



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
رساله دکتری استخراج مواد معدنی

## مدل سازی قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین

نگارنده: حاصل امینی خوشالان

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

استاد مشاور:

دکتر سید هادی حسینی

تیر ۱۳۹۵



تقدیم به:

پدر عزیز و مادر مهربانم که دعای خیرشان همیشه پشت و پناهم بوده است

و

خواهران و برادران عزیزم که همواره پشتیبان و حامیان من در طول دوران تحصیلی ام بوده

اند

و

همسر عزیزم که در این دوره با تمام سختی‌هایی که داشتیم صبورانه در کنارم بود

و همچنین

دختر نازنینم امید زندگی ام....

## تشکر و قدردانی

اکنون که با فضل و احسان خداوند متعال به این درجه از علم نائل می‌شوم بر خود لازم می‌دانم که از تمامی عزیزانی که در طی دوران تحصیل این حقیر، زحمات زیادی متقبل شده‌اند اعم از اعضای خانواده و همه‌ی دبیران و اساتید گرانقدرام کمال امتنان و نهایت سپاس‌گزاری را داشته باشم.

اینجانب از تمامی اساتید گرانمایه و پرسنل محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که میزبان شایسته‌ای از حقیر در مقطع دکتری بودند نهایت قدردانی را می‌نمایم.

همچنین بر خود واجب می‌دانم از زحمات استاد راهنمای ارجمند و فرزانه‌ام جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی که در طول این دوره تحصیلی مطالب علمی و نکات اخلاقی ارزنده‌ای از ایشان آموختم و همیشه خودم را مدیون ایشان می‌دانم کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم و برای ایشان و خانواده محترم‌شان سلامتی و طول عمر آرزومندم.

در نهایت از جناب آقای دکتر سید هادی حسینی و جناب آقای دکتر بهزاد قدرتی که اساتید مشاور این رساله بودند به خاطر مشاوره‌های ارزنده ایشان صمیمانه سپاس‌گزارم.

## تعهد نامه

اینجانب **حاصل امینی خوشالان** دانشجوی دوره **کارشناسی ارشد / دکتری رشته مهندسی استخراج معدن** معدن ، نفت دانشکده **معدن و نفت** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده **پایان نامه / رساله** **مدل سازی قابلیت اطمینان: دسترسی و نگهداری و تعمیر ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل** تحت راهنمایی **پروفسور سید رحمان ترابی** متعهد می شوم . فشار زمین

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

تاریخ : ۹۵/۴/۹

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد .

## چکیده

تحلیل قابلیت اطمینان فرآیندی عملی و کاربردی می‌باشد که هم در مراحل طراحی و هم در مراحل مختلف بهره‌برداری صورت می‌گیرد و به کنترل، آزمون و ارزیابی، تجزیه و تحلیل خرابی‌های بالفعل و بالقوه موجود در سیستم پرداخته و نهایتاً قادر به پیش‌بینی نرخ وقوع خرابی مجموعه مورد مطالعه می‌باشد. به موازات بحث قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر نیز میزان سهولت نسبی تعمیر و اصلاح هر بخش یا زیرسیستم را تعیین می‌کند و موضوع تکمیل کننده قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری، مبحث قابلیت دسترسی سیستم یا دستگاه می‌باشد که با محاسبه آن میزان در دسترس بودن دستگاه مشخص می‌شود و می‌توان دید واقع بینانه‌تری نسبت به وضعیت کلی دستگاه پیدا کرد.

در رساله حاضر به منظور بررسی وضعیت عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین، ماشین حفار مشغول در خط یک مترو تبریز ساخت شرکت NFM فرانسه در نظر گرفته شد و با مطالعه ساختار کلی ماشین، شش زیر سیستم شامل زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین، زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین، زیرسیستم الکتریک، زیرسیستم هیدرولیک، زیرسیستم هوای فشرده و زیرسیستم آب برای این نوع ماشین حفاری معرفی گردید و کلیه اطلاعات و داده‌های توقف‌های ناشی از خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته مربوط به حدود ۲۶ ماه عملیات حفاری ماشین جمع آوری گردید.

در ادامه داده‌های خرابی و تعمیر مربوط به هر زیرسیستم طبقه‌بندی شدند و تحلیل‌های آماری صورت گرفته نشان داد که داده‌های خرابی و تعمیر همه‌ی زیرسیستم‌ها از توابع توزیع آماری کلاسیک تبعیت می‌کنند. بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای مربوط به توابع توزیع چگالی خرابی و تعمیر، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و همچنین قابلیت دسترسی هر زیرسیستم محاسبه شد. در مرحله بعد، با توجه به نتایج به دست آمده و ساختار سری زیرسیستم‌ها، تحلیل‌های مربوط به کل ماشین حفاری صورت پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، قابلیت اطمینان ماشین مورد مطالعه بعد از حدود ۵۵ ساعت عملیات حفاری تونل به صفر می‌رسد. همچنین قابلیت دسترسی ماشین حدود ۴۸/۰۳٪ محاسبه شد. همچنین به منظور بهبود عملکرد و کاهش توقفات ناخواسته ماشین حفاری، برنامه تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه برای ماشین حفاری تمام مقطع تونل در خط یک مترو تبریز پیشنهاد گردید. در پایان تخمین میانگین عمر باقی‌مانده ابزار برشی ماشین با در نظر گرفتن شرایط محیطی صورت گرفت.

**کلمات کلیدی:** ماشین حفاری تمام مقطع تونل، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری، قابلیت دسترسی

1. Amini Khoshalan H., Torabi S. R., Hoseinie S. H., Ghodrati B. (2015) "RAM Analysis of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines: A Case Study", *International Journal of Mining & GeoEngineering*, 49(2): 173-185.
2. Amini Khoshalan H., Torabi S. R., Maleki D. (2015) "RAM Analysis of Hydraulic System of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine", *Indian Journal of Science and Technology*, 8(28): 1-9.
3. Amini Khoshalan H., Torabi S. R., Hoseinie S. H., Ghodrati B. (2014) "An introduction to RAM analysis of EPB tunnel boring machines", *Scientific Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(3): 120-127.
۴. امینی خوشالان ح.، ترابی س. ر.، راضی فرد م. (۱۳۹۴) "مدل سازی قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین" نشریه مهندسی منابع معدنی و هیدروکربنی، پذیرفته شده در ۱۳۹۴/۱۰/۱۹.
5. Amini Khoshalan H., Torabi S. R., (2014) "Guideline for RAM analysis of EPB-TBMs", 5th Iranian Rock Mechanics Conference (IRMC5), Tehran, Iran.
6. Amini Khoshalan H., Torabi S. R., Hoseinie S.H., Maleki D. (2015) "Reliability concepts applied to earth pressure balance tunnel boring machine", International Conference on New Research in Civil engineering and Architecture, Tehran, Iran.



## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- آشنائی ..... ۲
- ۲-۱- متروی تبریز؛ خط یک ..... ۴
- ۳-۱- بیان مسأله و سؤال‌های اصلی تحقیق ..... ۶
- ۴-۱- اهداف تحقیق ..... ۸
- ۵-۱- ضرورت انجام تحقیق ..... ۸
- ۶-۱- ساختار رساله ..... ۱۰

### فصل دوم: کلیاتی در مورد قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲- مفاهیم قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (RAM) ..... ۱۴
- ۳-۲- برخی از اصطلاحات و پارامترهای حوزه‌ی RAM ..... ۱۵
- ۴-۲- توابع احتمالاتی خرابی - زمان ..... ۱۷
- ۱-۴-۲- تابع توزیع چگالی احتمال ..... ۱۷
- ۲-۴-۲- تابع توزیع تجمعی ..... ۱۸
- ۳-۴-۲- تابع قابلیت اطمینان ..... ۱۸
- ۴-۴-۲- تابع نرخ خرابی ..... ۱۸
- ۱-۴-۴-۲- مفهوم نمودار وان حمام و نرخ خرابی ..... ۲۰
- ۵-۴-۲- توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال ..... ۲۲
- ۱-۵-۴-۲- توزیع نمایی ..... ۲۲
- ۲-۵-۴-۲- توزیع ویبل ..... ۲۳
- ۳-۵-۴-۲- توزیع نرمال ..... ۲۴
- ۴-۵-۴-۲- توزیع لاگ نرمال ..... ۲۴
- ۵-۵-۴-۲- توزیع گاما ..... ۲۵
- ۶-۲- قابلیت تعمیر و نگهداری ..... ۲۶

۲۷	۲-۶-۱- توانع قابلیت تعمیر و نگهداری
۲۸	۲-۷-۱- قابلیت دسترسی
۲۹	۲-۷-۱- تخصیص قابلیت دسترسی
۳۰	۲-۷-۲- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی
۳۳	۲-۸-۱- انواع سیستم‌ها
۳۳	۲-۸-۱- شبکه سری
۳۴	۲-۸-۱-۱- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای شبکه سری
۳۴	۲-۸-۲- شبکه موازی
۳۵	۲-۸-۲-۱- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای شبکه موازی
۳۶	۲-۹-۱- مدل‌سازی و تحلیل RAM
۳۸	۲-۹-۱- مدل‌سازی RAM با روش آماری
۳۹	۲-۹-۲- آزمون روند
۴۱	۲-۹-۳- آزمون همبستگی سری
۴۱	۲-۹-۴- فرآیند پواسن

#### فصل سوم: مروری بر تحقیقات انجام شده

۴۴	۳-۱- مقدمه
۴۴	۳-۲- تاریخچه تحقیقات صورت گرفته در حوزه RAM
۴۶	۳-۳- تحقیقات صورت گرفته در حوزه RAM بر روی ماشین آلات معدنی
۶۰	۳-۴- مطالعات صورت گرفته در مورد قابلیت اطمینان ماشین حفاری تمام مقطع تونل

#### فصل چهارم: تعیین زیرسیستم‌های ماشین حفاری تمام مقطع تونل و تهیه پایگاه داده

۶۴	۴-۱- مقدمه
۶۴	۴-۲- ماشین حفار خط یک مترو تبریز و زیرسیستم‌های آن
۶۸	۴-۲-۱- ساختار کلی ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۶۸	۴-۲-۱-۱- بخش سپر و کله حفار
۷۱	۴-۲-۱-۲- بخش اتصال

۷۲.....	۳-۱-۲-۴- بخش پشتیبان
۷۶.....	۳-۴- تعیین زیرسیستم‌های ماشین حفار و داده‌های خرابی و تعمیر آن
۷۶.....	۱-۳-۴- زیرسیستم مکانیک
۸۴.....	۲-۳-۴- زیرسیستم برق
۸۷.....	۳-۳-۴- زیرسیستم هیدرولیک
۹۰.....	۴-۳-۴- زیرسیستم هوای فشرده
۹۲.....	۵-۳-۴- زیرسیستم آب

#### فصل پنجم: تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری EPB- TBM

۹۶.....	۱-۵- مقدمه
۹۶.....	۲-۵- تحلیل پارتو
۹۷.....	۳-۵- تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری EPB - TBM
۱۰۰.....	۴-۵- تحلیل قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۰۲.....	۱-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک
۱۰۸.....	۲-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم برق
۱۱۱.....	۳-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک
۱۱۳.....	۴-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده
۱۱۶.....	۵-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم آب
۱۱۹.....	۶-۴-۵- قابلیت اطمینان کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۲۱.....	۵-۵- تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۲۳.....	۱-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک
۱۲۸.....	۲-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق
۱۲۸.....	۳-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک
۱۳۲.....	۴-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هوای فشرده

۱۳۴.....	۵-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم آب
۱۳۷.....	۵-۵-۶- قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۳۹.....	۵-۶- قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۴۲.....	۵-۷- تخصیص قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۴۴.....	۵-۸- بهبود قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز با تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه
۱۴۵.....	۵-۸-۱- سیستم تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه
۱۴۶.....	۵-۸-۲- تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان
۱۴۸.....	۵-۸-۳- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز
۱۵۲.....	۵-۸-۴- ارزیابی میانگین عمر باقی‌مانده با در نظر گرفتن شرایط محیط
۱۵۳.....	۵-۸-۴-۱- قابلیت اطمینان مبتنی بر پارامترها و متغیرهای محیطی
۱۵۵.....	۵-۸-۴-۲- محاسبه میانگین عمر باقی‌مانده
۱۵۶.....	۵-۸-۴-۳- تأثیر متغیرهای محیطی بر میانگین عمر باقی‌مانده ابزار برش ماشین حفار

#### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۶۸.....	۶-۱- مقدمه
۱۶۸.....	۶-۲- نتایج
۱۷۵.....	۶-۲- پیشنهادات
۱۷۷.....	منابع و مراجع

#### فهرست جداول

۹.....	جدول ۱-۱- پروژه‌های حفاری با EPB – TBM در کشور
۲۳.....	جدول ۱-۲- توابع مختلف و میانگین توزیع ویبل
۲۴.....	جدول ۲-۲- توابع مختلف و میانگین توزیع نرمال

- جدول ۲-۳- توابع مختلف و میانگین توزیع لاگ نرمال ..... ۲۵
- جدول ۲-۴- توابع مختلف و میانگین توزیع گاما ..... ۲۵
- جدول ۳-۱- سیستم‌ها و زیرسیستم‌های TBM ..... ۶۱
- جدول ۳-۲- اعداد اولویت ریسک برای سیستم‌های TBM ..... ۶۱
- جدول ۴-۱- مشخصات کلی ماشین سیلان ..... ۶۶
- جدول ۴-۲- داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار ..... ۷۷
- جدول ۴-۳- داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین حفار ..... ۸۰
- جدول ۴-۴- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم برق ماشین حفار ..... ۸۵
- جدول ۴-۵- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم هیدرولیک حفار ..... ۸۸
- جدول ۴-۶- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفار ..... ۹۱
- جدول ۴-۷- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم آب ماشین حفار ..... ۹۳
- جدول ۵-۱- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها ..... ۱۰۰
- جدول ۵-۲- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های تعمیر زیرسیستم‌ها ..... ۱۲۳
- جدول ۵-۳- نتایج شاخص‌های اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های ماشین حفار ..... ۱۴۳
- جدول ۵-۴- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد زیرسیستم‌های ماشین حفار ..... ۱۴۷
- جدول ۵-۵- دوره تعمیرات پیش‌گیرانه پیشنهادی برای زیرسیستم‌های EPB-TBM ..... ۱۴۸
- جدول ۵-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ..... ۱۵۰
- جدول ۵-۷- حالت‌های مختلف متغیرهای موجود ..... ۱۵۷
- جدول ۵-۸- داده‌های خرابی خراش دهنده ماشین حفار و وضعیت متغیرهای تأثیرگذار بر آن ..... ۱۵۸
- جدول ۵-۹- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های خرابی خراش دهنده‌ها ..... ۱۵۹
- جدول ۵-۱۰- نتایج تحلیل داده‌ها با نرم افزار SYSTAT ..... ۱۶۰
- جدول ۵-۱۱- میانگین عمر باقی‌مانده ابزار برشی ماشین بعد از گذشت ۵۰ ساعت عملیات حفاری ..... ۱۶۴

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱-۱- موقعیت خطوط مترو تبریز ..... ۵
- شکل ۱-۲-۱- خروج ماشین حفار از تونل سبلان خط یک متر تبریز ..... ۶
- شکل ۱-۳-۱- میانگین زمان‌های توقف و حفاری در ۱۰ تونل مکانیزه ..... ۷
- شکل ۱-۴-۱- میزان نسبی زمان‌های حفاری و تعمیرات و نگهداری ماشین حفار تمام مقطع تونل ..... ۱۰
- شکل ۱-۲-۱- نمودار وان حمام نرخ خرابی ..... ۲۰
- شکل ۲-۲-۱- یک شبکه سری با  $n$  زیر سیستم ..... ۳۳
- شکل ۳-۲-۱- یک شبکه موازی با  $n$  زیر سیستم ..... ۳۵
- شکل ۴-۲-۱- روندنمای فرآیند تحلیل RAM ..... ۴۰
- شکل ۵-۲-۱- محدوده پذیرش فرض صفر و حد بالا و پایین در آزمون روند ..... ۴۱
- شکل ۱-۳-۱- منحنی قابلیت اطمینان LHD ..... ۴۷
- شکل ۲-۳-۱- مدل قابلیت اطمینان برای یک کامیون‌های زیرزمینی ..... ۴۹
- شکل ۳-۳-۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های دستگاه شاول ..... ۴۹
- شکل ۴-۳-۱- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های دستگاه شاول ..... ۵۰
- شکل ۵-۳-۱- قابلیت دسترسی دستگاه شاول ..... ۵۰
- شکل ۶-۳-۱- منحنی نرخ خرابی و منحنی قابلیت اطمینان نوار نقاله و سرند در معدن بوکسیت جاجرم ..... ۵۱
- شکل ۷-۳-۱- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری نوار نقاله و سرند در معدن بوکسیت جاجرم ..... ۵۲
- شکل ۸-۳-۱- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری سه شاول از نوع کابل برقی ..... ۵۳
- شکل ۹-۳-۱- قابلیت دسترسی اجزای سیستم تولید در معدن مورد مطالعه ..... ۵۳
- شکل ۱۰-۳-۱- زیرسیستم‌های دستگاه شیر در معدن زغال سنگ طبس ..... ۵۵
- شکل ۱۱-۳-۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های درام شیر در معدن زغال سنگ طبس ..... ۵۳
- شکل ۱۲-۳-۱- منحنی قابلیت اطمینان درام شیر معدن زغال سنگ طبس ..... ۵۶
- شکل ۱۳-۳-۱- ماشین لقی‌گیر در معادن زیرزمینی سوئد ..... ۵۷
- شکل ۱۴-۳-۱- قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری در معدن مس سرچشمه ..... ۵۸
- شکل ۱۵-۳-۱- خرابی‌های غیر قابل قبول ( $RPN > 80$ ) ..... ۶۲

- شکل ۴-۱- ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۶۵
- شکل ۴-۲- نمای شماتیک ساختار ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۶۷
- شکل ۴-۳- نمایی بسته از سپرهای ماشین حفار ..... ۶۸
- شکل ۴-۴- صفحه حفار و اجزای برشی آن ..... ۷۰
- شکل ۴-۵- اجزای اصلی بخش سپر ماشین حفار ..... ۷۱
- شکل ۴-۶- اجزای اصلی بخش اتصال ماشین حفار ..... ۷۲
- شکل ۴-۷- اجزای اصلی تعبیه شده در بخش پشتیبان ماشین حفار ..... ۷۵
- شکل ۴-۸- زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۷۶
- شکل ۵-۱- نمودار تحلیل پارتو برای زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۹۷
- شکل ۵-۲- روندنمای استفاده شده در رساله برای تحلیل RAM ..... ۹۸
- شکل ۵-۳- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۴- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P ی زیرسیستم مکانیک ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک پشتیبان ماشین ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۶- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک پشتیبان ماشین ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۷- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک بدنه ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۸- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۰- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم برق ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۱- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم برق ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم برق ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۳- نمودار فراوانی خرابی‌ها و تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۶- نمودار فراوانی خرابی‌ها و تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۱۴

- شکل ۵-۱۷- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۸- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۹- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم آب ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم آب ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم آب ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۲۲- منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبری ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۳- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۴- آزمون همبستگی سری برای داده‌های تعمیر ..... ۱۲۲
- شکل ۵-۲۵- نمودار فراوانی و پارامترهای توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک پشتیبان ..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۶- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۷- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۸- نمودار فراوانی و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک بدنه ..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۹- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین ..... ۱۲۷
- شکل ۵-۳۰- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین ..... ۱۲۷
- شکل ۵-۳۱- نمودار فراوانی تعمیرها و تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم برق ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۳۲- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق ..... ۱۲۹
- شکل ۵-۳۳- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم برق ..... ۱۲۹
- شکل ۵-۳۴- نمودار فراوانی تعمیرها و تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۳۰
- شکل ۵-۳۵- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۳۱
- شکل ۵-۳۶- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم هیدرولیک ..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳۷- نمودار فراوانی و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳۸- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳۹- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم هوای فشرده ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۴۰- نمودار فراوانی تعمیرها و تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم آب ..... ۱۳۵



- شکل ۵-۴۱- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم آب ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۴۲- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم آب ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۴۳- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفار ..... ۱۳۷
- شکل ۵-۴۴- قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار خط یک مترو تبریز ..... ۱۳۸
- شکل ۵-۴۵- تغییرات منحنی قابلیت اطمینان ماشین با اعمال تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ..... ۱۵۱
- شکل ۵-۴۶- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی خراش دهنده‌ها ..... ۱۵۹
- شکل ۵-۴۷- نمودارهای نرخ خرابی خراش دهنده‌ها در حالات مختلف متغیرهای محیطی ..... ۱۶۱
- شکل ۵-۴۸- نمودارهای قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن شرایط محیطی ..... ۱۶۲



# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- آشنائی

آهنگ رشد بی‌سابقه جمعیت شهرهای بزرگ کشور ما از یک سو و فقدان سیستم حمل و نقل مناسب از سوی دیگر ما را در مدیریت حمل و نقل شهری با مشکلات زیادی مواجه نموده و موجب تأخیر و طولانی شدن سفرهای درون شهری، آلودگی هوا، اتلاف وقت شهروندان، افزایش مصرف سوخت، افزایش هزینه سفر و غیره شده است. پیشرفت روزافزون دانش صنعت حفاری، استفاده از قطار شهری زیرزمینی (مترو) را به گزینه مناسبی برای کاهش این مشکلات مبدل ساخته است.

در سال‌های اخیر استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل به سرعت در حال افزایش می‌باشد. چرا که این ماشین‌ها در واقع یک کارخانه عظیم تونل‌سازی هستند و توانسته‌اند دو پارامتر اصلی در یک پروژه تونل‌سازی یعنی کاهش زمان اجرا و کاهش هزینه را به شدت تحت تأثیر خود قرار بدهند. این ماشین‌ها، کمترین تأثیر ممکن بر سازه‌های سطح زمین داشته و همچنین بدلیل حفاری با کیفیت و سرعت بالا، ایمنی بسیار بالا برای پرسنل و کمترین تأثیرات زیست محیطی روز به روز بر کاربرد آن‌ها افزوده می‌شود. این ماشین‌ها هم برای حفاری در سنگ سخت و هم در زمین‌های سست شهری کاربرد دارند که برای حفاری در زمین‌های سست شهری که غالباً جهت حفر تونل‌های مترو می‌باشد ماشین‌های حفاری از نوع تعادل فشار زمین<sup>۱</sup> (EPB) از کاربرد بسیار زیادی برخوردارند. با توجه به افزایش روزافزون جمعیت کشورمان و ضرورت استفاده از مترو و فضاهای زیرزمینی، این ماشین‌ها در کشورمان با استقبال زیادی روبرو شده‌اند و در حال حاضر چندین دستگاه از این ماشین‌ها در تونل‌های مترو تهران، اصفهان، تبریز، مشهد و اهواز مشغول به حفاری می‌باشند.

با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بالای این ماشین‌ها، نیاز به شناخت کامل از قسمت‌های مختلف دستگاه و زیرسیستم‌های آن احساس می‌شود تا با مطالعه دقیق دستگاه و اطلاعات خرابی‌ها و تعمیراتی که در این ماشین صورت می‌گیرد شناخت صحیحی از قابلیت اطمینان<sup>۲</sup>،

<sup>۱</sup>. Earth Pressure Balance

<sup>۲</sup>. Reliability

قابلیت دسترسی<sup>۱</sup> و قابلیت تعمیر و نگهداری<sup>۲</sup> (تحت عنوان تحلیل RAM ماشین) صورت گیرد و با برنامه‌ریزی صحیح عملیات تعمیر و نگهداری بتوان از توقف‌های ناخواسته ماشین تا حدود زیادی جلوگیری کرد و همچنین با افزایش قابلیت دسترسی یا به عبارت بهتر افزایش ضریب بهره‌وری<sup>۳</sup> ماشین و کاهش زمان انجام پروژه تا حدود زیادی در هزینه‌های عملیاتی پروژه صرفه‌جویی کرد. تحلیل RAM فرآیندی عملی و کاربردی می‌باشد که هم در مراحل طراحی و ساخت و هم در مراحل مختلف بهره‌برداری از ماشین آلات می‌تواند به کار رود. این فرآیند به کنترل، آزمون و ارزیابی و تجزیه و تحلیل خرابی‌های بالفعل و بالقوه حادث در تک تک زیرسیستم‌ها و کل سیستم پرداخته و نهایتاً قادر به تخمین قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت نگهداری و برنامه‌ریزی مناسب برای تعمیر و نگهداری و بهبود قابلیت‌های فوق در مجموعه مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به گسترش زیاد این فرآیند در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از قبیل حمل و نقل، صنایع نفت و گاز، صنایع نظامی و تجهیزات الکترونیکی، نیروگاه‌های اتمی، تجهیزات و ماشین آلات معادن روباز و زیرزمینی و صنایع وابسته معدنی نظیر کارخانجات شن و ماسه و کارخانجات فرآوری و امثالهم، می‌توان از این فرآیند در مطالعه ماشین حفاری تمام مقطع تونل نیز استفاده کرد و در هزینه‌های عملیاتی پروژه تا حدود زیادی صرفه‌جویی کرد.

لذا در این رساله هدف بررسی قسمت‌های مختلف ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین و تعیین زیرسیستم‌های آن و مطالعه خرابی‌ها و تعمیرات و نگهداری آن می‌باشد تا با تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (تحت عنوان تحلیل RAM) ماشین، بتوان متخصصان و کارشناسان صنعت حفاری کشورمان را با نحوه عملکرد زیرسیستم‌های این کارخانه تونل‌زنی و مدیریت خرابی‌های آن بیشتر آشنا کرد و در این زمینه، افق نوینی را برای دست‌اندرکاران صنعت حفاری و تونل‌سازی کشورمان نمایان ساخت.

---

<sup>۱</sup> . Availability

<sup>۲</sup> . Maintainability

<sup>۳</sup> . Utilization factor

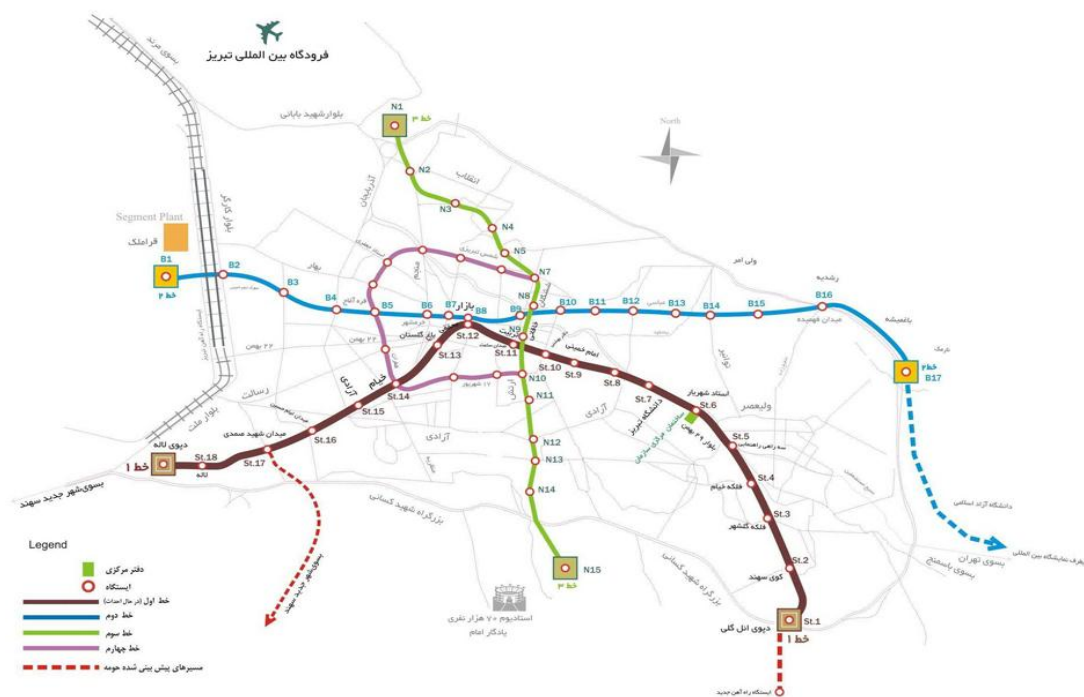
ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز (ماشین سبلان) به عنوان مطالعه موردی برای این رساله در نظر گرفته شده است.

## ۱-۲- مترو تبریز؛ خط یک

شهر تبریز بزرگترین شهر منطقه شمال غرب کشور و یکی از پرجمعیت‌ترین شهرهای کشور می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون سفرهای درون شهری در تبریز و ضرورت استفاده از سامانه حمل و نقل ریلی، مطالعات خطوط قطار شهری تبریز در سال ۱۳۸۰ و عملیات اجرایی نیز از سال ۱۳۸۴ آغاز شده است. مترو تبریز از پنج خط (شامل چهار خط اصلی و یک خط حومه) به طول ۱۰۰ کیلومتر تشکیل شده است. موقعیت خطوط مترو تبریز در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

ساختار زمین در مسیر تونل عمدتاً از دانه‌های شن، سیلیت، رس (با خاصیت خمیری زیاد) و قلوه سنگ تشکیل شده است و ترکیب آن به طور متوسط شامل ۸ درصد گراول، ۶۶ درصد ماسه و ۲۶ درصد سیلت و رس می‌باشد. به لحاظ گذر از زیربافت مسکونی و واقع شدن در محل‌های پرازدحام و پرتراфик، حفاری با روش‌های معمول تونل‌سازی، سخت و بعضاً امکان‌ناپذیر بوده و نیاز به استفاده از روش‌های مکانیزه و ویژه حفاری دارد. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر پروژه، ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین انتخاب گردیده است.

خط یک مترو به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گلی تبریز آغاز و از طریق بلوار شهید باکری و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، چهارراه محقق، باغ گلستان و خیابان خیام به کوی لاله ختم می‌شود. حدود ۸ کیلومتر (حداصل ایستگاه ۷ تا ایستگاه ۱۶ در مسیر خط یک مطابق شکل ۱-۱) به صورت دو تونل عمیق دوقلو طراحی شده و با دو دستگاه حفاری تونل در عمق حدود ۱۴ تا ۲۵ متری در حال حفاری می‌باشد. عملیات حفاری هر دو تونل توسط دو ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در سال ۱۳۸۸ آغاز شده است.



شکل ۱-۱- موقعیت خطوط مترو تبریز [۱]

یکی از دو تونل عمیق خط یک با عنوان تونل سبلان که ماشین حفار این تونل در این رساله مورد مطالعه قرار گرفته است، صبح روز شنبه ۲۱ شهریور ماه ۹۴ به ایستگاه انتهائی خود رسید و ماشین حفاری با موفقیت از آن خارج شد. عملیات حفاری این تونل حدود شش سال به طول انجامید که دو سال از این شش سال جهت ساخت و تجهیز شفت (فضای دسترسی مستطیل شکل) شماره ۱۲ زمان صرف شده است. این شفت دارای ۱۰۳ متر طول، ۲۵ متر عرض و ۲۶ متر عمق می باشد. هدف ایجاد این شفت تأمین وسایل و تجهیزات یدکی و پشتیبانی دو ماشین حفار مشغول در دو تونل خط یک، انتقال قطعات بتنی پیش ساخته<sup>۱</sup> (سگمنت) به داخل ماشین حفاری برای نگهداری تونل و تخلیه خاکهای حاصل از حفاری می باشد. این تونل دارای ۸۰۴۳ متر طول و قطر حفاری ۶/۸۸ متر بوده که قطر نهایی تونل بعد از نصب قطعات بتنی ۶ متر می باشد و در طول حفاری جمعاً ۴۳۱۰۲۵ متر مکعب خاکبرداری و به بیرون از تونل حمل شده است. شکل ۱-۲ خروج ماشین حفاری از تونل سبلان خط یک مترو تبریز را نشان می دهد.

<sup>۱</sup>. Segment

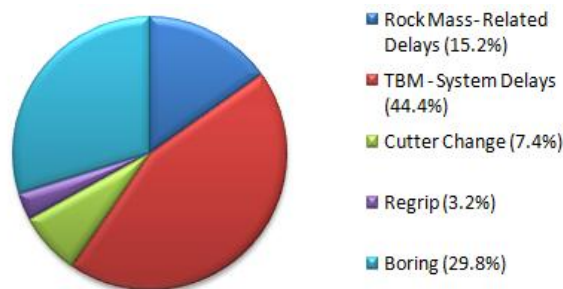


شکل ۱-۲- خروج ماشین حفار از تونل سبلان خط یک متر تبریز

### ۱-۳- بیان مسأله و سؤال‌های اصلی تحقیق

با توجه به کاربرد روزافزون ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین به‌ویژه در محیط‌های شهری، شناخت نحوه عملکرد اجزاء مختلف ماشین ضروری می‌باشد تا با اصلاح و رفع خرابی‌ها امکان فعال بودن و در دسترس بودن ماشین افزایش یابد. استفاده موفقیت‌آمیز از این ماشین مستلزم طراحی دقیق و منطبق با شرایط تونل، اپراتور و پرسنل ماهر پشتیبانی عملیات حفاری، گروه مجرب تعمیرات و نگهداری تحت نظر یک مدیریت منسجم می‌باشد که در نتیجه آن هم پروژه طبق زمان‌بندی مورد نظر پیش رود و هم هزینه‌های عملیاتی کاهش یابد. به‌طور کلی در تمامی صنایع، هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات از ۲۰ الی ۵۰ درصد کل هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود که با مطالعه صحیح دستگاه‌ها و ماشین‌آلات می‌توان زمان تعمیرات و توقف‌های ناخواسته دستگاه را بسته به نوع هر صنعت از ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش داد [۲]. مطالعات نشان می‌دهد که در اکثر پروژه‌های حفاری مکانیزه میانگین زمان فعال حفاری کمتر از ۵۰ درصد کل زمان‌های کاری ماشین می‌باشد. میانگین زمان‌های حفاری و توقف‌های ۱۰ حفاری مکانیزه در شکل ۱-۳ نشان می‌دهد که سهم توقف‌های ناشی از خرابی و تعمیر و نگهداری *TBM* حدود ۴۴ درصد کل زمان کاری و بیش از ۶۰ درصد زمان کل توقف‌ها می‌باشد [۳].





شکل ۱-۳- میانگین زمان‌های توقف و حفاری در ۱۰ تونل مکانیزه [۳]

مهم‌ترین نقش و ویژگی قابلیت اطمینان در حوزه‌ی کاهش هزینه‌ها می‌باشد. به موازات بحث قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر نیز می‌تواند مطرح شود و با معلوم شدن میزان سهولت نسبی و هزینه پیش‌گیری از خرابی‌ها یا اصلاح خرابی‌های هر بخش یا زیرسیستم، عملیات نگهداری و تعمیر مناسب برنامه‌ریزی می‌شود. موضوع تکمیل کننده قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری، مبحث قابلیت دسترسی سیستم یا دستگاه می‌باشد که با محاسبه آن میزان در دسترس بودن دستگاه مشخص می‌شود و می‌توان دید واقع بینانه‌تری نسبت به وضعیت کلی دستگاه پیدا کرد و از همه مهم‌تر با محاسبه تخصیص قابلیت دسترسی<sup>۱</sup> مشخص کنیم که برای افزایش و بهبود قابلیت دسترسی سیستم، بر اساس کاهش میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم‌های بحرانی عمل شود یا بهتر است که میانگین زمان بین خرابی‌های زیرسیستم‌های بحرانی را افزایش یابد. بدین ترتیب با استفاده از این تحلیل‌ها می‌توان در نهایت بهره‌وری دستگاه را تا حدود زیادی افزایش داد. لذا در این رساله برای اولین بار با مطالعه زیرسیستمی دستگاه، بخش‌های مختلف آن طبقه بندی شده و تحلیل خرابی‌ها، تعمیرات و میزان در دسترس بودن هر بخش به صورت جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته است. به طور کلی مهم‌ترین سؤالات این تحقیق را می‌توان به‌طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

۱- زیرسیستم‌های عملیاتی دستگاه مورد نظر کدام‌اند؟

۲- نحوه عملکرد این زیرسیستم‌ها و دستگاه از لحاظ سری و یا موازی بودن چگونه است؟

۳- حساس‌ترین زیرسیستم از نظر فراوانی خرابی‌ها با کمترین قابلیت اطمینان کدام است؟

<sup>۱</sup>. Availability allocation

۴- حساس‌ترین زیرسیستم از نظر بیشترین زمان تعمیرات با کمترین قابلیت تعمیر و نگهداری کدام است؟

۵- زیرسیستم‌های بحرانی از نظر قابلیت دسترسی و تخصیص قابلیت دسترسی کدامند؟

۶- برای تحلیل RAM، از روش‌های آمار کلاسیک استفاده خواهد شد یا مدل‌سازی تصادفی؟

۷- بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه برای هر زیرسیستم و کل دستگاه چه زمانی است؟

#### ۴-۱- اهداف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، آشنایی کامل با ماشین حفاری تمام مقطع تونل و بررسی اجزاء و زیرسیستم‌های آن می‌باشد تا با جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته در این دستگاه، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی این دستگاه تعیین شوند و زیرسیستم‌های بحرانی و حساس دستگاه از نظر مشکلات قابلیت اطمینان (فراوانی خرابی‌ها) و مشکلات تعمیر و نگهداری (بالا بودن زمان تعمیرات) مشخص شده و با برنامه ریزی صحیح تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، تمهیدات لازم برای افزایش میزان دسترسی بودن دستگاه و بهبود ضریب بهره‌وری صورت پذیرد و با کاهش میزان توقف‌های دستگاه و افزایش زمان مفید کاری، در هزینه‌های عملیاتی پروژه تا حدود زیادی صرفه جویی به‌عمل آید.

#### ۵-۱- ضرورت انجام تحقیق

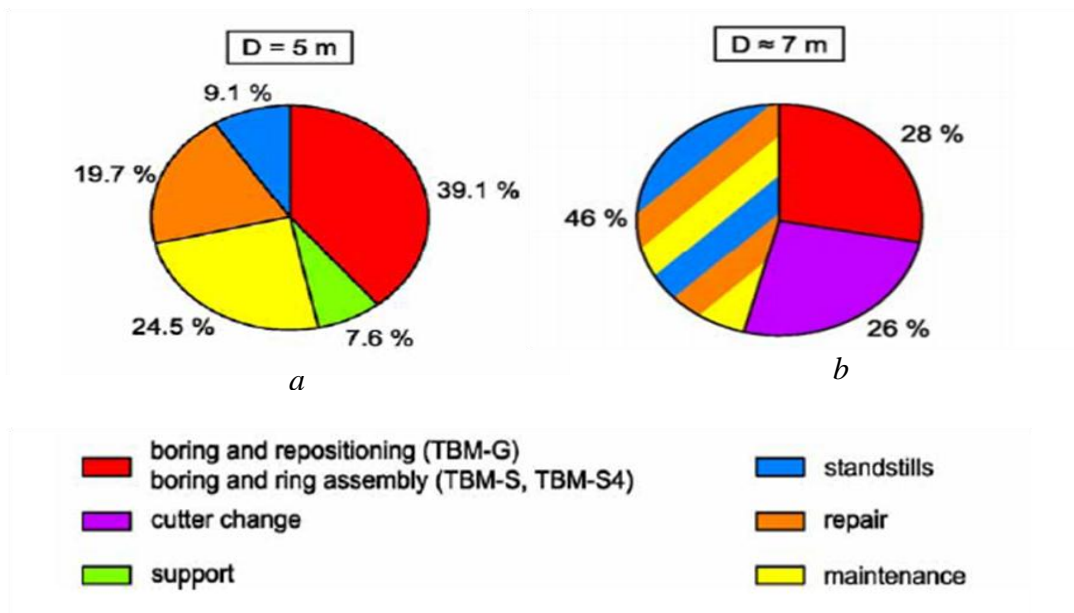
استفاده از فن‌آوری پیشرفته حفاری مکانیزه در کشورمان روز به روز در حال گسترش می‌باشد اولین بار قبل از سال ۱۳۵۷ سه دستگاه TBM از نوع باز ساخت شرکت کاوازاکی ژاپن جهت حفاری در پروژه تونل کوه‌رنگ ۳ وارد کشور شدند که البته به دلیل در نظر نگرفتن شرایط ساختگاه تونل در طراحی این ماشین‌ها، استفاده از آن‌ها با موفقیت همراه نبود. سابقه استفاده از EPB – TBM نیز به سال ۱۳۷۷ برمی‌گردد که در تونل خیام (تونل جمع‌آوری آب‌های تهران) با قطر ۴/۶۶ و به طول ۵۶۰۰ متر به‌کار گرفته شد [۴]. اما از اوایل دهه ۸۰، استفاده از این ماشین‌ها به سرعت افزایش یافته

و همان‌طور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است در حال حاضر چندین پروژه در کشور در حال اجرا با این نوع ماشین‌ها می‌باشند که به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد این پروژه‌ها و نقش اساسی زمان اجرای این پروژه‌ها که رابطه مستقیم با هزینه‌های عملیاتی دارد نیاز جدی متولیان امر و مهندسين تعميرات و نگهداری به آشنایی کامل با این ماشین‌ها و شناسایی و طبقه بندی انواع خرابی‌ها و تعميرات صورت گرفته و ثبت دقیق نوع خرابی، علت خرابی، زمان وقوع خرابی و زمان تعمیر یا تعویض انجام گرفته را می‌طلبد تا با تحلیل و مدل‌سازی این نتایج، استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری مشخص شود و با اطلاع از قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری و همچنین میزان در دسترس بودن ماشین، با یک برنامه‌ریزی صحیح قادر باشند هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داده و عملکرد ماشین حفار را بهبود بخشند. پایین بودن فاکتور بهره‌وری و زیاد بودن میزان توقف‌های ناشی از خرابی و تعميرات این ماشین در پروژه‌های مختلف، ضرورت انجام یک تحقیق جامع در حوزه یاد شده را بیشتر نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱- پروژه‌های حفاری با EPB – TBM در کشور

شرکت سازنده/ تعداد	محل مورد استفاده	وضعیت فعلی
Lovat/ یک دستگاه	تونل خیام و تونل بهمن‌یار تهران	به اتمام رسیده است
Herrenknecht/ دو دستگاه	مترو اصفهان	در حال اجرا
NFM - Wirth/ دو دستگاه	مترو شیراز	به اتمام رسیده است
NFM - Wirth/ دو دستگاه	مترو تبریز	به اتمام رسیده است
NFM - Wirth/ دو دستگاه	مترو اهواز	در حال اجرا
NFM - Wirth/ یک دستگاه	مترو مشهد- خط ۲	در حال اجرا
Lovat/ دو دستگاه	مترو تهران- خط ۷	در حال اجرا
Herrenknecht/ یک دستگاه	مترو تهران - خط ۶	در حال اجرا
Herrenknecht/ یک دستگاه	مترو تهران - خط ۳	در حال اجرا

همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشخص است زمان‌های صرف شده برای تعمیرات و نگهداری ماشین حفار تمام مقطع تونل در سنگ سخت و همچنین زمین نرم درصد بالایی از زمان کاری ماشین را به خود اختصاص می‌دهند.



شکل ۴-۱- میزان نسبی زمان‌های حفاری و تعمیرات نگهداری ماشین حفار تمام مقطع تونل [۵]  
 (a: حفاری در سنگ سخت b: حفاری در زمین نرم با ماشین از نوع اسلاری)

بنابراین میزان بالای توقف‌ها و خرابی‌های ماشین حفار تمام مقطع تونل نیازمند یک تحلیل علمی و عملی جامع در حوزه RAM می‌باشد که یک دید جامع نسبت به دستگاه در اختیار دست‌اندرکاران و مهندسين پروژه‌های حفاری مکانیزه قرار دهد.

#### ۶-۱- ساختار رساله

در فصل دوم این رساله به کلیاتی در مورد قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی پرداخته شده است. سپس روش‌های مختلفی که برای تحلیل این پارامترها استفاده می‌شوند

به طور مختصر بحث شده و توابع مهم توزیع آماری که در این زمینه کاربرد دارند اشاره شده است. همچنین دو آزمون مهم وجود یا عدم وجود روند<sup>۱</sup> و همبستگی سری<sup>۲</sup> در داده توضیح داده شده است. در فصل سوم رساله مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی ماشین آلات و تجهیزات معدنی آورده شده است.

در فصل چهارم رساله با مطالعه مشخصات فنی ماشین حفار، زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین تعیین شده و اجزاء اصلی تشکیل دهنده هر زیرسیستم ذکر شده است. همچنین پایگاه داده جامع شامل کلیه داده‌های خرابی و تعمیر ماشین حفار در خط یک مترو تبریز در مدت حدود ۲۶ ماه عملکرد ماشین ارائه گردیده است.

در فصل پنجم رساله کلیه محاسبات و تحلیل‌های آماری صورت گرفته بر روی تک تک زیرسیستم‌ها و همچنین کل ماشین آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی قابلیت اطمینان، برنامه و زمان‌بندی مناسب جهت تعمیرات پیش‌گیرانه هر کدام از زیرسیستم‌ها و در نهایت کل ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در مترو تبریز ارائه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای محیطی و عملیاتی پروژه بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان ابزار برشی ماشین حفار که از مهم‌ترین اجزای ماشین می‌باشند بررسی شده است.

در فصل ششم نتایج به دست آمده در این رساله آورده شده و پیشنهادات لازم برای مطالعات بیشتر در حوزه تحلیل RAM ماشین حفار تمام مقطع تونل اشاره شده است.

---

<sup>۱</sup> . Trend

<sup>۲</sup> . Serial correlation



## فصل دوم

**کلیاتی در مورد قابلیت اطمینان،**

**دسترسی و تعمیر و نگهداری**

## ۲-۱- مقدمه

توسعه زندگی بشری طی چند دهه‌ی اخیر مرهون پیشرفت‌های تکنولوژی و رفع موانع و فاصله‌ها بوده است. تکوین بسیاری از سازه‌ها و سازوکارهای مهندسی مبتنی بر نوآوری در زمینه مواد، روش‌های طراحی و فناوری‌های ساخت و همچنین بهره‌برداری و پشتیبانی، موجب نیاز و توجه روزافزون به رویکردی بنیادین به مفاهیم قابلیت اطمینان به عنوان محور توسعه مهندسی در هزاره سوم شده است. تکیه بر این معیار، راه را برای تضمین ایمنی و ثمر بخشی سامانه‌های مهندسی و تسریع روند تکامل صنایع در ابعاد مختلف هموار کرده است و از جمله می‌توان به بهبود و تداوم عملکردها، منظم‌تر شدن برنامه بازرسی و نگهداری، افزایش قابلیت دسترسی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، تأمین دوام بیشتر و پیش‌بینی عمر و صدمات احتمالی اشاره کرد. در این فصل به مفاهیم قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و نگهداری پرداخته شده و روش‌های مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها شرح داده شده است.

## ۲-۲- مفاهیم قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (RAM)

RAM شامل سه مشخصه قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری یک دستگاه یا سیستم می‌باشد. وزارت دفاع امریکا این سه مشخصه را به صورت زیر تعریف کرده است [۶]:

- قابلیت اطمینان (پایایی): احتمال توانایی سیستم یا زیرسیستم برای انجام دادن صحیح و بدون خرابی مأموریت مشخص و از پیش تعریف شده در شرایط معین و در دوره زمانی مشخص می‌باشد که تحت عنوان مدل قابلیت اطمینان دستگاه یا سیستم به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود.
- قابلیت دسترسی: احتمال در دسترس بودن (آماده عملیات بودن) سیستم یا دستگاه جهت انجام مأموریت مشخص در هر زمان یا بازه زمانی تصادفی می‌باشد.



- قابلیت تعمیر و نگهداری: احتمال توانایی دوباره سیستم یا دستگاه به انجام دادن صحیح مأموریت مشخص در شرایط معین بعد از تعمیر توسط پرسنل تعمیر و نگهداری می‌باشد.
- لازم به ذکر است که قابلیت اطمینان تنها تابعی از خرابی سیستم یا زیرسیستم می‌باشد. در حالی که قابلیت دسترسی علاوه بر خرابی‌ها به زمان تعمیر و نگهداری نیز وابسته است در واقع قابلیت دسترسی تابعی از قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری است.
- عوامل مهمی در RAM مطرح می‌باشند که از آن جمله می‌توان طراحی سیستم، کیفیت ساخت، شرایط محیطی که سیستم در آن نگهداری می‌شود یا کار می‌کند، وضعیت سیستم نگهداری، میزان مهارت اپراتور، پرسنل تعمیرات و نگهداری و در دسترس بودن قطعات و تجهیزات جهت تعمیر سیستم را نام برد. شناخت صحیح این عوامل برای رسیدن به سطوح مورد انتظار RAM ضروری می‌باشد. رسیدن به سطوح طراحی شده RAM موجب افزایش عملکرد سیستم، مهارت بیشتر پرسنل، بهبود وضعیت تعمیر و نگهداری سیستم، افزایش قابلیت دسترسی قطعات یدکی، افزایش ایمنی سیستم، موفقیت آمیز بودن عملیات و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

## ۲-۳- برخی از اصطلاحات و پارامترهای حوزه‌ی RAM

مهم‌ترین اصطلاحات و پارامترهایی که در حوزه‌ی RAM کاربرد دارند و در بخش‌های مختلف این رساله مطرح می‌باشند به صورت زیر تعریف می‌شوند [۶-۹]:

- **خرابی<sup>۱</sup>**: عدم توانایی یک بخش یا یک قطعه از سیستم یا دستگاه در انجام وظایف مشخص شده.
- **حادثه<sup>۲</sup>**: وقوع رویداد مضر در صورت عدم کنترل مؤثر منبع انرژی یا عوامل رفتاری.
- **نرخ خرابی یا نرخ حادثه<sup>۱</sup>**: تعداد خرابی یا حادثه در واحد زمان.

<sup>۱</sup> . Failure

<sup>۲</sup> . Hazard

- **تعمیرات و نگهداری<sup>۲</sup>**: کلیه فعالیت‌های لازم برای نگهداری و آماده‌سازی یک سیستم یا دستگاه در یک شرایط مشخص.
- **تعمیرات و نگهداری اصلاحی<sup>۳</sup>**: عملیات تعمیر و آماده‌سازی سیستم بعد از وقوع خرابی و از کار افتادن سیستم.
- **تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه<sup>۴</sup>**: عملیات تعمیرات و نگهداری سیستم در یک فاصله زمانی معین (حتی اگر سیستم درست کار کند).
- **زمان بین خرابی‌ها (TBF)<sup>۵</sup>**: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل - تعمیر از دستگاه.
- **میانگین زمان بین خرابی‌ها<sup>۶</sup> (MTBF)**: متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه (نسبت مجموع زمان کارکرد بخش موردنظر از دستگاه به تعداد کل خرابی‌های آن بخش).
- **میانگین زمان تا خرابی<sup>۷</sup> (MTTF)**: متوسط عمر یک بخش یا یک قطعه غیر قابل تعمیر از دستگاه.
- **زمان تعمیر<sup>۸</sup> (TTR)**: زمان مورد نیاز برای تعمیر یا رفع اشکال قطعه یا بخش خراب شده دستگاه.
- **میانگین زمان تعمیرات<sup>۹</sup> (MTTR)**: متوسط زمان صرف شده برای تعمیرات یک قطعه یا یک بخش از دستگاه.

---

<sup>1</sup> . Failure Rate

<sup>2</sup> . Maintenance

<sup>3</sup> . Corrective maintenance

<sup>4</sup> . Preventive maintenance

<sup>5</sup> . Time Between Failures

<sup>6</sup> . Mean Time Between Failures

<sup>7</sup> . Mean Time To Failures

<sup>8</sup> . Time To Repair

<sup>9</sup> . Mean Time To Repair

- نرخ تعمیر<sup>۱</sup>: تعداد تعمیر در واحد زمان.
- زمان کارکرد دستگاه<sup>۲</sup>: مدت زمانی که دستگاه در حال انجام کار می‌باشد.

با درک مفاهیم اصلی حوزه RAM، از آن جایی که قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری هر سه از جنس احتمال می‌باشند لذا در ادامه به توابع احتمالی که مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره می‌شود.

## ۲-۴- توابع احتمالاتی خرابی - زمان

تحلیل مناسب و تصمیم‌گیری در خصوص مسائل احتمالی در حوزه قابلیت اطمینان و تعمیرات و نگهداری، نیازمند آگاهی از زمان وقوع خرابی است. هرچند امکان پیش‌بینی و تعیین زمان خرابی دستگاه‌ها به‌طور قطع میسر نیست ولی این امکان وجود دارد که بر اساس مشاهدات قبلی، احتمال وقوع خرابی در یک سیستم یا دستگاه را تعیین نمود. توزیع احتمال برای زمان خرابی یا تعمیر (یک متغیر تصادفی پیوسته که زمان خرابی یا تعمیر یک بخش یا سیستم را نشان می‌دهد)، می‌تواند با تابع توزیع چگالی احتمال، تابع توزیع تجمعی، تابع قابلیت اطمینان، تابع قابلیت تعمیر و نگهداری، تابع نرخ خرابی یا تابع نرخ تعمیر مشخص شود که برای تحلیل RAM یک سیستم یا دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این توابع به شرح ذیل می‌باشند:

### ۲-۴-۱- تابع توزیع چگالی احتمال<sup>۳</sup>

این تابع که تابع چگالی خرابی یا تابع چگالی تعمیر نیز نامیده می‌شود به‌جای نمودار فراوانی نسبی زمان بین خرابی‌ها یا زمان تعمیرات (متغیر تصادفی) استفاده می‌شود و شکل توزیع متغیر تصادفی را نشان می‌دهد در واقع تابع چگالی احتمال منحنی برآزش شده به نمودار فراوانی نسبی متغیر تصادفی

<sup>۱</sup>. Repair Rate

<sup>۲</sup>. Up Time

<sup>۳</sup>. Probability density function (pdf)

می‌باشد [۱۰]. معادله این منحنی برای توزیع‌های مختلف، متفاوت می‌باشد و برای متغیرهای تصادفی گسسته و پیوسته دارای اشکال مختلفی می‌باشد. متغیر تصادفی در این بحث، از نوع پیوسته می‌باشد لذا بعد از معرفی توابع توزیع تجمعی احتمال و نرخ خرابی، مهم‌ترین توابعی که در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند آورده شده است.

### ۲-۴-۲- تابع توزیع تجمعی<sup>۱</sup>

این تابع که تابع توزیع تجمعی خرابی یا تعمیر نیز نامیده می‌شود معرف مقادیر احتمال یک متغیر تصادفی تا قبل از یک زمان خاص،  $t$ ، می‌باشد و برابر است با:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (1-2)$$

احتمال وقوع خرابی یا تعمیر تا زمان  $t = F(t)$

لازم به ذکر است که در انتگرال فوق، مقدار کران پایین در واقع از  $-\infty$  می‌باشد ولی در بحث RAM، زمان خرابی از لحظه شروع به کار یعنی زمان صفر در نظر گرفته می‌شود [۷، ۱۰].

### ۲-۴-۳- تابع قابلیت اطمینان

تابع قابلیت اطمینان یک سیستم یا دستگاه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (2-2)$$

### ۲-۴-۴- تابع نرخ خرابی

نرخ خرابی معمولاً با  $\lambda$  نمایش داده می‌شود ولی تابع نرخ خرابی یا نرخ خطر یک سیستم یا دستگاه با  $\lambda(t)$  یا  $h(t)$  بیان می‌شود.

<sup>۱</sup> . Cumulative distribution function (cdf)

تابع نرخ خرابی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3-2)$$

با توجه به رابطه (۲-۱) داریم:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow -\int_0^t \lambda(t) dt = \int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t) \Rightarrow \ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt \quad (4-2)$$

بنابراین رابطه بین قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی به صورت زیر می باشد [۱۱]:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (5-2)$$

از دیگر پارامترهایی که در حوزه RAM کاربرد دارد میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) و میانگین زمان تعمیرات (MTTR) می باشد که به صورت زیر محاسبه می شوند:

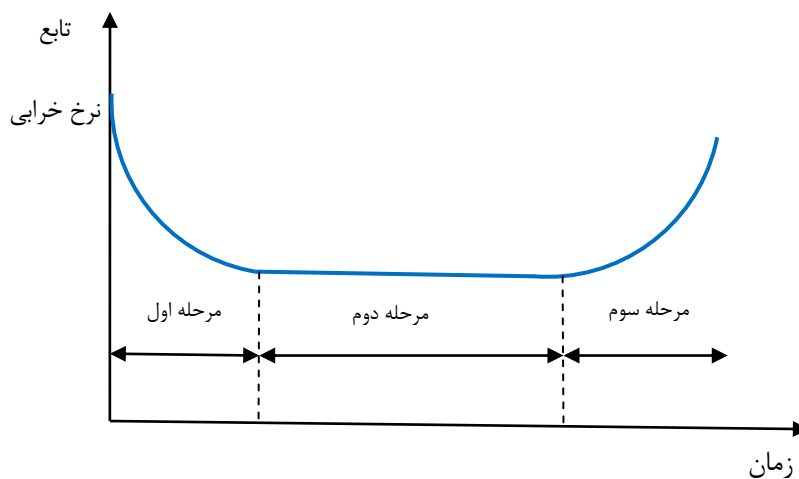
$$MTBF = \int_0^{\infty} tf(t) dt \quad (6-2)$$

این رابطه نشان می دهد که MTBF در واقع مقدار امید ریاضی زمان بین خرابی‌ها می باشد [۱۲].

