



دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت

گروه مهندسی استخراج معدن

مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان  
درام شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی  
مکانیزه  
مطالعه موردی: معدن زغال‌سنگ طبس

دانشجو: سید هادی حسینی

اساتید راهنما:

پروفسور محمد عطائی  
پروفسور رضا خالوکاکایی

استاد مشاور:

**Prof. Uday Kumar**

رساله جهت اخذ درجه دکتری مهندسی استخراج معدن

آذر 1390



## تعهد نامه

اینجانب ..... **سید هادی حسینی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته ..... معدن مهندسی استخراج  
معدن، نفت  
دانشکده ..... ژئوفیزیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله ..... مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان  
درام شیرر در معدن جبهه کار طولانی مکانیزه، ..... تحت راهنمایی ..... پروفیسور محمد  
مطالعه موردی: معدن زغال سنگ طمس ..... رضا خالوکا کایی

- 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 : 90/9/24

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 .

تقدیم به

## پدر و مادر دلسوزم

که اولین معلمان زندگیم بودند

و

## همسر عزیزم

که این دفتر را مدیون عشق، صبر و تشویق ایشان هستم

و تقدیم به

## کارگران سختکوش معادن زغالسنگ ایران

## تشکر و قدردانی

سپاس یزدان پاک را که زمین به گرد خورشید و ماه به دور زمین، به قدرت او میچرخند و قلم به خواست او مینویسد دفتر پاک عشق را. سپاس او را که بزرگیاش را در اعماق زمین و در گرمای زغالسنگ یافتم.

این دفتر قطرهای از دریای علمی است که توأم با عشق و معرفت از اساتیدم آموختم. از زحمات استاد مهربان و فرزانهام جناب آقای دکتر عطایی که عاشقانه راهنما، مشوق و مایه دلگرمی بنده در این پروژه بودند و بسیار مدیون محبتهای بیدریغ و حمایتهای همه جانبه ایشان هستم، صمیمانه سپاسگزارم و برای ایشان آرزوی سلامتی و بهروزی دارم. از استاد عزیز و بزرگواریم جناب آقای دکتر کاکایی که در طی پروژه پیوسته راهنما و مشوقم بودند کمال امتنان و تشکر را دارم و برای ایشان سلامتی و طول عمر آرزومندم. از استاد ارجمند جناب آقای پروفیسور کومار که به عنوان مشاور و میزبان فرصت مطالعاتی اینجانب در کشور سوئد، در این تحقیق مرا یاری نمودند سپاسگزار و متشکرم.

از کلیه کارگران سختکوش و مسئولین محترم مجتمع زغالسنگ طبس به ویژه آقایان مهندس کزیتی (مدیرعامل محترم)، مهندس جلالی (مدیر محترم آموزش)، مهندس حسینی، مهندس سجادی، مهندس روئینتن، مهندس شجاع و مهندس فتوت که با محبت و بزرگواری خویش بنده را یاری نمودند و مهماندوستی و پاکی مردم کویر و بویژه شهر زیبای طبس را در خاطرم جاودانه کردند، کمال تشکر را دارم. امیدوارم با به پایان رساندن این تحقیق، اندکی از دین خویش را به وطن عزیزم و مردمان مهربانش ادا کرده باشم.

از آقایان دکتر بهزاد قدرتی و دکتر علیرضا احمدی (اساتید ایرانی بخش مهندسی تعمیر و نگهداری دانشگاه صنعتی لولئو- سوئد) و خانواده محترمشان، به خاطر لطف و محبت بیدریغ و کمکهای علمی بسیار ارزندهشان و از جناب آقای دکتر جواد برآبادی، به خاطر راهنماییهای سودمندشان کمال امتنان و تشکر را دارم.

از مسئولین محترم دانشگاه صنعتی همدان که با اعطای بورسیه تحصیلی، اینجانب را در طی دوره دکتری و فرصت مطالعاتی خارج از کشور مورد حمایت مالی قرار دادند سپاسگزار و متشکرم.

در پایان، از پدر و مادر مهربان و بزرگواریم که از کودکی همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی راهنمایی و یاریمان نمودند کمال تشکر و سپاس را دارم. از همسر عزیزم که در طی دوران کارشناسیاش و دکتری، تمامی سختیهای زندگی را با گشادهرویی تحمل نمودند و بنده تمامی پیشرفتهای تحصیلیام را مدیون صبر و تشویقهای ایشان هستم، کمال سپاسگزاری، تشکر و امتنان را دارم. از پدر و مادر همسرم به خاطر درک بالا و تشویقهای گرمشان سپاسگزار و متشکرم. برای تمامی عزیزانم، از درگاه الهی سلامتی و طول عمر خواستارم.

## چکیده

قابلیت اطمینان، به عنوان یک شاخص مهندسی، از کاربردهای بسیار زیادی در کنترل عملیات و راندمان تولید ماشینآلات سنگین برخوردار است. با توجه به حجم بالای عملیات در معادن، حفظ توان تولید و مدیریت ماشینآلات از جمله مواردی هستند که میتوانند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را تحت تأثیر قرار دهند. قابلیت اطمینان تولید هر معدن به طور مستقیم به قابلیت اطمینان ماشینآلات فعال در آن معدن وابسته است.

با توجه به اهمیت پیوستگی تولید در معادن جبهه‌کار طولانی، هزینه‌های سنگین توقف‌های ناشی از خرابی و نقش حیاتی دستگاه درام شیرر در توان تولید معدن، در این رساله، قابلیت اطمینان درام شیرر مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، با استفاده از اطلاعات فنی و دستگاه‌های درام شیرر موجود در بازار، ساختار کلی دستگاه مورد مطالعه قرار گرفته و زیرسیستم‌های آن پیشنهاد و معرفی شدند. در مجموع شش زیرسیستم شامل: سیستم آب، سیستم حرکت، سیستم هیدرولیک، سیستم برق، سیستم کابل و بازوهای برش برای دستگاه در نظر گرفته شده است.

در ادامه طی مطالعه موردی در معدن زغالسنگ مکانیزه طبس، داده‌های خرابی شیرر و توقفات تولید ناشی از آن در طی پهنه اول این معدن برای مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان دستگاه مورد استفاده قرار گرفتند. پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها، محاسبات مربوط به تحلیل داده بر روی آنها انجام گردید. نتایج تحلیلهای آماری نشان داد که رفتار خرابی سیستم آب از تابع گاما، سیستم‌های حرکت و هیدرولیک از تابع وایبول سه پارامتری، سیستم برق از تابع لاگنرمال و دو سیستم کابل و بازوهای برش از مدل قانون توان تبعیت میکنند.

در مرحله بعد، با استفاده از نتایج تحلیل داده و در نظر گرفتن ساختار سری برای زیرسیستم‌های دستگاه، قابلیت اطمینان کل دستگاه محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد که قابلیت اطمینان درام شیرر طبس پس از طی 100 ساعت عملیات برش به صفر میرسد. همچنین با استفاده از روش مونت کارلو کامات و رابلی (K-R)، قابلیت اطمینان درام شیرر شبیه‌سازی گردید. برای اجرای الگوریتم شبیه‌سازی، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab توسعه داده شد. با استفاده از این برنامه، منحنی قابلیت اطمینان شبیه‌سازی شده دستگاه رسم گردیده و با منحنی حاصل از مدلسازی مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان داد که منحنی‌های قابلیت اطمینان حاصل از هر دو روش بسیار به هم شبیه میباشند. اما منحنی حاصل از روش شبیه‌سازی نرم‌تر و یکنواختتر بوده و توانایی بیشتری برای پیشبینی قابلیت اطمینان دستگاه دارد. در پایان، با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان، برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس پیشنهاد شد.

**کلمات کلیدی:** زغالسنگ، جبهه‌کار طولانی، درام شیرر، قابلیت اطمینان، تعمیر و نگهداری، طبس

## مقالات مستخرج از رساله

### – مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات بینالمللی

- 1) S. H. Hoseinie, M. Ataie, R. Khalokakaie, U. Kumar, Reliability Modeling of Water System of Longwall Shearer Machine, *Archive of Mining Science*, Vol. 56 (2011), No.2, pp. 291–302. (ISI)
- 2) S. H. Hoseinie, R. Khalokakaie, M. Ataie, U. Kumar, Reliability-based Maintenance Scheduling of Haulage System of Drum Shearer, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, Vol. 3(2011), No. 1, pp. 26-37.
- 3) S. H. Hoseinie, M. Ataie, R. Khalokakaie, U. Kumar, Reliability and Maintainability Analysis of Electrical System of Drum Shearers, *Journal of Coal Science and Engineering*, Vol.17, No.2, June 2011, pp. 192–197.
- 4) S. H. Hoseinie, M. Ataie, R. Khalokakaie, U. Kumar, Reliability Modeling of Hydraulic System of Drum Shearer Machine, *Journal of Coal Science and Engineering*, Vol.17, No.4, Dec. 2011, pp. 450–456.
- 5) S. H. Hoseinie, M. Ataie, R. Khalokakaie, U. Kumar, Reliability Analysis of Cable System of Drum Shearer Using Power Law Process Model, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* (accepted for publication)
- 6) S. H. Hoseinie, M. Ataie, R. Khalokakaie, B. Ghodrati, U. Kumar, Reliability Analysis of Drum Shearer Machine at Mechanized Longwall Mines, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (accepted for publication)

### – مقاله ارائه شده در کنفرانس

- 7) S. H. Hoseinie, S. H. Hosseini, M. Ataie, R. Khalokakaie, U. Kumar, Reliability Modeling of Hydraulic System of Drum Shearer: A Case Study at Tabas Mechanized Coal Mine, *2<sup>nd</sup> Iranian Conference on Reliability Engineering*, 26-28 Oct. 2011, Tehran, Iran.

### – مقالات تحت داوری

- 8) S. H. Hoseinie, R. Khalokakaie, M. Ataie, B. Ghodrati, U. Kumar, Reliability Analysis and Maintenance Scheduling of Cutting Arms of Drum Shearer Machine in Tabas Coal Mine, *Reliability Engineering and System Safety* (ISI).
- 9) S. H. Hoseinie, R. Khalokakaie, M. Ataie, B. Ghodrati, U. Kumar, Monte-Carlo Reliability Simulation of Water System of Longwall Shearers, *Archive of Mining Science* (ISI).
- 10) S. H. Hoseinie, R. Khalokakaie, M. Ataie, B. Ghodrati, U. Kumar, Reliability Analysis of Coal Shearer Machine Using Event-Based Monte Carlo Simulation Method, *European Journal of Industrial Engineering* (ISI)

## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه

- 1-1- مقدمه ..... 2
- 2-1- معدن زغالسنگ پروده طبس ..... 5
- 3-1- بیان مسأله و سؤالهای اصلی تحقیق ..... 8
- 4-1- ضرورت انجام تحقیق ..... 9
- 5-1- اهداف تحقیق ..... 9
- 6-1- ساختار رساله ..... 10

### فصل دوم: قابلیت اطمینان؛ مفاهیم، مدلسازی و شبیهسازی

- 1-2- مقدمه ..... 13
- 2-2- تعاریف اصطلاحات رایج در مهندسی قابلیت اطمینان ..... 13
- 3-2- تعاریف ریاضی کمیتهای موجود در مهندسی قابلیت اطمینان ..... 15
- 1-3-2 - تابع چگالی توزیع احتمال ( $f(t)$ ) ..... 15
- 2-3-2 - تابع توزیع تجمعی ( $F(t)$ ) ..... 15
- 3-3-2 - تابع قابلیت اطمینان ( $R(t)$ ) ..... 16
- 4-3-2 - امید ریاضی ( $E(t)$ ) ..... 16
- 5-3-2 - تابع نرخ خرابی ( $\lambda(t)$ ) ..... 17
- 4-2- شبکههای قابلیت اطمینان ..... 19
- 5-2- روشهای متداول در تحلیل قابلیت اطمینان ..... 19
- 1-5-2 - روش تحلیل انواع خرابیها و تأثیرات آنها (FMEA) ..... 19
- 2-5-2 - روش مارکوف ..... 21
- 3-5-2 - روش تحلیل درخت خطا (FTA) ..... 23
- 4-5-2 - روش تحلیل آماری ..... 25
- 6-2- تحلیل آماری و مدلسازی قابلیت اطمینان ..... 25
- 1-6-2 - آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها ..... 28
- 1-1-6-2 - آزمونهای روند ..... 28
- 2-1-6-2 - آزمون همبستگی سری ..... 31
- 2-6-2 - فرآیند تجدیدشونده ..... 31
- 3-6-2 - فرآیند پواسون ..... 33
- 4-6-2 - فرآیند قانون توان ..... 34
- 7-2- شبیهسازی قابلیت اطمینان ..... 36
- 1-7-2 - شبیهسازی مونته کارلو ..... 37
- 2-7-2 - انواع الگوریتمهای مونته کارلو برای شبیهسازی قابلیت اطمینان ..... 40
- 3-7-2 - روش شبیهسازی قابلیت اطمینان مونته کارلو K-R ..... 43
- 8-2- نتیجهگیری ..... 45



## فصل سوم: بررسی سابقه علمی موضوع

- 3-1- مقدمه ..... 46
- 3-2- تحقیقات قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن ..... 46
- 3-3- مطالعات پیشین در مورد قابلیت اطمینان درام شیر ..... 64
- 3-4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ..... 67

## فصل چهارم: تعیین زیرسیستم‌های درام شیر

- 4-1- مقدمه ..... 71
- 4-2- مشخصات درام شیر معدن طبس ..... 71
- 4-3- ساختار کلی و زیرسیستم‌های درام شیر ..... 72
- 4-3-1- سیستم آب ..... 76
- 4-3-2- سیستم حرکت ..... 80
- 4-3-3- سیستم هیدرولیک ..... 82
- 4-3-4- سیستم برق ..... 85
- 4-3-5- بازوهای برش ..... 86
- 4-3-6- سیستم کابل ..... 89
- 4-4- نتیجه‌گیری ..... 91

## فصل پنجم: مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان شیر

- 5-1- مقدمه ..... 94
- 5-2- جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابیها ..... 94
- 5-3- تحلیل پارتو ..... 97
- 5-4- روش کلی تحلیل خرابیها و مدل‌سازی قابلیت اطمینان هر زیرسیستم ..... 98
- 5-5- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستمها ..... 100
- 5-5-1- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم آب ..... 100
- 5-5-2- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم حرکت ..... 106
- 5-5-3- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک ..... 112
- 5-5-4- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم برق ..... 117
- 5-5-5- مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم کابل ..... 123
- 5-5-6- مدل‌سازی قابلیت اطمینان بازوهای برش ..... 128
- 5-6- مدل‌سازی قابلیت اطمینان کل دستگاه درام شیر ..... 132
- 5-7- شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیر ..... 134
- 5-8- مقایسه نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیر معدن طبس ..... 140
- 5-9- نتیجه‌گیری ..... 142

## فصل ششم: تعمیر و نگهداری شیر معدن طبس

- 6-1- مقدمه ..... 145
- 6-2- اهمیت تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات معدنی ..... 145

.....146	3-6- تعمیر و نگهداری
.....147	4-6- انواع استراتژیهای تعمیر و نگهداری
.....148	1-4-6- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه
.....149	1-1-4-6- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت (C.B.M)
.....150	2-1-4-6- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان (T.B.M)
.....152	2-4-6- تعمیر و نگهداری اصلاحی
.....153	5-6- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری
.....154	6-6- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر شرایط عملیاتی دستگاه
.....156	7-6- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای شیرر طبس
.....163	8-6- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان شیرر
.....167	9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستمها
.....168	1-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم آب
.....168	2-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم حرکت
.....169	3-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم هیدرولیک
.....170	4-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم برق
.....171	5-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم کابل
.....172	6-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازوهای برش
.....173	10-6- نتیجهگیری

### فصل هفتم: نتیجهگیری و پیشنهادات

.....175	1-7- نتیجهگیری
.....182	2-7- پیشنهادات
.....185	منابع و مراجع

## فهرست جدولها

جدول 1-2- انواع آرایشها و شبکهها س قابلیت اطمینان و محاسبات مربوطه .....	20
جدول 2-2- روشهای شبیهسازی قابلیت اطمینان مونت کارلو مورد استفاده در سیستمهای غیرقابل تعمیر .....	41
جدول 2-3- نتایج شبیهسازی قابلیت اطمینان با استفاده از روش K-R برای یک مثال مفروضه .....	46
جدول 1-3- لیست تحقیقات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن .....	47
جدول 3-2- روشهای مختلف به کار رفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشینآلات معدنی .....	68
جدول 1-4- مشخصات فنی درام شیرر معدن زغالسنگ طبس .....	72
جدول 1-5- دادههای خرابی مربوط به سیستم آب .....	101
جدول 2-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی سیستم آب .....	102
جدول 3-5- دادههای خرابی مربوط به سیستم حرکت .....	107

جدول 4-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی	
سیستم حرکت	108
جدول 5-5- داده‌های خرابی مربوط به سیستم هیدرولیک	112
جدول 6-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی	
سیستم هیدرولیک	114
جدول 7-5- داده‌های خرابی مربوط به سیستم برق	118
جدول 8-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی	
سیستم برق	120
جدول 9-5- داده‌های خرابی مربوط به سیستم کابل	124
جدول 10-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی	
سیستم برق	126
جدول 11-5- داده‌های خرابی مربوط به بازوهای برش	129
جدول 12-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی داده‌های خرابی	
بازوهای برش	130

#### حد بالا و پائین قابلیت اطمینان شیر 1345

جدول 1-6- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان 90% و دوره تعمیرات	
پیشگیرانه برای زیرسیستم‌های شیرر طبس	159
جدول 2-6- دوره‌های تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای	
زیرسیستم‌های شیرر طبس	161
جدول 3-6- تغییرات قابلیت اطمینان دستگاه شیرر در اثر انجام	
عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه	165

### فهرست شکلها

شکل 1-1- گستردگی و میزان ذخایر سوخته‌های فسیلی جهان بر حسب	
میلیارد تن در سال 2010	2
شکل 1-2- طرح نهایی و جانمایی کارگاه‌های استخراج معدن شماره یک	
طبس	7
شکل 1-2- منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک	
دستگاه (Dhillon, 2008)	16

- شکل 2-2- مدل شماتیک یک کارگاه استخراج از دیدگاه روش مارکوف (Dhillon, 2008) ..... 20
- شکل 2-3- یک نمونه درخت خطا (Dhillon, 2008) ..... 24
- شکل 2-4- روندنمای مربوط به انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان ..... 26
- شکل 2-5- آزمون گرافیکی جهت تعیین نوع داده‌ها (Ridgon & Basu, 2000) ..... 29
- شکل 2-6- آزمون همبستگی سری ..... 30
- شکل 2-7- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته ..... 31
- شکل 2-8- شبیه‌سازی ضریب ایمنی شیروانی‌های معادن با استفاده از روش مونت کارلو (Khalokakaie, 1999) ..... 38
- شکل 2-9- شبکه قابلیت اطمینان سیستم مفروض ..... 44

#### طریق‌های اطمینان در حوزه مهندسی معدن 148

- شکل 2-3- نمودار درخت خطا جهت تحلیل قابلیت اطمینان راه‌های فرار معدن (Goodman, 1988) ..... 51
- شکل 3-3- نمودار درخت خطا برای تعیین احتمال ایجاد ولتاژ خطرناک در ماشین شاتل ..... 52
- شکل 3-4- منحنی قابلیت اطمینان LHD (Kumar, 1990) ..... 53
- شکل 3-5- ساختار کلی سیستم تولید در معدن کایرونا و زیرسیستم‌های مربوطه (Kumar & Huang, 1993) ..... 54
- شکل 3-6- درخت خطای تشکیل شده برای دستگاه شاول (Samanta et al., 2001) ..... 56
- شکل 3-7- نمودارهای قابلیت اطمینان برای پنج شاول هیدرولیکی مختلف مورد مطالعه ..... 58
- شکل 3-8- نمودارهای قابلیت اطمینان کامیون زیرزمینی (Hall & Daneshmend, 2003b) ..... 59
- شکل 3-9- زیرسیستم‌های تولید یک معدن زیرزمینی (Vagenas et al., 2003) ..... 59
- شکل 3-10- منحنی قابلیت اطمینان AFC (Gupta & Bhattacharya, 2007) ..... 61
- شکل 3-11- درخت خطای AFC (Gupta & Bhattacharya, 2007) ..... 61
- شکل 3-12- تغییرات شاخص اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های کارخانه فرآوری بوکسیت جاجرم ..... 62
- شکل 3-13- قابلیت دسترسی اجزای سیستم تولید در معدن جبهه‌کار طولانی (Bing-yuan et al., 2009) ..... 63
- شکل 3-14- درخت خطای پیشنهادی برای درام شیرر (Gupta et al., 2006) ..... 65
- شکل 3-15- منحنی قابلیت اطمینان درام شیرر (Gupta & Bhattacharya, 2006) ..... 66
- شکل 4-1- دستگاه درام شیرر در حال کار در معدن طبس ..... 73
- شکل 4-2- بخش‌های کلی تشکیل‌دهنده درام شیرر (در معدن زغالسنگ طبس) ..... 75
- شکل 4-3- دیاگرام بلوکی درام شیرر ..... 76

- شکل 4-4- نقشه شماتیک سیستم آب درام شیرر (در معدن زغالسنگ  
 طبس) ..... 79
- شکل 4-5- محل قرارگیری سیستم حرکت و اجزای اصلی آن (در معدن  
 زغالسنگ طبس) ..... 81
- شکل 4-6- ساختار کلی و اجزای اصلی زیرسیستم هیدرولیک درام  
 شیرر (شیرر زغالسنگ طبس) ..... 83
- شکل 4-7- ساختار کلی و اجزای اصلی زیرسیستم برق درام شیرر  
 (شیرر زغالسنگ طبس) ..... 86
- شکل 4-8- بازوی برش سمت راست درام شیرر (معدن زغالسنگ طبس) . 88
- شکل 4-9- نمای کلی درام ..... 89
- شکل 4-10- ساختار کلی و اجزای اصلی تشکیل دهنده سیستم کابل  
 شیررها (Stefanko, 1983) ..... 90
- شکل 4-11- ترتیب حرکت و حالتهای قرارگیری سیستم کابل شیرر در  
 حین عملیات برش (Stefanko, 1983) . ..... 91
- شکل 4-12- ساختار کلی درام شیررها ..... 92
- شکل 5-1- فرآیند و مراحل جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های خرابی  
 شکل 5-2- مثالی از نحوه محاسبه زمان بین خرابیها (در سیستم  
 آب) ..... 96
- شکل 5-3- نمودار پارتو خرابیهای زیرسیستمهای درام شیرر معدن  
 طبس ..... 97
- شکل 5-4- مراحل مدلسازی قابلیت اطمینان و تحلیل نرخ خرابی هر  
 زیرسیستم ..... 97
- شکل 5-5- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم آب شیرر ..... 100
- شکل 5-6- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن داده‌های خرابی  
 سیستم آب ..... 102
- شکل 5-7- نتایج تحلیل داده‌های خرابی سیستم آب شیرر ..... 104
- شکل 5-9- نمودار نرخ خرابی سیستم آب شیرر معدن طبس ..... 106
- شکل 5-10- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم حرکت شیرر .... 107
- شکل 5-11- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن داده‌های خرابی  
 سیستم حرکت ..... 108
- شکل 5-12- نتایج تحلیل داده‌های خرابی سیستم حرکت شیرر ..... 109
- شکل 5-13- نمودار قابلیت اطمینان سیستم حرکت درام شیرر معدن  
 طبس ..... 110
- شکل 5-14- نمودار نرخ خرابی سیستم حرکت درام شیرر معدن طبس 111
- شکل 5-15- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم هیدرولیک شیرر 113

- شکل 5-16- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادههای خرابی  
سیستم هیدرولیک ..... 114
- شکل 5-17- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم هیدرولیک شیرر . 115
- شکل 5-18- نمودار قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک درام شیرر  
معدن طبس ..... 116
- شکل 5-19- نمودار نرخ خرابی سیستم هیدرولیک درام شیرر معدن  
طبس ..... 117
- شکل 5-20- مهمترین دلایل خرابی سیستم برق شیرر ..... 119
- شکل 5-21- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادههای خرابی  
سیستم برق ..... 119
- شکل 5-22- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم برق شیرر ..... 121
- شکل 5-23- نمودار قابلیت اطمینان سیستم برق درام شیرر معدن  
طبس ..... 122
- شکل 5-24- نمودار نرخ خرابی سیستم آب درام شیرر معدن طبس .. 122
- شکل 5-25- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم کابل شیرر .... 125
- شکل 5-26- نتایج آزمون گرافیکی روند بر روی دادههای خرابی  
سیستم کابل ..... 125
- شکل 5-27- آزمون گرافیکی تطابق دادههای خرابی سیستم کابل با  
مدل قانون توان ..... 126
- شکل 5-28- نمودار قابلیت اطمینان سیستم کابل درام شیرر معدن  
طبس ..... 127
- شکل 5-29- نمودار نرخ خرابی سیستم کابل درام شیرر معدن طبس 127
- شکل 5-30- فراوانی مهمترین دلایل خرابی بازوهای برش شیرر ... 129
- شکل 5-31- نتایج آزمون گرافیکی روند بر روی دادههای خرابی  
بازوهای برش ..... 130
- شکل 5-32- آزمون گرافیکی تطابق دادههای خرابی بازوهای برش با  
مدل قانون توان ..... 130
- شکل 5-33- نمودار قابلیت اطمینان سیستم کابل درام شیرر معدن  
طبس ..... 131
- شکل 5-34- نمودار نرخ خرابی بازوهای برش درام شیرر معدن طبس 132
- شکل 5-35- منحنیهای قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف درام  
شیرر ..... 133
- شکل 5-36- منحنی قابلیت اطمینان درام شیرر ..... 134
- شکل 5-37- روندنمای شبیهسازی انجام شده بر روی درام شیرر معدن  
طبس ..... 137
- شکل 5-38- توابع توزیع احتمال خرابی تجمعی زیرسیستمهای ششگانه  
دستگاه شیرر معدن طبس ..... 138

- شکل 5-39- تأثیر دور تکرار بر قابلیت اطمینان شبیهسازی شده  
 138 ..... دستگاه در زمان  $t=10$  .....  
 شکل 3-40- منحنی قابلیت اطمینان شبیهسازی شده درام شیرر معدن  
 140 ..... طبس .....  
 شکل 5-41- منحنی قابلیت اطمینان مدلسازی و شبیهسازی شده درام  
 142 ..... شیرر معدن طبس .....  
 شکل 6-1- انواع استراتژیهای تعمیر و نگهداری ( IEC-60300-3-14, 2004;  
 148 ..... ( Ahmadi, 2010 ) .....  
 شکل 6-2- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر نرخ خرابی و عمر  
 مفید دستگاه ( Ghodrati, 2010 ) .....  
 شکل 6-3- الگوریتم انتخاب استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری ( )  
 153 ..... (Barabady & Kumar, 2007) .....  
 شکل 6-4- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازههای زمانی  
 155 .....  $T_{PM}$  بر قابلیت اطمینان دستگاه .....  
 شکل 6-5- هیستوگرام فراوانی سرعت برش زغال توسط شیرر در معدن  
 157 ..... طبس .....

برای زیرسیستمهای شیرر طبس 6-159

- شکل 6-7- طرح بهبود یافته و بسته عملیات تعمیر و نگهداری  
 161 ..... پیشگیرانه برای زیرسیستمهای شیرر طبس .....  
 8-162 .....  
 شکل 6-9- منحنی قابلیت اطمینان پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه  
 166 ..... و بدون تعمیرات پیشگیرانه .....

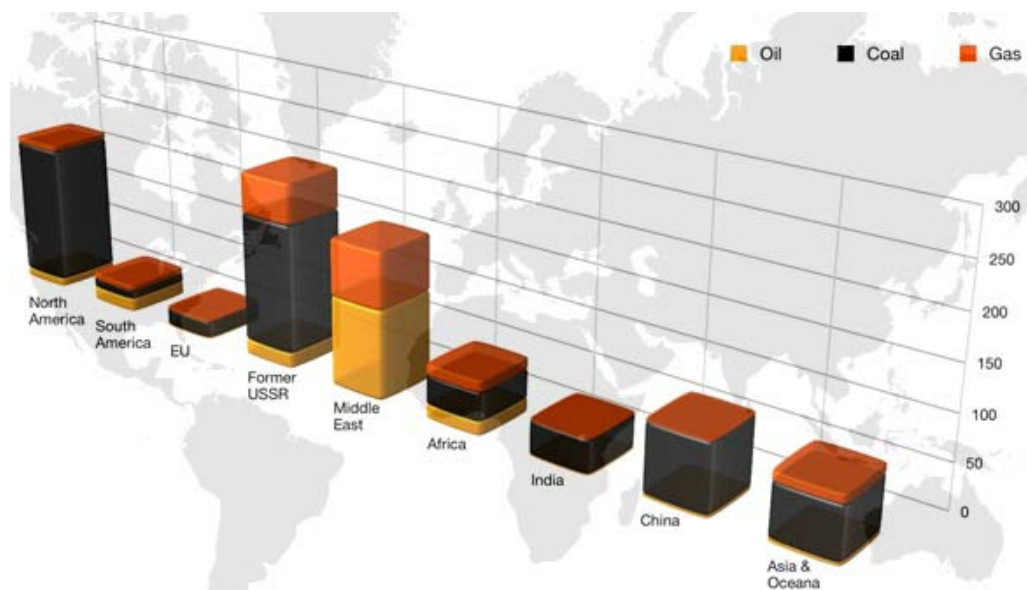


# مقدمه

### 1-1- مقدمه

بی‌شک در قرن حاضر بشر برای دستیابی به پیشرفت صنعتی و رفاه بیشتر به طور قابل توجهی به انواع حامل‌های انرژی شامل نفت، گاز و زغالسنگ نیاز دارد. در اقتصاد انرژی سه عامل ذخیره، میزان تولید و قیمت به عنوان پارامترهای مهم مطرح می‌باشند. در قرن گذشته با توجه به کشف نفت و توسعه کاربردهای صنعتی و تولید مشتقات مختلف از آن، تولید و مصرف این ماده حیاتی و با ارزش به صورت فزاینده‌ای افزایش یافت و امروزه عواقب این پدیده به اشکال مختلف جامعه بشری را درگیر خود کرده است. مصرف بالای نفت و گاز در قرن گذشته و ذخایر محدود آن‌ها، جهان را به تکاپوی

جدی برای یافتن انرژی‌های نو و بهینه‌سازی مصرف سوخت‌های موجود واداشته است. از جمله انرژی‌های نو می‌توان به انرژی زمین‌گرمایی و انرژی هسته‌ای اشاره نمود. همچنین در توجه به بهینه‌سازی سوخت‌های قدیمی، زغالسنگ به عنوان قدیمی‌ترین حامل انرژی جهان مدرن، مجدداً مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین دلایل این امر را می‌توان فراوانی و گستردگی بسیار خوب ذخایر زغالسنگ در جهان دانست. چنانکه در شکل 1-1 نشان داده شده است، زغالسنگ تنها سوخت فسیلی است که در تمامی مناطق جهان یافت شده و قابل استخراج میباشد.



شکل 1-1- گستردگی و میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی جهان بر حسب میلیارد تن

در سال 2010 (World Coal Association, 2010)

طبق آمار موجود، ذخایر جهانی اثبات شده زغالسنگ 847 میلیارد تن است. این آمار بیانگر آن است که با میزان تولید کنونی، ذخایر زغالسنگ 119 سال دیگر جوابگوی تقاضای جهانی برای این ماده با ارزش معدنی خواهند بود. این عدد برای نفت و گاز به ترتیب 46 و 63 سال میباشد (World Coal Association, 2011).

با توجه به آمار، در سالهای آینده زغالسنگ به عنوان فراوان‌ترین و مطمئن‌ترین سوخت فسیلی جهان مطرح بوده و درخواست جهانی برای زغالسنگ به شدت افزایش خواهد یافت. البته نمونه‌هایی از این تقاضا امروزه نیز در برخی کشورهای فاقد نفت و گاز به وضوح قابل رویت است. طبق آمار

آژانس بینالمللی انرژی، در سال 2006، 41٪ از انرژی برق جهان توسط نیروگاههای زغالی تأمین گردیده و پیشبینی میشود این میزان به 44٪ در سال 2030 برسد (IEA, 2010).

صنعت فولادسازی امروزه بازار جهانی و اقتصاد زغالسنگ را داغ و پررونق ساخته است. طبق گزارش انجمن جهانی زغالسنگ، 70٪ فولاد جهان با استفاده از زغالسنگ تولید میشود. جهان صنعتی امروز که به صورت سرسام‌آوری نیازمند فولاد می‌باشد، به طور غیرمستقیم به زغالسنگ نیز وابستگی قطعی دارد. با توجه به اینکه یکی از شاخص‌های توسعه یافتگی کشورها میزان مصرف سرانه فولاد آنها است، لذا می‌توان میزان مصرف سرانه زغالسنگ را نیز به طور غیرمستقیم شاخص توسعه یافتگی کشورها در نظر گرفت. شاهد این ادعا مصرف 82٪ زغالسنگ جهان توسط پنج کشور چین، آمریکا، هندوستان، ژاپن و آفریقای جنوبی است که چهار مورد اول چهار کشور قدرتمند اقتصادی جهان به شمار می‌آیند (World Coal Association, 2010).

با توجه به موارد اشاره شده فوق، میزان تولید بالا و ارزان، دو هدف عمده معدنکاری زغالسنگ در قرن حاضر به شمار می‌آیند. درصد بالایی از استخراج زغالسنگ در جهان از معادن زیرزمینی انجام می‌شود. معادن زیرزمینی زغالسنگ معمولاً به دو روش جبهه‌کار طولانی و اتاق و پایه استخراج می‌شوند. در این میان با توجه به اینکه روش جبهه‌کار طولانی با طبیعت لایه‌های زغالسنگ اقصی نقاط جهان تطابق بسیار خوبی دارد، به طور گسترده‌ای در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به دلیل همخوانی با ضخامت‌های مختلف لایه‌های زغالسنگ، در معادن شامل لایه‌های کم ضخامت تا لایه‌های ضخیم کاربرد داشته و لذا سهم بالایی از استخراج زغالسنگ را نسبت به روش اتاق و پایه به خود اختصاص داده است.

روش جبهه‌کار طولانی خود به دو روش سنتی و مکانیزه انجام می‌شود. با توجه به نیاز بالا و درخواست جهانی برای زغالسنگ -در حال و آینده- و نیز مسأله قیمت تمام شده، پایداری تولید و ایمنی، روش مکانیزه از اقبال بیشتری برای استفاده در کشورهای مختلف برخوردار است. این در حالی است که نمی‌توان از سهم روش سنتی در استخراج زغالسنگ در برخی کشورها و نیز در لایه‌های با

شرایط زمین‌شناسی خاص صرف نظر نمود. امروزه روش جبهه‌کار طولانی مکانیزه به عنوان یک روش توانمند و با نرخ تولید بالا در میان متخصصان معدنکاری به صورت سمبل پیشرفت و تکنولوژی روز معدنکاری شناخته می‌شود.

در روش جبهه‌کار طولانی مکانیزه تمامی عملیات استخراج و کندن زغالسنگ از لایه برجا توسط دستگاه شیرر یا رنده انجام می‌گیرد. گرچه آمار دقیقی از درصد استفاده از هر یک از دستگاه‌های فوق در معادن زغالسنگ مکانیزه جهان وجود ندارد، اما، استفاده از شیرر به مراتب بیشتر از رنده می‌باشد تا جایی که امروزه معمولاً روش جبهه‌کار طولانی با این دستگاه شناخته می‌شود. با توجه به پیوستگی تولید، توان تولید بالا و نیز حجم سرمایه‌گذاری در این روش، ضرورت عملیات صحیح و دسترسپذیری شیرر در حین عملیات به خوبی آشکار است. هرگونه خرابی دستگاه شیرر و توقف برش زغال، باعث توقف سایر دستگاه‌های مرتبط با تولید و در نهایت توقف عملیات در کارگاه استخراج می‌شود. این امر در نهایت باعث اتلاف سرمایه و بروز خسارت‌های مالی به معدن می‌شود. به منظور جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش عملکرد شیرر، اطلاع از شرایط کاری دستگاه و کنترل آماری دقیق آن یکی از رهیافت‌های عملی به شمار می‌آید. یکی از تکنیک‌های توانمند برای پیش‌بینی خرابی‌ها و عملکرد مناسب دستگاه در یک زمان مشخص، ارزیابی "قابلیت اطمینان"<sup>1</sup> دستگاه می‌باشد. با استفاده از این کمیّت می‌توان احتمال عدم خرابی و عملکرد مطلوب دستگاه در یک بازه زمانی را تخمین زد. این کمیّت امروزه در اکثر صنایع به عنوان یک عامل فنی و مدیریتی کمک شایانی به حفظ پیوستگی تولید و بهبود وضعیت مالی بنگاه‌های اقتصادی می‌کند. در این رساله، قابلیت اطمینان درام شیرر با استفاده از دو رهیافت مدلسازی و شبیهسازی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این دو روش مقایسه خواهند شد. مطالعه موردی این تحقیق در معدن زغالسنگ طبس می‌باشد.

## 1-2- معدن زغالسنگ پروده طبس

<sup>1</sup>. Reliability

نواحی زغالدار طبس در شمال استان یزد، جنوب و جنوب غربی شهر طبس واقع شده‌اند. وسعت نواحی مذکور حدود 30 هزار کیلومتر مربع می‌باشد. مطالعات اکتشافی در این منطقه از سال 1346 آغاز ولی به دنبال وقوع زلزله طبس، فعالیت‌های مذکور متوقف شدند. پس از پیروزی انقلاب اسلامی، در اواسط سال 1359 واحد اکتشافی طبس تأسیس و تا ابتدای 1369 بخش اعظم اکتشافات مقدماتی در یکی از بزرگترین و غنیترین ذخایر کشور به نام مناطق پروده به پایان رسید. با انجام مراحل آماده‌سازی، خرید ماشینآلات و تجهیز معدن، تولید از معدن در سال 1386 آغاز گردید. ناحیه پروده با وسعتی حدود 1200 کیلومتر مربع در 70 کیلومتری جنوب شهرستان طبس واقع است. میزان ذخیره زغالسنگ ککشو این ناحیه بیشترین ذخائر زغالسنگ کشور بوده و 1/1 میلیارد تن برآورد شده است. با توجه به کیفیت و کمیّت ذخایر ناحیه پروده، بیشترین فعالیت‌های اکتشافی و طرح‌های بهره‌برداری در طبس به این مناطق اختصاص یافته است. ارتفاع متوسط ناحیه زغالدار پروده از سطح دریا 850 متر می‌باشد.

در این ناحیه 29 لایه زغالی شناسایی شده که به طور کلی به گروه‌های A, B, C, D, E و F تقسیم‌بندی شده‌اند. مهم‌ترین لایه‌های زغالی با ضخامت قابل استخراج (بیش از 0/4 متر) عبارتند از: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> و E و D که از بین آنها لایه C<sub>1</sub> دارای تداوم و گستردگی بیشتری در منطقه بوده و از قابلیت معدنکاری بالایی برخوردار است.

میزان خاکستر لایه‌ها تا حد زیادی به ضخامت آنها بستگی دارد، به طوری که در معادن پروده 1 و 2 که ضخامت لایه‌ها بیشتر است، خاکستر زغال نیز زیادتر است. خاکستر لایه‌های زغالسنگ به‌طور کلی بیشتر از 30 درصد است. یکی از مشکلات اصلی در قابلیت فرآوری و استفاده از زغالسنگ کانسار پروده، بالا بودن میزان گوگرد است که میانگین آن به بیش از 1 درصد میرسد. میزان مواد فرّار، کم تا متوسط است و از جنوب‌شرقی به طرف شمال‌غربی افزایش می‌یابد. متوسط آن 23 تا 25 درصد می‌باشد. بیشینه گاز متان در لایه‌های B<sub>1</sub> و C<sub>1</sub> در عمق 650 متری، حدود 24 مترمکعب در هر تن زغالسنگ استخراجی است. درجه حرارت با عمیق شدن لایه‌ها افزایش یافته و در عمق 650

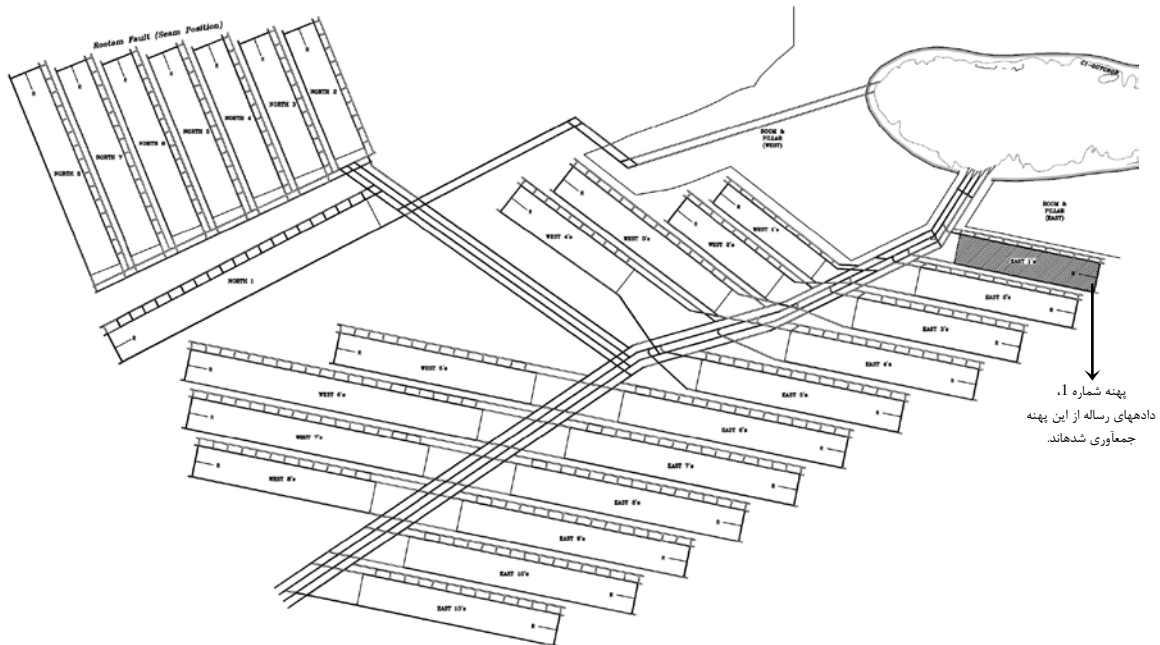
متری به 50 درجه سانتیگراد و گاهی بیشتر از آن میرسد. عمق سطح ایستایی آب زیرزمینی از 2 متر تا حدود 60 متر متغیر است (معدن زغالسنگ طبس، 1375).

