دستگاه در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی دستگاه بوده و به شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک می کند.

### ۶-۷- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم های ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۰ درصد، زمان های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای زیرسیستم های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ در جدول (۷-۷) و شکل (۷-۸) آورده شده است.

جدول ۶-۷- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۶

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ (ساعت)	۵	۱۵	۶۵	۱۵	۶۵



شکل ۶-۸- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۶

چنانکه در جدول (۶-۷) مشاهده می شود، زیرسیستم های هیدرولیک، الکتریک و حفاری با کوتاهترین



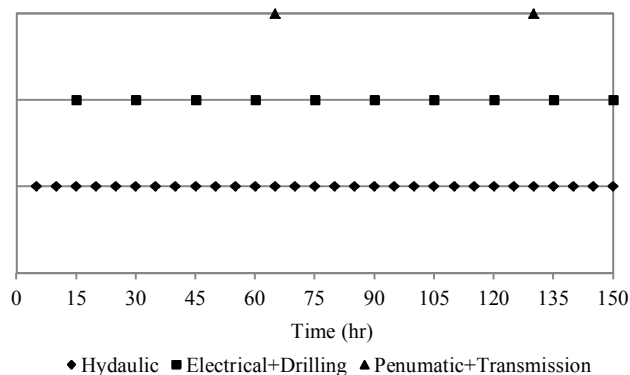
## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه

زمان و زیرسیستم های هوای فشرده و حرکت با طولانی ترین زمان در بین سایر زیرسیستم ها، به قابلیت اطمینان ۹۰ درصد می رسند. به منظور سهولت در اجرای تعمیر و نگهداری، می توان 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 زیرسیستم هیدرولیک پس از ۵ ساعت و زیرسیستم های الکتریک و حفاری با یکدیگر ترکیب شده و عملیات تعمیر و نگهداری هر ۱۵ ساعت یکبار انجام می شود. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم های هوای فشرده و حرکت پس از ۶۵ ساعت انجام خواهد گرفت. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۶-۸) و شکل (۶-۹) نشان داده شده است.

با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می شود که در پایان هر دو شیفت (۱۶ ساعت)، هر یک از زیرسیستم های این ماشین حفاری بجز زیرسیستم های هوای فشرده و حرکت، یکبار مورد بازرسی و تعمیر پیش گیرانه قرار خواهند گرفت.

جدول ۶-۸- دوره های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۶

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک و حفاری	هوای فشرده و حرکت
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۵	۱۵	۶۵



شکل ۶-۹- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۶

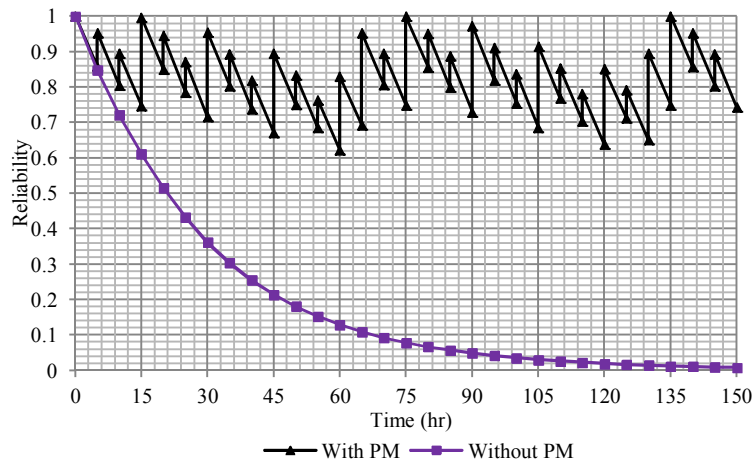
### ۶-۷-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۶

در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری ۲۱۰۶ و زیرسیستم های آن به شرح جدول (۶-۹) تغییر می کند. شکل (۶-۱۰) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می دهد.

جدول ۶-۹- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۶ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان زیرسیستم ها					قابلیت اطمینان ماشین
	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت	
0	1	1	1	1	1	1
5	0.9	0.964	1	0.99	1	0.858
5.01	1	0.964	1	0.99	1	0.954
10	0.9	0.938	0.999	0.954	1	0.805
10.01	1	0.938	0.999	0.954	1	0.895
15	0.9	0.916	0.998	0.909	0.999	0.747
15.01	1	1	0.998	1	0.999	0.997
20	0.9	0.964	0.994	0.99	0.996	0.85
20.01	1	0.964	0.994	0.99	0.996	0.945
25	0.9	0.938	0.99	0.954	0.984	0.785
25.01	1	0.938	0.99	0.954	0.984	0.872
30	0.9	0.916	0.983	0.909	0.972	0.716
30.01	1	1	0.983	1	0.972	0.955
35	0.9	0.964	0.975	0.99	0.96	0.803
35.01	1	0.964	0.975	0.99	0.96	0.893
40	0.9	0.938	0.966	0.954	0.948	0.738
40.01	1	0.938	0.966	0.954	0.948	0.82
45	0.9	0.916	0.955	0.909	0.936	0.67
45.01	1	1	0.955	1	0.936	0.895
50	0.9	0.964	0.944	0.99	0.925	0.75
50.01	1	0.964	0.944	0.99	0.925	0.833
55	0.9	0.938	0.932	0.954	0.913	0.686
55.01	1	0.938	0.932	0.954	0.913	0.762
60	0.9	0.916	0.92	0.909	0.902	0.622
60.01	1	1	0.92	1	0.902	0.83
65	0.9	0.964	0.906	0.99	0.891	0.693
65.01	1	0.964	1	0.99	1	0.954
70	0.9	0.938	1	0.954	1	0.806
70.01	1	0.938	1	0.954	1	0.895
75	0.9	0.916	0.999	0.909	1	0.749
75.01	1	1	0.999	1	1	0.999
80	0.9	0.964	0.998	0.99	0.999	0.856
80.01	1	0.964	0.998	0.99	0.999	0.951
85	0.9	0.938	0.994	0.954	0.996	0.799
85.01	1	0.938	0.994	0.954	0.996	0.887
90	0.9	0.916	0.99	0.909	0.984	0.73