قابل ذکر است که روابط فوق بر اساس توابع توزیع چگالی خرابی می باشند و برای محاسبه میانگین زمان تعمیر (MTTR)، باید از توابع توزیع چگالی تعمیر استفاده کرد. در واقع MTTR برابر با امید ریاضی (میانگین) زمان تعمیر می باشد که در بخش‌های بعدی بحث خواهد شد.

۲-۴-۴-۱- مفهوم نمودار وان حمام<sup>۱</sup> و نرخ خرابی

نمودار وان حمام یک نمودار شناخته شده برای نمایش وضعیت خرابی یک دستگاه یا سیستم می‌باشد. از آنجایی که با گذشت زمان، خرابی در دستگاه یا سیستم به وجود می‌آید لذا این نمودار چرخه عمر یک دستگاه یا سیستم را با گذشت زمان بر حسب نرخ خرابی یا نرخ خطر نشان می‌دهد. چرخه عمر بیشتر دستگاه‌ها و سیستم‌ها شامل سه بازه زمانی می‌باشد که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است:



شکل ۱-۲ نمودار وان حمام نرخ خرابی [۱۳]

- مرحله اول (آب بندی تجهیزات)

این مرحله مربوط به آغاز بهره‌برداری اولیه و یا بهره‌برداری مجدد تجهیزات بعد از تعمیرات اساسی می‌باشد. چنانچه در شکل دیده می‌شود در این بازه، نرخ خرابی بالا می‌باشد از جمله دلایل این امر، نا آشنا بودن پرسنل و اپراتور با مشخصات فنی دستگاه، تعمیرات نادرست، کنترل کیفیت ضعیف، خطای انسانی و غیره می‌باشند. که به تدریج با مهارت اپراتور و سایر پرسنل، تجهیزات با محیط و

<sup>۱</sup> . Bathtub curve

فرآیند تولید سازگاری پیدا کرده و حالت پایدار و تنظیم شده‌ای را به خود می‌گیرند و هر چقدر در این دوران تجهیزات بیشتر کار کنند از احتمال خرابی آن‌ها کاسته می‌شود.

- مرحله دوم (عمر طبیعی)

در این مرحله تجهیزات پس از گذشتن از دوران آب بندی وارد مرحله عمر طبیعی خود می‌شوند و با توجه به آشنایی پرسنل و برنامه‌ریزی صحیح تعمیرات و نگهداری، نرخ خرابی به حداقل رسیده و تقریباً ثابت خواهد بود.

- مرحله سوم (فرسایش)

تجهیزات بعد از گذراندن عمر طبیعی وارد مرحله فرسایش می‌شوند. در این مرحله نرخ خرابی‌ها به شدت در حال افزایش بوده و هر چقدر از عمر تجهیزات می‌گذرد رشد نرخ خرابی باعث فرسایش شدید تجهیزات می‌گردد.

از مزایای این نمودار این است که با محاسبه قابلیت اطمینان دستگاه و در نظر گرفتن زمان‌های عمر دستگاه، می‌توان برای تعمیر و نگهداری دستگاه برنامه‌ریزی کرد. همچنین با استفاده از نرخ خرابی و نمودار فوق وضعیت فرسودگی و نیز عمر مفید باقیمانده دستگاه مشخص می‌شود و می‌توان با کنترل آماری خرابی‌های یک بخش یا یک قطعه از دستگاه، زمان مناسب تعمیر یا تعویض یک قطعه از دستگاه را پیش‌بینی کرد [۱۳].

حال با توجه به شناخت مفاهیم فوق انواع مهم توابع توزیع متغیرهای پیوسته که در حوزه RAM کاربرد دارند شرح داده می‌شوند.

## ۲-۴-۵- توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال

توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال که بیشترین کاربرد را در قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری دارند به شرح ذیل می‌باشند:

۲-۴-۵-۱- توزیع نمایی<sup>۱</sup>

توزیع نمایی یکی از توابع بسیار کاربردی در قابلیت اطمینان است. این تابع دارای نرخ خرابی ثابت می‌باشد و از آن جا که بیشتر تجهیزات و دستگاه‌ها در مرحله دوران طبیعی عمر خود دارای نرخ خرابی تقریباً ثابتی می‌باشند لذا این توزیع کاربرد گسترده‌ای در توزیع زمان‌های خرابی دارد. توزیع نمایی تنها توزیع پیوسته‌ای است که دارای خاصیت بی‌حافظگی<sup>۲</sup> است یعنی توزیع سالم بودن قطعه در انتهای عمر آن با توزیع اصلی قطعه نو برابر است. در واقع قطعه به یاد نمی‌آورد که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته و در صورت تعمیر شدن نیز "به‌خوبی یک قطعه نو"<sup>۳</sup> می‌باشد. تابع چگالی احتمال توزیع نمایی یک پارامتری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \lambda \geq 0 \quad (۷-۲)$$

این توزیع فقط دارای پارامتر مقیاس  $(\frac{1}{\lambda})$  می‌باشد و پارامتر شکل توزیع ندارد. تابع توزیع تجمعی توزیع نمایی برابر است با:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۸-۲)$$

مقدار میانگین (امید ریاضی) این توزیع که در واقع میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) می‌باشد برابر است با:

<sup>۱</sup> . Exponential distribution

<sup>۲</sup> . Memory less

<sup>۳</sup> As good – as- new



$$E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (9-2)$$

مقدار انحراف معیار این توزیع ( $\sigma$ ) نیز برابر با  $\frac{1}{\lambda}$  می باشد.

تابع قابلیت اطمینان توزیع نمایی یک متغیره برابر است با:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (10-2)$$

تابع نرخ خرابی برای توزیع نمایی ثابت و برابر  $\lambda$  می باشد [۱۴].

در ادامه روابط مربوط به سایر توابع توزیع پرکاربرد در تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری به طور مختصر آورده شده است.

## ۲-۴-۵-۲- توزیع ویبول<sup>۱</sup>

توزیع ویبول به دلیل انعطاف پذیری و داشتن اشکال مختلف (برای مقادیر مختلف پارامتر تغییر شکل آن) یکی از پرکاربردترین توابع مرسوم در قابلیت اطمینان است. توابع مختلف توزیع ویبول سه پارامتری در جدول زیر آورده شده است [۱۳، ۱۴].

جدول ۲-۱- توابع مختلف و میانگین توزیع ویبول [۱۳، ۱۴]

تابع چگالی احتمال	تابع توزیع تجمعی	تابع قابلیت اطمینان
$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)$	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)$	$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)$

<sup>۱</sup>. Weibull distribution

در این روابط،  $\alpha$  پارامتر شکل،  $\beta$  پارامتر مقیاس و  $\gamma$  پارامتر مکان توزیع ویبول می‌باشد. چنانچه پارامتر مکان صفر باشد توزیع ویبول سه پارامتری به ویبول دو پارامتری تبدیل می‌شود. تابع چگالی احتمال توزیع ویبول با  $\alpha = 1$  به تابع چگالی احتمال توزیع نمایی و نرخ خرابی به مقدار ثابت  $\beta$  تبدیل می‌شود.

### ۲-۴-۵-۳- توزیع نرمال<sup>۱</sup>

توزیع نرمال نیز از توابع پرکاربرد در توزیع چگالی احتمال می‌باشد. برای یک توزیع نرمال دو پارامتری توابع مختلف آماری آن در جدول زیر آورده شده است. در این روابط،  $\sigma$  پارامتر مقیاس و  $\mu$  پارامتر مکان می‌باشد.

جدول ۲-۲- توابع مختلف و میانگین توزیع نرمال [۱۵]

تابع چگالی احتمال	تابع توزیع تجمعی	تابع قابلیت اطمینان
$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

### ۲-۴-۵-۴- توزیع لاگ نرمال<sup>۲</sup>

این توزیع نیز دارای کاربرد گسترده‌ای در قابلیت اطمینان می‌باشد. روابط ریاضی و توابع آماری این توزیع به صورت جدول زیر می‌باشند:

<sup>۱</sup> . Normal distribution

<sup>۲</sup> . Lognormal distribution

جدول ۲-۳- توابع مختلف و میانگین توزیع لاگ نرمال [۱۵]

تابع چگالی احتمال	تابع توزیع تجمعی	تابع قابلیت اطمینان
$\frac{1}{(t-\gamma)\sigma} \phi\left(\frac{\ln(t-\gamma)-\mu}{\sigma}\right)$	$\Phi\left(\frac{\ln(t-\gamma)-\mu}{\sigma}\right)$	$1-\Phi\left(\frac{\ln(t-\gamma)-\mu}{\sigma}\right)$

۲-۴-۵-۵- توزیع گاما<sup>۱</sup>

توزیع گاما نیز از توابع پرکاربرد در قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد. این تابع دارای انعطاف‌پذیری زیادی می‌باشد و برای مقادیر مختلف پارامتر شکل آن، به سایر توابع توزیع تبدیل می‌شود. مشخصات آماری این توزیع مطابق جدول (۲-۴) می‌باشد.

جدول ۲-۴- توابع مختلف و میانگین توزیع گاما [۱۵]

تابع چگالی احتمال	تابع توزیع تجمعی	تابع قابلیت اطمینان
$\frac{(t-\gamma)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{(t-\gamma)}{\beta}\right)$	$\frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$	$1-\frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$

در این روبربط  $\beta$  پارامتر مقیاس و  $\alpha$  پارامتر شکل و  $\gamma$  پارامتر مکان توزیع می‌باشد. در صورتی که مقدار  $\gamma$  برابر صفر باشد توزیع فوق، توزیع گاما دو پارامتری خواهد بود و چنانچه  $\alpha$  برابر صفر باشد توزیع گاما همان توزیع نمایی با نرخ خرابی ثابت خواهد بود و چنانچه  $\alpha < 1$  باشد از این توزیع در ادغام با توزیع ویبول سه پارامتری، می‌توان برای محاسبه و مدل‌سازی نرخ خرابی دستگاه‌هایی که دارای منحنی نرخ خرابی به شکل وان حمام هستند استفاده کرد.

<sup>۱</sup> . Gamma distribution

در روابط فوق،  $\Phi(x)$  انتگرال لاپلاس<sup>۱</sup> (تابع توزیع تجمعی توزیع نرمال)،  $\phi(x)$  تابع چگالی احتمال توزیع نرمال،  $\Gamma(\alpha)$  تابع گامای کامل<sup>۲</sup>،  $\Gamma_x(\alpha)$  تابع گامای ناقص<sup>۳</sup> بوده و مقادیر آن‌ها از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad (11-2)$$

$$\phi(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \quad (12-2)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (13-2)$$

$$\Gamma_x(\alpha) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (14-2)$$

## ۲-۶- قابلیت تعمیر و نگهداری

امروزه نیاز به شناخت قابلیت تعمیر و نگهداری به دلیل هزینه‌های سرسام آور عملیاتی و نگهداری تجهیزات و سیستم‌ها بیشتر احساس می‌شود. بهبود قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم باعث افزایش کیفیت سیستم، کاهش زمان تعمیرات و نگهداری و کاهش هزینه‌های پروژه، کاهش زمان توقف‌ها در پروژه، افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم و نیز ارزیابی قابلیت دسترسی سیستم می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد قابلیت تعمیر و نگهداری، احتمال اینکه یک بخش یا سیستم بتواند وظایف محوله خود را بعد از تعمیر، برای استفاده در شرایط مشخص، به درستی انجام دهد تعریف می‌شود. "شرایط مشخص" در این تعریف، شامل شرایط آب و هوایی، وضعیت نگهداری، نیروی انسانی، موقعیت جغرافیایی و غیره می‌باشد. از آنجایی که در این نوشتار با دو شاخص قابلیت تعمیر و

<sup>1</sup> . Laplace integral

<sup>2</sup> . Complete gamma function

<sup>3</sup> . Incomplete gamma function

نگهداری<sup>۱</sup> و تعمیرات و نگهداری<sup>۲</sup> مواجه هستیم بهتر است که وجه تمایز آن‌ها مشخص شود. قابلیت تعمیر و نگهداری، مربوط به اندازه‌گیری شاخص‌هایی است که مربوط به فاز طراحی دستگاه می‌باشند که باعث سهولت تعمیرات و نگهداری قطعات و دستگاه، اطمینان از کاهش زمان توقفها (ناشی از خرابی) و کاهش هزینه‌های عملیاتی دستگاه در حین استفاده می‌شود ولی تعمیرات و نگهداری، شامل فعالیت‌هایی است که توسط پرسنل استفاده کننده از دستگاه جهت عملیاتی نگهداشتن آن یا تعمیر دستگاه جهت برگرداندن آن به وضعیت عملیاتی باشد. به بیان ساده‌تر، قابلیت تعمیر و نگهداری، یک پارامتر طراحی جهت به حداقل رساندن زمان تعمیر می‌باشد که با تحلیل نتایج تعمیرات و نگهداری دستگاه محاسبه می‌شود درحالی که تعمیرات و نگهداری عملیات سرویس و تعمیر دستگاه می‌باشد [۱۶].

## ۲-۶-۱- توابع قابلیت تعمیر و نگهداری

همان‌طور که قبلاً بحث شد قابلیت تعمیر و نگهداری، از جنس احتمال است و برای محاسبه آن از توابع توزیع احتمالی زمان‌های تعمیر که متغیر تصادفی در بحث قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد استفاده می‌شود. در این جا نیز بعد از تعیین تابع توزیع تعمیر، تابع قابلیت تعمیر و نگهداری محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در بحث قابلیت اطمینان متغیر تصادفی زمان بین خرابی‌ها (TBF) بود و تابع چگالی خرابی محاسبه می‌شد در حالی که در تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری متغیر تصادفی زمان تعمیرات (TTR) می‌باشد و تابع چگالی تعمیر<sup>۳</sup> ( $f_{dr}$ ) محاسبه می‌شود. فرمول ریاضی قابلیت تعمیر و نگهداری به صورت زیر است [۱۷]:

$$M(t) = \int_0^t f_{dr}(t) dt \quad (15-2)$$

<sup>1</sup> Maintainability

<sup>2</sup> Maintenance

<sup>3</sup> Repair density function

که  $t$  زمان مورد نظر،  $f_{dr}$  تابع چگالی احتمال برای زمان تعمیر (تابع چگالی تعمیر) و  $M(t)$  تابع قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد. در واقع تابع قابلیت تعمیر و نگهداری همان توزیع تجمعی احتمال زمان‌های تعمیر می‌باشد و فرمول آن برای توزیع‌های نمایی، ویبول، نرمال، لاگ نرمال و گاما که نسبت به سایر توابع توزیع کاربرد بیشتری در تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری دارند همان روابط توزیع تجمعی این توابع در تحلیل قابلیت اطمینان می‌باشد که پارامترهای آن‌ها بر اساس زمان‌های تعمیر تعیین می‌شوند. همچنین لازم به ذکر است که در بحث قابلیت تعمیر و نگهداری نرخ تعمیر ( $\mu$ ) مطرح است که در بحث قابلیت اطمینان نرخ خرابی ( $\lambda$ ) مطرح بود و نرخ تعمیر ثابت برابر است با:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (۱۶-۲)$$

به این ترتیب با تحلیل داده‌های زمان تعمیر (TTR) و میانگین زمان تعمیر (MTTR) بهترین تابع توزیع چگالی تعمیر به دست می‌آید و پارامترهای مدل توزیع تعیین شده و در نهایت مقدار تابع قابلیت تعمیر و نگهداری محاسبه می‌شود.

## ۲-۷- قابلیت دسترسی

قابلیت دسترسی یک سیستم می‌تواند چگونگی تحقق اهداف پروژه در طول برنامه زمان‌بندی شده برای اجرای پروژه را نشان دهد. تحلیل قابلیت دسترسی مشخص می‌کند که یک سیستم با چه احتمالی می‌تواند طبق برنامه در حالت عملیاتی و در یک زمان مشخص به هدف مورد نظر برسد. در واقع قابلیت دسترسی ترکیبی از قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد و بر مبنای توزیع خرابی‌ها و توزیع زمان تعمیر استوار می‌باشد. چنانچه هیچ‌گونه تعمیرات و نگهداری وجود نداشته باشد قابلیت اطمینان به صورت یک دسترسی فوری در نظر گرفته می‌شود. یک سیستم

تعمیرپذیر، پس از خرابی تعمیر می‌شود و عمل تعمیر زمان بر می‌باشد. احتمال این که یک سیستم در حال کار باشد در واقع همان قابلیت دسترسی سیستم می‌باشد.

قابلیت دسترسی از این رو می‌تواند به عنوان یک پارامتر طراحی سیستم، بیانگر وضعیت قابلیت اطمینان- قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم باشد. تعیین قابلیت آنی یا نقطه‌ای یک سیستم در هر لحظه (رابطه  $A(t)$ ) دشوار می‌باشد لذا در مطالعات قابلیت دسترسی از مفهوم قابلیت دسترسی حالت پایدار<sup>۱</sup> یا ذاتی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود که بر اساس عملکرد سیستم در یک زمان نسبتاً طولانی استوار است و در حالت کلی قابلیت دسترسی یک زیرسیستم یا سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_s = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime} \quad (۱۷-۲)$$

میانگین زمان تعمیر و نگهداری (MTTR)، شامل زمان دسترسی به قطعه معیوب<sup>۳</sup>، تشخیص خرابی<sup>۴</sup>، زمان تعویض یا تعمیر، زمان تنظیم و تأیید تعمیر<sup>۵</sup> می‌باشد و فرض بر این است که تجهیزات مورد نیاز، قطعات یدکی، پرسنل و غیره صددرصد فراهم باشند [۱۸،۱۹].

## ۲-۷-۱- تخصیص قابلیت دسترسی<sup>۶</sup>

قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی از شاخص‌های اصلی بیانگر عملکرد یک سیستم قابل تعمیر می‌باشد. هدف اصلی مطالعه و تحقیق بسیاری از محققین در زمینه قابلیت اطمینان، بهبود قابلیت دسترسی سیستم می‌باشد چرا که با افزایش قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی نیز افزایش می‌یابد و همین‌طور افزایش قابلیت دسترسی، بهبود قابلیت اطمینان سیستم را در پی خواهد داشت [۲۰]. مباحث اصلی در قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی یک سیستم تعیین میانگین زمان بین خرابی‌ها و

<sup>۱</sup> . Steady state availability

<sup>۲</sup> . Inherent availability

<sup>۳</sup> . Access time

<sup>۴</sup> . Diagnosis time

<sup>۵</sup> . Verification and alignment

<sup>۶</sup> . Availability Allocation

میانگین زمان تعمیرات برای هر کدام از زیرسیستم‌ها و نیز خود سیستم می‌باشد سوال اصلی اینجاست که بعد از تعیین شاخص‌های ذکر شده، برای بهبود عملکرد سیستم چه باید کرد؟

برای رسیدن به این مهم، بسیاری از محققین بحث تخصیص قابلیت دسترسی به زیرسیستم‌ها را مطرح کرده‌اند [۲۱-۲۳]. تخصیص قابلیت دسترسی بر مبنای "شاخص‌های اهمیت قابلیت دسترسی"<sup>۱</sup> بیان می‌شود.

### ۲-۷-۲- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی

شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای یک سیستم نشان می‌دهد که کدام یک از زیرسیستم‌های آن سیستم دارای اهمیت یا تأثیر بیشتری در عملکرد سیستم می‌باشد. مفهوم شاخص اهمیت یا تأثیر زیرسیستم‌ها اولین بار توسط بیرن باوم<sup>۲</sup> ارائه شد که کاربرد گسترده‌ای در قابلیت اطمینان<sup>۳</sup> دارد [۲۴]. شاخص اهمیت قابلیت اطمینان، براساس اطلاعات خرابی‌های زیرسیستم ارزیابی می‌شود و احتمال این که زیرسیستم  $i$ ، یک زیرسیستم بحرانی باشد را نشان می‌دهد و با تخصیص منابع به این زیرسیستم‌ها باعث بهبود قابلیت دسترسی و در نهایت افزایش قابلیت اطمینان و حتی قابلیت تعمیر و نگهداری می‌شود [۲۵،۲۶]. در یک سیستم شامل  $n$  زیرسیستم، شاخص یا میزان اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم  $i$  (که به شاخص اهمیت بیرن باوم شناخته می‌شود) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_A^i = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} \quad (18-2)$$

در رابطه فوق،  $I_A^i$  شاخص اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم  $i$ ،  $R_s(t)$  قابلیت اطمینان سیستم و  $R_i(t)$  قابلیت اطمینان زیرسیستم می‌باشد.

<sup>1</sup> . Availability importance measures

<sup>2</sup> . Birnbaum

<sup>3</sup> . Reliability importance indices



بنابراین میزان تأثیر قابلیت اطمینان هر زیرسیستم تابعی از زمان است و می‌توان میزان تأثیر هر کدام از زیرسیستم‌ها را تعیین کرد و برای بالا بردن میزان قابلیت اطمینان سیستم، لازم است که روی زیرسیستم‌های دارای بیشترین تأثیر در سیستم تمرکز نمود.

با توجه به مطالب فوق، همین مفهوم را در مورد قابلیت دسترسی سیستم نیز می‌توان پیاده کرد. بدین ترتیب شاخص اهمیت و تأثیر قابلیت دسترسی هر زیرسیستم که تابعی از زمان عملیات، نرخ خرابی، نرخ تعمیر و ساختار سیستم می‌باشد تعیین می‌شود لذا شناخت زیرسیستم‌های مؤثر این امکان را فراهم می‌کند که برای برنامه‌ریزی عملیات تعمیرات و نگهداری، روی این زیرسیستم‌ها بیشتر تمرکز شود. بدین ترتیب با تعیین قابلیت دسترسی مؤثر هر زیرسیستم، می‌توان بیشترین تأثیر را بر بهبود وضعیت عملیاتی سیستم گذاشت. شاخص یا میزان اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم  $i$  در یک سیستم که دارای  $n$  زیرسیستم می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (19-2)$$

رابطه فوق شاخص اهمیت قابلیت دسترسی هر زیرسیستم را بر قابلیت دسترسی کل سیستم نشان می‌دهد. هر زیرسیستم که دارای بیشترین مقدار از رابطه فوق باشد بیشترین تأثیر را بر قابلیت دسترسی کل سیستم خواهد داشت. بنابراین چنانچه بهبود قابلیت دسترسی سیستم مورد نظر باشد ابتدا بایستی زیرسیستم‌های مؤثرتر مورد توجه قرار گیرند. قابلیت دسترسی یک سیستم، تابعی از میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) و میانگین زمان تعمیر (MTTR) می‌باشد از این رو برای افزایش قابلیت دسترسی سیستم، ضروری است که شاخص اهمیت و تأثیر هر زیرسیستم بر اساس زمان‌های ذکر شده تعیین گردد.

شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس میانگین زمان بین خرابی‌ها، در حقیقت تأثیر میانگین زمان بین خرابی‌های زیرسیستم  $i$  را بر قابلیت دسترسی کل سیستم نشان خواهد داد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$I_{A,MTBF_i}^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial MTBF_i} \quad (20-2)$$

به همین ترتیب، شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس میانگین زمان تعمیرت، بیانگر تأثیر میانگین زمان تعمیرتی زیرسیستم  $i$  بر قابلیت دسترسی سیستم می‌باشد و این شاخص برابر است با:

$$I_{A,MTTR_i}^i = -\frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial MTTR_i} \quad (21-2)$$

در صورتی که نرخ خرابی و نرخ تعمیر ثابت باشند می‌توانند در روابط فوق به جای میانگین زمان بین خرابی و میانگین زمان تعمیر جایگزین شوند:

$$I_{A,\lambda_i}^i = -\frac{\partial A_s}{\partial \lambda_i} = -\frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial \lambda_i} \quad (22-2)$$

$$I_{A,\mu_i}^i = \frac{\partial A}{\partial \mu_i} = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \times \frac{\partial A_i}{\partial \mu_i} \quad (23-2)$$

در روابط فوق،  $I_{A,MTBF_i}^i$  شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس میانگین زمان بین خرابی‌ها،  $I_{A,MTTR_i}^i$  شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر اساس میانگین زمان تعمیرات،  $A_s$  قابلیت دسترسی سیستم،  $A_i$  قابلیت دسترسی زیرسیستم  $i$ ،  $MTBF_i$  و  $MTTR_i$  به ترتیب میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم  $i$ ،  $\lambda_i$  و  $\mu_i$  نیز به ترتیب نرخ خرابی و نرخ تعمیر زیرسیستم  $i$  می‌باشد.

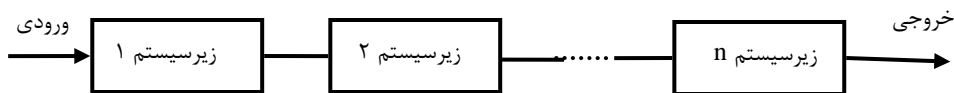
در ادامه میزان شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای یک سیستم دارای  $n$  زیرسیستم که به صورت یک شبکه سری یا موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند بحث می‌شود.

## ۸-۲- انواع سیستم‌ها

هر دستگاه یا سیستم از بخش‌ها یا زیرسیستم‌های مختلفی تشکیل می‌شود که نحوه قرارگیری این زیرسیستم‌ها در تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری کل سیستم مؤثر می‌باشد. در این بخش شبکه‌های سری و موازی که مهم‌ترین آرایش زیرسیستم‌ها می‌باشند بحث می‌شود.

۸-۲-۱- شبکه سری<sup>۱</sup>

در این شبکه همه زیرسیستم‌های یک سیستم یا دستگاه به‌طور سری با هم‌دیگر کار می‌کنند و هر زیرسیستم که دچار خرابی و توقف شود باعث توقف کل سیستم خواهد شد. به‌عبارت دیگر برای موفقیت چنین سیستمی همه‌ی زیرسیستم‌های آن باید درست کار کند. نمودار بلوکی<sup>۲</sup> چنین شبکه‌ای مطابق شکل ۲-۲ می‌باشد [۱۶،۲۸].



شکل ۲-۲- یک شبکه سری با  $n$  زیرسیستم [۱۶]

در این حالت قابلیت‌های RAM هر زیرسیستم ( $R_i$  قابلیت اطمینان هر زیرسیستم،  $A_i$  قابلیت دسترسی هر زیرسیستم و  $M_i$  قابلیت تعمیر و نگهداری هر زیرسیستم) محاسبه می‌شود و مقادیر آن برای کل سیستم برابر خواهد بود با:

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (24-2)$$

$$A_s = A_1 A_2 A_3 \dots A_n = \prod_{i=1}^n A_i \quad (25-2)$$

<sup>۱</sup> . Series network

<sup>۲</sup> . Block diagram

$$M_s = M_1 M_2 M_3 \dots M_n = \prod_{i=1}^n M_i \quad (26-2)$$

بنابراین در حالت کلی مقادیر RAM برای یک سیستم با  $n$  زیرسیستم در حالت سری برابر است با:

$$RAM_s = \prod_{i=1}^n RAM_i \quad (27-2)$$

### ۲-۸-۱-۱- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای شبکه سری

برای یک شبکه سری با  $n$  زیرسیستم شاخص اهمیت قابلیت دسترسی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \prod_{k=1, k \neq i}^n A_k \quad (28-2)$$

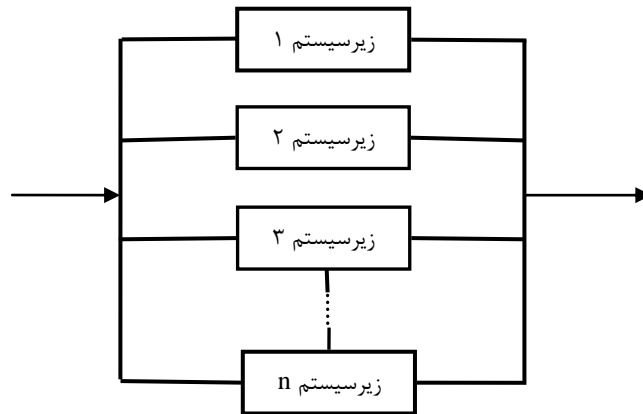
$$\begin{aligned} I_{A, MTBF_i}^i &= \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial MTBF_i} = \prod_{k=1, k \neq i}^n A_k \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i \times (MTBF_i + MTTR_i)} \times A_i \\ &= A_s \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i (MTBF_i + MTTR_i)} \end{aligned} \quad (29-2)$$

$$\begin{aligned} I_{A, MTTR_i}^i &= -\frac{\partial A_s}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial MTTR_i} = \prod_{k=1, k \neq i}^n A_k \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \times A_i \\ &= A_s \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \end{aligned} \quad (30-2)$$

### ۲-۸-۲- شبکه موازی<sup>۱</sup>

در این شبکه تمامی زیرسیستم‌ها هم‌زمان فعال هستند ولی در صورتی که فقط یک زیرسیستم درست کار کند کل سیستم فعال خواهد بود. آرایش زیرسیستم‌ها در چنین سیستمی مطابق نمودار بلوکی شکل زیر می‌باشد که هر بلوک یک زیرسیستم را نشان می‌دهد [۱۶، ۲۸].

<sup>۱</sup> . Parallel network



شکل ۲-۳- یک شبکه موازی با  $n$  زیرسیستم [۱۶]

در حالت کلی برای چنین شبکه‌ای قابلیت‌های RAM از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$RAM_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - RAM_i) \quad (۳۱-۲)$$

#### ۲-۸-۱- شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برای شبکه موازی

برای یک شبکه دارای  $n$  زیرسیستم موازی شاخص اهمیت قابلیت دسترسی از روابط زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = 1 - \prod_{k=1, k \neq i}^n (1 - A_k) \quad (۳۲-۲)$$

$$I_{A, MTBF_i}^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial MTBF_i} = 1 - \prod_{k=1, k \neq i}^n (1 - A_k) \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i \times (MTBF_i + MTTR_i)} \times A_i \quad (۳۳-۲)$$

$$I_{A, MTTR_i}^i = -\frac{\partial A_s}{\partial A_i} \frac{\partial A_i}{\partial MTTR_i} = 1 - \prod_{k=1, k \neq i}^n (1 - A_k) \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \times A_i \quad (۳۴-۲)$$

مقایسه شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برحسب MTBF و MTTR نشان می‌دهد که از بین دو پارامتر میانگین زمان بین خرابی و میانگین زمان تعمیر، کدام یک بیشترین تأثیر را بر قابلیت دسترسی کل سیستم دارند. به عبارت دیگر این نتایج به ما کمک می‌کند که برای افزایش و بهبود قابلیت

دسترسی سیستم، بر اساس کاهش میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم‌های بحرانی عمل کنیم یا بهتر است که میانگین زمان بین خرابی‌های زیرسیستم‌های بحرانی را افزایش دهیم [۲۷].

## ۲-۹- مدل‌سازی و تحلیل RAM

برخی از دستگاه‌ها و سیستم‌ها ساختمان بسیار حجیم و پیچیده‌ای دارند که مدیریت چنین سیستم‌ها و دستگاه‌هایی به شناخت کافی از قابلیت اطمینان آن‌ها هم برای جلب رضایت مشتری و هم برای اطمینان از اجرای صحیح پروژه و رسیدن به تولید مورد نظر در شرایط و مدت زمان معلوم نیاز اساسی دارد. روش‌های مختلفی برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌ها و دستگاه‌ها ارائه شده‌اند که اساس این روش‌ها تحلیل‌های کیفی، کمی و یا بر مبنای مدل‌سازی و شبیه‌سازی استوار می‌باشد. در این میان، روش‌های مرسوم که بیشترین استفاده را در تحلیل RAM و تعمیرات و نگهداری دستگاه‌ها و سیستم‌ها دارند عبارتند از: روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها<sup>۱</sup>، روش تحلیل درخت خطا<sup>۲</sup>، روش مارکوف<sup>۳</sup> و روش آماری [۹]. همچنین روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی از جمله شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۴</sup> نیز در قابلیت اطمینان سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹].

روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها در اوایل دهه ۱۹۵۰ برای توسعه سیستم‌های کنترل پرواز و تعیین قابلیت اطمینان سیستم و تحلیل خرابی‌ها در امریکا به کار گرفته شد. هدف این روش شناسایی انواع خرابی‌های محتمل در زیرسیستم‌های مختلف سیستم و تأثیر آن‌ها بر سایر زیرسیستم‌ها و در نهایت بر کل سیستم به منظور بالا بردن ایمنی سیستم و انجام صحیح مأموریت آن می‌باشد. این تحلیل در مراحل اولیه طراحی دستگاه و همچنین در مراحل مختلف چرخه عمر دستگاه قابل استفاده می‌باشد. این روش یکی از روش‌های معروف تحلیل قابلیت اطمینان می‌باشد ولی بزرگ‌ترین کاستی این روش این است که تمامی تحلیل‌های آن کیفی می‌باشد و همچنین استفاده از

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

<sup>۲</sup> . Fault Tree Analysis (FTA)

<sup>۳</sup> . Markov

<sup>۴</sup> . Monte Carlo simulation

این روش در دستگاه‌ها و سیستم‌های پیچیده خیلی دشوار می‌باشد [۷].

روش تحلیل درخت خطا نیز یکی از روش‌های پرکاربرد و دارای توانایی بالا در تحلیل خرابی‌های دستگاه‌ها می‌باشد. این روش در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آزمایشگاه بل<sup>۱</sup> برای ارزیابی قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم کنترل پرتاب موشک مورد استفاده قرار گرفت. روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها به‌عنوان روش تحلیل رخدادها از پایین به بالا<sup>۲</sup> و روش تحلیل درخت خطا به‌عنوان روش تحلیل رخدادها از بالا به پایین<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند. در روش تحلیل درخت خطا رخداد نامطلوب بالا (خرابی سیستم یا زیرسیستم) مشخص شده و به‌صورت ساختار یک درخت به سمت پایین دلایل و احتمال این رخداد نامطلوب را در سطوح مختلف سیستم بررسی می‌کند تا به پایین‌ترین جزء سیستم برسد. این روش هم کیفی و هم کمی می‌باشد و کاربرد گسترده‌ای در تحلیل خرابی‌ها و شناسایی رخدادهای بحرانی و احتمال وقوع آن‌ها دارد ولی این روش نیز در دستگاه‌ها و سیستم‌های بزرگ و پیچیده بسیار زمان‌بر و مشکل می‌باشد [۳۰].

ساختار و منطق دو روش ذکر شده فوق بیشتر برای شناسایی انواع رخدادهای ممکن، احتمال وقوع هر رخداد، تأثیر متقابل رخدادها بر اجزاء مختلف سیستم به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان مناسب می‌باشند نه یک روش کمی که قابلیت اطمینان سیستم را به‌صورت تابعی از زمان ارائه دهند.

از این‌رو روش مارکوف و روش آماری که با تحلیل داده‌های عملیاتی سیستم و دستگاه، یک رابطه مبتنی بر زمان برای تعیین قابلیت اطمینان ارائه می‌دهند روش‌هایی سودمند برای مدل‌سازی و تعیین قابلیت اطمینان می‌باشند. فرآیندهای مارکوف در زمان پیوسته<sup>۴</sup> در مهندسی قابلیت اطمینان کاربرد گسترده‌ای دارند [۳۱-۳۳].

مشخصه اصلی فرآیندهای مارکوفی این است که فقط با داشتن وضعیت فعلی سیستم، رفتار آتی آن را

<sup>۱</sup> . Bell

<sup>۲</sup> . Bottom - top

<sup>۳</sup> Top - bottom

<sup>۴</sup> . Markov processes in continuous times

می‌توان تعیین کرد یعنی رفتار آتی سیستم مستقل از عملکرد گذشته آن می‌باشد. اساس این روش بر مبنای ماتریس انتقال یا گذر سیستم از حالت سالم به خرابی (با نرخ خرابی  $\lambda$ ) و از حالت خرابی به وضعیت سالم (با نرخ تعمیر  $\mu$ ) استوار می‌باشد و همچنین نرخ خرابی و نرخ تعمیر ثابت فرض می‌شوند در نهایت با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، رابطه قابلیت اطمینان سیستم یا دستگاه به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود [۳۴].

از آن جایی که هدف این مطالعه تحلیل RAM می‌باشد و همان‌طور که اشاره شد برای تعیین قابلیت اطمینان، نرخ خرابی، قابلیت تعمیر و نگهداری، نرخ تعمیر و قابلیت دسترسی نیاز به توابع توزیع چگالی احتمال خرابی و تعمیر و توابع توزیع تجمعی احتمال خرابی و تعمیر وجود دارد که در نهایت میانگین زمان بین خرابی و میانگین زمان تعمیر سیستم نیز بر مبنای آن‌ها محاسبه شده و تحلیل‌ها بر اساس آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین همگی این محاسبات از جنس احتمال می‌باشند و روش آماری جامع‌ترین روش تحلیل RAM می‌باشد. لذا فرآیند استفاده از روش آماری برای تحلیل‌های مورد نظر در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲-۹-۱- مدل‌سازی RAM با استفاده از روش آماری

برای تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی یک سیستم که کمیت‌هایی احتمالی هستند داده‌های مورد نیاز شامل زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیرات (که متغیرهای تصادفی مدل‌سازی و تحلیل RAM می‌باشند) جمع آوری می‌گردند. شکل ۲-۴ روندنمای کلی نحوه تعیین نوع فرآیند تحلیل داده‌ها در روش آماری، و فرآیند مدل‌سازی و تحلیل RAM را نشان می‌دهد. مطابق این روندنما جهت تحلیل داده‌ها در ابتدا دو آزمون روند<sup>۱</sup> و همبستگی سری<sup>۲</sup> صورت می‌پذیرد که بر مبنای نتایج این آزمون‌ها چنانچه داده‌ها دارای روند باشند روش فرآیند پواسن ناهمگن<sup>۳</sup> (مثل فرآیند قانون توان) برای تحلیل استفاده می‌شود و اگر داده‌ها از روند خاصی پیروی نکنند به عبارت دیگر

<sup>۱</sup> . Trend test

<sup>۲</sup> . Serial correlation test

<sup>۳</sup> . Non-Homogenous Poisson Process (NHPP)



داده‌ها به‌طور یکسان توزیع شده باشند آزمون همبستگی، وابستگی داده‌ها یا مستقل بودن آن‌ها را مشخص می‌کند که در صورت وجود همبستگی، روش مورد استفاده فرآیند پواسون همگن (مثل فرآیند پواسون شاخه‌ای<sup>۱</sup>) خواهد بود و در صورتی که داده‌ها مستقل باشند (در این صورت که داده‌ها هم به‌طور یکسان توزیع شده و هم مستقل می‌باشند در اصطلاح مانا<sup>۲</sup> و مستقل خوانده می‌شوند) روش آمار کلاسیک (فرآیند تجدید شونده<sup>۳</sup>) بر مبنای توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیر که قبلاً اشاره گردید جهت تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این صورت، یافتن تابع توزیع چگالی احتمال که بر داده‌ها بهترین تطابق را داشته باشد اساسی‌ترین گام فرآیند تحلیل می‌باشد.

## ۲-۹-۲- آزمون روند

آزمون روند یک روش مرسوم آماری برای بررسی وضعیت عملیاتی و اطلاعات خرابی‌ها و تعمیرات دستگاه یا سیستم با گذشت زمان است و نشان دهنده روند یکنواخت خرابی‌ها و تعمیرات یا روند کاهشی و یا افزایشی در زمان خرابی‌های اتفاق افتاده و تعمیرات صورت گرفته می‌باشد. روش‌های تحلیلی مختلفی برای آزمون روند ارائه شده‌اند از قبیل روش هندبوک نظامی<sup>۴</sup>، روش چیدمان معکوس<sup>۵</sup>، آزمون لاپلاس<sup>۶</sup> و غیره که در این میان روش هندبوک نظامی بیشتر مرسوم می‌باشد [۳۵-۳۷]. در این روش از فرمول آماری زیر استفاده می‌شود [۳۸].

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{T_n}{T_i} \quad (۳۵-۲)$$

در فرمول فوق،  $n$  تعداد خرابی‌ها،  $T_n$  زمان آخرین خرابی و  $T_i$  زمان خرابی  $i$ ام می‌باشد. تحت فرض

<sup>۱</sup> . Branching Poisson Process

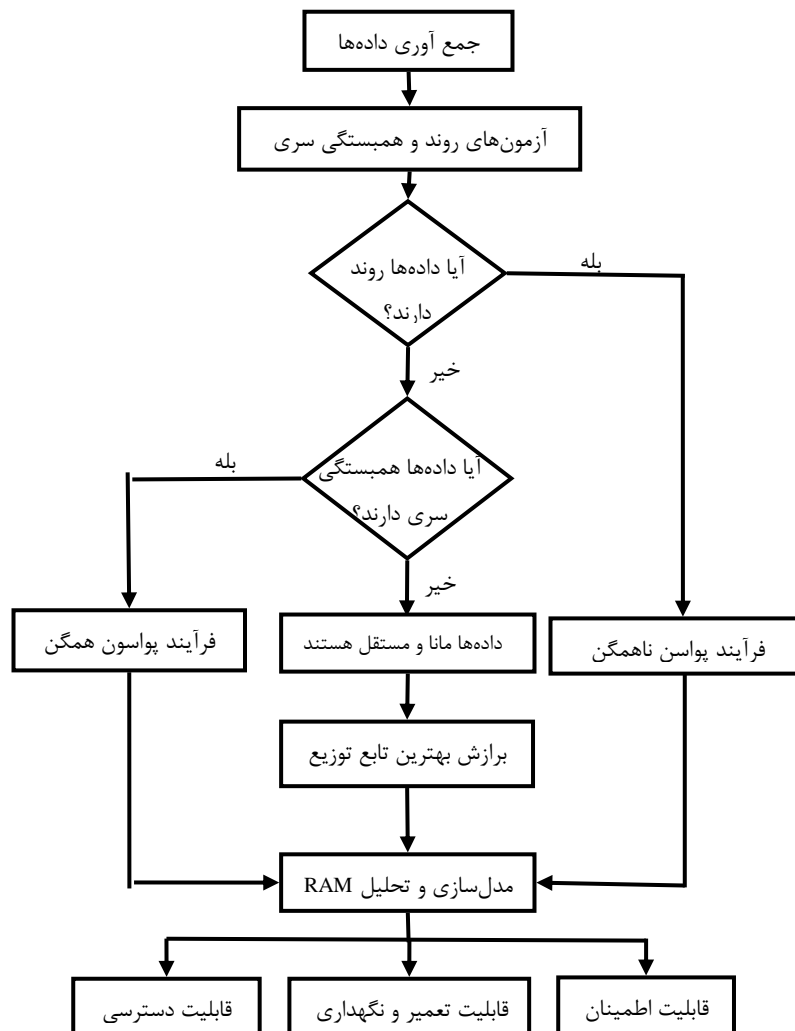
<sup>۲</sup> . Independent and Identically Distributed (iid)

<sup>۳</sup> . Renewal process

<sup>۴</sup> . Military Handbook Test

<sup>۵</sup> . Reverse Arrangement

<sup>۶</sup> . Laplace

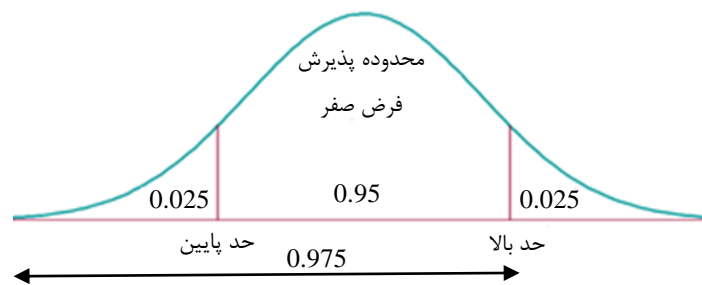


شکل ۲-۴- روندنمای فرآیند تحلیل RAM (تطبيق یافته از [۳۹])

صفر داده‌ها از فرآیند پواسن ناهمگن تبعیت نمی‌کنند و مقدار  $U$  دارای توزیع کی - دو<sup>۱</sup> با درجه آزادی  $2(n-1)$  می‌باشد. چنانچه مقدار  $U$  محاسبه شده از رابطه فوق در بازه بین حد بالا و حد پایین به دست آمده از جدول این توزیع (جدول  $\chi^2$ ) در سطح اطمینان ۹۵٪ باشد در این صورت فرض صفر پذیرفته می‌شود و داده‌ها دارای روند نمی‌باشند [۴۰، ۴۱]. به عبارت بهتر مطابق شکل ۲-۵ برای پذیرش فرض صفر بایستی رابطه زیر برقرار باشد ( $N$  درجه آزادی می‌باشد):

$$\chi_{N,0.025}^2 < U < \chi_{N,0.975}^2 \quad (۳۶-۲)$$

<sup>۱</sup>. Chi-squared



شکل ۲-۵- محدوده پذیرش فرض صفر و حد بالا و پایین در آزمون روند

### ۲-۹-۳- آزمون همبستگی سری

در این آزمون،  $i$  امین داده  $TBF$  یا  $TTR$  بر حسب  $(i-1)$  امین داده  $TBF$  یا  $TTR$  در یک فضای دو بعدی رسم می‌شوند. چنانچه نقاط ترسیم شده دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد و به صورت پراکنده توزیع شده باشند در این صورت داده‌ها دارای همبستگی سری نمی‌باشند به عبارت دیگر اگر داده‌های ترسیم شده در امتداد یک خط قرار بگیرند دارای همبستگی خواهند بود [۳۶].

### ۲-۹-۴- فرآیند پواسن

فرآیند پواسن یک فرآیند تصادفی شمارشگر می‌باشد که دارای کاربرد گسترده‌ای در تحلیل داده‌های خرابی می‌باشد. اگر نرخ خرابی ثابت باشد توزیع پواسن همگن و در غیر این صورت توزیع پواسن ناهمگن خواهد بود. فرآیند پواسن ناهمگن دارای روش‌های مختلفی از جمله: فرآیند قانون توان<sup>۱</sup>، فرآیند لاگ خطی<sup>۲</sup> و فرآیند چگالی احتمال (شدت) کرانه‌دار<sup>۳</sup> می‌باشد [۴۳]. فرآیند قانون توان که فرآیند ویبول ناهمگن نیز خوانده می‌شود دارای تابع چگالی احتمال (خرابی یا تعمیر)، تابع نرخ خرابی (یا نرخ تعمیر)، تابع قابلیت اطمینان و تابع قابلیت تعمیر و نگهداری به صورت زیر می‌باشد:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right) \quad (۳۷-۲)$$

<sup>۱</sup> . Power Law Process (PLP)

<sup>۲</sup> . Log-Linear Process (LLP)

<sup>۳</sup> . Bounded Intensity Process (BLP)

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (38-2)$$

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right) \quad (39-2)$$

$$M(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right) \quad (40-2)$$

در این روابط،  $\beta$ ، پارامتر شکل و  $\theta$  پارامتر مقیاس می‌باشند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\beta = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{T_n}{T_i}} \quad (41-2)$$

$$\theta = \frac{T_n}{n^{1/\beta}} \quad (42-2)$$

در فرمول فوق،  $n$  تعداد خرابی‌ها (یا تعمیرت)،  $T_n$  زمان آخرین خرابی (یا تعمیر) و  $T_i$  زمان خرابی (یا تعمیر)  $i$ ام می‌باشد [۴۳].

## فصل سوم

مروری بر مطالعات انجام شده

## ۳-۱- مقدمه

تا اوایل قرن بیستم، موضوع هزینه در طراحی‌ها به گونه‌ای که امروزه اهمیت دارد مطرح نبوده و معمولاً بالاترین سطوح قابلیت اطمینان بعد از چندین طراحی حاصل می‌شد. همچنین روش‌های ارزیابی کمی قابلیت اطمینان تعریف نشده بود بنابراین نیازی به نرخ خرابی‌های قطعات و تجهیزات مهندسی نبود و آمار و اطلاعات خرابی‌ها ثبت نمی‌گردید. با ظهور عصر الکترونیک که با جنگ جهانی دوم شتاب بیشتری به خود گرفت نیاز به سیستم‌ها و تجهیزات مهندسی پیچیده با قابلیت اطمینان بالا بیشتر احساس شد و به تدریج موضوع ثبت آمار و اطلاعات خرابی‌ها و تحلیل‌های ریاضی روی آن‌ها منجر به مدل‌سازی قابلیت اطمینان شد. سپس مطالعات بیشتر بر روی داده‌های خرابی و تعمیرات سیستم‌ها و دستگاه‌ها در نهایت تحت عنوان تحلیل RAM مطرح شد به طوری که علاوه بر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی سیستم‌ها هم اکنون از پرتفردارترین حوزه‌های مهندسی می‌باشد [۱۶].

## ۳-۲- تاریخچه تحقیقات صورت گرفته در حوزه RAM

مفهوم قابلیت اطمینان اولین بار بعد از جنگ جهانی اول برای مقایسه ایمنی عملیات هواپیماهای یک موتور، دو موتور و چهار موتور مورد استفاده قرار گرفت بدین صورت که قابلیت اطمینان به عنوان تعداد حادثه‌ها در هر ساعت زمان پرواز این هواپیماها محاسبه می‌شد. با شروع دهه ۱۹۳۰، مباحث تئوری کاربرد روش‌ها و تحلیل‌های آماری در کنترل کیفیت محصولات ارائه شد ولی این مباحث با شروع جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفتند. در این دوران، مباحث قابلیت اطمینان توسط آلمان‌ها برای افزایش کیفیت موشک‌های موسوم به V-1 به کار گرفته شد که موفقیت چندانی نداشت ولی بعد از جنگ جهانی دوم برای بهبود شرایط این موشک‌ها از یک ریاضی‌دان برای تجزیه و تحلیل آماری خرابی‌ها و بررسی اجزاء تشکیل دهنده موشک (زیرسیستم‌های آن) کمک گرفتند و بدین ترتیب بعد از جنگ جهانی دوم مفاهیم و تئوری‌های قابلیت اطمینان شکل جدی به خود گرفتند و به

تدریج در سایر زمینه‌ها از جمله تجهیزات الکترونیکی، کامپیوترها، تلویزیون و غیره به کار گرفته شدند و در اوایل دهه ۱۹۶۰ ایالات متحده آمریکا برای افزایش توانایی موشک‌های بالستیک و روسیه برای افزایش ایمنی و موفقیت اولین فضاپیما از قابلیت اطمینان استفاده کردند. در سال ۱۹۶۳، اولین مجله در زمینه قابلیت اطمینان شروع به فعالیت کرد و در دهه ۱۹۶۰ چندین کتاب در این زمینه منتشر شد. در دهه ۱۹۷۰ با کاربرد قابلیت اطمینان در نیروگاه‌های هسته‌ای ایالات متحده آمریکا و صنایع نفت و گاز در نروژ، تحلیل‌های آماری خرابی‌ها و مفاهیم قابلیت اطمینان به‌طور گسترده‌ای عمومیت یافته و روز به روز بر کاربرد آن در صنایع مختلف افزوده شده است [۴۴-۴۷].

تاریخچه قابلیت نگهداری به سال ۱۹۰۱ بر می‌گردد جایی که برادران رایت<sup>۱</sup> طی یک قرارداد نظامی ساخت هواپیما را بنیان نهادند. یکی از بندهای این قرارداد شامل عبارت "سهولت عملکرد و تعمیر و نگهداری" هواپیمای موردنظر بود. وزارت دفاع آمریکا در فاصله زمانی جنگ جهانی دوم و اوایل دهه ۱۹۵۰، مطالعات گسترده‌ای را در زمینه قابلیت تعمیر و نگهداری تجهیزات نظامی انجام داد. در سال ۱۹۵۶ مجموعه‌ای از مقالات در زمینه طراحی ماشین ارائه شدند که مباحث آن‌ها پیرامون دستورالعمل‌های نگهداری ماشین، قابلیت تعمیر و نگهداری تجهیزات الکترونیکی بوده است [۴۸]. در سال ۱۹۵۹ وزارت دفاع آمریکا مشخصات و معیارهای قابلیت تعمیر و نگهداری تجهیزات (به‌ویژه تجهیزات نظامی) را به‌طور جامع در دستورالعمل‌های MIL - M - 26512، MIL - STD - 470 و MIL - HDBK - 472 ارائه کرد. اولین کتاب در زمینه قابلیت تعمیر و نگهداری تحت عنوان قابلیت تعمیر و نگهداری الکترونیکی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۰ انتشار یافت و از آن به بعد مطالعات در زمینه‌های مختلف قابلیت تعمیر و نگهداری رشد بیشتری داشته و مقالات متعددی در این حوزه انتشار یافته و کاربرد آن در همه زمینه‌های مهندسی گسترش یافته است [۱۷].

<sup>۱</sup> . Wright brothers

<sup>۲</sup> . Electronic maintainability

قابلیت دسترسی در اوایل دهه ۱۹۶۰ مطرح شد و تعاریف اولیه آن توسط ساندلر<sup>۱</sup> [۴۹] و بارلو<sup>۲</sup> و فرانک<sup>۳</sup> [۵۰] ارائه شد. قابلیت دسترسی یک سیستم در یک بازه زمانی، قابلیت دسترسی در فواصل زمانی محدود با در نظر گرفتن احتمال دسترسی واقعی در عمل و سایر کاربردهای قابلیت دسترسی برای سیستم‌های پیچیده با اجزاء مختلف به تدریج ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۵۱].

### ۳-۳- تحقیقات صورت گرفته در حوزه ی RAM بر روی ماشین آلات معدنی

تحقیقات صورت گرفته در حوزه ی RAM در مهندسی معدن، از اواخر دهه ۱۹۶۰ شروع شده که بیشتر پیرامون قابلیت اطمینان ماشین آلات، تجهیزات و سیستم های تولید در معادن روباز و زیرزمینی، سیستم های برقی و تهویه در معادن بوده است. در این قسمت به تحقیقات عمده صورت گرفته بر روی ماشین آلات معدنی اشاره می‌شود.

**کومار و گرانهولم<sup>۴</sup> سال ۱۹۸۸:** مفاهیم پایه و کاربردی تحلیل قابلیت اطمینان ماشین آلات معدنی را مطرح نمودند و با تحلیل قابلیت اطمینان LHD<sup>۵</sup> در معادن زیرزمینی، برای تعمیر و نگهداری این دستگاه برنامه مناسب را ارائه کردند [۵۲].

**استانک و ونکاتا<sup>۶</sup> سال ۱۹۸۸:** قابلیت اطمینان سیستم‌های برق دستگاه‌های برقی مختلف موجود در معادن زغال سنگ آمریکا را ارزیابی کردند. برای این منظور از اطلاعات ۱۰ سال خرابی در ۴ معدن استفاده نموده و نرخ خرابی قطعات برقی از جمله اجزای برقی سیستم تهویه، موتور ماشین شاتل<sup>۷</sup> و موتور ماشین معدنکاری پیوسته<sup>۸</sup>، و غیره را با استفاده از روش‌های آماری تعیین نمودند [۵۳].

**کومار سال ۱۹۹۰:** در رساله دکتری خود به مدل‌سازی قابلیت اطمینان LHDهای معدن سنگ آهن

1. Sandler

2. Barlow

3. Frank

4. Kumar & Granholm

5. Load-Haul-Dump

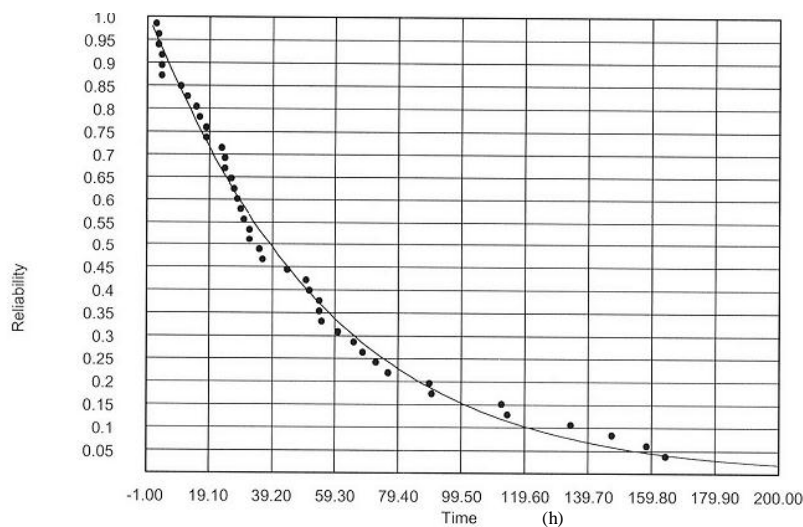
6. Stanek & Venkata

7. Shuttle car

8. Continuous miner



کایرونا<sup>۱</sup> پرداخت. وی برای این منظور، دستگاه را به چهار زیرسیستم شامل زیرسیستم هیدرولیک، زیرسیستم موتور، زیرسیستم ترمز و زیرسیستم حرکت تقسیم کرد و این زیرسیستم‌ها به صورت سری با یکدیگر در نظر گرفته شدند. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات و داده‌های خرابی‌های صورت گرفته برای هر زیرسیستم، با روش آماری، تحلیل قابلیت اطمینان هر زیرسیستم صورت گرفته است و با توجه به سری بودن زیرسیستم‌ها در نهایت قابلیت اطمینان کل دستگاه LHD مدل‌سازی شده است و همچنین برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای آن ارائه شده است. منحنی قابلیت اطمینان به دست آمده در این تحقیق مطابق شکل ۳-۱ می‌باشد [۳۶].