معادن اصلی که طبق طرح جامع مورد تجهیز و بهره‌برداری قرار می‌گیرند عبارتند از: معدن مرکزی، معدن شماره یک، معدن شماره دو، معدن شماره سه، معدن شماره چهار و معدن پروده شرقی. مجموع ظرفیت تولید این معادن بیش از 3/5 میلیون تن در سال برنامه‌ریزی شده که باید به تدریج با طراحی و تجهیز آنها مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

در میان معادن مذکور، معدن شماره یک، فعالترین و بزرگترین معدن منطقه بوده و به روش جبهه‌کار طولانی مکانیزه استخراج میشود. این معدن هم اکنون با ظرفیت اسمی سالانه 750 هزار تن کنسانتره زغالسنگ ککشو فعالیت مینماید و قرار است 450 هزار تن در سال به ظرفیت تولید آن افزوده شود. بهره‌برداری از این طرح مهم معدنی، علاوه بر کمک به خودکفایی در تأمین زغالسنگ مورد نیاز صنایع فولاد کشور و ایجاد اشتغال و محرومیتزدایی، سالانه 187/5 میلیون دلار صرفه‌جویی ارزی در بر داشته است. برای تجهیز و بهره‌برداری از این مجموعه 260 میلیارد تومان سرمایه‌گذاری شده و زمینه اشتغال 1200 نفر فراهم آمده است (معدن زغالسنگ طبس، 1375).

لایه مورد استخراج در این معدن لایه C<sub>1</sub> است. این لایه مهمترین لایه قابل کار در منطقه پروده به شمار می‌آید. تغییرات ضخامت، ساختمان و پارامترهای کیفی این لایه در این محدوده نسبتاً کم است. لایه C<sub>1</sub>، لایه‌های است مرکب و غالباً از دو تا سه بخش زغالسنگ تشکیل شده که عمدتاً به وسیله میانلایه‌هایی از جنس آرژولیت از یکدیگر تفکیک میشوند. میانلایه‌ها به طور متوسط 15 درصد بخش قابل کار لایه را تشکیل میدهند. حداقل و حداکثر ضخامت این لایه به ترتیب 1/09 و 2/51 متر است. شیب لایه در محدوده معدن بین 5-26 درجه میباشد که در محدوده پهنه‌های استخراج بین 11-26 درجه است. از این رو کارگاه‌های استخراج با زاویه‌های نسبت به بزرگترین شیب لایه طراحی شده‌اند تا شیب کارگاه از 14 درجه بیشتر نشود.

27 در این معدن، استخراج به روش جبهه‌کار طولانی پسرو و به طور تمام مکانیزه انجام میشود. کارگاه استخراج برای این معدن طراحی گردیده که در مجموع 29 میلیون تن زغال خام از آنها استخراج خواهد شد. در حال حاضر، دومین کارگاه (E2) این معدن در حال استخراج است. شکل 1-2 طرح نهایی و جانمایی کارگاههای استخراج معدن شماره یک را نشان میدهد.



شکل 1-2- طرح نهایی و جانمایی کارگاههای استخراج معدن شماره یک طبس

در طرح اجرا شده، پهنه اول به طور متوسط 200 متر عرض و 1200 متر طول دارد و بقیه پهنه‌های طراحی شده به طور متوسط 220 متر عرض و بین 700 تا 1500 متر طول دارند. ارتفاع کار در کارگاهها بین 1/7 تا 2 متر متغیر است.

استخراج از این معدن توسط یک دستگاه درام شیرر (دارای دو درام) انجام میگردد. تجهیزات اصلی مورد استفاده در عملیات استخراج عبارتند از: درام شیرر، نگهدارنده‌های قدرتی، ناو زنجیری زره‌دار، بارگیر مرحله‌ای و نوار نقاله. در کارگاه استخراج اول تعداد 117 عدد سپر<sup>1</sup> سرتاسر کارگاه را نگهداری میکردند. این سپرها حداکثر 650 تن وزن سقف را تحمل میکنند. هر سپر 15/5 تن وزن داشته و عرض صفحه نگهدارنده آنها 1/5 متر است. حد جابجایی عمودی از 0/9 متر تا 2/2 متر متغیر

<sup>1</sup>. Shield

میباشد. کنترل سینهکارهای پیشروی و جبههکارهای استخراج و نقاط حساس معدن به لحاظ ایمنی، گرد و غبار و تصاعد گاز متان، از طریق یک سیستم پایش<sup>1</sup> پیشرفته با استفاده از حسگرهای نصب شده در نقاط حساس معدن و انتقال آن به اطاق فرمان صورت میگیرد. در این تحقیق از درام شیرر این معدن به عنوان مطالعه موردی و جمعآوری داده استفاده شده است. در ادامه این فصل، ضرورت انجام این رساله، اهداف و ساختار کلی آن و نیز مطالب ارائه شده در این فصول آینده مورد بحث قرار میگیرند.

### 1-3- بیان مسأله و سؤالهای اصلی تحقیق

روش جبههکار طولانی به عنوان یک روش مکانیزه، از ویژگیهای خاصی نسبت به سایر روشهای معدنکاری زیرزمینی برخوردار است. اجزای موجود در این روش در یک تعامل تنگاتنگ، باعث تشکیل یک زنجیره تولید پیوسته میگردند. درام شیرر به عنوان مهمترین جزء این زنجیره، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان شیرر، یکی از راهکارهای مهم دستیابی به تولید پیوسته با حداقل توقف و حداکثر قابلیت دسترسی است. هدف اصلی این رساله، مدلسازی و شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبههکار طولانی میباشد. برای ارزیابی قابلیت اطمینان درام شیرر، شناخت ساختار مهندسی دستگاه و نیز مطالعه آمار خرابی و توان تولید دستگاه امری ضروری است. به طور کلی، مهمترین سؤالهایی که در طی این تحقیق به آنها پاسخ داده خواهند شد به شرح ذیل میباشد:

- زیرسیستمهای شیرر چه بخشهایی هستند و نحوه ارتباط این زیرسیستمها چگونه است؟
- حساسترین زیرسیستم دستگاه از نظر فراوانی خرابیها کدام است؟
- رفتار خرابی هر یک از زیرسیستمهای دستگاه، از چه نوع تابع توزیع احتمالی تبعیت میکنند؟
- منحنی قابلیت اطمینان شیرر به چه صورتی است؟
- بازه قابلیت اطمینان در سطح اعتمادهای مختلف چه میزان است؟

<sup>1</sup>. Monitoring



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

#### 1-4- ضرورت انجام تحقیق

به طور کلی مهمترین دلایل انجام این تحقیق عبارتند از:

- اهمیت فوق العاده دستگاه شیرر در نرخ تولید معادن جبهه کار طولانی
- هزینه سرمایه گذاری و تعمیر و نگهداری بالای دستگاه شیرر
- عدم وجود مطالعات جامع و دقیق بر روی قابلیت اطمینان درام شیرر در سطح بین المللی
- عدم معرفی زیرسیستم های عملیاتی درام شیرر در گذشته
- عدم وجود تجربه در معدنکاری به روش جبهه کار طولانی مکانیزه در کشور
- لزوم آشنایی با فناوری معدنکاری و مدیریت تجهیزات جبهه کار طولانی مکانیزه در کشور

#### 1-5- اهداف تحقیق

در طی این تحقیق سعی خواهد شد تا با مدلسازی این قابلیت اطمینان درام شیرر، راهکار عملی برای پیش بینی خرابی و بهبود عملیات استخراج ارائه شود. سایر اهداف این تحقیق به طور کلی عبارتند از:

- تعیین بهترین زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر زیرسیستم و نیز کل دستگاه شیرر
- حفظ پیوستگی تولید در معدن مطالعه موردی
- بهبود شرایط فنی و اقتصادی معدن مطالعه موردی

#### 1-6- ساختار رساله

در فصل دوم این نوشتار مفاهیم فنی و آماری مرتبط با قابلیت اطمینان و روش های مطالعه قابلیت اطمینان معرفی شده و مزایا و معایب هر یک از این روش ها ارائه شده است. سپس روابط ریاضی و نیز توزیع های مهم آماری مورد استفاده در مدلسازی قابلیت اطمینان معرفی گردیده است. در ادامه

شبیهسازی قابلیت اطمینان و روش‌های مربوطه ارائه شده و دامنه کاربرد هر یک از این روش‌ها ذکر شده است.

در فصل سوم، با توجه به متون علمی موجود و تحقیقات گذشته، شماری از کاربردهای فنی قابلیت اطمینان در معدنکاری مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این تحقیقات به طور خلاصه ارائه شده است. در فصل چهارم که یکی از فصول مهم و کلیدی رساله می‌باشد، دستگاه شیر از دیدگاه مکانیکی و برقی مورد ارزیابی و بررسی کامل قرار گرفته و زیرسیستم‌های عملیاتی آن تعریف شده‌است. سپس نحوه عملکرد تمامی زیرسیستم‌ها به طور کامل مورد بررسی و ارائه قرار گرفته است.

در فصل پنجم، در ابتدا نحوه جمع‌آوری داده‌ها از معدن زغالسنگ طبس ارائه شده و سپس تمامی تحلیل‌های آماری و مطالعات عملی رساله در این بخش آورده شده است. نتایج مدلسازی و شبیهسازی قابلیت اطمینان شیر معدن طبس در این فصل ارائه شده است. در انتهای این فصل نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

در فصل ششم، ابتدا اهمیت تعمیر و نگهداری و ضرورت انجام آن در ماشین‌آلات معدنی بررسی گردیده و سپس انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری و تأثیر آنها بر قابلیت اطمینان دستگاه ارائه شده است. سپس با توجه به نتایج تحلیل قابلیت اطمینان انجام شده، استراتژی مناسب برای تعمیر و نگهداری شیر انتخاب شده و نتایج و تأثیرات این استراتژی بر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های مختلف و قابلیت اطمینان کل دستگاه بررسی و ارائه گردیده است.

در فصل هفتم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای مطالعات آینده و بهبود وضعیت عملیاتی دستگاه در معدن طبس پرداخته شده است.

## فصل دوم

# قابلیت

## اطمینان؛

### مفاهیم، مدلسازی و

### شبیهسازی

#### 2-1- مقدمه

امروزه، مهندسی قابلیت اطمینان به عنوان ابزاری توانمند، در بسیاری از شاخه‌های مهندسی و فنآوری به طور گسترده مورد استفاده قرار میگیرد. این علم از نظر مبانی نظری بسیار گسترده بوده و دارای زیرشاخه‌های متعددی در سایر علوم میباشد. به عنوان مثال، مفاهیم آمار، مدلسازی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، مکانیک، برق و مهندسی سیستم به طور جدی با قابلیت اطمینان درآمیخته و ارتباط تنگاتنگی میان تمامی این علوم و مهندسی قابلیت اطمینان شکل گرفته است. در این فصل، به منظور آشنایی بیشتر و پرهیز از تکرار برخی مطالب در فصول آینده، یک سری مفاهیم و تعاریف کلی و پرکاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان شرح داده شده و در ادامه فصل روشهای مدلسازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در پایان، روشهای مورد استفاده برای تحلیل قابلیت اطمینان شیرر در این رساله مورد بحث قرار میگیرند.

#### 2-2- تعاریف اصطلاحات رایج در مهندسی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان، یک شاخص مهندسی و ریاضی برای بررسی کمی خرابیها و پیش‌بینی زمان عملیات مفید هر دستگاه یا سیستم مهندسی است. در تحلیل قابلیت اطمینان، مجموعه‌ای از مفاهیم، کمیته‌ها

- و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و پرکاربرد مطرح هستند. تمامی تعاریف قابلیت اطمینان بر مبنای "سیستم" ارائه میشوند. از آنجایی که این رساله در مورد یک دستگاه نگاشته شده است، لذا در تمامی متن رساله از کلمه "دستگاه" به جای "سیستم" استفاده خواهد شد. تعاریف مفهومی از کمیتهای مورد استفاده در مهندسی قابلیت اطمینان به شرح زیر میباشد (Dhillon, 2008; Finkelstein, 2008; Blischke & Murthy, 2003; Kececiyoglu, 2002; Birolini, 2007):
- **خرابی**<sup>۱</sup>: ناتوانی یک بخش یا یک قطعه از دستگاه در انجام وظایف تعریف شده، "خرابی" یا نقص نامیده می شود.
  - **نرخ خرابی**: تعداد خرابی در واحد زمان "نرخ خرابی" خوانده میشود.
  - **زمان بین خرابیها (TBF)**<sup>۲</sup>: فاصله زمانی بین خرابیهای متوالی یک بخش یا قطعه قابلتعمیر (تعمیرپذیر) از دستگاه را "زمان بین خرابیها" می نامند.
  - **میانگین زمان بین خرابیها (MTBF)**<sup>۳</sup>: میانگین فاصله زمانی بین خرابیهای یک بخش یا قطعه قابلتعمیر از دستگاه را "میانگین زمان بین خرابیها" می نامند.
  - **زمان تا خرابی (TTF)**<sup>۴</sup>: عمر مفید یک بخش یا یک قطعه غیرقابلتعمیر (تعمیرناپذیر) از دستگاه را "زمان تا خرابی" می نامند. شایان ذکر است که در برخی منابع، زمان وقوع هر خرابی نسبت به زمان صفر "زمان تا خرابی" نامیده شده است.
  - **میانگین زمان تا خرابی (MTTF)**<sup>۵</sup>: میانگین عمر یک بخش یا یک قطعه غیرقابلتعمیر از دستگاه "میانگین زمان تا خرابی" می نامند.
  - **زمان تعمیرات (TTR)**<sup>۶</sup>: زمان مورد نیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه را "زمان تعمیرات" می نامند.

---

<sup>1</sup>. Failure

<sup>2</sup>. Time Between Failures

<sup>3</sup>. Mean Time Between Failures

<sup>4</sup>. Time To Failure

<sup>5</sup>. Mean Time To Failures

<sup>6</sup>. Time To Repair

- میانگین زمان تعمیرات (MTTR)<sup>1</sup>: میانگین زمانی صرف شده برای تعمیرات یک بخش از دستگاه را "میانگین زمان تعمیرات" می‌نامند.
- زیرسیستم<sup>2</sup>: هر یک از بخش‌های یک دستگاه را که عمل مشخص و قابل ملاحظه‌ای انجام می‌دهد، "زیرسیستم" می‌نامند.
- قابلیت اطمینان: احتمال این که یک دستگاه بتواند وظیفه محوله خویش را در یک بازه زمانی مشخص و تحت شرایط معلوم، به حالت مطلوب و از پیش طراحی شده انجام دهد، "قابلیت اطمینان"<sup>3</sup> آن دستگاه نامیده می‌شود.
- مدل قابلیت اطمینان<sup>4</sup>: رابطه ریاضی که برای ارزیابی، تخمین و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان یک دستگاه به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود، "مدل قابلیت اطمینان" نامیده می‌شود.

### 3-2- تعاریف ریاضی کمیتهای موجود در مهندسی قابلیت اطمینان

مهندسی قابلیت اطمینان تا حد بسیار زیادی بر مفاهیم علم آمار و جمع‌آوری داده‌های آماری استوار است. در کلیه مراحل مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان از تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود. خرابی دستگاه و زمان، دو رکن اصلی قابلیت اطمینان محسوب میشوند. در این بخش تعاریف ریاضی کمیتهای مورد استفاده در مهندسی قابلیت اطمینان به طور خلاصه ارائه می‌شوند. به منظور رعایت پیوستگی مطالب، سعی شده تا کلیه کمیتهای حتی اصطلاحات بسیار شناخته شده آماری نیز در این بخش مورد اشاره قرار گیرند.

#### 3-2-1- تابع چگالی توزیع احتمال $(f(t))$

این تابع بیان‌کننده شکل توزیع متغیر تصادفی می‌باشد و تصویر کلی آن را می‌توان با ترسیم نمودار فراوانی متغیرهای تصادفی پیش‌آمده به دست آورد. در مهندسی قابلیت اطمینان، تابع چگالی احتمال

<sup>1</sup>. Mean Time To Repair

<sup>2</sup>. Subsystem

<sup>3</sup>. Reliability

<sup>4</sup>. Reliability Model

به نام "تابع چگالی خرابی"<sup>1</sup> خوانده می‌شود. در این محاسبات "زمان بین خرابی‌ها (TBF)" به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. از ویژگی‌های کلیه توابع چگالی این است که سطح زیر منحنی آن‌ها برابر یک می‌باشد. گفته فوق منطبق با این واقعیت است که احتمال رخداد هر حادثه‌ای حداکثر 100٪ یا یک می‌باشد. توابع چگالی احتمال دارای تنوع و اشکال مختلفی هستند که در بخش‌های آینده به طور کامل ارائه خواهند شد.

### 2-3-2- تابع توزیع تجمعی ( $F(t)$ )

تابع توزیع تجمعی، توزیع احتمال وقوع یک متغیر را بیان می‌کند. تابع توزیع تجمعی سطح زیر منحنی تابع چگالی احتمال است. در تحلیل‌های قابلیت اطمینان، این تابع "تابع توزیع خرابی"<sup>2</sup> خوانده می‌شود. رابطه این تابع با تابع چگالی احتمال به قرار زیر است:

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

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

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

### 2-3-3- تابع قابلیت اطمینان ( $R(t)$ )

طبق منابع موجود، تعریف ریاضی قابلیت اطمینان یک دستگاه به طور کلی به صورت رابطه ذیل است (Gendenka & Ushakov, 1995; Kececiyoglu, 2002; Birolini, 2007; Rausand & Hsyland, 2004):

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

<sup>1</sup>. Failure Density Function

<sup>2</sup>. Failure Distribution Function

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

### 2-3-4- امید ریاضی $(E(t))$

اگر  $x$  یک متغیر تصادفی باشد، مقدار امید ریاضی  $x$  به وسیله  $E(x)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (4-2)$$

امید ریاضی، متوسط وزن دار مقادیر ممکن برای متغیر تصادفی است. در بحث قابلیت اطمینان این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود (Gendenka & Ushakov, 1995):

$$E(t) = m = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (5-2)$$

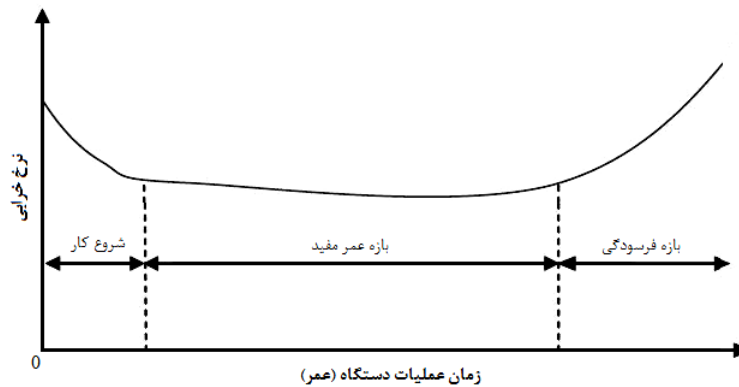
امید ریاضی با تعریف فوق، به عنوان میانگین متغیر تصادفی  $t$  شناخته می‌شود. با توجه به این که در قابلیت اطمینان، زمان‌های بین خرابی‌های سیستم به عنوان متغیر تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرند،  $m$ ، به عنوان میانگین زمان بین خرابیها (MTBF) می‌باشد.

### 2-3-5- تابع نرخ خرابی $(\lambda(t))$

میزان خرابی‌های هر دستگاه در طول عمر خود به طور خاص از یک روند تبعیت می‌کند. نرخ خرابی، به عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی کارآمدی دستگاه و وضعیت عملیاتی آن، در مهندسی قابلیت اطمینان و مدیریت تعمیر و نگهداری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. هر دستگاه در طول عمر خود به صورت کلی سه بازه زمانی مشخص را طبق شکل 1-2 سپری می‌نماید. این منحنی در مهندسی قابلیت اطمینان به منحنی "وان شکل"<sup>1</sup> شهرت یافته است (Ebeling, 2009; Dhillon, 2007,2008; Gupta et al., 2010; Finkelstein, 2008).

<sup>1</sup>. Bathtub failure rate curve





شکل 2-1- منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک دستگاه (Dhillon, 2008)

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

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

در تحلیل‌های قابلیت اطمینان، تعریف ریاضی نرخ خرابی یک دستگاه به طور کلی به صورت زیر است:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (6-2)$$

و یا به صورت:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (7-2)$$

تعیین نرخ خرابی یک دستگاه می‌تواند دید مناسبی از شرایط عملیاتی و سطح آمادگی دستگاه ارائه نماید. همچنین تعیین این شاخص در بازه‌های زمانی مشخص باعث می‌شود تا کاربر از وضعیت فرسودگی و نیز عمر مفید باقیمانده دستگاه مطلع شود. با استفاده از این شاخص می‌توان با کنترل آماري خرابی‌های یک بخش یا یک قطعه از دستگاه، زمان بهینه تعویض یک قطعه را پیش‌بینی کرد. علاوه بر این موارد، از منحنی نرخ خرابی می‌توان به منظور استخراج اطلاعات با ارزشی مثل موارد ذیل بهره جست (Kececiyoglu, 2002):

- پیش‌بینی زمان بهینه و هزینه دوره ضمانت دستگاه

- پیش‌بینی و مدیریت قطعات یدکی

- تخمین زمان پایان بازه شروع کار.

هر کدام از دو مورد اول به تنهایی زمینه پیچیده و وسیعی از مهندسی ماشین‌آلات و قابلیت اطمینان را شامل میشوند، لذا برای ارزیابی هر یک از آنها تحقیق جداگانه‌ای لازم است. اما مورد سوم یک پارامتر مدیریتی است که می‌توان با ارزیابی رفتار دستگاه و داده‌های خرابی، برای هر بخش یا کل دستگاه تعریف و محاسبه شود.

## 2-4- شبکه‌های قابلیت اطمینان

دستگاه‌های مختلف ممکن است دارای شبکه‌های ساده تا فوق‌العاده پیچیده‌ای باشند اما در مجموع پنج آرایش عمده در تحلیل‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع این آرایش‌ها و محاسبات ریاضی مربوط به هر کدام از آنها در جدول 2-1 معرفی شده‌اند.

## 2-5- روش‌های متداول در تحلیل قابلیت اطمینان

تاکنون روش‌ها و تکنیک‌های مختلف و متنوعی برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه‌ها ارائه

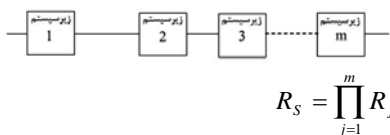

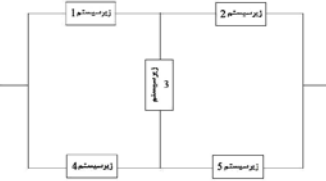
شده است که در ادامه، پنج روش اصلی مورد استفاده در تحلیل‌های قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## 2-5-1- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA)<sup>1</sup>

این روش یکی از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. روش FMEA یک روش کیفی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌ها است. این روش در اوایل دهه 1920 برای ارزیابی طراحی‌های سیستم‌های کنترل پرواز ارائه شد (Rausand & Hsyland, 2004; Countinho, 1964). مراحل اجرای این روش از فاز طراحی دستگاه شروع شده و در تمامی مراحل عمر دستگاه ادامه می‌یابد. گام‌های پیاده‌سازی این روش به شرح زیر است (Dhillon, 2008):

### گام 1) تعریف و تعیین مرزهای سیستم و جزئیات مورد نیاز

جدول 2-1- انواع آرایشها و شبکه‌های قابلیت اطمینان و محاسبات مربوطه

نوع شبکه	توضیحات	شکل و محاسبه
سری	در این آرایش تمامی زیرسیستم‌ها باید درست کار کنند تا در نهایت سیستم بتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد	 $R_S = \prod_{j=1}^m R_j$
موازی	در آرایش موازی تمامی زیرسیستم‌ها فعال‌اند و حداقل باید یک زیرسیستم درست کار کند تا دستگاه عملکرد موفقیت‌آمیزی داشته باشد	 $R_S = 1 - \prod_{j=1}^m F_j$
پل		 $R_S = 2R_1R_2R_3R_4R_5 + R_2R_3R_4 + R_1R_3R_5 + R_1R_4 + R_2R_5 - R_2R_3R_4R_5 - R_1R_2R_3R_4 - R_5R_1R_2R_3 - R_1R_3R_4R_5 - R_1R_2R_4R_5$
k از m	در این آرایش m زیرسیستم در حال فعالیت هستند و حداقل باید k تا زیرسیستم درست کار کنند تا دستگاه بتواند عملکرد مورد انتظار و مطلوبی داشته باشد	$R_S = \sum_{j=k}^m \binom{m}{j} R^j (1-R)^{m-j}$

<sup>1</sup>. Failure Modes and Effects Analysis

$R_{sb}(t) = \sum_{j=k}^m \left[ \int_0^t \lambda(t) dt \right]^j e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} / j$	<p>در این آرایش سیستم از n+1 بخش تشکیل یافته و تنها از میان آن‌ها یک بخش کار کرده و بقیه n بخش در حالت انتظار به سر می‌برند. به محض خرابی و توقف بخش فعال، یکی از بخش‌های در حال انتظار وارد کار شده و عملیات ادامه می‌یابد. سیستم زمانی از کار می‌افتد که تمامی n بخش خراب شده باشند</p>	<p>سیستم در حال انتظار</p>
<p><math>R_s</math>: قابلیت اطمینان سیستم، <math>R_j</math>: قابلیت اطمینان هر زیرسیستم، <math>F_j</math>: احتمال خرابی هر زیرسیستم، <math>R_{sb}(t)</math>: قابلیت اطمینان سیستم در حال انتظار در زمان t، <math>\lambda(t)</math>: نرخ خرابی تابع زمان هر بخش، n: تعداد بخش‌های در حال انتظار</p>		

گام 2) تهیه لیست تمامی زیرسیستم‌ها و اجزای سیستم

گام 3) شناسایی انواع خرابی‌های مربوط به هر زیرسیستم و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به آن‌ها

گام 4) اختصاص احتمال یا نرخ خرابی به هر کدام از حالت‌های خرابی

گام 5) پیش‌بینی تأثیرات هر کدام از حالت‌های خرابی بر سایر اجزاء، زیرسیستم‌ها و یا کل سیستم

گام 6) وارد کردن توضیحات و ملاحظات مناسب در اطلاعات مربوط به هر حالت خرابی

گام 7) مرور تک‌تک حالت‌های خرابی بحرانی و اتخاذ تدابیر مناسب برای کاهش تأثیرات آن‌ها.

با استفاده از گام‌های هفت‌گانه روش FMEA، متخصصان تعمیر و نگهداری هر سیستم می‌توانند به

یک پایگاه اطلاعاتی مناسب و قوی در مورد آن سیستم یا دستگاه‌های موجود دست یابند. این امر در

آینده، تشخیص و رفع خرابی‌ها را در هر سیستمی تسریع می‌کند.

اساس روش FMEA کیفی بوده و هیچگونه بحث کمی در تحلیل‌ها وارد نمی‌شود. این امر یکی از

بزرگترین نقاط ضعف و محدودیتهای این روش است.

## 2-5-2- روش مارکوف<sup>1</sup>

روش مارکوف یکی از توانمندترین و پرکاربردترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. این روش

بر مبنای حالت‌های سیستم استوار بوده و با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان

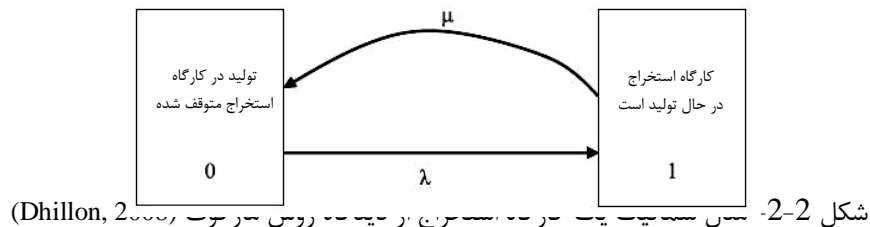
سیستم را محاسبه می‌نماید. فرضیات زیر در روش مارکوف در نظر گرفته می‌شود (Wang & Pham,

<sup>1</sup>. Markov

(2006; Birolini, 2007):

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

برای آشنایی بیشتر و راحت تر با فرآیند روش مارکوف، در ادامه یک مثال ارائه شده است (Dhillon, 2008): فرض کنیم کارگاه استخراج یک معدن جبهه کار طولانی در یکی از دو حالت خرابی (توقف تولید) یا سالم بودن (تولید) باشد. نرخ خرابی ثابت این کارگاه  $\lambda$  و نرخ تعمیر و رفع نقص آن  $\mu$  بوده و مدل شماتیک آن به صورت شکل 2-2 باشد.



با توجه به شکل و با استفاده از روش مارکوف، معادلات احتمال وجود کارگاه استخراج در دو حالت مختلف را به شرح زیر می توان نوشت:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_1(t)\mu\Delta t \quad (8-2)$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t)(1 - \mu\Delta t) + P_0(t)\lambda\Delta t \quad (9-2)$$

که در آن:

$\lambda$ : نرخ ثابت خرابی

$\mu$ : نرخ ثابت تعمیر

$t$ : زمان

$\lambda\Delta t$ : احتمال خرابی در بازه زمانی  $\Delta t$

$\mu\Delta t$ : احتمال تعمیر در بازه زمانی  $\Delta t$

$(1 - \lambda\Delta t)$ : احتمال اینکه در بازه زمانی  $\Delta t$  هیچ خرابی رخ ندهد

$(1 - \mu\Delta t)$ : احتمال اینکه در بازه زمانی  $\Delta t$  سیستم تعمیر نشود

$P_i(t + \Delta t)$ : احتمال اینکه کارگاه استخراج در زمان  $(t + \Delta t)$  در حالت  $i$  باشد

$P_i(t)$ : احتمال اینکه کارگاه استخراج در زمان  $(t)$  در حالت  $i$  باشد

در نهایت با انجام محاسبات ریاضی، احتمال وجود کارگاه استخراج در هر یک از حالت‌های فوق به

شرح ذیل به دست می‌آید:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (10-2)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (11-2)$$

معادله (10-2) بیان‌کننده احتمال متوقف بودن کارگاه استخراج در زمان  $t$  است. همچنین معادله

(11-2) احتمال در حال تولید بودن کارگاه استخراج را در زمان  $t$  نشان می‌دهد. احتمال در حال

تولید بودن کارگاه استخراج در حقیقت همان قابلیت اطمینان کارگاه استخراج در زمان  $t$  است.

مثال فوق یک مثال بسیار ساده از کاربرد روش مارکوف در تحلیل قابلیت اطمینان است. در

سیستم‌های بسیار پیچیده با زیرسیستم‌های زیاد نیز روش مارکوف از توانایی بالایی برای تحلیل

برخوردار است. اما، پیچیدگی روش و حجم زیاد محاسبات ریاضی، باعث افزایش زمان محاسبات و

تحلیل میشوند. همین امر، باعث محدودیت در استفاده از این روش در میان محققان حوزه قابلیت

اطمینان شده است.

## 2-5-3- روش تحلیل درخت خطا (FTA)<sup>1</sup>

روش تحلیل درخت خطا یکی از جامع‌ترین روشهای موجود در مهندسی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات است. این روش به صورت نظاممند، تمامی دلایل خرابی و قطعات مربوط به هر دستگاه را در یک ساختار بالا به پائین که شبیه به درخت است، مرتب کرده و از این ساختار برای محاسبه احتمال خرابی یا سالم بودن یک دستگاه یا مجموعه استفاده می‌کند. این روش اولین بار در آزمایشگاه‌های تلفن بل<sup>2</sup> ارائه و توسعه داده شد (Vesley et al., 1981). این روش دارای شش گام اصلی برای تشکیل درخت خطاست که در زیر به طور خلاصه ارائه می‌شوند (Dhillon, 2008):

گام 1) ارائه تعریفی از سیستم و تشریح رخدادهای نامطلوب در آن

گام 2) ساخت درخت خطا با استفاده از منطق ریاضی و سایر علائم استاندارد

گام 3) ارزیابی کیفی درخت خطای تشکیل شده

گام 4) جمع‌آوری اطلاعات پایه شامل نرخ خرابی اجزای مختلف و احتمال وقوع خرابی در آن‌ها

گام 5) ارزیابی کمی درخت خطا

گام 6) پیشنهاد اقدامات لازم برای اصلاح و بهبود.

چنانکه مشاهده می‌شود روش درخت خطا یک روش کیفی و کمی بوده و به این دلیل به طور بسیار مناسبی شرایط فنی و خرابی‌های دستگاه را تحلیل می‌نماید. این روش با تعریف رخدادهای نامطلوب به عنوان "رخداد بالا"<sup>3</sup>، شروع شده و با پرسیدن این سؤال که "این رخداد چگونه می‌تواند اتفاق بیافتد؟" مسئله را تحلیل مینماید و ساختار درخت خطا را تا رسیدن به کوچکترین اجزاء سیستم ادامه می‌دهد. شکل 2-3 یک نمونه درخت خطا را برای آشنایی بیشتر نشان می‌دهد. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، این درخت برای تحلیل احتمال تاریک بودن یک اتاق تشکیل شده است. در این درخت از بالا به پائین، دلایل ممکن برای تاریک بودن یک اتاق به صورت شاخه‌های ارائه شده است

<sup>1</sup>. Fault Tree Analysis

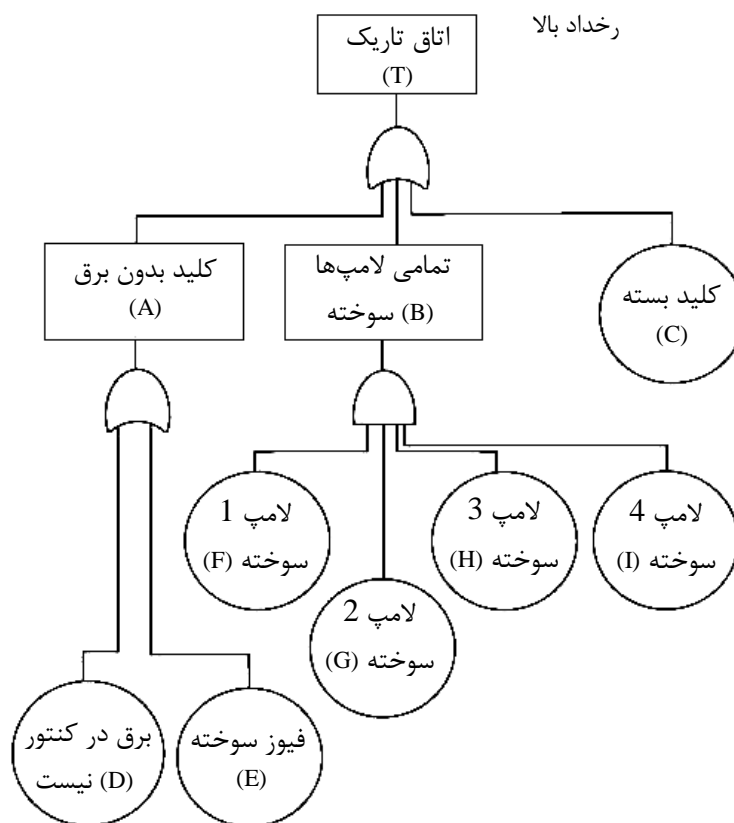
<sup>2</sup>. Bell

<sup>3</sup>. Top Event

(Dhillon, 2008).

با توجه به مفاهیم نمادهای مختلف به کار رفته در درخت خطا، برای محاسبه احتمال وقوع رخداد اصلی (رخداد بالا) باید احتمال وقوع هر یک از خرابی‌های شاخه‌های مختلف معلوم باشد. با معلوم بودن احتمال هر شاخه، می‌توان احتمالات مربوط به شاخه‌ها را از پائین به بالا محاسبه کرده و احتمال رخداد اصلی را به دست آورد.

چنانکه توضیح داده شد روش درخت خطا، روش توانمند و پرکاربردی در حوزه مهندسی قابلیت اطمینان است اما یک مشکل همواره کاربرد این روش توانمند با مشکل مواجه می‌کند. زمانی که شاخه‌ها به دقت تا کوچکترین بخش‌های یک دستگاه را پوشش دهند، زمان بسیار زیادی لازم است تا با استفاده از داده‌های واقعی و کنترل‌های آماری بتوان احتمال خرابی یک قطعه را که در پائین‌ترین بخش یک شاخه قرار دارد را محاسبه نمود. در دستگاه‌های بسیار پیشرفته و با طراحی فوق‌العاده، این زمان ممکن است تا 10 سال و شاید بیشتر نیز به طول انجامد. لذا در کوتاه مدت شاید نتوان به خوبی از توانمندی این روش استفاده نموده و رفتار دستگاه را به صورت کامل مورد مطالعه قرار داد. لذا با توجه به این موضوع، امروزه این روش بیشتر برای تشخیص خرابی و ریشه‌یابی دلایل خرابیهای دستگاه استفاده میشود و برای تحلیل قابلیت اطمینان کمتر از آن استفاده میشود.





## 2-5-4- روش تحلیل آماری

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

## 2-6- تحلیل آماری و مدلسازی قابلیت اطمینان

با توجه به رابطه (2-3)، تابع توزیع احتمال زمان بین خرابیها به عنوان اصلیترین بخش محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است. لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با دادهها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان به شمار میآید.

با توجه به طبیعت آماری محاسبات، مهمترین و حیاتیترین عامل در دستیابی به مدل قابلیت اطمینان مناسب، داشتن جامعه آماری کامل و دقیق میباشد. چنانکه شرح داده شد، زمان بین خرابیها (TBF) به عنوان متغیرهای تصادفی، تشکیل دهنده جامعه آماری مورد استفاده در مدلسازی قابلیت اطمینان میباشد. معمولاً برای مدلسازی قابلیت اطمینان یک دستگاه از سه روش عمده استفاده میشود (Ascher & Feingold, 1984; Klefsjö & Kumar, 1992; Modarres, 2006; Birolini, 2007):

الف) فرآیند تجدید شونده (RP)<sup>1</sup>

ب) فرآیند پواسون همگن (HPP)<sup>2</sup>

ج) فرآیند پواسون ناهمگن (NHPP)<sup>3</sup>

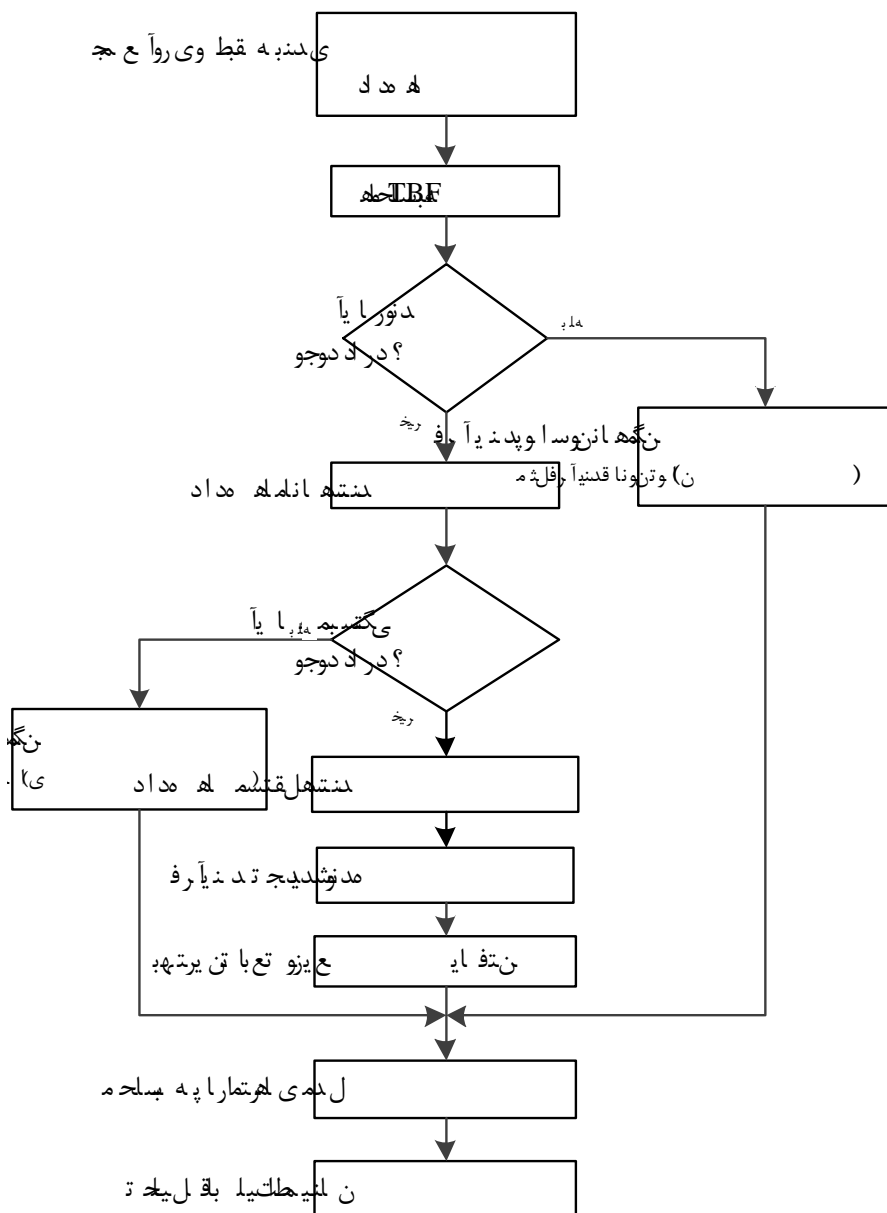
انتخاب هر یک از روشهای مدلسازی فوق بستگی به نوع دادههای جمعآوری شده دارد. الگوریتم

<sup>1</sup>. Renewal Process

<sup>2</sup>. Homogenous Poison Process

<sup>3</sup>. Nonhomogeneous Poison Process

کلی برای انتخاب روش مدلسازی و تحلیل قابلیت اطمینان که در این رساله نیز مورد استفاده قرار گرفته است در شکل 2-4 ارائه شده است. چنانکه در شکل مشاهده میشود، برای تشخیص نوع دادهها و انتخاب بهترین روش مدلسازی، دو مرحله ارزیابی (آزمون) روی دادهها انجام میگردد. در مرحله اول دادهها برای وجود یا عدم وجود روند مورد ارزیابی قرار میگیرند. در صورت وجود روند در دادهها، از فرآیند پواسون ناهمگن مانند روش فرآیند قانون توان<sup>1</sup> برای تحلیل قابلیت اطمینان استفاده میشود.