90.01	1	1	0.99	1	0.984	0.974
95	0.9	0.964	0.983	0.99	0.972	0.82
95.01	1	0.964	0.983	0.99	0.972	0.911
100	0.9	0.938	0.975	0.954	0.96	0.754
100.01	1	0.938	0.975	0.954	0.96	0.838
105	0.9	0.916	0.966	0.909	0.948	0.686
105.01	1	1	0.966	1	0.948	0.916
110	0.9	0.964	0.955	0.99	0.936	0.768
110.01	1	0.964	0.955	0.99	0.936	0.853
115	0.9	0.938	0.944	0.954	0.925	0.704
115.01	1	0.938	0.944	0.954	0.925	0.782
120	0.9	0.916	0.932	0.909	0.913	0.638
120.01	1	1	0.932	1	0.913	0.852
125	0.9	0.964	0.92	0.99	0.902	0.712
125.01	1	0.964	0.92	0.99	0.902	0.791
130	0.9	0.938	0.906	0.954	0.891	0.651
130.01	1	0.938	1	0.954	1	0.895
135	0.9	0.916	1	0.909	1	0.749
135.01	1	1	1	1	1	1
140	0.9	0.964	0.999	0.99	1	0.858
140.01	1	0.964	0.999	0.99	1	0.953
145	0.9	0.938	0.998	0.954	0.999	0.803
145.01	1	0.938	0.998	0.954	0.999	0.892
150	0.9	0.916	0.994	0.909	0.996	0.742



شکل ۶-۱۰- منحنی قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۶ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به جدول (۹-۶)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقا با هم برابر می باشند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان دستگاه دچار جهش شده و از مقدار  $0.8/0.85$  به  $0.4/0.95$  افزایش می یابد. با گذشت زمان،

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و دستگاه در زمان ۱۵ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان سه هیدرولیک، الکتریک و حفاری به طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند. لذا، با توجه به افزایش توأم قابلیت اطمینان سه زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل دستگاه به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. روند کاهش قابلیت اطمینان پس از انجام تعمیرات، بسیار کندتر از منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیرات پیشگیرانه است. همچنین، شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۶ معدن مس سرچشمه را به طور متوسط در حد فاصل ۰.۷۵٪-۱.۰۰٪ و حداقل ۰.۶۲٪ حفظ کرد.

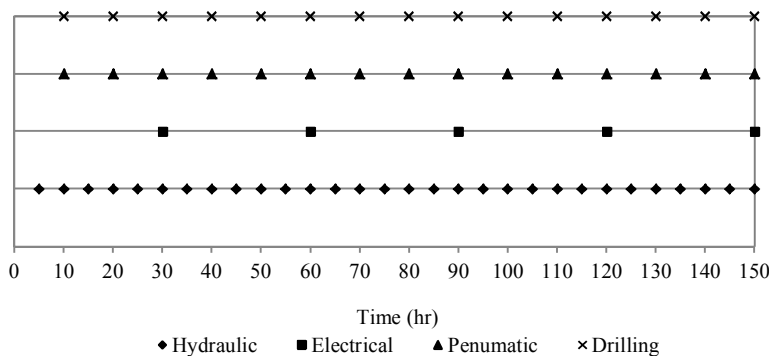
### ۶-۸- برنامه تعمیر و نگهداری برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷

#### معدن مس سرچشمه

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۰ درصد، زمان‌های محاسبه شده برای رسیدن به این سطح از قابلیت اطمینان، برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ در جدول (۶-۱۰) و شکل (۶-۱۱) آورده شده است.

جدول ۶-۱۰- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری ۲۱۰۷

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت
زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۹۰٪ (ساعت)	۵	۳۰	۱۰	۱۰	۶۰۰



شکل ۶-۱۱- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷

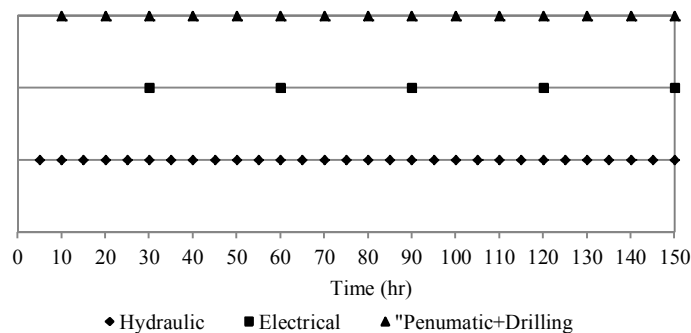
## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