شکل ۳-۱- منحنی قابلیت اطمینان LHD [۳۶]

دی<sup>۲</sup> و همکاران سال ۱۹۹۴: به ارزیابی قابلیت اطمینان لاستیک کامیون‌های معدنی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تابع چگالی خرابی لاستیک‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کند [۵۴].

واگناس<sup>۳</sup> و همکاران سال ۱۹۹۷: تحلیل قابلیت اطمینان سه دستگاه LHD را ارائه نمودند. برای این منظور LHD به ۱۰ زیرسیستم به صورت سری تقسیم شده است و با استفاده از روش آماری قابلیت اطمینان هر کدام از زیرسیستم‌ها محاسبه شده است [۵۵].

سامانتا<sup>۴</sup> و همکاران سال ۲۰۰۱: برای تحلیل قابلیت اطمینان شاول، دستگاه به شش زیرسیستم

<sup>۱</sup>. Kiruna

<sup>۲</sup>. Dey

<sup>۳</sup>. Vagenas

<sup>۴</sup>. Samanta

تقسیم شده است که عبارتند از: زیرسیستم حرکت، زیرسیستم هیدرولیک، جام بارگیری، موتور، کابل‌ها، بدنه و کابین اپراتور. در این تحقیق برای تحلیل خرابی‌ها و عوامل توقف تولید مربوط به شاول از روش تحلیل درخت خطا (FTA) استفاده شده است [۵۶].

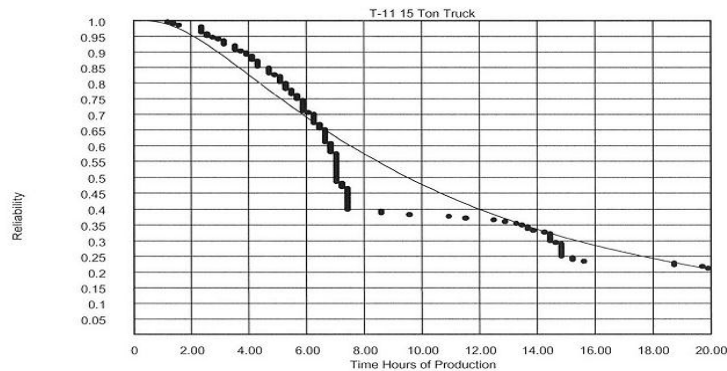
**تاونسن<sup>۱</sup> سال ۲۰۰۲:** به تحلیل قابلیت اطمینان دراگلین پرداخته است. برای این منظور در رساله دکتری خویش دراگلین را به ۲۵ زیرسیستم تقسیم کرده و قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری آن را با روش مدل‌سازی آماری ارائه نموده است [۵۷].

**هال و دانشمند<sup>۲</sup> سال ۲۰۰۳:** ماشین آلات باربری در یک معدن زیرزمینی در کشور شیلی را مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از اطلاعات ثبت شده توسط حسگرهای نصب شده بر روی کامیون‌ها و خاک انداز<sup>۳</sup>‌های موجود در معدن، گزارش‌های تولید معدن، گزارش‌های تعمیرات و نگهداری در معدن و همچنین اطلاعات ثبت شده توسط اپراتورها قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری این ماشین‌ها را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق برای تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری برای کامیون‌ها سه زیرسیستم، شامل زیرسیستم موتور، زیرسیستم حرکت و زیرسیستم هیدرولیک در نظر گرفته شده و بهترین توابع توزیع برای خرابی‌های زیرسیستم موتور و زیرسیستم حرکت دستگاه، تابع توزیع ویبول و برای زیرسیستم هیدرولیک تابع توزیع لاگ نرمال به‌دست آمده است. این زیرسیستم‌ها به صورت سری با یکدیگر در نظر گرفته شده اند و قابلیت اطمینان کامیون‌ها محاسبه شده است که برای یک کامیون ۱۵ تنی مدل T-11 مدل قابلیت اطمینان آن مطابق شکل ۳-۲ به‌دست آمده است [۵۸]. هال و دانشمند در ادامه تحقیقات خویش، قابلیت اطمینان پنج دستگاه شاول هیدرولیکی فعال در یکی از معادن روباز آمریکا را مدل‌سازی نمودند. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده نشان داد که چگالی خرابی شاول‌ها از تابع توزیع ویبول و چگالی زمان‌های تعمیر و نگهداری و توقف‌ها از تابع توزیع لاگ‌نرمال تبعیت می‌کنند [۵۹].

1. Townson

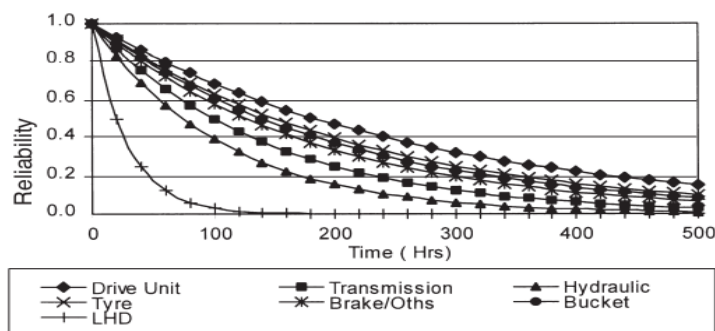
2. Hall & Daneshmand

3. Scoop



شکل ۳-۲- مدل قابلیت اطمینان برای یک کامیون‌های زیرزمینی [۵۸]

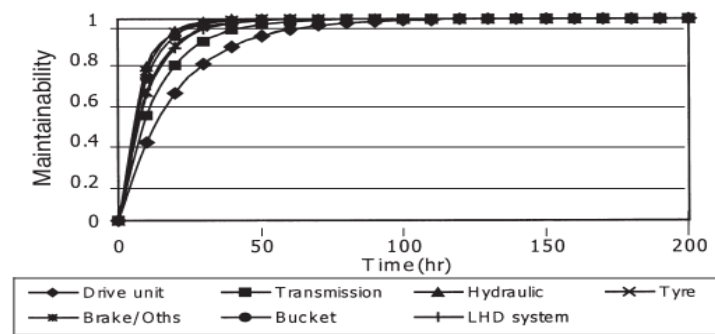
سامانتا و همکاران سال ۲۰۰۴: برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و محاسبه قابلیت دسترسی دستگاه<sup>۱</sup> LHD از مدل مارکوف<sup>۲</sup> استفاده کردند. در این تحقیق ایشان دستگاه LHD را به شش زیرسیستم شامل زیرسیستم حرکت، هیدرولیک، انتقال نیرو، جام بارگیری، لاستیک و ترمز تقسیم نموده و نرخ خرابی و نرخ تعمیر برای همه زیرسیستم‌ها مقادیر ثابت لحاظ شده است. نتایج به دست آمده برای قابلیت اطمینان (شکل ۳-۳)، قابلیت تعمیر و نگهداری (شکل ۳-۴) و میزان قابلیت دسترسی (شکل ۳-۵) در ادامه آورده شده است [۶۰].



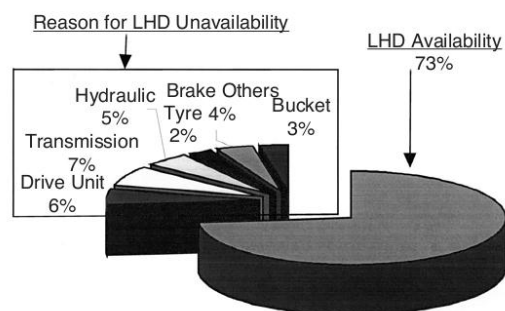
شکل ۳-۳- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های دستگاه LHD [۶۰]

<sup>۱</sup> . Load – Haul - Dump

<sup>۲</sup> .Markov model



شکل ۳-۴- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های دستگاه LHD [۶۰]

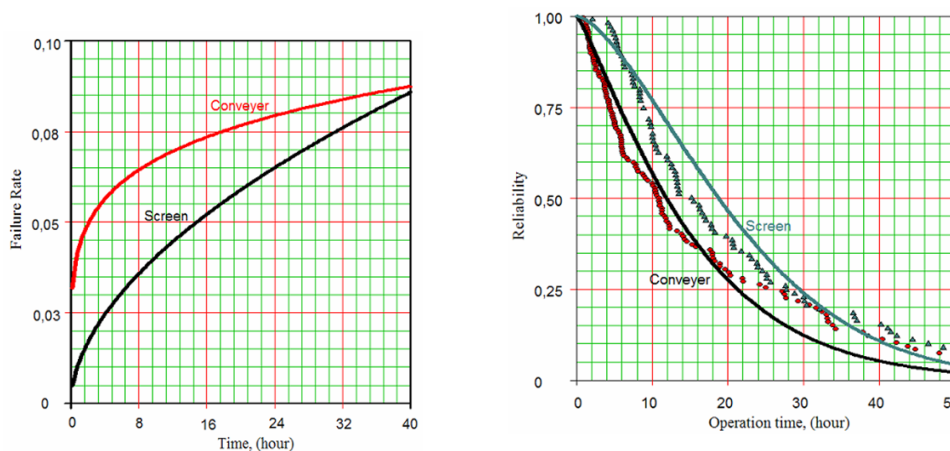


شکل ۳-۵- قابلیت دسترسی دستگاه LHD [۶۰]

**قدرتی سال ۲۰۰۵:** در رساله دکتری خویش تحلیل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن محیط و شرایط عملیاتی ماشین آلات معدنی را ارائه نمود. وی در مطالعات خود با توجه به شرایط محیطی و عملیاتی (از قبیل وضعیت آب و هوایی، دما، رطوبت و گرد و خاک محیط کار، مهارت پرسنل، موقعیت قرارگیری کارگاه عملیات به منظور قابلیت دسترسی و تأمین قطعات در بازار) به شناسایی قطعات یدکی ضروری پرداخته است تا با توجه به قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری دستگاه یا سیستم، با پیش‌بینی صحیح میزان لوازم و قطعات یدکی مورد نیاز دستگاه، از تأخیرها و توقف‌های پیش‌بینی نشده جلوگیری به عمل آید و همچنین با کاهش انبار کردن قطعات غیرضروری، از هزینه‌های عملیاتی اضافی کاسته شود [۶۱].

گوپتا و بهاتاچاریا<sup>۱</sup> سال ۲۰۰۷: قابلیت اطمینان ناو زنجیری در یک معدن جبهه کار طولانی زغال‌سنگ در هند را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق داده‌های عملیاتی سه سال نوار نقاله جمع‌آوری و با روش تحلیل درخت خطا مدل قابلیت اطمینان ناو زنجیری تعیین شده است [۶۲].

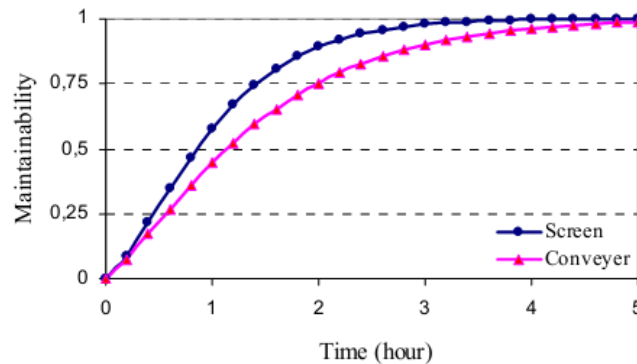
برآبادی و کومار سال ۲۰۰۷: قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (RAM) کارخانه خردایش در معدن بوکسیت جاجرم را تحلیل کردند. ایشان در این تحقیق دو زیرسیستم اصلی مدار سنگ شکنی کارخانه که بیشترین تأثیر را در راندمان و عملکرد خردایش دارند شامل نوار نقاله و سرند در نظر گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌های خرابی این دو زیرسیستم دارای توزیع ویبول می‌باشند و میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) برای دو زیرسیستم نوارنقاله و سرند به ترتیب ۱۵/۲۵ و ۲۱/۴۴ ساعت می‌باشد. منحنی‌های نرخ خرابی و قابلیت اطمینان مدار سنگ شکنی این کارخانه مطابق شکل ۳-۶ ارائه شده است. با تحلیل داده‌های تعمیرات این دو زیرسیستم، بهترین تابع توزیع برای این داده‌ها نیز تابع توزیع ویبول به‌دست آمده است و میانگین زمان تعمیرات (MTTR) برای نوارنقاله و سرند به ترتیب ۱/۴۲ و ۱/۰۲ ساعت محاسبه شده است. با استفاده از میانگین زمان‌های خرابی و تعمیرات، قابلیت دسترسی برای نوارنقاله ۰/۹۱۵ و برای سرند ۰/۹۵۸ به‌دست آمده است [۶۳].



شکل ۳-۶- منحنی نرخ خرابی و منحنی قابلیت اطمینان نوار نقاله و سرند در معدن بوکسیت جاجرم [۶۳]

<sup>1</sup> . Gupta & Bhattacharya

همچنین با استفاده از داده‌های تعمیر و نگهداری، قابلیت تعمیر و نگهداری این دو زیرسیستم نیز به صورت شکل زیر تعیین شده است.

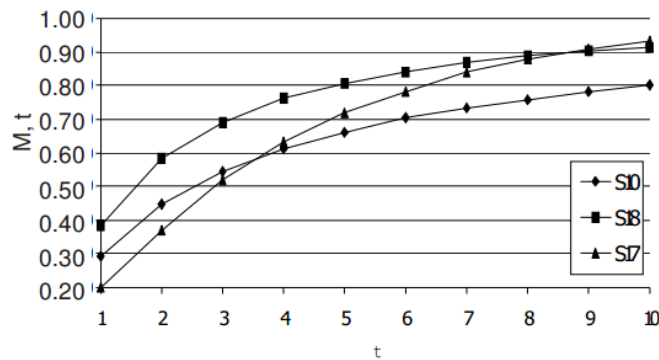


شکل ۳-۷- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری نوار نقاله و سرنند در معدن بوکسیت جاجرم [۶۳]

همچنین در این تحقیق با توجه به نتایج مدل‌سازی و تحلیل‌های صورت گرفته، بهترین فواصل زمانی برای نگهداری پیشگیرانه برای رسیدن به سطوح مختلف قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها نیز ارائه شده است.

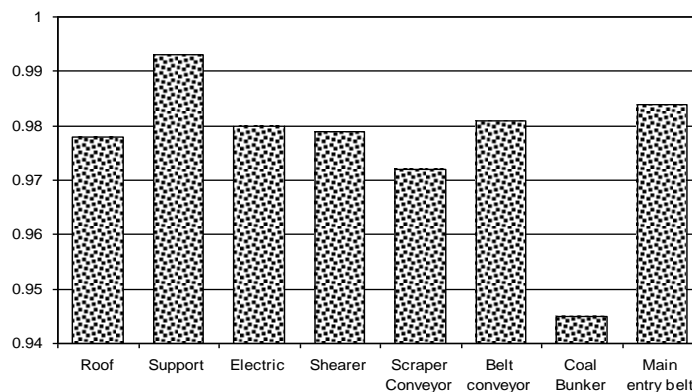
**الولی<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۰۸:** در این تحقیق قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم‌های مکانیکی شاول از نوع کابل برقی بررسی شده است. برای این منظور از داده‌های یک سال عملیاتی ۷ شاول در ترکیه استفاده شده و با استفاده از داده‌های تعمیر و نگهداری و برازش بهترین توابع توزیع، میانگین زمان تعمیر برای هر شاول محاسبه شده و قابلیت تعمیر و نگهداری هر شاول تعیین شده است. در شکل ۳-۸ منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری سه نوع از شاول‌های مورد مطالعه آورده شده است. مطابق این شکل شاول S10 بعد از گذشت ۴ ساعت کاری، قابلیت تعمیر و نگهداری آن کاهش می‌یابد این بدان معنی است که میانگین زمان تعمیرات آن افزایش یافته و نیاز به تعمیرات نگهداری پیشگیرانه دارد [۶۴].

<sup>۱</sup>. Elevli



شکل ۳-۸- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری سه شاول از نوع کابل برقی [۶۴]

بینگ-یوان<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۰۹: با مطالعه نرخ خرابی‌های ماشین‌آلات و میزان زغال خروجی در یک معدن جبهه‌کار بلند در کشور چین، قابلیت اطمینان سیستم تولید معدن را بررسی و راه‌کارهایی را برای بهبود قابلیت تولید معدن ارائه دادند. همچنین نتایج تحلیل قابلیت دسترسی اجزای تولید در معدن مورد مطالعه که در شکل ۳-۹ آورده شده است نشان داد که نگهدارنده‌های قدرتی و بونکر ذخیره زغال به ترتیب بیشترین و کمترین قابلیت دسترسی را دارند [۶۵].



شکل ۳-۹- قابلیت دسترسی اجزای سیستم تولید در معدن مورد مطالعه [۶۵]

وایناس و زیانگزی<sup>۲</sup> سال ۲۰۰۹: با استفاده از داده‌های حدود ۱۶ ماه عملکرد ۱۳ دستگاه ماشین LHD در یک معدن زیرزمینی در منطقه سادبوری<sup>۳</sup> کانادا به تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیر و

<sup>۱</sup> . Bing-Yuan

<sup>۲</sup> . Vayenas & Xiangxi

<sup>۳</sup> . Sudbury

نگهداری هر کدام از ماشین‌ها پرداختند و در نهایت قابلیت اطمینان کل سیستم شامل ۱۳ دستگاه LHD را تعیین کردند. همه‌ی داده‌های خرابی و تعمیر در این تحقیق فاقد روند و همبستگی بودند و روش آماری کلاسیک استفاده شده است. توابع توزیع نمایی و لاگ نرمال بهترین توابع برازش شده بر داده‌های خرابی و تعمیر معرفی شده است [۶۶].

**پراتاما<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۱۰:** در این تحقیق قابلیت اطمینان ناوگان ماشین‌آلات یک معدن روباز زغال سنگ شامل ۱۲ دستگاه اکسکواتور صورت گرفته است. ایشان از داده‌های خرابی مربوط به ۲ سال عملکرد دستگاه استفاده کرده و برای بررسی قابلیت اطمینان، اکسکواتور را به ۵ زیرسیستم تقسیم نموده و از روش تحلیل آماری استفاده نموده‌اند [۶۷].

**جلالی و فروهنده سال ۲۰۱۱:** با محاسبه نرخ خرابی و نرخ تعمیر فن‌های به کار رفته در یک تونل در حال ساخت در ایران و با مدل‌سازی تصادفی حالات کار و خرابی فن‌ها و همچنین استفاده از روش مارکوف، قابلیت اطمینان سیستم تهویه تونل را تحلیل نمودند [۶۸].

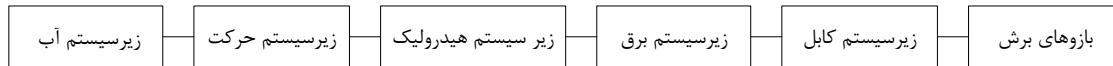
**اسماعیلی و همکاران سال ۲۰۱۱:** قابلیت اطمینان ۳ دستگاه لودر در معدن سنگ آهن سنگان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق از داده‌های یک سال عملکرد لودرها استفاده شده و ۹ زیرسیستم برای آن‌ها تعریف شده است. ایشان از روش تحلیل آماری استفاده کرده و برای هر کدام از لودرها تابع قابلیت اطمینان ارائه نموده‌اند [۶۹].

**حسینی سال ۱۳۹۰:** تحقیق جامع در مورد قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی توسط حسینی طی رساله دکتری ایشان و حسینی و همکاران [۷۰-۷۳] صورت گرفته است. در این تحقیقات مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه‌کار بلند صورت گرفته است که مطالعه موردی

<sup>۱</sup> . Pratama

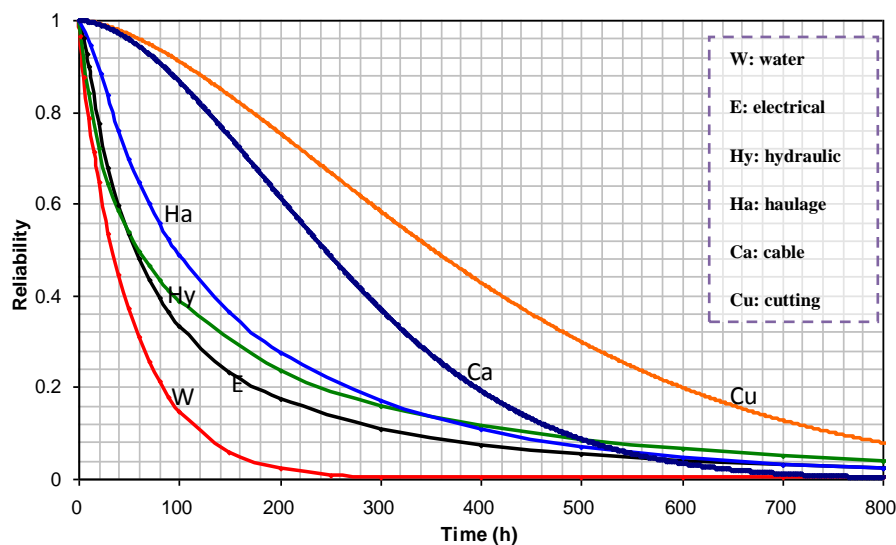


آن معدن زغال سنگ طبس بوده است و برای این منظور دستگاه درام شیرر به شش زیرسیستم مطابق شکل زیر تقسیم شده است که این زیرسیستم‌ها به صورت سری با همدیگر قرار دارند.



شکل ۳-۱۰- زیرسیستم‌های دستگاه شیرر در معدن زغال سنگ طبس [۲۹]

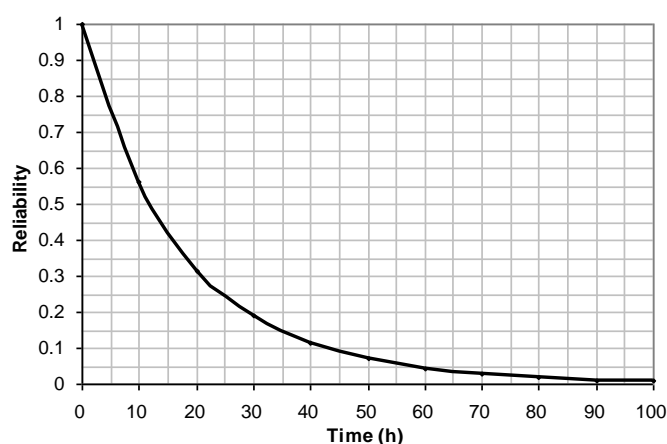
هر کدام از زیرسیستم‌های فوق با تمام ریزقطعات و جزئیات آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و از داده‌های خرابی‌های روی داده در مدت دو سال استفاده شده است. برای هر کدام از زیرسیستم‌ها میانگین زمان بین خرابی‌ها، تابع نرخ خرابی و قابلیت اطمینان محاسبه شده است. همچنین منحنی مربوط به قابلیت اطمینان هر کدام از زیرسیستم‌ها نیز مطابق شکل ۳-۱۱ محاسبه شده است. مطابق این شکل، زیرسیستم‌های بازوهای برش و آب به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان قابلیت اطمینان می‌باشند [۲۹].



شکل ۳-۱۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های درام شیرر در معدن زغال سنگ طبس [۲۹]

با توجه به این که زیرسیستم‌های فوق به طور سری با همدیگر در نظر گرفته شده‌اند قابلیت اطمینان کلی دستگاه درام شیرر به صورت منحنی زیر به دست آمده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که

قابلیت اطمینان کلی دستگاه درام شیرر در معدن زغال سنگ طبس بعد از حدود ۱۰۰ ساعت عملکرد این دستگاه به صفر می‌رسد.



شکل ۳-۱۲- منحنی قابلیت اطمینان درام شیرر معدن زغال سنگ طبس [۲۹]

در این تحقیق در نهایت با توجه به داده‌های خرابی و آمار فراوانی خرابی‌ها (تحلیل پارتو<sup>۱</sup>) استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری برای دستگاه درام شیرر ارائه شده و با انجام تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه<sup>۲</sup> (PM) قابلیت اطمینان دستگاه تا حدود زیادی بهبود خواهد یافت [۲۹].

**برآبادی و همکاران سال ۲۰۱۱:** تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری را با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی وابسته به زمان توسعه دادند. در این تحقیق سیستم خردایش معدن بوکسیت جاجرم به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است و شش پارامتر شامل دمای محیط کار، شیفت کاری (مدار خردایش در دو شیفت روز و شب کار می‌کند)، موقعیت (دو مدار موازی برای خردایش وجود دارد و برای مدار اول کد صفر و برای مدار دو کد ۱ در نظر گرفته شده است)، باد، باران و برف به عنوان پارامترهای متغیر و تأثیرگذار بر خرابی‌ها و تعمیرات در نظر گرفته شده و تابع قابلیت تعمیر و نگهداری به صورت پارامتری و برحسب این متغیرها بیان شده است [۷۴].

<sup>1</sup> . Pareto

<sup>2</sup> Preventive Maintenance

ویجایا<sup>۱</sup> سال ۲۰۱۲: طی رساله دکتری خویش به مطالعه توقف‌ها و خرابی‌های ماشین لق‌گیر<sup>۲</sup> و روش‌های بهبود قابلیت اطمینان آن در معادن زیرزمینی سوئد پرداخت. این دستگاه که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است به ۱۱ زیرسیستم تقسیم شده است که عبارتند از: موتور، سیستم روغن‌کاری مرکزی، حرکت، شاسی، کابین، سیستم برق، سیلندرهای هیدرولیکی، شیلنگ‌های هیدرولیک، بازو، سیستم آب و چکش هیدرولیکی. در این تحقیق، خرابی‌های مربوط به هر زیرسیستم و زمان توقف‌ها و تعمیرات ثبت شده و با تحلیل‌های آماری و توابع توزیع مناسب، میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBFs) و میانگین زمان تعمیرات (MTTRs) برای هر زیرسیستم محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که زیرسیستم روغن‌کاری مرکزی، چکش هیدرولیکی، بازو، کابین (محل اسقرار اپراتور)، شیلنگ‌های هیدرولیکی و سیلندرهای هیدرولیکی دستگاه به ترتیب دارای بیشترین مدت زمان خرابی و توقف بوده‌اند. همچنین در این تحقیق بیان شده است که توقف زیاد زیرسیستم‌های روغن‌کاری مرکزی، چکش هیدرولیکی، بازو، شیلنگ‌های هیدرولیکی و سیلندرهای هیدرولیکی ناشی از مشکلات قابلیت اطمینان (بالا بودن تعداد خرابی‌ها و پایین بودن زمان تعمیرات) بوده و توقف زیاد زیرسیستم کابین (محل اسقرار اپراتور)، ناشی از مشکلات قابلیت تعمیرات و نگهداری (پایین بودن تعداد خرابی‌ها و بالا بودن زمان تعمیرات) بوده است و با قابلیت دسترسی دستگاه، قابلیت اطمینان نیز بهبود می‌یابد [۷۵].



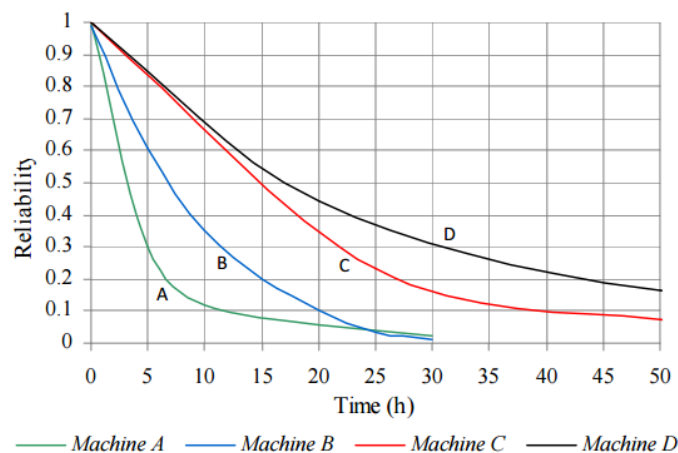
شکل ۳-۱۳- ماشین لق‌گیر در معادن زیرزمینی سوئد [۷۵]

<sup>۱</sup> . Wijaya

<sup>۲</sup> . Scaling Machine

حسینی و همکاران سال ۲۰۱۳: در ادامه تحقیقات خویش با محاسبه قابلیت اطمینان و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای اسپری جت‌های دستگاه درام شیرر معدن زغال سنگ طبس را ارائه نمودند [۷۶].

رحیم‌دل و همکاران سال ۲۰۱۳: قابلیت اطمینان سیستم حفاری در معدن مس سرچشمه شامل چهار ماشین حفار چرخشی در معدن مس سرچشمه را ارائه کردند و برنامه تعمیر و نگهداری برای سیستم حفاری را پیشنهاد کردند. در این بررسی‌ها هر ماشین حفار به ۵ زیرسیستم در یک شبکه سری تقسیم شده و با استفاده از روش آماری تحلیل‌ها صورت گرفته است. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان چهار ماشین مطالعه شده در این تحقیق مطابق شکل زیر به دست آمده است [۷۷، ۷۸].



شکل ۳-۱۴- قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری در معدن مس سرچشمه [۷۷]

محمدی و همکاران سال ۲۰۱۳: به منظور افزایش تولید در معادن روباز زغال در هند، قابلیت اطمینان و بهره‌وری ماشین درآگلایین را انجام دادند [۷۹].

گوستافسون<sup>۱</sup> سال ۲۰۱۳: در رساله دکتری خویش به مدل‌سازی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری و همچنین تحلیل عملکرد LHD پرداخته است. برای این منظور ۱۳ دستگاه LHD در یک معدن

<sup>۱</sup>. Gustafson

زیرزمینی در کشور سوئد مورد مطالعه قرار گرفته و ۱۱ زیرسیستم به صورت سری تعیین شده است. در این رساله قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری LHD های معمولی، نیمه خودکار و خودکار بررسی و مقایسه شده است [۸۰].

**مولی<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۱۴:** قابلیت اطمینان و تحلیل عملکرد ماشین LHD با استفاده از روش تخمین کاپلان - میر<sup>۲</sup> (KME) که یک روش گرافیکی برای تحلیل روند در داده‌ها می‌باشد را پیشنهاد کردند [۸۱].

**وایناس و پنگ<sup>۳</sup> سال ۲۰۱۴:** قابلیت اطمینان سیستم بالابر در معادن زیرزمینی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند. در این تحقیق پارامترهای تابع چگالی احتمال خرابی و در نهایت تابع قابلیت اطمینان سیستم بالابر (شامل دو اسکپ و یک قفسه) در دو معدن بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک قادر به پیش‌بینی و محاسبه زمان بین خرابی‌ها (TBF) می‌باشد [۸۲].

**فرولی<sup>۴</sup> و همکاران سال ۲۰۱۴:** قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی سیستم اصلی حمل زغال در یک معدن در نروژ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ۶ نوارنقاله به‌عنوان زیرسیستم‌های اصلی حمل زغال انتخاب شده و داده‌های خرابی و تعمیر مربوط به یک سال عملکرد معدن جمع‌آوری شده و با استفاده از روش آماری تحلیل‌ها صورت گرفته است [۸۳].

**الچلبی<sup>۵</sup> سال ۲۰۱۴:** در رساله دکتری خود با تحلیل‌های آماری، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر دستگاه‌های چال‌زن (جامبو) را مدل‌سازی و زمان بهینه تعویض قطعات دستگاه را تعیین نمود [۸۵].

<sup>1</sup> . Mouli

<sup>2</sup> . Kaplan-Meir Estimation

<sup>3</sup> . Vayens & Peng

<sup>4</sup> . Furuly

<sup>5</sup> . Al-Chalabi

گولباشی و دمیرل<sup>۱</sup> سال ۲۰۱۴: با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل روند و همچنین فرآیند پواسن همگن و ناهمگن، زمان فرسودگی ماشین آلات معدنی و برنامه تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه را پیش‌بینی کردند [۸۵].

منیری و همکاران سال ۲۰۱۴: قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان به‌منظور بهبود بهره‌روی کامیون‌ها در معدن مس سونگون را تحلیل و مدل‌سازی کردند. در این تحقیق از اطلاعات خرابی و تعمیر ۱۰ دستگاه کامیون در مدت زمان یک سال استفاده شده و کامیون به ۶ زیرسیستم اصلی تقسیم شده است. همچنین قابلیت دسترسی کامیون‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شده است [۸۶].

مرشدلو و دهقانی سال ۱۳۹۴: با استفاده از روش آماری قابلیت اطمینان دستگاه ناو زنجیری زرهی در معدن زغال‌سنگ مکانیزه طبس را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق ۴ زیرسیستم شامل زیرسیستم برق، مکانیک، کشش زنجیر و کنترل سرعت در یک شبکه سری برای تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه در نظر گرفته شده است و دوره تعمیرات پیش‌گیرانه مناسب برای هر کدام از زیرسیستم‌ها ارائه شده است [۸۷].

### ۳-۴- مطالعات صورت گرفته در مورد قابلیت اطمینان ماشین حفاری تمام مقطع تونل

تاکنون تنها مطالعه گزارش شده در زمینه قابلیت اطمینان ماشین حفاری تمام مقطع تونل، قابلیت اطمینان ماشین حفاری تونل در بزرگراه تهران - شمال بوده است. در این تحقیق دستگاه به چهار سیستم اصلی شامل سیستم برق، سیستم هیدرلیک، سیستم پنوماتیک و سیستم مکانیکی تقسیم شده و اجزاء هر سیستم مطابق جدول ۳-۱ تا حدودی مشخص شده‌اند [۸۸]. در این تحقیق، تعداد ۴۸ نوع خرابی در زیرسیستم‌های مختلف دستگاه ثبت شده و تأثیر هر خرابی با استفاده از روش تحلیل انواع خرابی و تأثیر آن‌ها (FMEA) مطالعه شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد این روش

<sup>۱</sup> . Gölbaşı & Demirel

تحلیل قابلیت اطمینان یک روش تحلیل کیفی می‌باشد بنابراین هیچ‌گونه تحلیل کمی در مورد قابلیت اطمینان ماشین صورت نگرفته است و محاسبات صورت گرفته در این مطالعه بر اساس تعیین عدد اولویت ریسک<sup>۱</sup> بوده که مقادیر آن برای سیستم‌های ماشین مورد مطالعه مطابق جدول ۳-۲ ارائه شده است [۸۸].

جدول ۳-۱- سیستم‌ها و زیرسیستم‌های TBM [۸۸]

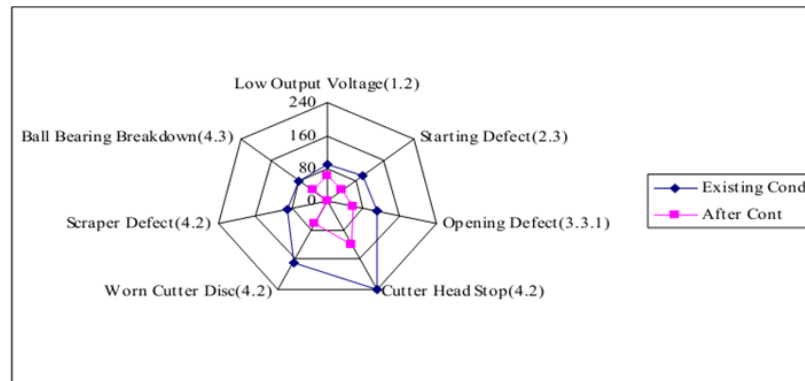
System	Code	Subsystem	Code	Component	Code
Electric System	1	Generator	1.1		
		Transformer	1.2		
		Control Board	1.3		
		Power Board	1.4		
Hydraulic System	2	Reservoir	2.1		
		Piping	2.2		
		Pump	2.3		
		Feeding Pump	2.4		
		Oil Cooler	2.5		
Pneumatic System	3	Compressor	3.1	Filter	3.1.1
		Electromotor	3.2	Outlet Valve	3.1.2
		Air Tank	3.3	Relief Valve	3.3.1
		Air Screw Pump	3.4		
Mechanical System	4	Grab	4.1		
		Cutter Head	4.2		
		Conveyor	4.3		

جدول ۳-۲- اعداد اولویت ریسک برای سیستم‌های TBM [۸۸]

Failure Mode	Existing Condition				After Control			
	Elec	Hydr	Pneu	Mech	Elec	Hydr	Pneu	Mech
Min	9	12	16	48	6	8	3	24
Max	90	96	108	240	60	40	54	120
Average	36	34.4	43.9	100.8	16.5	14.7	17.1	49.7
Standard Deviation	21.4	23.6	24.8	68.2	14.2	12.8	14.6	37.0
N	16	10	14	8	16	10	14	8

مطابق جدول فوق برای سیستم برق دستگاه، ۱۶ خرابی ثبت شده و مقادیر کمترین و بیشترین عدد اولویت ریسک برای خرابی‌های اتفاق افتاده و مقادیر متوسط و انحراف معیار آن‌ها محاسبه شده است. در این مطالعه خرابی‌های با عدد اولویت ریسک بیشتر از ۸۰ به عنوان خرابی‌های غیر قابل قبول و خرابی‌های با عدد اولویت ریسک بیشتر از ۱۰۰ به عنوان خرابی‌های با ریسک خیلی بالا در نظر گرفته شده و با اصلاحات انجام شده و کنترل‌های صورت گرفته، عدد اولویت ریسک‌ها کاهش یافته است. خرابی‌های غیرقابل قبول با عدد اولویت ریسک بیشتر از ۸۰ در شکل ۳-۱۵ ارائه شده است.

<sup>۱</sup>. Risk Priority Number (RPN)



شکل ۳-۱۵ - خرابی‌های غیر قابل قبول ( $RPN > 80$ ) [۸۸]

همچنین خرابی‌هایی که نیاز به بازنگری و طراحی مجدد دارند در این تحقیق بررسی شده است [۸۸]. با توجه به تحقیق فوق که بر روی ماشین حفار در سنگ سخت می‌باشد تعیین سیستم‌های اصلی و زیر سیستم‌های TBM خیلی کلی صورت گرفته است و هیچ مطالعه کمی در حوزه RAM دستگاه صورت نگرفته است.

با توجه به مطالعات و تحقیقاتی که در این فصل به آن‌ها پرداخته شد به وضوح آشکار است که از اوایل قرن بیست و یکم هم‌زمان با پیشرفت تکنولوژی معدن کاری و ماشین‌آلات موجود در معادن و اهمیت شناخت میزان دسترسی ماشین‌آلات به منظور برنامه‌ریزی صحیح عملیات و تخمین هزینه پروژه‌ها و همچنین به دلیل هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات و تجهیزات، مدل‌سازی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری جایگاه ویژه‌ای بین محققان و دست‌اندرکاران مهندسی معدن پیدا کرده است و این مطالعات از رشد چشم‌گیری برخوردار بوده است. به گونه‌ای که تقریباً بیشتر تجهیزات و ماشین‌آلات مهم معدنی مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که از مطالعات و تحقیقات فوق برمی‌آید روش مدل‌سازی آماری پرکاربردترین روش برای تحلیل قابلیت‌های RAM تجهیزات و ماشین‌آلات معدنی بوده است. از این‌رو در رساله حاضر نیز با توجه به مقبولیت بیشتر این روش، از آن برای تحلیل قابلیت‌های RAM ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین استفاده شده است.



## فصل چهارم

**تعیین زیرسیستم‌های EPB – TBM  
و تهیه پایگاه داده**

## ۴-۱- مقدمه

عملکرد مناسب یک سیستم مستلزم عملکرد درست بخش‌های مختلف آن است. از این‌رو اساسی‌ترین مرحله در مطالعه قابلیت‌های RAM هر دستگاه یا سیستم تعیین زیرسیستم‌های عملیاتی آن دستگاه یا سیستم می‌باشد. با تحلیل قابلیت‌های RAM زیرسیستم‌ها، زیرسیستم‌های حساس و بحرانی از لحاظ قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری شناسایی شده و می‌توان با ارائه برنامه منظمی برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیش‌گیرانه قابلیت اطمینان و همچنین با کمک پرسنل مجرب تعمیر و نگهداری قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم‌ها و در نهایت کل سیستم را بهبود بخشید. ماشین حفاری تمام مقطع تونل به‌عنوان یک سیستم و در واقع یک کارخانه تونل‌سازی نیازمند شناخت و مطالعه وسیع ماشین و تعیین زیرسیستم‌های عملیاتی آن می‌باشد تا با مطالعه صحیح رفتار خرابی و تعمیر زیرسیستم‌ها در نهایت بتوان تحلیل مناسبی از عملکرد ماشین ارائه کرد.

در این فصل با مطالعه مشخصات فنی ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز و با مشاوره اساتید مجرب و مهندسان تعمیر و نگهداری پروژه مترو تبریز، زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین تعیین شده و پایگاه داده شامل داده‌های خرابی و تعمیر هر زیرسیستم تهیه شده است. لازم به ذکر است با مطالعه اجمالی مشخصات ماشین‌های سایر شرکت‌های اصلی سازنده TBM از جمله هرکنکشت<sup>۱</sup> آلمان و لوات<sup>۲</sup> کانادا که در ایران مشغول حفاری هستند این تقسیم‌بندی زیرسیستم‌ها برای تمامی ماشین‌های حفاری تونل از نوع تعادل فشار زمین قابل تعمیم است.

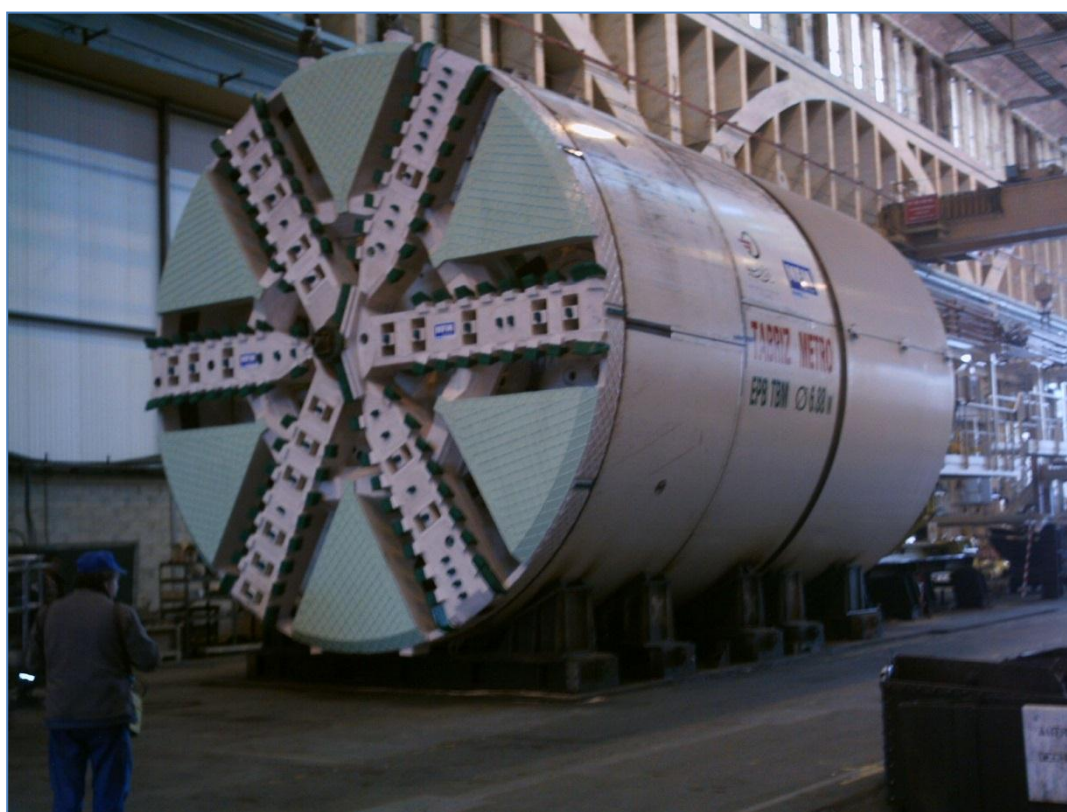
## ۴-۲- ماشین حفار خط یک مترو تبریز و زیرسیستم‌های آن

خط یک مترو تبریز شامل دو تونل دوقلو می‌باشد که توسط دو دستگاه ماشین حفار مشابه و ساخت

<sup>۱</sup> . Herrenknecht

<sup>۲</sup> . Lovat

شرکت گروه صنایع سنگین شمالی<sup>۱</sup> چین (NHI) با تکنولوژی ان اف ام<sup>۲</sup> فرانسه، یکی از شرکت‌های بزرگ سازنده ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل، حفاری می‌شود. در این رساله داده‌های عملیاتی ماشین حفار یکی از تونل‌های خط یک به نام تونل سبلان استفاده شده است که نمایی از آن در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد براساس مطالعات صورت گرفته در مورد روش حفاری خط یک مترو تبریز، روش حفاری مکانیزه و ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین برای این پروژه انتخاب شده است.



شکل ۱-۴- ماشین حفار خط یک مترو تبریز

مشخصات کلی ماشین تونل سبلان که ساخت سال ۲۰۰۷ بوده و از نوع EPB با نام 1331 / 372 / S9 می‌باشد در جدول ۱-۴ آمده است. کلیه اطلاعات در مورد این ماشین از اسناد و کاتالوگ شرکت

<sup>۱</sup> . Northern Heavy Industries Group

<sup>۲</sup> . NFM

سازنده استخراج شده است. ماشین مورد مطالعه دارای طول بیش از ۱۰۰ متر بوده و بخش پشتیبان<sup>۱</sup> آن دارای ۹ تریلر (گنتری<sup>۲</sup>) و دو بخش یا کابین اتصال بین بخش پشتیبان ماشین و قسمت جلویی ماشین می‌باشد.

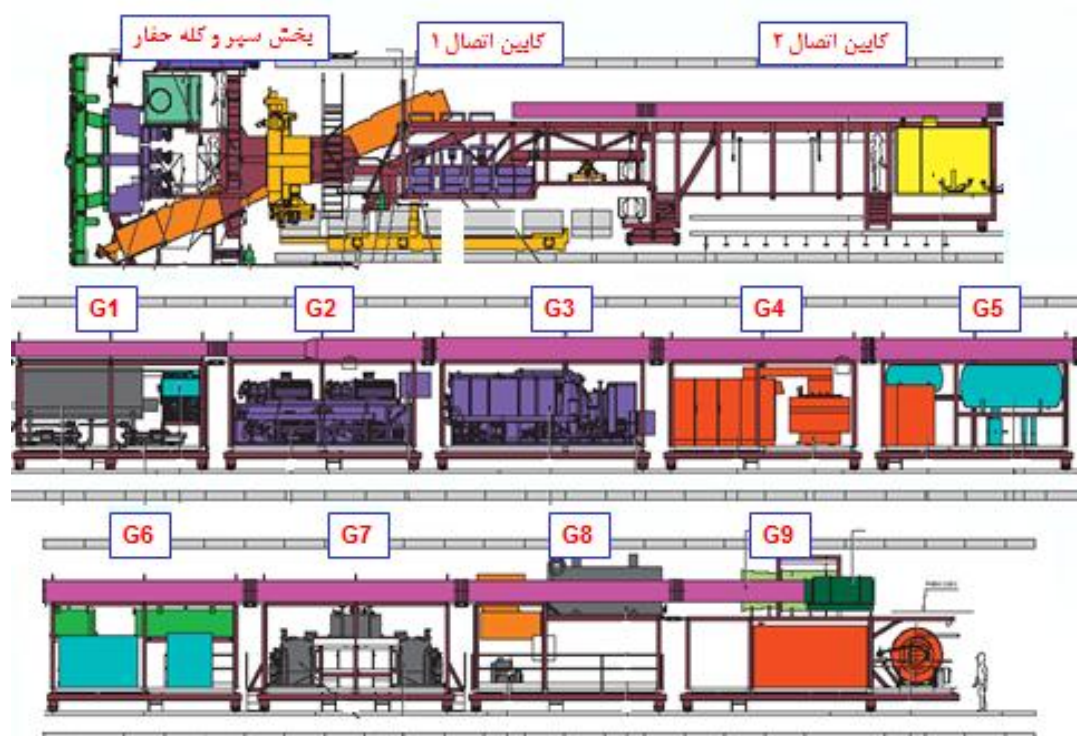
جدول ۴-۱- مشخصات کلی ماشین سبلان [۸۹]

مشخصه ماشین	کمیت
قطر سپر	۶/۸۶ متر
قطر حفاری	۶/۸۸ متر
نیروی محرکه موتورهای کله حفار	۹۴۵ کیلووات
نیروی پیش‌برنده (رانش)	۴۶۰۰۰ کیلو نیوتن
تعداد جک‌های پیش‌ران	۲۲ عدد
سرعت دوران کله حفار	تا ۴ دور در دقیقه
حداکثر گشتاور اسمی در سرعت ۱/۱ دور بر دقیقه	۸۹۶۰ کیلو نیوتن متر
حداکثر گشتاور	۱۱۹۳۰ کیلو نیوتن متر
حداکثر نرخ نفوذ	۸۰ میلیمتر در دقیقه
تیغه‌های برش	۱۴۴ عدد در سه نوع
کل نیروی محرکه مورد نیاز	۲۶۰۰ کیلو ولت آمپر
نیروی محرکه کله حفار	۸ دستگاه هیدروموتور
تعداد حسگر اندازه‌گیری فشار زمین	۵ عدد
تعداد تریل‌های بخش پشتیبانی	۹ دستگاه
تعداد سگمنت در یک حلقه	۳+۲+۱
طول یک حلقه (عرض سگمنت)	۱/۴ متر
وزن یک حلقه	حداکثر ۲۲ تن
ضخامت سگمنت	۳۰ سانتی‌متر
طول شیلد	۱۰ متر
طول دستگاه وسیستم پشتیبانی	۱۰۲/۱ متر
وزن کل	۶۲۰ تن

1. Back up

2. Gantry

کلیه ملزومات و تجهیزات ماشین حفار جهت کندن زمین و پیشروی در مسیر تونل از جمله سیستم آب، سیستم هیدرولیک، سیستم بهسازی خاک، سیستم‌های کنترلی و ایمنی، سیستم تهویه، سیستم توزیع برق و غیره در این قسمت قرار گرفته‌اند. علاوه بر این‌ها بخش جلویی ماشین که قسمت اصلی ماشین بوده و وظیفه حفاری و نصب قطعات بتنی<sup>۱</sup> جهت نصب پوشش نهائی و نگهداری تونل را بر عهده دارد شامل بخش سپر<sup>۲</sup> و کله حفار<sup>۳</sup> می‌باشد. ساختار کلی ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صورت شماتیک در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. از آنجایی که این کارخانه عظیم و متحرک تونل‌سازی شامل قطعات و اجزاء خیلی زیادی می‌باشد در ادامه به قسمت‌های اصلی تشکیل دهنده آن پرداخته شده است.



شکل ۲-۴- نمای شماتیک ساختار ماشین حفار خط یک مترو تبریز [۸۹]

<sup>۱</sup> . Segment  
<sup>۲</sup> . Shield  
<sup>۳</sup> . Cutterhead

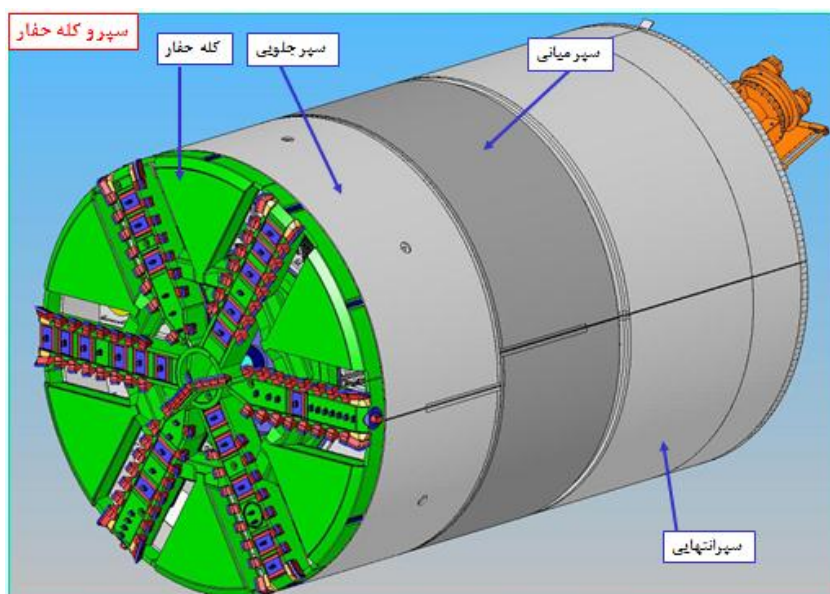
## ۴-۲-۱- ساختار کلی ماشین حفار خط یک مترو تبریز

همان‌طور که اشاره شد ماشین حفار خط یک مترو تبریز از سه بخش اصلی زیر تشکیل شده است:

- بخش سپر و کله حفار
- بخش اتصال
- بخش پشتیبان

## ۴-۲-۱-۱- بخش سپر و کله حفار

ماشین حفار شامل سه سپر جلویی، میانی و انتهایی می‌باشد و در جلوی آن‌ها صفحه حفار قرار گرفته است که با سینه‌کار در تماس می‌باشد. شکل ۴-۳ نمای بسته از این سپرها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳- نمای بسته از سپرهای ماشین حفار [۸۹]

مهم‌ترین قسمت ماشین حفار تمام مقطع صفحه حفار آن است که در جلو دستگاه قرار دارد. این صفحه که عموماً دایره‌ای شکل می‌باشد، حول محور خود که منطبق بر محور ماشین و محور تونل می‌باشد می‌چرخد. کله حفار نزدیک‌ترین قسمت از ماشین حفاری به جبهه کار می‌باشد که در جلوی

سپر جلویی قرار گرفته و به یاتاقان‌های محرک اصلی<sup>۱</sup> وصل می‌شود. بر روی سطح و محیط صفحه حفار ابزارهای برشی و نازل‌های تزریق وجود دارد که به منظور کندن زمین و بهسازی خاک در جبهه کار فراهم شده‌اند. با چرخش صفحه حفار و نیروی پیش‌رانی که توسط جک‌های پیش‌ران به آن وارد می‌شود، کله حفار با زمین درگیر شده و توسط ابزارهای برشی نصب شده بر روی آن که با توجه به شرایط زمین انتخاب می‌شوند، حفاری انجام می‌گردد. مواد حفاری شده به سمت بازشدگی هدایت و از طریق این بازشدگی‌ها به داخل اتاقک حفاری<sup>۲</sup> منتقل می‌شوند تا توسط آماده‌سازها (ترکیبات آب، فوم، پلیمر و بنتونیت) و همزن‌ها به دوغاب خمیری تبدیل شده و از طریق ناله حلزونی<sup>۳</sup> تخلیه گردند. از آنجائی که قبل از حفر جبهه کار تونل، زمین بایستی برای رسیدن به شرایط مورد نظر آماده گردد نازل‌های تزریق نصب شده در سطح صفحه حفار، آماده سازهای مناسب را جهت بهسازی و پایداری خاک به آن اضافه می‌کنند. ابزارهای برشی قابل تعویض بر روی صفحه حفار که وظیفه کندن و جمع کردن خاک را برعهده دارند شامل موارد زیر می‌باشند:

- خراش دهنده<sup>۴</sup> (جاروبک): ۹۸ عدد
- رنده<sup>۵</sup> (ناخن): ۲۴ عدد
- تیغه برنده<sup>۶</sup> (دیسک برنده): ۲۲ عدد
- جاروبک انتهایی<sup>۷</sup>: ۱۲ عدد

این اجزاء در شکل ۴-۴ نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل صفحه حفار شامل شش بازو می‌باشد و در انتهای هر کدام از بازوها دو عدد جاروبک (که عملکرد آن‌ها شبیه به اسکرپر می‌باشد) تعبیه شده

---

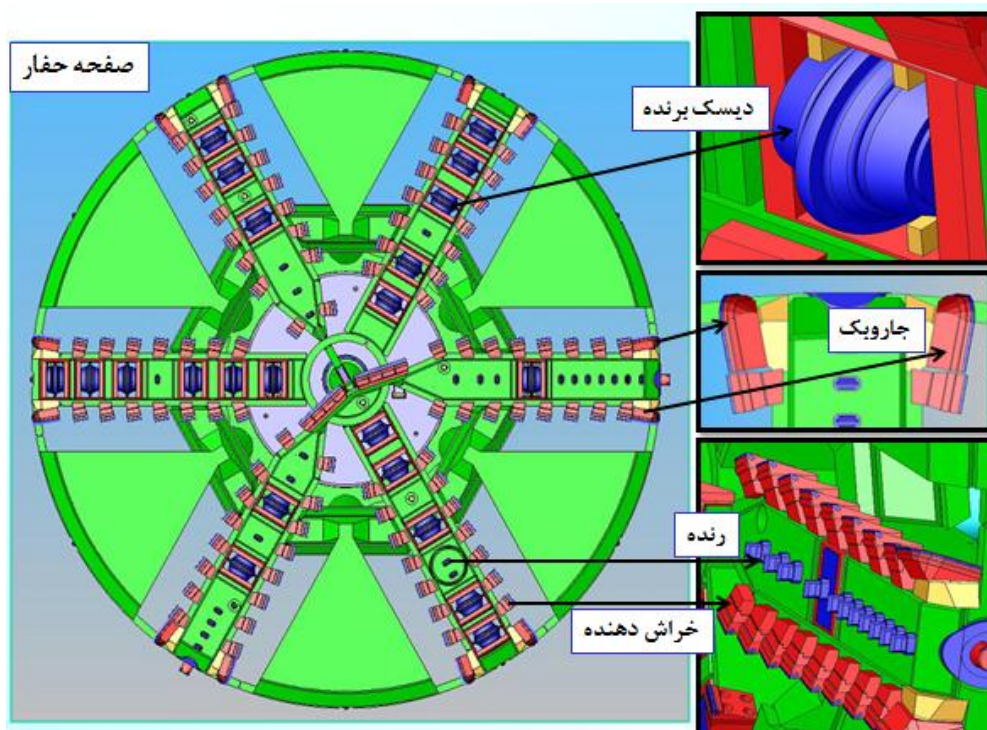
1. Main drive  
 2. Chamber  
 3. Screw conveyor  
 4. Scrapper  
 5. Ripper  
 6. Cutter disk  
 7. Peripheral bucket tool



که علاوه بر خراش دادن جبهه کار وظیفه جمع‌آوری و هدایت خاک‌های کنده شده به فضاهای خالی روی صفحه حفار و سپس اتاقک حفاری<sup>۱</sup> را دارد.