شکل 2-4- روندنمای مربوط به انتخاب روش مناسب برای مدل سازی قابلیت اطمینان

<sup>1</sup>. Power Law Process

(Ascher & Feingold, 1984; Kumar, 1990)

در صورت عدم وجود روند در دادهها، دادهها برای وجود یا عدم وجود همبستگی سری<sup>۱</sup> مورد آزمایش قرار میگیرند. در صورت وجود همبستگی در دادهها، از روشهای زیرمجموعه فرآیند پواسون همگن مثل فرآیند پواسون شاخهای<sup>۲</sup> برای مدلسازی انتخاب میشود. در صورت عدم وجود روند و همبستگی، دادهها از نظر آماری "مستقل و مانا (iid)"<sup>۳</sup> نامیده میشوند (Kumar, 1990; Ascher & Feingold, 1984) و برای مدل سازی این نوع دادهها از فرآیند تجدیدشونده و آمار کلاسیک استفاده می شود (Ebeling, 2009; Kececiyoglu, 2002; Ridgon & Basu, 2000). در ادامه انواع آزمونهای روند و همبستگی سری که به آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها شهرت دارند و نیز مدلسازی قابلیت اطمینان ارائه میگردند.

## 2-6-1- آزمونهاى مستقل و مانا بودن دادهها

### 2-6-1-1- آزمونهاى روند<sup>۴</sup>

به الگوی خرابیهای یک دستگاه روند گفته میشود که میتواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد. در حالت یکنواخت، اگر فاصله زمانی خرابیها رو به افزایش باشد، شرایط دستگاه "رو به بهبود"<sup>۵</sup> (روند کاهشی) خوانده میشود. اگر فاصله زمانی خرابیها با افزایش عمر دستگاه کاهش یابد، شرایط دستگاه "رو به زوال"<sup>۶</sup> (روند افزایشی) خوانده میشود. در صورتی که تغییرات چندانی در TBFهای دستگاه رخ ندهد، دستگاه را "پایدار"<sup>۷</sup> مینامند (Kvaloy & Lindqvist, 1996).

برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در دادهها، آزمونهای مختلفی پیشنهاد شدهاند که به طور کلی به دو گروه آزمونهای تحلیلی و گرافیکی تقسیم میشوند. از جمله روشهای تحلیلی می توان به

<sup>1</sup>. Serial correlation

<sup>2</sup>. Branching Poisson process

<sup>3</sup>. Independent and Identically Distributed

<sup>4</sup>. Trend Test

<sup>5</sup>. Improving System

<sup>6</sup>. Deteriorating System

<sup>7</sup>. Stable

آزمونهای لاپلاس<sup>۱</sup>، هندبوک نظامی<sup>۲</sup>، چیدمان معکوس<sup>۳</sup>، نسبت همسایگی<sup>۴</sup> و آزمون مساحت<sup>۵</sup> اشاره اشاره کرد (Kvaløy & Lindqvist, 1996; Ascher & Feingold, 1984). در میان این روشها روش هندبوک نظامی از کاربرد بیشتری نسبت به سایر آزمونها برخوردار است (Kumar, 1990). در مواقعی که هدف از آزمون روند، انتخاب بین دو فرآیند تجدیدشونده و پواسون ناهمگن از نوع قانون توان باشد، این آزمون بهترین و قابل اعتمادترین نتیجه را ارائه مینماید (NIST, 2011). در آزمون نظامی، ارزیابی وجود روند در دادهها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری  $(U)$  (رابطه 2-12) انجام میشود (MIL-HDBK-189, 1984).

$$-2)U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n / T_i) \quad (12)$$

که در آن،  $n$  تعداد خرابی،  $T_n$  زمان آخرین خرابی،  $T_i$  زمان خرابی  $i$ ام میباشد. در این روش، فرض صفر این است که دادهها از فرآیند پواسون ناهمگن تبعیت نمیکنند. بر مبنای این فرض، شاخص  $U$  دارای توزیع کی-دو ( $\chi^2$ ) با درجه آزادی  $2(n-1)$  است. برای کنترل صحت فرض صفر، پس از محاسبه  $U$  برای دادهها، از جدول استاندارد توزیع کی-دو استفاده میشود. اگر  $U$  از عدد بحرانی قرائت شده از جدول استاندارد بزرگتر باشد فرض پایه صفر پذیرفته میشود. در صورتی که فرض موجود در سطح اعتماد بالای 90٪ (معمولاً 95٪) پذیرفته شود، آنگاه مشخص میشود که دادهها دارای روند نیستند. در صورت رد این فرض، دادهها دارای روند تشخیص داده میشوند. آزمون گرافیکی به دلیل سادگی، سرعت عملکرد و اطلاعات با ارزشی که در اختیار قرار میدهد، از کاربرد بیشتری نسبت به روشهای تحلیلی برخوردار است. در این آزمون شماره خرابیها بر اساس تابعی از زمان تجمعی وقوع هر خرابی (زمان تا خرابی) به صورت نقاط مجزایی رسم میشوند. نحوه

<sup>1</sup>. Laplace

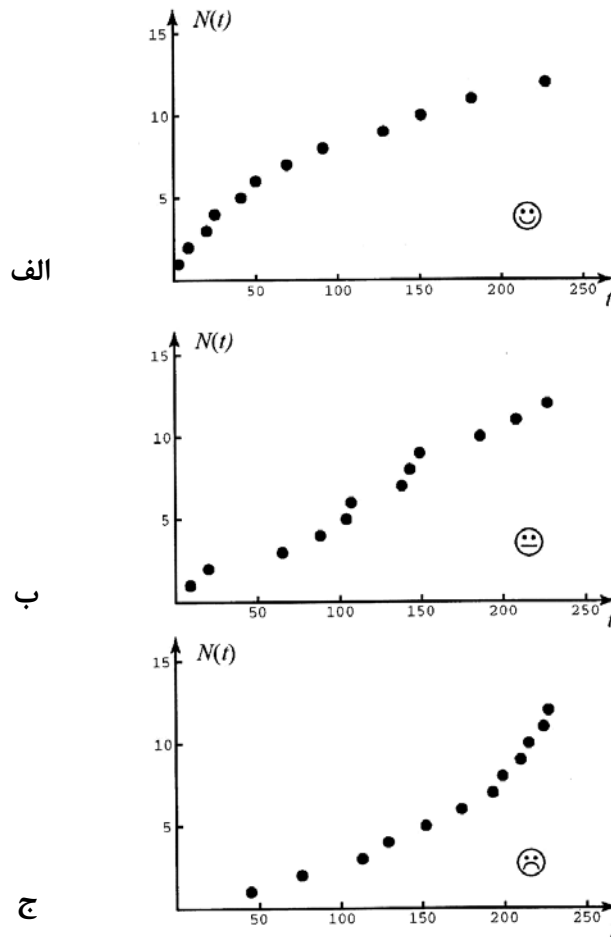
<sup>2</sup>. Military Handbook Test

<sup>3</sup>. Reverse Arrangement

<sup>4</sup>. Likelihood-ratio

<sup>5</sup>. Area Test

قرارگیری این نقاط نشاندهنده نوع رفتار دستگاه و وجود یا عدم وجود روند در دادهها است. در صورتی که الگوی کلی قرارگیری نقاط به صورت خطی باشد، دادهها عاری از روند میباشند. وجود حالت تحدب، تقعر و یا به طور کلی انحنا در نحوه قرارگیری نقاط، نشان دهنده روند در دادههاست (Ascher & Feingold, 1984; Kumar & Klefsjo, 1992; Misra, 2011). انواع حالت‌های ممکن برای آزمون روند گرافیکی در شکل 2-5 نشان داده شده است. چنانکه در شکل مشاهده میشود، مهمترین برتری و اهمیت روش گرافیکی نسبت به روشهای تحلیلی، تشخیص همزمان روند و نوع "رو به بهبود" یا "رو به زوال" بودن دستگاه است که در روشهای تحلیلی قابل تشخیص نیست.

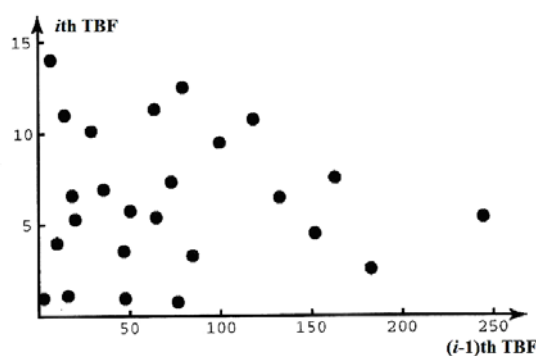


الف) دادهها دارای روند میباشند (به دلیل تحدب شکل قرارگیری دادهها، سیستم رو به بهبود است)، ب) دادهها دارای روند نیستند (سیستم پایدار است) ج) دادهها دارای روند میباشند (به دلیل تقعر شکل قرارگیری دادهها، سیستم رو به زوال است)، شکل 2-5- آزمون گرافیکی برای تعیین نوع دادهها (Ridgon & Basu, 2000)

از آنجایی که در روشهای تحلیلی با دادهها و سیستم موجود با استراتژی "جعبه سیاه"<sup>۱</sup> برخورد میشود، الگوی کلی دادهها مورد ارزیابی قرار گرفته و حالت‌های خرابی<sup>۲</sup> مورد توجه قرار نمیگیرند. اما در روش گرافیکی امکان بررسی و مطالعه وجود یا عدم وجود حالت‌های خرابی چندگانه وجود دارد. در این رساله به منظور دستیابی به دقت بالا و نیز بررسی رفتار تابع زمان زیرسیستمهای دستگاه، از آزمون گرافیکی و آزمون تحلیلی "نظامی"<sup>۳</sup> به طور همزمان استفاده خواهند شد.

## 2-6-1-2- آزمون همبستگی سری<sup>۳</sup>

هدف از این آزمون ارزیابی استقلال<sup>۴</sup> یا همبستگی دادهها است. برای بررسی همبستگی دادههای خرابی یک دستگاه از روش گرافیکی استفاده میشود. در این روش  $n$  آمین داده‌ای خرابی به صورت تابعی از  $(n-1)$  آمین داده‌های خرابی در یک فضای  $XY$  رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد، نشان دهنده آن است که داده‌های متوالی دارای همبستگی نیستند. در غیر این صورت دادهها غیرمستقل خوانده میشود (Ascher & Feingold, 1984). نمونه‌های از نتیجه آزمون همبستگی در شکل 2-6 ارائه شده‌است. در این شکل، نقاط از پراکندگی و بینظمی برخوردار هستند و این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی در دادههاست.

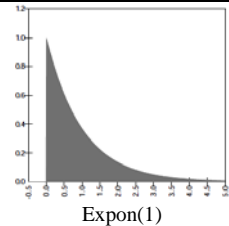
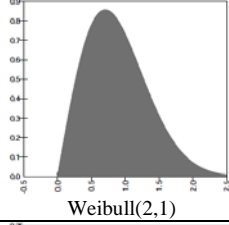
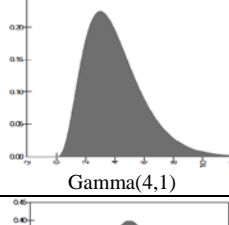
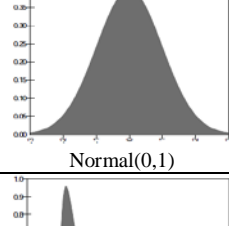
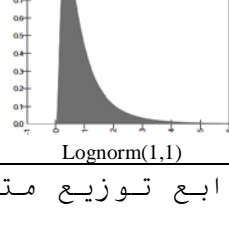


شکل 2-6- آزمون همبستگی سری

## 2-6-2- فرآیند تجدیدشونده

1. Black Box
2. Failure modes
3. Serial Correlation Test
4. Dependence

فرآیند تجدیدشونده فرآیندی شمارنده است که زمانهای بین رخدادها در آن به صورت مانا و مستقل و تحت تابع توزیع مشخصی اتفاق میافتد (Rausand & Hsyland, 2004). برای یافتن توزیع مناسب در فرآیند تجدیدشونده از روشهای آمار کلاسیک استفاده میشود. برای این منظور، توابع توزیع مختلف روی دادهها امتحان میشوند تا بهترین توزیع (دارای کمترین خطا و اختلاف با واقعیت) انتخاب شود. در شکل 2-7 تعدادی از توابع توزیع پیوسته که در تحلیل قابلیت اطمینان از کاربرد بیشتری برخوردارند، ارائه شدهاند. توضیحات تکمیلی در بخش مطالعه موردی ارائه خواهد شد.

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

شکل 2-7- مشخصات توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته

برای انتخاب بهترین تابع چگالی احتمال خرابی، نیاز است که بدانیم هر توزیع تا چه حد بر دادهها تجربی موجود تطابق دارد. برای ارزیابی این موضوع آزمونهای آماری "تطابق برازش"<sup>1</sup> مورد استفاده قرار میگیرند. سه آزمون اصلی که در آمار بسیار مورد استفاده قرار میگیرند عبارتند از: روش آزمون مربع کی<sup>2</sup>، کلموگروف-اسمیرنوف<sup>3</sup> (K-S)، و روش حداقل مربعات<sup>4</sup>. در مهندسی قابلیت اطمینان از

1. Goodness-of-fit test

2.  $\chi^2$  test

3. Kolmogorov-Smirnov test

4. Least Squares



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

## 2-6-3- فرآیند پواسون

فرآیند پواسون، یک فرآیند تصادفی شمارشگر است که برای وقوع رخدادهای تصادفی بر روی یک بازه زمانی یا یک فاصله مکانی تعریف می شود. اگر  $N(t)$  نشاندهنده تعداد پیشآمدهایی باشد که در فاصله زمانی  $[0, t]$  رخ میدهند، به فرآیند شمارشگر  $N(t)$  فرآیند پواسون با نرخ  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) گفته میشود اگر شرایط زیر را دارا باشد (چینلار، 1380):

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

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

(ج) توزیع تعداد پیشآمدهایی که در یک بازه مفروض رخ میدهند، تنها به طول بازه وابستگی داشته باشد و نه به موقعیت آنها. این شرط نمو ایستا نامیده میشود و بیانکننده آن است که توزیع

احتمال  $N(t+s)-N(t)$  برای هر مقدار  $t$  یکسان است.

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

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

دو شرط آخر بیان میکنند که در یک بازه کوچک با طول  $h$ ، احتمال اینکه یک پیشامد رخ دهد تقریباً مساوی  $\lambda h$  است. در حالی که احتمال اینکه 2 یا تعداد بیشتر پیشامد رخ دهند تقریباً مساوی با صفر است. در نهایت شرطهای فوق نتیجه میدهند که تعداد پیشامدهایی که در بازه به طول  $t$  رخ میدهند یک متغیر تصادفی پواسون با پارامتر  $\lambda t$  است.

فرآیندهای پواسون بر حسب نوع پارامتر شدت  $\lambda$  (به دو خانواده همگن یا ناهمگن تقسیم میشوند. در فرآیند پواسون همگن،  $\lambda$  با گذشت زمان ثابت میماند. اما در فرآیند پواسون ناهمگن،  $\lambda$  با گذشت زمان تغییر میکند و به عبارتی تابع زمان میباشد.

در مهندسی قابلیت اطمینان فرآیند پواسون از کاربرد بسیار گستردهای برخوردار است. یکی از پرکاربردترین انواع فرآیندهای پواسون، فرآیند قانون توان میباشد که در مدلسازی رفتار خرابی ماشینآلات از توانایی بالایی بهره‌مند است (Kumar & Klefsjo, 1992). در ادامه، این فرآیند و محاسبات مربوطه ارائه میشوند.

## 2-6-4- فرآیند قانون توان

فرآیند قانون توان یکی از شناختهشدهترین روشهای مطالعه قابلیت اطمینان دستگاههای تعمیرپذیر به شمار میآید. این روش اولین بار توسط دوآنه (Duane, 1964) ارائه گردید. کرو (Crow, 1974) این فرآیند را به صورت یک فرآیند پواسون ناهمگن فرموله کرده و تابع شدت (تابع نرخ خرابی) آن را به صورت تابعی از زمان به شکل زیر ارائه نمود:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (13-2)$$

که در آن  $\theta$ ، پارامتر مقیاس و  $\beta$ ، پارامتر شکل میباشد که طبق پیشنهاد کرو میتوان آنها را با استفاده از روش تخمین نزدیکترین همسایگی<sup>2</sup> و روابط زیر محاسبه نمود:

<sup>1</sup>. Intensity parameter  
<sup>2</sup>. Maximum likelihood

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n-1} \ln(t_n / t_i)} \quad (14-2)$$

(15-2)

$$\hat{\theta} = \frac{t_n}{n^{1/\beta}}$$

که در آنها  $t_i$  زمان پیشامد  $i$ امین خرابی،  $t_n$  زمان کل عملکرد دستگاه و  $n$  تعداد کل خرابی دستگاه میباشد. شایان ذکر است روابط 14-2 و 15-2 زمانی استفاده میشوند که دادهها "برشخورده بر مبنای خرابی"<sup>1</sup> باشند. یعنی، مطالعه دستگاه در آخرین خرابی متوقف شده و زمان عملکردی پس از آخرین داده خرابی، برای دستگاه لحاظ نمیشود. تابع چگالی خرابی و قابلیت اطمینان فرآیند قانون توان به صورت روابط زیر می باشند:

(16-2)

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

(17-2)

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

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

تاکنون در این فصل، تئوریها و مفاهیم مربوط به قابلیت اطمینان و روشهای تحلیل و

مدلسازی قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه، مبانی شبیهسازی قابلیت اطمینان و

<sup>1</sup>. Failure truncated

روش شبیهسازی مورد استفاده در این رساله مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## 2-7- شبیهسازی قابلیت اطمینان<sup>1</sup>

امروزه با پیچیده‌تر شدن دستگاه‌ها و سیستم‌های مهندسی، مسأله مدیریت و ارزیابی آن‌ها نیز پیچیده‌تر شده و نیازمند ابزارهای کارآمدتری است. پیچیدگی‌های مذکور، حاصل اندرکنش و ارتباطات داخلی اجزای سیستم‌ها بوده و تغییر در یکی از این بخش‌ها تغییرات زیادی در سایر بخش‌ها و در کل سیستم ایجاد می‌کند. علم تحلیل سیستم‌ها، به ارزیابی این تغییرات و شدت آن‌ها می‌پردازد (شانون، 1371). یکی از ابزارهای توانمند در زمینه تحلیل سیستم‌ها، شبیهسازی است. چنانچه شرح داده شد، مدل‌سازی قابلیت اطمینان در نهایت منجر به پیش‌بینی قابلیت اطمینان در هر لحظه از عملکرد دستگاه می‌شود. با توجه به این که مدل، عموماً بر مبنای یک سری ساختار و شبکه شناخته شده ارائه می‌شود، برخی اوقات در سیستم‌های با شبکه پیچیده، مدل‌سازی با دشواری‌های عملی و اجرایی مواجه می‌شود. گاهی نیز مدل‌های آماری، بسیار پیچیده بوده و ابزارهای آنالیز ریاضی نمی‌توانند جواب مناسبی در مورد قابلیت اطمینان دستگاه در اختیار بگذرانند (Dekking et al., 2005). به طور کلی چهار مشکل عمده در مدل‌سازی قابلیت اطمینان دستگاه‌های بزرگ مقیاس به وجود می‌آید (Wang & Pham, 1997):

- الف) شبکه قابلیت اطمینان ممکن است بسیار پیچیده باشد
  - ب) زیرسیستم‌ها ممکن است دارای توابع چگالی خرابی متفاوتی باشند
  - ج) زیرسیستم‌ها ممکن است پس از تعمیر دارای توابع خرابی دلخواهی باشند
  - د) داده‌های مربوط به زیرسیستم‌ها ممکن است کافی نباشند.
- از طرفی، به دلیل ماهیت آماری، قابلیت اطمینان همواره با عدم اعتماد و عدم قطعیت<sup>2</sup> همراه است.

<sup>1</sup>. Reliability Simulation  
<sup>2</sup>. Uncertainty

لذا اطلاع از میزان قطعیت قابلیت اطمینان محاسبه شده برای دستگاه در یک زمان مشخص، امری مهم و گاه ضروری است.

با توجه به مشکلات مذکور، همواره متخصصان به دنبال راه چاره ای برای رفع این موارد و بهبود تحلیل قابلیت اطمینان بوده‌اند. یکی از راه کارهای عملی و جدی برای رفع این مشکلات، شبیهسازی قابلیت اطمینان است. در شبیهسازی قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان به عنوان یک سیستم مجازی در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که، از دیدگاه مدل‌سازی کلاسیک، قابلیت اطمینان یک مشخصه سیستم است. شبیهسازی قابلیت اطمینان به دو روش عمده قابل اجرا است (Wang & Pham, 1997):

الف) روش ترتیبی<sup>1</sup>: این روش تمامی بازه‌های زمانی موجود در محدوده شبیهسازیشده را به صورت مرتب (به ترتیب) آزموده و محاسبه میکند.

ب) روش تصادفی<sup>2</sup>: این روش با انتخاب تصادفی بازه‌های زمانی موجود، محاسبات مربوط به شبیهسازی را انجام میدهد.

روش تصادفی که با نام "شبیهسازی مونت کارلو"<sup>3</sup> شناخته میشود، یک ابزار توانمند برای شبیهسازی سیستم‌های پیچیده و تعیین سطح اطمینان خروجی مدل‌های قابلیت اطمینان است که بر مبنای مدل‌های احتمال و تولید اعداد تصادفی کار میکند (Dekking et al., 2005, Wang & Pham, 1997). در ادامه این بحث برای آشنایی بیشتر، روش مونت کارلو به صورت عمومی ارائه شده و سپس روش‌های مونت کارلو مورد استفاده در شبیهسازی قابلیت اطمینان توضیح داده خواهند شد.

## 2-7-1- شبیهسازی مونت کارلو

روش شبیهسازی مونت کارلو در دهه 1940 در طی تحقیقات برای ساخت بمب اتمی توسط ریاضیدانان ارائه گردید. این روش برای اولین بار در آزمایشگاه ملی لاس‌آلاموس<sup>4</sup> برای مطالعه

<sup>1</sup>. Sequential

<sup>2</sup>. Random

<sup>3</sup>. Monte Carlo Simulation

<sup>4</sup>. Los Alamos

پخششدگی تصادفی نوترونها<sup>1</sup> استفاده شد (Alexander, 2003). روش مونت کارلو با تولید اعداد تصادفی یا شبه تصادفی، از توزیع چگالی مربوط به هر یک از اجزای سیستم نمونه گیری کرده و با قرار دادن این نمونه ها در مدل نهایی سیستم، توزیع خروجی را به دست می دهد و برای هر نوع توزیع ورودی و خروجی قابل استفاده است. این روش در حقیقت با استفاده از مدل احتمالاتی سیستم و شبیه سازی متغیرهای تصادفی، یک راه حل اساسی برای مسائل ریاضی و فنی ارائه می کند. از جمله مهمترین ویژگیهای این روش میتوان به انعطافپذیری بالا و عدم وابستگی به ابعاد سیستم اشاره نمود (Faulin et al., 2010, Rubinstein & Kroese, 2007). گامهای اجرای شبیه سازی مونت کارلو به شرح زیر است (Biolini, 2007):

گام اول) تعریف تابع توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهای ورودی با استفاده از داده های تجربی

گام دوم) نمونه گیری تصادفی از توزیع احتمال هر متغیر ورودی

گام سوم) استفاده از مقادیر انتخاب شده به عنوان پارامترهای ورودی و محاسبه خروجی

گام چهارم) تکرار گام های (2) و (3) تا جایی که یک توزیع احتمال پایدار برای خروجی حاصل

شود

گام پنجم) محاسبه احتمال رخداد خروجی با مقدار دلخواه با استفاده از هیستوگرام به دست آمده.

به عنوان نمونه ای از کاربرد شبیه سازی مونت کارلو، شبیه سازی ضریب ایمنی شیروانی های معادن با تکیه بر گام های فوق، به صورت شماتیک در شکل 2-8 نشان داده شده است (Khalokakaie, 1999).

چنانچه در شکل مشاهده می شود، این روش بر مبنای انتخاب تصادفی متغیرهای ورودی از

زیرسیستم ها و جایگذاری آنها در مدل اصلی استوار است. این فرآیند، عمومی ترین حالت اجرای

الگوریتم مونت کارلو است. اما در مهندسی قابلیت اطمینان نمی توان به صورت فوق از شبیه سازی

مونت کارلو استفاده کرد. برای بیان این مشکل، مثال فرضی زیر را در نظر می گیریم:

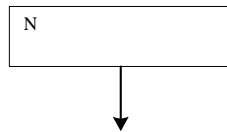
فرض کنیم یک دستگاه متشکل از چهار بخش مجزا (زیرسیستم) که به صورت سری کار می کنند را

در اختیار داریم و توابع  $F_1(t)$ ،  $F_2(t)$ ،  $F_3(t)$  و  $F_4(t)$  به ترتیب توابع توزیع تجمعی خرابی مربوط به هر

<sup>1</sup>. Neutron

زیرسیستم هستند. مدل قابلیت اطمینان این دستگاه را در حالت کلی می توان به صورت زیر نوشت:

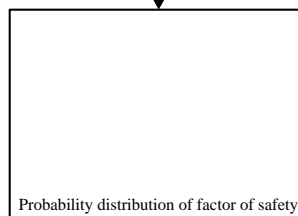
$$R(t) = (1 - F_1(t))(1 - F_2(t))(1 - F_3(t))(1 - F_4(t))$$



Calculate factor of safety

I

Yes



شکل 2-8- شبیهسازی ضریب ایمنی شیروانی های معادن با استفاده از روش مونت کارلو (Khalokakaie, 1999)

برای شبیهسازی باید با استفاده از توابع تولیدکننده اعداد تصادفی، اعدادی بین صفر و یک انتخاب کرده و زمان  $t$  متناظر با هر زیرسیستم را استخراج کرد. سپس این زمان ها را در معادله فوق قرار داده و قابلیت اطمینان دستگاه را تعیین نمود. این عمل برای تعداد دفعات زیادی به طور مرتب تکرار می شود و در نهایت هیستوگرام قابلیت اطمینان دستگاه به دست می آید. اما در عمل این امر و عملیات ریاضی فوق امکان اجرا ندارند. زیرا، طبق رابطه فوق، مدل نهایی دستگاه خود تابعی از توابع تجمعی خرابی های زیرسیستم هاست و اگر بخواهیم زمان های تصادفی ایجاد شده را در مدل قرار دهیم، در نهایت مشخص نمیشود که قابلیت اطمینان به دست آمده مربوط به چه زمانی  $(t)$  است.

لذا، فرآیند تولید و مصرف اعداد تصادفی در یک چرخه تکرار باطل قرار می‌گیرد. بنابراین، از مونت کارلو کلاسیک نمی‌توان در شبیهسازی قابلیت اطمینان استفاده کرد. به همین دلیل، متخصصان آمار و مهندسی قابلیت اطمینان تلاش‌های گسترده‌ای را برای رفع این مشکل و امکان شبیهسازی قابلیت اطمینان انجام داده‌اند. هدف این تلاش‌ها تعیین قابلیت اطمینان و سطح اعتماد قابلیت اطمینان محاسبه شده با استفاده از شبیهسازی مونت کارلو بوده است. در ادامه این فصل انواع روشهای شبیهسازی قابلیت اطمینان مورد مطالعه و بررسی قرار خواهند گرفت.

## 2-7-2- انواع الگوریتم‌های مونت کارلو برای شبیهسازی قابلیت اطمینان

تاکنون تلاشها و تحقیقات بسیار زیادی برای شبیهسازی قابلیت اطمینان با استفاده از روش مونت کارلو انجام شده است. به گزارش وانگ و فام (Wang & Pham, 1997) این روش برای اولین بار در سال 1960 توسط ارکاند<sup>1</sup> در کشور آمریکا، با تعیین سطح اعتماد قابلیت اطمینان، وارد حیطه مهندسی قابلیت اطمینان شد. در سال 1961 بورت و ویلز<sup>2</sup> روش‌های تحلیلی و شبیهسازی مونت کارلو را برای تعیین سطح اعتماد مورد بحث قرار داده و روشی را برای شبیهسازی سیستم‌های پیچیده با تابع خرابی نمایی ارائه کردند. برنهوف<sup>3</sup> در سال 1963 شبیهسازی قابلیت اطمینان مونت کارلو را در انیستیتو تکنولوژی نیروی هوایی آمریکا مورد مطالعه قرار داد. مور<sup>4</sup> در سال 1965 روش جامع مونت کارلو را ارائه کرد. وی و دانشجویانش در طی 15 سال، مطالعات گسترده و بنیادی در این زمینه انجام داده و روش‌های مختلفی را توسعه دادند. در یکی از شاخص‌ترین این تحقیقات، لوی و مور<sup>5</sup> در سال 1967 فرآیندی برای به دست آوردن سطح اعتماد قابلیت اطمینان سیستم‌هایی که اجزای آنها دارای توابع خرابی نرمال، لاگ نرمال، گاما و وایبول باشند را ارائه کردند. در سال‌های بعد متخصصان مختلفی تحقیقات در این زمینه را ادامه دادند که توضیحات بیشتر در این مورد در Wang & Pham (2006) ارائه شده است. امروزه شبیهسازی قابلیت اطمینان به طور گسترده در سیستم‌های برق

<sup>1</sup>. Orkand

<sup>2</sup>. Burnett & Wales

<sup>3</sup>. Bernhoff

<sup>4</sup>. Moore

<sup>5</sup>. Levy & Moore



(قدرت)، مهندسی عمران، مهندسی هسته‌های و مکانیک آماری کاربرد دارد (Faulin et al., 2010).

هر یک از روش‌های ارائه شده تاکنون، به شبیه‌سازی نوع خاصی از مسائل قابلیت اطمینان و سیستم‌های مختلفی پرداخته‌اند. اما در این میان روش‌های عمومی‌تر و جامع‌تری وجود دارند که بیشتر مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرند. تمامی تحقیقات گذشته بر روی تجهیزات مهندسی را میتوان به طور کلی در دو بخش مورد مطالعه قرار داد: شبیه‌سازی دستگاه‌های تعمیرپذیر و شبیه‌سازی دستگاه‌های غیرقابل تعمیر. شبیه‌سازی دستگاه‌های تعمیرپذیر به مراتب مشکل‌تر از دستگاه‌های تعمیرناپذیر میباشد. لذا، تحقیقات و روش‌های ارائه شده برای سیستم‌های غیرقابل تعمیر بیشتر از روش‌هایی است که برای دستگاه‌های تعمیرپذیر ارائه شده است.

تاکنون بیش از 12 روش مبتنی بر روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان دستگاه‌های غیرقابل تعمیر ارائه شده است. از این میان تنها پنج روش به عنوان روش‌های پرکاربرد و شناخته‌شده در مهندسی قابلیت اطمینان مطرح می‌باشند و سایر روش‌ها در حد پیشنهاد و راه حلی برای موارد بسیار خاص باقی مانده‌اند. نام و موارد کاربرد پنج روش پرکاربرد به طور خلاصه در جدول 2-2 ارائه شده است.

جدول 2-2- مهم‌ترین روش‌های شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مونت کارلو مورد استفاده در سیستم‌های غیرقابل تعمیر

نام روش	ارائه دهنده‌گان	موارد کاربرد
K-R	Kamat & Riley (1975)	برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان هر نوع سیستمی با ساختار آزاد و با زیرسیستم‌های دارای توزیع خرابی مختلف به کار می‌رود.
R-M	Rice & Moore (1983)	برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده که خرابی‌های زیرسیستم‌های آن دارای توزیع دو جمله هستند، استفاده می‌شود. کاربرد ویژه این روش در سیستم‌هایی است که برخی زیرسیستم‌ها خرابی صفر دارند.
C-H	Chao & Huang (1987)	این روش برای کاهش خطا در تخمین حد بالای قابلیت اطمینان در روش R-M ارائه شده و حدود قابلیت اطمینان سیستم‌های با توزیع دو جمله‌ای را به طور کاملاً دقیق ارائه می‌کند. این روش جایگزین روش R-M شده است.
L-D-L	Lin et al., (1988)	این روش نیز برای شبیه‌سازی سیستم‌هایی به کار می‌رود که دارای توزیع خرابی دو جمله‌ای باشند. این روش نسبت به دو روش قبل از خود اطلاعات بیشتری در مورد خرابی زیرسیستم‌ها اختیار کاربر می‌گذارد.
L-D	Lin & Donaghy (1993)	این روش یک روش ترکیبی بین تکنیک مونت کارلو و روش گرافیکی "دیگرام بلوکی قابلیت اطمینان" است. کاربرد اصلی این روش در تعیین قابلیت اطمینان و سایر کمیت‌های مربوطه د

سیستم‌های با آرایش پل یا سیستم‌های با بیش از 10 زیرسیستم است. بزرگترین ایراد این روش عدم ارائه بازه‌های سطح اعتماد برای قابلیت اطمینان است.

روش‌های ذکر شده در جدول فوق، راه‌حلهای مناسبی برای رفع مشکلات موجود در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده را ارائه مینمایند. در مجموع این روش‌ها دارای مزایایی به شرح زیر می‌باشند (Gendenka & Ushakov, 1995):

الف) این روش‌ها برای هر نوع ساختار قابلیت اطمینان بدون توجه به پیچیدگی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ب) از این روش‌ها می‌توان برای تعیین قابلیت دسترسی<sup>1</sup> سیستم‌ها و نیز MTBF سیستم‌های غیرقابل تعمیر به سادگی استفاده کرد.

ج) این روش‌ها با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری به راحتی، با سرعت و دقت بالا قابل پیاده‌سازی و محاسبه هستند.

د) با استفاده از این روش‌ها، بازه قابلیت اطمینان محاسبه شده با سطح اعتماد مشخص، قابل محاسبه و تحلیل است.

روش‌های دیگری نیز برای شبیهسازی قابلیت اطمینان دستگاه‌های غیرقابل تعمیر توسط محققانی همچون لانتن (Lutton, 1967)، لانتن (Lannon, 1972)، کوماموتو و همکاران (Kumamoto et al., 1977)، پوتز (Putz, 1979)، مور (Moore et al., 1980)، مکدونالد (Macdonald, 1982) و فیشر (Fishman, 1987) ارائه شده‌اند، اما هیچ یک از آنها از عمومیت و سادگی کاربرد عملی همچون پنج روش ارائه شده در جدول 1-2 برخوردار نیستند.

در دستگاه‌های تعمیرپذیر، شبیهسازی با دشواریهایی نسبت به دستگاه‌های غیرقابل تعمیر همراه است. منشأ این دشواریها مربوط به شبیهسازی همزمان عملکرد ماشین با زمان تعمیرات خرابیهاست. به عبارت دیگر، در این روش، محاسبات شبیهسازی TBF و TTR به صورت همزمان و موازی با هم اجرا شده و در نهایت با ادغام با یگدیگر، منجر به محاسبه قابلیت اطمینان شبیهسازی

<sup>1</sup>. Availability

شده میشوند. شبیهسازی تنها راه تعیین سطح اعتماد محاسبات قابلیت اطمینان در سیستمهای تعمیرپذیر به شمار میرود (Albert et al., 1985).

تاکنون شبیهسازی قابلیت اطمینان دستگاههای تعمیرپذیر توسط محققانی همچون کامات و فرانزمیر (Kamat & Franzmeier, 1976)، کوماموتو و همکاران (Kumamoto et al., 1980a, 1980b)، مور و همکاران (Moore et al., 1985) و کیم و لی (Kim & Lee, 1992) مورد مطالعه قرار گرفته و روشهای محدودی برای این منظور ارائه شده است. در میان روشهای مذکور، روش کامات و فرانزمیر عمومیتزین و منعطفترین روش به حساب میآید. این روش که بر مبنای مفهوم و تئوری روش K-R ارائه شده است، از سهولت بالا و زمان اجرای کمتری برخوردار است. با تکیه بر این مسائل، روش کامات و فرانزمیر تنها روش ساده، جامع و پرکاربرد در شبیهسازی قابلیت اطمینان سیستمهای تعمیرپذیر میباشد (Wang & Pham, 1997).

چنانکه ذکر شد، روش K-R به عنوان عمومیترین روش شبیهسازی قابلیت اطمینان از کاربرد بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار بوده و با انواع سیستمها تطابق بهتری دارد. در ادامه، روش مذکور بیشتر تشریح می شود.

### 2-7-3- روش شبیهسازی قابلیت اطمینان مونت کارلو K-R

در روش K-R فرض می شود زیرسیستمهای یک دستگاه مستقل از هم بوده و غیرقابل تعمیر می باشند. همچنین برای شروع این الگوریتم توابع توزیع خرابی و پارامترهای آماری مربوط به هر زیرسیستم باید تعیین شده باشد. این روش برای محاسبه قابلیت اطمینان با سطح اعتماد مشخص، مورد استفاده قرار می گیرد (Kamat & Rilye, 1975). گامهای اجرای این روش برای یافتن بازه قابلیت اطمینان سیستم در زمان  $t$  با سطح اعتماد مشخص به شرح زیر است:

گام اول) یافتن تمامی مسیرها شامل زیرسیستمهای مختلف، که کل سیستم را از ابتدا به انتها می رسانند (در مثال بیشتر توضیح داده خواهد شد).

گام دوم) تولید زمانهای خرابی تصادفی ( $t_i$ ) با استفاده از تابع توزیع زمانهای خرابی هر

زیرسیستم  $i$  نشان دهنده  $i$ امین زیرسیستم می باشد.  $0 < i < n$  (تعداد زیرسیستم)

گام سوم) مقایسه  $t_i$  با  $t$  برای تمامی زیرسیستمها. اگر  $t_i > t$  باشد این امر نشان دهنده این است که در زمان  $t$  زیرسیستم به خوبی کار می کند و اگر  $t_i < t$  باشد نشان دهنده آن است که زیرسیستم مورد نظر در زمان  $t$  خراب است.

گام چهارم) تخمین اینکه آیا کل سیستم در زمان  $t$  در حال کار است یا به دلیل خرابی برخی از زیرسیستمها (با توجه به نتایج گام 3) از کار افتاده است. برای این منظور تمامی زیرسیستمهای موجود در کوتاهترین مسیر موجود در سیستم، از دیدگاه گام سوم کنترل می شوند، اگر تمامی اجزا، در وضعیت عملیاتی باشند آنگاه سیستم درست کار می کند. اگر در کوتاهترین مسیر، یک زیرسیستم یا بیشتر خراب باشند، آنگاه آن مسیر خاص در سیستم، در زمان  $t$  خراب است. در مرحله بعدی، مسیرهای دیگر کنترل می شوند تا یک مسیر غیرخراب کشف شود. اگر حداقل یک مسیر غیرخراب در کل سیستم یافت نشود، آنگاه کل سیستم در زمان  $t$  دچار خرابی است. گام پنجم) تکرار گامهای دوم، سوم و چهارم برای  $m$  بار. در طی این تکرار، تعداد دفعات خرابی و تعداد دفعات سالم بودن سیستم شمارش می شود. در این حالت رابطه زیر برقرار است:

$$m = n_S(t) + n_F(t) \quad (18-2)$$

که در آن،  $n_S(t)$ ، تعداد دفعات عدم خرابی در کل دفعات تکرار و  $n_F(t)$ ، تعداد دفعات خرابی در کل دفعات تکرار میباشند.