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 زیرسیستم هیدرولیک پس از ۵ ساعت، زیرسیستم‌های حفاری و هوای فشرده پس از ۱۰ ساعت و زیرسیستم الکتریک پس از ۳۰ ساعت مورد بازرسی و عملیات تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. نکته حائز اهمیت آن است که زیرسیستم حرکت پس از گذشت ۶۰۰ ساعت به قابلیت اطمینان ۹۰ درصد می‌رسد. بنابراین با توجه به اینکه بدون در نظر گرفتن برنامه تعمیر و نگهداری، ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه تنها پس از ۱۵۰ ساعت فعالیت (یک چهارم زمان بازرسی پیشگیرانه) متوقف خواهد شد، استفاده از تعمیر و نگهداری اصلاحی گزینه مناسبی برای این چنین زیرسیستم‌هایی است. با در نظر گرفتن تعمیر و نگهداری اصلاحی، زیرسیستم حرکت ماشین حفاری تنها در زمان بروز شکست و خرابی مورد تعمیر و نگهداری قرار خواهد گرفت. با این وجود عملیات تعمیر و نگهداری سایر زیرسیستم با توجه به برنامه نگهداری پیشگیرانه صورت خواهد گرفت. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول (۶-۱۱) و شکل (۶-۱۲) نشان داده شده است. با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص می‌شود که در پایان هر دو شیفت (۱۶ ساعت)، هر یک از زیرسیستم‌های این ماشین حفاری بجز زیرسیستم‌های الکتریک و حرکت، یکبار مورد بازرسی و تعمیر پیشگیرانه قرار خواهند گرفت.

جدول ۶-۱۱- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷

زیرسیستم	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده و حفاری	حرکت
دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)	۵	۳۰	۱۰	۶۰۰

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۶-۱۲- طرح بهبود یافته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستم های ماشین حفاری ۲۱۰۷

### ۶-۸-۱- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۷

با اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادهی، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری ۲۱۰۷ و زیرسیستم های آن به شرح جدول (۶-۱۲) تغییر می کند. شکل (۶-۱۳) منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان می دهد.

جدول ۶-۱۲- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفاری ۲۱۰۷ در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

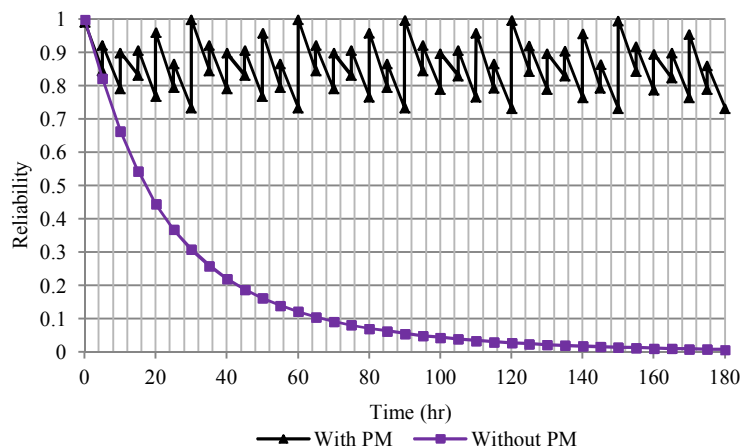
زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان زیرسیستم ها					قابلیت اطمینان ماشین
	هیدرولیک	الکتریک	هوای فشرده	حفاری	حرکت	
0	1	1	1	0.992	1	0.992
5	0.917	0.999	0.95	0.972	1	0.846
5.01	1	0.999	0.95	0.972	1	0.923
10	0.917	0.99	0.922	0.946	1	0.792
10.01	1	0.9	1	1	1	0.9
15	0.917	0.983	0.95	0.972	1	0.833
15.01	1	0.983	0.95	0.972	1	0.908
20	0.917	0.961	0.922	0.946	1	0.768
20.01	1	0.961	1	1	1	0.961
25	0.917	0.939	0.95	0.972	1	0.796
25.01	1	0.939	0.95	0.972	1	0.868
30	0.917	0.918	0.922	0.946	1	0.734
30.01	1	1	1	1	1	1
35	0.917	0.999	0.95	0.972	1	0.847
35.01	1	0.999	0.95	0.972	1	0.923
40	0.917	0.99	0.922	0.946	1	0.792
40.01	1	0.9	1	1	1	0.9
45	0.917	0.983	0.95	0.972	1	0.833
45.01	1	0.983	0.95	0.972	1	0.908
50	0.917	0.961	0.922	0.946	1	0.768

فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

ادامه جدول ۶-۱۲

50.01	1	0.961	1	1	1	0.96
55	0.917	0.939	0.95	0.972	1	0.796
55.01	1	0.939	0.95	0.972	1	0.868
60	0.917	0.918	0.922	0.946	1	0.734
60.01	1	1	1	1	1	1
65	0.917	0.999	0.95	0.972	0.999	0.846
65.01	1	0.999	0.95	0.972	0.999	0.923
70	0.917	0.99	0.922	0.946	0.999	0.791
70.01	1	0.9	1	1	0.999	0.899
75	0.917	0.983	0.95	0.972	0.999	0.832
75.01	1	0.983	0.95	0.972	0.999	0.907
80	0.917	0.961	0.922	0.946	0.999	0.768
80.01	1	0.961	1	1	0.999	0.96
85	0.917	0.939	0.95	0.972	0.999	0.795
85.01	1	0.939	0.95	0.972	0.999	0.867
90	0.917	0.918	0.922	0.946	0.999	0.734
90.01	1	1	1	1	0.999	0.999
95	0.917	0.999	0.95	0.972	0.999	0.846
95.01	1	0.999	0.95	0.972	0.999	0.922
100	0.917	0.99	0.922	0.946	0.999	0.791
100.01	1	0.9	1	1	0.999	0.899
105	0.917	0.983	0.95	0.972	0.998	0.832
105.01	1	0.983	0.95	0.972	0.998	0.907
110	0.917	0.961	0.922	0.946	0.998	0.767
110.01	1	0.961	1	1	0.998	0.959
115	0.917	0.939	0.95	0.972	0.998	0.795
115.01	1	0.939	0.95	0.972	0.998	0.866
120	0.917	0.918	0.922	0.946	0.998	0.733
120.01	1	1	1	1	0.998	0.998
125	0.917	0.999	0.95	0.972	0.998	0.845
125.01	1	0.999	0.95	0.972	0.998	0.921
130	0.917	0.99	0.922	0.946	0.997	0.79
130.01	1	0.9	1	1	0.997	0.898
135	0.917	0.983	0.95	0.972	0.997	0.831
135.01	1	0.983	0.95	0.972	0.997	0.906
140	0.917	0.961	0.922	0.946	0.997	0.766
140.01	1	0.961	1	1	0.997	0.958
145	0.917	0.939	0.95	0.972	0.997	0.793
145.01	1	0.939	0.95	0.972	0.997	0.865
150	0.917	0.918	0.922	0.946	0.996	0.732

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه



شکل ۶-۱۳- منحنی قابلیت اطمینان ماشین ۲۱۰۷ پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به جدول (۷-۱۲)، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان ۵ ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً بر هم منطبق هستند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان دستگاه از مقدار  $0.84/6$  به  $0.92/3$  افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و دستگاه در زمان ۱۵ ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد. در این زمان سه زیرسیستم هیدرولیک، هوای فشرده و حفاری به طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار می‌گیرند. لذا، با توجه به افزایش همزمان قابلیت اطمینان سه زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل دستگاه به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. در زمان ۳۰ ساعت که تمامی زیرسیستم‌های دستگاه غیر از زیرسیستم حرکت تحت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار می‌گیرند، قابلیت اطمینان دستگاه به  $1.00$  (افزایش  $69\%$  نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری) بهبود می‌یابد. همچنین، شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷ معدن مس سرچشمه را به طور متوسط در حد فاصل  $75\%$ - $1.00$  حفظ کرد.



## ۶-۹- تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه

در بخش‌های گذشته به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه و تاثیر آن بر بهبود قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری پرداخته شد. در این بخش با در نظر گرفتن تاثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بهبود قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری، به بررسی تاثیر برنامه‌های نگهداری ارائه شده بر قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن پرداخته شده است. در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری و ناوگان حفاری معدن به شرح جدول (۶-۱۳) تغییر می‌کند. شکل (۶-۱۴)، منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه را پس از اعمال تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه نشان می‌دهد. با اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن در حد فاصل ۹۷٪ تا ۱۰۰٪ و به طور متوسط ۹۸٪ افزایش خواهد یافت.

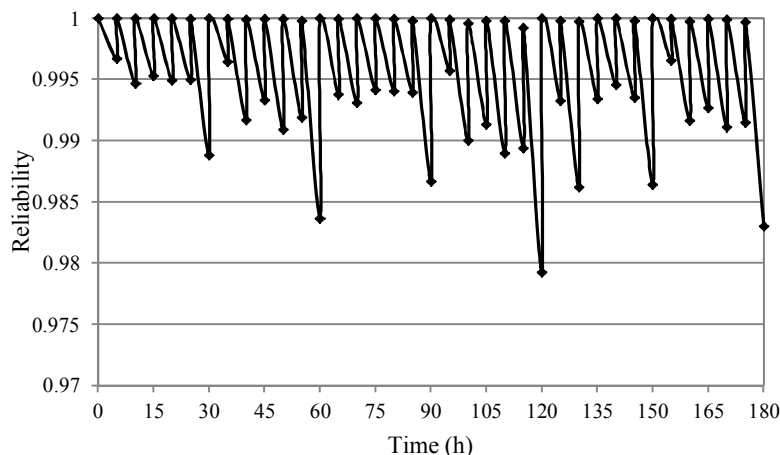
جدول ۶-۱۳- تغییرات قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان بهبود یافته ماشین‌های حفاری				قابلیت اطمینان ناوگان حفاری
	۲۱۰۱	۲۱۰۳	۲۱۰۶	۲۱۰۷	
0	1	0.987	1	0.992	1
5	0.63	0.59	0.858	0.846	0.997
5.01	0.97	0.951	0.954	0.923	1
10	0.582	0.686	0.805	0.792	0.995
10.01	0.996	0.987	0.895	0.9	1
15	0.626	0.702	0.747	0.833	0.995
15.01	0.963	0.95	0.997	0.908	1
20	0.577	0.656	0.85	0.768	0.995
20.01	0.986	0.888	0.945	0.961	1
25	0.618	0.702	0.785	0.796	0.995
25.01	0.951	0.95	0.872	0.868	1
30	0.569	0.655	0.716	0.734	0.989
30.01	0.974	0.887	0.955	1	1
35	0.609	0.7	0.803	0.847	0.996
35.01	0.938	0.948	0.893	0.923	1
40	0.561	0.654	0.738	0.792	0.992
40.01	0.959	0.885	0.82	0.9	1
45	0.599	0.698	0.67	0.833	0.993
45.01	0.922	0.945	0.895	0.908	1
50	0.551	0.651	0.75	0.768	0.991

فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری معدن مس سرخشم

ادامه جدول ۶-۱۳

50.01	0.942	0.881	0.833	0.96	1
55	0.588	0.694	0.686	0.796	0.992
55.01	0.905	0.94	0.762	0.868	1
60	0.54	0.647	0.622	0.734	0.984
60.01	0.924	0.875	0.83	1	1
65	0.576	0.689	0.693	0.846	0.994
65.01	0.887	0.933	0.954	0.923	1
70	0.526	0.641	0.806	0.791	0.993
70.01	1	0.868	0.895	0.899	1
75	0.564	0.682	0.749	0.832	0.994
75.01	0.868	0.924	0.999	0.907	1
80	0.517	0.634	0.856	0.768	0.994
80.01	0.884	0.859	0.951	0.96	1
85	0.551	0.675	0.799	0.795	0.994
85.01	0.848	0.913	0.887	0.867	1
90	0.505	0.626	0.73	0.734	0.987
90.01	0.863	0.848	0.974	0.999	1
95	0.537	0.666	0.82	0.846	0.996
95.01	0.827	0.901	0.911	0.922	1
100	0.492	0.617	0.754	0.791	0.99
100.01	0.842	0.836	0.838	0.899	1
105	0.523	0.656	0.686	0.832	0.991
105.01	0.806	0.888	0.916	0.907	1
110	0.479	0.608	0.768	0.767	0.989
110.01	0.82	0.823	0.853	0.959	1
115	0.51	0.645	0.704	0.795	0.989
115.01	0.785	0.873	0.782	0.866	0.999
120	0.466	0.597	0.638	0.733	0.979
120.01	0.798	0.888	0.852	0.998	1
125	0.496	0.702	0.712	0.845	0.993
125.01	0.763	0.951	0.791	0.921	1
130	0.453	0.656	0.651	0.79	0.986
130.01	0.776	0.888	0.895	0.898	1
135	0.482	0.702	0.749	0.831	0.993
135.01	0.741	0.951	1	0.906	1
140	0.526	0.656	0.858	0.766	0.995
140.01	1	0.888	0.953	0.958	1
145	0.468	0.702	0.803	0.793	0.994
145.01	0.72	0.951	0.892	0.865	1
150	0.427	0.656	0.742	0.732	0.986
150.01	0.884	0.887	0.991	0.996	1
155	0.551	0.700	0.836	0.843	0.997
155.01	0.848	0.948	0.929	0.92	1
160	0.505	0.654	0.77	0.789	0.992
160.01	0.863	0.885	0.855	0.896	1
165	0.537	0.698	0.701	0.824	0.993
165.01	0.827	0.945	0.936	0.899	1
170	0.492	0.651	0.786	0.766	0.991
170.01	0.842	0.881	0.873	0.955	1
175	0.523	0.694	0.721	0.79	0.991
175.01	0.806	0.940	0.801	0.862	1
180	0.479	0.647	0.654	0.733	0.983



شکل ۶-۱۴- منحنی قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن مس سرچشمه پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه

### ۶-۱۰- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستم‌ها

یکی از نکات مهم در عملیات تعمیر و نگهداری، به حداقل رساندن زمان تعمیر و توقف دستگاه است. بنابراین، تشخیص نقاط ضعف هر یک از زیرسیستم‌ها و تمرکز بیشتر عملیات نگهداری و تعمیرات بر این بخش از ماشین، افزایش راندمان عملیاتی، کاهش هزینه‌های بازبینی و تعمیراتی و بهبود عملیات نگهداری ماشین را به دنبال خواهد داشت. در ادامه فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ضروری و مبتنی بر سوابق خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه، مورد بحث قرار گرفته است.

#### ۶-۱۰-۱- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم هیدرولیک

با توجه به تحلیل پارتو (بخش (۵-۳))، زیرسیستم هیدرولیک به عنوان بحرانی‌ترین زیرسیستم در ماشین‌های حفاری ۲۱۰۳ و ۲۱۰۷ بوده و در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۶، دومین زیرسیستم بحرانی از نظر خرابی پس از زیرسیستم الکتریک است. با دقت در داده‌های خرابی این زیرسیستم، مشخص می‌شود که بیشتر خرابی‌های این زیرسیستم شامل موتور پروپیل شنی، پمپ آب و موتور هیدرولیک

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

سرچرخشی بوده و با رفع خرابی این زیرسیستم، به طور مرتب و پس از هر ۵ ساعت، درصد خرابی‌های این زیرسیستم در ماشین‌های ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ به ترتیب ۰.۶۹٪، ۰.۷۵٪، ۰.۷۱٪ و ۰.۶۸٪ کاهش می‌یابد. با توجه به نکات فوق، پیشنهاد می‌شود موارد زیر به صورت امور ضروری در عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک انجام شوند:

- بازدید و بررسی پمپ آب و همچنین شیلنگ‌های انتقال آب به طور منظم و در اوسط هر شیفت

- بررسی منظم سیستم روغنکاری خودکار شنی

- بازدید از موتور هیدرولیک و چرخ‌دنده‌ها و بررسی روغن‌ریزی از قسمت‌های مختلف آن

- کنترل شیلنگ‌ها و شیرهای فشارشکن هیدرولیک موجود در مدار برای بررسی نشتی و ریزش روغن

### ۶-۱۰-۲- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم الکتریک

با بررسی داده‌های خرابی و دقت در تحلیل پارتو (بخش ۵-۳)، واضح است که، زیرسیستم الکتریک در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۶ اولین و در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۶ به ترتیب، دومین و سومین زیرسیستم بحرایی از نظر خرابی است. خرابی‌های این زیرسیستم در ماشین‌های ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ به ترتیب ۰.۴۰٪، ۰.۳۲٪، ۰.۴۵٪ و ۰.۱۵٪ است. با دقت در داده‌های خرابی این زیرسیستم، مشخص می‌شود که بیشتر خرابی‌های زیرسیستم الکتریک شامل قطع دور موتور سرچرخشی، استارت کمپرسور و خرابی فیوزها و ترمینال‌های توزیع برق است. با توجه به نکات فوق، پیشنهاد می‌شود موارد زیر به صورت امور ضروری در عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم الکتریک انجام شوند:

- بررسی منظم موتور استارت کمپرسور و سایر قسمت‌های الکتریکی آن

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

- بررسی منظم اتصالات، حسگرهای درجه حرارت روغن هیدرولیک و کمپرسور، گیج‌های الکتریکی فشار روغن، سرعت دورانی، نیروی پشت سرمته و غیره.

### ۶-۱۰-۳- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم هوای فشرده

با دقت در تحلیل پارتو، واضح است که زیرسیستم هوای فشرده در ماشین‌های ۲۱۰۱ و ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۹ به ترتیب ۱۸٪، ۱۹٪، ۱۰٪ و ۳٪ از کل خرابی ماشین‌های حفاری را شامل می‌شود. عمده خرابی‌های کمپرسور و سیستم تامین هوای فشرده در ماشین‌های حفاری ماشین معدن مس سرچشمه، شامل خرابی و یا افتادگی تسمه و نشت باد بوده است. بنابراین بررسی شل بودن تسمه‌های کمپرسور، بازرسی منظم لوله‌های انتقال هوای فشرده، بررسی و بازرسی منظم درجه حرارت و عملکرد خنک‌کننده کمپرسور به عنوان فعالیت‌های مهم در حین عملیات بازرسی و نگهداری زیرسیستم تامین هوای فشرده ماشین‌های حفاری، پیشنهاد می‌شود.

### ۶-۱۰-۴- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم حفاری

با توجه به اینکه، زیرسیستم حفاری به طور مستقیم در ارتباط با عملیات حفر چال قرار دارد، بررسی و بازبینی مرتب قسمت‌های مهم این زیرسیستم حیاتی به منظور بهبود عملیات حفاری، ضرورت دارد. با بررسی داده‌های خرابی و دقت در تحلیل پارتو، واضح است که، زیرسیستم حفاری در ماشین‌های ۲۱۰۱، ۲۲۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷، به ترتیب ۷٪، ۵٪، ۲۱٪ و ۱۸٪ از کل خرابی این ماشین‌ها را تشکیل می‌دهند. با این وجود، این زیرسیستم دومین زیرسیستم بحرانی از نظر خرابی در ماشین‌های حفاری ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ بوده و دارای کم‌ترین خرابی در ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱ و ۲۱۰۳ است. عمده خرابی‌های این زیرسیستم شامل شکستگی تثبیت‌کننده و خرابی ضربه‌گیر می‌باشد. بنابراین، بررسی

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

این دو بخش حیاتی در زیرسیستم حفاری ماشین‌های معدن مس سرچشمه به منظور بهبود در عملکرد و افزایش بازدهی عملیات تعمیر و نگهداری آن ضرورت دارد.

### ۶-۱۰-۵- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در زیرسیستم حرکت

با بررسی داده‌های خرابی و دقت در تحلیل پارتو، واضح است که زیرسیستم حرکت در ماشین‌های ۲۱۰۱، ۲۲۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷، به ترتیب ۷، ۵، ۸ و ۸ درصد از کل خرابی این ماشین‌ها را تشکیل می‌دهند. استفاده از ماشین‌های حفاری در زمین‌های ناهموار و نامناسب عملکرد بهینه این زیرسیستم را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. شل شدن پیچ‌های کفشک و شکستگی و بیرون آمدن آن‌ها از عمده‌ترین خرابی‌های مشاهده شده در این زیرسیستم است. با این وجود پیشنهاد می‌شود موارد زیر به صورت امور ضروری در عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستم حرکت انجام شوند:

- بازرسی منظم خورشیدی تامبلر، خورشیدی‌های کوچک و پیچ‌های کفشک
- بررسی عملکرد و بازبینی اتصالات ترمز
- بازرسی اتصالات، شیلنگ‌ها و جعبه‌دنده موتور پیش‌ران‌ش‌شنی برای تشخیص زودهنگام نشتی روغن و رفع آن
- بررسی سنسور نیتروژن مربوط به تنظیم زنجیر شنی و بازرسی عملکرد مناسب آن