بخش سپر ماشین شامل سه سپر است نقش سپر جلوئی، نگه داشتن صفحه حفار و انتقال نیروی محرکه لازم جهت چرخش آن، اتصال به سپر میانی و جهت دادن به صفحه حفار در مسیر حفاری تونل می‌باشد. اتصال سپرهای میانی و انتهایی از نوع مفصلی است و امکان چرخش ماشین در قوس‌ها را فراهم می‌کند. قسمت‌های اصلی تشکیل دهنده بخش سپر این ماشین حفار چنان که در شکل ۴-۵ نشان داده است شامل

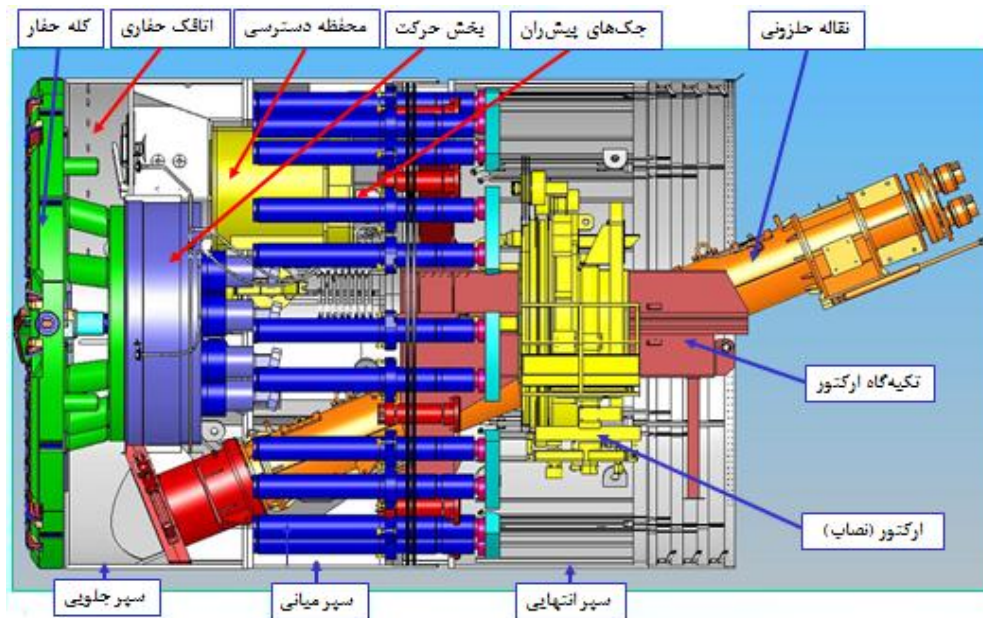
اتاقک (محرک اصلی)، جک‌های پیش‌ران و نقاله حلزونی می‌باشد.



شکل ۴-۴- صفحه حفار و اجزای برشی آن [۸۹]

<sup>۱</sup>. Chamber



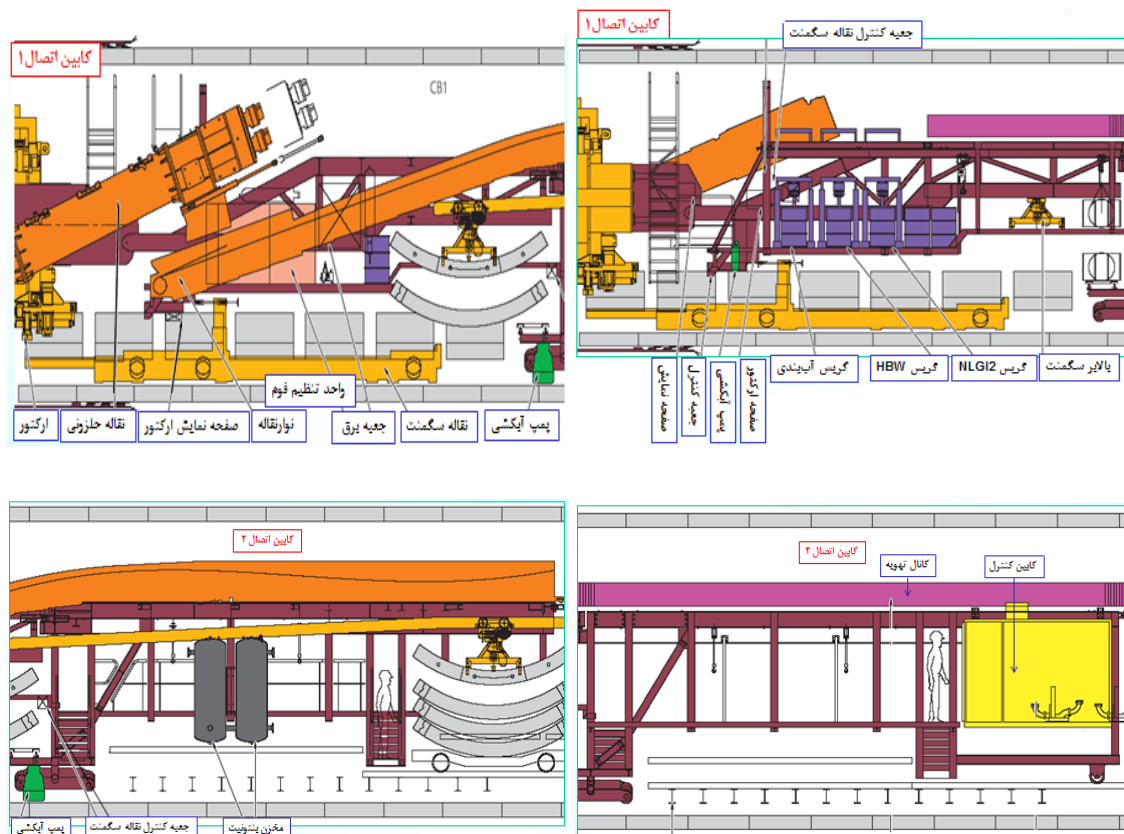


شکل ۴-۵- اجزای اصلی بخش سپر ماشین حفار [۸۹]

#### ۴-۲-۱-۲- بخش اتصال

این بخش در واقع اتصال دهنده بخش جلویی ماشین (سپر و کله حفار) و بخش پشتیبان ماشین<sup>۱</sup> می‌باشد و شامل دو تریلر یا کابین اتصال می‌باشد که در شکل ۴ - ۶ اجزاء و واحدهای اصلی آن آورده شده است. مصالح حفاری از داخل اتاقک حفاری به وسیله نقاله حلزونی به روی نوار نقاله که از کابین اتصال ۱ شروع می‌شود منتقل شده و از آنجا به انتهای سیستم پشتیبان هدایت می‌شود. اجزای اصلی این بخش شامل واحد تهیه و تنظیم فوم، تحویل گرفتن قطعات بتنی از نقاله مخصوص توسط جرثقیل و ریل حمل قطعات بتنی و تحویل آن‌ها به بازوی نصاب، جعبه کنترل نقاله حمل قطعات بتنی، نوار نقاله، پمپ آبکشی (جهت جمع‌آوری آب‌های ریخته شده در کف بخش اتصال، جعبه برق، دوربین‌های نمایش وضعیت و مونی‌تورینگ نقاله حلزونی و نصب قطعات بتنی، کابین کنترل و هدایت ماشین و عملیات حفاری، راهروهای دسترسی به سپرها و کابین کنترل، سیستم روشنایی و تهویه و انواع مختلف گریس مورد استفاده جهت گریس‌کاری و آب‌بندی می‌باشد.

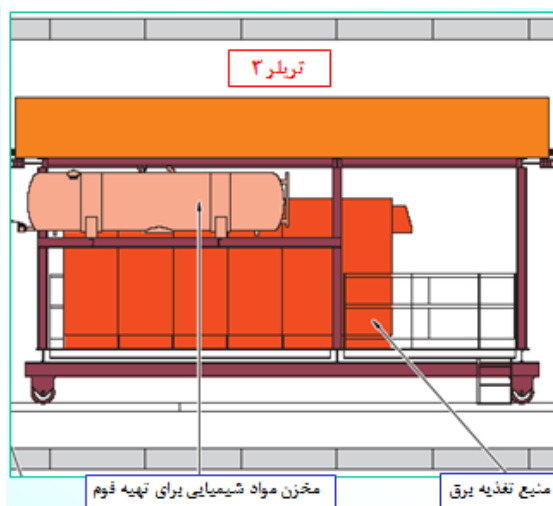
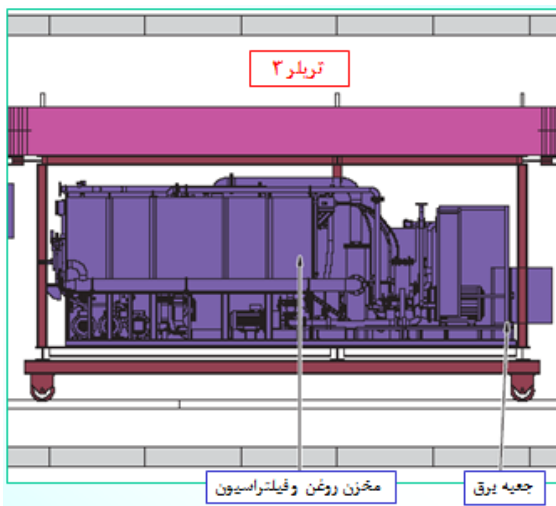
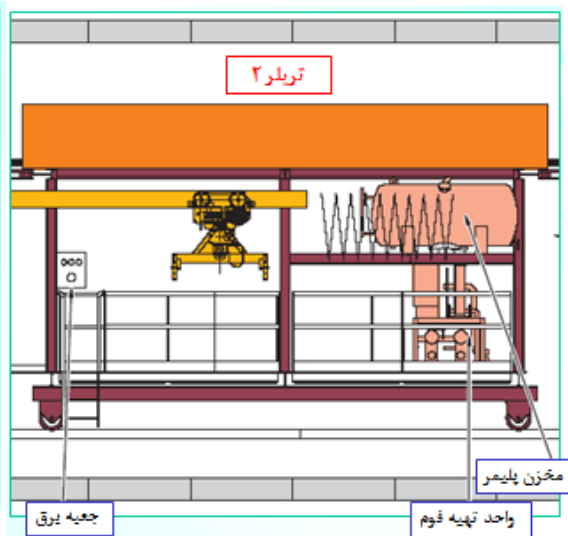
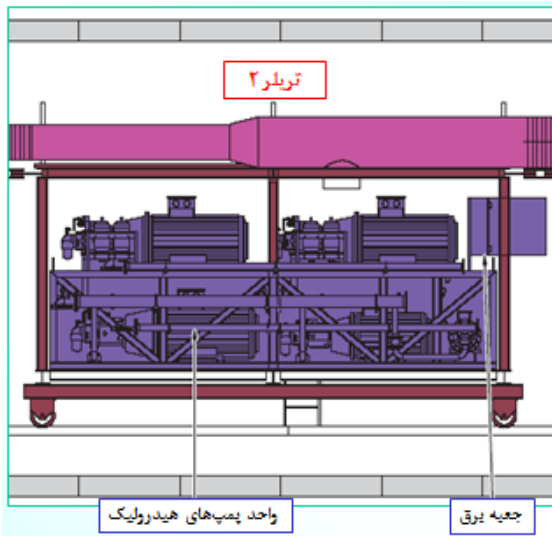
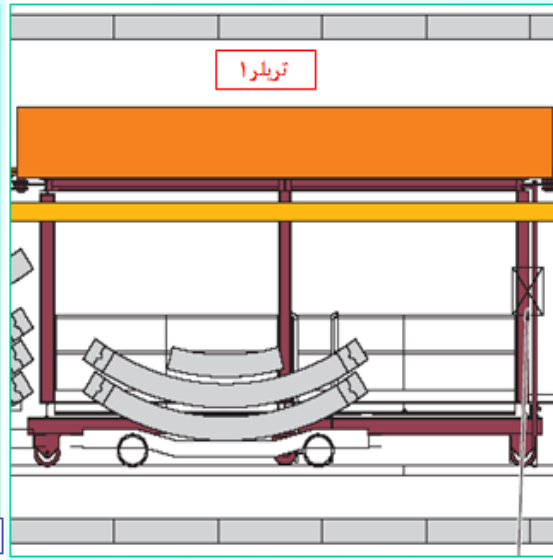
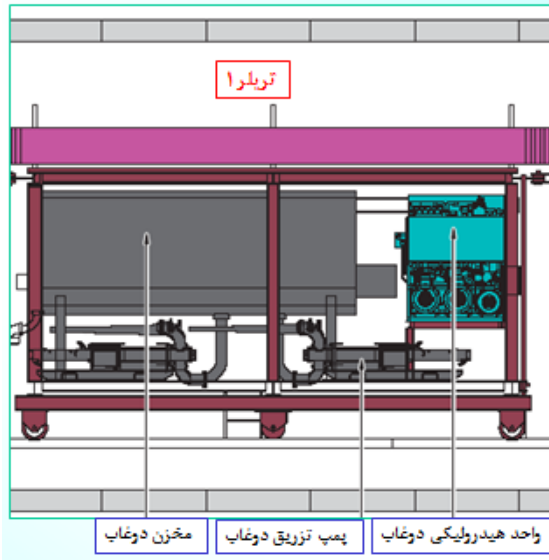
<sup>۱</sup> . Back up

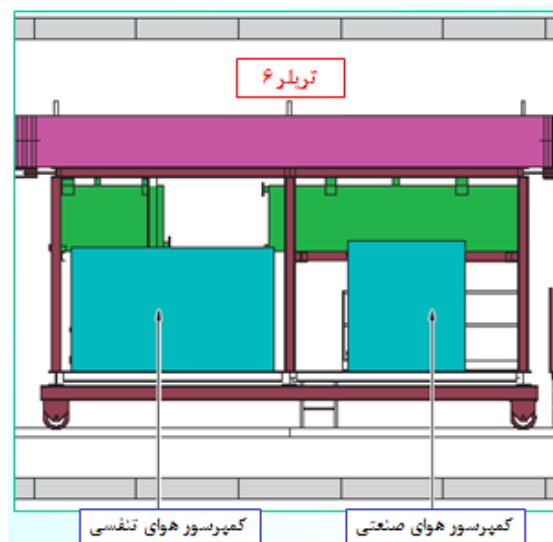
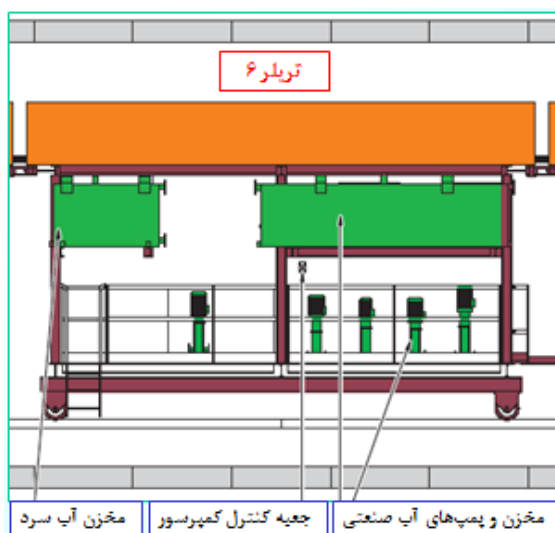
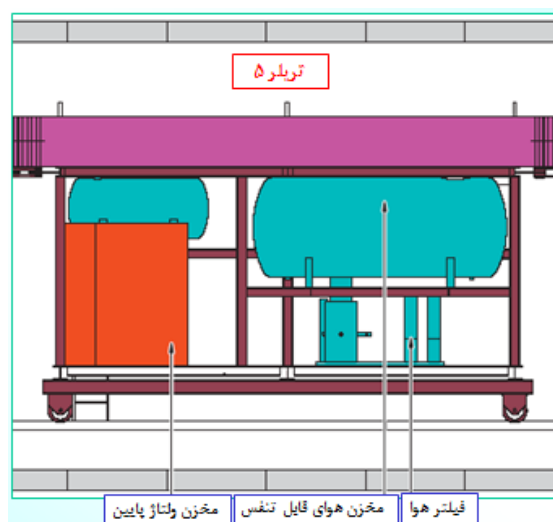
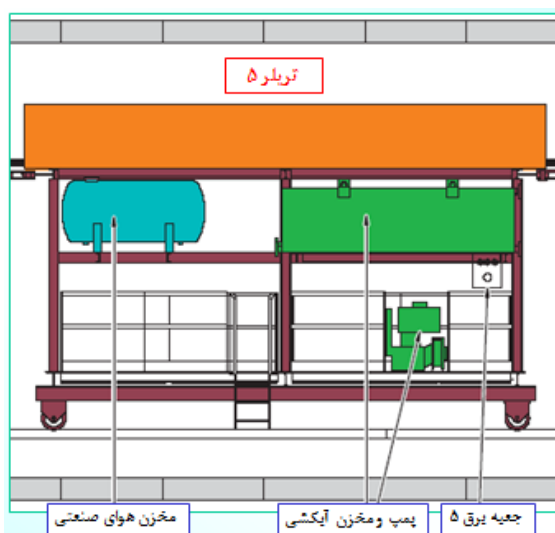
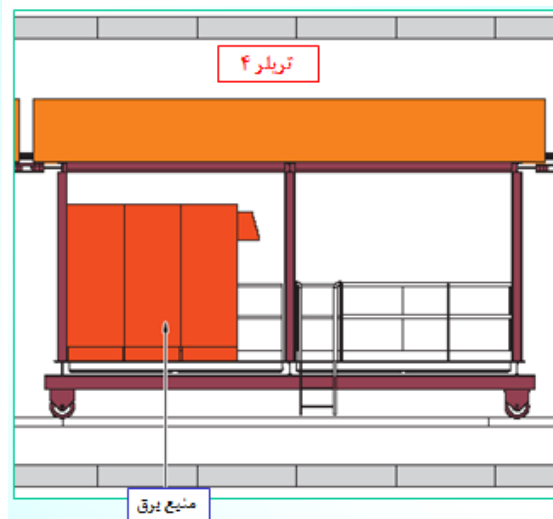
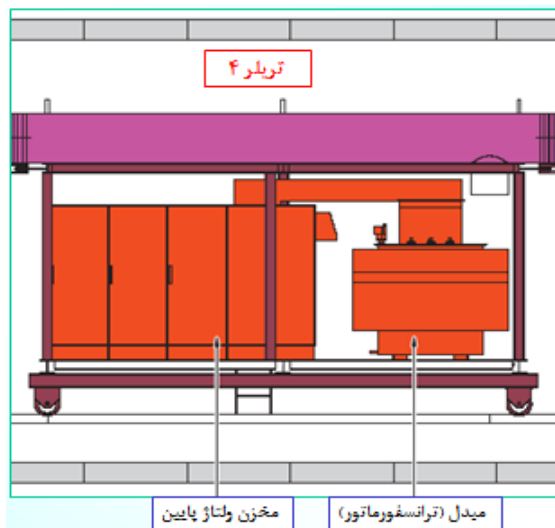


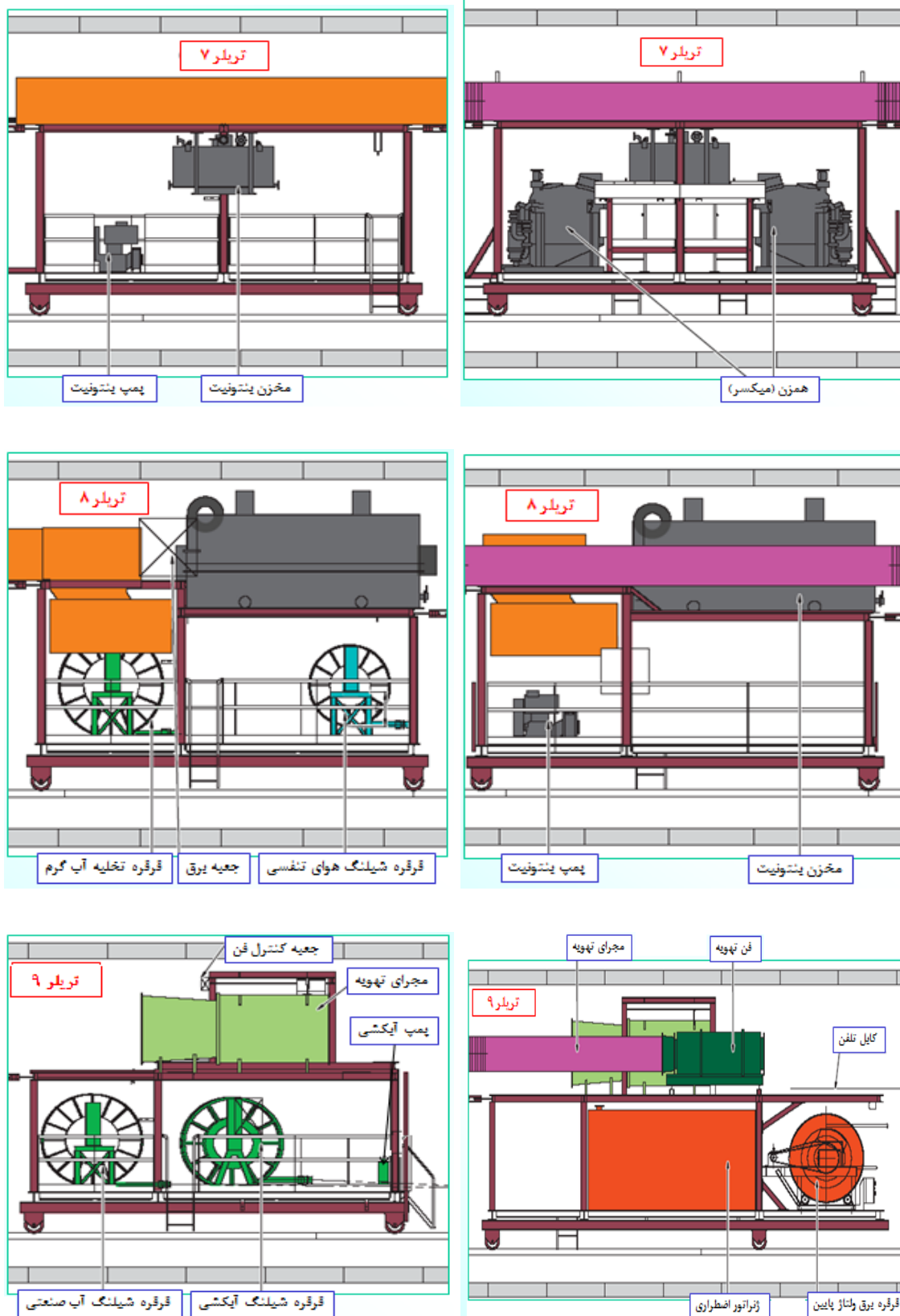
شکل ۴-۶- اجزای اصلی بخش اتصال ماشین حفار [۸۹]

#### ۴-۲-۱-۳- بخش پشتیبان

بخش پشتیبان ماشین حفار متشکل از ۹ تریلر می‌باشد که گنتری نامیده می‌شوند. در این بخش سیستم‌های پشتیبانی از عملیات حفاری و پیشروی واقع شده است. در سمت چپ قسمت بالا، نوار نقاله جهت انتقال و تخلیه مصالح نصب شده است و سایر تجهیزات از جمله سیستم‌های هیدرولیک، آب، برق، روشنایی، کنترلی، ایمنی، تهویه و ... به تفکیک در تریلرها قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها از طریق کابل، شیلنگ و لوله به همراه اتصالات با عملگرهای ماشین حفار در ارتباط می‌باشند. قطعات و سیستم‌های نصب شده در داخل تریلرهای ۱ تا ۹ به تفکیک محل نصب در تریلر، با توجه به عملکرد آن‌ها در شکل ۴-۷ آورده شده است.



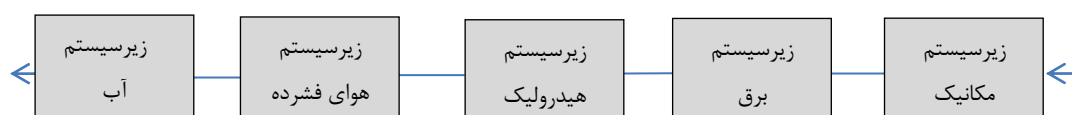




۷-۴- اجزای اصلی تعبیه شده در بخش پشتیبان ماشین حفار [۸۹]

#### ۴-۳- تعیین زیرسیستم‌های ماشین حفار و داده‌های خرابی و تعمیر آن

با مطالعه ساختار و عملکرد ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز زیرسیستم‌های زیر برای ماشین در نظر گرفته شد. از آن جایی که خرابی در هر زیرسیستم باعث توقف ماشین و عملیات حفاری می‌شود بنابراین این زیرسیستم‌ها به صورت یک شبکه سری مطابق شکل ۴-۸ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۴-۸- زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز

مهم‌ترین مرحله انجام این رساله تهیه یک پایگاه داده جامع می‌باشد که کلیه اطلاعات خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته ماشین حفار را شامل شود. برای این منظور گزارش‌های عملیاتی ماشین حفار تونل سبلان خط یک مترو تبریز اعم از گزارش روزانه عملیات حفاری، گزارش‌های گروه تعمیر و نگهداری و گزارش اپراتور ماشین حفار از مورخه ۸۸/۵/۲۵ لغایت ۹۰/۷/۶ جمع‌آوری شده و به دقت مورد مطالعه قرار گرفت. بدین ترتیب کلیه توقف‌های عملیات حفاری که دلیل آن ماشین حفار بوده است استخراج گردیده و سپس این داده‌ها در زیرسیستم مربوطه در نظر گرفته شده و به ترتیب وقوع زمانی طبقه‌بندی شده‌اند. با معلوم شدن داده‌های هر زیرسیستم، TBF و TTR زیرسیستم‌ها محاسبه شده است که این داده‌ها پایه و اساس تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری می‌باشد. در ادامه اجزای اصلی هر زیرسیستم که خرابی آن در زیرسیستم مربوطه ثبت شده آورده شده است.

#### ۴-۳-۱- زیرسیستم مکانیک

کلیه خرابی‌های مکانیکی قطعات و اجزای ماشین از قبیل شکستگی، لب‌پر شدگی و سائیدگی ابزار برشی کله حفار (خراشنده‌ها، ناخن‌ها، دیسک‌های برنده و جاروبک‌ها) و سایر قطعات، ترکیدگی لوله

فوم و مشکلات سیستم تزریق فوم، سیستم تریق بنتونیت، مشکلات مکانیکی نقاله حلزونی، نوار نقاله، نصاب قطعات بتنی و اجزای آن، مشکلات مکانیکی جک‌های پیش‌ران و سیلندرهای مفصلی، گرفتگی لوله‌های گریس، آچارکشی ماشین، تمیزکاری و شستشوی قسمت‌های مختلف ماشین به‌ویژه تمیزکاری سپر انتهایی ماشین در زیرسیستم مکانیک ماشین حفار ثبت شده‌اند. این زیرسیستم بیشترین تعداد خرابی و بیشترین زمان تعمیر در بین سایر زیرسیستم‌ها را دارا می‌باشد. مطابق پایگاه داده ثبت شده در این رساله، ۱۲۸ مورد خرابی و تعمیر مربوط به زیرسیستم مکانیک می‌باشد. با توجه به بالا بودن میزان خرابی‌ها، داده‌های زیرسیستم مکانیک برای دو قسمت بدنه ماشین (شامل بخش سپر و کله حفار) و قسمت پشتیبان (شامل بخش اتصال و ۹ تریلر بخش پشتیبان) به‌طور مجزا در نظر گرفته شده‌اند تا قطعات بحرانی از نظر قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و تعمیر و نگهداری در هر بخش شناسایی شوند و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دقیق‌تر صورت گیرد. داده‌های مربوط به علت خرابی و زمان‌های TBF و TTR زیرسیستم مکانیکی ماشین حفار برای بخش بدنه و بخش پشتیبان ماشین به ترتیب مطابق جداول ۲-۴ و ۳-۴ می‌باشد.

جدول ۲-۴- داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۱	تعویض ابزارهای برشی (جاروبک‌ها و خراش‌دهنده‌ها)	11.67	18.5
۲	تعویض ۴۲ عدد خراش‌دهنده از بازوهای کله حفار	31.83	11.17
۳	بریدن پیچ‌های همزن داخل اتاقک حفاری و تعمیر آن	0.67	2.83
۴	کنده شدن همزن اتاقک حفاری	1.5	5.84
۵	تعویض ۲۴ عدد خراش‌دهنده و نصب همزن بریده شده اتاقک حفاری	35.5	9.67
۶	تخلیه اتاقک حفاری و بازدید ابزارهای برشی	6.17	5.67
۷	برش‌کاری و جوش‌کاری ناخن‌ها و جاروبک‌ها، تعویض خراش‌دهنده‌ها	132.17	2.17

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۸	تخلیه اتاقک حفاری و تعویض ۵۴ عدد خراش دهنده از بازوهای کله حفار	25.83	59
۹	تخلیه اتاقک حفاری و بازدید ابزارهای برشی	2.17	55.5
۱۰	تعویض ۶۶ عدد خراش دهنده از بازوهای کله حفار، تعویض جاروبک‌ها	33	20.17
۱۱	تمیزکاری سپر انتهایی	1.17	2
۱۲	تعویض ۱۴ عدد خراش دهنده	5.33	40.5
۱۳	تخلیه اتاقک حفاری، بازدید خطوط فوم	1.83	20.83
۱۴	تخلیه اتاقک حفاری، تعویض ۸۲ عدد خراش دهنده، تعویض ۲۶ عدد دیسک برنده، تمیزکاری ۴ عدد دیسک برنده، تعویض ۱۲ عدد جاروبک	70.33	56.5
۱۵	نقص فنی جک‌های پیش‌ران	1	93.5
۱۶	بازدید ابزارهای برشی کله حفار، تعویض خراش دهنده‌ها	13	8.17
۱۷	تخلیه اتاقک حفاری و تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها، برش‌کاری جاروبک‌های شماره ۱ تا ۹ کله حفار	72.83	41.17
۱۸	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها، برش‌کاری و جوش‌کاری ناخن‌ها، مشکل سنسور EPB	247.67	257
۱۹	تمیزکاری سپر انتهایی	0.5	50.17
۲۰	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها	42.83	55.67
۲۱	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها	50.83	110.83
۲۲	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها، برش‌کاری و جوش‌کاری ناخن‌ها، و دمونتاز و مونتاز تیغه تمیزکننده نوار نقاله و نقاله سگمنت	176.5	93.33
۲۳	تعویض خراش دهنده‌ها از بازوهای کله حفار، تعویض جاروبک‌ها	7.17	75.33
۲۴	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها و آزمایش خطوط فوم دستگاه	41.33	21
۲۵	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها و آزمایش خطوط فوم دستگاه	29.33	122.67



شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۲۶	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها، برش کاری و جوش کاری ناخن‌ها	124.67	107.17
۲۷	نقص فنی نقاله حلزونی	1.67	58.17
۲۸	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها	9.83	46.83
۲۹	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها	47.5	20.33
۳۰	تعویض خراش دهنده‌ها	8.4	96.67
۳۱	تعویض خراش دهنده‌ها، جاروبک‌ها، تمیزکاری سپر دستگاه	43.33	59.17
۳۲	گرفتگی نقاله حلزونی	1.17	20.33
۳۳	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها، جوش کاری و برش کاری ناخن‌ها، گریس کاری دستگاه، شستشوی دستگاه، دمونتاز، سرویس و مونتاژ نقاله سگمنت	287.33	95.5
۳۴	تعویض خراش دهنده‌ها	22.4	33.17
۳۵	تمیزکاری سپر انتهایی	0.33	56.33
۳۶	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها	35	10.17
۳۷	تمیزکاری سپر انتهایی	1	0.5
۳۸	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها	29.83	71.17
۳۹	تعویض خراش دهنده‌ها، تمیزکاری محفظه دسترسی و سپر انتهایی	13.33	66
۴۰	تمیزکاری سپر انتهایی	0.5	12.17
۴۱	تمیزکاری سپر انتهایی	1.17	13.83
۴۲	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها، دمونتاز و مونتاژ نقاله سگمنت	52	134.83
۴۳	تعویض خراش دهنده‌ها، جوش کاری خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها	75	143.67
۴۴	آچارکشی، تعویض و جوش کاری خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها، مشکل حس گرهای سنسور EPB	162.17	84.33

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۴۵	تعویض خراش دهنده‌ها، جوش کاری و برش کاری خراش دهنده‌ها	159.5	151.83
۴۶	تعویض خراش دهنده‌ها و جاروبک‌ها، تمیزکاری نوار نقاله، تمیزکاری و شستشوی راهروهای دستگاه، رفع مشکل سیلندرهای مفصلی	114.1	105.49
۴۷	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها	31.5	74.32
۴۸	تعویض خراش دهنده‌ها، جوش کاری خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها	81.2	2.67
۴۹	تعویض خراش دهنده‌ها، تعویض جاروبک‌ها	16.5	45.33

جدول ۴-۳- داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۱	نقص فنی ارکتور	0.5	5.33
۲	تمیزکاری قسمت های مختلف دستگاه	1.5	29.33
۳	نقص فنی ارکتور	1	26.83
۴	خرابی و تعمیر نوار نقاله	1.17	79.17
۵	گرفتگی خط گریس EP2	3.67	18.17
۶	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	0.17	21.83
۷	نقص فنی نوار نقاله	0.33	158
۸	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	0.17	4.83
۹	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	0.17	26.33
۱۰	نقص فنی ارکتور	0.33	11.83
۱۱	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	0.33	8.67
۱۲	نقص فنی نوار نقاله و رفع آن	0.5	26.83
۱۳	نقص فنی ارکتور و رفع آن	0.5	9.5

TBF(h)	TTR(h)	علت خرابی و توقف ماشین	شماره
6.67	0.33	نقص فنی ارکتور و رفع آن	۱۴
14	0.33	نقص فنی سیستم تزریق بنتونیت و رفع آن	۱۵
1	0.33	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	۱۶
4.33	0.67	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	۱۷
2.83	0.33	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	۱۸
8	0.33	نقص فنی ارکتور و رفع آن	۱۹
2.17	2.67	نقص فنی ارکتور و رفع آن	۲۰
1.33	0.33	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	۲۱
6.67	0.17	نقص فنی نوار نقاله و رفع آن	۲۲
9.17	0.17	نقص فنی نوار نقاله و رفع آن	۲۳
232	0.33	نقص فنی نوار نقاله و رفع آن	۲۴
35.83	0.33	نقص فنی سیستم تزریق فوم و رفع آن	۲۵
269.67	0.33	نقص فنی نوار نقاله	۲۶
2.16	0.33	نقص فنی سیستم تزریق گریس HBW	۲۷
32.83	0.33	نقص فنی سیستم تزریق گریس HBW	۲۸
39	0.5	نقص فنی نوار نقاله	۲۹
3.83	0.67	نقص فنی همزن بنتونیت دستگاه و رفع آن	۳۰
40.83	2.33	ترکیدگی لوله گروت‌کار دستگاه	۳۱
15.33	0.5	نقص فنی بالابر سگمنت	۳۲
13.5	1.17	نقص فنی بالابر سگمنت	۳۳
1.17	3.5	تعویض بالابر سگمنت دستگاه	۳۴
61.33	0.67	نقص فنی نوار نقاله	۳۵

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۳۶	مشکل بالابر سگمنت و سقوط سگمنت	1	140.17
۳۷	شکستگی ماش‌روم حین نصب رینگ	10.17	73.33
۳۸	نقص فنی سیستم تزریق فوم	3.17	26.5
۳۹	گیر کردن سنگ روی نوار نقاله	0.33	34.67
۴۰	نقص فنی نقاله سگمنت	0.33	31.83
۴۱	نقص فنی نقاله سگمنت	0.83	32.83
۴۲	تعویض نخ نسوز پمپ بنتونیت	1.33	68.83
۴۳	نقص فنی نقاله سگمنت	1.67	244.51
۴۴	گیر کردن سنگ در قیف انتهایی نوار نقاله دستگاه	0.67	33.67
۴۵	شکستگی در خطوط گریس و رفع آن	7	65.17
۴۶	تمیزکاری قسمت‌های مختلف دستگاه	1.17	25
۴۷	دمونتاژ، گریس‌کاری و مونتاژ نقاله سگمنت، تمیزکاری نوار نقاله	2.5	5.67
۴۸	پاره شدن شیلنگ فوم و تعویض آن	4.5	16.83
۴۹	تعمیر قیف نوار نقاله	2.17	1.33
۵۰	تعمیر قیف نوار نقاله	1.33	1.67
۵۱	تعمیر محافظ نوار نقاله	1.33	13.17
۵۲	جوش‌کاری بر روی ارکتور، تعویض بلبرینگ فن تهویه دستگاه	3	50.83
۵۳	نقص فنی ارکتور دستگاه	0.67	14.17
۵۴	مشکل محافظ‌های کناری نوار نقاله و تعویض آن	1	16.33
۵۵	گرفتگی سیستم تزریق فوم و رفع آن	0.67	24.16
۵۶	نقص فنی سیستم تزریق بنتونیت و رفع آن	1.5	96.17
۵۷	تعمیر محافظ کناری نوار نقاله	1.17	20.67

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۵۸	پاره شدن شیلنگ فوم و تعویض آن	1.67	101.17
۵۹	مشکل گیربکس بالابر سگمنت و رفع آن	4.83	22.5
۶۰	تعویض محافظ کناری نوار نقاله سمت کابین	4.33	15
۶۱	گیرکردن سنگ داخل قیف نوار	0.67	81.17
۶۲	مشکل نوار نقاله	0.83	2
۶۳	مشکل نوار نقاله	1.83	7.33
۶۴	مشکل نوار نقاله	0.5	15.83
۶۵	تعمیر، تمیزکاری و گریس کاری نقاله سگمنت	20	1.67
۶۶	تعویض سیل های نوار نقاله	1.83	6.83
۶۷	مشکل مخزن گروت دستگاه	1	69.33
۶۸	تعویض لنت ترمز گیربکس بالابر سگمنت	2.17	15.5
۶۹	مشکل بالابر سگمنت و رفع آن	2.17	22.83
۷۰	دمونتاژ، گریس کاری و مونتاژ نقاله سگمنت، شستشوی نوار نقاله	4	49.67
۷۱	تعویض محافظ‌های نوار نقاله	1.33	13.83
۷۲	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	0.83	10.67
۷۳	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	0.33	1.33
۷۴	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	1	1
۷۵	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	0.83	3.5
۷۶	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	1	0.83
۷۷	تمیزکاری و شستشوی نوار نقاله	0.5	19.5
۷۸	مشکل نوار نقاله و تعمیر آن	1.33	1.17
۷۹	مشکل نوار نقاله و رفع آن	1.17	3.17

مطابق جداول فوق، بیش از ۷۰ درصد خرابی‌های زیرسیستم مکانیک در قسمت بدنه ماشین مربوط به ابزار برشی کله حفار و حدود ۴۰ درصد خرابی‌های مکانیکی قسمت پشتیبان ماشین مربوط به نوار نقاله می‌باشند. همچنین زمان تعمیرات مربوط به ابزار برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای از زمان تعمیر سایر قطعات بیشتر است.

#### ۴-۳-۲- زیرسیستم برق

برق مورد نیاز دستگاه (11KV) از پست برق تامین می‌گردد و به واسطه کابل‌های مسیر تونل به قرقه کابل در تریلر ۹ و سپس به ترانسفورماتورها وارد می‌شود. در مواقع قطع برق اصلی و شرایط اضطراری، از دیزل ژنراتور که مولد برق می‌باشد جهت موارد خاص استفاده می‌گردد. این ژنراتور که در راهروی سمت چپ تریلی ۹ واقع شده است در حالت معمول خاموش بوده و در مواقع قطع برق اصلی دستگاه، جهت استفاده از مصرف کننده‌های ضروری و روشنایی اضطراری در مدار قرار می‌گیرد. سوخت مصرفی آن گازوئیل بوده و به صورت اتوماتیک و دستی<sup>۱</sup> قابل راه اندازی می‌باشد.

از جمله موارد مهم استفاده از این ژنراتور، در زمان تعویض کابل برق اصلی دستگاه در مسیر تونل می‌باشد. پس از اتمام کابل، با قطع برق و بازکردن اتصالات انتهای کابل، کابل جدید را در مسیر تونل اضافه نموده و سپس کابل متصل به قرقه را جمع می‌کنند. برق مورد نیاز جهت چرخش قرقه به منظور جمع نمودن کابل در زمان قطع برق اصلی، به وسیله این ژنراتور تامین می‌گردد. پس از اتمام تعویض کابل نیز با خاموش کردن ژنراتور، برق اصلی در مدار قرار خواهد گرفت. از دیگر موارد استفاده این ژنراتور، تامین روشنایی تونل در مواقع ضروری و خاموش شدن مهتابی‌های اضطراری (شارژی) می‌باشد.

کلیه توقف‌های ناشی از قطعی یا اتصالات برق در هرقطعه از ماشین در زیرسیستم برق قرار گرفته است و داده‌های این زیرسیستم در جدول ۴-۴ آورده شده است.

<sup>1</sup> Auto / Manual

جدول ۴-۴- داده‌های زیرسیستم برق ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۱	مشکل برقی جک‌های پیش‌ران	2.17	3.83
۲	نقص فنی برق سیستم تزریق فوم	0.33	27.67
۳	کابل کشی برق ۲۰ کیلو ولت دستگاه حفار	5.83	208
۴	وجود نقص در ترموستات مخزن اصلی آب و رفع آن	1.17	26.33
۵	نقص فنی برق سیستم تزریق فوم	1.5	105.83
۶	کابل کشی برق ۲۰ کیلو ولت دستگاه حفار	3.17	53.33
۷	نقص فنی برق سیستم تزریق فوم	0.83	23.5
۸	نقص فنی برقی مانیتورینگ دستگاه	1.17	11.83
۹	نقص فنی سنسور نقاله حلزونی و رفع آن	0.17	25.83
۱۰	مشکل سنسور ارکتور	0.17	15.33
۱۱	مشکل برقی جک‌های پیش‌ران و رفع آن	0.17	55.5
۱۲	نقص فنی برقی کمپرسور صنعتی	0.33	58.83
۱۳	کابل کشی برق ۲۰ کیلو ولت دستگاه حفار و رفع عیب برق مانیتورهای کنترل	4.33	24.67
۱۴	رفع مشکل برقی تابلو برق جک‌های پیش‌ران	0.5	0.67
۱۵	نقص فنی برقی جک‌های پیش‌ران و رفع آن	2.33	24.83
۱۶	مشکل برقی اینورتر پمپ آب برگشتی دستگاه	1	125.33
۱۷	نقص فنی برقی سیستم تزریق فوم	0.33	54.67
۱۸	نقص فنی سنسورهای گریس HBW و EP2	0.33	72
۱۹	نقص فنی برقی جک‌های پیش‌ران و رفع آن	0.67	12.33
۲۰	کابل کشی برق ۲۰ کیلوولت دستگاه حفار	4	39.33

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۲۱	نقص فنی سنسور نوار نقاله	0.33	21.5
۲۲	نقص فنی برقی مانیتورینگ دستگاه	0.67	20.33
۲۳	نقص فنی سنسورهای نقاله سگمنت	0.33	166.33
۲۴	نقص فنی برقی و عدم پیش‌روی دستگاه	0.67	30.5
۲۵	رفع عیب برقی مانیتورینگ دستگاه	0.67	63.83
۲۶	کابل کشی برق ۲۰ کیلوولت دستگاه حفار و رفع عیب سیستم UPS دستگاه (سیستم تأمین برق مانیتورینگ دستگاه)	4.67	90
۲۷	اتصال کابل برق ۲۰ کیلوولت دستگاه	1.83	100.83
۲۸	نقص فنی برقی سیستم تزریق گریس EP2	0.17	3.33
۲۹	عیب یابی و رفع عیب کامپیوتر صنعتی سیستم مانیتورینگ	1	44.67
۳۰	رفع نقص فنی پیش‌روی دستگاه	0.5	113
۳۱	نقص فنی برق دستگاه و رفع آن	1.17	200.5
۳۲	رفع نقص فنی جک‌های پیش‌ران دستگاه	0.33	38.33
۳۳	نقص فنی برقی ارکتور، مشکل ریموت ارکتور	0.83	73.83
۳۴	کابل کشی برق ۲۰ کیلوولت دستگاه	4.33	17.33
۳۵	رفع عیب ریموت کنترل بالابر سگمنت	0.5	5.67
۳۶	نقص فنی سنسور جک‌های پیش‌ران	0.33	113.5
۳۷	مشکل برقی ارکتور	3	23.83
۳۸	مشکل برقی فوم	0.33	246.67



## ۴-۳-۳- زیرسیستم هیدرولیک

به طور کلی نقش یک سیستم هیدرولیکی، تولید، کنترل و انتقال توان است. عملاً تمام مدارهای هیدرولیک بدون توجه به نوع کاربردشان مشابه بوده و هدف آنها نیز انتقال و تبدیل نیرو توسط مایعات می‌باشد. برای نصب و راه اندازی یک سیستم هیدرولیک، ۶ جزء اساسی وجود دارد:

یک مخزن برای نگهداری مایع، یک پمپ برای ایجاد جریان در سیستم، یک موتور الکتریکی یا هر منبع توان دیگر برای راه اندازی پمپ، یک عملگر برای تبدیل انرژی مایع به نیروی مکانیکی، قطعات کنترلی جهت کنترل عملکرد و کارایی سیستم، لوله، شیلنگ و اتصالات جهت انتقال مایع.

در حالت کلی، عملکرد دستگاه TBM تلفیقی از سیستم‌های هیدرولیک و سیستم کنترل گر برقی می‌باشد به طوری که نیروی لازم جهت چرخش صفحه حفار و پیشروی دستگاه، به کمک سیستم هیدرولیک و راه اندازی و کنترل دستگاه نیز توسط سیستم کنترل گر برقی صورت می‌پذیرد.

مدار هیدرولیک این دستگاه شامل یک مخزن روغن (در سمت راست تریلر ۳)، منبع تغذیه انتقال روغن و عملگرهای داخل سپر به همراه لوله، شیلنگ و اتصالات رفت و برگشت روغن می‌باشد. عملگرهای دستگاه شامل سیلندرها (جهت حرکت خطی) و هیدروموتورها (جهت حرکت دورانی) می‌باشند که در سپرها نصب شده‌اند. قطعات کنترلی از جمله انواع مختلف شیر، فیلتر، کولر، حسگر، فشار سنج، سوئیچ و ... با توجه به کاربردشان در سپر، بخش اتصال و تریلرهای بخش پشتیبان نصب شده‌اند و نیز لوله، شیلنگ و اتصالات که رابط بین اجزا و قسمت‌های مختلف می‌باشند به آنها متصل می‌گردند. داده‌های این زیرسیستم مطابق جدول ۴-۵ می‌باشد که شامل کلیه خرابی‌های ناشی از مشکلات هیدرولیکی ماشین و تعمیرات مربوطه می‌باشد.

جدول ۴-۵- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF (h)
۱	نشستی روغن هیدرولیک	0.5	0.5
۲	تزریق روغن به مخزن اصلی هیدرولیک	1.5	37.5
۳	بالا رفتن دمای روغن	0.33	23
۴	تعویض شیر هیدرولیک یکی از جک‌های بالابر ارکتور	1.33	0.33
۵	پایین آمدن سطح روغن مخزن اصلی و تزریق روغن	2	47.83
۶	تزریق روغن هیدرولیک به مخزن اصلی دستگاه	2.83	9.5
۷	افزایش ناگهانی فشار پمپ‌های هیدرولیک	3.5	31
۸	ترکیدن شیلنگ هیدرولیک نقاله سگمنت	2.67	154.5
۹	نقص فنی هیدرولیکی نقاله سگمنت و رفع آن	2.33	6.5
۱۰	نقص فنی فیلتر روغن	0.33	65.17
۱۱	نقص فنی شیلنگ هیدرولیک جک‌های پیش‌ران	0.67	83
۱۲	افت فشار جک‌های پیش‌ران	0.67	198.67
۱۳	نقص فنی فیلتر پمپ هیدرولیکی JZ1200	1.17	38
۱۴	تعویض شیلنگ برگشت روغن هیدرولیک	2.17	15.5
۱۵	تزریق روغن هیدرولیک به مخزن اصلی دستگاه	2.5	0.83
۱۶	نقص فنی جک هیدرولیکی نوار نقاله	0.33	67.5
۱۷	نقص فنی فیلتر پمپ هیدرولیکی JZ1200	0.33	64.83
۱۸	نقص فنی جک‌های پیش‌ران	1.33	101
۱۹	نقص فنی پمپ HZ1100 و رفع آن	1.17	139.83
۲۰	ترکیدن شیلنگ هیدرولیک ارکتور و تعویض آن	1	179.83

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF (h)
۲۱	تعویض شیر پمپ هیدرولیکی ارکتور	6.5	3.5
۲۲	خرابی شیر سه راهی هیدرولیک	0.67	28
۲۳	افت فشار جک‌های پیش‌ران	0.17	76.17
۲۴	تعویض فیلتر پمپ هیدرولیک	0.33	43.33
۲۵	تزریق روغن به مخزن اصلی هیدرولیک دستگاه	0.33	23.33
۲۶	نقص فنی جک‌های پیش‌ران	0.17	39.17
۲۷	نقص فنی جک‌های پیش‌ران	0.33	25.33
۲۸	نقص فنی پمپ خنک کننده هیدرولیک	0.33	30
۲۹	بالا رفتن دمای روغن هیدرولیک	0.17	4.17
۳۰	ترکیدن شیلنگ هیدرولیک ارکتور و تعویض آن	2	39.33
۳۱	تعویض شیلنگ برگشت روغن هیدرولیک	1	60
۳۲	تزریق دو بشکه روغن هیدرولیک به مخزن دستگاه	0.33	0.83
۳۳	بالا رفتن دمای روغن هیدرولیک سیستم تزریق ماشین	0.5	190.33
۳۴	تزریق روغن به مخزن اصلی هیدرولیک	0.17	13.5
۳۵	تعویض روغن هیدروموتورهای شماره ۱ و ۲	1.83	143
۳۶	پاره شدن اورینگ هیدرولیک جک‌های پیش‌ران	1.17	0.67
۳۷	تعویض شیلنگ هیدرولیک ۴ اینچ	0.33	148.67
۳۸	مشکل شیلنگ برگشت روغن هیدرولیک	3.67	30.17
۳۹	مشکل جک‌های پیش‌ران	0.33	16.83
۴۰	تعویض شیر هیدرولیکی جک‌های پیش‌ران	2.1	1.67
۴۱	تزریق روغن هیدرولیک به مخزن اصلی و مشکل جک‌های پیش‌ران	2	82
۴۲	تعویض شیلنگ هیدرولیک مخزن گروت بدلیل نشتی روغن	0.67	100

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF (h)
۴۳	تعویض شیلنگ ۱ اینچ هیدرولیک نقاله سگمنت	3.67	13.33
۴۴	تعویض شیلنگ ۴ اینچ هیدرولیک برگشتی دستگاه به علت پارگی	2	1
۴۵	تعویض شیلنگ هیدرولیک جک‌های بالابر سگمنت	6.33	137.83
۴۶	مشکل شیلنگ هیدرولیک جک‌های بالابر سگمنت و رفع آن	0.5	32.83
۴۷	مشکل جک‌های پیش‌ران ۱، ۲، ۳ و ۱۱ و رفع آن	6	15

#### ۴-۳-۴- زیرسیستم هوای فشرده

این زیرسیستم شامل تجهیزات مربوط به هوای فشرده، فیلترهای هوا، تهویه و شیرهای تنظیم و ایمنی هوای فشرده در ماشین حفار می‌باشد. از جمله موارد کاربرد هوای فشرده در دستگاه، در ترکیب با بنتونیت و تزریق آن، راه اندازی پمپ‌های گریس، ترکیب با محلول فوم و تزریق آن، راه اندازی پمپ‌ها و عملگرهای پنوماتیک می‌باشد. مقدار هوای مورد نیاز، توسط سیستم تولید هوای فشرده که شامل دو کمپرسور (یک کمپرسور هوای فشرده (هوای صنعتی) و یک کمپرسور هوای تنفسی) و دو مخزن ذخیره هوای فشرده و هوای تنفسی می‌باشد، تامین می‌گردد. کمپرسورها در تریلر ۶ و مخازن در تریلر ۵ واقع شده‌اند. هوای تولیدی در این دو کمپرسور از طریق شیلنگ، وارد مخزن ذخیره هوا در تریلر ۵ شده و سپس به داخل لوله‌های انتقال هوای فشرده در سقف تریلرها هدایت می‌شوند و از طریق شیلنگ و اتصالات، انشعابات آن‌ها به مصرف‌کننده‌ها متصل می‌گردند. داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفار در خط یک مترو تبریز مطابق جدول ۴-۶ می‌باشد.

جدول ۴-۶- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR(h)	TBF(h)
۱	نشستی هوا از سیستم پنوماتیک	6.33	193.83
۲	تمیزکاری داخل کمپرسورهای هوای صنعتی و تنفسی	4.83	48.67
۳	خرابی پمپ پنوماتیک گریس EP2	10.67	100.33
۴	نقص فنی سیستم هوای فشرده دستگاه	1.67	10
۵	تعویض فنرهای شیرفلکه پنوماتیک فوم	2.5	102.67
۶	نقص فنی پمپ گریس EP2	1.17	17.33
۷	تعویض پمپ گریس ماستیک و تعویض فنرهای شیرهای پنوماتیک فوم	3.5	322.33
۸	نقص فنی پمپ گریس EP2	1	25
۹	دمونتاژ پمپ ماستیک جهت تعویض مجموعه‌های آن	2	67.83
۱۰	تعویض فنرهای شیرفلکه پنوماتیک فوم	2.5	182.17
۱۱	تعویض پکینگ پمپ ماستیک	2	208.67
۱۲	نقص فنی پمپ ماستیک	3.17	32.17
۱۳	تعویض فنرهای شیرهای پنوماتیک خطوط ۶ و ۸ سیستم تزریق فوم	3.33	70.17
۱۴	تعمیر پمپ ماستیک و پمپ HBW - کنترل و رفع نقص فنی خطوط هوای تنفسی اتاقک حفاری و تخلیه هوای اتاقک حفاری و خطوط تزریق بنتونیت	9.5	145.67
۱۵	دمونتاژ، تعویض مجموعه و مونتاژ پمپ گریس HBW	0.83	179.67
۱۶	تعمیر پمپ گریس HBW	0.5	43
۱۷	نقص فنی پمپ ماستیک و خطوط آن - نقص فنی پمپ گریس EP2	5.17	19
۱۸	تعویض مجموعه‌های پمپ گریس HBW - تعویض فنرها و مجموعه‌های شیرهای هوای فشرده سیستم تزریق فوم	2.33	96.17

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF(h)
شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF(h)
۱۹	رفع عیب پمپ تزریق ماستیک (تعویض مجموعه)	2.17	98.67
۲۰	مشکل پنوماتیک پمپ ماستیک	0.5	187
۲۱	خرابی شیرهای پنوماتیک سیستم فوم	0.5	58.5
۲۲	تعویض پکینگ های پمپ ماستیک	2.17	96.83
۲۳	مشکل پمپ گریس ماستیک	1.5	179
۲۴	مشکل پمپ ماستیک - دمونتاژ پمپ ماستیک و تعویض مجموعه آن و مونتاژ	1.33	63.83

#### ۴-۳-۵- زیرسیستم آب

جهت تأمین آب مورد نیاز ماشین در خنک‌کاری موتورها، سیستم‌های تزریق، شستشو و تمیزکاری از این سیستم استفاده می‌گردد. آب مورد نیاز دستگاه پس از عبور از فیلتر، وارد مجموعه پمپ‌های آب تونل می‌گردد و از طریق لوله‌های نصب شده در مسیر تونل به قرقه آب در انتهای دستگاه (تریلر ۹) ارسال می‌شود. آب ورودی پس از عبور از فیلترهای آب وارد مخزن ذخیره آب که در راهروی سمت چپ تریلر ۶ واقع شده است، می‌شود و به کمک پمپ‌ها، لوله‌ها و شیلنگ‌ها به مصرف‌کننده‌ها ارسال می‌گردد.