گام ششم) تخمین قابلیت اطمینان در زمان  $t$  با استفاده از رابطه زیر:

$$(19-2)$$

$$\hat{R}(t) = \frac{n_S(t)}{n_S(t) + n_F(t)}$$

خروجی شبیهسازی از نوع توزیع دو جمله‌ای است. با توجه به شباهت‌های توزیع نرمال و توزیع دو جمله‌ای، بازه‌های قابلیت اطمینان با سطح اعتماد  $100(1-\gamma)\%$  در زمان  $t$  با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$(20-2) \quad [R_L(t), R_U(t)] = \hat{R}(t) \pm z_\gamma \frac{\hat{R}(t)(1-\hat{R}(t))}{[n_S(t) + n_F(t)]^{1/2}}$$

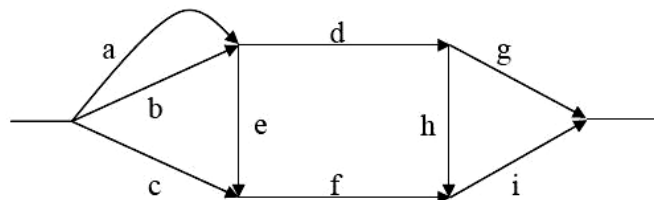
که در آن،  $R_L(t)$  نشان‌دهنده حد پائین قابلیت اطمینان،  $R_U(t)$  حد بالای قابلیت اطمینان و  $Z_\gamma$ ، برابر است با  $100\gamma$  درصد مساحت دو طرفه زیر منحنی توزیع نرمال با مقدار میانه صفر و واریانس یک است.

برای درک بهتر روش، کامات و رایلی مثالی ارائه نمودند که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است (Kamat & Rilye, 1975). فرض کنید یک سیستم دارای ساختاری به صورت شکل 2-9 و متشکل از

9 زیرسیستم باشد. همچنین تمامی زیرسیستم‌های a, b, c, ..., i دارای توزیع چگالی احتمال خرابی و ایپول دو پارامتری بوده و پارامترهای توزیع برای تمامی زیرسیستم‌ها معلوم باشند. در اولین گام باید مسیرهای ممکن و نیز کوتاهترین مسیر را در شبکه قابلیت اطمینان سیستم تشخیص دهیم.

مسیرهای موجود در این شبکه عبارتند از:

adg, bdg, cfi, adhi, bdhi, aefi, befi



شکل 2-9- شبکه قابلیت اطمینان سیستم مفروض

کامات و رایلی مثال مذکور را با استفاده از روش پیشنهادی خویش حل نموده و نتایج محاسبات را به صورت قابلیت اطمینان در زمان‌های مختلف و نیز بازه قابلیت اطمینان در هر زمان را در سطح اعتماد

95٪ به شرح جدول 2-3 ارائه کردند.

چنانکه در جدول مشاهده می‌شود، با استفاده از روش مونت کارلو، به راحتی می‌توان قابلیت اطمینان را در زمان‌های مختلف و در سطح اعتماد مطلوب تعیین نمود. اطلاع از میزان قطعیت قابلیت اطمینان محاسبه شده، یک هدف عالی در تمامی مطالعات و تکنیک‌های تحلیل قابلیت اطمینان به حساب می‌آید.

جدول 2-3- نتایج شبیهسازی قابلیت اطمینان با استفاده از روش K-R برای یک مثال مفروض

زمان (t)	قابلیت اطمینان تخمین زده شده	قابلیت اطمینان در محدوده 2/5٪ بالا	قابلیت اطمینان در محدوده 2/5٪ پائین
0	1	1	1
0/1	1	1	1
0/2	0/999	1	0/997
0/3	0/986	0/993	0/979
0/4	0/95	0/964	0/936
0/5	0/886	0/906	0/886
0/6	0/775	0/801	0/749
0/7	0/625	0/665	0/595
0/8	0/445	0/486	0/424

## 2-8- نتیجه‌گیری

در این فصل، مفاهیم پایه مورد استفاده در قابلیت اطمینان معرفی شده و مورد بحث قرار گرفتند. روش و الگوریتم مدلسازی قابلیت اطمینان مورد استفاده در این رساله معرفی و تشریح گردیدند. همچنین، مفاهیم شبیهسازی قابلیت اطمینان و مزایا و معایب روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به تمامی مطالب ارائه شده در این فصل، در این رساله از ترکیب روش K-R و کامات و فرانزمیر برای شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیرر استفاده خواهد شد. در فصل آینده سابقه علمی مهندسی قابلیت اطمینان در مهندسی معدن و مروری بر مطالعات گذشته ارائه خواهد شد.

## فصل سوم

# بررسی سابقه علمی موضوع

قابلیت اطمینان یک شاخص عمومی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های مختلف مهندسی است. به رغم اینکه مفهوم قابلیت اطمینان برای اولین بار در سال 1930 ارائه شده است، اولین کاربردهای جدی مهندسی قابلیت اطمینان به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد. در طی جنگ جهانی دوم، آلمان‌ها برای بهبود شرایط عملیاتی موشک‌های  $V_1$  و  $V_2$  خود از مفاهیم قابلیت اطمینان استفاده کردند. پس از آن تاریخ، قابلیت اطمینان به سرعت در کارهای نظامی و سپس به طور بسیار گسترده‌ای در تمامی شاخه‌های مهندسی از جمله هوافضا، تسلیحات نظامی، صنعت حمل و نقل (قطار، کشتی و...)، تولید و انتقال برق، مخابرات، نیروگاه‌های اتمی و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. در این فصل تحقیقات انجام‌شده در زمینه قابلیت اطمینان سیستمها و ماشینآلات معدنی مورد مطالعه و مرور اجمالی قرار میگیرند.

### 3-2- تحقیقات قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن

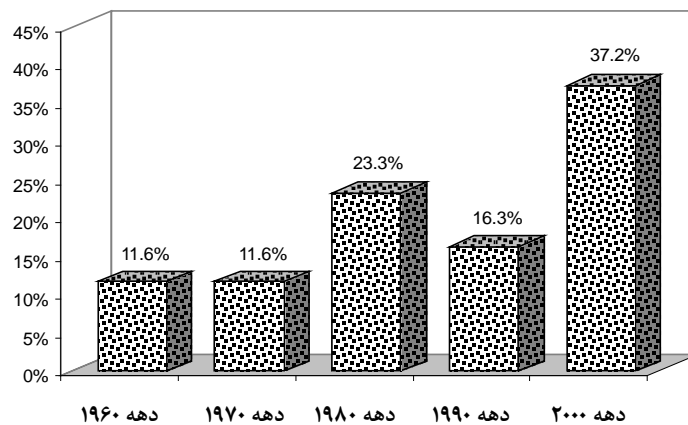
اولین کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن به اواخر دهه 1960 برمی‌گردد. از سال 1966 تاکنون، مطالعه بر روی قابلیت اطمینان سیستم‌های معدنی به طور پیوسته ادامه داشته است. اما حجم این تحقیقات در مقایسه با وسعت و حجم ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی در حد بسیار ناچیز است و میزان استفاده از مفاهیم قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری در مهندسی معدن بسیار کمتر از سایر شاخه‌های مهندسی مثل برق یا هوافضا است. برای آشنایی اولیه و درک بهتر از روند به کارگیری مفهوم قابلیت اطمینان در معدنکاری، لیست تحقیقات شاخص و معتبر انجام شده در جدول 3-1 ارائه شده است. در ادامه این فصل، تحقیقات مهم و تأثیرگذار ذکر شده در جدول مذکور به طور اجمالی مورد مطالعه، طبقه‌بندی و معرفی قرار میگیرند.



تخمین تعداد کارگاههای رزرو در روش جبههکار طولانی بر مبنای قابلیت اطمینان تولید	Levkovich & Chalenko (1966)
سیستمهای الکترومکانیکی در معادن (تهویه و ماشینآلات روباز)	Gimelshein & Nikeshein (1967)
سیستم ترابری اسکاوتور-کامیون	Altshuler (1969)
پمپ آب در معادن	Makhinin (1969)
تجهیزات آتشکاری	Soldatov (1969)
قابلیت اطمینان مکانیکی و عملیاتی نگهدارندههای قدرتی در معادن زغالسنگ	Ivko et al. (1973)
رهنمودهایی برای بررسی قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی	Rubinshtein (1975)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن روباز (شامل: اسکاوتور، کامیون و قطار)	Freidina et al. (1975)
ماشین حفاری	Butorin & Gavrilenko (1976)
سیستم نوار نقاله در معادن روباز عمیق	Bondar & Meruov (1979)
نگهدارندههای قدرتی در معادن زغالسنگ	Haskayne & Farmer (1982)
AFC در کارگاه جبههکار طولانی	Walker (1982)
تجهیزات کارگاه جبههکار طولانی	Mason (1983)
سیستمهای ترابری در معادن زیرزمینی	Singh & Tiwarl (1984)
ارزیابی عملیات تعمیر و نگهداری و تولید معدن بر مبنای قابلیت اطمینان ماشینآلات	Garakavi et al. (1984)
انواع آرایشها و شبکههای مورد استفاده در سیستم تهویه معادن	Petrov & Butorina (1986)
موتور الکتریکی نوار نقاله و سیستم برقی ماشین معدنکار	Shpiganovich & Maslovskaya (1987)
کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن	Kumar & Granholm (1988)
سیستم تولید در معادن روباز	Mukhopadhyay (1988)
راههای فرار از معادن زغالسنگ	Goodman (1988)
سیستمهای برق معدن (ماشین شاتل، موتور ماشین معدنکار پیوسته، سیستم برق تهویه)	Stanek & Venkata (1988)
کتابی در مورد قابلیت اطمینان سیستمهای تولید در معادن	Pavlovic (1989)
ماشین LHD	Kumar (1990)
سیستم انتقال برق LHDها	Kumar et al. (1992)
سیستم هیدرولیک LHDها	Kumar & Klefsjo (1992)
سیستم تولید معدن زیرزمینی	Kumar & Huang (1993)
لاستیک کامیونهای معدنی	Dey et al. (1994)
تجهیزات جبههکار طولانی	Mandal & Banik (1996)
تعمیر و نگهداری LHDها	Vagenas et al. (1997)
شاوول برقی در معادن زغالسنگ روباز	Samanta et al. (2001)
دراگلاین	Townson (2002)
شاوول هیدرولیکی در معادن روباز	Hall & Daneshmend (2003a)
ماشینآلات ترابری در معادن زیرزمینی (LHD و کامیون)	Hall & Daneshmend (2003b)
حفاریهای معدنی زیرزمینی	Vagenas et al. (2003)
سیستم ترمز هیدرولیکی لودرهای معدنی	Ghodrati & Kumar (2005a)
جکهای هیدرولیکی ماشین LHD	Ghodrati & Kumar (2005b)
سیستم تولید معدن زیرزمینی	Kumral (2005)
شیرر در معادن جبههکار طولانی	Gupta et al. (2006)
سیستم نوار نقاله در معادن زیرزمینی	Gupta & Bhattacharya (2007)
کارخانه فرآوری مواد معدنی	Barabady & Kumar (2007, 2008)
شبکههای تهویه معادن زغالسنگ	Dongpeng et al. (2008)
سیستم تولید معدن جبههکار طولانی	Bing-Yuan et al. (2009)
ماشین LHD در معادن با سنگ سخت	Vagenas & Xiangxi (2009)
سیستم تولید در معادن روباز	Sharma et al. (2009)
سیستم تهویه تونلهای در حال ساخت	Jalali & Forouhandeh (2011)
ماشین تمیزکاری و لقیگیری <sup>1</sup> در معادن زیرزمینی	Wijaya et al. (2011)

<sup>1</sup>. Scaling Machine

چنانکه از جدول 1-3 بر میآید، تاکنون طیف وسیعی از ماشینآلات معدنی و سیستمهای تولید در معادن از دیدگاه قابلیت اطمینان و خرابی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتهاند. این مطالعات را میتوان از دیدگاههای مختلف طبقه‌بندی نمود. بررسی اولیه نشان میدهد (شکل 1-3) که در دو دهه اول ورود مفاهیم قابلیت اطمینان به مهندسی معدن، فراوانی مطالعات کم بوده و این دو دهه را میتوان مرحله آشنایی جامعه معدنی با مفاهیم قابلیت اطمینان دانست. در دهه 1980 مطالعات سرعت بیشتری به خود گرفته و در طی این دهه به اندازه کل دو دهه قبل تحقیقات شاخص گزارش شده است. دهه 1980 و به ویژه 1990 را میتوان دهه ثبات و نیز گسترش مدلسازیهای آماری دانست. پس از سال 2000 با افزایش رویکرد جهانی به ماشینآلات و مهندسی قابلیت اطمینان، مهندسی معدن نیز با رویکرد قویتری نسبت به چهار دهه گذشته روبه‌رو گردید. در مجموع میتوان دهه 80 و دهه 2000 را فعالترین سالهای تحقیقاتی در این زمینه دانست.



شکل 1-3- فراوانی مطالعات قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن

نتایج بررسی نشان میدهد که 5/60٪ مطالعات گذشته، بر روی تجهیزات و سیستمهای تولید در معادن زیرزمینی انجام شده است. در این میان 2/23٪ از کل مطالعات انجام شده به روش جبهه‌کار طولانی مربوط میشود. سیستم تولید پیوسته، شرایط کاری سخت و مکانیزاسون بالا از جمله دلایل تمایز این روش نسبت به روشهای معدنکاری و حجم بالای مطالعات میباشد.

در این رساله به منظور دستیابی به کیفیت مطالعات گذشته و الهامگیری از آنها، منابع مورد اشاره در جدول 3-1 مورد مطالعه دقیق قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعات و بررسیها نشانگر روندی خاص در محتوای علمی این مقالات میباشد. مقالات مربوط به دهه‌های 1960 و 1970 میلادی با توجه به ناآشنا بودن جامعه مهندسی معدن با مفاهیم قابلیت اطمینان، عمدتاً مقالاتی کوتاه، مفهومی و کلی میباشند که به دلیل فقدان نرمافزارهای آماری پیشرفته و نیز سیستمهای جمعآوری داده قوی از محتوای آماری و مدلسازی ضعیفی برخوردارند. تا اواسط دهه 1980، این روند کمابیش ادامه یافته ولی از آن تاریخ به بعد توجه جدیتری به این موضوع معطوف شده و تحولی اساسی در کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن رخ داده است. از اواخر دهه 1980 تحقیقات قابلیت اطمینان وارد مرحله پیشرفتهتری گردیده و مفاهیم آمار کاربردی با قدرت بیشتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از دلایل مهم این موضوع میتوان به افزایش تقاضای بینالمللی برای مواد معدنی، افزایش قیمت ماشینآلات و هزینههای عملیاتی و پیچیدهتر شدن تجهیزات معدنی اشاره نمود. لذا، در این تحقیق فقط گزارشهای علمی مربوط به سه دهه اخیر که بر روی ماشینآلات پیشرفتهتر انجام شده‌اند مورد بحث تفصیلی قرار خواهند گرفت.

کومار و گرانهولم<sup>1</sup> (Kumar & Granholm, 1988) برای اولین بار در سال 1988 به طور جدی مفاهیم پایه، روشهای تحلیل قابلیت اطمینان و کاربردهای آنها را در مهندسی معدن به طور عمومی مطرح نمودند. پس آن کومار و همکارانش طی پنج سال با انتشار مقالات کاربردی در این حوزه، کاربرد قابلیت اطمینان را در ماشینآلات معدنی گسترش دادند. یک سال بعد، پاولویچ<sup>2</sup> اولین کتاب در زمینه قابلیت اطمینان سیستمهای معدنی را در سال 1989 به چاپ رسانید (Pavlovic, 1989). در این کتاب مفاهیم و تئوریهای اصلی قابلیت اطمینان و ارتباط و کاربردهای آن را با سیستمها و ماشینآلات معدنی به صورت بسیار مدون و سازمانیافته ارائه شده است. از ویژگیهای بارز این کتاب میتوان مبنای بسیار قوی ریاضی و دیدگاه کاملاً محاسباتی و مدلسازی را برشمرد.

<sup>1</sup>. Kumar & Granholm

<sup>2</sup>. Pavlovic

موخوپادای (Mukhopadhyay, 1988)، برای اولین بار مجموعه عملیات استخراج در معادن روباز را به عنوان یک سیستم در نظر گرفت. وی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان، معادن روباز را از نظر تولید به دو دسته کلی: الف) معادن با یک محل استخراج و ب) معادن با محل‌های استخراج متعدد تقسیم‌بندی نمود و برای هر محل استخراج، چهار زیرسیستم به شرح زیر پیشنهاد کرد:

الف) زیرسیستم بارگیری (قابلیت اطمینان شاول)

ب) زیرسیستم باربری (قابلیت اطمینان کامیون)

ج) محل استخراج (قابلیت اطمینان سینه‌کار)

د) مقصد بار (دمپ باطله یا کارخانه فرآوری)

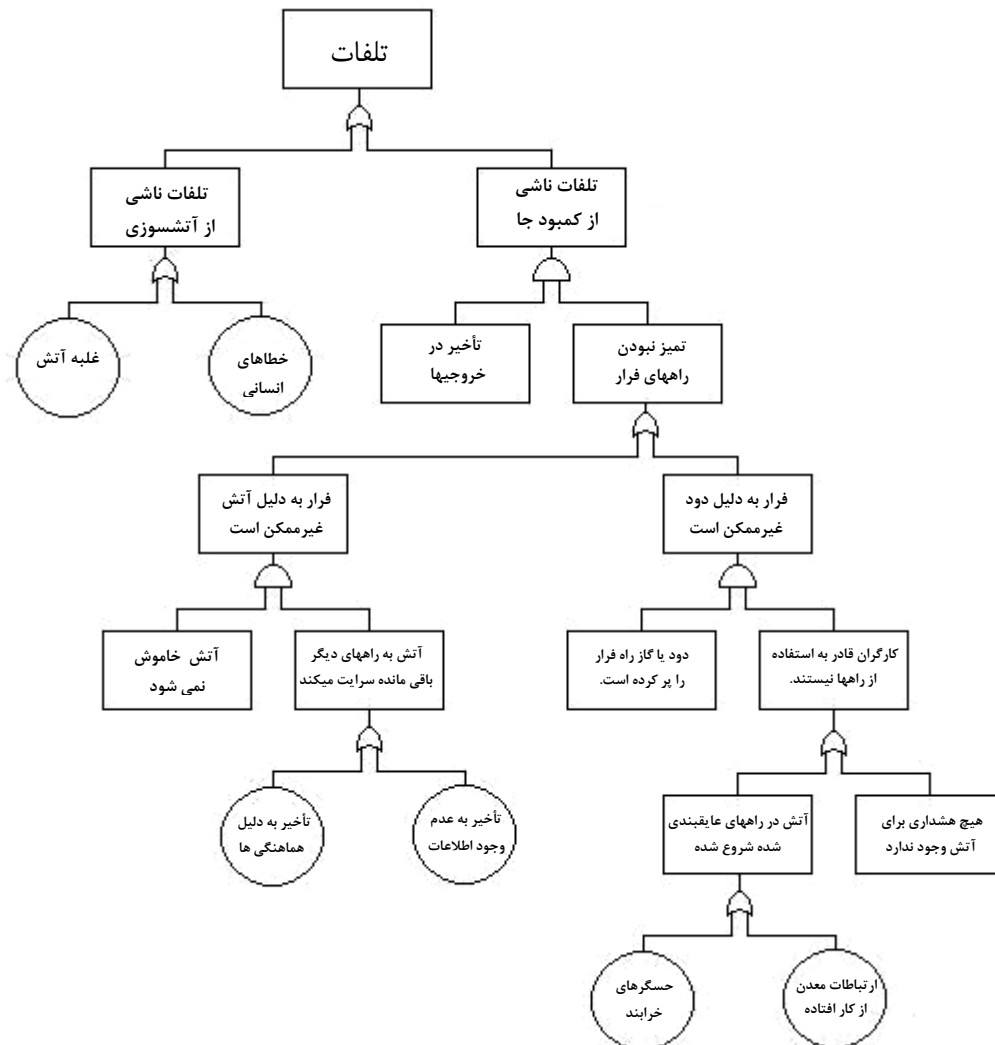
اگر معدن تنها از یک محل استخراج شود، کلیه زیرسیستم‌های فوق به صورت سری عمل می‌کنند و در صورت خرابی هر کدام از بخش‌های بالا، تولید معدن متوقف خواهد شد. اما اگر معدن نقاط استخراج متعدد داشته باشد (چندین شاول در معدن باشند)، سیستم استخراج معدن موازی در نظر گرفته می‌شود. وی با در نظر گرفتن نرخ خرابی ثابت برای کلیه زیرسیستم‌های فوق، قابلیت اطمینان و میانگین زمان بین خرابی‌های معدن را در دو حالت ذکر شده محاسبه نمود.

گودمن<sup>1</sup> در سال 1988، با توجه به حساسیت صنایع و دولت آمریکا نسبت به آتش‌سوزی‌ها و انفجارات مرگبار در معادن زغالسنگ آمریکا، قابلیت اطمینان راه‌های فرار در معادن اتاق و پایه آمریکا را با استفاده از روش آنالیز درخت خطا مورد تحلیل قرار داد (Goodman, 1988). وی با استفاده از درخت پیشنهادی خویش، دلایل و عوامل کاهش ایمنی در معادن زغالسنگ آمریکا را ارائه کرد. درخت خطای پیشنهادی گودمن به صورت شکل 3-2 می‌باشد.

استانک و ونکاتا<sup>2</sup>، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در طی 10 سال در 4 معدن زغالسنگ آمریکا، قابلیت اطمینان سیستم‌های برق دستگاه‌های برقی مختلف موجود در معادن را مورد تحلیل و

<sup>1</sup>. Goodman

<sup>2</sup>. Stanek & Venkata



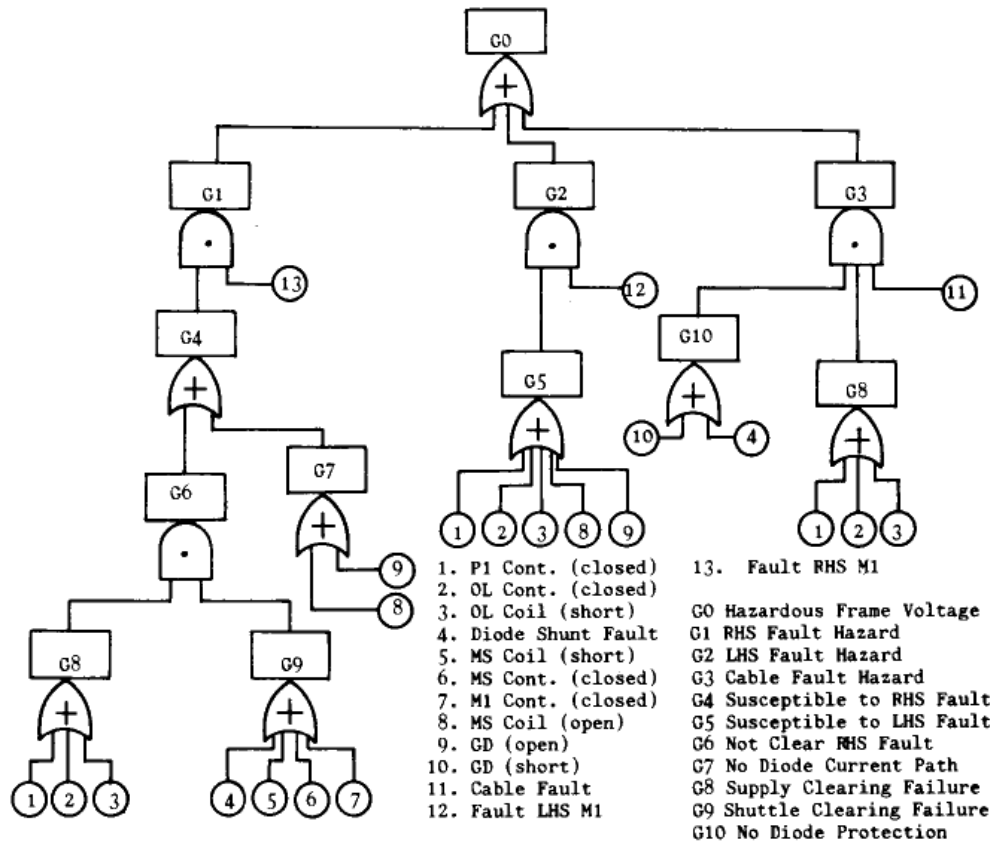
شکل 3-2- نمودار درخت خطا جهت تحلیل قابلیت اطمینان راههای فرار معدن (Goodman, 1988)

ارزیابی قرار دادند. ایشان در طی این تحقیق، نرخ خرابی 22 بخش یا قطعه برقی مختلف از جمله موتور دستگاه‌های نصب بولت، موتور ماشین شاتل<sup>1</sup>، موتور ماشین معدنکار پیوسته<sup>2</sup>، اجزای برقی سیستم قطع یا وصل تهویه و غیره را با استفاده از روش‌های آماری تعیین نمودند (Stanek & Venkata, 1988). در مرحله دیگر تحقیق با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، احتمال به وجود آمدن ولتاژ خطرناک در سیستم‌های معدنی را به دست آوردند. درخت نشان داده شده در شکل 3-3، که برای تعیین احتمال به وجود آمدن ولتاژ خطرناک در ماشین شاتل تشکیل شده، نمونه ای از درخت‌های تشکیل شده در طی این تحقیق است. آنها همچنین مطالعه خویش را به تعداد محدودی

<sup>1</sup>. Shuttle car

<sup>2</sup>. Continuous miner

معدن غیرزغالی گسترش داده و با استفاده از تحلیل‌های اشاره شده در فوق، اعلام کردند که بحرانی‌ترین بخش برقی ماشین‌آلات معدنی، کابل اتصال به زمین آنها است.

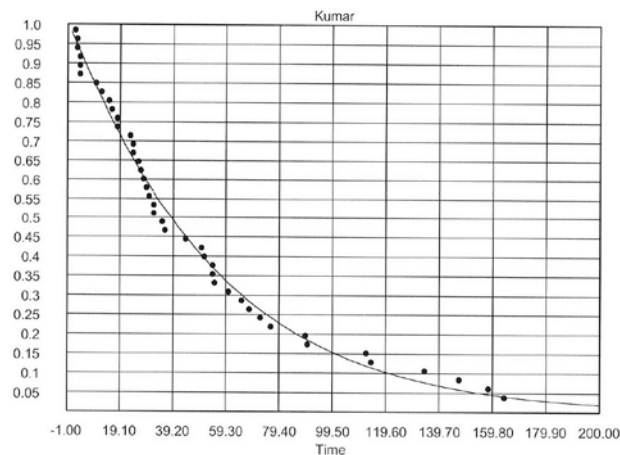


شکل 3-3- نمودار درخت خطا برای تعیین احتمال ایجاد ولتاژ خطرناک در ماشین شاتل (Stanek & Venkata, 1988)

کومار در سال‌های 1989 و 1990، به ترتیب در یک مقاله و نیز رساله دکتری خویش، نتایج مطالعات خود را بر روی تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان دستگاه LHD<sup>1</sup> در معادن ارائه نمود (Kumar & Gronholm, 1989; Kumar, 1990). در این تحقیق، داده‌های مربوط به خرابی‌های شش دستگاه LHD دیزلی در معدن سنگ آهن کایرونا<sup>2</sup> مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند. برای مدل‌سازی، دستگاه LHD به چهار زیرسیستم شامل: (1) موتور، (2) سیستم هیدرولیک، (3) سیستم ترمز و (4) سیستم حرکت که به صورت سری با هم در نظر گرفته شده‌اند، تقسیم شده است. با استفاده از داده‌های خرابی، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از این زیرسیستم‌ها تعیین شده و در

<sup>1</sup>. Load-Haul-Dump  
<sup>2</sup>. Kiruna

نهایت قابلیت اطمینان کل دستگاه و تدابیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای لودرهای معدنی پیشنهاد شده است. منحنی قابلیت اطمینان LHD ارائه شده توسط کومار در شکل 3-4 ارائه شده است.



شکل 3-4- منحنی قابلیت اطمینان LHD (Kumar, 1990)

در سال 1992، کومار و همکارانش قابلیت اطمینان و نرخ خرابی کابل لودرهای برقی را مورد ارزیابی قرار داده و تابع نرخ خرابی این کابل‌ها را ارائه نمودند (Kumar et al., 1992).

کومار و کلفسجو<sup>1</sup> در ادامه تحقیقات سال‌های گذشته خویش، مدل قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک LHDهای معدنی را در سال 1992 ارائه نمودند (Kumar & Klefsjo, 1992). برای مدل‌سازی این بخش از دستگاه، تمامی مراحل آزمایش داده‌ها به طور مناسبی انجام شده و در نهایت از روش مدل‌سازی تصادفی برای تعیین توزیع خرابی‌ها و ارائه مدل استفاده شده است.

در سال 1993 کومار و هوانگ<sup>2</sup>، قابلیت اطمینان سیستم تولید یک معدن زیرزمینی را مورد تحلیل قرار دادند (Kumar & Huang, 1993). در این تحقیق معدن کایرونا سوئد که به روش تخریب در طبقات فرعی<sup>3</sup> استخراج می‌شود به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. برای تحلیل قابلیت اطمینان تولید در معدن، عملیات استخراج شامل دو زیرسیستم اصلی به شرح زیر تعریف شده است:

<sup>1</sup>. Klefsjo

<sup>2</sup>. Huang

<sup>3</sup>. Sublevel Caving

الف) دسترسی به ماده معدنی خرد شده شامل: مشکلات سقف، نیرو و تهویه، پایداری چال‌های

انفجاری و میزان سنگ تولید شده (نسبت به توان تولید لودرهای معدن)

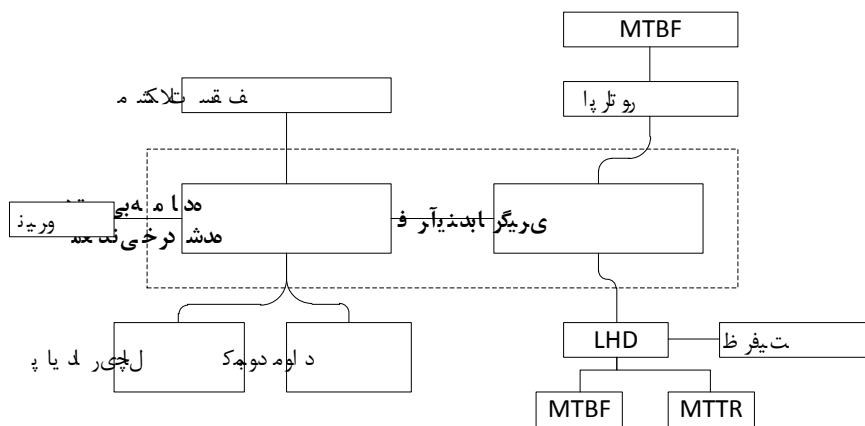
ب) فرآیند بارگیری شامل: اپراتور و LHD

شکل 3-5 ساختار کلی سیستم تولید در معدن کایرونا را نشان می‌دهد. نتیجه کلی تحلیل‌های انجام

شده در این تحقیق نشان داد که از دیدگاه قابلیت اطمینان، LHDها بحرانی‌ترین زیرسیستم معدن

مورد مطالعه بوده و بیشترین نقش را در قابلیت اطمینان و تولید معدن دارند. همچنین میزان قابلیت

دسترسی کل سیستم 76٪ به دست آمد.



شکل 3-5- ساختار کلی سیستم تولید در معدن کایرونا و زیرسیستم‌های مربوطه (Kumar & Huang, 1993)

دی<sup>1</sup> و همکارانش در سال 1994 قابلیت اطمینان لاستیک کامیون‌های معدنی را مورد مطالعه قرار دادند (Dey et al., 1994). نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تابع چگالی خرابی لاستیکها از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و لذا میزان ثابتی نیست. در این مطالعه تأکید شده است که کم‌باد بودن، پرباد بودن، فشرده شدن لاستیک، گرم شدن، سرعت و طول مسیر باربری پارامترهایی هستند که عمر مفید لاستیک کامیون‌های معدنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایشان اعلام کردند سرعت بیش از 30 کیلومتر بر ساعت و مسافت حمل بیش از 5 کیلومتر، قابلیت اطمینان و عمر مفید لاستیک را کاهش می‌دهد.

<sup>1</sup>. Dey



در سال 1996 مندل و بانیک<sup>1</sup> میزان تولید از دست‌رفته (ریسک تولید) و نیز قابلیت دسترسی کارگاه‌های استخراج و نیز ماشین‌آلات موجود در شش کارگاه واقع در چهار معدن جبهه کار طولانی کشور هند را مورد تحلیل و مطالعه قرار دادند (Mandal & Banic, 1996). در این بررسی، شیرر، ناو زنجیری، بارگیر مرحله‌ای<sup>2</sup>، نوارنقاله‌ها، شرایط زمین‌شناسی و نیز نگهداری قدرتی به عنوان زیرسیستم‌های اصلی کارگاه‌های استخراج در نظر گرفته شدند. این محققان با انجام مطالعات آماری، احتمال توقف تولید مربوط به هر یک از ماشین‌آلات مذکور را محاسبه نمودند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در سه کارگاه از شش کارگاه مورد مطالعه، شیرر، بیشترین میزان تأخیر را در تولید ایجاد نموده و در سه کارگاه دیگر ناو زنجیری بحرانی‌ترین زیرسیستم از نظر تأخیر در تولید بوده است. در این تحقیق، گرچه مطالعه بسیار خوبی بر روی آمار خرابی و تأخیرهای به وجود آمده انجام شده است، با این حال هیچگونه مدل قابلیت اطمینان برای دستگاه‌های مورد اشاره ارائه نشده است.

واگناس و همکارانش (Vagenas et al., 1997) ضمن انجام مروری جامع بر روشهای جمع‌آوری داده‌های خرابی از ماشین‌آلات معدنی، انواع روشهای مدلسازی قابلیت اطمینان و ارزیابی عملکرد ماشین‌آلات معدنی را بررسی نموده و این روشها را بر روی تعدادی از LHDهای معادن زیرزمینی (سنگ سخت) مورد استفاده قرار داده و نتایج روشهای مختلف را با یکدیگر مقایسه نمودند.

سامانتا<sup>3</sup> و همکارانش (Samanta et al., 2001) با تأکید بر اهمیت شاول در عملیات استخراج معادن روباز، خرابی‌ها و عوامل توقف تولید مربوط به شاول را با استفاده از روش درخت خطا تحلیل نمودند. درخت خطای تشکیل شده در طی این تحقیق به صورت شکل 3-6 می‌باشد. طبق این مطالعه، شاول به شش زیرسیستم شامل: موتور، جام بارگیری، سیستم حرکت، هیدرولیک، کابل‌ها، بدنه و کابین اپراتور تقسیم شده است. خرابی هر یک از این بخش‌ها باعث توقف تولید شاول می‌شود. طبق درخت نشان داده شده، خرابی موتور می‌تواند ناشی از خرابی بخش‌های ساکن و یا قطعات متحرک شاول

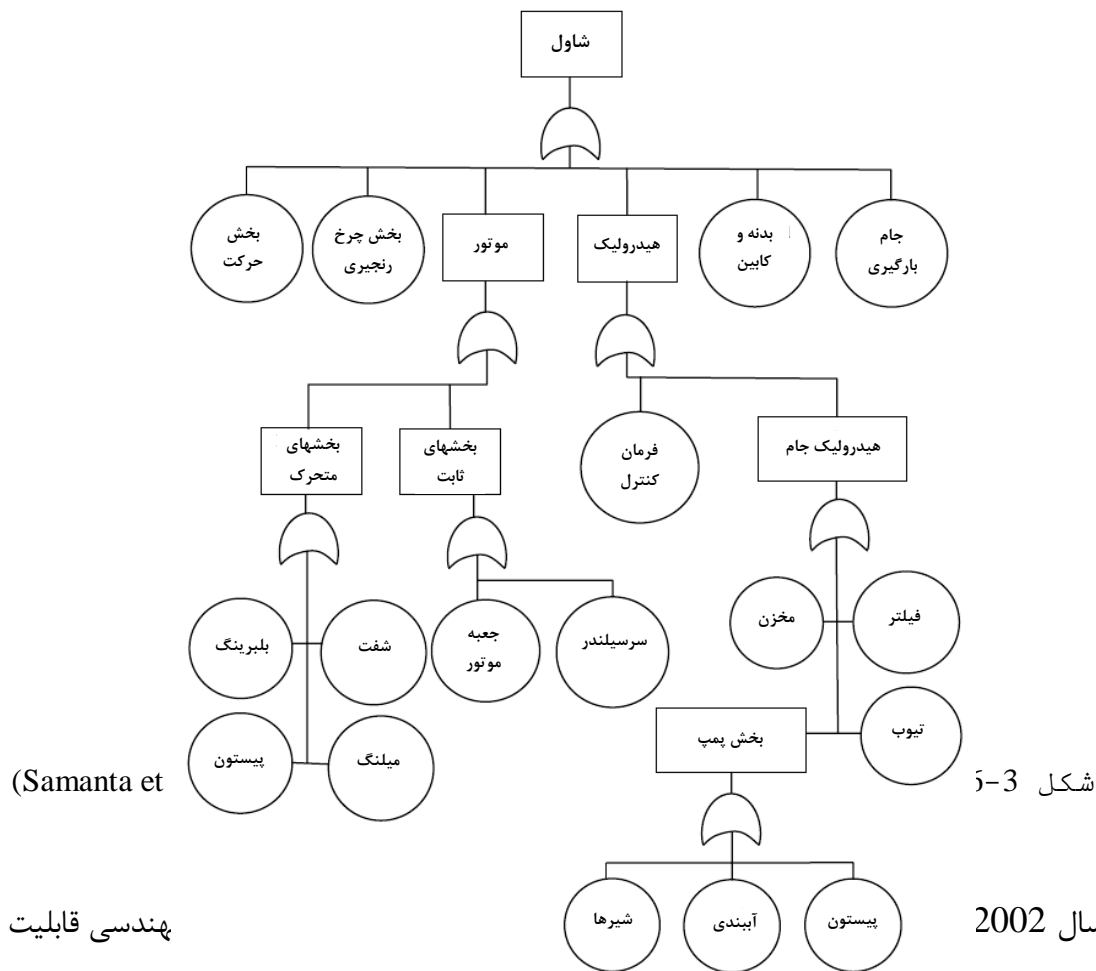
---

<sup>1</sup>. Mandal & Banic

<sup>2</sup>. Stage Loader

<sup>3</sup>. Samanta

باشد. با ادامه روند تجزیه ماشین، عوامل انتهایی شاخه ها که با علامت‌های دایره در شکل 3-6 نشان داده شده‌اند، بروز می‌نمایند. وقوع هر کدام از این عوامل باعث وقوع خرابی در کار شاول می‌شود. سامانتا و همکارانش در یکی از معادن زغالسنگ هند، احتمال بروز هر یک از عوامل خرابی را تعیین کرده و در نتیجه احتمال خرابی در شاول را که به عنوان رخداد بالا در درخت ارائه شده است را تعیین نمودند.



پهندسی قابلیت

اطمینان در مهندسی معدن ارائه نمود (Tawson, 2002). وی در این تحقیق، میزان بارگیری عملیاتی در آگلاین را در یکی از معادن استرالیا از دیدگاه قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری بهینه‌سازی نمود. تاوسون در این تحقیق تأکید کرده است که گرچه با افزایش توان و نیروی عملیاتی دستگاه، تولید افزایش می‌یابد، اما در حین حال وارد آوردن فشار به دستگاه باعث افزایش خرابی و در نتیجه افزایش

نیاز به تعمیر و نگهداری می‌شود. لذا توان عملیاتی دستگاه باید در یک حد بهینه هم از نظر تولید و هم از نظر تعمیر و نگهداری متعادل باشد. برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری، تاوسون دراگلاین را به 25 زیرسیستم مختلف تقسیم‌بندی نموده و جمع‌آوری داده‌های مدل را با استفاده از این ساختار انجام داد.

هال و دانشمند<sup>1</sup> در سال 2003 با انجام دو تحقیق مجزا در معادن روباز و زیرزمینی آمریکا و شیلی، تحقیقات در زمینه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی در سال‌های اخیر را مجدداً به سمت مدل‌سازی سوق دادند (Hall & Daneshmend, 2003a, 200b). در اولین تحقیق که در معادن روباز آمریکا انجام شده است، ایشان منابع و روش‌های جمع‌آوری داده‌های مربوط به ماشین‌آلات معدنی و منابع اطلاعاتی ممکن را به شرح زیر پیشنهاد نموده‌اند (Hall & Daneshmend, 2003a):

- حسگرهای<sup>2</sup> نصب شده روی دستگاه‌ها

- اطلاعات ثبت شده توسط اپراتور

- سیستم‌های گسیل<sup>3</sup> ناوگان ترابری

- گزارش‌های تولید

- گزارش‌های واحد تعمیر و نگهداری

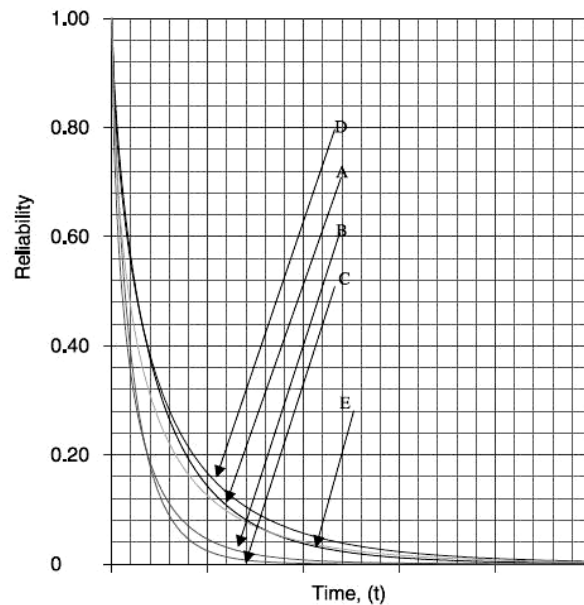
در ادامه تحقیق با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف مورد اشاره در یکی از معادن آمریکا، مدل قابلیت اطمینان برای پنج دستگاه شاول هیدرولیکی فعال در آن معدن ارائه گردید. شکل 3-7، نمودارهای قابلیت اطمینان حاصل از این مدل‌ها را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده بر روی شاول‌های مذکور نشان داد که تابع چگالی خرابی شاول‌ها همگی از نوع وایبول بوده و تنها پارامترهای مقیاس ( $\theta$ ) و پارامتر شکل ( $\beta$ ) توزیع‌ها تفاوت دارند. همچنین تابع چگالی زمان‌های از دست رفته و توقف‌های تولید مربوط به همه دستگاه‌ها از نوع لاگ‌نرمال با میانگین و واریانس های

<sup>1</sup>. Hall & Daneshmend

<sup>2</sup>. Sensors

<sup>3</sup>. Dispatching Systems

مختلف بودند.