### ۶-۱۱- 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 حفاری معدن مس سرچشمه معرفی شدند. در استراتژی انتخاب شده، با تاکید بر رسیدن قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری به سطح ۹۰٪، به ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای هر یک از

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه

زیرسیستم‌ها پرداخته شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه زمان رسیدن قابلیت اطمینان زیرسیستم حرکت ماشین حفاری شماره ۲۱۰۷، حدود ۴ برابر زمان توقف این ماشین است، تعمیر و نگهداری اصلاحی برای این زیرسیستم ارائه شد. پس از ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای سایر زیرسیستم‌های ماشین حفاری ۲۱۰۷ و همچنین زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱، ۲۱۰۳ و ۲۱۰۶، به بررسی تاثیر برنامه نگهداری بر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و نیز قابلیت اطمینان کلی ماشین‌های حفاری پرداخته شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، با بهره‌گیری از برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷ به طور متوسط به ترتیب ۰/۶۵٪، ۰/۸۰٪، ۰/۸۷٪ و ۰/۸۸٪ افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن نیز به طور متوسط به اندازه ۰/۹۸٪ افزایش پیدا کرده است. در پایان به منظور افزایش بازدهی عملیات سرویس و نگهداری، جزئیات تعمیر و نگهداری تمام زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه ارائه و مورد بررسی قرار گرفت.

فصل ہفتم:

نتیجہ گیری و پیشہ داری



## ۷-۱- نتیجه گیری

تجهیزات حفاری مهمترین واحد عملیاتی در معادن روباز بوده که از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و سودآوری معدن تلقی گردد. به منظور جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش عملکرد دستگاه‌های حفاری، اطلاع از شرایط کاری دستگاه‌ها 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 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.

اگرچه تاکنون تحقیقات گسترده و مهمی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم‌های مهندسی در دنیا ارائه شده است، اما تجهیزات حفاری از این مقوله بی‌بهره بوده و بررسی‌های صورت گرفته در مورد این‌گونه تجهیزات عمدتاً بر پایه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی بوده است. بر این اساس در این تحقیق، ضمن مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری 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 حفاری مورد تحلیل قرار گرفت. در فاز دوم تحقیق، با بررسی کاتالوگ، نقشه‌های فنی، بررسی‌ها صحرائی و تعمیراتی و مشاوره‌های انجام شده با مهندسين مکانیک و مکانیک‌های معدن، پنج زیرسیستم هیدرولیک، الکتریک، هوای فشرده، حفاری و حرکت برای ماشین‌های حفاری معدن مس سرچشمه تعریف شدند. در فاز سوم تحقیق، داده‌های خرابی هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری، تفکیک و 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 حفاری محاسبه و با توجه به ارتباط سری بین زیرسیستم‌های هر یک از

ماشین‌ها، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری معدن، مورد مدلسازی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مدل‌های قابلیت اطمینان ارائه شده، ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷، به ترتیب پس از ۱۲۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۸۰ ساعت به طور کامل متوقف خواهند شد. با توجه به مدل‌های قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری مختلف، مدل قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن ارائه گردید. در فاز چهارم (فاز نهایی) تحقیق، با استفاده از مدل‌های قابلیت اطمینان ارائه شده برای هر یک از ماشین‌های حفاری، به ارائه برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از زیرسیستم‌های ماشین‌های حفاری معدن پرداخته شد. با توجه به برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان هر یک از ماشین‌های حفاری ۲۱۰۱، ۲۱۰۳، ۲۱۰۶ و ۲۱۰۷، به طور متوسط به ترتیب ۰/۶۵٪، ۰/۸۰٪، ۰/۸۷٪ و ۰/۸۸٪ درصد و نیز قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن، ۰/۹۸٪ بهبود خواهد یافت. در پایان به منظور بهینه‌سازی عملیات بازرسی، تعمیر و نگهداری، جزئیات برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از زیرسیستم‌ها به صورت مجزا ارائه شد.

### ۷-۲- 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 زیرسیستم‌های مختلف ماشین‌های حفاری، 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:

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

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

۳- بررسی تاثیر برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهاد شده در کاهش نرخ خرابی هر یک از زیرسیستم‌های پنج‌گانه ماشین‌های حفاری.

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

۵- استفاده از روش‌های ارائه شده در این تحقیق به منظور بررسی قابلیت اطمینان سایر ماشین‌های معدنی که در معدن مس سرچشمه و یا سایر معادن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## منابع و مراجع

- بلینتون، ر.، آلن، ر.، (۱۳۹۰)، "قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی"، ترجمه: محسن رضاییان، چاپ دوم: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۵۱۲ صفحه.
- جلالی، س. م. ا.، حسینی، س. م. ع.، نجفی، م.، (۱۳۸۸)، "برآورد تعداد کارگاه‌های استخراج ذخیره در معدنکاری زیرزمینی با استفاده از فرآیندهای تصادفی"، نشریه علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شماره ۷۰، صفحات ۴۵-۵۲.
- حاج‌شیر محمدی، ع.، (۱۳۹۰)، "برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (مدیریت فنی در صنایع)"، علی حاج شیر محمدی، چاپ شانزدهم، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ صفحه.
- حسینی، س. ه.، (۱۳۹۰)، "مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان شیرر؛ مطالعه موردی: معدن زغالسنگ طبس"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرباسیان، م.، طباطبایی، ل.، (۱۳۸۸)، "آشنایی با قابلیت اطمینان"، چاپ اول، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول، ۱۵۰ صفحه.
- نعمت‌اللهی، ن.، (۱۳۸۷)، "آمار و احتمالات مهندسی"، چاپ نهم، انتشارات دالفک. ۳۳۷ صفحه.