لوله‌های نصب شده در سقف تریلرهای بخش پشتیبان جهت انتقال آب، هوای فشرده، هوای قابل تنفس، روغن و بنتونیت می‌باشند که از طریق شیلنگ‌ها و اتصالات به مصرف‌کننده‌ها وصل می‌شوند. این لوله‌ها با رنگ‌های متفاوت از یکدیگر قابل تشخیص می‌باشند. لوله‌های آب شامل لوله‌ی آب سرد (رفت)، لوله‌ی آب گرم (برگشت) جهت خنک‌کاری و لوله‌ی آب سرویس (آب صنعتی) می‌باشند. آب خنک‌کاری به صورت رفت و برگشتی می‌باشد که جهت خنک‌کاری منبع تغذیه‌ها مورد استفاده قرار

می‌گیرد. یک انشعاب نیز آب مصرفی در سیستم تزریق فوم را تأمین می‌کند. از لوله آب سرویس در سقف تریلرها، انشعابات به سیستم تزریق دوغاب جهت تمیزکاری لوله‌های تزریق متصل شده است. از این لوله در هر تریلر نیز یک لوله‌ی یک اینچ منشعب می‌شود که جهت تمیزکاری و شستشو می‌باشد. برای سیستم خنک کاری، دو پمپ و برای سیستم شستشو، یک پمپ به صورت مستقل از هم در جلوی مخزن آب نصب شده‌اند که از زیر مخزن دارای ورودی جداگانه‌ای می‌باشند. یک مخزن نیز جهت جمع‌آوری آب‌های شستشو و ریخته شده در کف در قسمت بالای راهروی سمت راست تریلر ۵ تعبیه شده است. داده‌های مربوط به زیرسیستم آب ماشین در جدول ۴ - ۷ آورده شده است.

جدول ۴-۷- داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم آب ماشین حفار

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF (h)
۱	توقف به دلیل مشکل سیستم آب دستگاه	0.5	39
۲	توقف به دلیل مشکل سیستم آب دستگاه	0.67	18.67
۳	تخلیه و تمیزکاری مخزن آبکشی	1.5	177.83
۴	ترکیدن لوله آب ورودی دستگاه و رفع آن	0.33	11
۵	نقص فنی آب ورودی دستگاه و رفع آن	0.17	93.17
۶	توقف به دلیل مشکل سیستم آب دستگاه	0.33	109.67
۷	تخلیه و تمیزکاری مخزن آبکشی	1.5	125.17
۸	تعویض شیر فلکه آب دستگاه	0.33	107
۹	لوله گذاری مسیر آب اصلی دستگاه	0.5	95.17
۱۰	ترکیدن لوله آب برگشتی دستگاه و تعویض آن	0.33	77
۱۱	مشکل پمپ آبکشی	0.83	209
۱۲	ترکیدن شیلنگ آب فوم و رفع آن	1	59
۱۳	ترکیدن لوله آب ورودی دستگاه و تعویض آن	1.67	171.17

شماره	علت خرابی و توقف ماشین	TTR (h)	TBF (h)
۱۴	مشکل پمپ آبکشی و رفع آن	0.33	117.33
۱۵	نقص فنی پمپ خنک کننده مبدل حرارتی و تعویض آن	0.83	136.67
۱۶	ترکیدن لوله آب اصلی دستگاه و تعویض آن	2.17	64.33
۱۷	تخلیه مخزن آبکشی	0.67	188.5
۱۸	افزایش لوله آب ورودی دستگاه	0.67	127.33
۱۹	مشکل پمپ آبکشی و رفع آن	0.83	125.33
۲۰	تخلیه مخزن آبکشی	0.67	32.33
۲۱	نصب خط ورود آب اتاقک حفاری از محفظه دسترسی	1.17	139.33
۲۲	اصلاح مسیر آب سیستم خنک کننده کمپرسورها	2.5	103.67
۲۳	تخلیه مخزن آبکشی	0.5	120.67

لازم به توضیح است که در جداول داده‌های فوق، TTR زمان صرف شده برای تعمیر و برطرف کردن هر خرابی می‌باشد و TBF مدت زمان فعال بین دو خرابی متوالی در زیرسیستم مورد نظر می‌باشد که زمان فعال ماشین شامل عملیات حفاری و نصب پوشش نگهداری بتنی می‌باشد.

در این فصل ساختار کلی ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز شرح داده شد و زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین تعیین گردید. سپس داده‌های خرابی و تعمیر هر زیرسیستم طبقه‌بندی شده و TBF و TTR هر زیرسیستم محاسبه شد. بدین ترتیب با به‌دست آمدن این مقادیر که اساس و مبنای تحلیل RAM می‌باشند در فصل بعد به تحلیل RAM ماشین مورد مطالعه پرداخته شده است.



## فصل پنجم

تحليل قابليت اطمینان، دسترسى

و تعمیر و نگهدارى EPB - TBM

## ۵-۱- مقدمه

در فصل‌های گذشته کلیات تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری شرح داده شد و ساختار کلی و همین‌طور زیرسیستم‌های عملیاتی ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز ارائه گردید. از آنجایی که خرابی در هر کدام از زیرسیستم‌ها باعث توقف ماشین و عملیات حفاری می‌گردد شبکه سری برای زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شد. در این فصل با معلوم شدن زیرسیستم‌های ماشین و تهیه پایگاه داده، ابتدا تحلیل پارتو برای تعیین فراوانی‌های هر زیرسیستم صورت گرفته و سپس به تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌ها و همچنین کل ماشین مورد مطالعه پرداخته شده است. در نهایت با محاسبه شاخص اهمیت قابلیت دسترسی، میزان اهمیت و تأثیر هر کدام از زیرسیستم‌ها در عملکرد ماشین بررسی شده است.

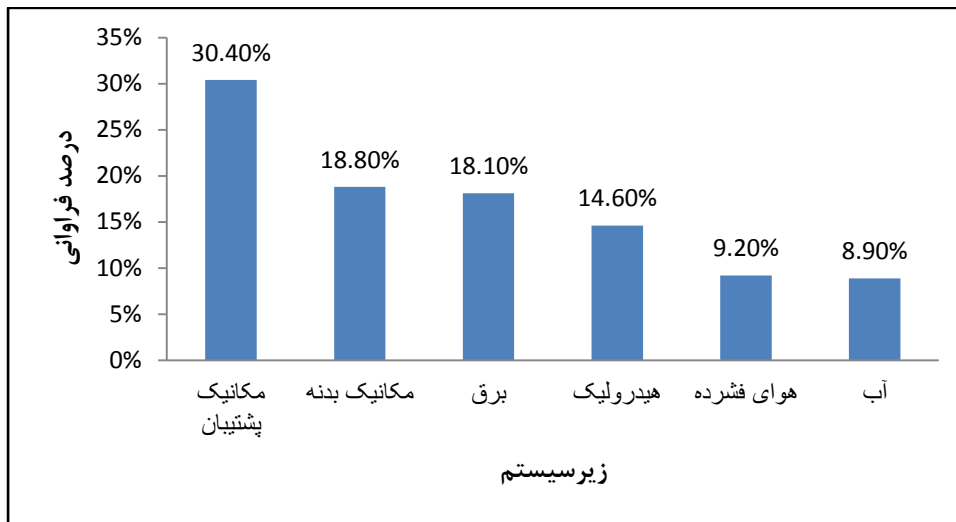
۵-۲- تحلیل پارتو<sup>۱</sup>

برای تعیین میزان نسبی خرابی‌ها یا تعمیرات زیرسیستم‌های یک دستگاه از نمودار تحلیل پارتو استفاده می‌شود. برای این منظور، درصد خرابی یا تعمیر هر زیرسیستم نسبت به کل خرابی‌ها یا تعمیرات محاسبه می‌شود و نمودار ستونی فراوانی خرابی یا تعمیر هر کدام از زیرسیستم‌ها ترسیم می‌گردد و زیرسیستم‌های بحرانی از لحاظ فراوانی خرابی‌ها و تعمیرات مشخص می‌شود تا برای بهبود قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی مناسب تعمیر و نگهداری آن‌ها تمهیدات لازم صورت گیرد.

نتایج تحلیل پارتو نشان می‌دهد که زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین حفار خط یک مترو تبریز دارای بیشترین آمار خرابی و تعمیر بوده و لازم است نسبت به سایر زیرسیستم‌ها از توجه بیشتری برخوردار باشد. همچنین مطابق نمودار ۵-۱ زیرسیستم‌های آب و هوای فشرده عملکرد بهتری نسبت به سایر زیرسیستم‌ها دارند.

---

<sup>۱</sup> . Pareto analysis

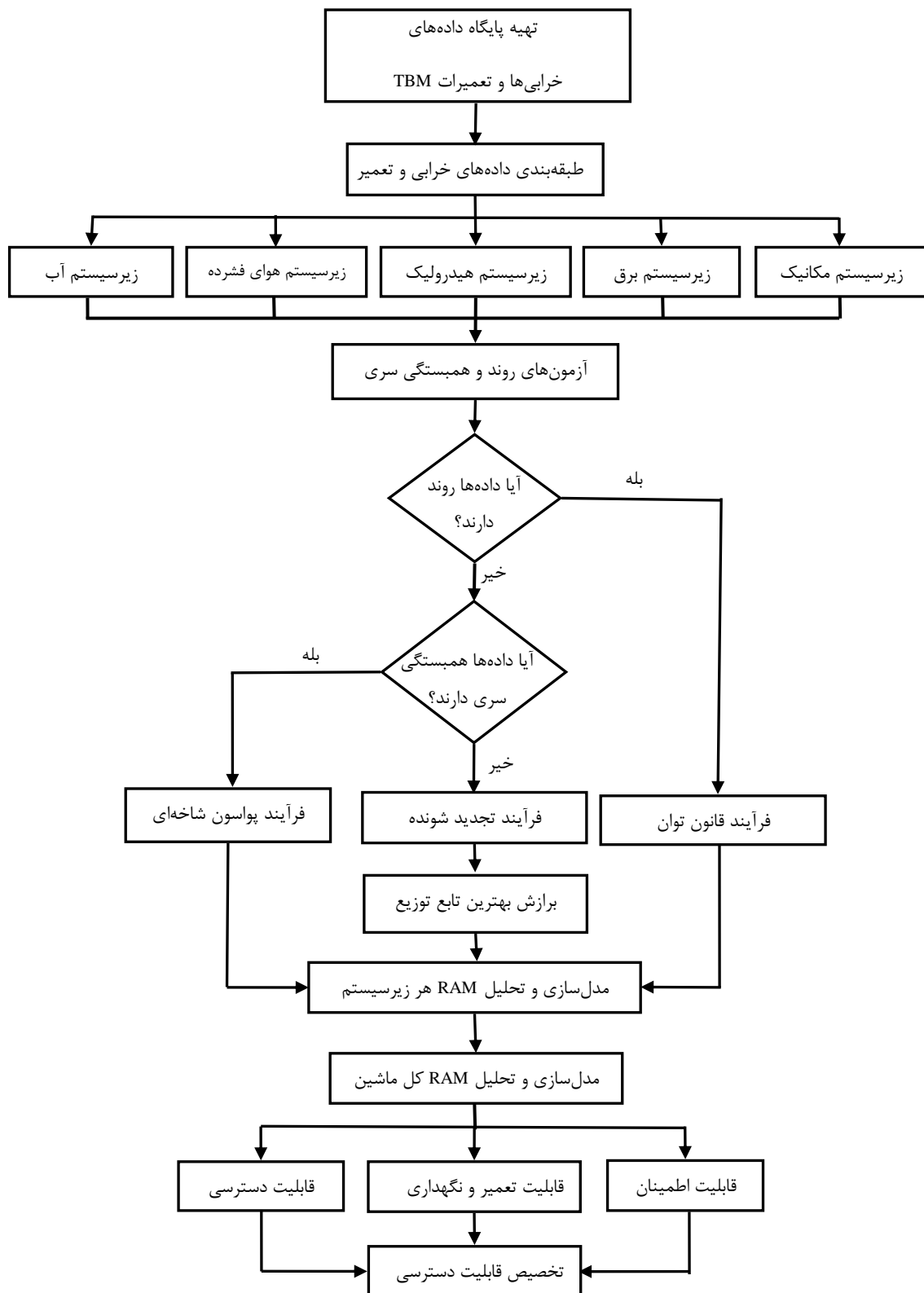


شکل ۵-۱- نمودار تحلیل پارتو برای زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز

### ۵-۳- تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری EPB - TBM در خط یک مترو

#### تبریز

در این رساله با توجه به کاربرد گسترده روش تحلیل و مدل‌سازی آماری در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری، از این روش برای تحلیل RAM ماشین حفار خط یک مترو تبریز استفاده شده است. تمامی داده‌های خرابی و تعمیر هر کدام از زیرسیستم‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه که حدود ۲۶ ماه عملکرد ماشین می‌باشد به‌طور دقیق طبقه‌بندی شده و بعد از محاسبه زمان‌های بین خرابی‌ها (TBFs) و زمان‌های تعمیرات صورت گرفته (TTRs) مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل ۵-۲ برای هر کدام از زیرسیستم‌ها و در نهایت کل ماشین تحلیل‌ها صورت گرفته است. برای این منظور، آزمون روند برای داده‌های خرابی و تعمیر هر کدام از زیرسیستم‌ها صورت گرفته است و برای داده‌های دارای روند از مدل‌سازی تصادفی فرآیند پواسون ناهمگن و فرآیند قانون توان استفاده شده است. در صورت عدم وجود روند و همبستگی در داده‌ها، فرآیند تجدید شونده برای یافتن بهترین توابع توزیع چگالی احتمال خرابی و احتمال تعمیر به‌کار گرفته شده است.



شکل ۵-۲- روندنمای استفاده شده در رساله برای تحلیل RAM

در این رساله برای تحلیل داده‌ها و یافتن بهترین تابع توزیع برازش از نرم‌افزار آماری Easyfit-5.5 [۹۰]، که نرم‌افزاری تخصصی برای تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد استفاده شده است. برای این منظور داده‌های ورودی این نرم‌افزار، زمان بین خرابی‌ها (TBFs) و زمان تعمیرات (TTRs) برای هر کدام از زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شده است. این نرم‌افزار با محاسبه پارامترهای آماری، کاربر را در انتخاب بهترین تابع برازش‌شده بر داده‌های موجود یاری می‌نماید. با وجود این‌که در این نرم‌افزار ۴۹ تابع توزیع پیوسته برای تحلیل داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند ولی فقط توابع نمایی، گاما (دو پارامتری و سه پارامتری)، گامای تعمیم یافته، نرمال، لاگ نرمال (دو پارامتری و سه پارامتری)، ویبول (دو پارامتری و سه پارامتری) به عنوان توابع شناخته شده و پرکاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده می‌شوند. در این رساله نیز، از این توابع به عنوان توابع اصلی برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است.

همچنین در این رساله برای ارزیابی بهترین تابع توزیع برازش شده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف<sup>۱</sup> (K-S) استفاده شده است. این آزمون یکی از آزمون‌های اصلی و پرکاربرد در بحث تطابق برازش<sup>۲</sup> می‌باشد [۹۱]. آزمون مذکور بر اساس بیشترین اختلاف داده‌های واقعی و مورد انتظار (تولید شده توسط تابع چگالی احتمال انتخابی) استوار است. این آزمون برای تطابق توزیع، احتمال‌های تجمعی مقادیر در مجموعه داده‌ها را با احتمال تجمعی همان مقادیر در یک تابع توزیع نظری خاص مقایسه می‌کند و هر تابعی که دارای کمترین میزان این اختلاف باشد به عنوان منطبق‌ترین تابع توزیع روی داده‌ها انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج این آزمون با تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها و همچنین نمودار P-P که برای کنترل اختلاف میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با داده‌های واقعی استفاده می‌شود نیز همخوانی مناسبی دارد.

---

1. Kolmogorov-Smirnov  
2. Goodness-of-fit test

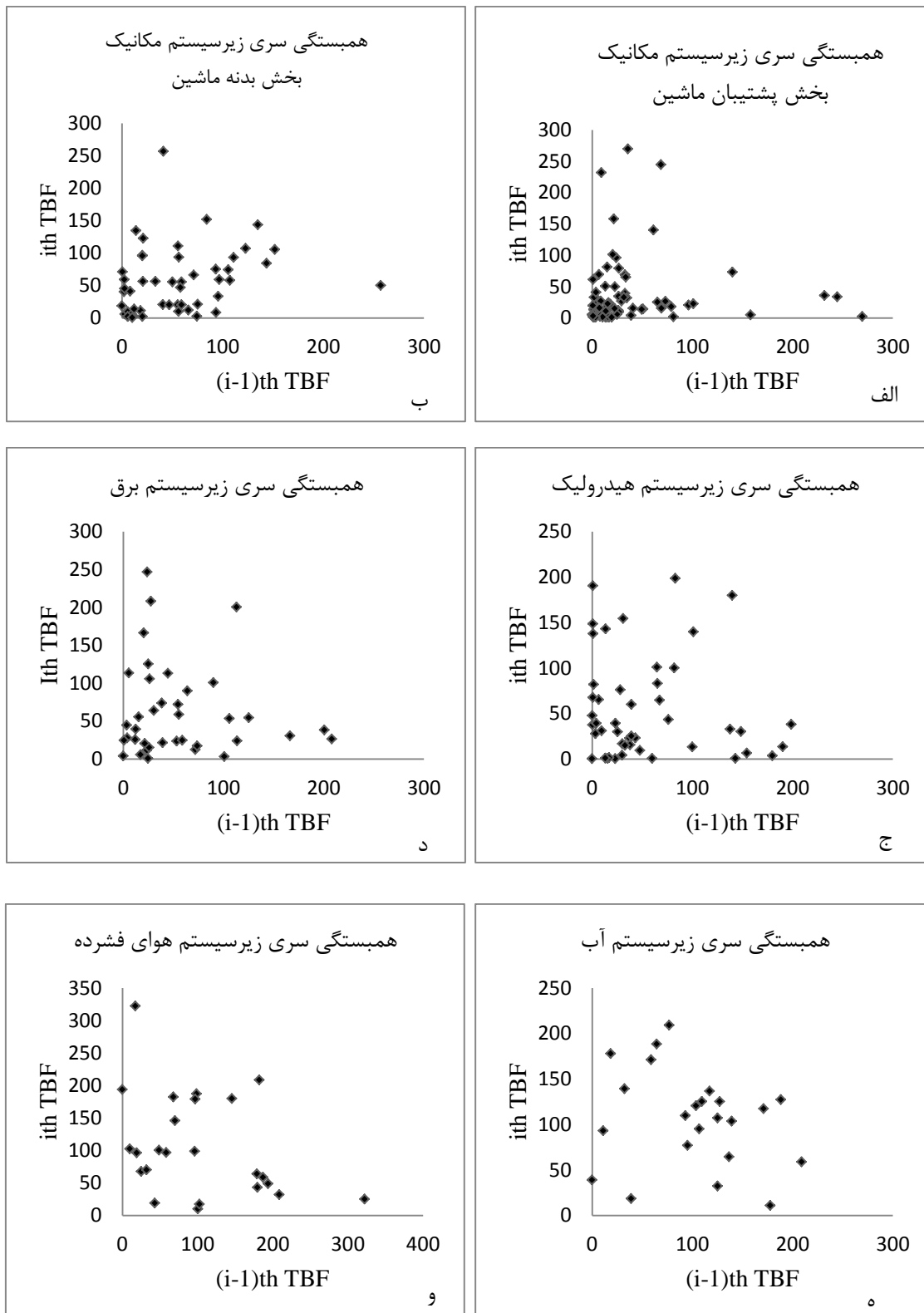
## ۵-۴- تحلیل قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز

همان‌طور که در روندنمای شکل ۵-۲ اشاره شد بعد از تهیه پایگاه داده و مشخص کردن داده‌های خرابی هر زیرسیستم، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین حفاری تمام مقطع تونل، انجام آزمون روند می‌باشد. با توجه به کاربرد گسترده روش هندبوک نظامی در رساله حاضر از این روش برای بررسی وجود یا عدم وجود روند استفاده شده و نتایج آن برای داده‌های خرابی (TBFs) همه‌ی زیرسیستم‌های ماشین مورد مطالعه در جدول ۵-۱ آورده شده است. فرض صفر در این آزمون آن است که داده‌ها از فرآیند پواسن ناهمگن (مثل قانون توان) تبعیت نمی‌کنند. در صورت رد شدن فرض صفر، وجود روند در داده‌ها تأیید می‌گردد.

نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقدار پارامتر محاسبه شده  $U$  (مطابق رابطه ۲-۳۵) برای تمام زیرسیستم‌ها در محدوده‌ی مقادیر به‌دست آمده از توزیع کی-دو ( $\chi^2_{0.025}$  و  $\chi^2_{0.975}$ ) با توجه به درجه آزادی آن‌ها قرار دارد. بنابراین در داده‌های خرابی ثبت شده برای این زیرسیستم‌ها روند مشاهده نگردید. از آنجایی که در داده‌های خرابی این زیرسیستم‌ها همبستگی سری نیز مشاهده نگردید روش آمار کلاسیک یا فرآیند تجدید شونده برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان این زیرسیستم‌ها انتخاب گردید. نتایج آزمون همبستگی سری برای همه‌ی زیرسیستم‌ها در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم TBM	تعداد خرابی	درجه آزادی	U محاسبه شده	حد بالا توزیع $\chi^2$	حد پایین توزیع $\chi^2$	روند	همبستگی سری	روش مدل‌سازی
مکانیک (پشتیبان)	۷۹	۱۵۶	۱۵۱/۶۱	۱۹۴/۳۸	۱۲۳/۳۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
مکانیک (بدنه)	۴۹	۹۶	۱۱۹/۴۲	۱۲۵/۰۰	۷۰/۷۳۸	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
برق	۳۸	۷۴	۸۷/۶۳	۹۹/۷	۵۲/۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
هیدرولیک	۴۷	۹۲	۱۱۲/۴	۱۲۰/۴	۶۷/۴	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
هوای فشرده	۲۴	۴۶	۴۱/۹۲	۶۶/۶	۲۹/۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
آب	۲۳	۴۴	۵۴/۰۴	۶۴/۲	۲۷/۶	ندارد	ندارد	تجدیدشونده



شکل ۵-۳- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی زیرسیستم‌های الف) مکانیک بخش پشتیبان، ب) مکانیک بخش بدنه، ج) هیدرولیک، د) برق، ه) آب، و) هوای فشرده

چنان که در شکل فوق مشاهده می‌شود برای هر کدام از شش زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بدنه، برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب، داده‌های خرابی طبق آزمون همبستگی سری، دارای نظم و ترتیب خاصی نبوده و به صورت پراکنده توزیع شده‌اند. از این‌رو، داده‌های خرابی همه‌ی این زیرسیستم‌ها فاقد همبستگی سری می‌باشند.

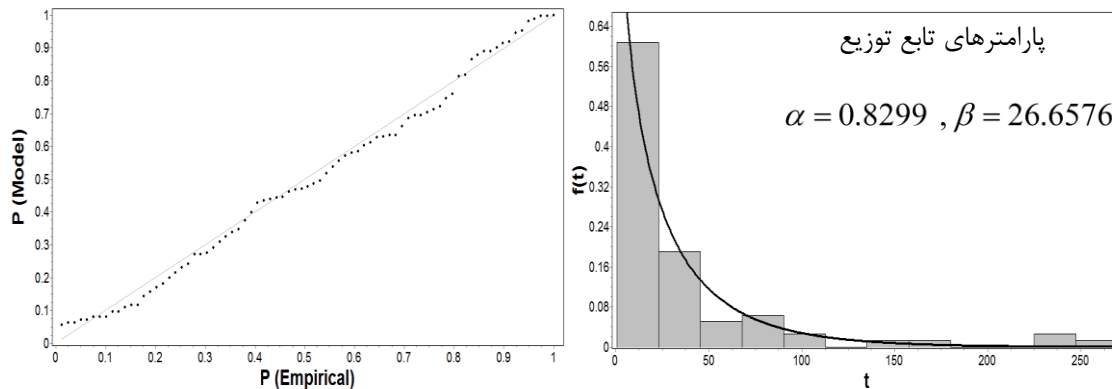
#### ۵-۴-۱- قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک

همان‌طور که اشاره شد به دلیل بالا بودن میزان خرابی‌های زیرسیستم مکانیک و در واقع بزرگ بودن این زیرسیستم، داده‌های خرابی و تعمیر زیرسیستم مکانیک ماشین در دو بخش جداگانه شامل بخش پشتیبان ماشین (بخش اتصال و تریلرها) و بخش بدنه ماشین (کله حفار و سپرها) منظور شده است. با توجه به شکل ۵-۱ زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان با درصد فراوانی  $30/4$  بیشترین میزان خرابی را در بین زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز دارا می‌باشد. بنابراین این زیرسیستم به‌عنوان زیرسیستم بحرانی ماشین معرفی می‌گردد و پر واضح است که فراهم ساختن شرایط عملیاتی مناسب برای این زیرسیستم باعث بهبود عملکرد ماشین حفار و افزایش بهره‌وری آن خواهد شد. خرابی‌های زیرسیستم مکانیک مطابق جداول ۴-۲ و ۴-۳ نشان می‌دهد که در بین اجزای این زیرسیستم در بخش بدنه ماشین، ابزار برشی و در بخش پشتیبان ماشین، تسمه نقاله دارای بیشترین تعداد دفعات خرابی می‌باشند.

با طبقه‌بندی خرابی‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بخش بدنه ماشین و محاسبه TBFs برای این زیرسیستم، نتایج آزمون روند مطابق جدول ۵-۱ نشان داد که داده‌های خرابی این زیرسیستم‌ها فاقد روند و همچنین همبستگی سری می‌باشند و بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بدنه ماشین از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین نشان داد که تابع توزیع ویبول دارای کمترین مقدار K-S برابر با  $0/0546$  در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین



تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



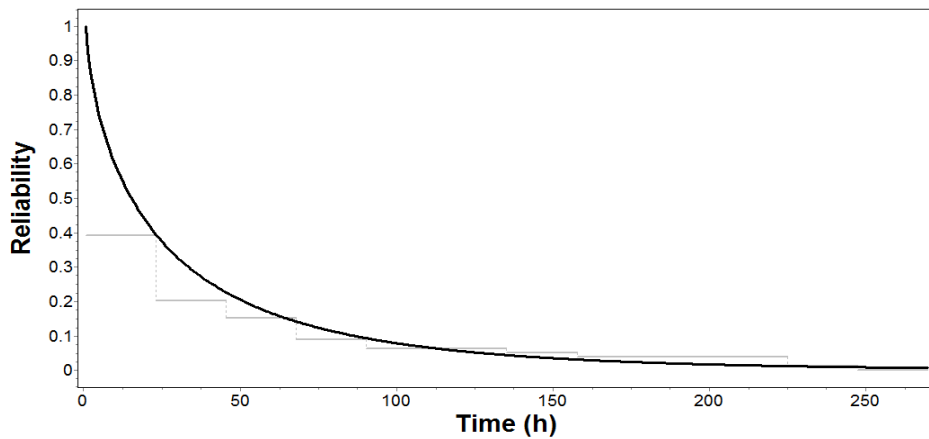
شکل ۴-۵- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک پشتیبان

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صورت روابط ۱-۵ و ۲-۵ محاسبه گردید. شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ منحنی‌های معادل با این روابط را نشان می‌دهند.

$$R_{Mechanical}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.5}{26.6576}\right)^{0.8299}\right) \quad (1-5)$$

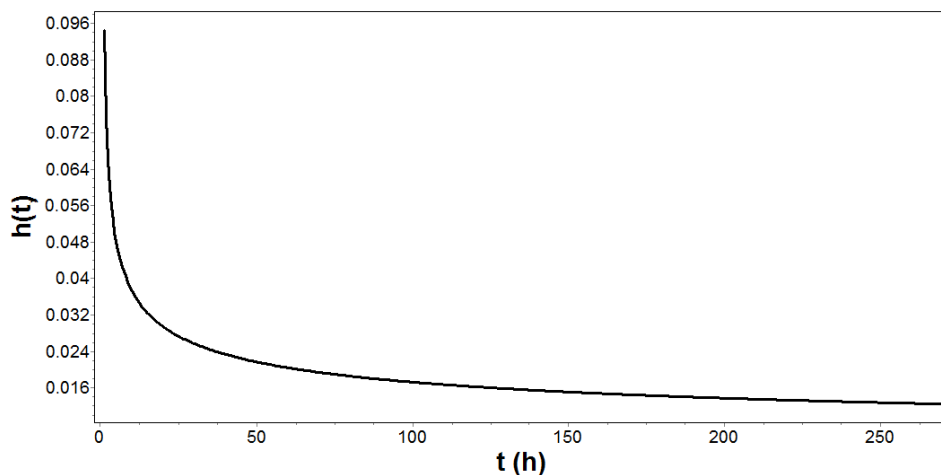
$$\lambda_{Mechanical}(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0311 \left(\frac{t}{26.6576}\right)^{-0.1701} \quad (2-5)$$

لازم به ذکر است پارامترهای بهترین تابع برازش شده بر داده‌ها که توسط نرم افزار محاسبه می‌گردد در فرمول‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی مربوطه (که در بخش ۲-۴ به همراه پارامترهای هر رابطه بحث شد) جاگذاری می‌گردد و بدین ترتیب مدل مورد نظر به دست می‌آید.



شکل ۵-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین

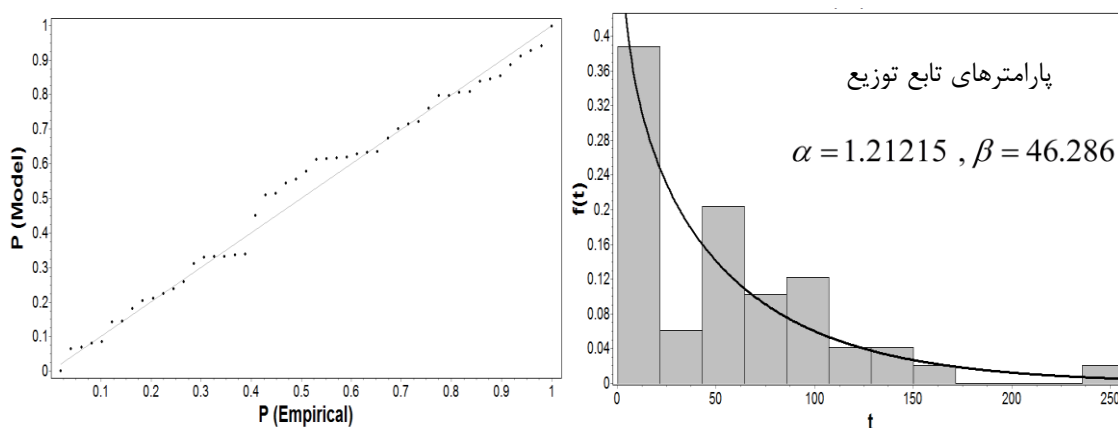
منحنی فوق نشان می‌دهد که بعد از حدود ۲۵۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر چنانچه هیچ‌گونه برنامه‌ای برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیش‌گیرانه در زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان وجود نداشته باشد این زیرسیستم به احتمال قریب به یقین بعد از ۲۵۰ ساعت عملیات حفاری تونل، دچار خرابی شده و ماشین حفار متوقف خواهد شد. همچنین این منحنی نشان می‌دهد که بعد از گذشت حدود ۵۰ ساعت حفاری پیوسته، احتمال خرابی این زیرسیستم به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد.



شکل ۵-۶- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین

منحنی نرخ خرابی نشان می‌دهد که زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین دارای نرخ خرابی حدود ۰/۱ خرابی در ساعت در ابتدای شروع عملکرد خود می‌باشد و سپس نرخ خرابی این زیرسیستم به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و بنابراین سیستم رو به بهبود می‌باشد. دلیل کاهش شدید منحنی نرخ خرابی در زمان کمتر از ۱۰ ساعت، این است که خرابی‌هایی از قبیل مشکل نوار نقاله و سیستم ترزریق فوم که بالاترین میزان خرابی را در این زیرسیستم دارند بیشتر در این فاصله زمانی حادث می‌شوند و سپس میزان فراوانی خرابی‌ها تا حدود زیادی کاهش می‌یابد و بنابراین نرخ خرابی از شیب کاهشی کمتری برخوردار می‌شود.

همچنین نتایج تحلیل داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین نشان داد که تابع توزیع گاما دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۱۱۵۸ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه در شکل ۷-۵ نشان داده شده است.

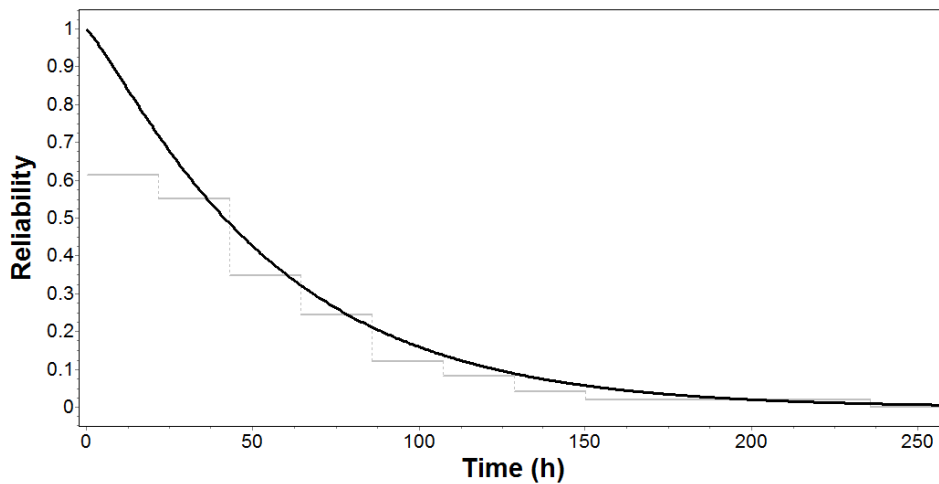


شکل ۷-۵- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک بدنه

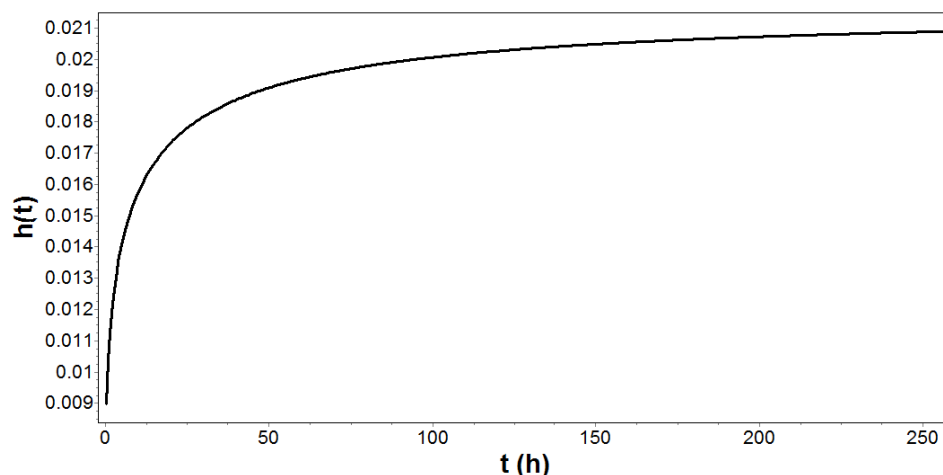
مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صورت روابط ۳-۵ و ۴-۵ محاسبه گردید. شکل های ۸-۵ و ۹-۵ منحنی های معادل با این روابط را نشان می دهند.

$$R_{\text{Mechanical2}}(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = 1 - 1.1\left(\Gamma_{(0.017t)^{0.883}}(0.859)\right) \quad (3-5)$$

$$\lambda_{\text{Mechanical2}}(t) = \frac{kt^{k\alpha-1}e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^k}}{\beta^{k\alpha}\Gamma(\alpha)\left(1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}\right)} = \frac{0.883t^{-0.242}e^{-(-0.017t)^{0.883}}}{24.104\left[1 - 1.1\left(\Gamma_{(0.017t)^{0.883}}(0.859)\right)\right]} \quad (4-5)$$



شکل ۸-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین



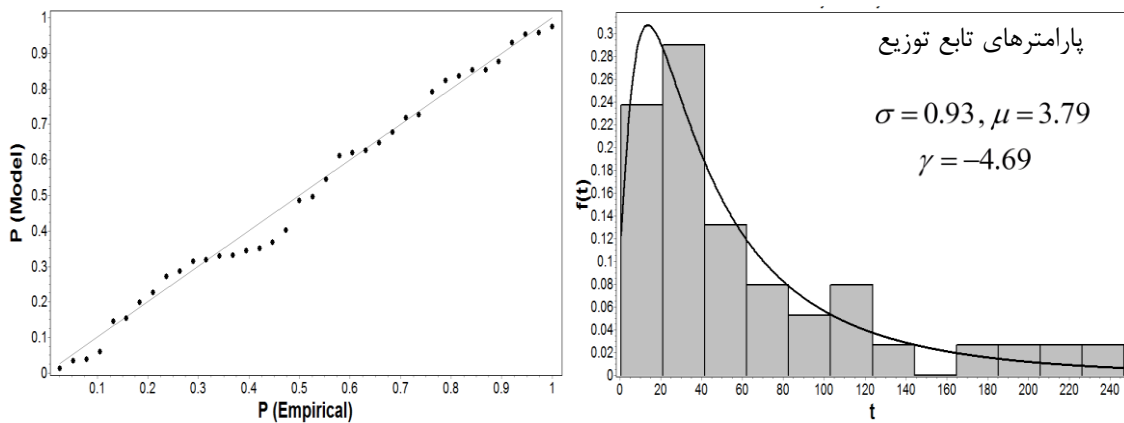
شکل ۵-۹- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین

با دقت در منحنی زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار مشخص می‌شود چنانچه در این زیرسیستم نیز همانند بخش پشتیبان ماشین هیچ‌گونه عملیات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه صورت نگیرد بعد از حدود ۲۵۰ ساعت عملیات حفاری پیوسته این زیرسیستم دچار خرابی می‌شود و ماشین متوقف می‌شود. اختلاف اساسی این منحنی با منحنی قابلیت اطمینان بخش پشتیبان ماشین در این است که شیب منحنی قابلیت اطمینان آن کمتر بوده به طوری که بعد از گذشت حدود ۱۰۰ ساعت عملیات حفاری مداوم احتمال خرابی این زیرسیستم به ۸۰ درصد می‌رسد در حالی که این میزان برای زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان حدود ۵۰ ساعت می‌باشد. همچنین منحنی نرخ خرابی این زیرسیستم از نوع افزایشی می‌باشد و این نشان می‌دهد که با گذشت زمان تعداد خرابی‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین نیازمند کنترل و نظارت بیشتر بر زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین می‌باشد. بیشترین توقف‌های ماشین در این زیرسیستم ناشی از خرابی‌های مربوط به ابزار برشی کله حفار و همین‌طور تمیزکاری سپر انتهایی ماشین می‌باشد. چنانچه تمیزکاری سپر انتهایی ماشین در فواصل زمانی مناسب و حین توقف ماشین در اثر سایر خرابی‌ها به طور مرتب صورت پذیرد به طور حتم تا حدود زیادی از توقف‌های ناخواسته مربوط به آن کاسته خواهد شد و باعث افزایش قابلیت اطمینان این زیرسیستم و در نهایت ماشین حفار خواهد شد.

## ۵-۴-۲- قابلیت اطمینان زیرسیستم برق

زیرسیستم برق با فراوانی نسبی ۱۸/۱ درصد بعد از زیرسیستم مکانیک، بیشترین میزان خرابی را در بین زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز به خود اختصاص داده است. مطالعه خرابی‌های زیرسیستم برق نشان می‌دهد که در بین اجزای این زیرسیستم، سنسورهای برقی جک‌های پیش‌ران ماشین دارای بیشترین تعداد دفعات خرابی می‌باشند.

نتایج آزمون روند مطابق جدول ۵-۱ نشان داد که در داده‌های خرابی این زیرسیستم روند وجود ندارد. همچنین با توجه به شکل ۵-۳، در این داده‌ها همبستگی نیز مشاهده نگردید لذا برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم برق از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد که تابع توزیع لاگ نرمال سه پارامتری دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۰۸۱۲ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم برق در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.

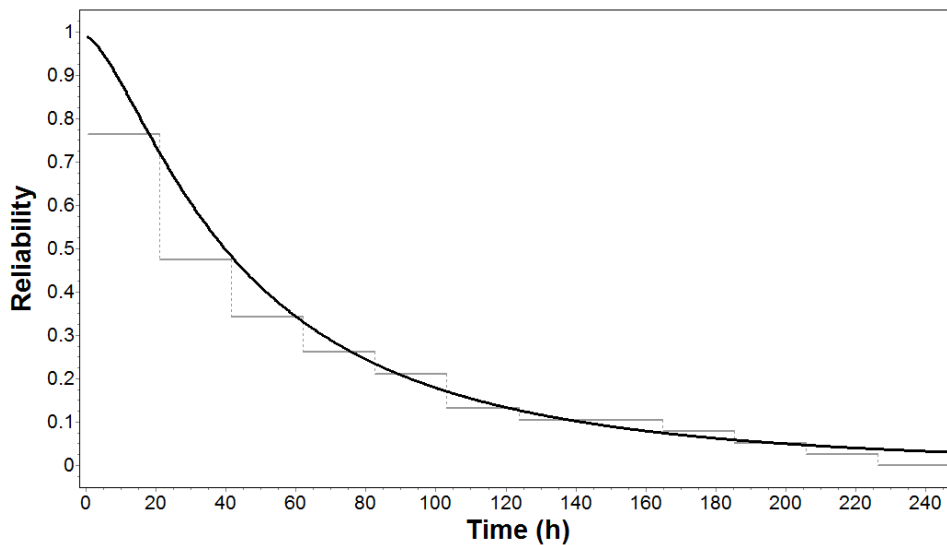


شکل ۵-۱۰- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم برق

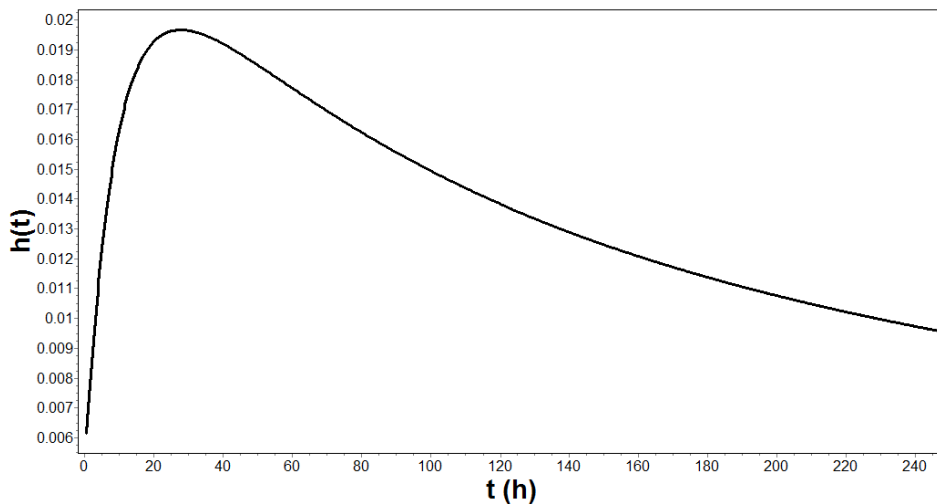
بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صورت روابط ۵-۵ و ۵-۶ محاسبه گردید. شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ منحنی‌های معادل با این روابط را نشان می‌دهند.

$$R_{Electrical}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t + 4.69) - 3.79}{0.93}\right) \quad (5-5)$$

$$\lambda_{Electrical}(t) = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma(t - \gamma) \cdot R(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t + 4.69) - 3.79}{0.93}\right)}{0.93(t + 4.69) \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln(t + 4.69) - 3.79}{0.93}\right)\right)} \quad (6-5)$$



شکل ۵-۱۱ - منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم برق



شکل ۵-۱۲- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم برق

با توجه به شکل ۵-۱۱ دیده می‌شود که قابلیت اطمینان زیرسیستم برق ماشین با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد به طوری که بعد از ۴۰ ساعت از شروع عملیات پیوسته حفاری، حدود ۵۰ درصد از قابلیت اطمینان ماشین کاسته می‌شود و بعد از گذشت حدود ۲۴۰ ساعت از عملیات حفاری، با احتمال صد در صد ماشین در زیرسیستم برق دچار خرابی شده و عملیات حفاری متوقف می‌گردد.

منحنی نرخ خرابی زیرسیستم برق نشان می‌دهد که تعداد خرابی‌های این زیرسیستم با شیب تندی افزایش یافته و سپس با شیب ملایمی کاهش می‌یابند. دلیل این افزایش و سپس کاهش نرخ خرابی این است که بیشترین خرابی‌های مربوط به این زیرسیستم در بازه زمانی ۳۰ ساعت اولیه روی می‌دهد. مطابق شکل ۵-۱۲ نرخ خرابی این زیرسیستم در فاز افزایشی در مدت زمان ۳۰ ساعت از ۰/۰۰۶ خرابی در ساعت به حدود ۰/۰۲ خرابی در ساعت افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بنابراین با کنترل و نظارت بیشتر بر زیرسیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز در برنامه‌های زمانی کمتر از ۳۰ ساعت می‌توان تعداد خرابی‌های این زیرسیستم را تا حدود ۵۵ درصد کاهش داد. با توجه به پایگاه داده‌های خرابی زیرسیستم برق، یکی از مواردی که به آسانی می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان و کاهش نرخ خرابی این زیرسیستم شود مشکل کابل‌کشی برق ۲۰ کیلوولت ماشین

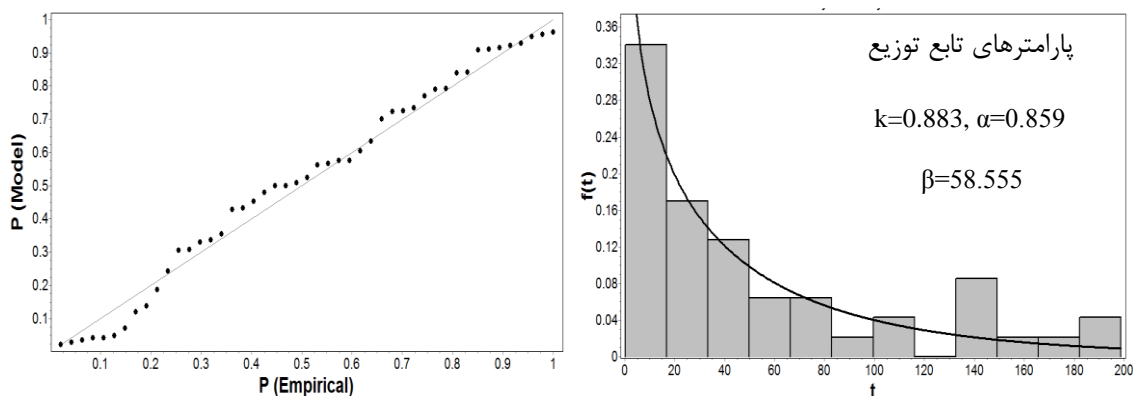


حفار می‌باشد. چنان‌چه این مورد حتی‌الامکان هم‌زمان با تعمیرات یا حین سایر توقف‌های ماشین صورت پذیرد تأثیر بسزایی در افزایش زمان بین خرابی‌ها به تبع آن کاهش نرخ خرابی خواهد داشت.

### ۵-۴-۳- قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک

زیرسیستم هیدرولیک به‌همراه زیرسیستم برق وظیفه اصلی تأمین و انتقال نیروی حرکتی ماشین حفار را به عهده دارند. بنابراین قابلیت اطمینان بالای این زیرسیستم باعث بهبود عملکرد ماشین حفار خواهد شد. این زیرسیستم نیز دارای حدود ۱۴/۶ درصد فراوانی خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز می‌باشد و از نظر فراوانی خرابی‌ها بعد از زیرسیستم‌های مکانیک و برق قرار دارد. نشی روغن هیدرولیک مهم‌ترین دلیل خرابی‌های ثبت شده در این زیرسیستم می‌باشد.

نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان داد که داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک فاقد روند بوده و داده‌ها مستقل می‌باشند لذا برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان این زیرسیستم نیز از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل با استفاده از نرم افزار نشان داد که تابع توزیع گامای تعمیم یافته دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۰۸۷۵ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد. لذا این تابع به‌عنوان بهترین تابع انعکاس دهنده رفتار خرابی زیرسیستم هیدرولیک در نظر گرفته شد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم هیدرولیک در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.



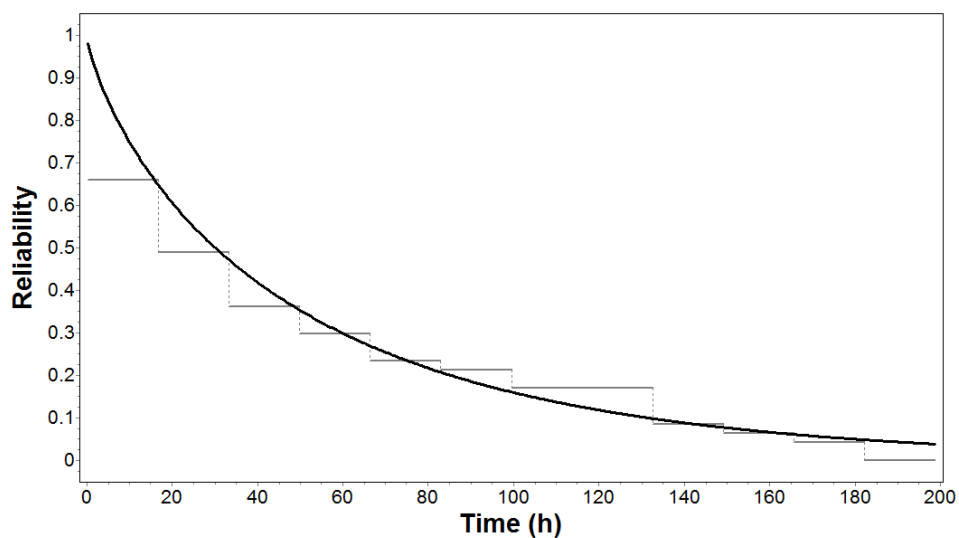
شکل ۵-۱۳- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هیدرولیک

با به دست آمدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفار به صورت روابط ۷-۵ و ۸-۵ محاسبه شد.

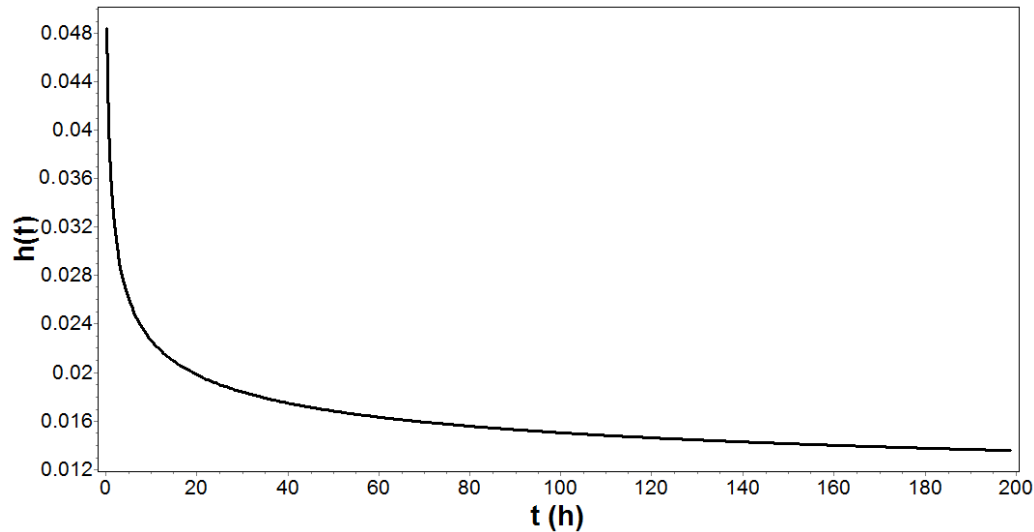
$$R_{\text{Hydraulic}}(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = 1 - 1.1\left(\Gamma_{(0.017t)^{0.883}}(0.859)\right) \quad (7-5)$$

$$\lambda_{\text{Hydraulic}}(t) = \frac{kt^{k\alpha-1}e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^k}}{\beta^{k\alpha}\Gamma(\alpha)\left(1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^k(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}\right)} = \frac{0.883t^{-0.242}e^{(-0.017t)^{0.883}}}{24.104\left[1 - 1.1\left(\Gamma_{(0.017t)^{0.883}}(0.859)\right)\right]} \quad (8-5)$$

منحنی‌های معادل با توابع قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک در شکل‌های ۱۴-۵ و ۱۵-۵ ارائه شده است. نتایج محاسبات نشان داد که قابلیت اطمینان این زیرسیستم بعد از گذشت حدود ۲۰۰ ساعت از عملیات حفاری به صفر نزدیک می‌شود و ماشین با احتمال صد در صد خراب خواهد شد.



شکل ۱۴-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک



شکل ۵-۱۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هیدرولیک

همچنین منحنی نرخ خرابی این زیرسیستم نشان داد که زیرسیستم هیدرولیک دارای نرخ خرابی کاهنده و بنابراین رفتار خرابی رو به بهبود می‌باشد. به دلیل این که حدود ۳۵ درصد خرابی‌های این زیرسیستم در بازه زمانی ۲۰ ساعت اولیه حادث می‌شود کاهش شدید منحنی نرخ خرابی در این بازه زمانی مشاهده می‌گردد. این زیرسیستم با نرخ خرابی برابر با ۰/۰۴۸ خرابی در ساعت کار خود را آغاز نموده و پس از ۱۰۰ ساعت به حدود ۰/۰۱۶ خرابی در ساعت می‌رسد. پس از این زمان تغییرات نرخ خرابی اندک بوده و حالت تقریباً پایداری در زیرسیستم هیدرولیک برقرار می‌شود.

#### ۵-۴-۴- قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده

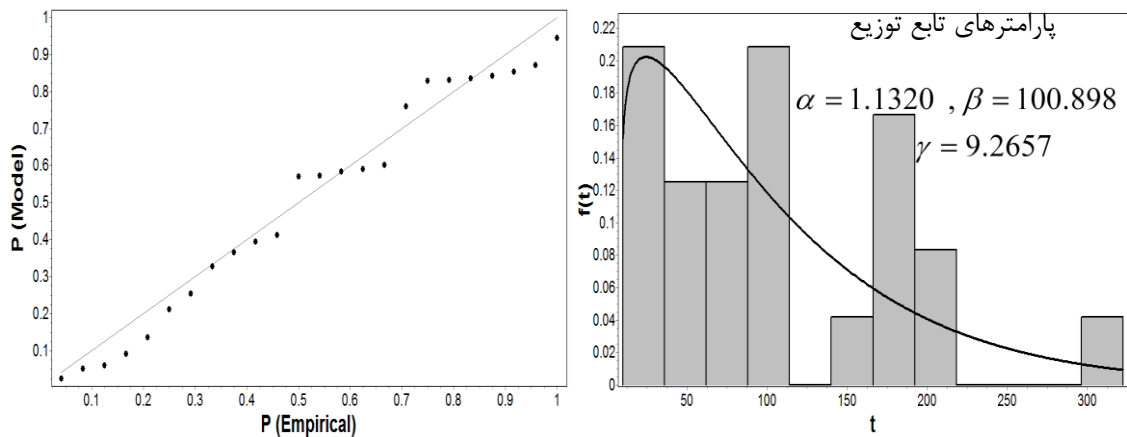
زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفار خط یک مترو تبریز از وضعیت عملکرد نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد و حدود ۹/۲ درصد فراوانی خرابی‌ها را به خود اختصاص داده است. مطالعه خرابی‌های این زیرسیستم نشان داد که حدود ۴۶ درصد از خرابی‌های این زیرسیستم فقط به دلیل خرابی پمپ ماستیک (پمپ مورد استفاده برای نوعی از گریس به نام ماستیک که جهت آب‌بندی سپر انتهائی به پشت سگمنت‌ها تزریق می‌شود و فضای بین سگمنت‌ها و سپر را پر می‌کند) می‌باشد که با هوای فشرده کار می‌کند. بنابراین تنها با کنترل مرتب این پمپ و حصول اطمینان از عملکرد مناسب آن و

یا تعویض به موقع، می‌توان خرابی‌های ناخواسته این زیرسیستم در حین کار ماشین را به میزان قابل تأملی کاهش داد.