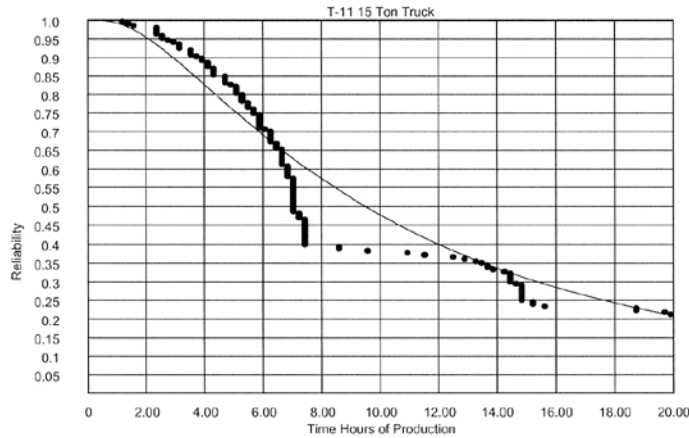


شکل 3-7- نمودارهای قابلیت اطمینان برای پنج شاول هیدرولیکی مختلف مورد مطالعه (Hall & Daneshmend, 2003a)

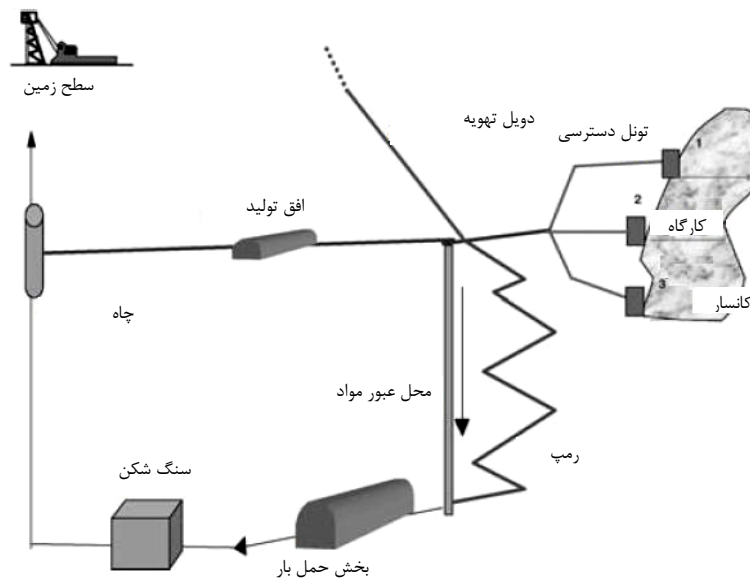
در دومین تحقیق، هال و دانشمند قابلیت اطمینان ماشین آلات سیار موجود در یک معدن زیرزمینی در کشور شیلی را مدل سازی نمودند (Hall & Daneshmend, 2003b). برای این منظور از داده‌های تعمیر و نگهداری 15 ماه معدن استفاده شد. معدن مورد نظر دارای چهار خاک انداز<sup>1</sup> و 11 کامیون بوده است. در تحلیل‌های آماری برای کامیون‌ها سه زیرسیستم: موتور، بخش‌های حرکتی و هیدرولیک در نظر گرفته شده و بهترین توزیع مرتبط با هر کدام به دست آمده است. در نهایت با در نظر گرفتن شبکه سری بین کلیه اجزاء، مدل قابلیت اطمینان برای هر کامیون ارائه شده است (شکل 3-8). واگناس و همکارانش در سال 2003، تحقیق در خور توجهی برای تعیین قابلیت اطمینان تولید در معادن زیرزمینی با تکیه بر مسائل و مشکلات زمین‌شناسی انجام دادند (Vagenas et al., 2003). در این مورد، کلیه سازه‌های ایجاد شده در زیر زمین شامل کارگاه‌ها، تونل‌ها، چاه‌ها و دوپل‌ها از نظر مشکلات زمین‌شناسی و مکانیکسنگی مورد مطالعه قرار گرفته و توزیع حوادث زمین‌شناسی منجر به توقف تولید در این فضاها تعیین شده است. با تعیین قابلیت اطمینان هر کدام از زیرسیستم های

<sup>1</sup>. Scoop

مذکور، قابلیت اطمینان تولید کل معدن تعیین شده است. شکل 3-9 تمامی اجزا و زیرسیستم‌های مورد نظر در تحقیق مذکور را نشان می‌دهد.



شکل 3-8- نمودارهای قابلیت اطمینان کامیون زیرزمینی (Hall & Daneshmend, 2003b)



شکل 3-9- زیرسیستم‌های تولید یک معدن زیرزمینی (Vagenas et al., 2003)

در سال 2005، کومرال<sup>1</sup> با تکیه بر مفهوم قابلیت اطمینان، سیستم تولید یک معدن زیرزمینی را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرد (Kumral, 2005). وی برای این منظور، عملیات استخراج در معادن زیرزمینی را شامل پنج زیرسیستم: حفاری، آشکاری، بارگیری، باربری و تهویه در نظر گرفت. سپس با استفاده از آمار خرابی‌ها و توقف‌های سالانه زیرسیستم‌های فوق، قابلیت اطمینان

<sup>1</sup>. Kumral

آن‌ها را تعیین نمود. در ادامه برای دسترسی به کمترین هزینه استخراج با بیشترین قابلیت اطمینان تولید، معادله هدف بهینه‌سازی را تشکیل داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسأله مذکور را حل نمود. نتایج تحقیق کومرال نشان داد که در بهترین حالت، قابلیت اطمینان حفاری 0/89، آتشکاری 0/87، بارگیری 0/89، باربری 0/96 و تهویه 0/95 است.

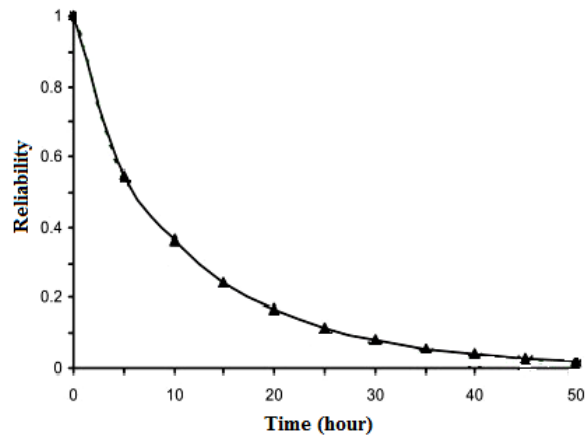
طی تحقیق دیگری در سال 2005، قدرتی رساله دکتری خویش را با موضوع تأثیر شرایط محیطی بر میزان لوازم یدکی مورد نیاز ماشینآلات ارائه نمود (Ghodrati, 2005). وی برای اولین بار در مهندسی معدن، با استفاده از روش "مدل خطر متناسب"<sup>1</sup> تأثیر پارامترهای محیطی همچون دما و رطوبت را بر قابلیت اطمینان و نیز تعداد قطعات یدکی مورد نیاز را مطالعه نمود. مطالعات موردی این تحقیق بر روی جکهای هیدرولیکی LHDها و سیستم ترمز لودرهای معدنی انجام شده (Ghodrati & Kumar, 2005a, 2005b) است.

گوپتا و بهاتاچاریا (Gupta & Bhattacharya, 2007) در تحقیق دیگری در مورد ماشینآلات موجود در سیستم معدنکاری جبهه‌کار طولانی، قابلیت اطمینان ناو زنجیری (AFC) را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان در این تحقیق روش تحلیل درخت خطا را مورد استفاده قرار داده و تمامی دلایل عمده خرابی AFC را مورد مطالعه قرار دادند و منحنی قابلیت اطمینان این دستگاه را ارائه نمودند. هدف اصلی این تحقیق را میتوان کشف نقاط ضعف عمده و ارائه راهکار مناسب برای کاهش عوارض خرابیها دانست. منحنی قابلیت اطمینان ارائه شده و درخت خطای تشکیل شده در این تحقیق به ترتیب در شکل 3-10 و 3-11 نشان داده شده‌اند.

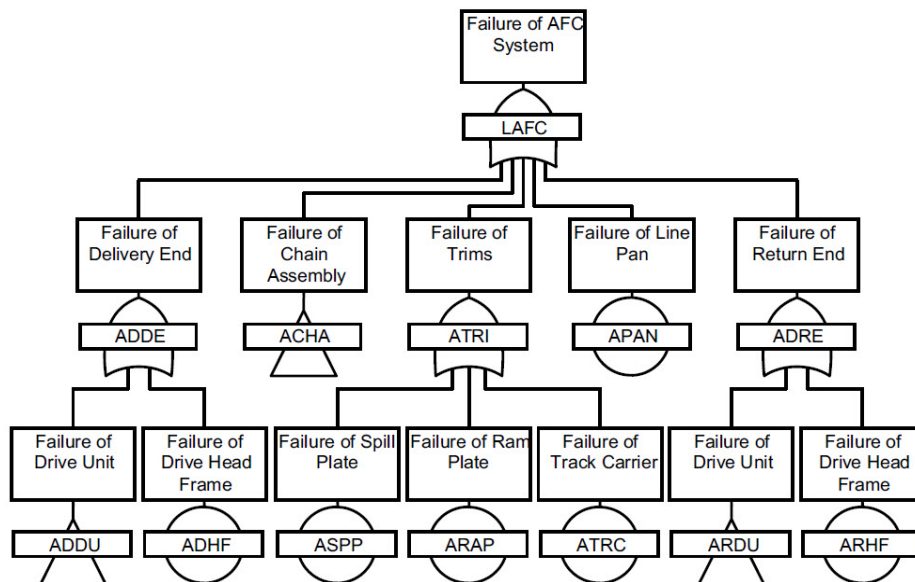
در سال 2008، برآبادی و کومار<sup>2</sup> طی یک سری تحقیقات بر روی قابلیت اطمینان تولید در کارخانه فرآوری بوکسیت جاجرم، به نتایج بسیار خوبی در ارائه مدل‌های قابلیت اطمینان برای بخش‌های

<sup>1</sup>. Proportional Hazard Model

<sup>2</sup>. Barabady & Kumar



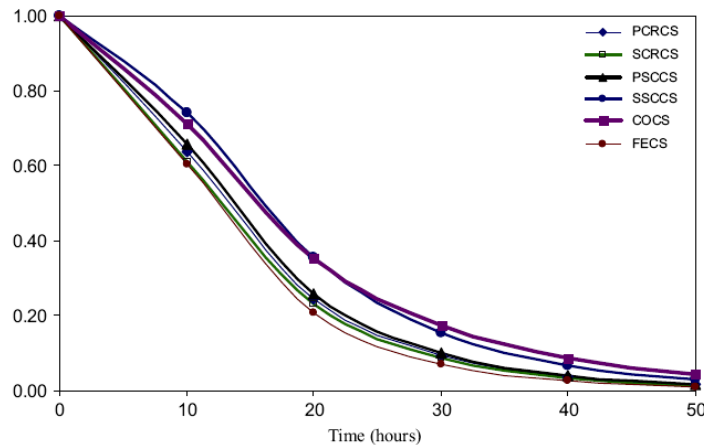
شکل 3-10 - منحنی قابلیت اطمینان AFC (Gupta & Bhattacharya, 2007)



شکل 3-11 - درخت خطای AFC (Gupta & Bhattacharya, 2007)

مختلف کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی دست یافتند (Barabady, 2007; Barabady & Kumar, 2008). آنها در تحقیقات خود شش زیرسیستم اصلی شامل: سیستم خوراک‌دهنده (FECS)، نوار نقاله (COCS)، سنگ‌شکن اولیه (PCRCS)، سنگ‌شکن ثانویه (SCRCS)، سردن اولیه (PSCCS) و سردن ثانویه (SSCCS) را برای کارخانه مورد مطالعه در نظر گرفتند. برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان هر یک از این زیرسیستم‌ها از اطلاعات خرابی ثبت شده در معدن استفاده شده و بهترین توزیع‌های چگالی احتمال بر روی داده‌ها تعیین شدند. برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سرندها از روش‌های پواسون غیرهمگن و برای چهار زیرسیستم دیگر از آمار کلاسیک استفاده شده است. پس از تعیین

مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، با در نظر گرفتن شبکه قابلیت اطمینان سری، مدل قابلیت اطمینان کل کارخانه تعیین شده است. نتایج کلی این تحقیق به صورت شکل 3-12 می‌باشد. در پایان با استفاده نتایج حاصله، برآبادی و کومار بهترین زمان‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را در سطوح مختلف قابلیت اطمینان ارائه دادند.



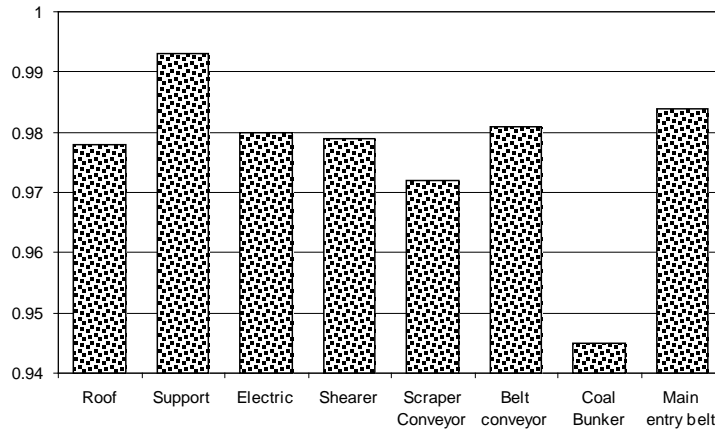
شکل 3-12- تغییرات شاخص اهمیت قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های کارخانه فرآوری بوکسیت جاجرم (Barabady & Kumar, 2008)

تحقیق دیگری که در سال 2008 به چاپ رسیده است، مربوط به تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه در معادن است (Dongpeng et al., 2008). دنق پنگ و همکارانش، شبکه تهویه معادن زغالسنگ را به صورت یک گراف نشان داده و با تعیین احتمال ایمن بودن مسیرها و گذرگاه‌های موجود در معدن، میزان قابلیت اطمینان کل شبکه و احتمال ایمن بودن معدن از نظر هوای پاک برای کارکنان را تعیین کردند. در این تحقیق گرچه از مفهوم قابلیت اطمینان استفاده شده است اما از روش‌های معمول و تکنیک‌های عمومی قابلیت اطمینان در آن استفاده نشده است.

بینگ-یوان و همکارانش طی تحقیقی در یکی از معادن جبهه‌کار طولانی چین، قابلیت اطمینان سیستم تولید در این نوع معادن را مورد ارزیابی قرار دادند (Bing-yuan et al., 2009). ایشان با مطالعه نرخ خرابیهای ماشینآلات، میزان زغال در حال عبور از دستگاههای مختلف و نیز خروجی کل سیستم، راهکارهایی را برای بهبود قابلیت تولید معدن ارائه دادند. مطالعات قابلیت اطمینان در این معدن منجر به تخمین قابلیت دسترسی اجزای تولید در جبهه‌کار طولانی به شرح شکل 3-13



گردید. نتایج این تحقیق نشان میدهد که نگهدارندههای قدرتی بیشترین و بونکر ذخیره زغال کمترین قابلیت دسترسی را دارند.



شکل 3-13- قابلیت دسترسی اجزای سیستم تولید در معادن جبههکار طولانی (Bing-yuan et al., 2009)

آخرین تحقیق در مورد قابلیت اطمینان LHDها در سال 2009 توسط واگناس و زیانگری گزارش شده است (Vagenas & Xiangxi, 2009). ایشان در این تحقیق ناوگانی متشکل از 13 ماشین LHD را در یک معدن سنگ سخت در کانادا مورد مطالعه قرار دادند. طی این تحقیق مشکلات تعمیر و نگهداری و دلایل توقفهای این ماشینآلات مورد بحث قرار گرفتند. در تحقیق دیگری در سال 2009، شارما و همکارانش (Sharma et al., 2009) قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن روباز را مورد مطالعه قرار داده و برآوردی آماری از هزینههای صرف شده برای تعمیر و نگهداری در یک معدن روباز ارائه نمودند. ایشان با مطالعه تأخیرها پیشآمده شاول، سنگشکن، آتشکاری و غیره، اعلام کردند که هزینه متوسط برای تعمیر و نگهداری ماشینآلات مورد مطالعه 6/12 میلیون دلار در سال است.

جلالی و فروهنده، در سال 2011 برای اولین بار در زمینه قابلیت اطمینان سیستمهای موجود در معدن، روش مارکوف را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تهویه تونلهای در حال ساخت به کار بردند (Jalali & Forouhandeh, 2011). ایشان با محاسبه نرخ خرابی و نرخ تعمیر فنهای به کار رفته در یک تونل در ایران و با مدلسازی تصادفی حالات کار و خرابی فنها و نیز جایگزینی فن در

حال انتظار<sup>۱</sup> به جای فن خراب، احتمال خرابی سیستم را تعیین نمودند. به استناد این گزارش، در 358 روز از سال نشانهای از خرابی در سیستم مشاهده نشد.

در آخرین تحقیقی که در زمینه قابلیت اطمینان ماشینهای معدنی به چاپ رسیده است، ویجایا و همکاران (Wijaya et al., 2011)، خرابیهای دستگاه لگگیر<sup>۲</sup> را در معادن زیرزمینی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق 11 زیرسیستم شامل: موتور، سیستم روانکاری مرکزی، حرکت، کابین، سیستم برق، سیلندرهای هیدرولیکی، شیلنگهای هیدرولیک، بازو، سیستم آب، چکش هیدرولیکی و شاسی برای این دستگاه تعریف شدهاند. با تحلیل دادههای خرابی مربوط به هر زیرسیستم و با استفاده از روش جک-نايف<sup>۳</sup> خرابیها و توقفهای تمامی زیر سیستمهای دستگاه مطالعه گردیده و بحرانیترین زیرسیستمهای دستگاه معرفی گردیدهاند. نتایج این تحقیق نشان میدهد که سیستم مرکزی روانکاری، چکش هیدرولیکی و بازوی دستگاه به ترتیب دارای بیشترین مدت زمان خرابی و توقف (بیشتر از 100 ساعت) بودهاند.

### 3-3- مطالعات پیشین در مورد قابلیت اطمینان درام شیرر

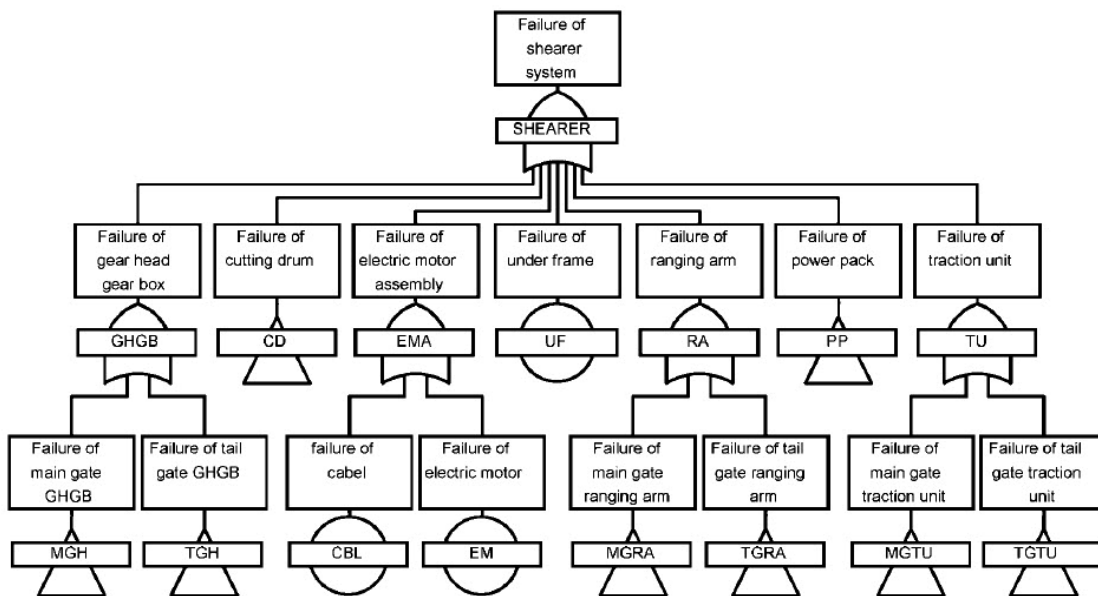
در میان تحقیقات انجام شده که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند، سه تحقیق به بررسی قابلیت اطمینان شیرر پرداختهاند. در دو تحقیقی که توسط مندل و بانیک (Mandal & Banik, 1996) و بینگ-یوان و همکاران (Bing-Yuan et al., 2009) انجام شدهاند، دستگاه شیرر در کنار سایر تجهیزات موجود در کارگاه جبههکار طولانی مورد مطالعه قرار گرفته و تنها قابلیت اطمینان کلی دستگاه به صورت یک عدد به طور میانگین ارائه شده است. در هر دو این تحقیقها، بر اهمیت شیرر به عنوان یک زیرسیستم بحرانی در کارگاه استخراج تأکید جدی شده است. اما، تنها یک مقاله به طور مستقیم به بررسی قابلیت اطمینان دستگاه شیرر پرداخته است. در سال 2006، گوپتا و همکارانش طی یک تحقیق در یکی از معادن جبههکار طولانی هند، زمان مناسب تعمیرات و تعویض قطعات

<sup>1</sup>. Standby

<sup>2</sup>. Scaling Machine

<sup>3</sup>. Jack-Knife

مختلف شامل 55 قطعه شیرر را مورد مطالعه قرار دادند (Gupta et al., 2006). در این تحقیق، با استفاده از روش درخت خطا (شکل 3-14) و دادههای عملکرد و خرابی دستگاه، احتمال وقوع هر یک از شاخهها محاسبه شده و در نهایت احتمال خرابی یا به عبارت دیگر عدم اطمینان<sup>1</sup> شیرر محاسبه شده است. گوپتا و همکارانش در این مقاله برای اولین بار شیرر را به عنوان یک سیستم مجزا و بیرون از فرآیند تولید معادن جبههکار طولانی مورد مطالعه قرار دادند که این موضوع با توجه به اهمیت این دستگاه و نیز اهمیت پیوستگی تولید در روش جبههکار طولانی، بسیار حائز اهمیت میباشد. همچنین با توجه به مطالعه جزئیات سیستم، در مدیریت قطعات یدکی میتوان از آن بهره جست.



شکل 3-14- درخت خطای پیشنهادی برای درام شیرر (Gupta et al., 2006)

تحقیق مذکور دارای نقاط ضعفی است که میزان اعتماد به نتایج آن را در حد قابل توجهی کاهش میدهد. در زیر به اهم این موارد اشاره میشود:

الف) در این تحقیق ساختار درام شیرر به صورت مدیریتی تقسیمبندی نشده است و دیدگاه زیرسیستمی در این مقاله وجود ندارد. دیدگاه زیرسیستمی، شناخت همه جانبه نسبت به کل سیستم را فراهم میسازد و علاوه بر مطالعه قابلیت اطمینان جداگانه زیرسیستمها، میتوان

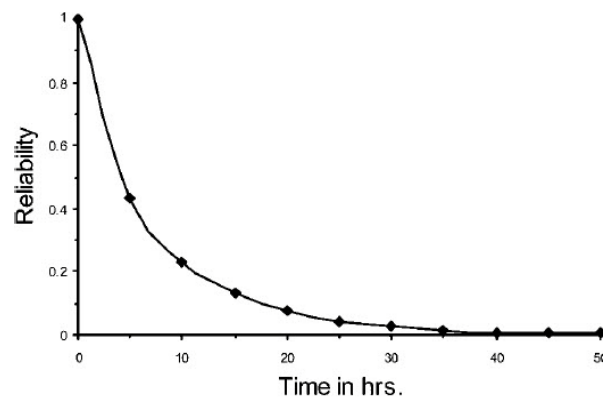
<sup>1</sup>. Unreliability

تعمیر و نگهداری ماشین را بسیار راحتتر و اقتصادیتر انجام داد. دیدگاه زیرسیستمی در تمامی مطالعات قابلیت اطمینان و نیز حوزه مهندسی معدن، پرکاربردترین و علمیتترین روش به حساب میآید. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که در این تحقیق از روش درخت خطا برای تخمین قابلیت اطمینان استفاده شده است که در تحقیقات اخیر به ویژه در حوزه مهندسی برق و کنترل از درخت خطا ( و درخت خطای فازی) فقط برای تعیین و تشخیص خرابی استفاده شده و قابلیت اطمینان عموماً از طریق مدلسازی آماری و یا با روش مارکوف تعیین میشود.

ب) TBFها درست و علمی محاسبه نشدهاند. برای محاسبه زمان بین خرابیها تعداد روزهای کاری بین دو خرابی به صورت ثابت به  $16/5$  ساعت عملکرد در روز ضرب شده و تبدیل به ساعت شدهاند. که این امر مبین آن است که در تحلیلهای انجام شده از پایگاه داده علمی و دقیقی استفاده نشده است. همچنین در بعضی از قطعات، با توجه به نقاط ضعف روش درخت خطا، از تعداد داده بسیار اندکی مثلاً شش خرابی استفاده شده است که از نظر علم آمار صحیح نبوده و قابل اعتماد نمیباشد.

ج) در این تحقیق تابع خرابی تمامی قطعات و بخشهای درخت خطا تابع وایبول دو پارامتری فرض شده و هیچ گونه تحلیل آماری برای انتخاب بهترین مدل خرابی بر روی دادهها انجام نشده است. این موضوع که مهمترین ضعف این تحقیق به شمار میآید، باعث تخمین نادرست قابلیت اطمینان گردیده و از رفتار واقعی دستگاه چشمپوشی شده است. چرخه قابلیت اطمینان دستگاه 40 ساعت محاسبه شده (شکل 3-15) که مقدار بسیار کمی است.

د) رفتار زیرسیستمهای دستگاه به دلیل مشکل ذکر شده در مورد الف، مورد ارزیابی قرار نگرفته و استراتژی مدیریت تعمیر و نگهداری برای هر زیرسیستم دستگاه تعیین نگردیده است. در مجموع با توجه به موارد اشاره شده فوق، چنین میتوان نتیجهگیری کرد که این مطالعه گرچه از ایده مناسبی برخوردار است، اما نتایج واقعی و کاربردی ارائه نداده و تنها در حیطه شناخت دلایل خرابیهای دستگاه میتوان به آن تکیه نمود و در سایر موارد نتایج قابل اعتمادی ارائه نمیدهد.



شکل 3-15 - منحنی قابلیت اطمینان درام شیرر (Gupta & Bhattacharya, 2006)

نقاط ضعف مذکور، مهمترین دلایل انتخاب دستگاه شیرر به عنوان موضوع این رساله بوده‌اند. لذا، در این رساله سعی خواهد شد تا برای اولین بار، با تشریح کامل ساختار زیرسیستمهای درام شیرر، قابلیت اطمینان واقعی دستگاه بدون ساده‌سازیهای خط‌آفرین تحلیل گردیده و یک ساختار جامع برای مدیریت چرخه عمر دستگاه و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری آن ارائه شود.

### 3-4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

45 با توجه به تحقیقات مورد بررسی در این فصل، پرواضح است که تمامی مطالعات انجام شده در سال اخیر را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم‌بندی نمود: 1) مطالعاتی که مفاهیم و تحلیل قابلیت اطمینان را هدف قرار داده‌اند، 2) مطالعاتی که به مدل‌سازی قابلیت اطمینان پرداخته‌اند. اکثر مطالعات قدیمی به مفاهیم اولیه تحلیل قابلیت اطمینان پرداخته‌اند. اما با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی معدنکاری و ماشین‌آلات موجود در معادن، مطالعات به سمت مدل‌سازی سوق پیدا کرده است. مهمترین دلیل این موضوع را می‌توان هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری و نیز اهمیت میزان تولید در دهه اخیر دانست. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی، مدل‌سازی آماری روش پرکاربرد و مقبول در مطالعات قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی بوده است. در مطالعاتی که تحلیل‌های آماری مبنای تعیین قابلیت اطمینان بوده‌اند، هیچ نوع مدل ریاضی برای قابلیت اطمینان ماشین‌آلات ارائه نشده است. در این مطالعات، یک سری داده‌های آماری با استفاده از محاسبات بسیار ساده، برای تعیین نرخ خرابی و یا تعیین میانگین زمان بین خرابی‌ها

مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در مطالعاتی که هدف آنها مدل‌سازی قابلیت اطمینان بوده است، مطالعات دقیق‌تر و علمی‌تری بر روی ماشین‌آلات انجام شده است. در این میان، شاول هیدرولیکی، لودر خاک‌انداز، کامیون‌های زیرزمینی، سنگ شکن، سرند، نوار نقاله، خوراک‌دهنده و LHDها به صورت کاملاً اصولی مدل‌سازی شده‌اند (جدول 2-3).

جدول 2-3- روش‌های مختلف به کار رفته برای مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی

روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان					نام ماشین	
شبیه‌سازی	مدل‌سازی	تحلیل آماری	درخت خطا	مارکوف		FMEA
		✓				شاول برقی
		✓				کامیون
		✓				نصب بولت
			✓			ماشین شاتل
			✓			سیستم‌های برقی
	✓					LHD
	✓					سیستم هیدرولیک LHDها
	✓					لاستیک کامیون‌ها
		✓			✓	درام شیرر
		✓			✓	ناو زنجیری زره‌دار (AFC)
		✓				بارگیر مرحله‌ای
		✓				نوار نقاله
		✓				نگهداری قدرتی
			✓			شاول برقی
		✓				دار گلابین
	✓					شاول هیدرولیکی
	✓					لودر خاک‌انداز
	✓					کامیون‌های زیرزمینی
	✓					سنگ شکن
	✓					سرند
	✓					نوار نقاله
	✓					خوراک‌دهنده به نوار نقاله
				✓		فن تهویه
	✓					ماشین لگگیر

چنانکه در جدول مشاهده میشود، تاکنون تنها از دو روش FMEA و شبیهسازی در مطالعه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی استفاده نشده است. همچنین روش مدلسازی آماری که روش اصلی و عمومی تحلیل قابلیت اطمینان به شمار میرود در حد بسیار مناسبی استفاده شده و پرکاربردترین

روش در ماشینآلات معدنی به شمار میآید. با توجه به قابلیت‌های روش شبیهسازی، احساس می‌شود استفاده از این روش در مطالعات معدنی، افق جدیدی از این مطالعات در زمینه مهندسی معدن خواهد گشود.

در این فصل تحقیقات مهم و تأثیرگذار مربوط به قابلیت اطمینان سیستمها و ماشینآلات معدنی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. در فصل آینده زیرسیستمهای عملیاتی و بخشهای مختلف دستگاه شیرر ارائه خواهند شد.

## فصل چهارم

# تعیین زیرسیستم-

های

درام شیرر

### 4-1- مقدمه

تعیین زیرسیستمهای عملیاتی یک دستگاه مرحله مهمی از مطالعه قابلیت اطمینان آن میباشد. عملکرد یک دستگاه نتیجه ترکیب و برآیند عملکرد بخشهای مختلف آن است و بنابراین قابلیت اطمینان دستگاه نیز از ترکیب قابلیت اطمینان زیرسیستمهای آن قابل محاسبه میباشد. تعیین



زیرسیستمهای یک دستگاه به ویژه دستگاههای پیچیده نیازمند شناخت کامل بخشهای مختلف، تسلط کامل بر طراحی دستگاه، آشنایی با نحوه ایجاد عملکرد نهایی دستگاه و نیز شناخت روابط درونی بخشهای مختلف است. هر گونه ضعف در شناخت اجزای ماشین تمامی قضاوتها و محاسبات بعدی را دچار مشکل نموده و باعث بروز خطا میگردد. علاوه بر اهمیت تعیین زیرسیستمهای مناسب در تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد دستگاه، تعمیر و نگهداری و مدیریت ماشینآلات نیز به شدت به نحوه تعیین زیرسیستمهای دستگاه وابسته است. برنامه‌ریزی صحیح و پویا برای ارتقاء عملکرد و بهبود قابلیت اطمینان، معمولاً بر اساس زیرسیستمهای دستگاه و رفتار خرابی آنها انجام میشود. لذا، تعیین مناسب و دقیق زیرسیستمها، زمینه‌ساز تحلیل و مدیریت مناسب دستگاه میباشد. در این فصل، برای اولین بار زیرسیستمهای عملیاتی دستگاه درام شیرر با استفاده از مشخصات فنی دستگاههای تولید شده توسط شرکتهای سازنده مختلف و با تکیه بر دستگاه موجود در معدن زغالسنگ طبس تعیین گردیده و سپس وظیفه هر بخش و ارتباطات داخلی زیرسیستمهای مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار خواهند گرفت. به منظور آشنایی بیشتر و مطالعه عمیقتر درام شیرر معدن طبس، تمامی نقشه‌های فنی و شکل‌های نشاندهنده جانمایی بخشهای مختلف دستگاه که در طی این فصل ارائه خواهند شد، از کاتالوگ دستگاه شیرر طبس اخذ گردیده‌اند.

#### 4-2- مشخصات درام شیرر معدن طبس

شیرر دو طبلیکی معدن طبس، مدل سال 2005 و ساخت گروه صنعتی فامور<sup>1</sup> لهستان میباشد. این گروه صنعتی متشکل از چندین شرکت اقماری بوده و جزو معدود شرکتهای جهان است که کلیه تجهیزات جبهه‌کار طولانی را به صورت کامل تولید مینماید. شیرر طبس با نام تجاری KGS-600N/2BP/03 دارای مشخصات فنی به شرح جدول 4-1 میباشد. با احتساب چگالی 1/6 تن بر متر مکعب، از هر برش استخراجی (در طول 200 متر کارگاه) حدود

<sup>1</sup>. Famur

460 تن زغالسنگ تولید میشود و حداکثر ظرفیت استخراج این شیرر 1235 تن در ساعت است.

شکل 1-4 دستگاه مورد نظر را در حال کار در معدن طیس نشان میدهد.

جدول 1-4- مشخصات فنی درام شیرر معدن زغالسنگ طیس

نام مشخصه	کمیت
قدرت کلی دستگاه (کیلووات)	600
قدرت موتورهای درامها (دو موتور) (کیلووات)	2×250
قدرت موتور محرک پمپ هیدرولیک (کیلووات)	100
ولتاژ برق مورد نیاز (ولت)	1100
قطر درام (میلیمتر)	1600
حداکثر ارتفاع برش (میلیمتر)	3400
عمق برش (میلیمتر)	800
حداکثر عمق برش در کف کارگاه (میلیمتر)	250
قدرت بخش حرکت (دو بخش) (میلیمتر)	2×300
سرعت حرکت دستگاه در حال برش (متر بر دقیقه)	0-9
حداکثر سرعت حرکت دستگاه در حال عدم برش و حرکت آزاد (متر بر دقیقه)	0-18
طول (میلیمتر)	11293
عرض (میلیمتر)	2326
ارتفاع (میلیمتر)	1329
وزن (تن)	35/2

#### 3-4- ساختار کلی و زیرسیستمهای درام شیرر

تمامی ماشینآلات معدنی و راهسازی عموماً دارای ساختارهای مشابه و طراحیهای یکسانی بوده و

تفاوتهای آنها معمولاً به توان عملیاتی و ظرفیت تولید مربوط میشود. لذا، زیرسیستمها و شبکه

قابلیت اطمینان تعریف شده برای یک دستگاه خاص مثل لودرهای معدنی، عمومیت کلی خود را

حفظ نموده و برای انواع مختلف آن دستگاه با ابعاد و توان تولید مختلف، کارآیی دارند.

در این مطالعه به منظور تعیین زیرسیستمهای عملیاتی درام شیرر، از مشخصات و اطلاعات فنی



شکل 4-1- دستگاه درام شیرر در حال کار در معدن طبس

محصولات سه شرکت شناخته شده سازنده شیرر شامل شرکت ماشینآلات معدنی جوی<sup>1</sup> آمریکا، شرکت باسیروس<sup>2</sup> روسیه و شرکت فامور<sup>3</sup> لهستان استفاده گردیده و بیش از 15 مدل مختلف درام شیرر تولید شده توسط این سازندگان مورد مطالعه اجمالی قرار گرفته است. تمامی دستگاههای مورد مطالعه دارای ساختار کلی شامل دو بخش عمده اجزای مکانیکی و اجزای برقی میباشند. بخشهای مکانیکی شیرر عبارتند از: سیستم قدرت<sup>4</sup>، بخش حرکت دستگاه<sup>5</sup> (دو بخش)، سیستم کنترل الکتریکی<sup>6</sup>، دو بازوی متحرک<sup>7</sup>، دو درام (درام) برش زغال<sup>8</sup>، سیستم آب، بخش تثبیتکننده کابل<sup>9</sup>، مخزن روغن و پوشش و بدنه دستگاه. بخشهای برقی دستگاه شامل اجزای زیر میباشند: اجزای برقی نصب شده بر روی دستگاه (موتورهای برقی درامها، موتور برق پمپ هیدرولیک، حسگرهای کنترل دستگاه) و کابل انتقال برق به دستگاه. بخشهای کلی تشکیلدهنده درام شیرر در شکل 2-4 نشان داده شده است.

تمامی بخشهای مورد بحث فوق، طبق طراحی خاصی در تعامل با یکدیگر، عملکرد نهایی دستگاه از جمله حرکت، برش و بارگیری را تشکیل میدهند. برای بررسی قابلیت اطمینان، تعیین زیرسیستمهای عملیاتی دستگاه امری کاملاً متفاوت از ساختار طراحی شده میباشد. در این فرآیند، هر جزء دستگاه ممکن است به صورت چند زیرسیستم، یا چند جزء به صورت یک زیرسیستم در نظر گرفته شوند. مهمترین موضوع در تعیین زیرسیستمها، عملکرد ملموس هر زیرسیستم و نیز شباهت وظایف و نحوه تعمیر و نگهداری اجزای موجود در آن زیرسیستم میباشد. سطح تقسیم هر دستگاه به زیرسیستمهای مختلف، یک دیدگاه مدیریتی و فنی است که در نهایت قابلیت تعمیر و نگهداری و دسترسپذیری دستگاه را به شدت تحت تأثیر قرار میدهد. در تعریف زیرسیستمهای یک دستگاه

<sup>1</sup>. Joy Mining Machinery

<sup>2</sup>. Bucyrus

<sup>3</sup>. Famur Group

<sup>4</sup>. Power pack

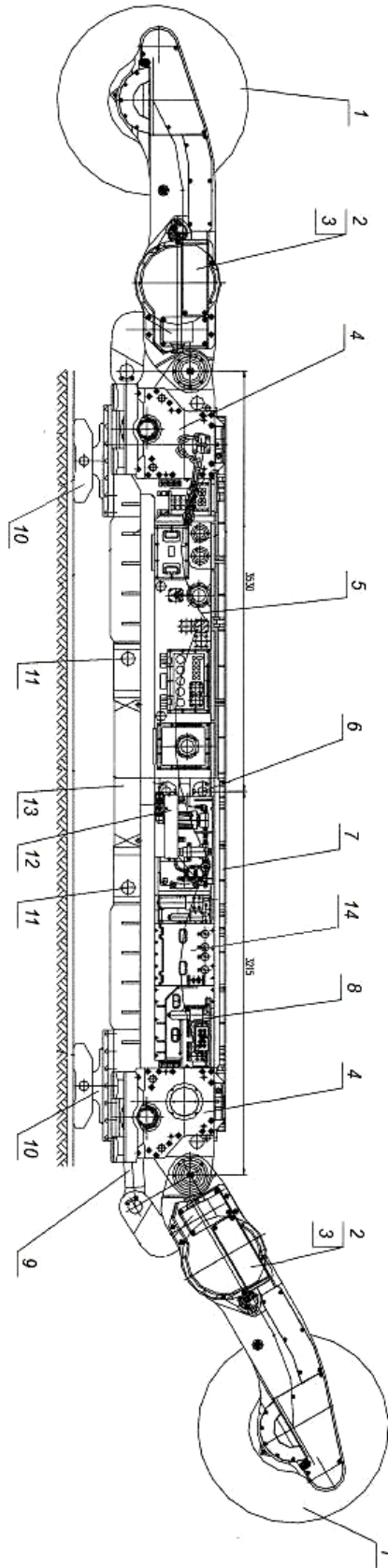
<sup>5</sup>. Haulage units

<sup>6</sup>. Electric control box

<sup>7</sup>. Ranging arms

<sup>8</sup>. Cutting drums

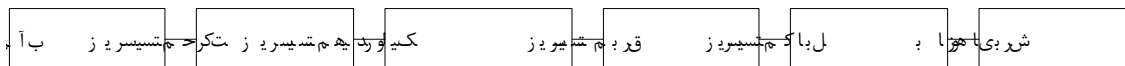
<sup>9</sup>. Fixing of shearer's cable



1) درام، 2 و 3) بازوی برش و موتور برق درام، 4) سیستم حرکت، 5) بولت اتصال دو بخش بدنه، 7) بدنه دستگاه، 8) سیستم هیدرولیک، 9) اتصال دهنده سروموتور، 10) چرخ دنده خورشیدی، 11) سروموتور، 12) سیستم آب، 13) مخزن روغن، 14) سیستم قدرت  
 شکل 4-2- بخشهای کلی تشکیلدهنده درام شیرر (در معدن زغالسنگ طبس)

معمولاً سعی میشود تا با کمترین تعداد زیرسیستم، بهترین ارزیابی حاصل شود. با توجه به ارزیابی ساختار متعارف شیررهای موجود در بازار، چنین به نظر میرسد که تعریف زیرسیستمهای این دستگاه بر مبنای اجزای تشکیل دهنده آن که در بالا شرح داده شدند از دیدگاه کاربردی مناسب نیست. در این مطالعه با استفاده از کاتالوگها و نقشههای فنی دستگاه شیرر معدن طبس مطالعه جامعی بر روی ساختار عملیاتی درام شیرر انجام گردیده و با تکیه بر جمعآوری اطلاعات و بازدیدهای صحرائی مکرر، زیرسیستمهای عملیاتی ماشین از میان اجزای پیچیده دستگاه تعریف شدهاند. در مجموع در این تحقیق برای اولین بار شش زیرسیستم شامل: سیستم آب، سیستم حرکت، سیستم هیدرولیک، سیستم برق، بازوهای برش و سیستم کابل، برای درام شیرر تعریف گردید که برای تمامی شیررهای موجود در بازار قابل استفاده میباشد.