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

Barabadi, A., Barabady, J., Markeset, T., (2011), "Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates", Journal of Reliability Engineering and System Safety, PP. 210-217.

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, PP. 647-653.

Bhalchandra, V.G., (2011), "Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines", CRC Press-Balkema

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

Blischke W. R., Murthy D. N. P., (2003), "Case Studies in Reliability and Maintenance", John Wiley & Sons, pp. 620-696.

Castet, J.F., Saleh, J.H., (2009), "Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling", journal of Reliability Engineering and System Safety 94, PP. 1718-1728

Csenki, A., (2007), Joint interval reliability for Markov systems with an application in transmission line reliability, Journal of Reliability Engineering and System Safety Vol. 92, PP. 685-691.

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

Das, K., Lashkari, R.S., Sengupta, S., (2007), "Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems", *European Journal of Operational Research* Vol. 183, PP. 162–180.

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.

Dhillon B. S., (1999), "Engineering Maintainability", Gulf Publishing Company.

Dutuit, Y., Rauzy, A., (2005), "Approximate estimation of system reliability via fault trees", *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 87, PP. 163-172.

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.M.E., and Forohande, S. F., (2011), "Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction", *Safety Science*, Vol. 49, PP. 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.

Jimeno, C.L., (1995), "Drilling and Blasting of Rocks", PP. 97-100.

Juang, Y.S., Lin, S.S., Kao, H.P., (2008), "A knowledge management system for series-parallel availability optimization and design", *Expert Systems with Applications*, Vol. 34, PP. 181-193.

Kececiyoglu D. B., (2002), "Reliability Engineering Handbook", Vol. 1, DEStech Publication, USA, PP. 721.

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.

Kumral, M., (2005), "Reliability-based optimization of a mine production system using genetic algorithms", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 18, PP. 186–189.

Kumar, D., Klefsjo, B., and Kumar, U., (1992), "Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model", Reliability Engineering and Safety system, Vol. 37, PP. 217–222.

Lisnianski, A., Elmakias, D., Laredo, D., and BenHaim, H., (2012), "A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit", journal of Reliability Engineering and System Safety 98, PP. 1–6.

Maciejewski, H., (2009), "Reliability Centered Maintenance of Repairable Equipment", Fourth International Conference on Dependability of Computer Systems.

Miao Z., Wang, Z., Lan, W., (2010), "Reliability Evaluation of Mine Ventilation Systems Based on Multi-state System Theory", 8th IEEE International Conference on Control and Automation Xiamen, China.

MIL-HDBK-189, (1981), "Reliability growth management", Headquarters, US Army Communication Research and Development Command, A'ITN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ.

Rausand M., Hsyland A., (2004), "System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications", 2nd edition, Wiley & Sons, PP. 644.

Ray, P., (2004), "Performance assessment of dragline in opencast mines", Indian journal of engineering and material science, Vol.4, PP. 493-498.

Samanta, B., Sarkar, B., and Mukherjee, S.K., (2004), "Reliability modeling and performance analyses of an LHD system in mining", Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.

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.

Wei, X.L., Ran, J.H., and Liu, X., (2009), "the reliability assessment of coal mine scraper conveyer flight link, word journal of engineering", PP. 79-83.

Zhang, J.J., Wei, Z.G., Qian, Z., Xiao, F., (2009), “A new algorithm for calculating ventilation network reliability based on truncation error theory and network simplification”, The 6th International Conference on Mining Science & Technology, PP.169-172.

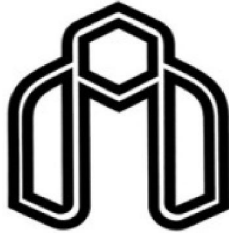
## **Abstract**

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. Drilling equipment is the most important operation unit in mine and mining industries 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 drilling operation and equipment area were based on engineering judgment. To avoid from unpredicted failures and improvements of drilling 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. In this research, after presentation of probability concepts, definition and reliability modeling in chapter 2 drilling machines have been introduced in chapter 3. Operation subsystems of drilling machines have been introduced in chapter 4. Based on this research, Hydraulic, electrical, pneumatic, drilling and transmission subsystems were introduced for the first time. Reliability modeling of any subsystems of drilling machines and drilling fleet in Sarchechme copper mine have been done and presented in chapter 5. Scheduling of



preventive maintenance for subsystems of drilling machines has been done base on keeping reliability of subsystems at 90% and given in chapter 6 of this research. Based on this presented maintenance scheduling, reliability of drilling 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, Drilling Machines, Sarcheshme copper mine.



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**M.Sc. Thesis**

**Reliability Modeling and Improvement of Operation and  
Repair Performance of Drilling Machines; Case Study:  
Sarcheshme Copper Mine**

**Mohammad Javad Rahimdel**

Supervisor(s):  
**Prof. M. Ataei**  
**Prof. R. Khalokakaei**

Advisor:  
**Dr. Seyed Hadi Hoseinie**

September 2012