با انجام آزمون‌های روند و همبستگی سری مشخص شد که داده‌های خرابی زیرسیستم هوای فشرده فاقد روند بوده و هیچ‌گونه همبستگی در داده‌ها دیده نمی‌شود بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان این زیرسیستم نیز روش فرآیند تجدید شونده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل با استفاده از نرم افزار نشان داد که تابع توزیع ویبول سه پارامتری بهترین تابع قابل برازش برای داده‌ها می‌باشد. مقدار K-S برای این توزیع برابر با ۰/۱۲۶۷ به دست آمد که کمترین میزان در بین سایر توابع توزیع می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع ویبول سه پارامتری و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم هوای فشرده در شکل ۱۶-۵ نشان داده شده است. با تعیین شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی این زیرسیستم مطابق روابط ۹-۵ و ۱۰-۵ به دست آمد.

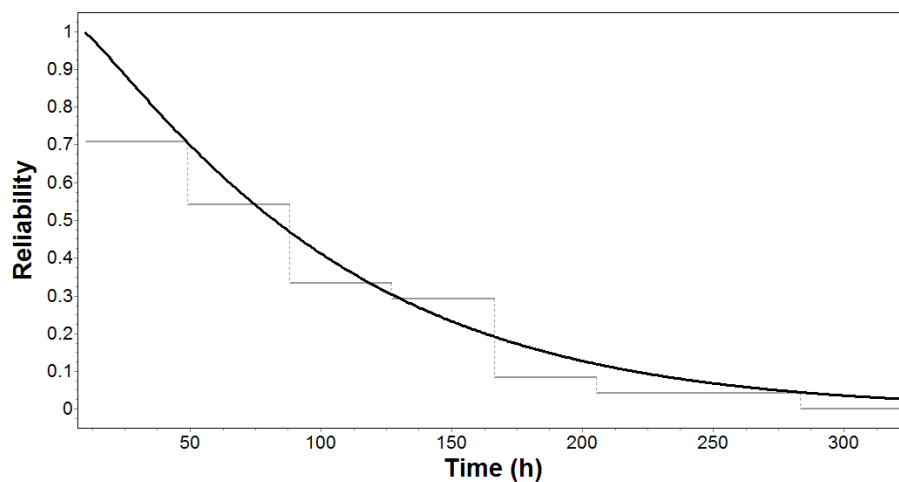
$$R_{Pneumatic}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-9.2657}{100.898}\right)^{1.1320}\right) \quad (9-5)$$

$$\lambda_{Pneumatic}(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} = 0.0112 \left(\frac{t-9.2657}{100.898}\right)^{1.1320} \quad (10-5)$$

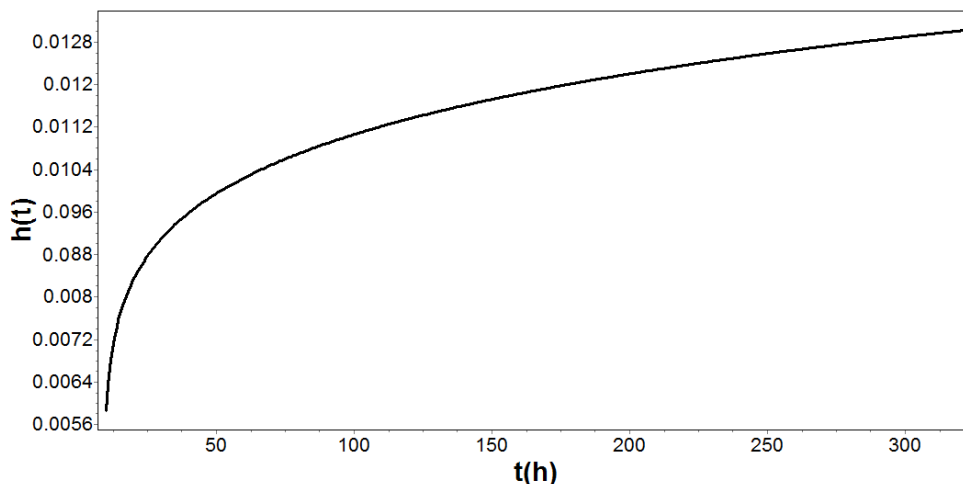


شکل ۱۶-۵- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هوای فشرده

منحنی‌های قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده مطابق شکل‌های ۱۷-۵ و ۱۸-۵ می‌باشد. منحنی قابلیت اطمینان این زیرسیستم شیب کاهشی نسبتاً ملایمی دارد و بعد از گذشت حدود ۱۰۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، قابلیت اطمینان این زیرسیستم به نصف تقلیل می‌یابد و انتظار می‌رود این زیرسیستم بعد از حدود ۳۰۰ ساعت عملیات حفاری حتماً دچار خرابی شده و ماشین متوقف شود.



شکل ۱۷-۵- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده



شکل ۱۸-۵- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم هوای فشرده

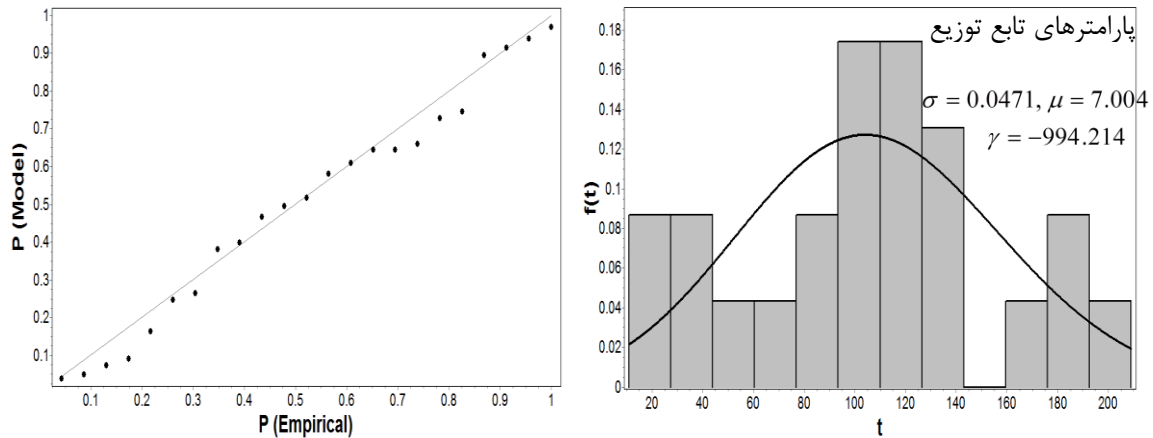
مطالعه رفتار خرابی زیرسیستم هوای فشرده نشان می‌دهد که نرخ خرابی این زیرسیستم صعودی بوده

و در حال فرسودگی افزایش یافته قرار دارد و در صورت عدم کنترل و تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه، این سیستم دچار خرابی بسیار زیادی خواهد شد. خرابی‌های ناشی از پمپ ماستیک ماشین حدود ۴۵ درصد خرابی‌های زیرسیستم هوای فشرده را شامل می‌شود. بنابراین با تعمیرات اساسی و نگهداری مناسب از این پمپ می‌توان نرخ خرابی این زیرسیستم را تا حدود زیادی کاهش داد و قابلیت اطمینان آن را افزایش داد.

#### ۵-۴-۵- قابلیت اطمینان زیرسیستم آب

زیرسیستم آب با فراوانی نسبی ۸/۹ درصد، کمترین میزان خرابی در بین سایر زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز را دارا می‌باشد. این زیرسیستم به دلیل کمتر بودن اجزا و پیچیدگی آن از میزان خرابی‌های کمتری نسبت به سایر زیرسیستم‌ها برخوردار است و عمده دلیل توقف‌ها در این زیرسیستم، سیستم آبکشی دستگاه می‌باشد که با کنترل آن و برنامه‌ریزی مناسب بری تخلیه آب می‌توان توقف‌های ناشی از این زیرسیستم را کمتر نیز نمود.

نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری نشان داد که داده‌های خرابی زیرسیستم آب نیز همانند چهار زیرسیستم مکانیک، برق، هیدرولیک و هوای فشرده فاقد روند بوده و داده‌ها مستقل می‌باشند. بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان این زیرسیستم نیز روش فرآیند تجدید شونده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که همانند زیرسیستم برق، تابع توزیع لاگ نرمال با میزان K-S برابر با ۰/۰۹۳ از بهترین تطابق براین داده‌ها برخوردار می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع لاگ نرمال و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم آب در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است.

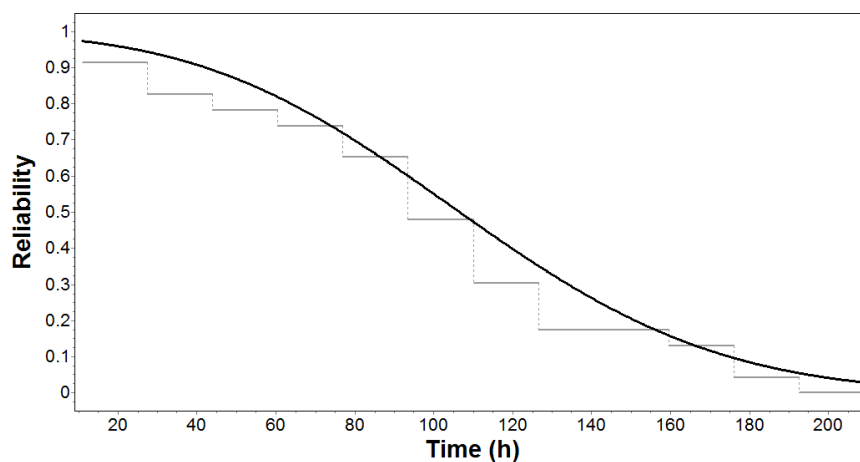


شکل ۵-۱۹- نمودار فراوانی خرابی‌ها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم آب

بدین ترتیب با تعیین شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۱۱ و ۵-۱۲ محاسبه گردید و منحنی‌های معادل با این روابط در شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ ارائه شده است.

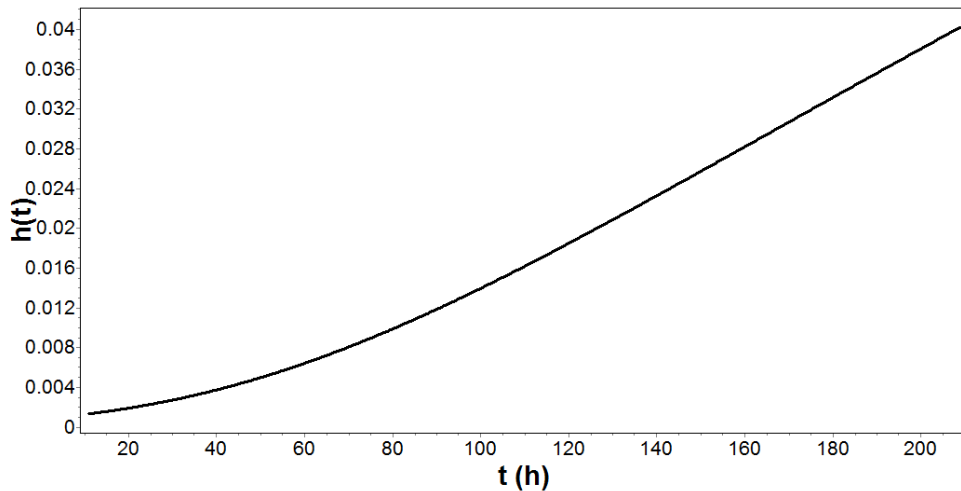
$$R_{Water}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t + 994.214) - 7.004}{0.0471}\right) \quad (5-11)$$

$$\lambda_{Water}(t) = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma(t - \gamma) \cdot R(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t + 994.214) - 7.004}{0.93}\right)}{0.0471(t + 994.214) \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln(t + 994.214) - 7.004}{0.0471}\right)\right)} \quad (5-12)$$



شکل ۵-۲۰- منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم آب

نتایج مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم آب ماشین حفار خط یک مترو تبریز نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان این سیستم پس از حدود ۲۴۰ ساعت، به صفر می‌رسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان در ساعات اولیه کار ماشین با شیب کمی کاهش می‌یابد، لذا طی ۸۰ ساعت اول عملیات، قابلیت اطمینان حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، شیب کاهش منحنی بیشتر شده و در فاصله زمانی بین ۸۰ تا ۱۶۰ ساعت، قابلیت اطمینان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات مبین آن است که در صورتی که زیرسیستم آب ماشین در بازه‌های زمانی کمتر از ۱۰۰ ساعت بازرسی و کنترل شود، می‌توان قابلیت اطمینان آن را در سطح بسیار خوبی حفظ نمود.



شکل ۵-۲۱- منحنی نرخ خرابی زیرسیستم آب

همچنین منحنی نرخ خرابی زیرسیستم آب نشان می‌دهد که نرخ خرابی این زیرسیستم صعودی بوده و همواره در حال فرسودگی افزایشی و شتابدار قرار دارد و در صورت عدم کنترل و تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه، این سیستم نیز همانند زیرسیستم هوای فشرده دچار خرابی بسیار زیادی خواهد شد. خرابی پمپ آبکشی و ترکیدگی لوله اصلی آب دستگاه از دلایل اصلی خرابی‌های زیرسیستم آب می‌باشند که با توجه به افزایشی بودن نرخ خرابی با کنترل و نظارت بیشتر بر این موارد می‌توان شیب منحنی نرخ خرابی این زیرسیستم را تا حدود زیادی کاهش داد.



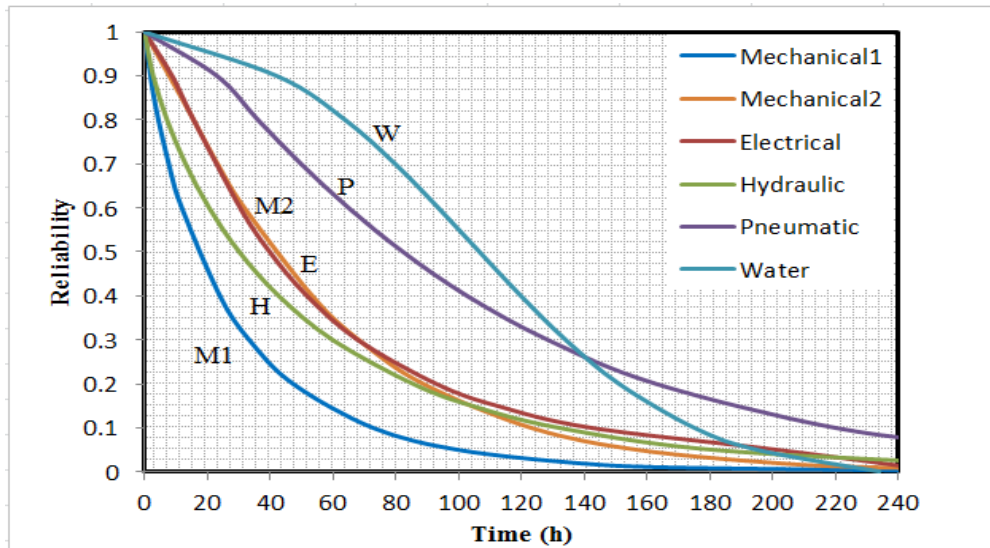
در مقایسه منحنی نرخ خرابی زیرسیستم آب با منحنی نرخ خرابی زیرسیستم برق (شکل ۵-۱۲) که دارای دو فاز افزایشی و سپس کاهش می‌باشد می‌توان علت این تفاوت را در بازه‌های زمانی مختلف وقوع خرابی‌های این دو زیرسیستم ذکر کرد.

#### ۵-۴-۶- قابلیت اطمینان کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز

در بخش‌های قبل، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین به‌طور جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته و مدل‌سازی گردیدند. چنان‌که قبلاً ذکر شد، مدل‌های قابلیت اطمینان مذکور، پایه و اساس دستیابی به قابلیت اطمینان کل ماشین می‌باشند. برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین، منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین مورد مطالعه در شکل ۵-۲۲ به صورت یک‌جا ارائه شده‌اند. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین در تمام طول عمر ماشین از قابلیت اطمینان پایین‌تری نسبت به سایر زیرسیستم‌ها برخوردار است. با توجه به میزان بالای پتانسیل خرابی زیرسیستم مکانیک، این زیرسیستم همواره به عنوان مهم‌ترین عامل بازدارنده و کاهنده قابلیت اطمینان ماشین به شمار می‌رود. زیرسیستم‌های مکانیک بخش بدنه، برق و هیدرولیک تغییرات تقریباً مشابهی در قابلیت اطمینان از خود نشان می‌دهند هرچند که زیرسیستم‌های مکانیک بدنه و برق تا حدودی قابلیت اطمینان بیشتری از زیرسیستم هیدرولیک را دارا می‌باشند. زیرسیستم آب تا مدت زمان ۱۴۰ ساعت بعد از شروع عملیات حفاری ماشین، از بیشترین میزان قابلیت اطمینان برخوردار می‌باشد ولی پس از این زمان، به جایگاه پایین‌تری از قابلیت اطمینان زیرسیستم هوای فشرده و سپس پایین‌تر از زیرسیستم‌های برق و هیدرولیک بعد از زمان حدود ۲۰۰ ساعت نزول می‌کند.

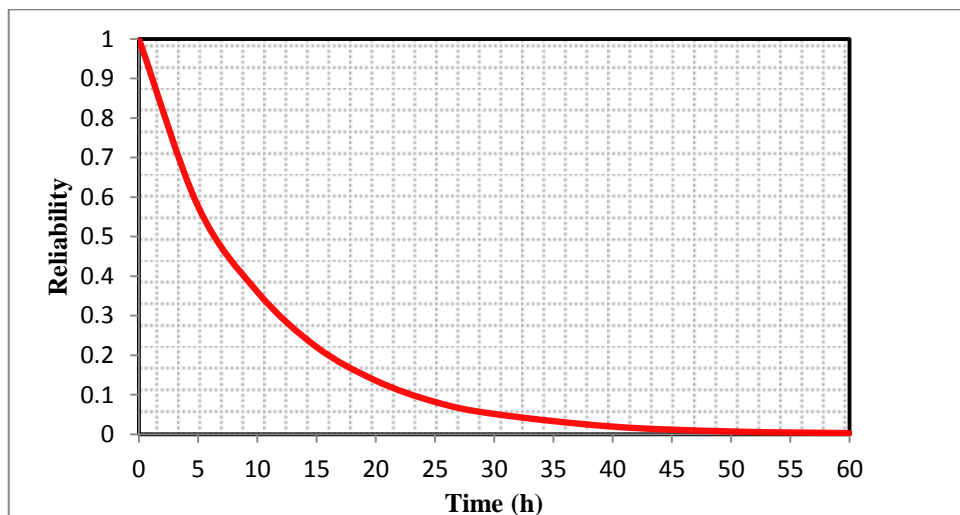
از آنجایی که شبکه زیرسیستم‌های ماشین به‌صورت سری می‌باشد بنابراین قابلیت اطمینان کل ماشین حفار با توجه به شکل ۵-۲۲ و رابطه ۵-۱۳ محاسبه شده و نمودار آن مطابق شکل ۵-۲۳

به دست آمد. لازم به ذکر است در شکل ۲۲-۵ منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم مکانیک پشتیبان ماشین با زیرسیستم مکانیک<sup>۱</sup> و بخش بدنه ماشین با زیرسیستم مکانیک<sup>۲</sup> نشان داده شده است.



شکل ۲۲-۵- منحنی‌های قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفار خط یک مترو تبریز

$$R_{TBM} = \prod_{i=1}^5 R_i = R_{mechanical1} \cdot R_{Mechanical2} \cdot R_{Electrical} \cdot R_{Hydraulic} \cdot R_{Pneumatic} \cdot R_{Water} \quad (13-5)$$



شکل ۲۳-۵- منحنی قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز

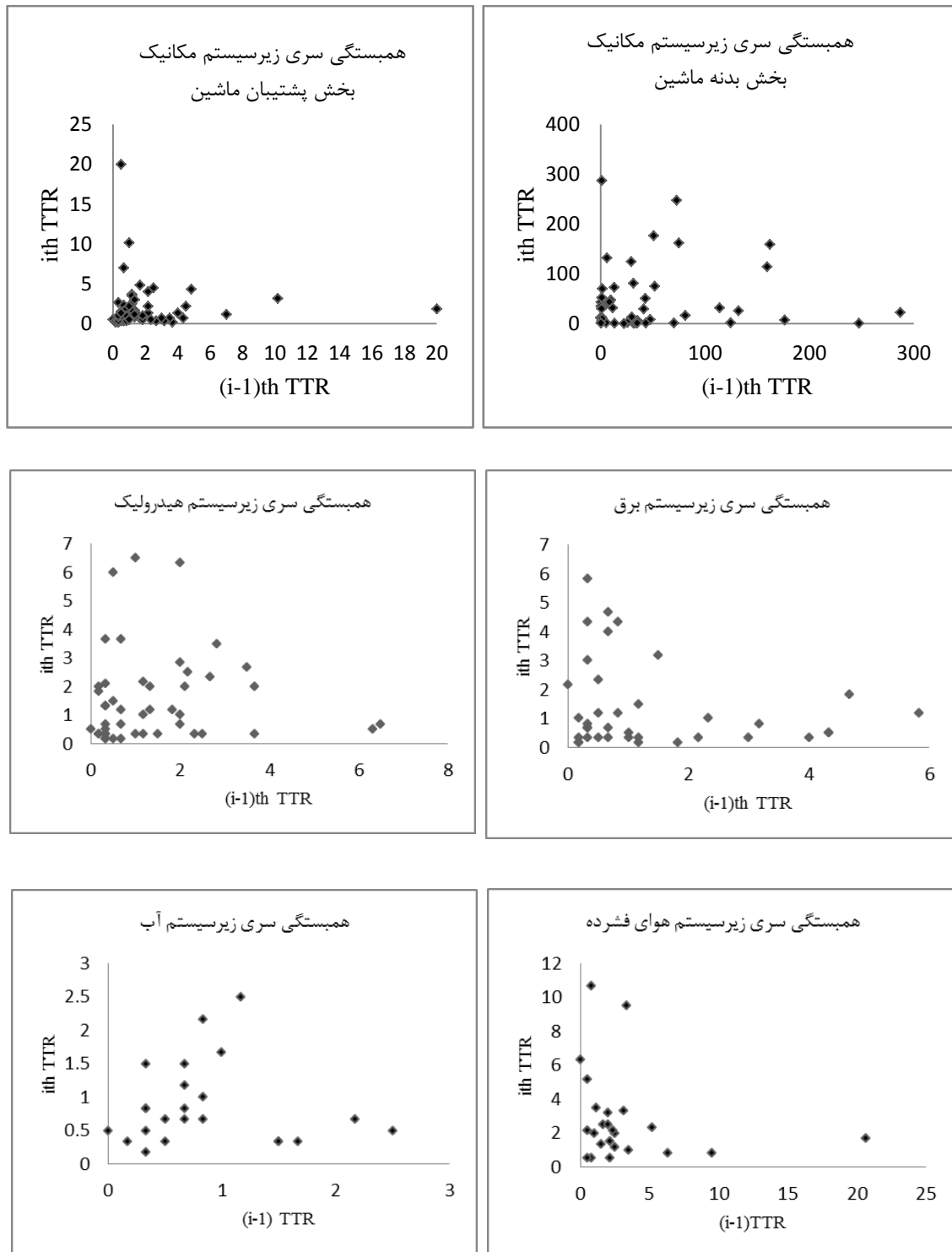
<sup>۱</sup>. Mechanical1

چنان که در شکل ۵-۲۳ دیده می‌شود، قابلیت اطمینان کل ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین پس از طی ۵۵ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان دستگاه در طی ۱۰ ساعت اول، حدود ۶۵ درصد کاهش می‌یابد که میزان قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

#### ۵-۵- تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار خط یک مترو تبریز

فرآیند مدل‌سازی و تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری نیز همانند بحث قابلیت اطمینان می‌باشد با این تفاوت که در این بخش به‌جای داده‌های خرابی (TBFs) از داده‌های تعمیر و نگهداری (TTRs) استفاده می‌شود. بنابراین بعد از تهیه پایگاه داده و طبقه‌بندی داده‌های تعمیر هر زیرسیستم، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفاری تمام مقطع تونل، انجام آزمون روند می‌باشد. در این بخش نیز از روش هندبوک نظامی برای این منظور استفاده شده و نتایج آن برای داده‌های تعمیر و نگهداری همه‌ی زیرسیستم‌های ماشین مورد مطالعه در جدول ۵-۲ آورده شده است. فرض صفر در این آزمون آن است که داده‌ها از فرآیند پواسن ناهمگن (مثل قانون توان) تبعیت نمی‌کنند. بنابراین در صورت رد شدن فرض صفر، وجود روند در داده‌ها تأیید می‌گردد.

نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقدار پارامتر محاسبه شده  $U$  برای همه‌ی زیرسیستم‌ها در محدوده‌ی حد بالا و حد پایین مقادیر به‌دست آمده از توزیع کی - دو ( $\chi_{0.025}^2$  و  $\chi_{0.975}^2$ ) با توجه به درجه آزادی آن‌ها قرار دارد. بنابراین داده‌های تعمیر ثبت شده برای این زیرسیستم‌ها فاقد روند بوده و از آنجایی که در داده‌های تعمیر این زیرسیستم‌ها همبستگی سری نیز مشاهده نگردید روش آمار کلاسیک یا فرآیند تجدید شونده برای مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم‌ها انتخاب گردید. نتایج آزمون همبستگی سری برای زیرسیستم‌های ماشین در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۴- آزمون همبستگی سری برای داده‌های تعمیر

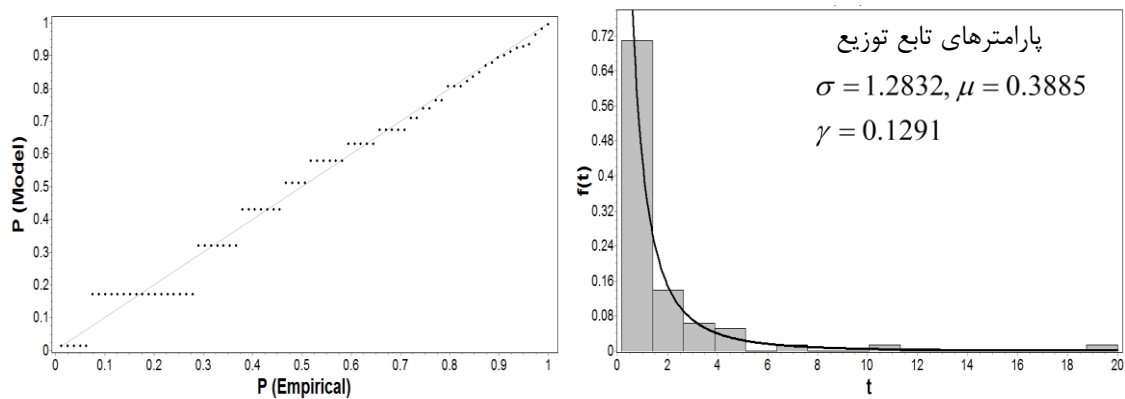
جدول ۵-۲- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های تعمیر زیرسیستم‌ها

زیرسیستم TBM	تعداد تعمیر	درجه آزادی	U محاسبه شده	حد بالا توزیع $\chi^2$	حد پایین توزیع $\chi^2$	روند	همبستگی سری	روش مدل‌سازی
مکانیک (پشتیبان)	۷۹	۱۵۶	۱۹۲/۴۶	۱۹۴/۳۸	۱۲۳/۳۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
مکانیک (بدنه)	۴۹	۹۶	۱۲۱/۵۷	۱۲۵/۰۰	۷۰/۷۳۸	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
برق	۳۸	۷۴	۶۰/۱۹	۹۹/۷	۵۲/۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
هیدرولیک	۴۷	۹۲	۱۰۰/۷	۱۲۰/۴	۶۷/۴	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
هوای فشرده	۲۴	۴۶	۳۲/۸۹	۶۶/۶	۲۹/۱	ندارد	ندارد	تجدیدشونده
آب	۲۳	۴۴۳۸	۴۹/۹۸	۶۴/۲	۲۷/۶	ندارد	ندارد	تجدیدشونده

با توجه به نتایج آزمون همبستگی سری در شکل فوق مشاهده می‌شود برای تمام زیرسیستم‌ها، داده‌های تعمیر طبق آزمون همبستگی سری، دارای نظم و ترتیب خاصی نبوده و به‌صورت پراکنده توزیع شده‌اند. از این‌رو، داده‌های تعمیر این زیرسیستم‌ها فاقد همبستگی سری می‌باشند.

#### ۵-۵-۱- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک

با مشخص شدن داده‌های تعمیر زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بخش بدنه ماشین و محاسبه TTRs برای این زیرسیستم‌ها، نتایج آزمون روند مطابق جدول ۵-۲ نشان داد که داده‌های تعمیر این زیرسیستم‌ها همانند داده‌های خرابی فاقد روند می‌باشند و بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم‌ها از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل داده‌های مکانیک بخش پشتیبان ماشین با استفاده از نرم افزار Easy fit نشان داد که تابع توزیع لاگ نرمال سه پارامتری دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۱۰۸۲ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است.

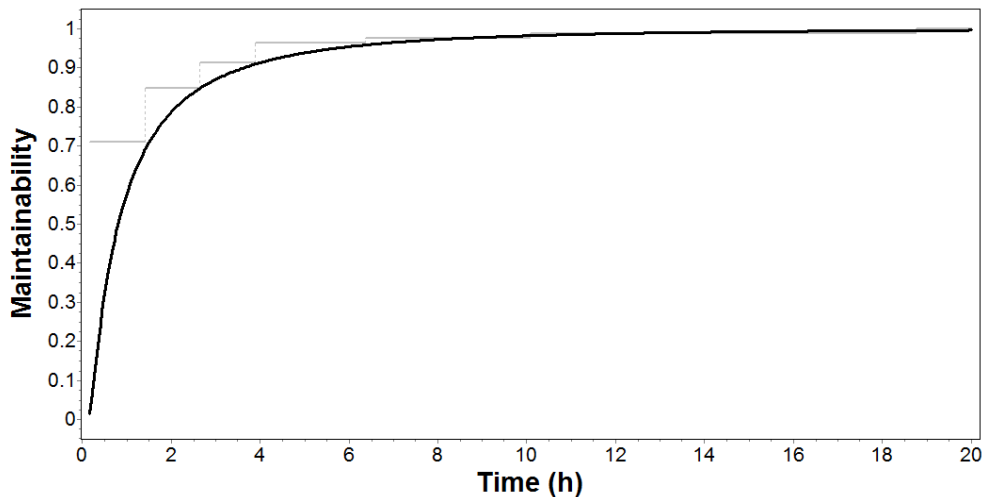


شکل ۵-۲۵- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک پشتیبان بدین ترتیب با استفاده از پارامترهای تابع توزیع چگالی تعمیر، مدل‌های قابلیت تعمیر و نگهداری و نرخ تعمیر این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۱۴ و ۵-۱۵ محاسبه گردید و منحنی‌های معادل با این روابط مطابق شکل‌های ۵-۲۶ و ۵-۲۷ به دست آمد.

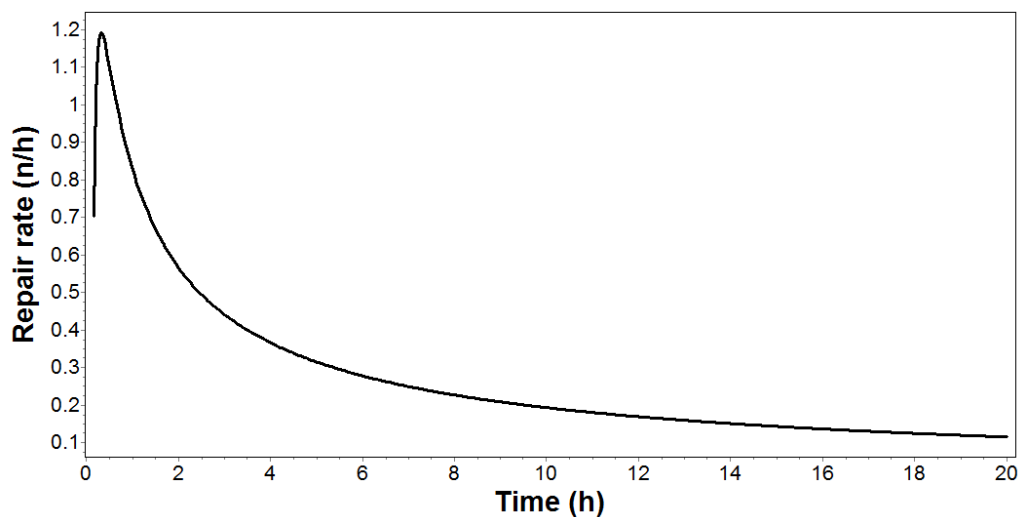
$$M_{Mechanical}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - 0.1291) - 0.3885}{1.2832}\right) \quad (14-5)$$

$$\mu_{Mechanical}(t) = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma(t - \gamma) \cdot R(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t - 0.1291) - 0.3885}{2.431}\right)}{1.2832(t - 0.1291) \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - 0.167) - 0.621}{1.2832}\right)\right)} \quad (15-5)$$

نتایج مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین (شکل ۵-۲۶) نشان می‌دهد که حداکثر زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در این زیرسیستم کمتر از ۲۰ ساعت می‌باشد و با احتمال ۹۰ درصد، تعمیرات در مدت زمان حداکثر ۵ ساعت صورت می‌گیرد و ماشین به فعالیت خود ادامه می‌دهد.



شکل ۵-۲۶- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین

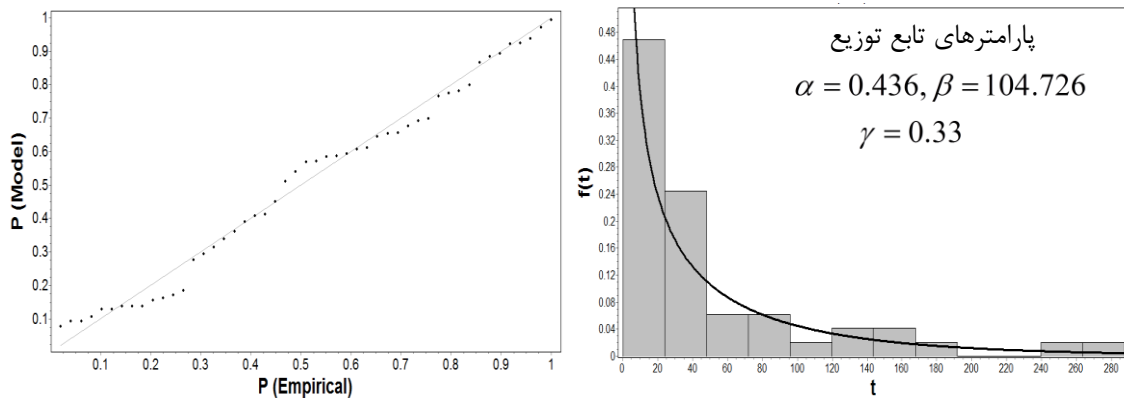


شکل ۵-۲۷- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین

همچنین منحنی نرخ تعمیر نشان می‌دهد که زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان در ابتدا دارای نرخ تعمیر افزایشی می‌باشد و سپس در مدت زمان کوتاهی نرخ تعمیر کاهش می‌یابد. نرخ بالای تعمیر در زمان کمتر از ۲ ساعت به دلیل تعمیر سریع خرابی‌های حادث شده در نوار نقاله، سیستم تزریق فوم و دستگاه نصاب سگمنت (ارکتور) می‌باشد.

نتایج تحلیل داده‌های مکانیک بخش بدنه ماشین با استفاده از نرم افزار نیز نشان داد که تابع توزیع گاما سه پارامتری دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۱۰۵۰ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با

هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین در شکل ۵-۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۸- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم مکانیک بدنه

بدین ترتیب با استفاده از پارامترهای تابع توزیع چگالی تعمیر، مدل‌های قابلیت تعمیر و نگهداری و نرخ تعمیر این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۱۶ و ۵-۱۷ محاسبه گردید و منحنی‌های معادل با این روابط مطابق شکل‌های ۵-۲۹ و ۵-۳۰ به دست آمد.

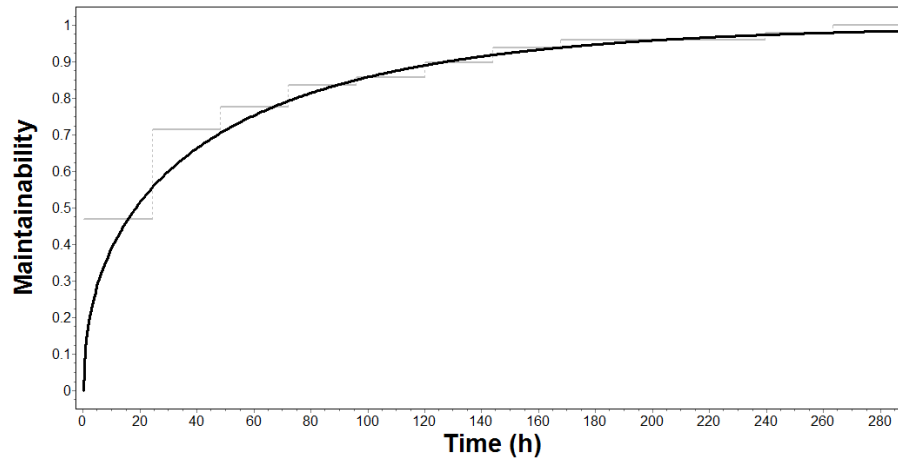
$$M_{\text{Mechanical2}}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.33)/104.726}(0.436)}{\Gamma(0.436)} = 0.49 \left( \Gamma_{(t-0.33)/104.726}(0.436) \right) \quad (5-16)$$

$$\mu_{\text{Mechanical2}}(t) = \frac{(t-\gamma)^{\alpha-1} e^{-\frac{t-\gamma}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \left( \Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha) \right)} = \frac{(t-0.33)^{-0.564} e^{-\frac{t-0.33}{1.58}}}{7.6 \left( \Gamma_{(t-0.33)/104.726}(0.436) \right)} \quad (5-17)$$

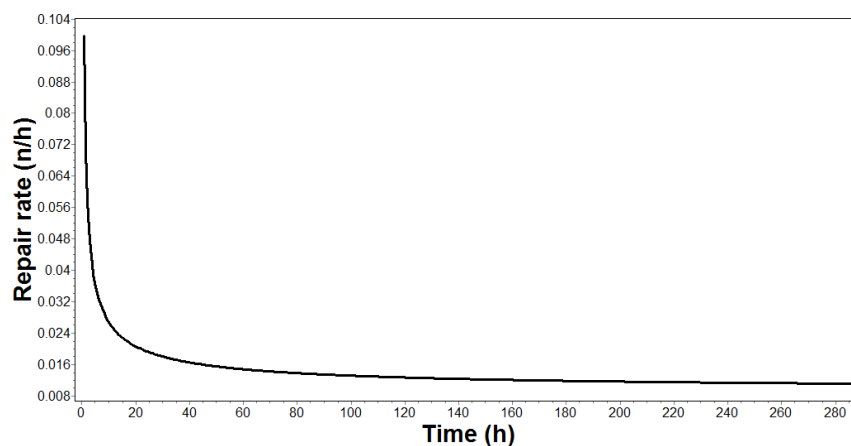
منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار نشان می‌دهد که حداکثر زمان لازم برای این که تمامی خرابی‌های اتفاق افتاده در این زیرسیستم، تعمیر شوند و ماشین به فعالیت خودش ادامه بدهد بیش از ۲۶۰ ساعت می‌باشد که مدت زمان بسیار زیادی در مقایسه با



سایر زیرسیستم‌ها می‌باشد. مدت زمان بالای تعمیرات مربوط به حالتی است که تعداد زیادی ابزارهای برشی مورد تعمیر و نگهداری قرار بگیرند.



شکل ۵-۲۹- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین



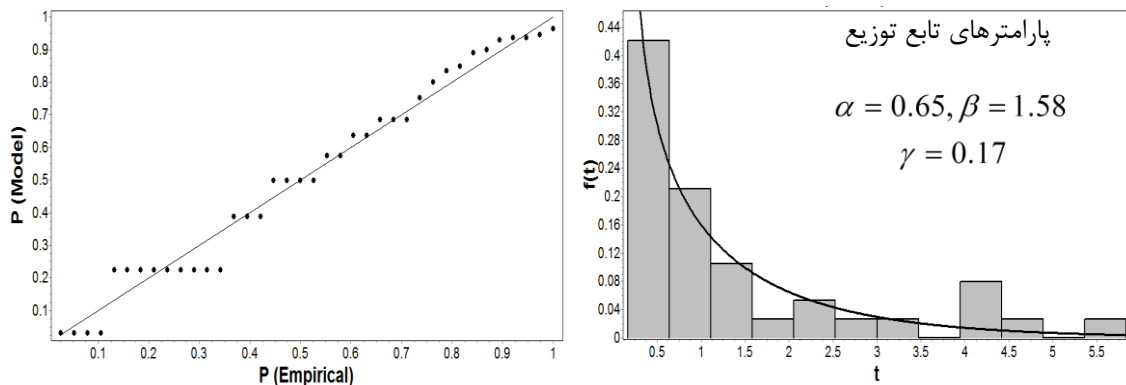
شکل ۵-۳۰- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین

همچنین منحنی نرخ تعمیر نشان می‌دهد که زیرسیستم مکانیک بدنه ماشین در ابتدا دارای نرخ تعمیر حدود ۰/۱ تعمیر در ساعت بوده و سپس با کاهش شدید بعد از گذشت ۲۰ ساعت به حدود ۰/۰۲ می‌رسد که بیان کننده میزان پایین احتمال تعمیر می‌باشد. این موضوع بیان کننده زمان بالای تعمیر و نگهداری برخی از قطعات و اجزای این زیرسیستم می‌باشد. با توجه به پایگاه داده تهیه شده، مشخص می‌شود که تعمیر و نگهداری ابزار برشی ماشین حفار بیشترین زمان را به خود اختصاص داده

است. بنابراین ضروری است که برای تعمیر و نگهداری این قسمت از زیرسیستم مکانیک بدنه ماشین تمهیدات ویژه‌ای اندیشیده شود تا با کاهش زمان بازرسی و تعمیر و نگهداری، قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم افزایش یابد.

### ۵-۵-۲- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق

نتایج آزمون روند برای زیرسیستم برق نشان داد که در داده‌های تعمیر این زیرسیستم روند وجود ندارد. همچنین با توجه به شکل ۵-۲۴، در این داده‌ها همبستگی نیز مشاهده نگردید لذا برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل با استفاده از نرم افزار نشان داد که تابع توزیع گامای سه پارامتری دارای کمترین مقدار K-S برابر با ۰/۱۳۲۲ در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم برق در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده است.



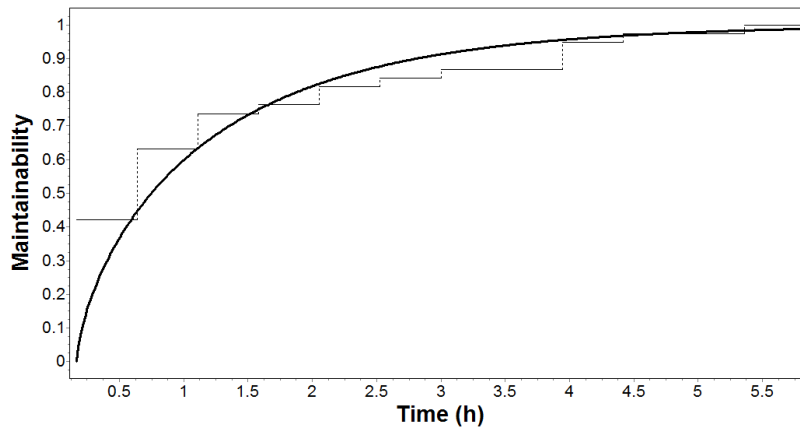
شکل ۵-۳۱- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم برق

با به دست آمدن پارامترهای تابع توزیع چگالی تعمیر زیرسیستم برق، مدل قابلیت تعمیر و نگهداری و همچنین مدل نرخ تعمیر این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۱۸ و ۵-۱۹ محاسبه گردید.

$$M_{\text{Electrical}}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.17)/1.58}(0.65)}{\Gamma(0.65)} = 1.385 \left( \Gamma_{(t-0.17)/1.58}(0.65) \right) \quad (5-18)$$

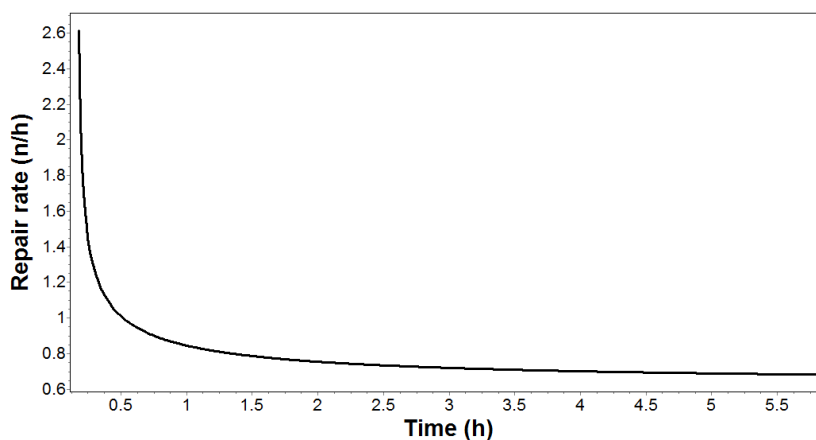
$$\mu_{Electrical}(t) = \frac{(t-\gamma)^{\alpha-1} e^{-\frac{t-\gamma}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)} = \frac{(t-0.17)^{-0.35} e^{-\frac{0.17-t}{1.58}}}{0.5 \Gamma_{(t-0.17)/1.58}(0.65)} \quad (19-5)$$

منحنی معادل با روابط فوق در شکل‌های ۳۲-۵ و ۳۳-۵ ارائه شده است.



شکل ۳۲-۵- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق

نتایج مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری مطابق شکل ۳۲-۵ نشان می‌دهد که حداکثر ۵/۶ ساعت زمان لازم است که کلیه خرابی‌های زیرسیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز تعمیر گردند. همچنین در ۹۰ درصد حالات، مدت زمان تعمیر این زیرسیستم کمتر از ۳/۶ ساعت می‌باشد. این میزان مبین سهولت تعمیرات در این زیرسیستم می‌باشد.

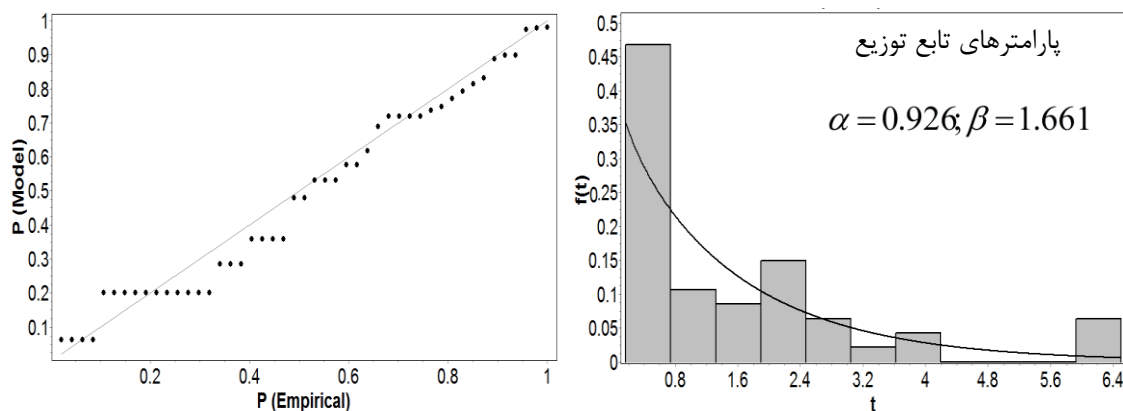


شکل ۳۳-۵- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم برق

مطالعه رفتار تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق نشان می‌دهد که نرخ تعمیر این زیرسیستم در ابتدا بالا بوده و به میزان  $2/6$  تعمیر در ساعت می‌باشد ولی بعد از گذشت  $1/2$  ساعت به میزان  $0/8$  نزول پیدا می‌کند. نرخ بالای تعمیر در ابتدای کار این زیرسیستم نشان از دوره شروع به کار آن دارد که پس از زمان کوتاهی به بازه عمر مفید خود می‌رسد.

### ۵-۳-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک

با توجه به نتایج آزمون روند برای زیرسیستم هیدرولیک، داده‌های تعمیر این زیرسیستم فاقد روند بوده و همچنین این داده‌ها مستقل نیز می‌باشند لذا برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد که تابع توزیع گاما با مقدار K-S برابر با  $0/1249$  بهترین تطابق را بر روی داده‌های تعمیر و نگهداری این زیرسیستم دارد. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های زیرسیستم هیدرولیک در شکل ۵-۳۴ نشان داده شده است. مدل‌های قابلیت تعمیر و نگهداری و نرخ تعمیر این زیرسیستم با توجه به تابع توزیع چگالی تعمیر مطابق روابط ۵-۲۴ و ۵-۲۵ به دست آمد. همچنین منحنی‌های مربوط به این روابط نیز در شکل‌های ۵-۳۵ و ۵-۳۶ آورده شده است.

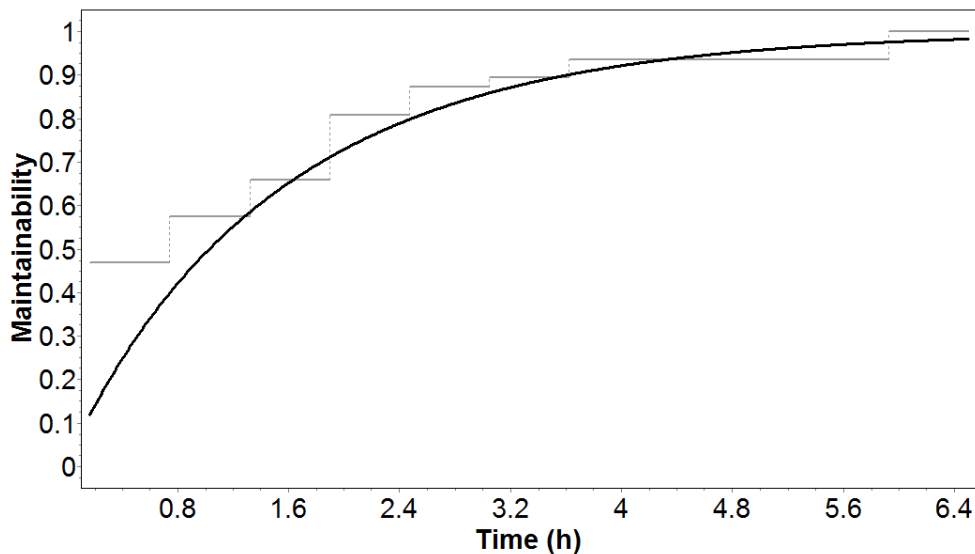


شکل ۵-۳۴- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هیدرولیک

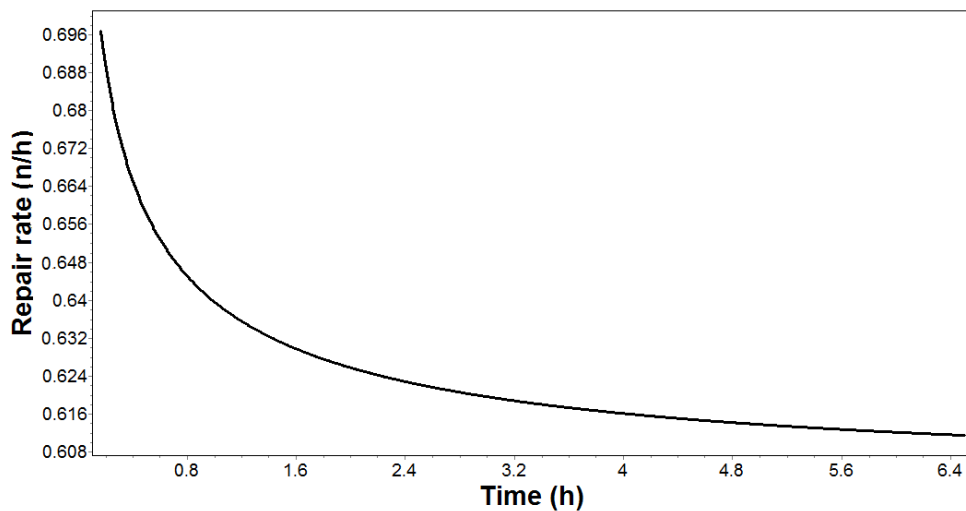
$$M_{\text{Hydraulic}}(t) = \frac{\Gamma_{t/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{t/1.661}(0.926)}{\Gamma(0.926)} = 1.049 (\Gamma_{0.6t}(0.926)) \quad (24-5)$$

$$\mu_{\text{Hydraulic}}(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{(-t/\beta)}}{\beta^\alpha (\Gamma_{t/\beta}(\alpha))} = \frac{t^{-0.074} e^{(-t/1.661)}}{1.6 (\Gamma_{0.6t}(0.926))} \quad (25-5)$$

با دقت در منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک مشخص می‌شود که در ۵۰ درصد حالات، تعمیرات این زیرسیستم در مدت زمان کمتر از ۱ ساعت صورت می‌گیرند و در بیش از ۹۰ درصد حالات حداکثر ۴ ساعت طول می‌کشد تا خرابی‌ها برطرف گردند. بنابراین بیشتر تعمیرات این زیرسیستم ساده و جزئی بوده و در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شوند.



شکل ۵-۳۵- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هیدرولیک

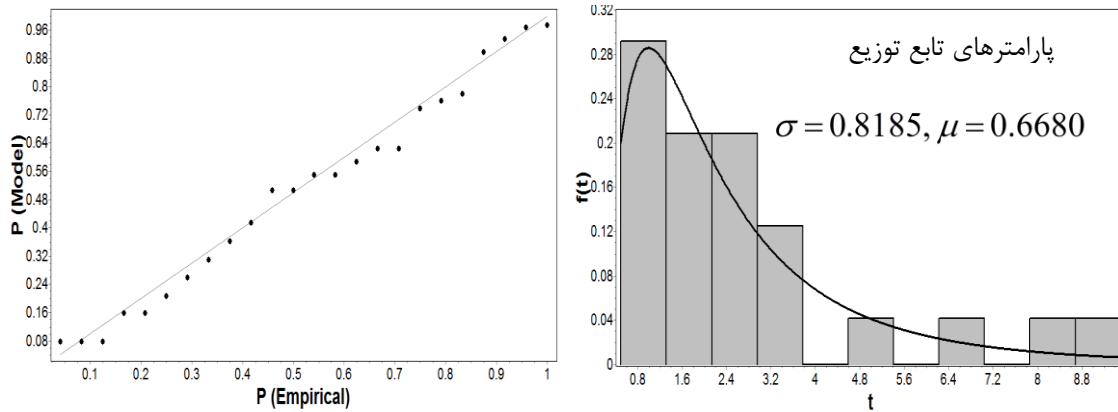


شکل ۵-۳۶- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم هیدرولیک

منحنی نرخ تعمیر این زیرسیستم نیز از کاهش کمی برخوردار بوده و از حدود ۰/۷ تعمیر در ساعت در ابتدای کار به میزان ۰/۶ بعد از طی زمان حدود ۵ ساعت می‌رسد و از این فاز به بعد تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

#### ۵-۴-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هوای فشرده

داده‌های تعمیر زیرسیستم هوای فشرده نیز همانند دو زیرسیستم برق و هیدرولیک مانا و مستقل تشخیص داده شدند بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم نیز از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. با تحلیل‌های صورت گرفته، تابع توزیع لاگ نرمال با مقدار K-S برابر با ۰/۰۹۵۶ به عنوان بهترین تابع نشان دهنده توزیع داده‌های تعمیر زیرسیستم هوای فشرده انتخاب گردید. تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های این زیرسیستم در شکل ۵-۳۷ آورده شده است.