با توجه به اینکه هر گونه خرابی در زیرسیستمهای شیرر باعث توقف دستگاه و قطع عملیات میگردد، لذا شبکه قابلیت اطمینان شیرر، سری در نظر گرفته میشود. با توجه به موارد فوق، دیاگرام بلوکی دستگاه شیرر به صورت شکل 3-4 میباشد.



شکل 3-4- دیاگرام بلوکی درام شیرر

در ادامه این فصل زیرسیستمهای تعیین شده برای دستگاه شیرر به طور تفصیلی مورد مطالعه قرار گرفته و اجزای مختلف و وظایف هر یک از آنها معرفی خواهند شد.

#### 4-3-1- زیرسیستم آب

سیستم آب به عنوان یکی از زیرسیستمهای مهم انواع دستگاههای حفار معدنی مثل معدنکار پیوسته<sup>۱</sup>، رودهدر<sup>۲</sup>، ماشین حفار تمام مقطع تونل<sup>۳</sup> و جامبو دریلها مطرح میباشد. در شیررها نیز زیرسیستم آب دارای اهمیت ویژه است. این زیرسیستم به طور کلی دارای چهار عملکرد و وظیفه

<sup>۱</sup>. Continuous miner

<sup>۲</sup>. Roadheader

<sup>۳</sup>. TBM

اصلی به شرح زیر میباشد:

الف) خنککردن بخشهای مختلف دستگاه: شامل موتورهای برقی، چرخ دندهها و بازوهای دستگاه

و روغن هیدرولیک (در بخشهای حرکت و بازوهای دستگاه)

ب) کنترل گسترش گرد زغال در محیط کارگاه

ج) کاهش احتمال و خطر آتشسوزی و انفجار

د) خنککردن ناخنهای<sup>1</sup> برش دستگاه

با دقت در موارد فوق مشخص میشود که این زیرسیستم در تمامی نقاط دستگاه گسترده شده و به

عنوان یک زیرسیستم خدمترسان، به سایر زیرسیستمهای دستگاه سرویسدهی مینماید. همین

موضوع باعث اهمیت فوقالعاده این زیرسیستم نسبت به سایر زیرسیستمهای دستگاه میشود.

زیرسیستم آب درام شیر از اجزای زیر تشکیل شده است (کدهای ارائه شده در شکل 4-4 نشان داده

شدهاند):

-موتور پمپ (P)

-فیلتر ورودی (F2)

-فیلتر خودپاککننده<sup>2</sup> (F1)

-شیر قطع اضطراری نصب شده روی لوله ورودی (ZO2)

-شیر قطع اضطراری نصب شده روی شیر (ZO1)

-جعبه تقسیم (KR)

-شیر کاهنده فشار (ZR)

-شیر ایمنی (ZB)

-دو عدد خنک کننده برای موتورهای برقی بازوها و درامها (Ch11)

-خنککننده موتور برقی بخش حرکت (Ch12)

<sup>1</sup>. Pick

<sup>2</sup>. Self-cleaning filter

خنککننده جعبه دنده پمپ هیدرولیک بخش حرکت (Chl3)

خنککننده روغن در بخش حرکت (Chl4)

دو خنککننده تسمه زنجیری بازوهای دستگاه (Chl5)

خنککننده چرخنده بازوهای دستگاه (Chl6)

خنک کننده روغن در مدار عملیاتی بازوها (Chl7)

مخزن آب اسپری جتها (BZ)

شیلنگها و اتصالات فشار قوی و ساده

اسپری جتهای خنککننده بیکها

نکته حائز اهمیت در تعیین مرز این زیرسیستم با زیرسیستمهای دیگر دستگاه این است که برخی از

قطعات و بخشهای ارائه شده برای زیرسیستم آب شیر، بر حسب عملکرد، دارای اشتراکاتی با

زیرسیستمهای دیگر دستگاه میباشد. به عنوان مثال، بخشهای خنککننده موجود در این سیستم

با زیرسیستمهای حرکت، بازوهای برش و هیدرولیک دستگاه به طور مؤثری در تماس بوده و از سه

دیدگاه نقش ایفا میکنند. این قطعات را میتوان به عنوان "گرههای عملکردی" در ماشین تعبیر

نمود. برای در نظر گرفتن این موضوع و تلاش برای تحلیل واقعیت خرابیهای زیرسیستمهای درگیر

در گره، دادههای مربوط به خرابیهایی که مستقیماً به آب مربوط میشوند مثل گرفتگی (انسداد)، در

زیرسیستم آب شمرده شده و سایر خرابیهای مکانیکی جزو زیرسیستمهای مربوطه محاسبه

میشوند. همچنین حسگرهای حرارت و فشار که در جای جای بخش آب دستگاههای شیر تعبیه

گردیدهاند، به طور کلی در زیرسیستم برقی و در بخش حسگرها شمرده میشوند و به بخش آب

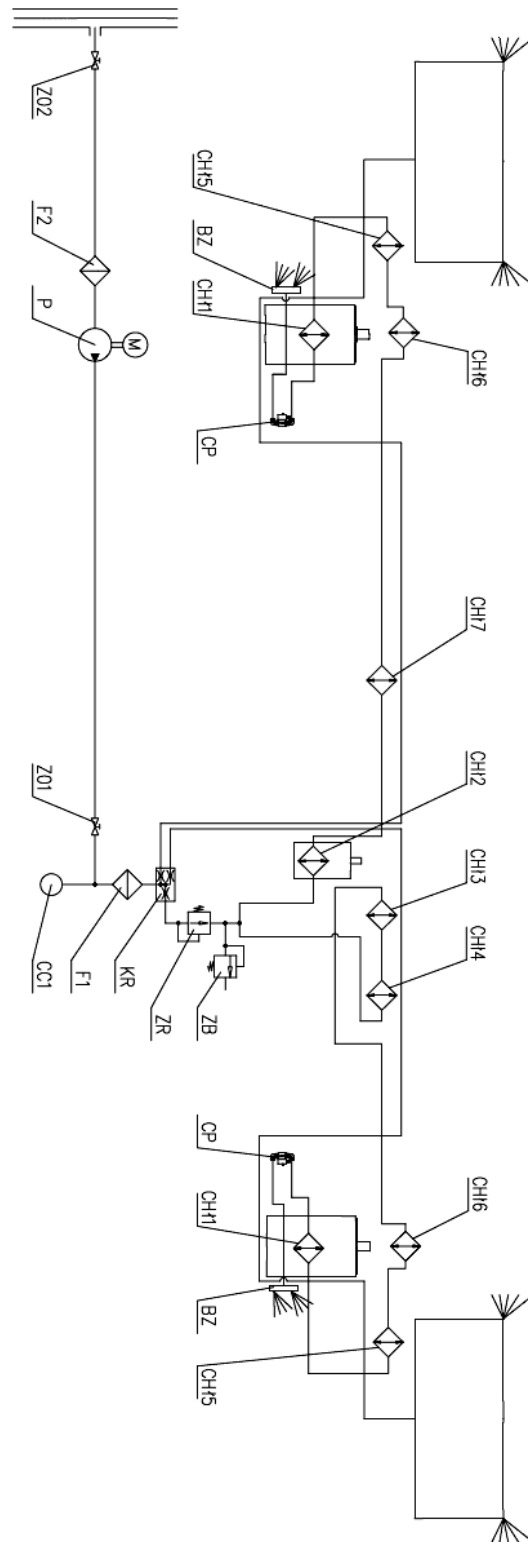
مربوط نمیشوند.

چرخه عملیات در زیرسیستم آب شیر به شرح زیر است:

آب، از لوله اصلی آبرسانی به دستگاه و از طریق فیلتر آب (F2) وارد شبکه اصلی دستگاه شده و به

پمپ آب میرسد (P). فیلتر آب تعبیه شده، ناخالصیهای مکانیکی (مواد معلق) آب را میگیرد. یک





(P موتور پمپ، F2 فیلتر ورودی، F1 فیلتر خودپاککننده، Z02 شیر قطع اضطراری نصب شده روی لوله ورودی، Z01 شیر قطع اضطراری نصب شده روی شیر، KR جعبه تقسیم، ZR شیر کاهنده فشار، ZB شیر ایمنی، Ch11 خنک کننده موتورهای برقی بازوها و درامها، Ch12 خنککننده موتور برقی بخش حرکت، Ch13 خنککننده جعبه دنده پمپ هیدرولیک بخش حرکت، Ch14 خنککننده روغن در بخش حرکت، Ch15 دو خنککننده تسمه زنجیری بازوهای دستگاه، Ch16 خنککننده چرخنده بازوهای دستگاه، Ch17 خنک کننده روغن در مدار عملیاتی بازوها، BZ مخزن آب اسپری جتها)

شکل 4-4- نقشه شماتیک زیرسیستم آب درام شیر (در معدن زغالسنگ طبس)

عدد فشارسنج<sup>1</sup> برای کنترل فشار آب ورودی و خروجی فیلتر به منظور تعیین میزان گرفتگی و کثیفی فیلتر تعبیه شده است. آب، پس از عبور از پمپ مستقیماً از طریق شیر قطع اضطراری روی ماشین (ZO1) و فیلتر خودپاک کننده (F1) به جعبه تقسیم رانده میشود. در جعبه تقسیم، آب به دو بخش مجزا تقسیم میشود: بخشی از آب به سمت اسپری جتها پمپاژ شده و بخش دیگر وارد مدار داخلی دستگاه میشود. بخش دوم، آب را از طریق شیر کاهنده فشار (ZR) و شیر ایمنی (ZB) وارد خنککنندههای تعبیه شده در بخشهای مختلف دستگاه میکند.

زیرسیستم آب در شیرر دارای دو سازوکار اصلی برای جلوگیری از خرابی است که هر دو به صورت خودکار عمل میکنند. در صورت افزایش فشار آب، شیر ایمنی باز شده و آب از زیر دستگاه به بیرون (کف کارگاه) جاری میشود و بدین طریق با کاهش فشار آب، خنککنندهها از آسیب محافظت میشوند. برعکس، اگر فشار آب از حد معینی کمتر شود، حسگرهای فشار به این تغییر عکسالعمل نشان داده و جریان برق دستگاه به صورت خودکار قطع شده و دستگاه خاموش میشود. این موضوع باعث جلوگیری از آسیب دیدگی ناخنهای برش زغال و گسترش گرد زغال در کارگاه میشود. اهمیت فشار مطلوب آب به حدی است که در هنگام روشنکردن دستگاه، ابتدا زیرسیستم آب دستگاه و به ویژه اسپری جتها فعال میشوند و در صورت به حد نصاب رسیدن فشار پاشش، جریان برق سایر بخشها وصل شده و دستگاه روشن میشود.

#### 4-3-2- زیرسیستم حرکت<sup>2</sup>

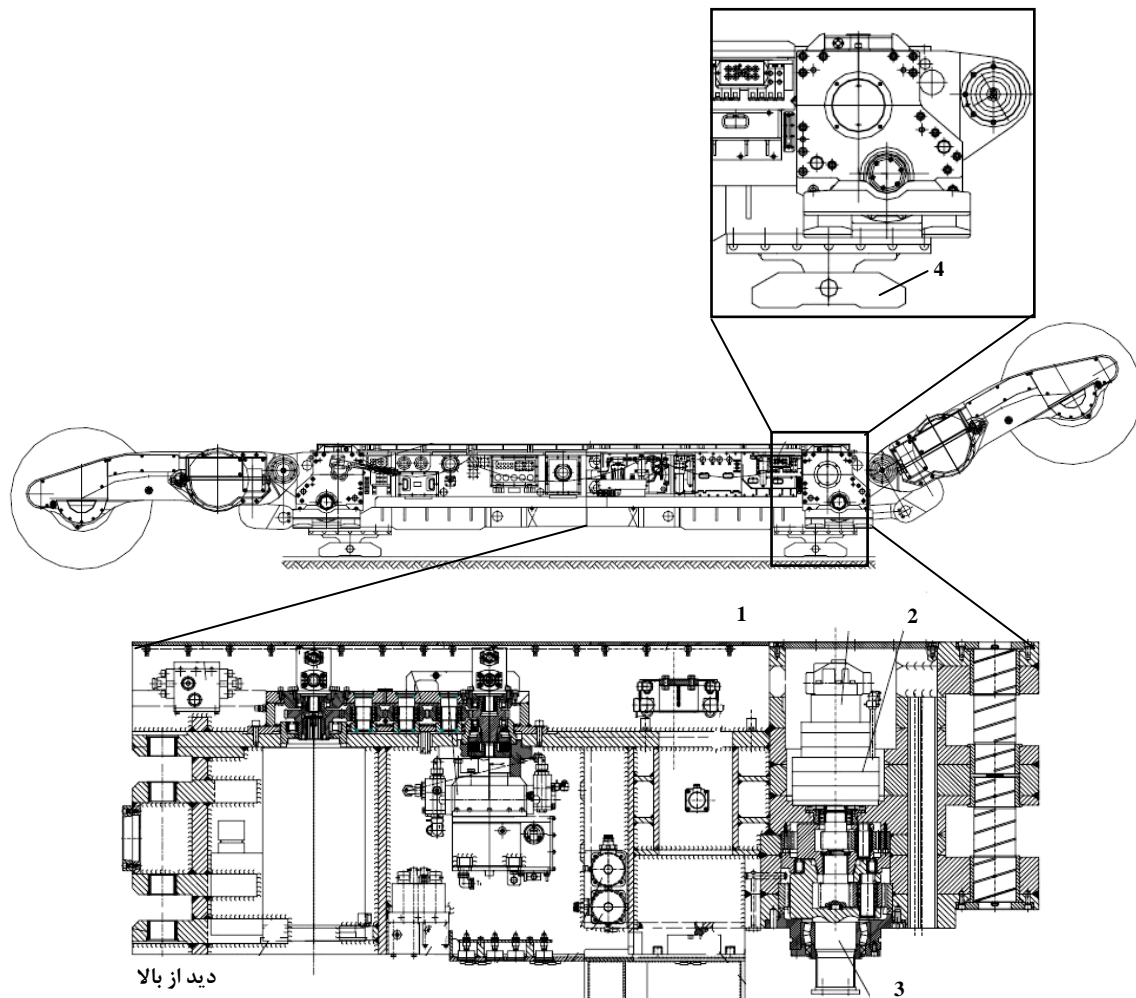
زیرسیستم حرکت درام شیرر، وظیفه اصلی جابجایی دستگاه را در طول کارگاه جبههکار طولانی بر عهده دارد و تمامی بدنه دستگاه با وزن زیادش بر روی این بخش استوار است. چنانکه در شکل 4-5 نشان داده شده است، زیرسیستم حرکت دستگاه از دو بخش جداگانه (چپ و راست) تشکیل شده است که به دو انتهای بدنه دستگاه متصل میباشند.

هر یک از این دو بخش اصلی شامل یک چرخ دنده خورشیدی است که توسط یک موتور هیدرولیک

<sup>1</sup>. Manometer

<sup>2</sup>. Haulage system

رانده میشود. سیستم ترمز هیدرولیکی چنددیسکی و قطعات مکانیکی زیادی، دیگر بخشهای این زیرسیستم از درام شیرر را تشکیل میدهند. بخش پایه از طریق اتصال به یک جعبه دنده، وظیفه انتقال حرکت و گشتاور را از محور اصلی چرخ دنده به ریل حرکت بر عهده دارد.



1) موتور هیدرولیک، 2) ترمز هیدرولیکی چند دیسکی، 3) چرخ دنده خورشیدی، 4) پایه حرکت کننده بر روی ریل  
شکل 4-5- محل قرارگیری زیرسیستم حرکت و اجزای اصلی آن (در معدن زغالسنگ طبس)

با توجه به وزن زیاد دستگاه و شیب برخی از کارگاههای استخراج (همچون معدن طبس)، این بخش از درام شیرر تحت تنش زیاد و گاهی بار بیش از حد مجاز قرار میگیرد. دور موتورهای هیدرولیکی موجود در این زیرسیستم، سرعت پیشرانش دستگاه را کنترل مینمایند.

با دقت در اجزای عملیاتی این زیرسیستم، معلوم میشود که زیرسیستم حرکت شیرر در ارتباط مستقیم با سیستم هیدرولیکی دستگاه بوده و تمام نیروی محرکه دستگاه را از این زیرسیستم دریافت

مینماید. لذا، خرابیهای این زیرسیستم باید از خرابیهای زیرسیستم هیدرولیک تفکیک گردد. در این رساله به منظور حفظ انسجام هر دو زیرسیستم، با توجه به مشاوره با مهندسان مکانیک و مکانیکهای معدن، تمامی خرابیهای اجزای مکانیکی زیرسیستم شامل اشکالات مربوط به قطعههای موتورهای هیدرولیک، چرخ دندهها، اتصالات، درزگیرها، قطعات عملکردی ترمزها و جعبه دنده به حساب زیرسیستم حرکت شمرده شده و تمامی خرابیهایی که به صورت مستقیم به روغن هیدرولیک و کیفیت روغن مربوط میشوند همانند شیرهای خودکار و شیلنگها و لولههای جریان روغن در زیرسیستم هیدرولیک شمارش میشوند.

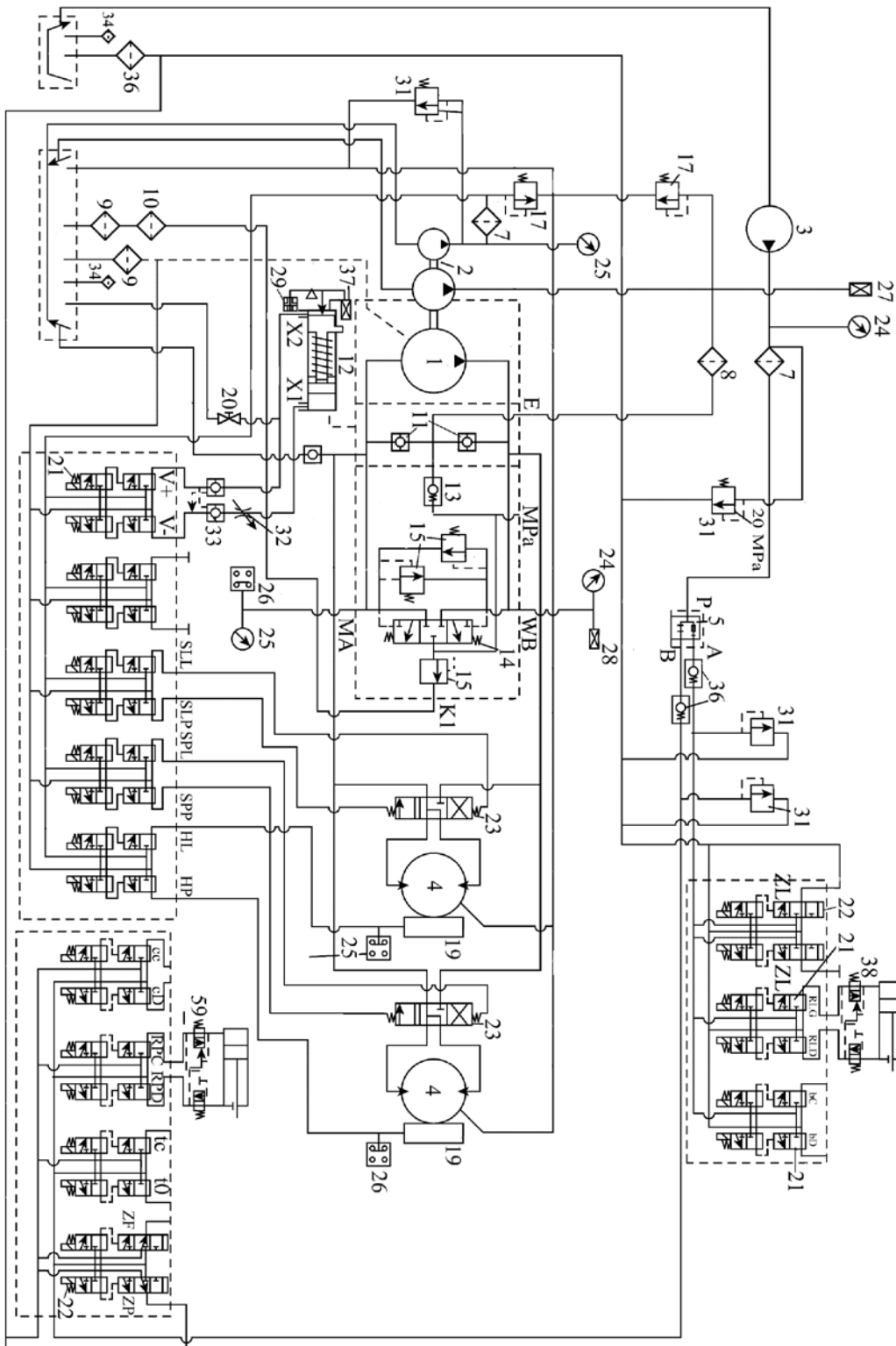
#### 4-3-3- زیرسیستم هیدرولیک

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

زیرسیستم هیدرولیک به همراه زیرسیستم برق، وظیفه تولید قدرت و نیز انتقال آن به بخشهای مختلف دستگاه شیرر را بر عهده دارد. حرکت و توقف دستگاه و بالا و پائین رفتن بازوها از ملموسترین عملکردهای این زیرسیستم به شمار میآید. ساختار کلی این زیرسیستم نیز همانند سایر بخشهای شیرر در مدلهای مختلف دستگاه بسیار مشابه هم بوده ولی سطح تکنولوژی و ظرفیت آنها متفاوت است. ساختار کلی و اجزای اصلی زیرسیستم هیدرولیک شیرر موجود در معدن زغالسنگ طبس در شکل 4-6 نشان داده شده است.

در دستگاه شیرر، پس از روشن شدن موتور برق، بخش پمپ سوپرشارژ و پمپ کنترل (قطعه 2 در شکل 4-6)، روغن را از مخزن مکیده و آن را از طریق فیلترها (7 و 8) به مدار کاری و کنترلی دستگاه هدایت میکند. تا زمانی که پمپ اصلی (1) کار میکند، روغن به طور مرتب در مدار عوض میشود. روغن برگشتی از مدار عملیات، پس از گذشتن از خنککننده (10) و فیلتر جریان (9) به

مخدا: اصل



(1) پمپ اصلی، (2) بخش پمپ، (3) پمپ محوری، (4) موتور هیدرولیک، (6) تقسیم‌کننده، (7) فیلتر فشاری، (8) فیلتر فشاری، (9) فیلتر جرطن، (10) خنک کننده روغن، (11) شئی کنترل، (13) شئی کنترل، (14) شئی فشار قوی، (15) شئی اضافه جرطن، (16) شئی اضافه جر ان، (17) شئی، (18) شئی کنترل، (19) ترمز هیدرولیکی، (20) شئی قطع اضطراری، (21) توزیع‌کننده، (22) جفتگر (کوپلر)، (23) تقسیم‌کننده، (24) فشارسنج WC، (25) فشارسنج NC، (26) حسگر

فشار، (27) حسگر آنالوگ NC، (28) حسگر آنالوگ WC، (29) اتصال، (31) شش، (32) شش گلوبی (خفهن)، (32) شش کنترل مقابلهای، (34) فیلتر هواگویی، (35) شش کنترل، (36) خنککننده روغن، (37) حسگر سرعت، (38) قفل.

شکل 4-6- ساختار کلی و اجزای اصلی زیرسیستم هیدرولیک درام شیرر (شیرر زغالسنگ طبس)  
روغن میرسد و مجدداً به مدار باز می‌گردد.

فشارسنج آنالوگ (27) که در مسیر بین پمپ (2) و فیلتر فشاری (8) تعبیه شده است، وظیفه اندازهگیری فشار شارژ روغن در مدار و میزان کثیف بودن فیلتر را عهده‌دار است. زمانی که فشار روغن به 4 الی 5 مگاپاسکال برسد، دستگاه به صورت خودکار خاموش می‌شود.

چنانکه در بخش قبل شرح داده شد، موتورهای هیدرولیک موجود در دستگاه وظیفه پیشرانش دستگاه را بر عهده دارند و روغن از مسیر پمپ اصلی، بخش فلاشینگ و قسمت تقسیم‌کننده به موتورهای انتقال می‌یابد. تقسیم‌کننده (23) وظیفه تعیین نوع حرکت (در حالت برش یا جابجایی آزاد) را بر عهده دارد.

پمپ شماره (3) موقعیت و حرکت بازوهای دستگاه را کنترل مینماید. این پمپ، روغن را از فیلتر شماره (7) عبور داده و به تقسیم کننده (6) می‌رساند. تقسیم‌کننده، روغن را به دو بخش A برای کنترل بازوی چپ و B برای کنترل بازوی راست هدایت میکند. وظیفه نهایی کنترل موقعیت و ارتفاع بازو بر عهده توزیع‌کنندهها (21 و 22) میباشد که جهت اطمینان از عملکرد کامل کوپلر تعبیه شده‌اند.

چنانکه ملاحظه میشود، زیرسیستم هیدرولیک دستگاه با ساختار پیچیده خود با زیرسیستمهای دیگر ماشین تعامل بسیار زیاد و پیچیده‌های دارد. این زیرسیستم توسط موتور و ترمز هیدرولیک با زیرسیستم حرکت، توسط خنککنندههای روغن با زیرسیستم آب، از طریق سیلندرهای هیدرولیکی با بخش بازوهای برش و به واسطه وجود حسگرهای متعدد فشار و حرارت و وجود سیستم خاموشی خودکار دستگاه، با زیرسیستم برق اشتراک و تعامل تنگاتنگی دارد. لذا، تعیین مرزبندی این زیرسیستم در بهبود ارزیابی خرابیها و مطالعه قابلیت اطمینان دستگاه بسیار مهم میباشد. در این ارتباط، تمامی خرابیهای حسگرها همانند زیرسیستم آب، در بخش برق دستگاه شمارش می‌گردد.

بخش مربوط به سیلندرهای هیدرولیکی بازوها و نیز تمامی خرابیهای مربوط به روغن خنککنندهها در زیرسیستم هیدرولیک شمارش میشوند.

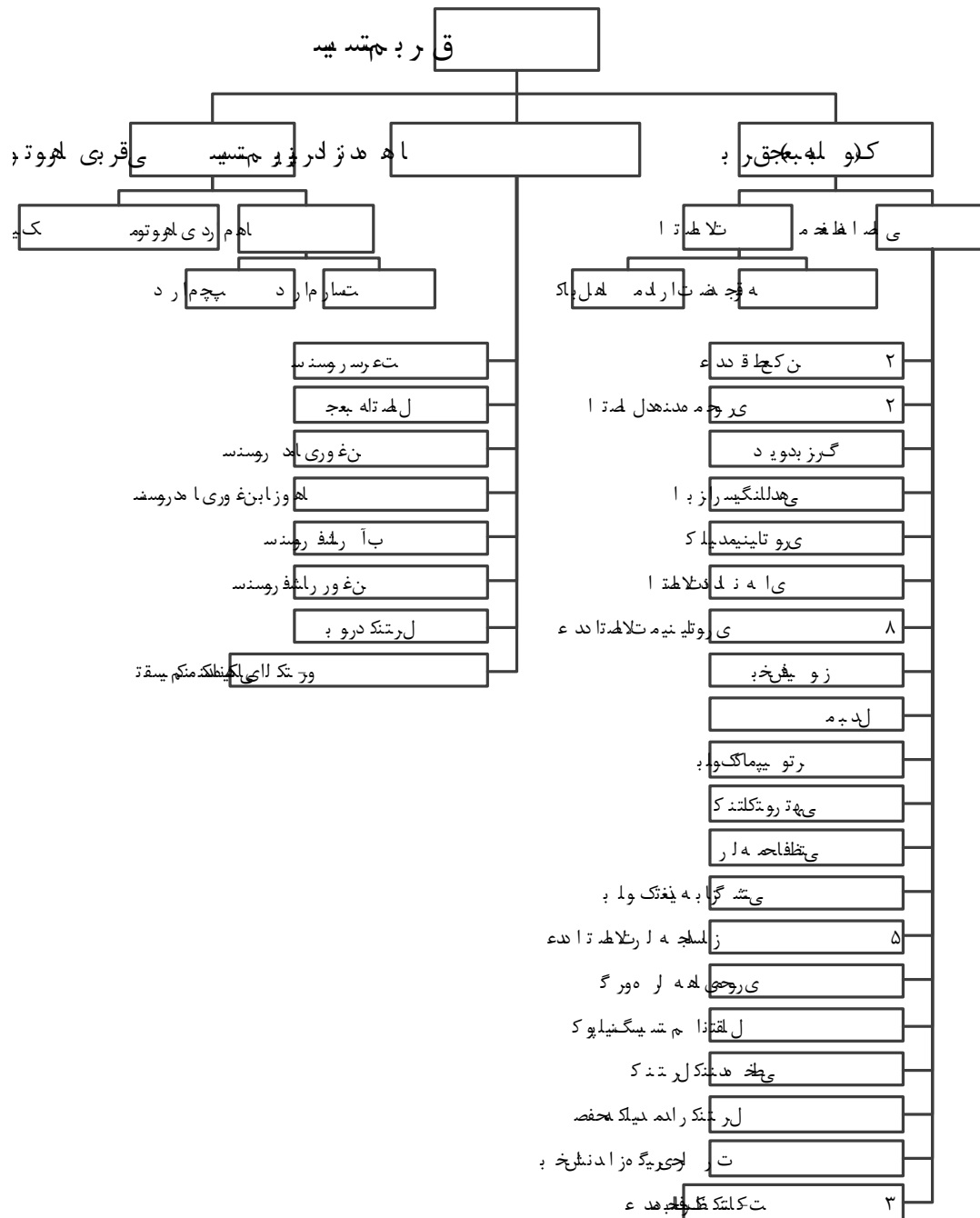
#### 4-3-4- زیرسیستم برق

امروزه ماشینآلات متعدد برقی برای استفاده در معادن و به ویژه معادن زیرزمینی توسعه داده شدهاند. شاید مهمترین دلایل این استفاده، عدم آلایندهی هوا و مصرف اکسیژن هوای معدن باشد. در معادن زغالسنگ، این موضوع با توجه به وجود گرد زغال و هوای سنگین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از آنجایی که ماشینآلات معدنی به قدرت و ظرفیت بالایی نیاز دارند، تأمین نیاز این ماشینآلات مستلزم وجود برق ولتاژ قوی در معدن میباشد. درام شیرر یکی از شاخصترین ماشینآلات برقی معادن زیرزمینی به حساب میآید. گاهی از این ماشین با تعبیر الکترو- هیدرولیکی یاد میشود که به طور کامل ساختار دستگاه را از نظر مکانیکی بیان مینماید. در دستگاه شیرر، برق ولتاژ بالا به دو صورت عمده مورد استفاده قرار میگیرد: بخشی از برق به صورت مستقیم به مصرف موتورهای برقی درامها میرسد و بخشی دیگر در موتورهای هیدرولیک بخش حرکت دستگاه، باعث پیشرانش دستگاه و بالا و پائین رفتن بازوهای برش میگردد. لذا این زیرسیستم به همراه زیرسیستم هیدرولیک، وظیفه تولید قدرت و انتقال آن به تمام نقاط ماشین را بر عهده دارد. اجزای اصلی تشکیلدهنده زیرسیستم برق درام شیرر در شکل 4-7 ارائه شده است.

چنانکه در شکل دیده میشود، جعبه برق، که در بخش مرکزی دستگاه قرار گرفته درصد بسیار زیادی از حجم زیرسیستم برق را به خود اختصاص میدهد و بخش عمده پیچیدگی این زیرسیستم مربوط به این بخش و بخش مربوط به ریزپردازندهها است. نقشه فنی زیرسیستم برق شیرر معدن طبس به عنوان نمونه‌ای از زیرسیستمهای برق درام شیررها در پیوست (ب) ارائه شده است. چنانکه از شکل پیوست (ب) بر میآید، این زیرسیستم از پیچیدگی فنی بالایی برخوردار است. از طرفی با توجه به محدودیت ابعاد دستگاه، تمامی اجزای این زیرسیستم در آرایشی فشرده و متراکم در

دستگاه جانمایی شده‌اند که به پیچیدگی و دشواری تعمیر و نگهداری این بخش میافزاید. در این رساله با توجه به اینکه تعمیرات بخش مکانیکی و برقی ماشینآلات توسط دو گروه تعمیر و نگهداری جداگانه انجام میشوند، لذا برای حفظ یکپارچگی زیرسیستم برق درام شیر، تمامی اجزای این زیرسیستم به طور یکجا به عنوان زیرسیستم برق دستگاه تعریف گردیدند.



شکل 4-7- ساختار کلی و اجزای اصلی زیرسیستم برق درام شیر (شیر زغالسنگ طبس)



### 4-3-5- بازوهای برش

درامهای برش، بخشهای بسیار بارز و ملموس ماشینآلات حفاری سنگ به شمار میآید. از آنجایی که تماس مستقیم ماشین با سنگ توسط این بخش انجام میشود و عملکرد دستگاه با استفاده از این بخش نمود پیدا میکند، لذا طراحی و ساخت کلههای برش<sup>1</sup> از جمله حساسترین مراحل ساخت دستگاههای حفار به شمار میآید.

دستگاه شیر با دارا بودن دو درام برش در دو سمت انتهایی دستگاه از جمله معروفترین ماشینهای دوار معدنی محسوب میشود. درامها در شیر دارای دو وظیفه اصلی شامل برش زغالسنگ از لایه برجا و بارگیری توأم آن بر روی ناو زنجیری میباشد. چنانچه در شکل 4-2 نشان داده شده است، درامها در انتهایی دو بازوی قدرتمند که توسط زیرسیستم هیدرولیک هدایت میشوند نصب شدهاند. بر روی هر بازو یک موتور برق تعبیه گردیده که وظیفه تولید نیروی چرخشی درام را بر عهده دارد. نیروی چرخشی ایجاد شده توسط جعبه دنده و تسمه زنجیری که در طول بدنه بازو قرار دارند به محور اصلی درام منتقل شده و درام را به چرخش در میآورد (شکل 4-8).

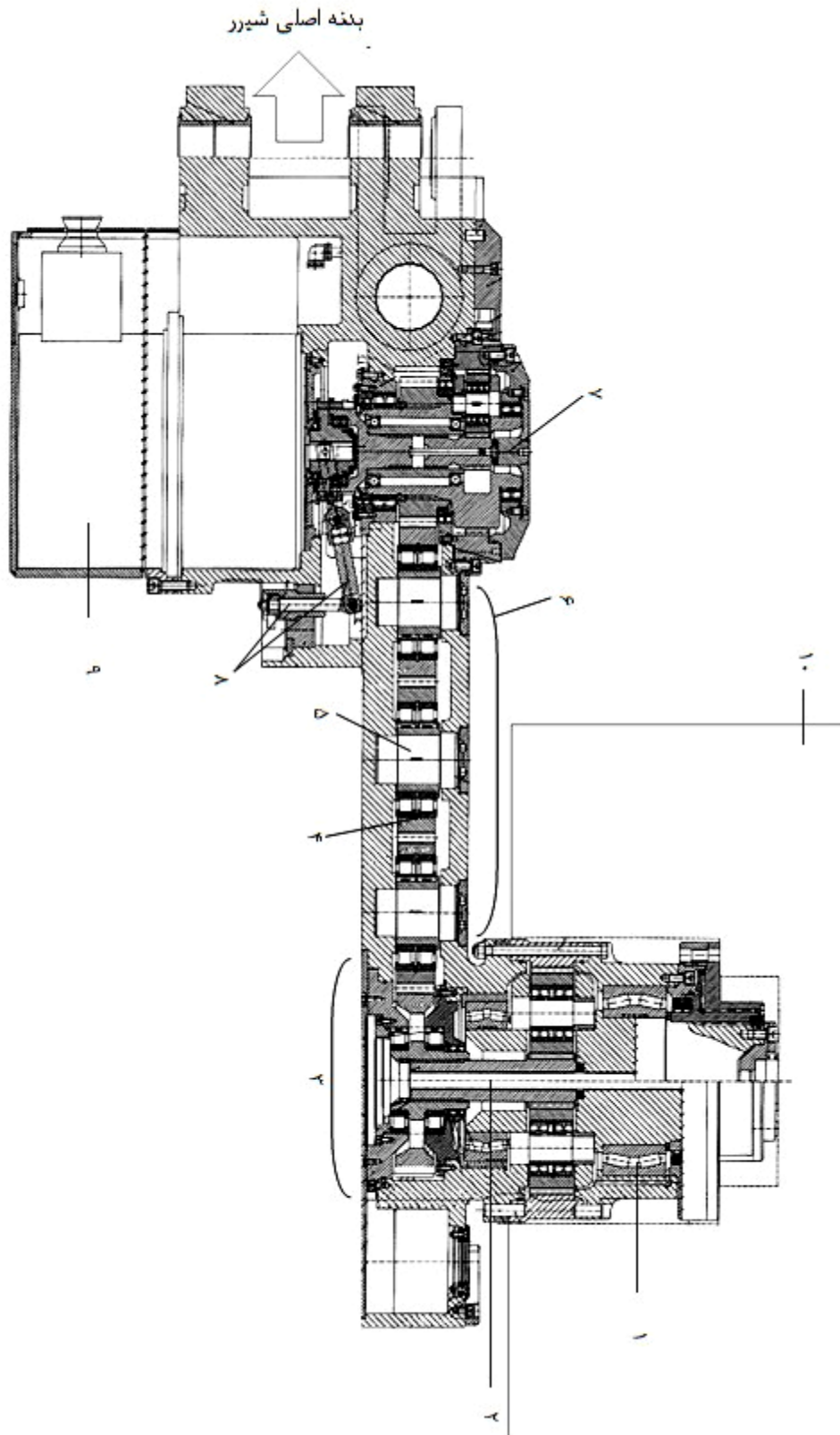
درام، از یک بدنه فولادی ضخیم که به صورت صفحات مارپیچی قرار گرفتهاند تشکیل شده است. روی این صفحات، پیکهای برش و اسپری جتها تعبیه شدهاند. محور اصلی اتصال درام به بازو، محل ورود آب فشار قوی مورد استفاده در اسپری جتها میباشد. شکل 4-9 نمای کلی درام را نشان میدهد.

گرچه در کاتالوگهای فنی اکثر شیرها، بخش درام و بازو به صورت دو جزء مجزا ارائه میشوند، اما در این مطالعه به منظور بهبود مدیریت تعمیر و نگهداری ماشین و نیز حفظ پیوستگی فرآیند تولید انرژی دورانی در بازوها و مصرف آن توسط درام، درامها و بازوها به طور یکجا به عنوان یک زیرسیستم تحت عنوان "بازوهای برش" تعریف گردیدهاند.

این زیرسیستم همانند سایر زیرسیستمهای دستگاه در تعامل مستقیم با سایر بخشها همچون

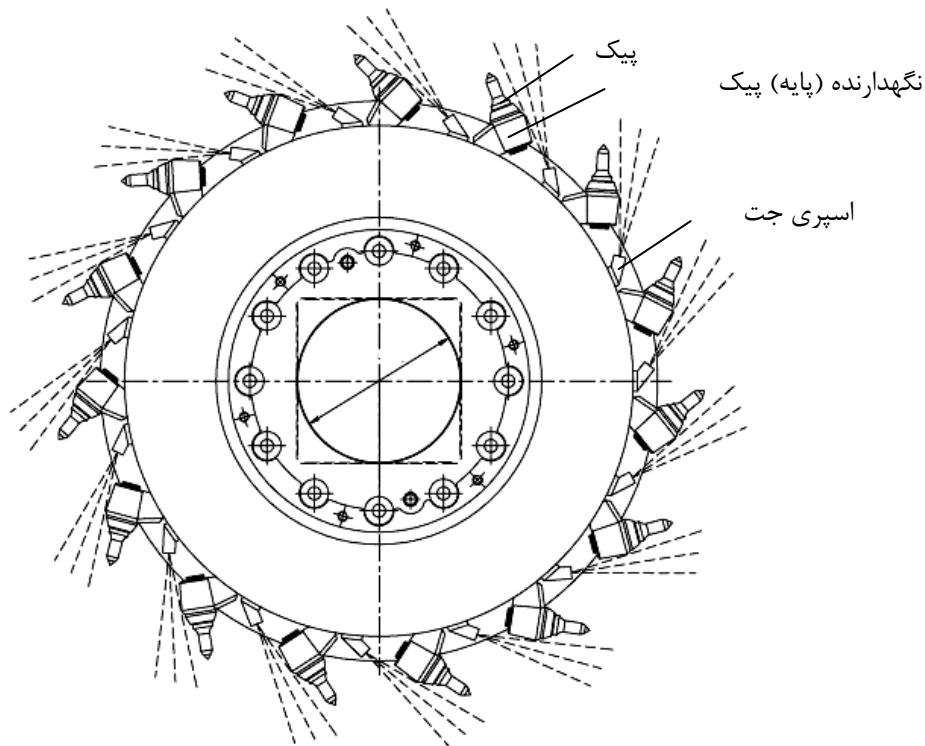
<sup>1</sup>. Cutter head

زیرسیستم هیدرولیک، زیرسیستم برق و زیرسیستم آب میباشد. در اختصاص خرابیها به این زیرسیستم، تمامی خرابیهای مربوط به آب شامل خرابی خنککننده روغن درام، اسپری جتها،



1) سیستم آب، 2) شفت خروجی دندانه‌ای، 3) سرپیتم دوران درام، 4) چرخ دنده، 5) چرخ دنده، 6) تسمه زنجیری و دنده استوانه‌ای، 7) بخش چرخ دنده خورشیدی و انتقال قدرت، 8) اتصالات تحکمی، 9) موتور برقی، 10) درام شکل 4-8- بازوی برش سمت راست درام شیرر (معدن زغالسنگ طبس)

و اتصالات آبی و مخزن آب اسپری جتها که روی هر بازو تعبیه شده است، جزو زیرسیستم آب محسوب میشوند. همچنین تمامی اجزای هیدرولیکی بازو شامل سیلندر هیدرولیک و اتصالات مربوطه و سیستم روغنکاری بازو جزو زیرسیستم هیدرولیک به شمار میآید. چنانکه در بخش برق نیز مطرح شد، موتور برق موجود بر روی بازوها و تمامی حسگرهای حرارت و فشار در زیرسیستم برق دستگاه محسوب میشوند. اما، کلیه اجزای مکانیکی همچون خرابی بدنه درام، پیکها، اتصالات درام به بازو، سیستم تسمه زنجیری انتقال قدرت از موتور به درام، جعبه دنده، بدنه بازوها و غیره جزو زیرسیستم بازوهای برش محسوب میگردند.

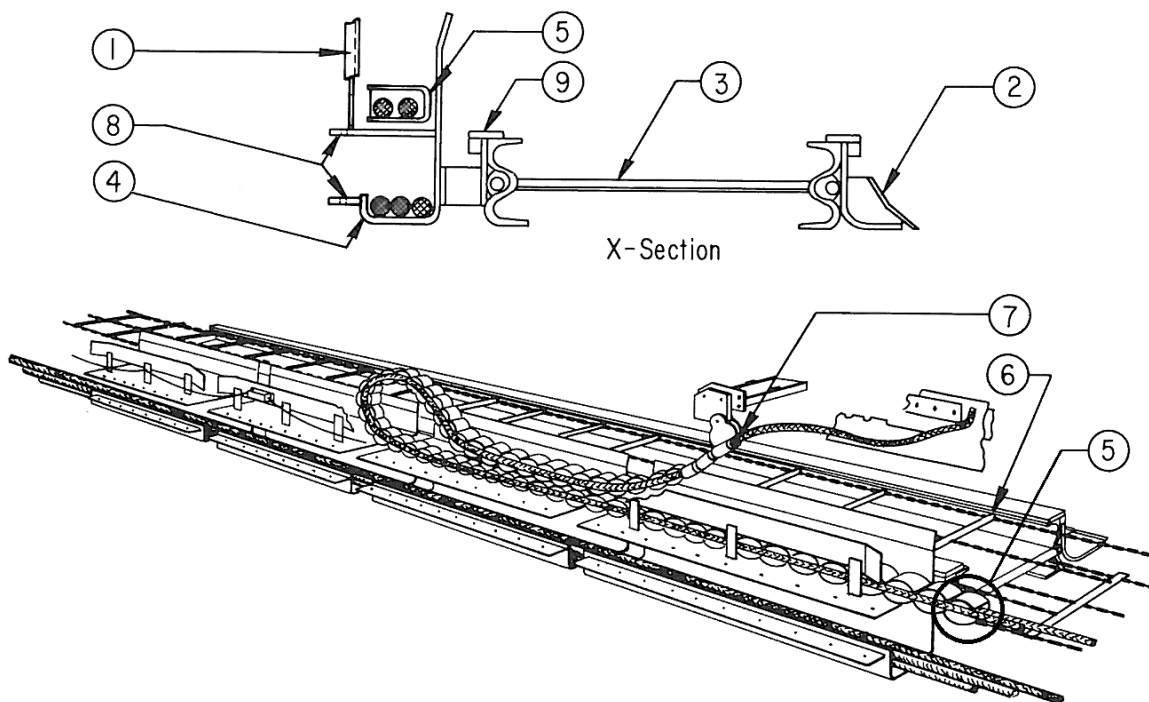


شکل 4-9- نمای کلی بخش درام دستگاه شیرر

#### 4-3-6- زیرسیستم کابل

انرژی برق دستگاه بوسیله یک زیرسیستم مجزا در طول کارگاه استخراج تأمین میشود. این زیرسیستم وظیفه حمل و محافظت از کابل برق فشار قوی و نیز شیلنگ اصلی آب ورودی به دستگاه را بر عهده دارد و لذا به عنوان یک واحد سرویس‌رسان، برقرسانی و آبرسانی به دستگاه را انجام می -

دهد. گرچه در ساختار مهندسی درام شیرها این بخش جزو بخشهای زیرمجموعه سیستم برق دستگاه تعریف گردیده، با این حال، با توجه به تجربیات به دست آمده در معدن طبس، دادههای موجود و نیز تجربیات گذشته در مورد سایر ماشینآلات معدنی برقی مثل LHD ها (Kumar et al., 1992)، زیرسیستم کابل به عنوان یک زیرسیستم مجزا برای دستگاه تعریف گردید. ساختار کلی و اجزای اصلی تشکیل دهنده زیرسیستم کابل در شکل 4-10 ارائه شده است.



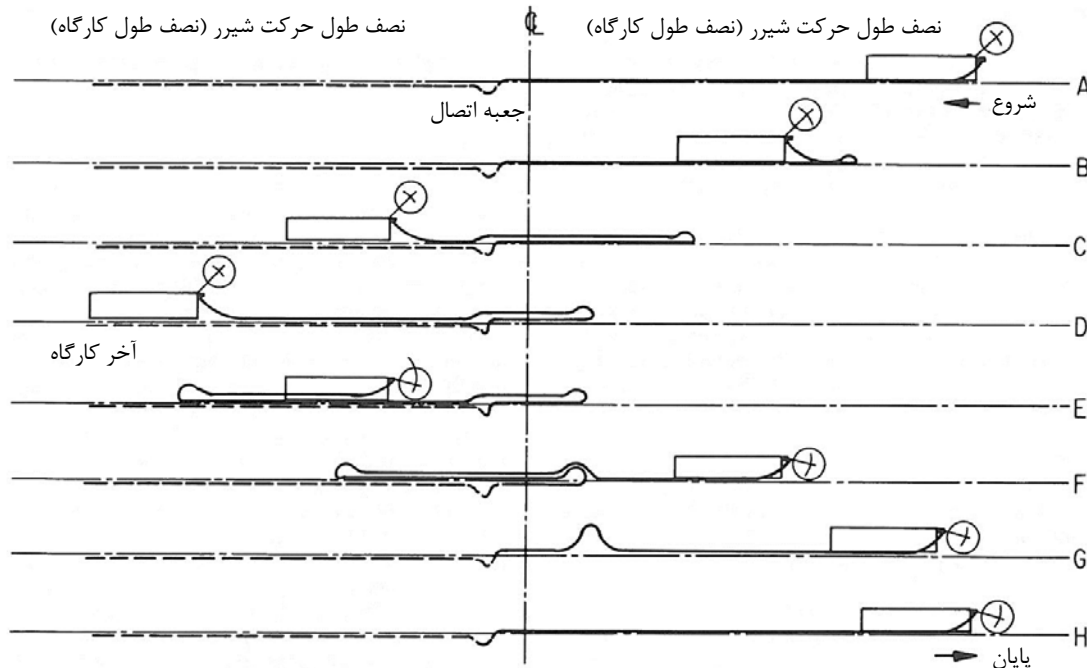
(1) صفحه (دیواره) محافظ متصل به AFC، (2) صفحه شیبدار متصل به AFC، (3) بخش حمل زغال AFC، (4) ریل قرارگیری کابلهای خدماتی، (5) بخش نگهدارنده کابل، (6) زنجیر و اتصالات مربوطه در AFC، (7) بخش اتصال کابل از سیستم کابل به بدنه ماشین (بخش ورودی کابل له ماشین)، (8) بخشهای اتصال AFC به نگهدارندههای قدرتی، (9) نوار محافظ و پوشنده بخش بالای ریل AFC که به عنوان ریل حرکت و کنترل شیرر است. شکل 4-10- ساختار کلی و اجزای اصلی تشکیل دهنده سیستم کابل شیررها (Stefanko, 1983)

چنانکه در شکل 4-10 مشاهده میشود، کابل فشار قوی در لفافی از لاستیکهای ضخیم، از جراحت و صدمات فیزیکی محافظت گردیده و از طریق سیستم اتصال به بدنه وارد دستگاه میشود. به منظور حفظ انعطاف سیستم حمل کابل، بخشهای نگهدارنده (بخش 5) در شکل 4-10) به صورت قطعات جدا از هم طراحی گردیدهاند. در حین حرکت شیرر در طول کارگاه، بخشهای نگهدارنده کابل که به صورت زنجیرهای به هم متصل هستند، در درون ریل مخصوص (فضای پشت بخش 1) توسط دستگاه کشیده شده و روی هم میلغزند. پس از اتمام برش، در مسیر برگشت نیز همین حالت تکرار

میشود. وظیفه اتصال کابل به سیستم اصلی نشان داده شده در شکل 4-10، توسط جعبه اتصال<sup>1</sup> که

تقریباً در میانه طول کارگاه نصب می گردد، انجام میشود. ترتیب حرکت و حالتهای قرارگیری

زیرسیستم کابل شیرر در حین عملیات برش زغالسنگ، در شکل 4-11 نشان داده شده است.



شکل 4-11- ترتیب حرکت و حالتهای قرارگیری زیرسیستم کابل شیرر در حین عملیات برش (Stefanko, 1983)

تمامی خرابیهای این زیرسیستم به صورت مستقل و تنها مربوط به خود آن میباشد و لذا هیچ

زیرسیستمی در تقسیمبندی و شمارش خرابیها، با این زیرسیستم اشتراک ندارد. با توجه به شرایط

طراحی، این بخش از عوامل محیطی آسیبهای فراوانی میبیند که در بخش مطالعه موردی بیشتر به

آن پرداخته خواهد شد.

#### 4-4- نتیجهگیری

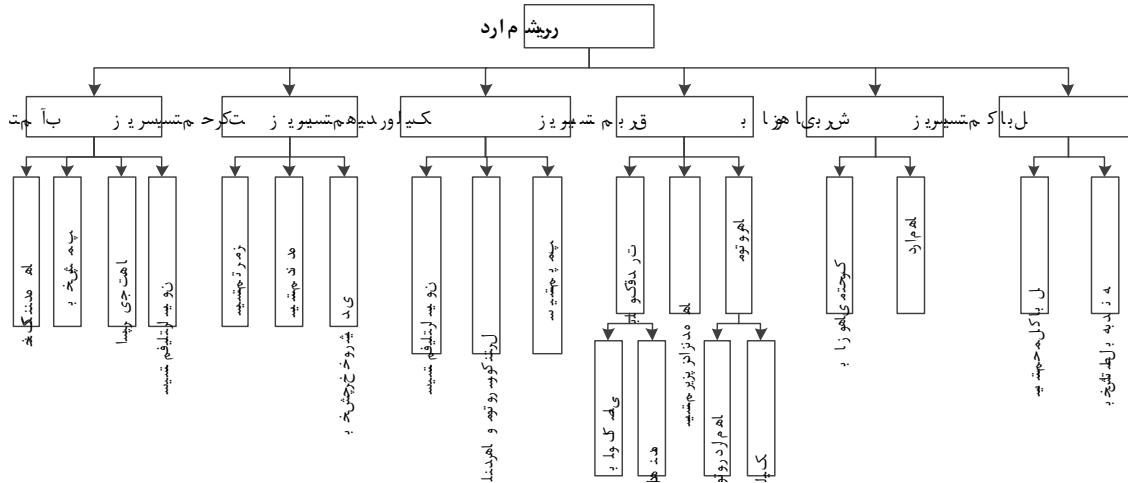
چنانکه در فصول گذشته مورد اشاره قرار گرفت، تعیین زیرسیستمهای عملیاتی یک دستگاه، اولین و

مهمترین مرحله در فرآیند مطالعه و تحلیل قابلیت اطمینان به شمار میآید. در این فصل، به استناد

مطالعات میدانی و نیز بررسی اجزای درام شیررهای مرسوم در بازار، زیرسیستمهای عملیاتی درام

<sup>1</sup>. Junction Box

شیر برای اولین بار تعیین و معرفی گردیدند. با توجه به توضیحات و نقشه‌های ارائه شده در این فصل، ساختار کلی شیر به صورت خلاصه در شکل 4-12 نشان داده شده است.



شکل 4-12- اجزای کلی درام شیرها

در این رساله، سطح زیرسیستمها، به عنوان سطح مدیریتی برای تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه شیر انتخاب شده است. در فصل آینده، نتایج مدلسازی و شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیر معدن طبس ارائه شده و مورد بحث قرار خواهند گرفت.

## فصل پنجم

# مدلسازی و شبیه- سازی قابلیت اطمینان شیرر

### 5-1- مقدمه

در فصل گذشته، زیرسیستمهای عملیاتی دستگاه شیرر به صورت کلی تعیین گردیدند و ساختار دستگاه به صورت سری معرفی شد. با مشخص شدن زیرسیستمهای دستگاه، مرزبندی دقیق



بخشهای مختلف دستگاه مشخص شده و نحوه همکاری آنها برای دستیابی به عملکرد نهایی دستگاه و عملیات برش زغالسنگ شرح داده شد.

در این رساله همانند تمامی مطالعات قابلیت اطمینان، برای مدلسازی قابلیت اطمینان واقعی مبتنی بر زیرسیستمهای تعریف شده دستگاه، یک مطالعه موردی در معدن طبس انجام گردیده است. درام شیرر موجود در این معدن و تمامی دادههای تولید، توقف و خرابی آن مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، قابلیت اطمینان دستگاه با استفاده از دو روش مدلسازی و شبیهسازی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شدهاند.

## 5-2- جمعآوری و طبقه‌بندی دادههای خرابیها

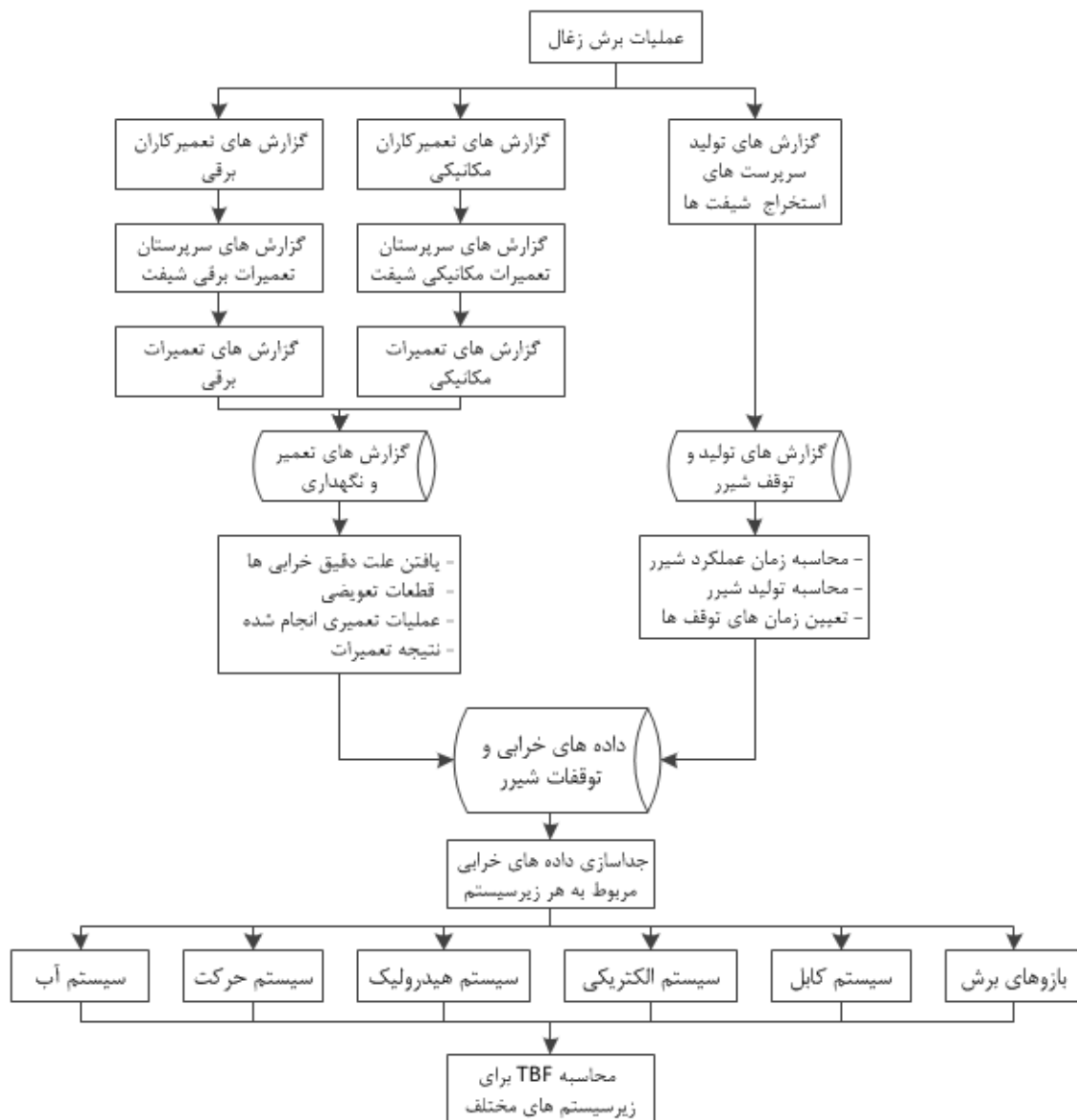
دادههای خرابی، ورودی و ابزار مهم و مورد نیاز برای تحلیل قابلیت اطمینان میباشند. لذا جمعآوری دادههای خرابی، طبقه‌بندی و پردازش آنها فاز اساسی و مهم مطالعات به شمار میآید. در این رساله، به منظور مدلسازی قابلیت اطمینان درام شیرر، دادههای تولید و تعمیر و نگهداری ثبت شده و بایگانی شده مربوط به استخراج پهنه اول معدن شماره یک طبس که به مدت دو سال از آبان ماه 1386 الی آبان 1388 (معادل اکتبر 2007 الی اکتبر 2009) ثبت گردیدهاند، مورد استفاده قرار گرفتهاند. با توجه به اینکه سیستم اداری معدن طبس دارای گواهی مدیریت کیفیت ISO-9002 میباشد، برای تمامی عملیات مهندسی موجود در معدن فرمهای استاندارد تهیه شده و مورد استفاده قرار میگیرند. کلیه مراحل جمعآوری و آمادهسازی دادهها طی فرآیند نشان داده شده در شکل 5-1 انجام گردید. چنانکه در این شکل دیده میشود، به منظور افزایش قابلیت اطمینان دادههای در دسترس، سه لایه مختلف داده به شرح زیر برای تشکیل پایگاه داده<sup>1</sup> اصلی این مطالعه در نظر گرفته شدند:

الف) لایه اطلاعاتی مربوط به تولید، زمان عملکرد و توقفهای شیرر

ب) لایه مربوط به گزارشهای تفصیلی تعمیرکاران بخشهای برقی شیرر

<sup>1</sup>. Database

## ج) لایه مربوط به گزارشهای تفصیلی تعمیرکاران بخشهای مکانیکی شیرر



شکل 5-1- مراحل جمعآوری و آمادهسازی دادههای خرابی

کار اصلی در مرحله جمعآوری داده، عبارت بود از وارد کردن اطلاعات نوشتاری موجود (فرمهای گزارشهای تولید و تعمیرات) مربوط به هر لایه اطلاعات به رایانه و کنترل نواقص و مقایسه آنها، به منظور پوشش حفرههای موجود در دادهها. پس از طی این مراحل و تکمیل پایگاه داده اصلی، طبق شکل 5-1، دادههای مربوط به هر زیرسیستم تعیین و تفکیک شده و به پایگاه داده ویژه هر

زیرسیستم اختصاص داده شدند. در نهایت زمانهای بین خرابیها (TBF) در هر زیرسیستم محاسبه گردیدند. برای محاسبه TBFها، مجموع زمانهای صرف شده برای برش زغال در طی شیفتهای میان دوخرابی، محاسبه شده و زمان محاسبه شده به عنوان زمان بین دو خرابی به خرابیهای متوالی مورد مطالعه اختصاص داده شدند. برای مثال، در شکل 5-2، نحوه محاسبه یکی از زمان بین دو خرابی مربوط به سیستم آب نشان داده شده است. نمونههایی از فرمهای گزارش مورد استفاده و نیز تمامی دادههای مربوط به میزان تولید دستگاه، ساعات عملکرد و نیز توقفهای شیر که در طی این رساله از فرمهای مذکور استخراج گردیده و محاسبه شدهاند، در پیوست "الف" ارائه شدهاند.

خرابی	زمان برش (دقیقه)	تولید (تن)	شیفت	سال (میلادی)	ماه	روز
	330	1163.3	3	8	11	1
	225	827.37	2	8	11	2
	115	423.01	3	8	11	2
	195	746.5	2	8	11	3
تعویض کاسه نمد پشت درام سمت چپ	300	1082.4	3	8	11	3
افت فشار آب به دلیل کثیفی فیلتر	55	155.52	2	8	11	4
	240	709.17	3	8	11	4
	60	55.987	1	8	11	5
	160	416.79	2	8	11	5
	105	264.38	3	8	11	5
	100	155.52	1	8	11	6
تمیزکاری اسپری جتها	335	1188.2	2	8	11	6
مجموع این اعداد = TBF = 1578 دقیقه معادل با 26/3 ساعت	305	864.69	3	8	11	6
	195	684.29	1	8	11	8
	228	746.5	2	8	11	8
	255	818.04	3	8	11	8
	260	948.67	1	8	11	9
تمیزکاری فیلتر آب	235	715.39	2	8	11	9
	235	855.36	3	8	11	9
	275	939.34	1	8	11	10
	165	482.11	2	8	11	10

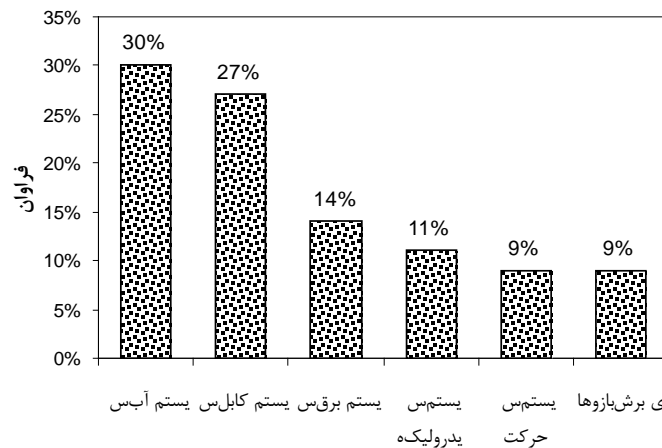
شکل 5-2- مثالی از نحوه محاسبه زمان بین خرابیها (در سیستم آب)

در مجموع، تمامی مراحل جمعآوری، مرتبسازی، طبقه‌بندی و محاسبه زمانهای بین خرابیهای رخ داده در دستگاه، قریب به هفت ماه به طول انجامیدند. همچنین به منظور ارزیابی کیفیت عملکرد دستگاه و نیز کسب اطلاعات تکمیلی در مورد خرابیهای دستگاه و عملیات تعمیر و نگهداری انجام شده، دستگاه در بازه‌های زمانی گسسته، طی یک سال از نزدیک به طور مرتب مورد بازدید و مطالعه

قرار گرفت.

### 3-5- تحلیل پارتو<sup>1</sup>

روش تحلیل پارتو، برای تعیین فراوانی خرابیهای مربوط به زیرسیستمهای دستگاه و نیز تعیین بحرانیترین زیرسیستم، استفاده قرار میشود. برای این منظور، پس از جمعآوری و طبقه‌بندی دادهها، درصد خرابی هر زیرسیستم نسبت به تمام خرابیها محاسبه شده و نمودار ستونی فراوانی خرابی زیرسیستمها، به ترتیب از بیشترین مقدار فراوانی به کمترین مقدار رسم میشود. نمودار پارتو خرابیهای زیرسیستمهای شیرر معدن طبس در شکل 3-5 ارائه شده است.



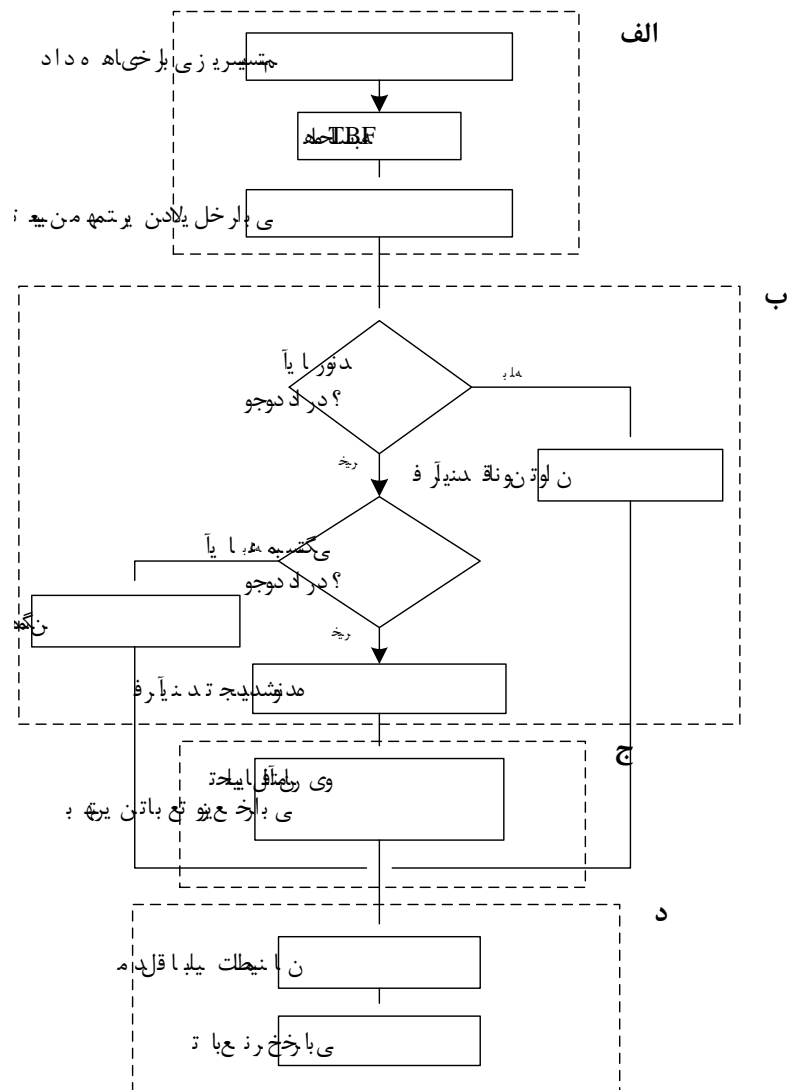
شکل 3-5- نمودار پارتو خرابیهای زیرسیستمهای درام شیرر معدن طبس

چنانکه در شکل دیده میشود، سیستم آب با فراوانی 30 درصد، بحرانیترین زیرسیستم و بازوهای برش و سیستم حرکت با 9 درصد کل خرابیها، بهترین شرایط را دارند. لذا، در تمامی مسائل مدیریتی مربوط به تعمیر و نگهداری این دستگاه، دو زیرسیستم آب و کابل باید بیش از سایر زیرسیستمها مورد توجه قرار گیرند.

### 4-5- روش کلی تحلیل خرابیها و مدلسازی قابلیت اطمینان هر زیرسیستم

<sup>1</sup>. Pareto analysis

با توجه به تعیین زیرسیستمهای درام شیر، برای مدلسازی قابلیت اطمینان دستگاه ابتدا باید قابلیت اطمینان هر زیرسیستم تعیین گردد. برای این منظور، در این فصل مراحل مشابهی به شرح آنچه در شکل 3-5 ارائه شده است، برای مدلسازی و تحلیل خرابیهای هر زیرسیستم انجام میشود. در ادامه، جزئیات مراحل نشان داده شده در شکل 4-5 ارائه میشوند.



شکل 4-5- مراحل مدلسازی قابلیت اطمینان و تحلیل نرخ خرابی هر زیرسیستم

الف) ارائه دادههای خرابی ثبت شده برای زیرسیستم: در این بخش، خرابیهای هر زیرسیستم

به ترتیب وقوع مرتب گردیده و دلایل و شرح خرابی، عملیات تعمیراتی انجام شده و زمانهای بین

خرابی (TBF) محاسبه شده، ارائه میشوند. سپس با استفاده از اطلاعات موجود، مهمترین دلایل

خرابیهای آن زیرسیستم و فراوانی هر یک از حالتیهای خرابی، ارائه شده و مورد بررسی و بحث

قرار میگیرند.

ب) **آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها** : در این بخش آزمونهای روند و همبستگی سری به صورت گرافیکی و تحلیلی، بر روی دادهها انجام میگیرند و با توجه به نتایج حاصله، نوع دادهها و بهترین روش مدلسازی قابلیت اطمینان تعیین میگردد.

ج) **تحلیل دادهها**: در این قسمت، محاسبات مربوط به تعیین بهترین تابع چگالی احتمال خرابی و تخمین پارامترهای مدل بر روی دادهها انجام میشود. با توجه به شرایط و تعداد دادههای مورد استفاده، در این رساله از روش کلموگروف-اسمیرنوف برای انتخاب بهترین تابع چگالی خرابی استفاده شده است. همچنین، تطابق ظاهری توابع مورد بررسی با هیستوگرام دادهها و نیز نمودار P-P (برای کنترل اختلاف احتمالی پیشبینی شده با تابع توزیع انتخابی با دادههای واقعی)، به عنوان شاخصهای کمکی، برای انتخاب بهترین توزیع مورد استفاده قرار گرفتهاند.

برای تحلیل دادهها، از نرمافزار تخصصی قابلیت اطمینان، Weibul++-6 (ReakSoft, 2002) و نرمافزار آماری Easyfit-5.5 (MathWave, 2010) استفاده شده است. این نرمافزارها با محاسبه پارامترهای آماری، کاربر را در انتخاب بهترین تابع برازششده بر دادههای موجود یاری مینمایند. گرچه در مجموع تعداد 57 توزیع آماری در این نرمافزارها مورد بررسی قرار میگیرند، با این حال فقط هشت تابع اصلی شامل توابع نمایی، گاما، گامای تعمیم یافته، نرمال، لاگنرمال، وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری و ارلانگ به عنوان توابع شناخته شده و پر کاربرد در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده میشوند (Dhillon, 2008; Kececiyoglu, 2002; Pavlovic, 1989). لذا در این رساله نیز، از این هشت تابع به عنوان توابع اصلی استفاده شده است.

د) **محاسبه مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی و رسم منحنیهای مربوطه** : در این مرحله تابع قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی محاسبه میگردند و منحنیهای آنها برای ارائه نمای گرافیکی از توابع، رسم میشوند. سپس، منحنیهای قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته و تفاسیر مربوط به آنها ارائه میگردند.

با انجام مراحل فوق، زمینه برای محاسبه قابلیت اطمینان کل دستگاه فراهم میشود. در ادامه، نتایج مراحل چهارگانه مذکور، برای هر یک از زیرسیستمها ارائه شده و سپس قابلیت اطمینان کل دستگاه محاسبه خواهد شد.

## 5-5- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستمها

### 5-5-1- مدلسازی قابلیت اطمینان زیرسیستم آب

#### الف- دادههای خرابی

با توجه به پایگاه دادههای تشکیل شده و پیوست "الف"، کل دادههای جمعآوری شده برای زیرسیستم آب درام شیرر طبس به شرح جدول 5-1 میباشد. با دقت در اطلاعات ارائه شده در این جدول، میتوان مهمترین دلایل خرابی سیستم آب شیرر را به شرح شکل 5-5 خلاصه نمود.



شکل 5-5- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم آب شیرر

چنانکه در شکل مشاهده میشود، مسدودشدگی اسپری جتها با فراوانی 40 درصد، دلیل اصلی

خرابی سیستم آب شیرر در معدن طبس بوده و باعث توقفهای زیادی در طی عملیات میشود.

همچنین، 74٪ کل خرابیهای این سیستم ناشی از دو عامل انسداد اسپری جتها و کثیفی فیلترها

میباشد. این موضوع نشان میدهد که برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم آب شیرر طبس، بازرسی

جدول 5-1- دادههای خرابی مربوط به سیستم آب

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	افت فشار آب (کثیفی فیلتر)	1/28	1/28
2	افت فشار آب (کثیفی فیلتر)	4/5	5/78
3	تمیزکاری تعدادی از اسپری جتها مسدود شده	150/12	155/9
4	تمیزکاری اسپری جتها	96/5	252/4

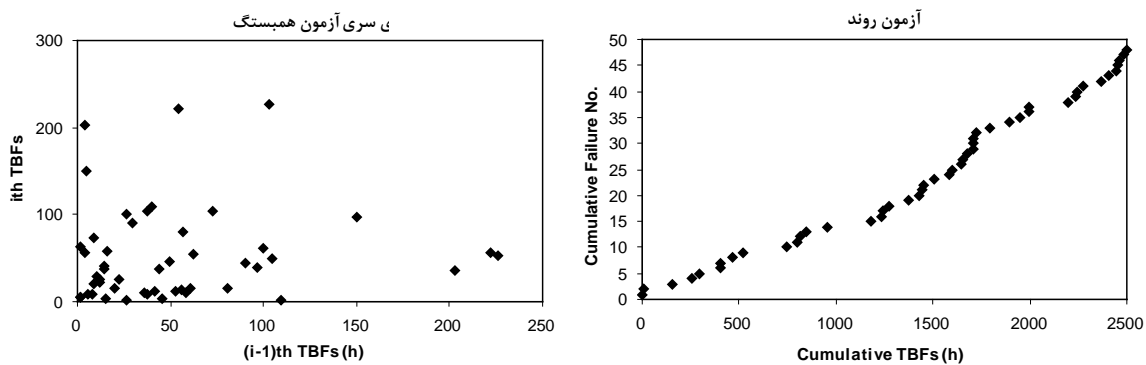
292/4	40	سیستم آب خوب کار نمی‌کرد، تعویض فیلتر آب	5
401/4	109	خرابی فیلتر آب (تمیزکاری)	6
403/43	1/67	افت فشار آب، بازکردن فیلتر و ارسال آن به سطح برای تمیزکاری	7
465/94	62/5	تمیزکاری اسپری جتها	8
520/32	54/4	مشکل افت فشار (تمیزکاری فیلتر آب)	9
742/22	222	تمیزکاری اسپری جتها	10
798/15	55/9	تمیزکاری اسپری جتها	11
812/27	14/1	آسیب دیدگی شیلنگ آب ورودی	12
849/6	37/3	تعویض شیر فیلتر آب به دلیل نشتی بیش از حد	13
952/92	103	تمیزکاری اسپری جتها	14
1179/3	226	تمیزکاری و شستشوی سیستم آب توسط اسید رقیق	15
1232/3	52/9	افت فشار آب به دلیل کثیفی فیلتر	16
1244/3	12	تمیزکاری اسپری جتها	17
1270/6	26/3	تمیزکاری فیلتر آب	18
1370/4	99/8	بازرسی اسپری جتها و تمیزکاری آنها	19
1431/2	60/8	افت فشار آب به دلیل گرفتگی فیلتر	20
1446/1	14/9	نشتی زیاد تقسیم کننده آب فیلتر	21
1450/1	3/95	تعویض فشنگی فیلتر	22
1506/6	56/6	افت فشار آب	23
1586/9	80/3	نشتی آب از خروجی فیلتر	24
1601/7	14/8	گرفتگی زیاد فیلتر و ارسال آن به سطح برای تمیزکاری	25
1643/2	41/5	تمیزکاری اسپری جتها	26
1655/4	12/2	قطع و وصل جریان برق به علت افت فشار آب و کثیفی فیلتر	27
1678/1	22/8	افت فشار بسیار زیاد آب (گرفتگی یکی از شیلنگها)	28
1704/4	26/3	تمیزکاری اسپری جتها	29
1706/1	1/67	تمیزکاری فیلتر	30
1711/9	5/83	تمیزکاری اسپری جتها	31
1720/6	8/75	تعمیر شیر اتصال شیرر به دلیل نشتی	32
1793/4	72/8	بریدگی یکی از شیلنگهای آب دستگاه	33
1898/1	105	تمیزکاری اسپری جتها	34
1947/6	49/5	آسیب دیدگی شیلنگ اصلی آب ورودی به دستگاه	35
1993/3	45/7	قطع و وصل مکرر برق دستگاه، تعویض فیلتر آب	36
1997	3/67	تمیزکاری اسپری جتها	37
2200/1	203	تعویض شیلنگ آب درام سمت راست	38
2236/1	36	نصب تقویت کننده فشار روی شیلنگ آب روی دستگاه	39
2246/8	10/8	نشتی آب از محل ورودی تقویت کننده آب درامها	40
2276/3	29/5	تمیزکاری اسپری جتها	41
2366/2	89/9	تعویض فیلتر PD و تمیزکاری فیلتر اصلی برای رفع افت فشار	42
2410/2	44	تمیزکاری اسپری جتها	43
2447/7	37/5	تمیزکاری اسپری جتها	44
2455/4	7/75	تمیزکاری اسپری جتها	45
2463/9	8/52	تمیزکاری اسپری جتها	46
2483/9	19/9	تمیزکاری اسپری جتها	47
2499/6	15/8	تمیزکاری اسپری جتها	48
2557/5	57/9	تعمیر شیلنگ آب جدا شده از دستگاه	49
2568/4	10/9	تعمیر شیلنگ روی شیرر	50



مرتب اسپری جتها و تمیزکاری فیلترهای آب شیرر، بهترین نتیجه را در پی خواهد داشت.

### ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

در این مرحله، دادههای خرابی سیستم آب از نظر وجود روند و همبستگی سری مورد ارزیابی قرار گرفتند. طبق موارد ذکر شده، به منظور ارزیابی دقیق نوع دادهها، آزمونهای گرافیکی و تحلیلی به طور همزمان بر روی دادهها انجام شدند. نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی به ترتیب در شکل 5-6 و جدول 2-5 ارائه شده است.



شکل 5-6- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها ی خرابی سیستم آب

جدول 2-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی سیستم آب

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمیشود ( $U > 76/17$ )	92/67	98	50

از آنجایی که شکل قرارگیری نقاط در آزمون روند بسیار به حالت خطی نزدیک است، مشخص میشود که دادههای خرابی سیستم آب، دارای روند نیستند و لذا به صورت مانا توزیع شدهاند.

همچنین، محاسبات جدول 2-5 نیز نشان میدهد که با توجه به بزرگتر بودن شاخص  $U$  از مقدار

بحرانی ( $76/17$ )، فرض صفر رد نمیشود و آزمون تحلیلی نیز عدم وجود روند در دادهها را تأیید

میکند. پراکندگی نامنظم نقاط در آزمون همبستگی سری، بیانگر آن است که دادهها دارای

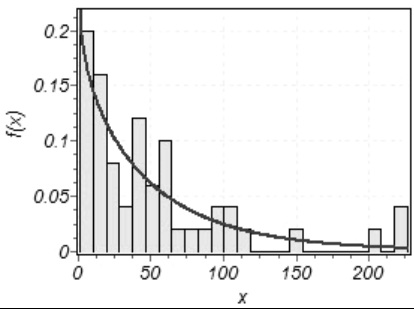
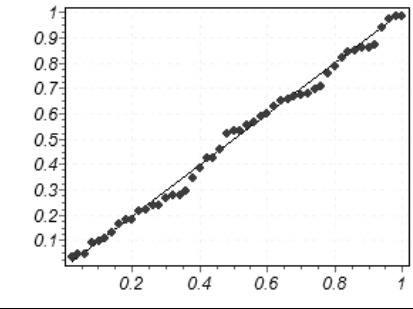
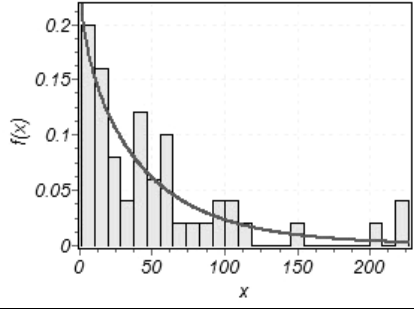
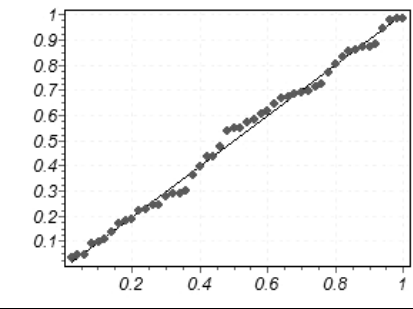
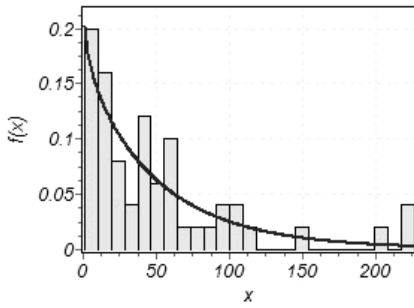
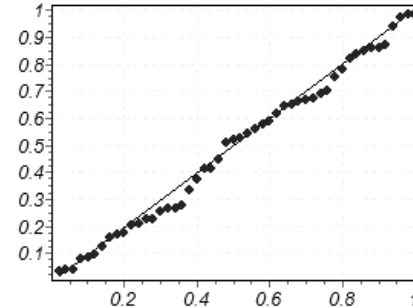
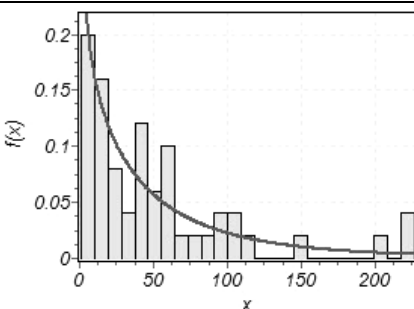
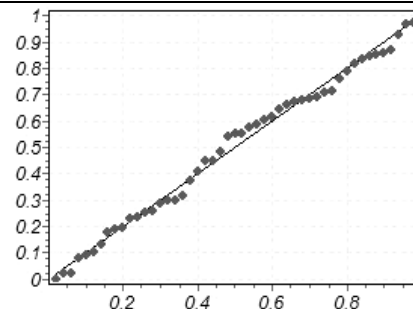
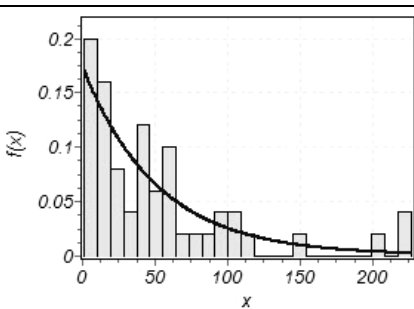
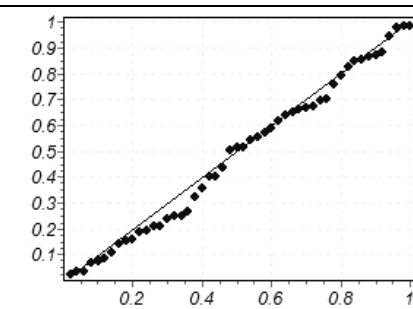
همبستگی سری نیستند و به صورت مستقل از هم توزیع شدهاند. نتایج دو آزمون مذکور نشان

میدهند که فرض مستقل و مانا بودن دادههای خرابی سیستم آب شیرر درست است و لذا، روش

فرآیند تجدیدشونده بهترین روش برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم می باشد.