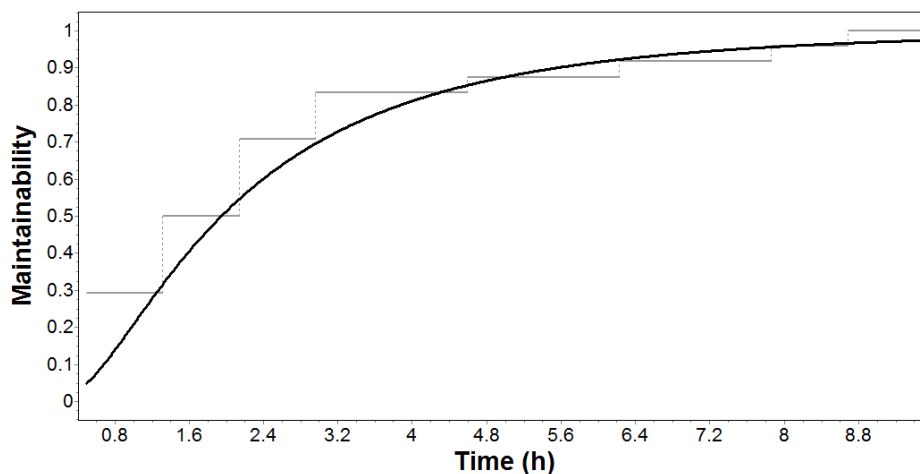


شکل ۵-۳۷- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم هوای فشرده

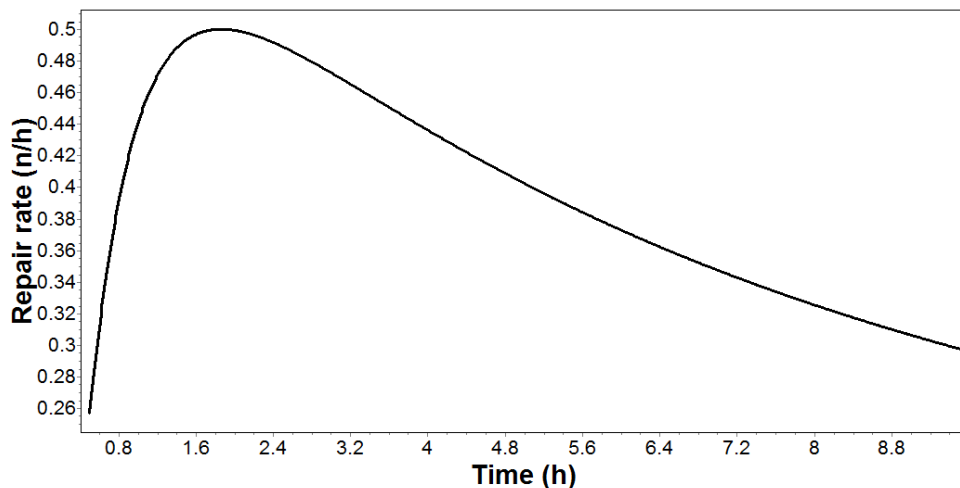
بدین ترتیب با استفاده از پارامترهای تابع توزیع چگالی تعمیر، مدل‌های قابلیت تعمیر و نگهداری و نرخ تعمیر این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۲۲ و ۵-۲۳ محاسبه گردید و منحنی‌های معادل با این روابط مطابق شکل‌های ۵-۳۸ و ۵-۳۹ به دست آمد.

$$M_{Pneumatic}(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - 0.6680}{0.8185}\right) \quad (۲۲-۵)$$

$$\mu_{Pneumatic}(t) = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma \cdot M(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t) - 0.6680}{0.8185}\right)}{0.8185t \cdot \Phi\left(\frac{\ln(t) - 0.6680}{0.8185}\right)} \quad (۲۳-۵)$$



شکل ۵-۳۸- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هوای فشرده



شکل ۵-۳۹- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم هوای فشرده

مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم هوای فشرده نشان می‌دهد که این زیرسیستم از قابلیت تعمیر و نگهداری کمتری نسبت به دو زیرسیستم برق و هیدرولیک برخوردار است و بعد از گذشت حدود ۵/۵ ساعت از عملیات تعمیر و نگهداری، ۹۰ درصد خرابی‌ها برطرف می‌گردند. این امر بیانگر آن است که تعمیرات این زیرسیستم تا حدودی زمان‌بر بوده و بایستی تمهیدات بیشتری در تعمیر این زیرسیستم لحاظ شود. همچنین نرخ تعمیر این زیرسیستم از ۰/۲۶ تعمیر در ساعت در ابتدای کار به ۰/۵ تعمیر در ساعت بعد از طی ۲ ساعت رسیده و پس از این فاز نزولی شده و با شیب نسبتاً کمی کاهش می‌یابد.

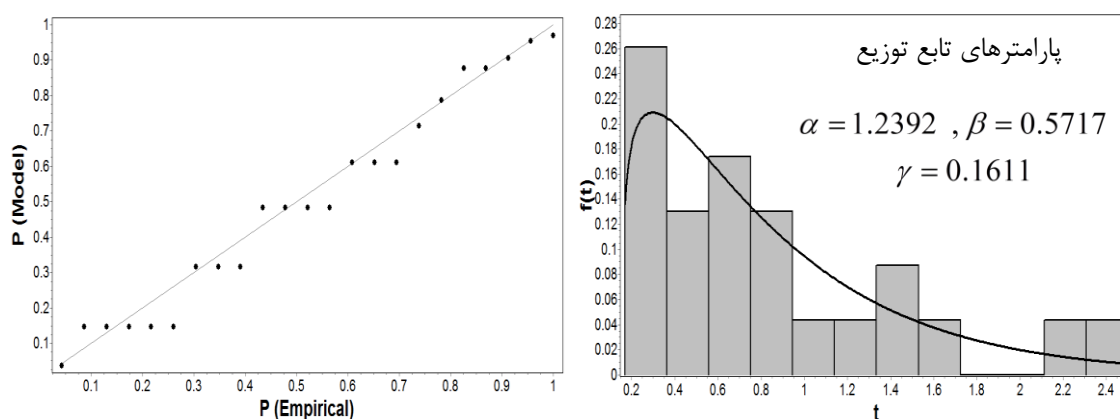
#### ۵-۵-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم آب

با توجه به نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری، داده‌های تعمیر زیرسیستم آب ماشین حفار خط یک مترو تبریز نیز فاقد روند بوده و مستقل می‌باشند بنابراین برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم نیز از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. با تحلیل‌های صورت گرفته، تابع گاما سه پارامتری با مقدار K-S برابر با ۰/۱۲۳۵ تطابق خوبی را بر داده‌های تعمیر زیرسیستم آب نشان داد و به عنوان بهترین تابع توزیع برازش انتخاب گردید. تطابق ظاهری تابع



توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام داده‌ها، پارامترهای تابع توزیع و همچنین نمودار P-P برای داده‌های این زیرسیستم در شکل ۵-۴۰ نشان شده است.

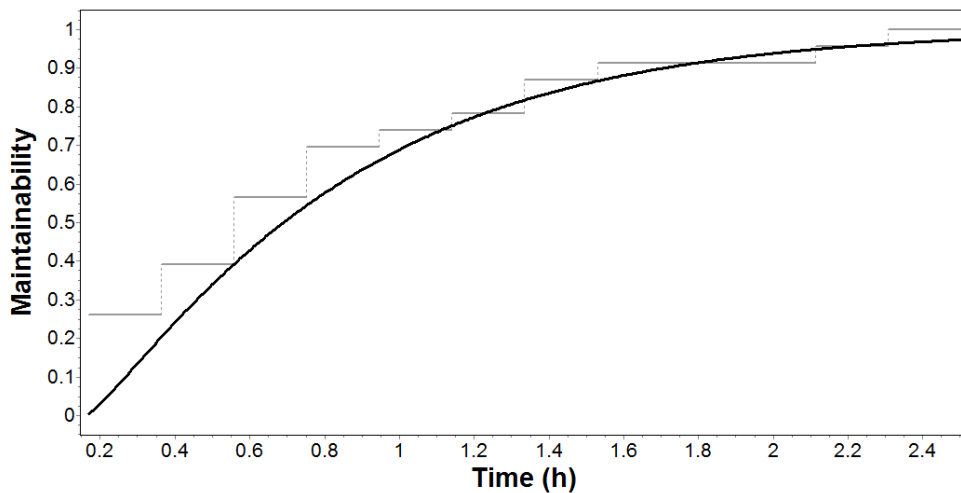
با استفاده از پارامترهای تابع توزیع چگالی تعمیر، مدل‌های قابلیت تعمیر و نگهداری و نرخ تعمیر این زیرسیستم مطابق روابط ۵-۲۴ و ۵-۲۵ محاسبه گردید و منحنی‌های معادل با این روابط مطابق شکل‌های ۵-۴۱ و ۵-۴۲ به دست آمد.



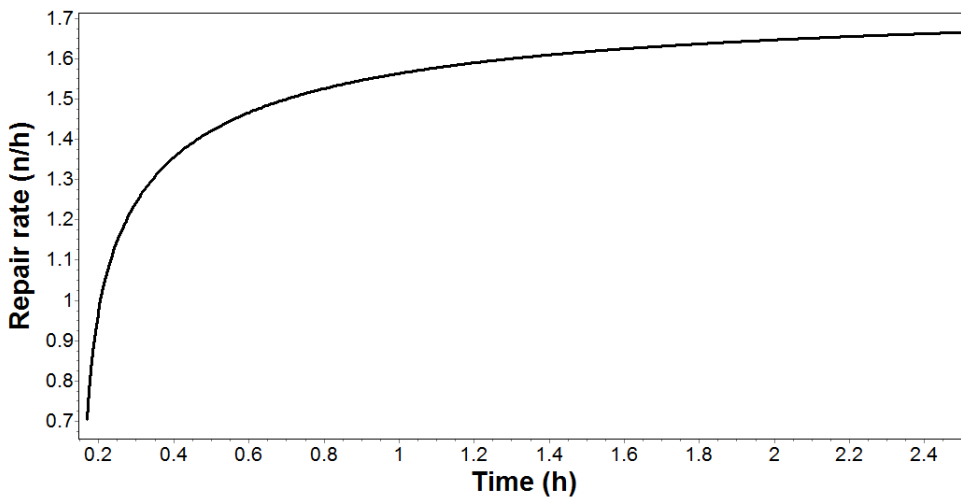
شکل ۵-۴۰- نمودار فراوانی تعمیرها و پارامترهای تابع توزیع و نمودار P-P برای زیرسیستم آب

$$M_{Water}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.1611)/0.5717}(1.2392)}{\Gamma(1.2392)} \quad (24-5)$$

$$\mu_{Water}(t) = \frac{(t-\gamma)^{\alpha-1} e^{-\frac{t-\gamma}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)} = \frac{(t-0.1611)^{0.2392} e^{-\frac{0.1611-t}{0.5717}}}{0.5 \Gamma_{(t-0.1611)/0.5717}(1.2392)} \quad (25-5)$$



شکل ۵-۴۱- منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم آب

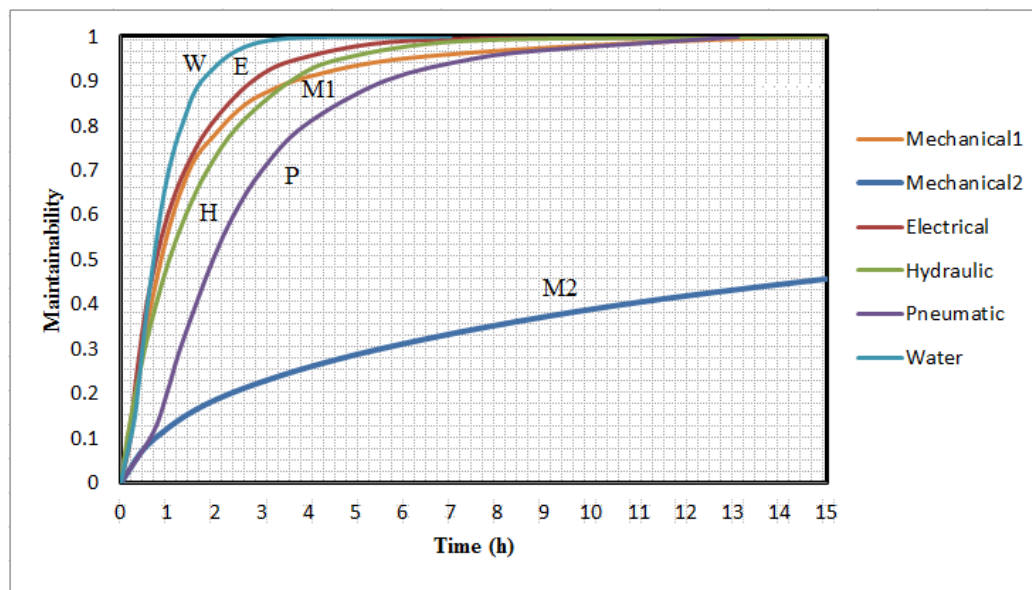


شکل ۵-۴۲- منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم آب

مدل سازی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم آب نشان می دهد که این زیرسیستم از قابلیت تعمیر و نگهداری بسیار خوبی برخوردار است. به طوری که در مدت زمان کمتر از ۳ ساعت تمامی خرابی های این زیرسیستم تعمیر می شوند. همچنین نرخ تعمیر این زیرسیستم از ۰/۷ تعمیر در ساعت در ابتدای کار به ۱/۷ تعمیر در ساعت بعد از طی حدود ۳ ساعت رسیده و سیر صعودی دارد.

## ۵-۵-۶- قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز

نتایج مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز در شکل ۴۳-۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل زیرسیستم‌های آب و برق دارای بیشترین قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد. همچنین زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین (M2) دارای قابلیت تعمیر و نگهداری بسیار کمتری از سایر زیرسیستم‌ها می‌باشد. با دقت در این منحنی‌ها مشخص می‌شود که در مدت زمان حداکثر ۱۵ ساعت تمامی تعمیرات پنج زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین، آب، برق، هیدرولیک و هوای فشرده صورت می‌گیرد. این در حالی است که در این مدت حدود ۴۵ درصد احتمال تعمیر در زیرسیستم مکانیک بخش بدنه وجود دارد. بنابراین ضروری است که با کنترل و نظارت بیشتر و انجام بازرسی‌های دوره‌ای و برنامه‌ریزی شده و همین‌طور



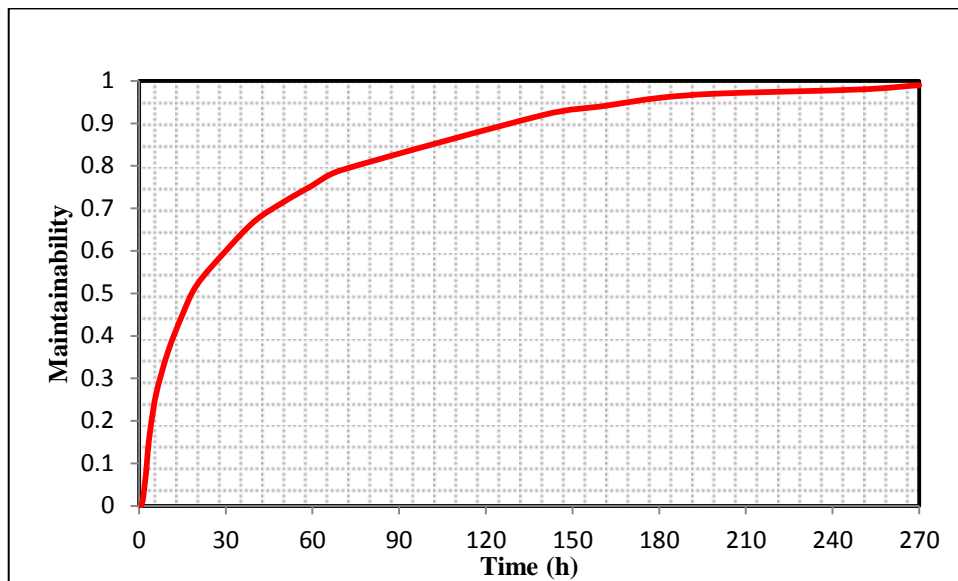
شکل ۴۳-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های مختلف ماشین حفار

اقدامات پیش‌گیرانه برای این زیرسیستم بحرانی ماشین حفار خط یک مترو تبریز، میزان وقوع خرابی و توقف‌های ناخواسته در این زیرسیستم کاهش یابد تا به تبع آن تعمیرات کمتری مورد نیاز باشد و عملکرد ماشین بهبود یابد.

برای محاسبه و مدل سازی قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین، با توجه به شبکه سری زیرسیستم‌ها که برای محاسبه قابلیت اطمینان ماشین در بخش قبل محاسبه شد از رابطه قابلیت تعمیر و نگهداری مطابق رابطه ۲۶-۵ استفاده شد. شکل ۴۴-۵ مدل قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز را نشان می‌دهد.

$$M_{TBM} = \prod_{i=1}^5 M_i = M_{Mechanical1} \cdot M_{Mechanical2} \cdot M_{Electrical} \cdot M_{Hydraulic} \cdot M_{Pneumatic} \cdot M_{Water} \quad (26-5)$$

در رابطه فوق،  $M_{TBM}$  قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین و  $M_i$  قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم  $i$ ام می‌باشد که شامل هر شش زیرسیستم در نظر گرفته شده برای ماشین می‌باشد.



شکل ۴۴-۵- قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار خط یک مترو تبریز

نتایج مدل سازی قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز نشان می‌دهد که منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری این ماشین بیشترین تأثیرپذیری را از قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین دارا می‌باشد. دلیل این امر این است که با توجه به شکل ۴۳-۵، قابلیت تعمیر و نگهداری پنج زیرسیستم مکانیک پشتیبان ماشین، برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب با

حداکثر زمان تعمیر ۱۵ ساعت به یک می‌رسند و بنابراین از این زمان به بعد قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار تنها وابسته به قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین می‌باشد. منحنی فوق نشان می‌دهد که در یک شیفت کاری ۱۲ ساعته حدود ۴۰ درصد تعمیرات ماشین حفار صورت می‌پذیرد که این میزان تعمیرات برای ایجاد پیوستگی در عملیات حفاری تونل تا حدودی پایین می‌باشد. همچنین برای کاهش زمان تعمیرات و افزایش پیوستگی در عملیات حفاری لازم است که برای انجام تعمیرات زمان بر به خصوص تعویض ابزار برشی کله حفاری ماشین، تمهیدات ویژه‌ای از قبیل افزایش پرسنل گروه تعمیرات و استفاده از پرسنل با مهارت بیشتر اتخاذ گردد.

#### ۵-۶- قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز

برای محاسبه قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های ماشین از رابطه ۲-۱۷ استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با توجه به پایگاه داده و داده‌های خرابی (TBFs) و همچنین تعمیر و نگهداری (TTRs) هر کدام از زیرسیستم‌ها، مقادیر MTBF و MTTR زیرسیستم‌ها تعیین شده و سپس قابلیت دسترسی آن‌ها محاسبه شده است.

#### ۵-۶-۱- قابلیت دسترسی زیرسیستم مکانیک

میانگین زمان بین خرابی‌ها برای زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین حفار خط یک مترو تبریز برابر ۳۵/۸۷ ساعت و همچنین میانگین زمان تعمیرات این زیرسیستم برابر با ۱/۶۳ ساعت می‌باشد. با توجه به رابطه ۲-۱۷ قابلیت دسترسی این زیرسیستم برابر است با:

$$A_{Mechanical} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{35.87}{35.87 + 1.63} = 95.7\% \quad (۲۷-۵)$$

با توجه به میزان پایین زمان تعمیرات، این زیرسیستم از قابلیت دسترسی بالایی برخوردار است.

همچنین میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان لازم برای تعمیرات زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار به ترتیب ۵۸/۱۵ و ۴۸/۲ ساعت می‌باشد. بنابراین قابلیت دسترسی این زیرسیستم برابر است با:

$$A_{Mechanical2} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{58.15}{58.15 + 48.2} = 54.7\% \quad (28-5)$$

این زیرسیستم به دلیل بالا بودن میانگین زمان تعمیر و نگهداری آن از قابلیت دسترسی نسبتاً پایینی برخوردار است. به دلیل سری بودن زیرسیستم‌های ماشین حفار، پایین بودن قابلیت دسترسی این زیرسیستم تأثیر خیلی زیادی در کاهش قابلیت دسترسی کل ماشین خواهد داشت.

#### ۵-۶-۲- قابلیت دسترسی زیرسیستم برق

زیرسیستم برق ماشین مورد مطالعه از میانگین زمان بین خرابی‌های نسبتاً بالایی برخوردار است. همچنین متوسط زمان لازم برای تعمیر خرابی‌های اتفاق افتاده در این زیرسیستم تا حدود زیادی کم بوده و بنابراین این زیرسیستم دارای قابلیت دسترسی بالایی می‌باشد. مقادیر میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تعمیرات برای این زیرسیستم به ترتیب برابر با ۶۱/۶۷ و ۱/۳۷ ساعت می‌باشد. با توجه به این مقادیر، قابلیت دسترسی زیرسیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز برابر است با:

$$A_{Electrical} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{61.67}{61.67 + 1.37} = 97.8\% \quad (29-5)$$

#### ۵-۶-۳- قابلیت دسترسی زیرسیستم هیدرولیک

زیرسیستم هیدرولیک ماشین حفار خط یک مترو تبریز نسبت به زیرسیستم برق این ماشین از میانگین زمان بین خرابی‌های کمتر و همچنین میانگین زمان تعمیرات بیشتری برخوردار است.

میانگین زمان بین خرابی‌های این زیرسیستم برابر با ۵۴/۵۷ ساعت و میانگین زمان تعمیرات نیز ۱/۵۴ ساعت می‌باشد. بنابراین قابلیت دسترسی این زیرسیستم برابر است با:

$$A_{Hydraulic} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{54.57}{54.57 + 1.54} = 97.2\% \quad (30-5)$$

#### ۵-۶-۴- قابلیت دسترسی زیرسیستم هوای فشرده

زیرسیستم هوای فشرده ماشین مورد مطالعه نسبت به هر سه زیرسیستم مکانیک، برق و هیدرولیک از تعداد خرابی‌های کمتری برخوردار است. میانگین زمان بین خرابی‌های این زیرسیستم برابر با ۱۰۶/۱۹ ساعت می‌باشد. که میزان بالایی را نشان می‌دهد. با وجود این، تعمیر این خرابی‌ها نسبتاً زمان‌بر بوده و حدود دو برابر زمان مورد نیاز برای تعمیرات زیرسیستم‌های برق و هیدرولیک می‌باشد. قابلیت دسترسی این زیرسیستم برابر است با:

$$A_{Pnumatic} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{106.19}{106.19 + 2.97} = 97.3\% \quad (31-5)$$

#### ۵-۶-۵- قابلیت دسترسی زیرسیستم آب

این زیرسیستم کمترین میزان خرابی در بین سایر زیرسیستم‌ها را به خود اختصاص داده است. همچنین میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیرات این زیرسیستم از سایر زیرسیستم‌ها کمتر بوده و برابر با ۰/۸۷ ساعت می‌باشد. بنابراین این زیرسیستم دارای بیشترین میزان قابلیت دسترسی در ماشین حفار خط یک مترو تبریز می‌باشد که برابر است با:

$$A_{Water} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{106.45}{106.45 + 0.87} = 99.2\% \quad (32-5)$$

بدین ترتیب با مشخص شدن قابلیت دسترسی هر کدام از زیرسیستم‌ها و با توجه به شبکه سری زیرسیستم‌ها، قابلیت دسترسی کل ماشین به صورت زیر محاسبه گردید.

$$A_{TBM} = \prod_{i=1}^5 A_i = A_{Mechanical1} \cdot A_{Mechanical2} \cdot A_{Electrical} \cdot A_{Hydraulic} \cdot A_{Pneumatic} \cdot A_{Water} = 48.03\% \quad (32-5)$$

لازم به ذکر است که میزان دسترسی فوق فقط شامل تمامی تأخیرها و توقف‌های ناشی از ماشین حفار می‌باشد و چنانچه شرایط عملیاتی پروژه کاملاً ایده‌آل باشد و هیچ‌گونه توقف دیگری در عمل وجود نداشته باشد قابلیت دسترسی همان ضریب بهره‌وری ماشین خواهد بود که برای محاسبات برنامه‌ی زمانی پروژه‌های تونل‌سازی با ماشین‌های حفاری تونل از نوع تعادل فشار زمین می‌تواند دید مناسبی را در اختیار دست اندرکاران صنعت تونل‌سازی قرار دهد. ماشین مورد مطالعه در خط یک مترو تبریز در بازه برداشت داده‌ها که حدود ۲۶ ماه می‌باشد حدود ۳۵۰۰ متر از تونل را حفاری کرده است. تأخیر واگن‌های حمل مواد حفاری شده و تأخیرات ناشی از کنترل فشار سینه کار به ترتیب از دلایل اصلی توقف ماشین حفاری مورد مطالعه بوده است.

#### ۵-۷- تخصیص قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد در مبحث تخصیص قابلیت دسترسی از مقایسه شاخص اهمیت قابلیت دسترسی برحسب MTBF و MTTR استفاده می‌شود که نشان می‌دهد از بین دو پارامتر میانگین زمان بین خرابی و میانگین زمان تعمیر، کدامیک بیشترین تأثیر را بر قابلیت دسترسی کل ماشین دارند. به عبارت دیگر این نتایج به ما کمک می‌کند که برای افزایش و بهبود قابلیت دسترسی ماشین، بر اساس کاهش میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم‌های بحرانی عمل کنیم یا بهتر است که میانگین زمان بین خرابی‌های زیرسیستم‌های بحرانی را افزایش دهیم. نتایج شاخص‌های اهمیت قابلیت دسترسی که در جدول ۳-۵ نشان داده است با استفاده از روابط ۳۳-۵ تا ۳۵-۵ محاسبه شده‌اند.



$$I_A^i = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \prod_{k=1, k \neq i}^n A_k \quad (33-5)$$

$$I_{A,MTBF_i}^i = A_s \times \frac{MTTR_i}{MTBF_i(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (34-5)$$

$$I_{A,MTTR_i}^i = A_s \times \frac{1}{(MTBF_i + MTTR_i)} \quad (35-5)$$

جدول ۳-۵- نتایج شاخص‌های اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های ماشین حفار

$I_{A,MTTR_i}^i$	$I_{A,MTBF_i}^i$	$I_A^i$	زیرسیستم
۰/۰۱۲۸۱	۰/۰۰۰۵۸	۰/۵۰۲	مکانیک بخش پشتیبان
۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۷	۰/۸۷۸	مکانیک بخش بدنه
۰/۰۰۷۶۲	۰/۰۰۰۱۷	۰/۴۹۱	برق
۰/۰۰۸۵۶	۰/۰۰۰۲۴	۰/۴۹۴	هیدرولیک
۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱۲	۰/۴۹۳	هوای فشرده
۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۸۴	آب

مطابق جدول ۳-۵، داده‌های ستون  $I_A^i$  میزان اهمیت و تأثیر قابلیت دسترسی هر کدام از زیرسیستم‌ها را بر قابلیت دسترسی کل ماشین نشان می‌دهد و هر چقدر این داده‌ها به عدد یک نزدیک باشند مبین اهمیت و تأثیر بیشتر قابلیت دسترسی آن زیرسیستم بر قابلیت دسترسی کل ماشین می‌باشد. لذا زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین بیشترین و زیرسیستم آب کمترین تأثیر را بر قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز دارا می‌باشند. داده‌های محاسبه شده در ستون‌های  $I_{A,MTBF_i}^i$  و  $I_{A,MTTR_i}^i$  نیز میزان اهمیت و تأثیر قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها را با توجه به میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تعمیرات نشان می‌دهند. حال با تعیین شدن زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین به‌عنوان مؤثرترین زیرسیستم بر قابلیت دسترسی کل ماشین، از مقایسه داده‌های محاسبه شده در ستون‌های  $I_{A,MTBF_i}^i$  و  $I_{A,MTTR_i}^i$  برای این زیرسیستم می‌توان نتیجه گرفت که شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر حسب میانگین زمان تعمیرات تأثیر بیشتری از میزان این

شاخص بر حسب میانگین خرابی‌ها دارد بنابراین برای افزایش و بهبود قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز بهتر است که میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم مکانیکبخش بدنه این ماشین کاهش یابد.

## ۵-۸- بهبود قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز با تعمیرات و نگهداری

### پیش‌گیرانه<sup>۱</sup>

به‌طور سنتی، تعمیر و نگهداری به مفهوم رفع خرابی است. با این تعریف فعالیت‌های تعمیر و نگهداری، محدود به تعمیر و یا تعویض قطعه معیوب خواهد بود که صرفاً پس از مشاهده خرابی صورت می‌پذیرد و اصطلاحاً به تعمیر و نگهداری انفعالی<sup>۲</sup>، تعمیر و نگهداری شکست<sup>۳</sup> یا تعمیر و نگهداری اصلاحی<sup>۴</sup> معروف می‌باشد [۹۲]. تعریف جدیدتر از تعمیر و نگهداری عبارت است از کلیه تصمیم‌های مهندسی و فعالیت‌هایی که هدف آن نگهداری و یا آماده‌سازی یک سیستم یا ماشین می‌باشد به‌گونه‌ای که بتواند وظایف خود را به‌طور کامل انجام دهد [۹۴]. با این تعریف دامنه فعالیت‌ها شامل، فعالیت‌هایی از قبیل انجام سرویس‌های عمومی<sup>۵</sup>، بازرسی‌های دوره‌ای<sup>۶</sup> و تعویض پیش‌گیرانه<sup>۷</sup> می‌باشد که تحت عنوان سیستم تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مطرح است. افزایش طول عمر دستگاه، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش توقف‌ها، معمولاً سه هدف عمده تعمیر و نگهداری در تمامی صنایع به شمار می‌آیند. با مطالعه صحیح رفتار خرابی دستگاه‌ها و ماشین‌آلات می‌توان زمان تعمیرات و توقف‌های ناخواسته دستگاه را بسته به نوع هر صنعت از ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش داد [۲].

- 
1. Preventive Maintenance
  2. Reactive Maintenance
  3. Breakdown Maintenance
  4. Corrective Maintenance
  5. Routine Services
  6. Periodic Inspections
  7. Preventive Replacement

## ۵-۸-۱- سیستم تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه

تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه (PM) مجموعه فعالیت‌ها و روش‌های منظم و دوره‌ای است که به منظور بررسی وضعیت موجود، به‌روزرسانی و حفظ تجهیزات در شرایط مطلوب انجام می‌شود. به‌نحوی که افزایش بهره‌وری و کاهش فرسایش تجهیزات و در نتیجه کاهش هزینه‌های سنگین خرید و تعمیرات قطعه برای مجموعه به حداقل برسد. این سیستم سیاست خود را به تعمیرات قبل از خرابی معطوف داشته و خصوصاً در صنایعی که حساسیت فرآیند بالاست و وقوع تغییرات بدون برنامه، هزینه‌های غیر مستقیم زیادی به سیستم وارد می‌کند مناسب است. علی‌الخصوص در مورد سیستم‌های تولید پیوسته و انبوه، با تدوین دستورالعمل‌های مناسب به بازدیدهای دوره‌ای و یا تعویض قطعات می‌پردازد.

نکته قابل ذکر در مورد این سیستم آن است که تضمین زمان مناسب عملیات نگهداری و تعمیرات از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. چرا که تعیین نادرست این زمان می‌تواند هزینه‌های تعمیر و نگهداری را تحت‌الشعاع هزینه‌های تعمیرات شکست افزایش دهد. این سیستم سبب افزایش اثربخشی، بالا رفتن عمر تجهیزات و کاهش دامنه احتمالی خرابی می‌شود. در این سیستم فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری بصورت گروهی در توقف‌های از قبل تعیین شده برنامه‌ریزی می‌گردد. بیشینه کردن کارایی کل تجهیزات و کاهش خرابی‌ها، استفاده موثر از پرسنل تعمیر و نگهداری و برنامه‌ریزی از قبل (حضور به موقع پرسنل و موارد مورد نیاز) از مزایای این سیستم می‌باشد [۹۴].

تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مبتنی بر زمان را شاید بتوان شناخته‌شده‌ترین و رایج‌ترین نوع تعمیر و نگهداری نامید. در این روش، دستگاه صرف نظر از شرایطی که در آن است، در بازه‌های زمانی مشخص مورد بازرسی، سرویس یا تعمیرات پیش‌گیرانه قرار می‌گیرد. برای تعیین بهترین فاصله زمانی تعمیرات<sup>۱</sup> سه رهیافت عمده به شرح زیر وجود دارد که شامل برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر

---

1. Maintenance interval

قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> (RCM)، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر نرخ خرابی<sup>۲</sup> و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر حداقل هزینه<sup>۳</sup> می‌باشد [۲۹]. با توجه به این‌که در این رساله هدف بهبود قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز می‌باشد از این‌رو برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای این منظور در نظر گرفته شده است.

### ۵-۸-۲- تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان

طبق تعریف جان موبری<sup>۴</sup> تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان فرآیندی است که به منظور رسیدن به یک هدف مطلوب و عملکرد مورد انتظار از یک ماشین و یا یک سیستم انجام می‌گیرد تا سیستم مطابق با سطح مشخصی از قابلیت اطمینان (مطابق با نظر استفاده‌کنندگان از آن‌ها)، بتواند عملکرد صحیح و مناسب خود را داشته باشد. در واقع RCM یک روش مهندسی برای تعیین برنامه‌های تعمیر و نگهداری در سطح یک سازمان است که قابلیت اطمینان را به عنوان مفهومی کلیدی لحاظ می‌نماید و شاید بتوان آن را توانمندترین ابزار تعریف فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه، تعیین فواصل انجام آن‌ها و نحوه اجرای درست آن‌ها دانست [۹۵].

استفاده از RCM در بخش‌های مختلفی نظیر مؤسسات تولیدی، صنایع تولید برق، معادن و صنایع نظامی در تحقیقات گذشته گزارش شده است [۹۶]. از مهمترین نتایج اجرای RCM می‌توان افزایش قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی اجزا، کاهش چشم‌گیر هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش تعداد دفعات خرابی دستگاه‌ها و افزایش طول عمر تجهیزات را برشمرد.

انتخاب سطح قابلیت اطمینان مطلوب برای ماشین حفار، تصمیم مهمی است که دوره انجام تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه بایستی بر اساس آن صورت پذیرد. بدیهی است که بهبود قابلیت اطمینان ماشین مستلزم افزایش یافتن قابلیت اطمینان هر کدام از زیرسیستم‌ها می‌باشد. لذا برنامه‌ریزی‌ها بر

---

1. Reliability – Centered Maintenance (RCM)  
 2. Failure-rate-based maintenance scheduling  
 3. Cost-effective maintenance scheduling  
 4. John Moubray

مبنای زیرسیستم‌های ماشین انجام می‌شود و با در نظر گرفتن منحنی‌های قابلیت اطمینان به‌دست آمده برای زیرسیستم‌های مختلف، قابلیت اطمینان بسیار کم زیرسیستم مکانیک به ویژه بخش پشتیبان ماشین، شیب کاهشی نسبتاً تند قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین و نیز تخصص تعمیرکاران، قابلیت اطمینان حدود ۸۰ درصد به عنوان قابلیت اطمینان هدف و حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستم‌های ماشین تعیین گردید. معمولاً سطح قابلیت اطمینان ۸۰ تا ۹۰ درصد در تحقیقات در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، جهت حفظ قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در سطح حدود ۸۰ درصد، زمانی که هر کدام از زیرسیستم‌ها به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد می‌رسد، به عنوان دوره تعمیرات پیش‌گیرانه آن زیرسیستم انتخاب می‌شود. نتایج محاسبات برای رسیدن قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مکانیک، برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب به حدود ۸۰ درصد در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد زیرسیستم‌های ماشین حفار

زیرسیستم	مکانیک پشتیبان	هیدرولیک	مکانیک بدنه	برق	هوای فشرده	آب
زمان (ساعت)	۴	۷/۵	۱۵/۵	۱۶	۳۵	۶۳

پرواضح است پیاده کردن تعمیر و نگهداری با این برنامه زمانی، هرچند باعث افزایش قابلیت اطمینان ماشین و حفظ آن در سطح قابل قبولی می‌شود ولی توقف‌های زیاد در نهایت باعث کاهش قابلیت دسترسی و ضریب بهره‌وری ماشین می‌گردند. لذا برای کاهش میزان توقف‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، برنامه زمانی تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مطابق جدول ۵-۵ تصحیح و پیشنهاد می‌گردد. مطابق این برنامه تعمیراتی که دوره زمانی نزدیک به هم دارند با هم ترکیب شده و طی یک عملیات واحد تعمیر و نگهداری انجام می‌شوند. بدین ترتیب زیرسیستم‌های مکانیک بخش پشتیبان و هیدرولیک هر ۵ ساعت با هم مورد بازرسی دوره‌ای و در صورت نیاز تعمیر پیش‌گیرانه قرار می‌گیرند.

جدول ۵-۵- دوره تعمیرات پیش‌گیرانه پیشنهادی برای زیرسیستم‌های EPB-TBM

زیرسیستم	مکانیک پشتیبان + هیدرولیک	مکانیک بدنه + برق	هوای فشرده	آب
دوره تعمیرات پیش‌گیرانه (ساعت)	۵	۱۵	۳۰	۶۰

مطابق جدول ۵-۵ بعد از گذشت هر ۳۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، پنج زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بدنه ماشین، برق، هیدرولیک و هوای فشرده تعمیر و نگهداری می‌شوند و همچنین کل ماشین بعد از ۶۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری مورد تعمیر و نگهداری قرار می‌گیرد.

### ۵-۸-۳- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بر قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز

همان‌طور که اشاره شد تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه به دلیل جبران خرابی و بهبود شرایط عملیاتی ماشین، باعث افزایش قابلیت اطمینان نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری می‌شود. با توجه به نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها، مشخص گردید که داده‌های خرابی هر شش زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بخش بدنه ماشین، برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب، 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 به حالت نو بودن یا به اصطلاح "به-خوبی-نو"<sup>۱</sup> بر می‌گردد. در این صورت قابلیت اطمینان سیستم پس از هر تعمیر، مجدداً به ۱۰۰ درصد بر می‌گردد. لازم به ذکر است در سیستم‌هایی که رفتار خرابی آن‌ها از فرآیند قانون توان پیروی می‌کنند، سیستم پس از تعمیر اصلاحی به حالت به-بدی-کهنه<sup>۲</sup> بر می‌گردد لذا، قابلیت

1. As-good-as-new  
2. As-bad-as-old

اطمینان آن‌ها دیگر به ۱۰۰ درصد باز نمی‌گردد. معمولاً، قابلیت اطمینان این‌گونه زیرسیستم‌ها پس از تعمیرات پیش‌گیرانه، به حالت بهتر از حالت قبل و بدتر از حالت ایده‌آل<sup>۱</sup> می‌رسند [۲۹].

بدین ترتیب، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل دستگاه و زیرسیستم‌های آن به شرح جدول ۵-۶ تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه منحنی قابلیت اطمینان دستگاه دچار جهش شده و از مقدار ۰/۵۸ به ۰/۷۸ افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و با انجام هر تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مجدداً قابلیت اطمینان ماشین به صورت دوره‌ای بهبود پیدا می‌کند.

همان‌طور که در جدول ۵-۶ دیده می‌شود بعد از گذشت ۳۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، همه‌ی زیرسیستم‌ها به غیر از زیرسیستم آب تحت تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه قرار می‌گیرند و قابلیت اطمینان ماشین بیش از دو و نیم برابر افزایش پیدا می‌کند. در حالت بدون اعمال تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بعد از گذشت کمتر از ۶۰ ساعت حفاری پیوسته، قابلیت اطمینان کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صفر می‌رسد و ماشین متوقف خواهد شد ولی با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی در این رساله و انجام تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه بر مبنای قابلیت اطمینان، RCM، می‌توان قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز را در سطح بالای ۸۰ درصد حفظ کرد. بدین ترتیب با کاهش میزان خرابی‌ها، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و بهره‌وری ماشین نیز افزایش می‌یابد.

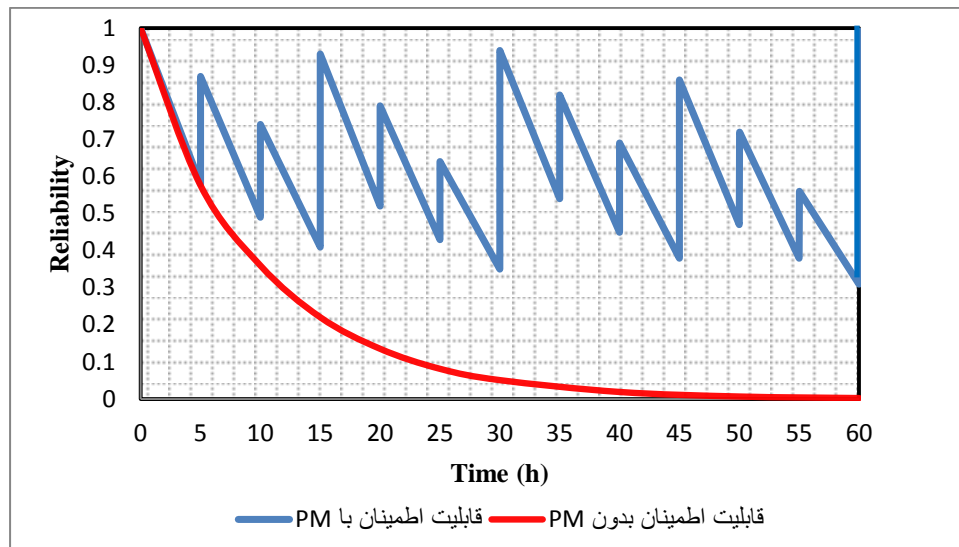
منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات قابلیت اطمینان ماشین حفار در نتیجه اعمال تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تعمیر و نگهداری در شکل ۵-۴۵ نشان داده شده است.

1. Better than old but worse than new

جدول ۵-۶- تغییرات قابلیت اطمینان ماشین در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیش گیرانه

قابلیت اطمینان ماشین	قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها						زمان (ساعت)
	آب	هوای فشرده	هیدرولیک	برق	مکانیک بدنه	مکانیک پشتیبان	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۰/۵۸	۰/۹۸۰	۱	۰/۸۴۵	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۵
۰/۸۷	۰/۹۸۰	۱	۱	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۱	۵/۰۱
۰/۴۹	۰/۹۷۴	۰/۹۹	۰/۸۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۰/۷۸	۱۰
۰/۷۴	۰/۹۷۴	۰/۹۹	۱	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۱	۱۰/۰۱
۰/۴۱	۰/۹۶۷	۰/۹۶	۰/۸۴۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۱۵
۰/۹۳	۰/۹۶۷	۰/۹۶	۱	۱	۱	۱	۱۵/۰۱
۰/۵۲	۰/۹۵۹	۰/۹۲۳	۰/۸۴۵	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۲۰
۰/۷۹	۰/۹۵۹	۰/۹۲۳	۱	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۱	۲۰/۰۱
۰/۴۳	۰/۹۴۹	۰/۸۸۵	۰/۸۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۰/۷۸	۲۵
۰/۶۴	۰/۹۴۹	۰/۸۸۵	۱	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۱	۲۵/۰۱
۰/۳۵	۰/۹۳۷	۰/۸۴۶	۰/۸۴۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۳۰
۰/۹۴	۰/۹۳۷	۱	۱	۱	۱	۱	۳۰/۰۱
۰/۵۴	۰/۹۲۳	۱	۰/۸۴۵	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۳۵
۰/۸۲	۰/۹۲۳	۱	۱	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۱	۳۵/۰۱
۰/۴۵	۰/۹۰۷	۰/۹۹	۰/۸۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۰/۷۸	۴۰
۰/۶۹	۰/۹۰۷	۰/۹۹	۱	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۱	۴۰/۰۱
۰/۳۸	۰/۸۹۲	۰/۹۶	۰/۸۴۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۴۵
۰/۸۶	۰/۸۹۲	۰/۹۶	۱	۱	۱	۱	۴۵/۰۱
۰/۴۷	۰/۸۷۴	۰/۹۲۳	۰/۸۴۵	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۵۰
۰/۷۲	۰/۸۷۴	۰/۹۲۳	۱	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۱	۵۰/۰۱
۰/۳۸	۰/۸۵۵	۰/۸۸۵	۰/۸۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۰/۷۸	۵۵
۰/۵۶	۰/۸۵۵	۰/۸۸۵	۱	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۱	۵۵/۰۱
۰/۳۱	۰/۸۳۳	۰/۸۴۶	۰/۸۴۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۶۰
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶۰/۰۱
۰/۵۷	۰/۹۸۰	۰/۹۹	۰/۸۴۵	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۶۵
۰/۸۶	۰/۹۸۰	۰/۹۹	۱	۰/۹۴۸	۰/۹۴	۱	۶۵/۰۱
۰/۴۷	۰/۹۷۴	۰/۹۶	۰/۸۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۰/۷۸	۷۰
۰/۷۲	۰/۹۷۴	۰/۹۶	۱	۰/۸۸۲	۰/۸۷	۱	۷۰/۰۱





شکل ۵-۴۵- تغییرات منحنی قابلیت اطمینان ماشین با اعمال تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه

نتایج محاسبات نشان می‌دهد با اعمال برنامه پیشنهادی در این رساله، بعد از گذشت ۶۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، همهی زیرسیستم‌های ماشین تحت تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه قرار می‌گیرند و بدین ترتیب قابلیت اطمینان ماشین مجدداً به ۱۰۰ درصد می‌رسد.

لازم به توضیح است برنامه پیشنهادی فوق، صرفاً بر اساس دسترسی به سطح مشخصی از قابلیت اطمینان می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط تأثیرگذار محیطی بر عملکرد ماشین حفار، می‌توان دید واقع بینانه‌تری نسبت به قابلیت اطمینان ماشین در شرایط مختلف به‌دست آورد و با داشتن میانگین عمر باقی‌مانده قطعات، برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای عملیات تعمیر و نگهداری ماشین حفار ارائه داد. با توجه به این‌که زیرسیستم مکانیک بخش بدنه کمترین میزان قابلیت تعمیر و نگهداری و همچنین کمترین میزان قابلیت دسترسی را دارا می‌باشد بیشترین توجه در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بایستی متوجه این زیرسیستم باشد تا عملکرد ماشین حفار بهبود یابد. همچنین با مراجعه به پایگاه داده‌های خرابی ماشین آشکار است که خرابی‌های ابزارهای برشی که جزو زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین می‌باشد از بیشترین فراوانی نسبی برخوردار است از این رو در ادامه به روش پیش‌بینی

میانگین زمان عمر باقی‌مانده<sup>۱</sup> (MRL) این ابزار پرداخته می‌شود تا با برنامه‌ریزی صحیح تعمیر و نگهداری این ابزار بتوان به بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری ماشین حفار کمک نمود.

#### ۵-۸-۴- ارزیابی میانگین عمر باقی‌مانده با در نظر گرفتن شرایط محیط

اخیراً به دلیل فضای رقابتی و هزینه‌های کلی عملیاتی و تولیدی، قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری اهمیت فراوانی پیدا کرده است [۹۷]. همچنین افزایش قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و ایمنی یک سیستم، یک فاکتور تعیین کننده در رابطه با اثربخشی عملکرد یک سیستم یا دستگاه می‌باشد. در نتیجه، به دلیل هزینه‌ی بالای نگهداری تجهیزات پیچیده، ارتقاء سیستم تعمیر و نگهداری و جایگزین نمودن استراتژی‌های سنتی توسط روش‌های جدید از قبیل میانگین عمر باقیمانده (MRL) که قادر به پیش‌بینی زمان وقوع انواع خرابی‌ها می‌باشد امری ضروری است. بنابراین با استفاده از وضعیت فعلی دستگاه و عملکرد گذشته‌ی آن و پیش‌بینی زمان عمر یک سیستم می‌توان قبل از وقوع خرابی MRL را پیش‌بینی کرد [۹۸]. اخیراً پیش‌بینی این پارامتر به منظور انجام برنامه‌ریزی به موقع عملیات تعمیر و نگهداری برای اجتناب از خرابی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. همچنین برآورد دقیق قابلیت اطمینان موجب تعیین دقیق فواصل بهینه بازرسی (تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه) و همین‌طور به حداقل رساندن هزینه‌های کلی سیستم می‌گردد [۹۹-۱۰۱].

امروزه MRL یا عمر مفید باقی‌مانده<sup>۲</sup> (RUL) به عنوان یک پارامتر کلیدی در استراتژی‌های تعمیر و نگهداری شناخته می‌شود. تعیین دقیق این پارامترها در صنایع مختلف و همین‌طور تجهیزات معدنی امری مشکل و با عدم قطعیت همراه است و عمر مفید به شرایط عملیاتی واقعی و ویژگی‌های محیط از قبیل مهارت اپراتور و پرسنل تعمیر و نگهداری، فشار، شرایط رطوبت و میزان پوسیدگی تجهیزات بستگی دارد.

<sup>۱</sup> . Mean Residual life (MRL)

<sup>۲</sup> . Remaining Useful Life (RUL)

برای استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان در تعیین MRL و همچنین شرایط محیطی، فرضیات زیر نیز در نظر گرفته می‌شود:

- بهترین تابع توزیع برای زمان‌های خرابی قطعات مکانیکی، تابع توزیع ویبول می‌باشد و برای این منظور ابتدا آزمون‌های روند و همبستگی سری بایستی صورت بگیرند تا صحت مستقل و یکسان توزیع شدن داده‌ها و همین

طور امکان استفاده از روش تجدید شونده تأیید گردد [۱۰۲].

- ویژگی‌ها و فاکتورهای قابلیت اطمینان کل سیستم و همین‌طور قطعات برای تحلیل قابلیت اطمینان و تخمین MRL مورد نیاز می‌باشند. همچنین متغیرهای محیطی عملیات از قبیل مهارت اپراتور، مهارت گروه تعمیر و نگهداری، شرایط دما و رطوبت محیط و ... به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان دستگاه در نظر گرفته می‌شوند [۶۱].

#### ۵-۴-۱- قابلیت اطمینان مبتنی بر پارامترها و متغیرهای محیطی

مدل خطرات متناسب<sup>۱</sup> (PHM) به عنوان یک مدل تکمیل کننده‌ی مجموعه ابزارها و روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می‌شود که اولین بار توسط کاکس<sup>۲</sup> ارائه شد [۱۰۳]. این مدل به عنوان یک مدل ضربی<sup>۳</sup> و رگرسیونی شبه پارامتریک<sup>۴</sup> طبقه بندی می‌شود که متغیرها یا پارامترهای کمکی محیطی از قبیل دما، فشار و ... را لحاظ می‌کند و نرخ خرابی یک سیستم یا قطعه را به صورت تابعی از حاصل ضرب نرخ خرابی پایه<sup>۵</sup> (که تنها وابسته به زمان است و در شرایط استاندارد سنجیده می‌شود) و یک عبارت مثبت و مستقل از زمان  $f(\alpha z)$  که ترکیبی از تأثیر متغیرها را نشان می‌دهد بیان می‌کند [۱۰۲]. توابع مختلفی برای بیان  $f(\alpha z)$  می‌تواند استفاده شود ولی تابع نمایی دارای

<sup>۱</sup> . Proportional Hazard Model (PHM)

<sup>۲</sup> . Cox

<sup>۳</sup> . Multiplicative

<sup>۴</sup> . Semi-parametric

<sup>۵</sup> . Baseline hazard rate

کاربرد گسترده‌ای برای این منظور می‌باشد [۱۰۴]. در حالت کلی این مدل به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰۵]:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) \exp(\alpha z) = \lambda_0(t) \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) \quad (۳۶-۵)$$

در رابطه فوق،  $\alpha$  پارامتر مجهول مدل یا ضریب رگرسیون مربوط به  $n$  متغیر متناظر ( $z$ ) که بیان کننده میزان تأثیر آن متغیر بر روی تابع خرابی یا تابع خطر است. در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان متغیرهای وابسته به زمان و همچنین متغیرهای مستقل از زمان از توان‌مندی‌های این مدل می‌باشد. در شرایط عملیاتی مناسب، متغیرهای محیطی باعث کمتر شدن خرابی و پایین آمدن نمودار نرخ خرابی از نمودار پایه‌ی آن می‌گردند و همین‌طور چنان‌که شرایط عملیاتی و متغیرهای محیطی نامساعد باشند میزان مشاهده شده نرخ خرابی، بیشتر از مقدار پایه آن خواهد بود.

تابع توزیع ویبول دارای کاربرد گسترده در توزیع زمان خرابی می‌باشد. چنان‌که تابع نرخ خرابی پایه، ویبول دو پارامتری باشد خواهیم داشت:

$$\lambda(t, z) = \frac{\beta_0}{\eta_0} \left(\frac{t}{\eta_0}\right)^{\beta_0-1} \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) \quad (۳۷-۵)$$

در رابطه فوق،  $\beta_0 > 0$  و  $\eta_0 > 0$  به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول می‌باشند.  $z_i$  بیانگر متغیر کمکی  $i$ ام و  $\alpha_i$  ضریب رگرسیونی متناظر با متغیر کمکی می‌باشد. این مدل به عنوان مدل خطرات متناسب ویبول<sup>۱</sup> معروف است. تابع قابلیت اطمینان متناظر که تابعی از قابلیت اطمینان پایه (تنها وابسته به زمان) و متغیرهای کمکی مستقل از زمان می‌باشد به صورت زیر است:

$$R(t) = R_0(t)^{\exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right)} \quad (۳۸-۵)$$

<sup>۱</sup>. Weibull PH model

$$R_0(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_0(t) dt\right] \quad (39-5)$$

در رابطه فوق،  $R_0(t)$  تابع قابلیت اطمینان پایه می‌باشد [۱۰۶].

#### ۵-۸-۴-۲- محاسبه میانگین عمر باقی‌مانده

هدف محاسبه‌ی مدت زمان مورد انتظار از عمر باقی‌مانده یک جزء یا سیستم قبل از وقوع خرابی در زمان دلخواه  $t_0$  (که به عنوان زمان بقای اولیه<sup>۱</sup> معروف است) می‌باشد. اگر  $MTTF(t_0)$  نشان دهنده زمان تا خرابی مورد انتظار یک جزء دارای عمر  $t_0$  باشد مقدار ریاضی  $MTTF(t_0)$  به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰۷-۱۰۹]:

$$MTTF(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} (t - t_0) f(t|t_0) dt \quad (40-5)$$

در رابطه فوق،  $f(t|t_0)$  چگالی احتمال خرابی شرطی در زمان  $t$  می‌باشد به شرط این که جزء مورد نظر تا زمان  $t_0$  سالم باشد و مقدار آن برابر است با:

$$f(t|t_0) = \lambda(t) \times R(t|t_0) \quad (41-5)$$

در رابطه فوق،  $R(t|t_0)$  قابلیت اطمینان شرطی جزء تا زمان  $t$  (احتمال سالم ماندن جزء تا زمان  $t$ ) می‌باشد به شرطی که آن جزء تا زمان  $t_0$  سالم بوده است. بنابراین رابطه فوق به صورت زیر می‌تواند بیان شود:

$$f(t|t_0) = \lambda(t) \times \frac{R(t)}{R(t_0)} \quad (42-5)$$

<sup>۱</sup>. Initial survival time

با محاسبه تابع قابلیت اطمینان شرطی، می توان تابع MRL را به راحتی به دست آورد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 MTTF(t_0) &= \int_{t_0}^{\infty} (t-t_0)\lambda(t) \frac{R(t)}{R(t_0)} dt \\
 &= \int_{t_0}^{\infty} \frac{(t-t_0)f(t)}{R(t_0)} dt = \frac{1}{R(t_0)} \int_{t_0}^{\infty} (t-t_0)f(t) d(t) = \frac{1}{R(t_0)} \int_{t_0}^{\infty} R(t) d(t) \quad (43-5)
 \end{aligned}$$

با توسعه رابطه فوق تابع  $MTTF(t_0) = m(t)$  یا همان مقدار MRL یا RUL به صورت زیر بیان می شود:

$$MTTF(t_0) = m(t) = \frac{\int_{t_0}^{\infty} R(t) dt}{R(t_0)} = \frac{\int_0^{\infty} R(t) dt - \int_0^{t_0} R(t) dt}{R(t_0)} = \frac{MTTF - \int_0^{t_0} R(t) dt}{R(t_0)} \quad (44-5)$$

چنان که قبلاً اشاره شد برای قطعات تعمیرپذیر از میانگین زمان بین خرابی‌ها ( $MTBFs$ ) و برای قطعات غیرقابل تعمیر از میانگین زمان تا خرابی ( $MTTFs$ ) استفاده می شود.

### ۵-۸-۴-۳- تأثیر متغیرهای محیطی بر میانگین عمر باقی مانده ابزار برش ماشین حفار

همان طور که اشاره شد برای ارزیابی تأثیر متغیرهای محیطی بر میانگین عمر باقی مانده یا زمان مفید باقی مانده، ابتدا بایستی تابع نرخ خرابی یا نرخ خطر محاسبه گردد و سپس قابلیت اطمینان شرطی و میانگین عمر باقی مانده تعیین گردند.

ابزار برش کله حفار ماشین مورد مطالعه شامل ۹۸ عدد خراش دهنده (اسکریپر)، ۲۴ عدد رنده (ناخن) و ۲۲ عدد دیسک برنده می باشد. از آنجایی که در هر بار توقف دستگاه ناشی از خرابی ابزارهای برشی، چند مورد از این ابزار تعویض می گردند و همگی ابزارها همزمان دچار خرابی نمی شوند به منظور تهیه یک پایگاه داده صحیح از زمان بین خرابی‌ها و با توجه به فراوانی خرابی‌های خراش

دهنده‌ها، تنها خرابی‌های ناشی از خراش دهنده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با توجه به اطلاعات موجود و همین‌طور نظرات کارشناسان مسئول پروژه، سه متغیر کمکی شامل میزان ساینده‌گی سینه کار تونل، مهارت اپراتور و مهارت پرسنل تعمیر و نگهداری به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان این ابزار در نظر گرفته شد و داده‌های مرتبط به آن استخراج گردید. با توجه به مصالح خارج شده از سینه‌کار، در صورت وجود مقادیر نسبتاً زیادی از خرده‌های قلوه سنگ مقدار ۱- (دارای ساینده‌گی بالا و شرایط نامطلوب) و در صورت زیاد بودن رس و سیلت مقدار ۱+ (شرایط مساعد) برای متغیر اول در نظر گرفته شده است. برای دو متغیر دیگر با توجه به این‌که ۵ نفر اپراتور و همچنین ۷ نفر پرسنل تعمیر مکانیک مشغول به فعالیت بودند با نظرات کارشناسان پروژه، برای اپراتور و پرسنل تعمیر و نگهداری با تجربه و مهارت بالا مقدار ۱+ و تجربه و مهارت پایین مقدار ۱- در نظر گرفته شده است. بنابراین با داشتن سه متغیر و دو حالت برای هر متغیر، ۸ حالت مختلف تأثیر متغیرها مطابق جدول ۵-۷ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۵-۷- حالت‌های مختلف متغیرهای موجود

State	Value	State	Value
S1	(+1,+1,+1)	S5	(-1,+1,+1)
S2	(+1,+1,-1)	S6	(-1,+1,-1)
S3	(+1,-1,+1)	S7	(-1,-1,+1)
S4	(+1,-1,-1)	S8	(-1,-1,-1)

با توجه به داده‌های زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین در جدول ۴-۲ و مطالعه گزارش جزئیات خرابی‌های صورت گرفته، داده‌های خرابی و تعویض خراش دهنده‌ها استخراج گردید و مقادیر متغیرهای محیطی متناظر ثبت گردید. از آنجایی که خراش‌دهنده‌ها بعد از خرابی (ساییدگی یا شکستگی) تعویض می‌شوند و در واقع غیر قابل تعمیر هستند بنابراین از زمان تا خرابی (TTF) در پایگاه داده استفاده شده است (جدول ۵-۸).

جدول ۵-۸- داده‌های خرابی خراش دهنده ماشین حفار و وضعیت متغیرهای تأثیرگذار بر آن

TTF of Scraper	ATFA	OPSK	MCSK
48	-1	-1	-1
142.5	+1	+1	+1
119.83	+1	-1	+1
101.66	+1	+1	-1
42.17	-1	-1	-1
357	+1	+1	+1
105.87	-1	+1	-1
110.83	+1	+1	+1
93.33	-1	+1	+1
75.33	-1	+1	-1
143.67	+1	+1	+1
107.17	+1	-1	+1
125.33	+1	+1	+1
96.5	-1	+1	+1
59.17	-1	-1	+1
115.87	+1	+1	+1
33.17	-1	-1	-1
66.5	-1	+1	-1
71.67	-1	+1	-1
226.83	+1	+1	+1
143.67	+1	+1	+1
84.33	-1	-1	+1
151.83	+1	+1	+1
182.5	+1	+1	+1

در جدول ۵-۸، متغیر ساینده‌گی سینه کار تونل با <sup>۱</sup>ATFA، مهارت اپراتور با <sup>۲</sup>OPSK و مهارت پرسنل تعمیر و نگهداری با <sup>۳</sup>MCSK نشان داده شده است. در ستون مربوط به متغیر ساینده‌گی، مقدار ۱- بیانگر ساینده‌گی بالا و شرایط نامطلوب و مقدار ۱+ نشان دهنده زیاد بودن رس و سیلت و شرایط مساعد می‌باشد. در ستون متغیرهای مهارت اپراتور و پرسنل تعمیر و نگهداری، برای اپراتور و پرسنل

<sup>۱</sup> . Abrasivity of Tunnel Face

<sup>۲</sup> . Operator Skill

<sup>۳</sup> . Maintenance Crew Skill



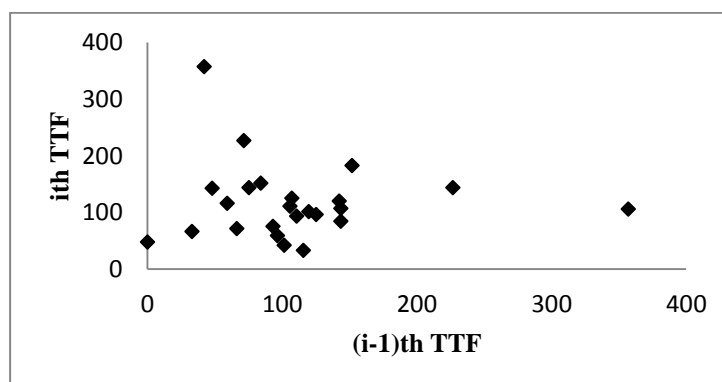
تعمیر و نگهداری با تجربه و مهارت بالا مقدار +۱ و مقدار -۱ برای افراد با تجربه و مهارت پایین در نظر گرفته شده است.

در این تحلیل نیز داده‌ها بایستی از نظر وجود یا عدم وجود روند و همبستگی سری مشخص گردند تا روش تحلیل قابلیت اطمینان مشخص گردد. نتایج نشان داد که داده‌ها فاقد روند بوده و همین‌طور مستقل می‌باشند. همچنین تابع توزیع ویبول دو پارامتری دارای بهترین تطابق بر این داده‌ها می‌باشد. بنابراین مدل خطرات متناسب ویبول<sup>۱</sup> برای تحلیل داده‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۵-۹ و شکل ۵-۴۶ نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۹- نتایج آزمون روند و همبستگی برای داده‌های خرابی خراش دهنده‌ها

تعداد خرابی	درجه آزادی	U محاسبه شده	حد بالا از توزیع $\chi^2$	حد پایین از توزیع $\chi^2$	روند	همبستگی سری	بهترین تابع توزیع
۲۴	۴۶	۴۵/۸	۶۶/۶	۲۹/۱	ندارد	ندارد	توزیع ویبول

برای مدل‌سازی و تحلیل مدل خطرات متناسب داده‌های خرابی و متغیرهای در نظر گرفته شده، از نرم افزار جامع تحلیل آماری SYSTAT-13 استفاده شده است. با این نرم افزار امکان انجام تحلیل‌های مختلف آماری، رسم انواع نمودارها، رگرسیون خطی و غیرخطی، رگرسیون شبه پارامتری کاکس و غیره امکان‌پذیر است.



شکل ۵-۴۶- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی خراش دهنده‌ها

<sup>۱</sup> . Weibull -PHM

داده‌های مرتبط به زمان خرابی‌ها و سه متغیر فوق به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است. با استفاده از تحلیل رگرسیون کاکس، خروجی مدل‌سازی مطابق جدول ۵-۱۰ به دست آمد و مقدار ضرایب رگرسیون ( $\alpha$ ) برای هر سه متغیر محاسبه شده است. مطابق مقادیر p-value، هر سه پارامتر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار هستند. در این جدول t-ratio نسبت ضریب متغیر به خطای استاندارد می‌باشد و برای محاسبه p-value در نرم افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۱۰- نتایج تحلیل داده‌ها با نرم افزار SYSTAT

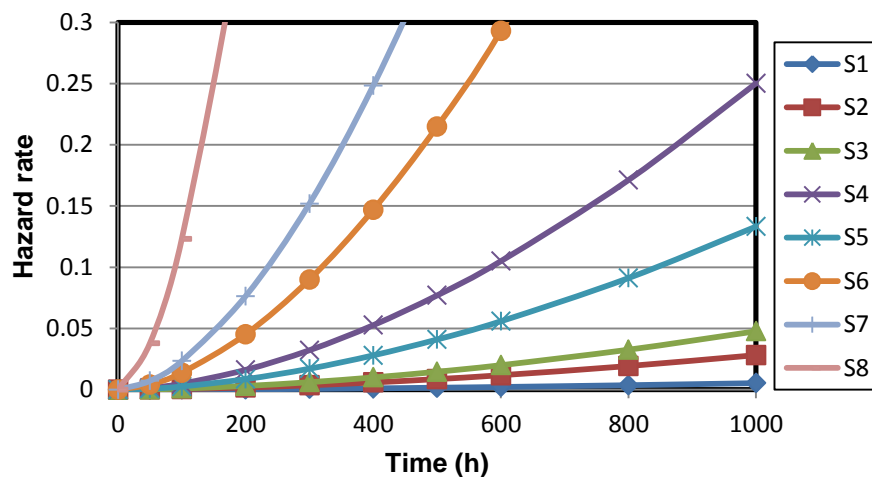
Parameter	Estimate	Standard Error	t-ratio	p-value
ATFA	-1.603	0.588	-2.727	0.006
OPSK	-1.090	0.337	-3.238	0.001
MCSK	-0.828	0.404	-2.051	0.040

بدین ترتیب با داشتن ضرایب رگرسیون و پارامترهای تابع نرخ خرابی پایه و همچنین با استفاده از رابطه‌ی ۵-۳۶ مدل خطرات متناسب ابزار برشی مورد مطالعه مطابق رابطه‌ی ۵-۴۵ به دست آمد. پارامترهای نرخ خرابی پایه یا توسط شرکت سازنده ارائه می‌گردد که نمونه را در شرایط آزمایشگاهی استاندارد مورد آزمایش قرار می‌دهند یا توسط خبرگان و با داده‌های میدانی در شرایط ایده‌آل تعیین می‌گردند. از آنجایی که این اطلاعات در دسترس نبود با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به شرایط مطلوب، پارامتر شکل  $\beta$  برابر با ۲/۷ و همچنین پارامتر مقیاس توزیع ویبول  $\mu$  برابر با ۲۱۰ ساعت به دست آمد.

$$\lambda(t, z) = \frac{2.7}{210} \left(\frac{t}{210}\right)^{2.7-1} \exp(-1.603AFTA - 1.090OPSK - 0.828MCSK) \quad (45-5)$$

با توجه به رابطه‌ی فوق و مقادیر متغیرهای کمکی، نمودار نرخ خرابی متناظر با هر ۸ حالت مختلف در شکل ۵-۴۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود تأثیر متغیرهای محیطی

بر نرخ خرابی خراش دهنده‌ها کاملاً آشکار است. حالت ۱ که هر سه متغیر در شرایط مطلوب هستند کمترین نرخ خرابی و در حالت ۸ که هر سه متغیر نامطلوب می‌باشند بیشترین میزان خرابی را نشان می‌دهد. برای سایر حالت‌ها نیز نمودار نرخ خرابی در حد فاصل بین دو حالت فوق قرار می‌گیرد.

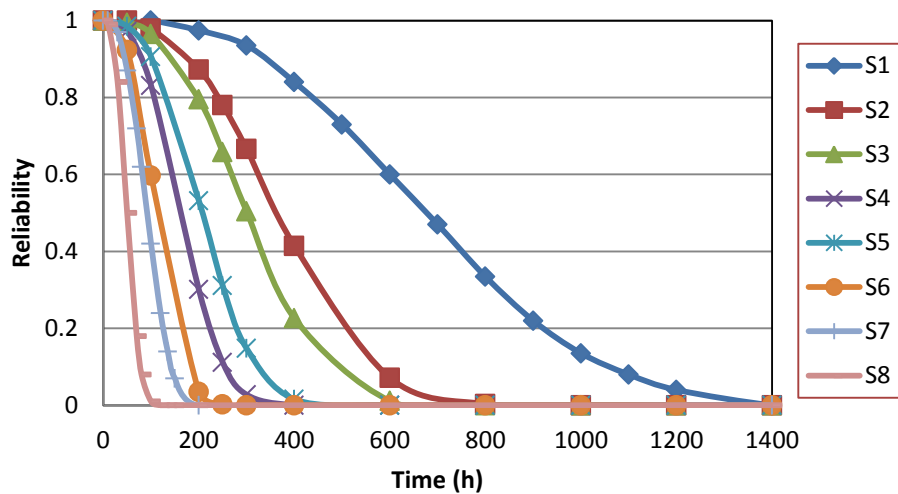


شکل ۵-۴۷- نمودارهای نرخ خرابی خراش دهنده‌ها در حالات مختلف متغیرهای محیطی

با داشتن رابطه نرخ خرابی پایه و ضرایب مدل کاکس، رابطه قابلیت اطمینان خراش دهنده‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز مطابق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$R(t) = R_0(t) \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) = \left[\exp\left(-\frac{t}{210}\right)\right]^{2.7} \exp(-1.603AFTA - 1.090OPSK - 0.828MCSK) \quad (۴۶-۵)$$

شکل ۵-۴۸- نمودارهای متناظر با قابلیت اطمینان خراش دهنده‌ها را با در نظر گرفتن حالات مختلف متغیرهای محیطی نشان می‌دهد. در این شکل نیز حالت یک از بیشترین میزان قابلیت اطمینان برخوردار می‌باشد. در این حالت که تمامی متغیرها مطلوب می‌باشند بعد از گذشت ۱۴۰۰ ساعت قابلیت اطمینان به صفر می‌رسد. در حالی که برای حالت ۸ که همه‌ی متغیرها نامساعد می‌باشند این میزان حدود ۱۵۰ ساعت است که اختلاف زیادی با حالت اول مشاهده می‌گردد.



شکل ۵-۴۸- نمودارهای قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن شرایط محیطی

بدین ترتیب با محاسبه‌ی مدل قابلیت اطمینان ابزار برشی و با استفاده از رابطه‌ی ۵-۴۴ می‌توان میانگین عمر باقی‌مانده این ابزار را با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی مختلف و بعد از گذشت زمان دلخواه محاسبه کرد. به عنوان مثال میزان MRL برای ابزار مورد مطالعه بعد از گذشت ۵۰ ساعت عملیات حفاری مطابق زیر محاسبه می‌گردد.

ابتدا بایستی مقادیر میانگین زمان خرابی (MTTF) با توجه به تأثیر متغیرها در نظر گرفته محاسبه گردد. برای این منظور با بسط رابطه‌ی ۵-۳۷ خواهیم داشت:

$$\lambda(t, z) = \frac{\beta_0}{\eta_0} \left(\frac{t}{\eta_0}\right)^{\beta_0-1} \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) = \frac{\beta_0 \times t^{\beta_0-1}}{\eta_0^{\beta_0}} \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) \quad (47-5)$$

$$\lambda(t, z) = \frac{\beta_0 \times t^{\beta_0-1}}{\eta_0^{\beta_0} \exp\left(-\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right)} = \frac{\beta_0 \times t^{\beta_0-1}}{\left[\eta_0 \times \exp\left(-\frac{1}{\beta_0} \times \sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right)\right]^{\beta_0}} \quad (48-5)$$

رابطه فوق تابع توزیع ویبول دو پارامتری را نشان می‌دهد که دارای پارامتر شکل و پارامتر مقیاس به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \beta = \beta_0 \\ \eta = \eta_0 \left[ \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) \right]^{-1/\beta_0} \end{cases} \quad (49-5)$$

بنابراین برای حالات مختلف متغیرها پارامتر شکل تابع توزیع ثابت می ماند ولی پارامتر مقیاس مطابق رابطه فوق تغییر می کند. به عنوان مثال برای حالت اول متغیرها این پارامتر مطابق زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0 \left[ \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) \right]^{-1/\beta_0} = 210 \times [\exp(-1.603(+1) - 1.090(+1) - 0.828(+1))]^{-1/2.7} \\ &= 773.41hr \end{aligned} \quad (50-5)$$

برای تابع توزیع ویبول، MTTF از رابطه زیر به دست می آید:

$$MTTF = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 773.41 \times \Gamma(1.3) = 690.66hr \quad (51-5)$$

مقدار فوق برای حالت اول متغیرهای در نظر گرفته شده می باشد و برای سایر حالات زیر به همین شیوه قابل محاسبه می باشد. بدین ترتیب برای زمان در نظر گرفته شده ۵۰ ساعت، میانگین عمر باقی مانده یا زمان مفید باقی مانده ابزار برشی مورد مطالعه به راحتی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد. محاسبات مربوط به میانگین عمر باقی مانده ابزار برشی ماشین حفار خط یک مترو تبریز بعد از گذشت ۵۰ ساعت عملیات حفاری در جدول ۵-۱۱ آورده شده است. در این جدول X1، X2 و X3 به ترتیب معرف متغیرهای ساینده، مهارت اپراتور و مهارت پرسنل تعمیر و نگهداری می باشند.

$$MRL = RUL = MTTF(50) = \frac{MTTF - \int_0^{50} R(t) dt}{R(50)} \quad (52-5)$$

جدول ۵-۱۱- میانگین عمر باقی مانده ابزار برشی ماشین حفار بعد از گذشت ۵۰ ساعت عملیات حفاری

State	$t_0$	X1	X2	X3	$\eta$	MTTF	R(t)	MRL(hr)
1	50	1	1	1	773.41	690.66	0.999	641.31
2	50	1	1	-1	418.99	374.16	0.997	325.19
3	50	1	-1	1	345.07	308.15	0.994	259.81
4	50	1	-1	-1	186.87	166.87	0.972	120.65
5	50	-1	1	1	235.98	210.73	0.985	163.38
6	50	-1	1	-1	127.79	114.12	0.925	70.51
7	50	-1	-1	1	105.25	93.99	0.875	52.26
8	50	-1	-1	-1	56.99	50.89	0.496	17.61

مطابق جدول فوق، شرایط مختلف عملیاتی تأثیر زیادی بر روی عمر ابزار برشی ماشین حفاری تمام مقطع خط یک مترو تبریز دارد. نتایج نشان می‌دهد چنانچه همه متغیرهای تأثیرگذار در شرایط مطلوب باشند قابلیت اطمینان و همچنین میانگین عمر باقی مانده ابزار برشی ماشین حفار نسبت به حالت کاملاً نامساعد متغیرها و شرایط نامطلوب تفاوت خیلی زیادی خواهد داشت. به طوری که قابلیت اطمینان در شرایط ایده‌آل تقریباً یک و در حالت نامطلوب به حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همین‌طور میانگین عمر باقی مانده در حالت اول ۶۴۱/۳۱ ساعت و در آخرین وضعیت که همه متغیرها نامطلوب هستند به مقدار بسیار پایین ۱۷/۶۱ ساعت می‌تواند تقلیل یابد. بنابراین با بهبود شرایط عملیاتی پروژه می‌توان میانگین عمر تجهیزات را در سطح بالایی حفظ کرد. افزایش مهارت اپراتور و پرسنل تعمیر و نگهداری باعث افزایش قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار و در نهایت افزایش قابلیت دسترسی و بهبود عملکرد آن می‌گردد. با ارزیابی و پیش‌بینی عمر مفید باقی مانده تجهیزات و ماشین‌آلات می‌توان برنامه‌ریزی صحیحی برای عملیات تعمیر و نگهداری در نظر گرفت و با کاهش توقف‌های ناخواسته، هزینه‌های عملیاتی پروژه را نیز تا حدود زیادی کاهش داد.

در این فصل مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز صورت پذیرفت و برای بهبود

قابلیت اطمینان ماشین، برنامه تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بر مبنای قابلیت اطمینان پیشنهاد گردید. همچنین تأثیر شرایط محیطی پروژه بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان ابزار برشی ماشین حفار بررسی شد و میانگین عمر باقی‌مانده خراش دهنده‌ها که از مهم‌ترین و مؤثرترین اجزای ماشین حفار می‌باشند محاسبه گردید.





## فصل ششم

## نتایج و پیشنهادات

## ۶-۱- مقدمه

استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل به دلیل حفاری با کیفیت و سرعت بالا، ایمنی بسیار زیاد برای پرسنل و کمترین تأثیرات زیست محیطی به سرعت در حال افزایش می‌باشد. با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بسیار بالای این ماشین‌ها و اهمیت افزایش قابلیت دسترسی و ضریب بهره‌وری آن‌ها، ضروری است با مطالعه ساختار این ماشین‌ها و اطلاعات دقیق خرابی‌ها و تعمیراتی که در آن‌ها انجام می‌پذیرد شناخت صحیحی از قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (RAM) صورت گیرد و با افزایش قابلیت دسترسی و کاهش زمان انجام پروژه تا حدود زیادی در هزینه‌های عملیاتی پروژه صرفه‌جویی کرد. با توجه به اهمیت این موضوع و عدم وجود تحقیقات علمی پیشین در این حوزه، در این رساله مدل‌سازی و تحلیل RAM ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین صورت گرفته است.

## ۶-۲- نتایج

به‌طور کلی، نتایج حاصل از این رساله به شرح ذیل می‌باشند:

۱- نتایج تحقیقات پیشین نشان داد که علی‌رغم مطالعات گسترده در مورد عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل، تاکنون هیچ گزارش جامعی در زمینه بهبود قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری این ماشین‌ها صورت نگرفته است.

۲- با توجه به کاربرد گسترده ماشین حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین، ساخت شرکت NFM فرانسه، در حفاری تونل‌های متروهای تهران، تبریز، اصفهان، مشهد و اهواز، این نوع ماشین برای بررسی و تحلیل RAM در نظر گرفته شد و به دلیل این‌که در پروژه خط یک مترو تبریز، داده‌های عملیاتی ماشین حفار از قبیل زمان دقیق خرابی‌ها، نوع و علت خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته در گزارش‌ها ثبت گردیده بود و این اطلاعات با بالاترین دقت قابل استخراج بود لذا این پروژه به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید.

۳- با مطالعه ساختار و عملکرد ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در خط یک مترو تبریز، شش زیرسیستم به عنوان زیرسیستم‌های عملیاتی برای ماشین در نظر گرفته شد. این زیرسیستم‌ها شامل زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان و بخش بدنه ماشین، زیرسیستم برق، زیرسیستم هیدرولیک، زیرسیستم هوای فشرده و زیرسیستم آب می‌باشند. این تقسیم‌بندی زیرسیستم‌ها برای ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل سایر شرکت‌های سازنده این ماشین‌ها نیز عمومیت دارد. از آنجایی که خرابی در هر کدام از زیرسیستم‌ها باعث توقف ماشین و عملیات حفاری می‌گردد شبکه سری برای زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شد.

۴- در این رساله تمامی داده‌های خرابی و تعمیر ماشین حفار تونل سبلان خط یک مترو تبریز با توجه به گزارش‌های روزانه اپراتور و سرپرست گروه تعمیر و نگهداری ماشین در بازه زمانی حدود ۲۶ ماه عملکرد ماشین جمع‌آوری گردید و تحلیل‌ها بر مبنای آن‌ها صورت پذیرفت.

۵- در این رساله با توجه به کاربرد گسترده روش تحلیل و مدل‌سازی آماری در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری، از این روش برای تحلیل RAM ماشین حفار خط یک مترو تبریز استفاده شد. اساس روش تحلیل آماری بر پایه دو آزمون اصلی روند و همبستگی سری استوار است. در این رساله از روش هندبوک نظامی برای آزمون روند استفاده شد.

۶- نتایج آزمون روند نشان داد که داده‌های خرابی ثبت شده برای کلیه زیرسیستم‌ها فاقد روند بوده و از آنجایی که در داده‌های خرابی این زیرسیستم‌ها همبستگی سری نیز مشاهده نگردید روش فرآیند تجدید شونده برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها انتخاب گردید. برای ارزیابی بهترین تابع توزیع برازش شده آزمون کلموگروف - اسمیرنوف (K-S) مورد استفاده قرار گرفت.

۷- با توجه به بزرگ بودن زیرسیستم مکانیک و بالا بودن میزان خرابی‌های این زیرسیستم، دو بخش شامل بخش پشتیبان و بخش بدنه برای زیرسیستم مکانیک در نظر گرفته شد و برای هر بخش تحلیل‌ها جداگانه صورت گرفت. با توجه به نتایج تحلیل پارتو، زیر سیستم مکانیک بخش پشتیبان

ماشین حفار با فراوانی نسبی ۳۰/۴ درصد، بیشترین میزان خرابی را به خود اختصاص داده است. برای این زیرسیستم، نتایج تحلیل داده‌های خرابی نشان داد که تابع توزیع ویبول بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. مدل قابلیت اطمینان این زیرسیستم مطابق رابطه ۶-۱ به دست آمد.

$$R_{\text{Mechanical}}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-0.5}{26.6576}\right)^{0.8299}\right) \quad (1-6)$$

همچنین نتایج تحلیل داده‌ها نشان داد که تابع توزیع گاما بهترین برازش را بر داده‌های خرابی زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین حفار دارد و مدل قابلیت اطمینان مطابق رابطه زیر به دست آمد.

$$R_{\text{Mechanical2}}(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}{\Gamma(\alpha)} = 1 - 1.1\left(\Gamma_{(0.017t)}^{0.883}(0.859)\right) \quad (2-6)$$

۸- زیرسیستم برق با فراوانی نسبی ۱۸/۱ درصد بعد از زیرسیستم مکانیک، بیشترین میزان خرابی را در بین زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز به خود اختصاص داده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم برق نشان داد که تابع توزیع لاگ نرمال سه پارامتری بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم برق مطابق رابطه ۶-۳ به دست آمد.

$$R_{\text{Electrical}}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t-\gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t+4.69) - 3.79}{0.93}\right) \quad (3-6)$$

۹- تحلیل پارتو همچنین نشان داد که زیرسیستم هیدرولیک دارای حدود ۱۴/۶ درصد فراوانی خرابی‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز می‌باشد با توجه به نتایج حاصل از تحلیل داده‌های خرابی زیرسیستم هیدرولیک، تابع توزیع گامای تعمیم یافته به‌عنوان بهترین تابع انعکاس دهنده رفتار خرابی زیرسیستم هیدرولیک در نظر گرفته شد. با به دست آمدن پارامترهای تابع چگالی خرابی، مدل قابلیت اطمینان این زیرسیستم مطابق رابطه ۶-۴ ارائه شد.

$$R_{\text{Hydraulic}}(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} = 1 - 1.1 \left( \Gamma_{(0.017t)^{0.883}}(0.859) \right) \quad (4-6)$$

۱۰- با توجه به نتایج به دست آمده، زیرسیستم هوای فشرده ماشین حفار خط یک مترو تبریز حدود ۹/۲ درصد فراوانی خرابی‌ها را به خود اختصاص داده است. نتایج تحلیل داده‌های خرابی این زیرسیستم مشخص کرد که تابع توزیع ویبول سه پارامتری بهترین تابع قابل برازش برای داده‌ها می‌باشد. همچنین مدل قابلیت اطمینان این زیرسیستم مطابق رابطه زیر می‌باشد.

$$R_{\text{Pneumatic}}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-9.2657}{100.898}\right)^{1.1320}\right) \quad (5-6)$$

۱۱- نتایج تحلیل نشان داد که زیرسیستم آب با فراوانی نسبی ۸/۹ درصد، کمترین میزان خرابی در بین سایر زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز را دارا می‌باشد و تابع توزیع لاگ نرمال بهترین تطابق برای داده‌ها برخوردار می‌باشد. مدل قابلیت اطمینان این زیرسیستم مطابق رابطه ۶-۶ ارائه گردید.

$$R_{\text{Water}}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t-\gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t+994.214) - 7.004}{0.0471}\right) \quad (6-6)$$

۱۲- با به دست آمدن قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و با توجه به ساختار سری آن‌ها، با استفاده از رابطه ۶-۷ قابلیت اطمینان کل ماشین حفار محاسبه گردید. محاسبات نشان داد که قابلیت اطمینان کل ماشین حفار تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین پس از طی حدود ۵۵ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. قابلیت اطمینان دستگاه در طی ۱۰ ساعت اول، حدود ۶۵ درصد کاهش می‌یابد که میزان قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

$$R_{\text{TBM}} = \prod_{i=1}^5 R_i = R_{\text{mechanical}} \cdot R_{\text{Electrical}} \cdot R_{\text{Hydraulic}} \cdot R_{\text{Pneumatic}} \cdot R_{\text{Water}} \quad (7-6)$$

۱۳- نتایج آزمون روند برای داده‌های تعمیر و نگهداری ماشین حفار نشان داد که داده‌های ثبت شده برای همه‌ی زیرسیستم‌ها فاقد روند و همبستگی سری بوده و مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری آن‌ها همانند مدل‌سازی قابلیت اطمینان، با فرآیند تجدید شونده صورت پذیرفت.

۱۴- مدل قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین به صورت رابطه ۶-۸ محاسبه گردید. نتایج مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم مکانیک بخش پشتیبان ماشین نشان داد که مدت زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در این زیرسیستم کمتر از ۲۰ ساعت می‌باشد هرچند که با احتمال ۹۰ درصد، تعمیرات در مدت زمان حداکثر ۵ ساعت صورت می‌گیرد و ماشین به فعالیت خود ادامه می‌دهد.

$$M_{Mechanic}(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t - 0.167) - 0.621}{2.431}\right) \quad (۸-۶)$$

همچنین مدل قابلیت تعمیر و نگهداری بخش بدنه ماشین مطابق رابطه ۶-۹ محاسبه شد. این زیرسیستم دارای بیشترین زمان مورد نیاز برای انجام تعمیرات و نگهداری می‌باشد. مدت زمان بالای تعمیرات مربوط به حالتی است که تعداد زیادی ابزارهای برشی مورد تعمیر و نگهداری قرار بگیرند.

$$M_{Mechanical2}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.33)/104726}(0.436)}{\Gamma(0.436)} = 0.49 \left( \Gamma_{(t-0.33)/104726}(0.436) \right) \quad (۹-۶)$$

۱۵- نتایج تحلیل داده‌های خرابی سایر زیرسیستم‌ها نشان داد که توابع توزیع گامای سه پارامتری، گاما، لاگ نرمال و گامای سه پارامتری به ترتیب بهترین توابع برزش شده بر داده‌های تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های برق، هیدرولیک، هوای فشرده و آب می‌باشد. مدل قابلیت تعمیر و نگهداری این زیرسیستم‌ها به صورت روابط ۶-۱۰ تا ۶-۱۳ به دست آمد.

$$M_{Electrical}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.17)/1.58}(0.65)}{\Gamma(0.65)} = 1.385 \left( \Gamma_{(t-0.17)/1.58}(0.65) \right) \quad (۱۰-۶)$$

$$M_{Hydraulic}(t) = \frac{\Gamma_{t/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{t/1.661}(0.926)}{\Gamma(0.926)} = 1.049 (\Gamma_{0.6r}(0.926)) \quad (11-6)$$

$$M_{Pneumatic}(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - 0.6680}{0.8185}\right) \quad (12-6)$$

$$M_{Water}(t) = \frac{\Gamma_{(t-\gamma)/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} = \frac{\Gamma_{(t-0.161)/0.5717}(1.2392)}{\Gamma(1.2392)} \quad (13-6)$$

۱۶- برای محاسبه و مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین، با توجه به شبکه سری زیرسیستم‌ها که برای محاسبه قابلیت اطمینان ماشین در بخش قبل محاسبه شد از رابطه قابلیت تعمیر و نگهداری از رابطه ۶-۱۴ استفاده شد.

$$M_{TBM} = \prod_{i=1}^5 M_i = M_{mechanical} \cdot M_{Electrical} \cdot M_{Hydraulic} \cdot M_{Pneumatic} \cdot M_{Water} \quad (14-6)$$

۱۷- نتایج مدل‌سازی قابلیت تعمیر و نگهداری ماشین حفار خط یک مترو تبریز نشان داد که در یک شیفت کاری ۱۲ ساعته حدود ۴۰ درصد تعمیرات ماشین حفار می‌تواند صورت پذیرد که این میزان تعمیرات برای ایجاد پیوستگی در عملیات حفاری تونل مناسب نمی‌باشد.

۱۸- نتایج قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های ماشین حفار خط یک مترو تبریز نشان داد که زیرسیستم آب با ۹۹/۲ درصد بیشترین و زیرسیستم مکانیک بخش بدنه با ۵۴/۷ درصد کمترین میزان قابلیت دسترسی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به سری بودن زیرسیستم‌ها با استفاده از رابطه ۶-۱۵ قابلیت دسترسی کل ماشین محاسبه گردید. میزان دسترسی محاسبه شده فقط شامل تمامی تأخیرها و توقف‌های ناشی از ماشین حفار می‌باشد و چنان‌که شرایط عملیاتی پروژه کاملاً ایده‌آل باشد و هیچ‌گونه توقف دیگری در عمل وجود نداشته باشد قابلیت دسترسی همان ضریب بهره‌وری ماشین خواهد بود که برای محاسبات برنامه‌ی زمانی پروژه‌های تونل‌سازی با ماشین‌های حفاری تونل از نوع تعادل فشار زمین می‌تواند دید مناسبی را در اختیار دست‌اندرکاران صنعت تونل‌سازی قرار دهد.

$$A_{TBM} = \prod_{i=1}^5 A_i = A_{Mechanical} \cdot A_{Electrical} \cdot A_{Hydraulic} \cdot A_{Pneumatic} \cdot A_{Water} = 48.3\% \quad (15-6)$$

۱۹- نتایج تخصیص قابلیت دسترسی نشان داد که زیرسیستم مکانیک بخش بدنه ماشین بیشترین و زیرسیستم آب کمترین تأثیر را بر قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز دارا می‌باشند. همچنین با توجه به محاسبات صورت گرفته، شاخص اهمیت قابلیت دسترسی بر حسب میانگین زمان تعمیرات تأثیر بیشتری از میزان این شاخص بر حسب میانگین خرابی‌ها دارد بنابراین برای برای افزایش و بهبود قابلیت دسترسی ماشین حفار خط یک مترو تبریز بهتر است که میانگین زمان تعمیرات زیرسیستم مکانیک این ماشین کاهش یابد.

۲۰- با توجه به قابلیت اطمینان پایین زیرسیستم مکانیک به ویژه بخش پشتیبان ماشین، شیب کاهشی نسبتاً تند قابلیت اطمینان زیرسیستم هیدرولیک ماشین و نیز تخصص تعمیرکاران، قابلیت اطمینان حدود ۸۰ درصد به عنوان قابلیت اطمینان هدف و حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستم‌های ماشین تعیین گردید و به منظور حفظ قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در سطح حدود ۸۰ درصد، زمانی که هر کدام از زیرسیستم‌ها به قابلیت اطمینان ۸۰ درصد می‌رسد، به عنوان دوره تعمیرات پیش‌گیرانه آن زیرسیستم انتخاب گردید.

۲۱- نتایج نشان داد بعد از گذشت ۳۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، همه‌ی زیرسیستم‌ها به غیر از زیرسیستم آب تحت تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه قرار می‌گیرند و قابلیت اطمینان ماشین به بیش از دو و نیم برابر افزایش پیدا می‌کند. در حالت بدون اعمال تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بعد از گذشت حدود ۵۵ ساعت حفاری پیوسته، قابلیت اطمینان کل ماشین حفار خط یک مترو تبریز به صفر می‌رسد و ماشین متوقف خواهد شد ولی با اعمال برنامه زمان‌بندی پیشنهادی در این رساله و انجام تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه بر مبنای قابلیت اطمینان، RCM، قابلیت اطمینان ماشین حفار خط یک مترو تبریز در سطح بالای ۸۰ درصد حفظ خواهد شد. بدین ترتیب با کاهش میزان خرابی‌ها، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و بهره‌وری ماشین نیز افزایش پیدا خواهد کرد.



نتایج محاسبات نشان داد با اعمال برنامه پیشنهادی در این رساله، بعد از گذشت ۶۰ ساعت عملیات پیوسته حفاری، همه‌ی زیرسیستم‌های ماشین تحت تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه قرار می‌گیرند و بدین ترتیب قابلیت اطمینان ماشین مجدداً به ۱۰۰ درصد می‌رسد.

۲۲- نتایج تحلیل قابلیت اطمینان ابزار برشی ماشین حفار با در نظر گرفتن شرایط محیط از قبیل میزان ساینده‌گی سینه کار تونل، مهارت اپراتور و مهارت پرسنل تعمیر و نگهداری نشان داد که نرخ خرابی و قابلیت اطمینان به شدت تحت تأثیر متغیرهای محیطی می‌باشد. مدل نرخ خرابی و قابلیت اطمینان خراش دهنده‌های ماشین مورد مطالعه مطابق روابط ۶-۱۶ و ۶-۱۷ به دست آمد.

$$\lambda(t, z) = \frac{2.7}{210} \left(\frac{t}{210}\right)^{2.7-1} \exp(-1.603AFTA - 1.090OPSK - 0.828MCSK) \quad (16-6)$$

$$R(t) = R_0(t) \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i\right) = \left[\exp\left(-\frac{t}{210}\right)\right]^{2.7} \exp(-1.603AFTA - 1.090OPSK - 0.828MCSK) \quad (17-6)$$

۲۳- با استفاده از توابع نرخ خرابی و قابلیت اطمینان وابسته به شرایط محیط، میانگین عمر باقی مانده ابزار برشی مورد مطالعه تعیین گردید که این امر در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد در صورتی که عوامل تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان ابزار برشی همگی مطلوب باشند بعد از گذشت ۵۰ ساعت حفاری انتظار می‌رود از این ابزار حدود ۶۴۰ ساعت دیگر نیز بتوان استفاده کرد. در حالی که برای شرایط کاملاً نامطلوب این میزان به حدود ۱۸ ساعت کاهش می‌یابد.

### ۳-۶- پیشنهادات

با توجه به مطالعات صورت گرفته در این رساله، به منظور انجام تحقیقات و مطالعات تکمیلی و بیشتر در این زمینه، پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

۱- پیشنهاد می‌شود قابلیت اطمینان ماشین حفار به عنوان تابعی از شرایط ژئومکانیکی مسیر تونل در نظر گرفته شود. به عبارت بهتر، تأخیرات ناشی از شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی مسیر در محاسبات در نظر گرفته شوند.

۲- پیشنهاد می‌گردد قابلیت اطمینان پرسنل تعمیر و نگهداری و همچنین اپراتور ماشین نیز بررسی گردند و تأثیر آن بر قابلیت اطمینان کل ماشین بررسی شود.

۳- با توجه به این که برای بیشتر ماشین آلات معدنی تحلیل و ارزیابی قابلیت اطمینان صورت گرفته است پیشنهاد می‌گردد علاوه بر ارزیابی قابلیت اطمینان، با تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی ماشین آلات معدنی که در معادن روباز و زیرزمینی کشورمان به کار گرفته می‌شوند افق نوینی در اختیار فعالان بخش معدن قرار گیرد تا هم زمینه برنامه‌ریزی دقیق و واقعی برای تولید و افزایش بهره‌وری داشته باشند و هم بتوانند در زمینه کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری گام‌های علمی و عملی بردارند.

۴- استفاده از قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری شرطی پیشنهاد می‌گردد تا تأثیر پارامترهای محیطی مؤثر بر عملکرد ماشین آلات مختلف معدنی مختلف ارزیابی شود و دید واقع بینانه‌تری نسبت به وضعیت نرخ خرابی، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و همین‌طور قابلیت دسترسی ماشین آلات و سیستم‌های معدنی حاصل گردد.

# فهرست منابع

۱. سازمان قطار شهری تبریز (۱۳۸۳)، گزارش مطالعات خط یک متروی تبریز.
2. Dhillon, B.S. (2008). Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety, Springer, pp. 209.
3. Laughton, C. (1998). Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in variable rock Masses, PhD Thesis, University of Texas.
۴. کوروش، ش. (1390)، مبانی حفاری مکانیکی و کاربرد آن در حفر تونل، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران، آبان ماه 1390. ATS11-055.
5. Wittke, W. (2007). Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling, WBI-6, Aachen, Germany, pp. 563.
6. DOD, (2005). DOD (Department of Defense) Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability. U.S.A, pp. 266.
7. Dhillon, B. S. (2006). Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers, Taylor & Francis group, pp. 221.
8. Stapelberg, R. F. (2009). Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design, Springer, pp. 827.
9. Birolini, A. (2007). Reliability Engineering, Theory and Practice, 5<sup>th</sup> edition, Springer, pp. 588.
10. Pham, H. (2006). Springer Handbook of Engineering Statistics, Springer, PP. 1120.
11. Kececiyoglu, D. B. (2002). Reliability Engineering Handbook” Vol. 1, Desteck Publication, USA, pp. 721.
12. Ebeling, C. E. (2010). An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, 2nd Edition, Waveland Press Inc. Illinois, USA, pp. 550.
13. Rausand, M., Hsyland, A. (2004). System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications, 2nd edition, Wiley & Sons, pp. 644.
14. Marshall, A. W., Olkin L. (2007). Life distributions, Springer, pp: 781.

15. Finkelstein, M. (2008). Failure Rate Modeling for Reliability and Risk, Springer, 290
16. Smith, D. J. (2005). Reliability, Maintainability and Risk, 7nd edition, Elsevier, pp 350
17. Dhillon, B. S. (1999). Design Reliability, Fundamentals and Applications, CRC Press LLC, pp. 397.
18. Myrefelt, S. (2004). The reliability and availability of heating, ventilation and air condition systems, Energy and Buildings, 36(10): 1035-1048
19. Barabady, J., Kumar, U. (2005). Maintenance schedule by using reliability analysis: A case study at Jajarm bauxite mine of Iran, 20th world mining congress & expo, Tehran, Iran, 79-86.
20. Samrout, M., Yalaoui, F., Chatelet E., Chebbo N. (2005). New methods to minimize the preventive maintenance cost of series -parallel systems using ant colony optimization, Reliability Engineering and System Safety, 89(3): 346-354.
21. Castro, H. F., Cavalca, K.L. (2003). Availability optimization with genetic algorithm, Inter-national Journal of Quality and Reliability Management, 20(7):847-863.
22. Eleqbede, C., Adjallah, K. (2003). Availability allocation to repairable systems with genetic algorithms: A multi-objective formulation, Reliability Engineering and System Safety, 82(3): 319-330.
23. Chiang, C.H., Chen, L.H. (2007). Availability allocation and multi-objective optimization for parallel-series systems, Reliability Engineering and System Safety, European Journal of Operational Research, 180(3):1231-1244.
24. Frickes, M. F., Trivedi, K. S. (2003). Importance analysis with Markov chains, Proceedings of the 49th Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tampa, FL, 27-30 January, pp. 89-95.
25. Cassady, R. C., Pohl, E. A., Song J. (2004). Managing availability improvement efforts with importance measures and optimization, IMA Journal of Management Mathematics 15(2):161-174.

26. Zio, E., Podofillini, L. (2003). Importance measures of multi-state components in multi-state systems, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 10(3):289-310.
27. Barabady, J., Kumar, U. (2007). Availability allocation through importance measures, *Inter-national Journal of Quality & Reliability Management*, 24(6), pp. 643-656.
28. Barabady J., Kumar U. (2006). "A method for managing the availability improvement efforts", *Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM)*, 74, 1-9.
۲۹. حسینی س. ه.، رساله دکتری (۱۳۹۰). مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه، مطالعه موردی معدن زغال‌سنگ طبس، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
30. Meeker, W. Q., Escobar, L. A., (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*, Wiley-Interscience Publication, pp. 712.
31. Jalali, S. E., Forouhandeh, S. F. (2011). Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction, *Safety Science*, 49: 664–669.
32. Lisnianski, A., Elmakias, D., Laredo, D., Ben Haim, H. (2012). A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit. *Reliability Engineering and System Safety*, 98: 1–6.
33. Jiang, J. J., Zhang, L., Wang, Y. Q., Peng, Y. Y., Zhang, K. (2011). Markov reliability model research of monitoring process in digital main control room of nuclear power plant, *Safety Science*, 49 :843–851.
34. Van, P. D., Barros, A., Berenguer, C. (2010). From differential to difference importance measures for Markov reliability models, *European Journal of Operational Research* 204: 513–521.

35. Taghipour, Sh., Banjevic, D. (2011). Trend analysis of the power law process using Expectation–Maximization algorithm for data censored by inspection intervals, *Reliability Engineering and System Safety*, 96: 1340–1348.
36. Kumar U. (1990). “Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines”. Ph.D thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
37. Wang, P., Coit, D. E. (2005). Repairable systems trend tests and evaluation, *Proceedings book of IEEE reliability and maintainability symposium*, 416-421.
38. MIL-HDBK-189. (1981). Reliability growth management, US army communication research and development command. A’ITN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ.
39. Ascher, H., Feingold, H. (1984). *Repairable System Reliability*, New York: Dekker.
40. Gölbaşı, O., Demirel, N. (2015). Review of Trend Tests for Detection of Wear Out Period for Mining Machineries, 24<sup>th</sup> International mining congress and exhibition of Turkey- IMCT15, 993-39.
41. Rahimdel, M. J., Ataei, M., Khalokakaei, R., Hoseinie S. H. (2014). Maintenance plan for a fleet of rotary drill rigs. *Archive of Mining Science*, 59(2), 441–45.
42. Balakrishnan, N., Limnios N., Papadopoulos, C., (2001). *Basic Probabilistic Models in Reliability*. pp. 848.
43. Pham, H. (2003). *Handbook of reliability engineering*, Springer-Verlag London Limited, pp. 696.
44. Rausand, M., Oien, K. (1996). The basic concepts of failure analysis, *Reliability Engineer-ing and System Safety* , 53(1):73-83.
45. Rackwitz, R. (2001). Reliability analysis-a review and some perspective, *Structural Safety* , 23(4):365-395.
46. Foucher B., Das D., Boulie J., Meslet B. (2002). “A review of reliability prediction methods for electronic devices”. *Microelectronics Reliability*, 42(8): 1155-1162.
47. Rueda A., Pawlak M. (2004). “Pioneers of the reliability theories of the past 50 years”. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, p. 102-109

48. Retterer, B.L. Kowalski R.A. (1984). "Maintainability: A historical perspective". IEEE Trans. Reliability, 33, 56-61, 1984.
49. Sandler, G. H. (1963). System Reliability Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
50. Barlow, R. E., Frank, P. (1965). Mathematical Theory of Reliability, Wiley, New York, pp. 256.
51. Lee, K. W. (2003). Random-request availability, In: Pham (ed) Handbook of Reliability Engineering. Springer, London: 643–652.
52. Kumar, U., Granholm S. (1988). Reliability Technique: A Powerful Tool for Mine Operator, Mineral Resource Engineering, 1: 13-28.
53. Stanek, E. K., Venkata S. S. (1988). Mine Power System Reliability, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 5.
54. Dey, A., Bhattacharya J., Banerjee S. (1994). Prediction of field reliability for dumper tires, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 8(1): 23–25.
55. Vagenas, N. Runciman, N. Clement, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11, 33-40.
56. Samanta, B., Sarkar, B., Mukherjee, S. K. (2001). Reliability centered maintenance (RCM) for heavy earth-moving machinery in an open cast coal mine, CIM Bull. Nov-Dec, pp. 104–108.
57. Townson, P. G. A. L. (2002). Load–Maintenance Interaction: Modeling and Optimization, Ph.D Thesis, University of Queensland, pp. 530.
58. Hall, R., Daneshmend, L. K. (2003). Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment, CIM Bulletin; 96, Jun/Jul, pp. 159-165.
59. Hall, R., Daneshmend, L. K. (2003). Reliability Modeling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 17(3): 139-155.



60. Samanta, B., Sarkar, B., Mukherjee, S. K. (2004). Reliability modeling and performance analysis of an LHD system in mining, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(1): 1-8.
61. Ghodrati, B. (2005). Reliability and operating environment based spare parts planning, PhD. Thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden
62. Gupta, S., Bhattacharya J. (2007). Reliability Analysis of a Conveyor System using Hybrid Data, *Quality and Reliability Engineering International*, 23:867–882.
63. Barabady, J., Kumar, U. (2007). Reliability characteristics based maintenance scheduling: a case study of a crushing plant, *International Journal of Performability Engineering*, 3(3), pp. 319 – 328.
64. Eleveli, S., Uzgoren, N., Taksuk, M. (2008). Maintainability analysis of mechanical system of electric cable shovels, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 67: 267-271.
65. Bing-Yuan, H., Gang, S., Li-Xun K. (2009). Reliability emulation of production system on longwall face, *Journal of Coal Science & Engineering*, 15(1): 76–80.
66. Vayenas, N., Xiangxi, W. (2009). Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3), 227-238.
67. Pratama, A.T. Moeis, A.O. (2010). Effort on Reliability and Availability Improvement of Excavator, *Proceeding, International Seminar on Industrial Engineering and Management*.
68. Jalali, S. E., Forouhandeh S. F. (2011). Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction, *Safety Science*, 49(2): 664–669.
69. Esmaeili, M. Bazzazi, A.A. Borna, S. (2011). Reliability analysis of a fleet of loaders in sangan iron mine, *Archives of Mining Sciences*, 26(4): 629-640.
70. Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., Kumar, U. (2012). Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines, *J. Quality Mainten. Engrg.* 18(1), 98–119.

71. Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., Kumar, U. (2011). Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine, *Journal of Coal Science and Engineering*, 17(4), 450–456.
72. Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., Kumar, U. (2011). Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers, *Journal of Coal Science and Engineering*, 17(2), 192–197.
73. Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Kumar, U. (2011). Reliability modeling of water system of longwall shearer machine, *Arch. Min. Sci.* 56(2), 291–302.
74. Barabadi, A., Barabady, J., Markeset, T. (2011). Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates, *Reliability Engineering and System Safety* 96: 210–217.
75. Wijaya, A. R. (2012). Methods for availability improvements of a scaling machine system, PhD. Thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden
76. Hoseinie S. H., Ahmadi, A., Ghodrati B., Kumar, U. (2013). Reliability – Centered maintenance for spray jets of coal shearer machine, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 20 (3):1340006.
77. Rahimdel, M. J., Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R. (2013). The Reliability and Maintainability Analysis of Pneumatic System of Rotary Drilling Machines, *Journal of Institute of Engineering, India Ser. D*, 94(2), 105 -111.
78. Rahimdel, M. J., Ataei, M., Khalokakaie, R., Hoseinie S. H. (2014). Maintenance plan for a fleet of rotary drill rigs, *Archive of Mining Science*, 59(2), 441–45.
79. Mohammadi, M., Rai, P., Oraee, S. K., Kumar, M. (2013). Analysis of availability and utilization of dragline for enhancement of productivity in surface mines: A case study, *Proceeding of 23rd World Mining Congress, Montreal*, Paper 598.
80. Gustafson, A. (2013). Automation of Load Haul Dump Machines: Comparative Performance Analysis and Maintenance Modeling, Ph.D. thesis, Luleå University of Technology: Luleå, Sweden.
81. Mouli, C., Chamarthi, S., Ravi Chandra G., Kumar, R. (2014). Reliability Modeling

and Performance Analysis of Dumper Systems in Mining by KME Method, International Journal of Current Engineering and Technology, DOI: <http://dx.doi.org/10.14741/ijcet/spl.2.2014.46>.

82. Vayenas, N., Peng S. (2014). Reliability analysis of underground mining equipment using genetic algorithms A case study of two mine hoists, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 20(1): 32-50.

83. Furuly, S., Barabady, J., Barabadi, A. (2014). Availability analysis of the main conveyor in the Svea Coal Mine in Norway, International Journal of Mining Science and Technology 24, 587–591.

84. Al-Chalabi, H. (2014). Reliability and Life Cycle Cost Modeling of Mining Drilling Rigs, Ph.D. thesis, Luleå University of Technology: Luleå, Sweden.

85. Gölbaşı, O., Demirel, N. (2014). Stochastic Models in Preventive Maintenance Policies, Advanced Materials Research, 1016: 802-806.

86. Moniri, A. M. Pourgol-Mohammad, M. Sattarvand, J. (2014). “Application of reliabilitycentered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of Sungun Copper Mine”, Journal of Central South University, 21, 6 , 2372-2382.

۸۷. مرشدلو، ع.، دهقانی، ح. (۱۳۹۴). تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه ناوزنجیری زرهی در معدن زغالسنگ مکانیزه طبس، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره دهم، شماره ۲۶، صفحه ۱-۹.

88. Jafari, M. J., Gharari, N. A., Sheikhi, H. R. (2009). The Reliability of a Tunnel Boring Machine, International journal of occupational hygiene, 1: 21-26.

89. NFM Technologies, (2007). Operating and maintenance manual for EPB TBM for Tabriz, Not published.

90. Francois, P, Noyes, D. (2003). Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair, Quality and Reliability Engineering International, 19(2), 129-148

91. Math Wave Technologies, (2010). Easy Fit Professional, Version 5.5, <http://www.mathwave.com>.

۹۲- گل مکانی، ح. ر. (۱۳۸۸). مدیریت نگهداری و تعمیرات؛ مدل سازی و بهینه سازی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. چاپ اول، ۳۱۲.

93. Geraerds, W.M.J. (1985). The cost of downtime for maintenance: preliminary considerations, *Maintenance Management International*, 5: 13-21.

94. Levitt, J. (2011). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*, 2<sup>nd</sup> ed. Industrial Press Inc. New York. pp. 372

95. Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance*, 2<sup>nd</sup> ed. Oxford; Boston, Butterworth Heinemann.

96. Tsang, A. H. C., Jardine, A. K. S., Campbell, J.D., Picknell, J.V. (2000). *Reliability Centered Maintenance: A Key to Maintenance Excellence*, Hong Kong, City University of Hong Kong.

97. Bimal, S., Sarkar, B., Mukherjee, S. (2001). Reliability analysis of Shovel Machines Used in an Open Cast Coal Mine”, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 219-231

98. Elsayed, E. A. (2003). Mean residual life and optimal operating conditions for industrial furnace tubes, *Case Studies in Reliability and Maintenance*, New York, Wiley, pp. 497–515

99. Jardine, A. K. S., Lin, D. Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20:1483–1510

100. El-Koujok, M., Gouriveau, R., Zerhouni, N. (2008). From monitoring data to remaining useful life: an evolving approach including uncertainty, in proceeding 34th European Safety Reliability & Data Association, San Sebastian, Spain.

101. Wang, L., Chu, J., Mao, W. (2009). A Condition-Based Replacement And Spare Provisioning Policy for Deteriorating Systems With Uncertain Deterioration To Failure, *European Journal of Operational Research*, 194: 184–205

102. Ghodrati, B., Kumar, U. (2005). Reliability and Operating Environment Based Spare Parts Estimation Approach – A Case Study in Kiruna Mine, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11: 168-184

103.

103. Cox, D.R. (1972). Regression models and life-tables, *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. B34, pp. 187-220
104. Barabadi, A., Barabady, J., Markeset, T. (2014) Application of reliability models with covariates in spare part prediction and optimization – A case study, *Reliability Engineering and System Safety*, 123: 1–7
105. Barabadi, A., Gudmestad, O.T., Barabady J. (2015). RAMS data collection under Arctic conditions, *Reliability Engineering and System Safety*, 135 (2015) 92–99
106. Barabadi, A., Markeset T. (2011). Reliability and maintainability performance under Arctic conditions, *Int J Syst Assur Eng Manag*, 2(3):205–217
107. Kumar, D., Crocker, J., Knezevic, J., El-Haram, M. (2000), *Reliability, Maintenance and Logistic Support: a Life Cycle Approach*, USA: Kluwer Academic Publishers
108. Banjevic, D., Jardine, A. K. S. (2006). Calculation of reliability function and remaining useful life for a Markov failure time process, *IMA Journal of Management Mathematics*. 17: 115–130
109. Yan, Sh. (2009), *Reliability modeling and analysis with mean residual life*, Doctoral thesis, National university of Singapore.

## **Abstract**

Reliability analysis is a practical and applied process that is performed during both design and operation steps. The result of this process is the control, evaluation, and assessment of potential failure existing in the system and, ultimately, prediction of failure rate of the studied system. Along with reliability, maintainability is a controlling parameter with regard to the performance of each sector or subsystem. In this regard, an additional element to reliability and maintainability is the system or machine availability through which it is possible to assess the entire condition of the system.

In the present dissertation, an attempt was made to investigate the operation of earth pressure balance tunnel boring machine installed in Line 1 of Tabriz Metro. The machine used in this project is manufactured by NFM Company (of France). Studying the overall structure of the machines, six systems including, mechanical of backup part, mechanical of body (front) part, electrical, hydraulic, pneumatic, and water systems were introduced to be studied as subsystems of the machine. Data and information of project delays caused by these systems malfunction over 26 month period of excavation were gathered.

As the next step, the failures and repairs data of each subsystem was classified. The applied statistical analyses showed that failure and repairs data of all subsystems follow classic statistical distribution functions. Therefore, by deriving the parameters of failure and repair density distribution of the functions, the reliability, maintainability, and availability of system were determined for each subsystem.

In the next step, based on the obtained results and structure of the subsystems, the analysis for the entire system was performed. The obtained results showed that the reliability level of the studied systems will reach 0 after 55 hours of excavation if no action is taken. Also the availability of the machine was calculated as 48.03%. Also, for improving the performance and reducing unpredicted failures of the TBM, a maintenance and repair plan was recommended for the whole tunneling machine in Line 1 of Tabriz Metro. Finally the estimation of mean residual life for the cutting tools of the machine was performed considering operating environment.

**Keywords:** Tunnel boring machine, Reliability, Maintainability, Availability, Mean residual life



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

Ph.D. Thesis in Mining Exploitation

**Modeling of Reliability, Availability and Maintainability of  
Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines**

By: Hasel Amini Khoshalan

Supervisor:

Dr Seyed Rahman Torabi

Advisor:

Dr Seyed Hadi Hoseinie

June 2016