### ج- تحلیل دادهها

در این مرحله، زمانهای بین خرابیها (TBF) به عنوان داده اصلی وارد نرمافزارهای مورد اشاره شدند. سپس، تحلیل آماری دادهها با استفاده از هر دو نرمافزار انجام شد. در طی تحلیل داده، میزان مطابقت هشت تابع پر کاربرد شرح داده شده، با دادههای موجود ارزیابی شدند. بهترین تابع با توجه به تطابق ظاهری تابع توزیع چگالی احتمال با هیستوگرام دادهها و نیز کمینه بودن نتیجه آزمون تطابق کلموگروف-اسمیرنوف (K-S) انتخاب گردید. در پایان، به منظور کنترل اختلاف میزان احتمال پیشبینی شده توسط تابع توزیع انتخابی با دادههای واقعی، از نمودار P-P استفاده شد. نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم آب شیرر، در شکل 5-7 ارائه شده است. چنانچه مشاهده میشود، پنج تابع دارای کمترین K-S که بر دادهها منطبق میباشند به ترتیب عبارتند از: توزیع گاما، وایبول دو پارامتری، گامای تعمیم یافته، وایبول سه پارامتری و توزیع نمایی. خرابیهای این سیستم با فواصل زمانی تا 250 ساعت نیز رخ داده است و فراوانی دادههای مربوط به مقادیر کوچکتر TBF بیشتر از فراوانی مقادیر بزرگتر است. هیستوگرامهای حاصل از تحلیل داده مبین آن است شکل توزیع تمامی پنج تابع مذکور بسیار شبیه به هم بوده و همچنین مقادیر K-S توابع نیز بسیار به هم نزدیک است. همین موضوع در نمودارهای P-P ترسیم شده نیز قابل مشاهده است. لذا، اختلاف زیادی بین مقادیر تجربی و مقادیر به دست آمده از توابع توزیع مذکور وجود ندارد و روند نقاط به خط نیمساز X-Y نزدیک هستند. اما، با توجه به میزان MTBF، مشاهده میشود که میانگین زمان خرابیهای محاسبه شده توسط توزیع گاما با مقدار واقعی محاسبه شده در معدن (51/37) برابر میباشد ولی سایر توابع توزیع مقادیری غیر از این مقدار را تخمین میزنند. بنابراین، با در نظر گرفتن نتایج فوق، چنین نتیجهگیری میشود که رفتار خرابی سیستم آب شیرر معدن طبس از تابع گاما تبعیت میکند.

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Gamma			0/0677 51/372
Weibull-2P			0/0778 49/47
Gen. Gamma			0/0795 51/99
Weibull-3P			0/0816 52/62
Exponential			0/0959 51/36
<p><math>\alpha = 58/36</math> <math>\beta = 0/88</math> پارامترهای بهترین توزیع: MTBF واقعی: 51/37 ساعت</p>			

شکل 5-7- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم آب شیرر

## د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

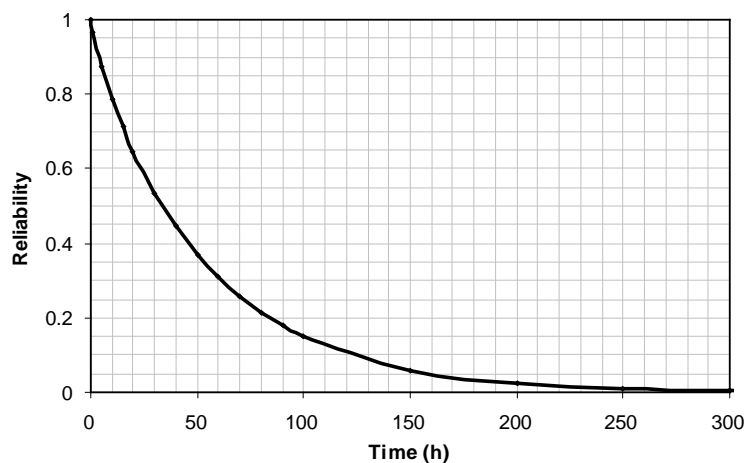
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل دادهها و مقادیر محاسبه شده برای  $\alpha$  (58/36) و  $\beta$  (0/88)، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم آب شیر طمس به صورت روابط 1-5 و 2-5 محاسبه گردید. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 5-8 و 5-9 ارائه شدهاند.

$$R_{water}(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\alpha^{\beta} \Gamma(\alpha)} s^{\beta-1} e^{-\frac{s}{\alpha}} ds = \int_t^{\infty} 0.0255 s^{-0.12} e^{-0.0171s} ds \quad (1-5)$$

$$= -6.78 \Gamma(0.88, 0.00171t)$$

(2-5)

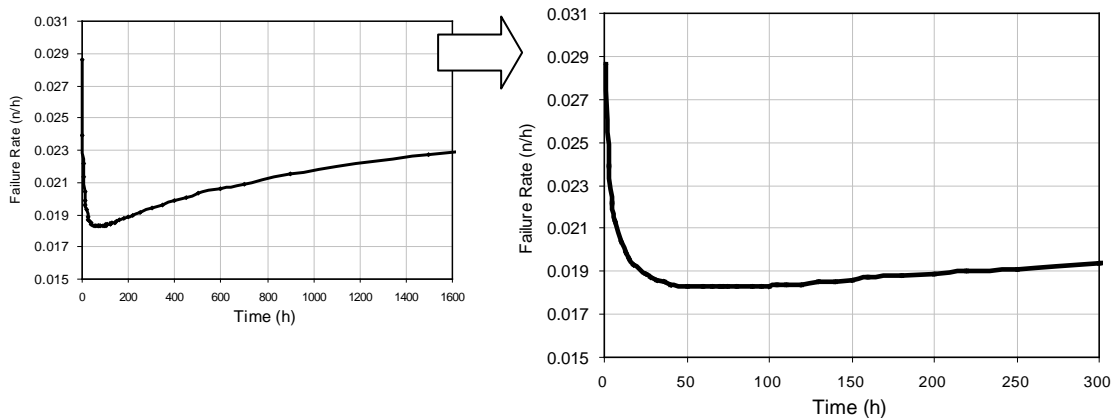
$$\lambda_{water}(t) = \frac{t^{\beta-1} e^{-\frac{t}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta) [1 - \Gamma(\frac{t}{\alpha}; \beta)]} = \frac{t^{-0.12} e^{-\frac{t}{58.36}}}{38.89 [1 - \Gamma(\frac{t}{58.36}; 0.88)]}$$



شکل 5-8- نمودار قابلیت اطمینان سیستم آب درام شیر معدن طمس

با دقت در شکل 5-8، مشخص میشود که قابلیت اطمینان سیستم آب شیر پس از 300 ساعت عملیات پیوسته برش به نزدیکی صفر میرسد. این کمیت بدین معنی است که پس از طی 300 ساعت، سیستم آب شیر صددرصد خراب شده و عملکرد آن متوقف خواهد شد. بنابراین ضروری است تا برای پرهیز از چنین خسارت عملیاتی، تدابیری اندیشه شود. همچنین منحنی نشان میدهد که پس از طی حدود 100 ساعت، احتمال خرابی سیستم آب شیر طمس به بیش از 80٪ میرسد که

رقم قابل توجهی میباشد.



شکل 5-9- نمودار نرخ خرابی سیستم آب شیرر معدن طبس

با دقت در نمودار نرخ خرابی سیستم (شکل 5-9)، مشخص میشود که سیستم آب شیرر طبس دارای رفتار خرابی بسیار مشابه به منحنی وان شکل (شکل 2-1) میباشد. چنانچه در این منحنی مشخص است، این سیستم دارای طول عمر مفید بسیار کوتاهی میباشد. نرخ خرابی این سیستم از حدود 0/029 خرابی در ساعت آغاز شده و پس از 45 ساعت، بازه شروع کار سیستم اتمام یافته و بازه عمر مفید آغاز میشود. منحنی نشان میدهد که این سیستم در کل 55 ساعت عمر مفید داشته و پس از طی این مدت و سپری نمودن 100 ساعت، مرحله فرسودگی سیستم آغاز میشود. نرخ خرابی از این زمان به بعد افزایش یافته و در پایان پهنه اول استخراج به مقدار 0/024 خرابی در ساعت می - رسد. حداقل نرخ خرابی محاسبه شده برای سیستم آب شیرر 0/0183 میباشد. مقادیر فوق نشان میدهند که سیستم آب شیرر دارای پتانسیل بالای خرابی و نرخ فرسودگی شتابداری است و این موضوع عملکرد این زیرسیستم مهم درام شیرر را به شدت تحت تأثیر قرار میدهد. در فصل آینده راهکارهای کنترل این موضوع و کاهش نرخ خرابی سیستم آب شیرر ارائه خواهد شد.

## 5-5-2- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم حرکت

### الف- دادههای خرابی

دادههای خرابی مربوط به سیستم حرکت شیرر طبس به صورت جدول 5-3 نشان داده شده است.

جمع‌بندی و طبقه‌بندی داده‌ها نشان می‌دهد که فراوانی مهمترین دلایل خرابی این سیستم به صورت شکل 5-10 می‌باشد.

جدول 5-3- داده‌های خرابی مربوط به سیستم حرکت

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	دستگاه فقط به سمت تونل باربری حرکت کرده و به سمت تونل تهویه حرکت نمی‌کند.	300/63	300/63
2	دستگاه حرکت نمی‌کند.	52/85	353/48
3	دستگاه حرکت نمی‌کند.	33/03	386/52
4	مشکل فنی چرخ دنده خورشیدی راست، باز شده و روانکاری گردید و مجدداً نصب شد.	172/43	558/95
5	دستگاه به دلیل مشکل فنی چرخ خورشیدی از ریل حرکت خویش خارج شده است.	371/6	930/55
6	ترمز دستگاه و سیستم حرکت مشکل داشت.	80/48	1011/03
7	مشکل فنی در ترمز	30/46	1041/5
8	مشکل فنی در ترمز، دستگاه روشن میشد ولی حرکت نمی‌کرد	19/37	1060/87
9	نشستی روغن از سیستم حرکت، باز کردن و تعویض چند قطعه	368/78	1429/65
10	بازرسی نشستی پمپ هیدرولیک و سیستم ترمز	51/9	1481/55
11	شارژ روغن به مخزن به دلیل نشستی از سیستم حرکت	230/35	1711/9
12	بازرسی و تعمیر نشستی روغن	190	1901/9
13	شارژ روغن به مخزن سمت چپ سیستم حرکت	108/23	2010/13
14	روانکاری و گریسکاری چرخ خورشیدی به دلیل عملکرد و ایجاد سر و صدا	26/75	2036/88
15	دستگاه از ریل حرکت خویش خارج شده، به دلیل مشکل فنی در چرخ خورشیدی و نشستی روغن از سیستم حرکت	139/74	2230/32



شکل 5-10- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم حرکت شیرر

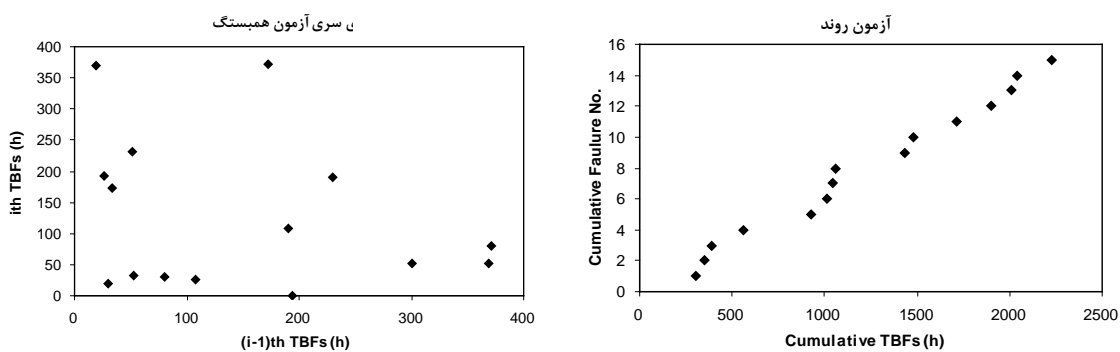
همانطور که در شکل ملاحظه میشود، خرابی چرخ خورشیدی، اشکال فنی سیستم ترمز و نشستی

روغن، سه عامل اصلی خرابی و توقفهای سیستم حرکت شیرر به شمار می‌آیند. لذا، برای بهبود

عملکرد و کاهش توقفهای این سیستم، بازرسی مرتب و کنترل این سه بخش ضروری است و باید در برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه دستگاه مورد توجه قرار گیرند.

### ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی انجام شده بر روی دادههای خرابی، به ترتیب در شکل 5-11 و جدول 5-4 ارائه شده است. با توجه به حالت خطی نقاط در آزمون روند و پراکندگی بینظم آنها در آزمون همبستگی سری (شکل 5-11)، مشخص میشود که دادههای خرابی سیستم حرکت شیر دارای روند و همبستگی سری نیستند. همچنین با توجه به عدم رد فرض صفر در آزمون تحلیلی روند، iid بودن دادهها به طور قطع پذیرفته میشود. لذا، روش فرآیند تجدیدشونده بهترین روش برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم میباشد.



شکل 5-11- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادههای خرابی سیستم حرکت

جدول 5-4- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای سیستم حرکت

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95%	روش مدلسازی انتخابی
15	28	23/24	رد نمیشود ( $U > 16/9$ )	فرآیند تجدید شونده

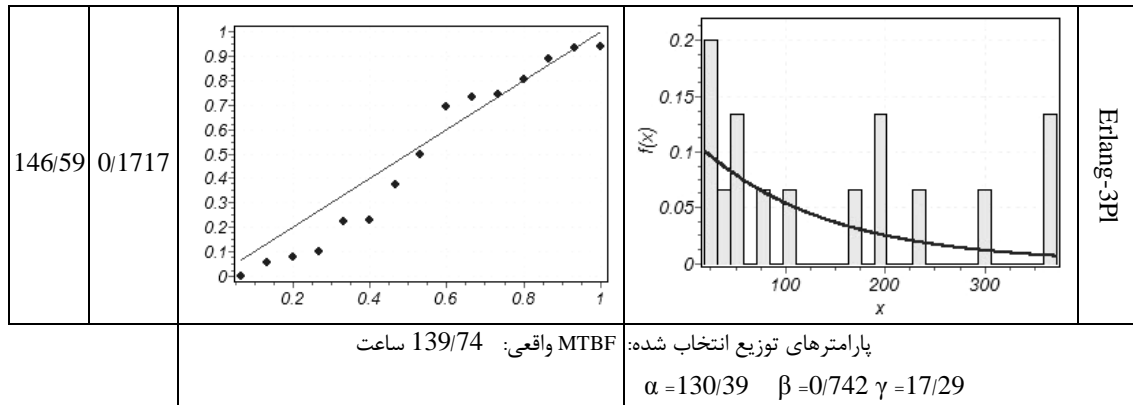
### ج- تحلیل دادهها

در این بخش، دادههای خرابی ارائه شده در جدول 5-3 وارد نرمافزارهای تحلیل آماری گردیده و خروجی تحلیلهای انجام شده در شکل 5-12 ارائه شده است. با دقت در این شکل، به یک مورد استثنایی در تحلیل دادهها بر میخوریم. چنانکه دیده میشود، در توابع پنج اولویت اول که دارای

K-S کمتری نسبت به سایر توزیعهای آماری هستند، توزیع نمایی دارای کمترین مقدار K-S و توزیع ارلانگ سه پارامتری دارای بیشترین مقدار بوده و سه توزیع دیگر در میان این اولویتبندی قرار دارند.

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Exponential			0/153 148/59
Weibull-2P			0/1619 143/9
Gen. Gamma			0/1624 154/16
Weibull-3P			0/1659 171/51



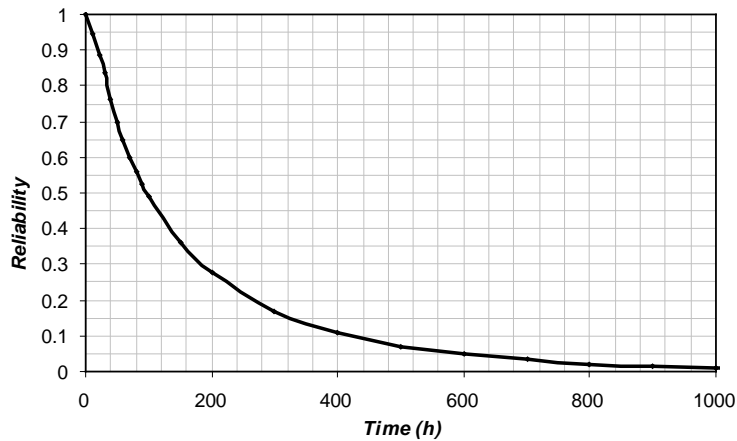


شکل 5-12- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم حرکت شیرر

اما، با این وجود توزیع نمایی به عنوان تابع توزیع خرابی برای این سیستم انتخاب نشده است. همچنین توابع وایبول دو پارامتری و گامای تعمیم یافته نیز رد شده و تابع توزیع وایبول سه پارامتری انتخاب گردیده است. دلیل این امر نکته ظریفی است که نمی توان در انتخاب تابع توزیع مناسب در تحلیلهای قابلیت اطمینان نادیده گرفت؛ سه تابع اول ردهبندی گرچه دارای K-S کمتری هستند، با این حال، توابع توزیع احتمال آنها انطباق ظاهری مناسبی بر دادهها ندارند و لذا به تبعیت از تابع چگالی احتمال، منحنیهای قابلیت اطمینان حاصل از این توابع نیز انطباق خوبی بر دادهها نخواهند داشت. همچنان که مشاهده میشود، تابع وایبول سه پارامتری نسبت به سایر توابع از انطباق بهتری با دادههای واقعی برخوردار بوده و پس از آن نیز تابع ارلانگ سه پارامتری با دادهها همخوانی بیشتری دارد. لذا، تابع وایبول سه پارامتری، به رغم دارا بودن بالاترین میانگین خرابی، به ناچار به عنوان تابع توزیع احتمال خرابی سیستم حرکت درام شیرر طبعی انتخاب گردیده است.

#### د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحلیل دادهها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم حرکت شیرر طبعی به صورت روابط 3-5 و 4-5 حاصل میشوند. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 5-13 و 5-14 ارائه شدهاند.

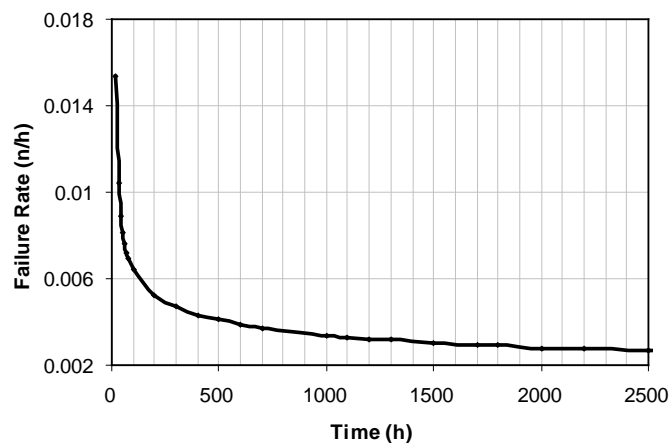


شکل 5-13- نمودار قابلیت اطمینان سیستم حرکت درام شیرر معدن طبس

$$R_{haulage}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-17.29}{130.39}\right)^{0.742}\right) \quad (3-5)$$

$$\lambda_{haulage}(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} = 0.00568 \left(\frac{t-17.29}{130.39}\right)^{-0.258} \quad (4-5)$$

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم حرکت شیرر طبس نشان میدهد که قابلیت اطمینان این سیستم پس از حدود 1000 ساعت، تقریباً به صفر میرسد. قابلیت اطمینان این سیستم پس از 40 ساعت به میزان 25٪ کاهش مییابد. طبق این منحنی، احتمال اینکه سیستم حرکت شیرر 100 ساعت بدون خرابی کار کند 49٪ میباشد.



شکل 5-14- نمودار نرخ خرابی سیستم حرکت درام شیرر معدن طبس

با دقت در نمودار نرخ خرابی سیستم (شکل 5-14)، مشخص میشود که سیستم حرکت شیرر طبس

دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی کاهنده می باشد. نرخ خرابی در زمان شروع کار (زمان صفر) برابر با 0/016 خرابی در ساعت بوده و با نزول سریع پس از 100 ساعت، به 0/006 میرسد. از این زمان به بعد نرخ خرابی با یک روند کاهنده ملایم، در زمان 2000 ساعت به مقدار 0/003 میرسد. بر اساس این منحنی، سیستم حرکت شیرر طبس در طی پهنه اول به دوره عمر مفید خود نرسیده و همچنان در دوره شروع کار، به کار خود پایان داده است. این منحنی نشان میدهد که اگر شرایط خاصی بر عملیات حاکم نباشد، این سیستم نیازی به تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه نداشته و تنها در زمان وقوع خرابی نیاز به تعمیرات اصلاحی پیدا میکند. اما در شرایط خاص، ممکن است استراتژی متفاوتی اتخاذ شود. در فصل بعد در این مورد بیشتر بحث خواهد شد.

### 5-3- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک

#### الف- دادههای خرابی

دادههای خرابی جمعآوری شده از سیستم هیدرولیک درام شیرر معدن طبس به شرح جدول 5-5 میباشد. با توجه به این جدول، انواع دلایل خرابی سیستم هیدرولیک شیرر معدن طبس مشخص گردیده و فراوانی آنها در شکل 5-15 نشان داده شده است.

جدول 5-5- دادههای خرابی مربوط به سیستم هیدرولیک

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	شارژ روغن به دلیل کمکردن روغن توسط دستگاه (احتمال نشستی)	285/05	285/05
2	بازرسی و تعمیر نشستی روغن از مخزن اصلی	9/75	294/8
3	شارژ روغن به مقدار زیاد (دستگاه تقریباً هیچ روغنی نداشت)	12/42	307/22
4	شارژ روغن (دستگاه روغن کم کرده است)	251/73	558/95
5	تعویض فیلتر روغن (کثیفی فیلتر)	178/12	737/07
6	تعویض روغن بازوی سمت راست	470/37	1207/433
7	تعویض روغن	271/95	1479/38
8	دستگاه مدت زمان کوتاهی پس از روشن شدن خاموش شد، فیلتر روغن آسیب دیده است.	185/02	1664/4
9	نشستی روغن از ورودی و خروجی خنککننده	18	1682/4
10	تعویض فیلتر اصلی روغن و دو فیلتر دیگر	5/42	1687/82
11	درام سمت چپ بالا نمیرود، تعویض شیر الکترو-مکانیکی شیلنگ روغن	119/7	1807/52
12	تعویض فیلتر روغن PD	46/38	1853/9
13	تعویض شیلنگ روغن خنککننده روغن	109/73	1963/63
14	تعویض فیلتر و تعویض روغن مخزن اصلی	38/33	2001/97

2010/13	8/17	تعویض فیلتر PS	15
2020/55	10/42	بالا و پائین رفتن بازوی سمت چپ از کنترل خارج شد، شیر هیدرولیک بازو مشکل داشت.	16
2056/63	36/08	خنککننده دارای نشستی بود، واشرها ی ورودی و خروجی تعویض گردیدند.	17
2278/92	222/28	تعویض فیلتر روغن PD، به دلیل کثیفی باعث قطع و وصل جریان برق دستگاه میگردد.	18

شکل 5-15 نشان میدهد که سه عامل؛ خرابی فیلترها، کمکردن و نشست روغن و خرابی شیرها و شیلنگها، اصلیترین دلایل خرابی سیستم هیدرولیک شیرر طبس میباشدند. در این میان، خرابی انواع فیلترهای موجود در مدار هیدرولیک دستگاه، با فراوانی 44٪، مهمترین دلیل خرابی سیستم هیدرولیک شیرر به شمار میآید. لذا بازرسی و کنترل مرتب فیلترهای روغن و انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر روی این قطعات، باعث جلوگیری از حدود نیمی از خرابیهای این بخش از دستگاه میشود.



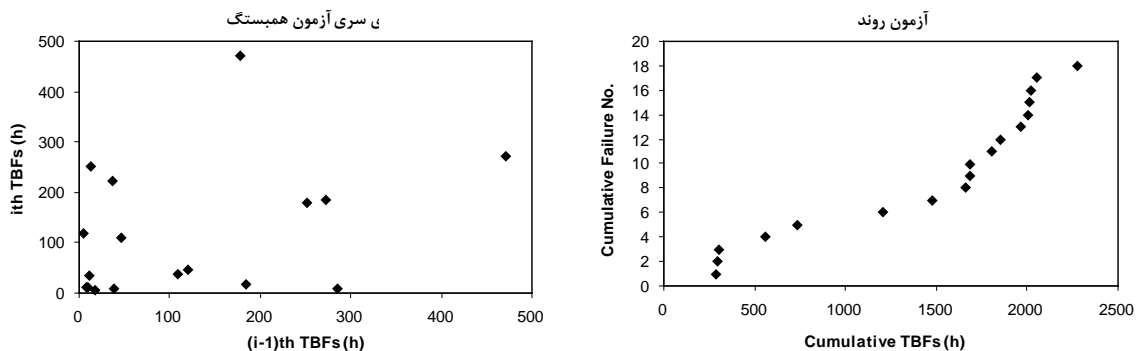
شکل 5-15- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم هیدرولیک شیرر

### ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

نتایج آزمونهای گرافیکی و تحلیلی انجام شده بر روی دادههای خرابی سیستم هیدرولیک شیرر به ترتیب در شکل 5-16 و جدول 5-6 ارائه شده است. چنانچه در جدول مشاهده میشود، در آزمون تحلیلی، فرض صفر در مورد دادههای سیستم هیدرولیک پذیرفته شده و دادهها دارای روند نمیباشند. اما در آزمون گرافیکی، نقاط به طور کامل به صورت خط قرار نگرفتهاند و در یک بخش شکستگی وجود دارد که دادهها را به دو بخش مجزا تقسیم نموده است. این دو بخش به تنهایی دارای روند

نبوده و تا حد مطلوبی خطی هستند. به عبارت دیگر دادهها دارای روند محلی<sup>1</sup> میباشند. این موضوع شاید نشان دهنده دو نوع خرابی مجزا در سیستم باشد.

در این رساله به منظور تصمیمگیری نهایی در مورد وجود یا عدم وجود روند در دادهها، با توجه به سطح مدیریتی انتخاب شده برای تحلیل قابلیت اطمینان درام شیر که تنها محدود به زیرسیستمهای ششگانه میگردد، رهیافت "جعبه سیاه"<sup>2</sup> مورد استفاده و استناد قرار میگیرد. بدین صورت که، با توجه به اینکه مدلسازی رفتار کل سیستم هیدرولیک مد نظر میباشد، لذا، بدون توجه به دوگانگی رفتار خرابی این سیستم، فقط نتایج آزمون تحلیلی که مبتنی بر جمعیت کل دادههاست مورد استفاده قرار میگیرد. با در نظر گرفتن تمامی موارد فوق مشخص میشود که دادههای سیستم هیدرولیک شیر معدن طبس دارای روند و همبستگی سری نبوده و iid میباشند. بنابراین، روش فرآیند تجدیدشونده بهترین روش برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم به شمار میآید.



شکل 5-16- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها ی خرابی سیستم هیدرولیک

جدول 5-6- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی سیستم هیدرولیک

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95%	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمیشود ( $21/82 > U$ )	23/42	34	18

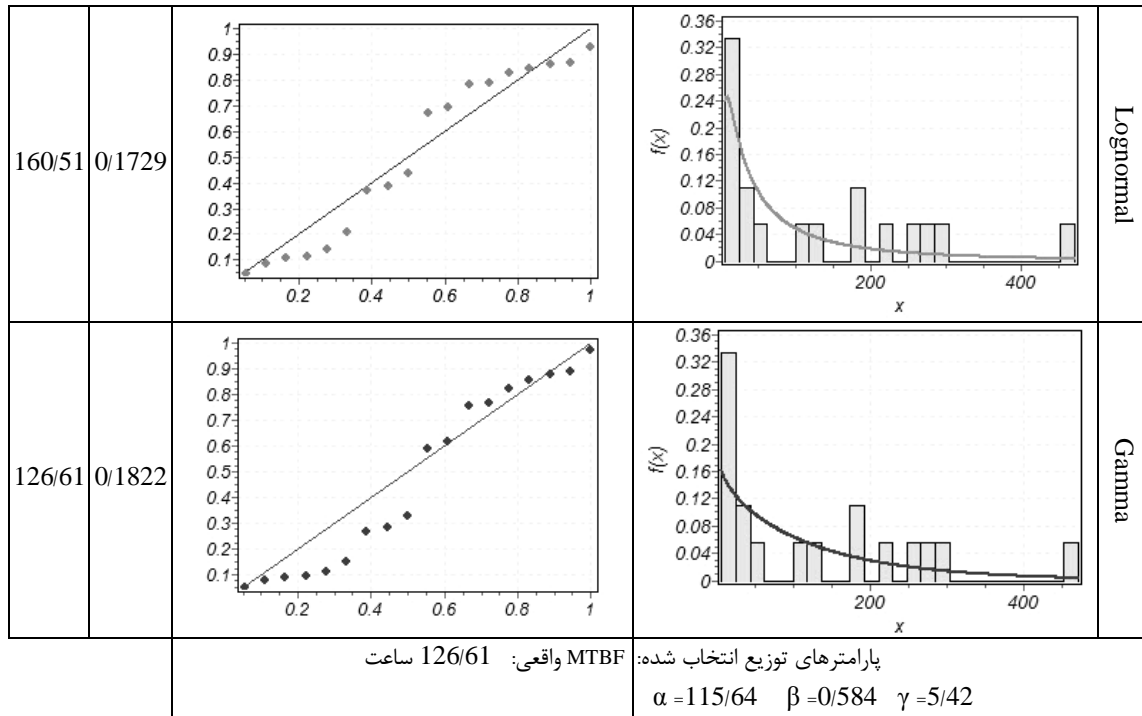
## ج- تحلیل دادهها

<sup>1</sup>. Local trend

<sup>2</sup>. Black box

با تحلیل آماری داده‌های ارائه شده در جدول 5-5، نتایج مربوط به تعیین بهترین تابع توزیع احتمال خرابی و مشخصات آماری آن به صورت شکل 5-17 حاصل گردید. چنانچه در شکل مشاهده میشود، توزیع وایبول سه پارامتری کمترین میزان K-S را در میان سایر توابع توزیع به خود اختصاص داده است. اما، میزان میانگین این توزیع بیشتر از سایر توابع میباشد. با این حال، منحنی چگالی احتمال بدست آمده از این توزیع تطابق بهتری با دادهها دارد. گرچه نمودار P-P نیز انطباق این توزیع را با دادهها تأیید میکند، اما، پرواضح است که پراکندگی نقاط نسبت به نیمساز X-Y، در این زیرسیستم نسبت به سیستم آب و سیستم حرکت بیشتر است. با عنایت به تمامی موارد فوق، این نکته نیز شایان

نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S میانگین (ساعت)
Weibul-3P			0/1317 185/73
Gen. Gamma			0/1495 126/06
Weibul-2P			0/1598 127/67



شکل 5-17- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم هیدرولیک شیرر

توجه است که به دلیل پراکندگی دادههای این سیستم (که در هیستوگرام مشخص است)، تغییرات مشخصات آماری توابع بیشتر از سایر زیرسیستمهای دستگاه میباشد.

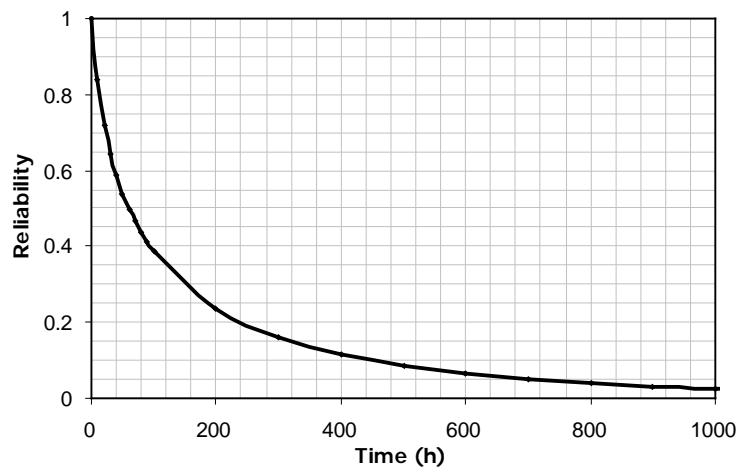
#### د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

بر پایه تابع خرابی و ایبول سه پارامتری برازش شده بر دادهها، مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی سیستم هیدرولیک شیرر طبس محاسبه شده و روابط 5-5 و 6-5 حاصل گردیدند. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 5-18 و 5-19 ارائه شدهاند.

$$R_{haulage}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right) = \exp\left(-\left(\frac{t-5.42}{115.64}\right)^{0.584}\right) \quad (5-5)$$

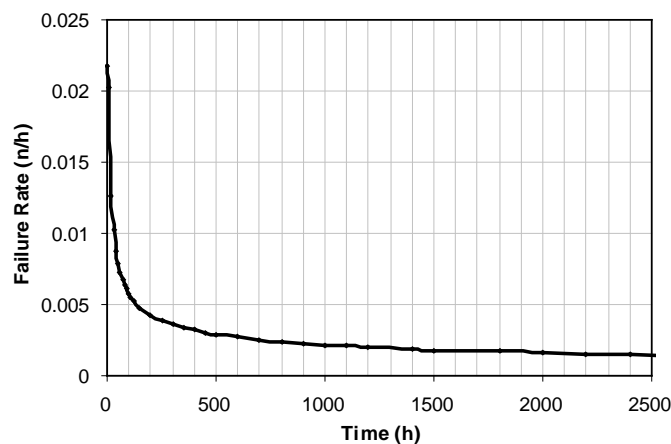
$$(6-5)$$

$$\lambda_{haulage}(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} = 0.005 \left(\frac{t-5.42}{115.64}\right)^{-0.416}$$



شکل 5-18- نمودار قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک درام شیرر معدن طبس

چنانچه شکل 5-18 نشان میدهد، قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک که یکی از مهمترین زیرسیستمهای ماشینآلات معدنی به شمار میآید، پس از حدود 1600 ساعت کارکرد، به نزدیکی صفر میرسد. این در حالی است که قابلیت اطمینان سیستم در اوایل عمر دستگاه به سرعت افت کرده و طی 80 ساعت به 40٪ میرسد. پس از این زمان نرخ کاهش قابلیت اطمینان بسیار کم شده و پیشبینی میشود دستگاه بتواند تا 1500 ساعت دیگر تا رسیدن به احتمال صددرصد خرابی کار کند.



شکل 5-19- نمودار نرخ خرابی سیستم هیدرولیک درام شیرر معدن طبس

با دقت در نمودار نرخ خرابی (شکل 5-19)، مشاهده میشود که سیستم هیدرولیک نیز همانند سیستم حرکت شیرر، دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی کاهندهای میباشد. سیستم



هیدرولیک شیرر با نرخ خرابی برابر با 0/022 خرابی در ساعت کار خود را آغاز نموده و با نزول سریع همانند سیستم حرکت، پس از 100 ساعت به حدود 0/005 خرابی میرسد. این منحنی نشاندهنده آن است که سیستم هیدرولیک شیرر طبس در اواخر پهنه اول مرحله شروع کار خود را سپری نموده و پس از 1000 ساعت وارد دوره عمر مفید خود شده است. پس از این زمان با تغییرات بسیار اندک نرخ خرابی مواجه بوده و از حالت تقریباً پایداری برخوردار بوده است.

#### 5-5-4- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم برق

##### الف- دادههای خرابی

با توجه به پایگاه داده تشکیل شده، کل دادههای جمعآوری شده برای زیرسیستم برق درام شیرر طبس به شرح جدول 5-7 خلاصه میشود. مهمترین دلایل خرابی این سیستم از دیدگاه آماری، در شکل 5-20 ارائه شده است.

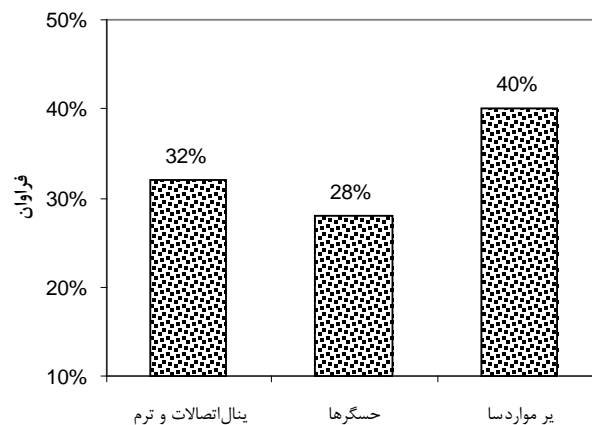
چنانچه در شکل مشاهده میشود، خرابی و توقف عملکرد سیستم برق دستگاه، عمدتاً ناشی از خرابی حسگرهای دستگاه و نیز بروز مشکل در اتصالات شامل سوکتها و ترمینالهای برق میباشد. در این میان خرابی اتصالات با فراوانی 32 درصد بالاترین آمار خرابی را به خود اختصاص داده است.

جدول 5-7- دادههای خرابی مربوط به سیستم برق

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	دستگاه روشن نمی شود	36/12	36/12
2	وجود مشکل برقی در دستگاه	111/2	147/32
3	وجود مشکل در حسگر آب	74/75	222/07
4	دستگاه روشن نمی شود	105/9	327/93
5	تنظیم حسگر آب درام سمت راست	74/58	402/52
6	دستگاه روشن نمیشود	133/4	535/87
7	وجود مشکل برقی در دستگاه	104	639/82
8	بازرسی و تعمیر و نگهداری سیستم برق دستگاه	125/1	764/95
9	دستگاه روشن نمیشود	298/4	1063/4
10	دستگاه برق دریافت نمیکند، دو عدد از دیودها به حالت سری درآمدند و یکی نیز از مدار خارج گردید.	556/3	1619/7
11	دستگاه در ارتباط با مرکز برق کارگاه مشکل دارد	5/67	1625/4
12	ایزولاتور روشن و خاموش نمیشود. قفل درونی و میکروسویچ ایزولاتور مشکل داشت که مورد تعمیر فرار گرفت.	39/03	1664/4

1696/7	32/33	جریان برق به دلیل اتصال در مدار به کرات قطع و وصل می‌شود	13
1711/9	15/17	تعمیرات سیستم برق دستگاه	14
1843/9	132	وجود مشکل در حسگر آب و تعمیر آن	15
1901/9	58	حذف یکی از اتصالات برقی که باعث بروز مشکل در حسگرها و خروج حسگرها (حسگر فشار آب، حسگر سطح و فشار روغن و...) از مدار می‌گردد.	16
1929/9	28	بازوی سمت چپ دستگاه پائین نمی‌آید، وجود مشکل در سوکت جعبه برق درام	17
1977/8	47/9	دستگاه روشن نمیشود، وجود مشکل در پایه رله و تعمیر ترمینال برق	18
2020/6	42/75	از کارافتادگی دکمه کنترل دستگاه و عدم کنترل حرکت بازو (باعث شکستگی چهار پیک گردید)	19
2033	12/42	وجود مشکل در سیستم کنترل و ارتباط رادیویی دستگاه	20
2044	11	دستگاه سه بار به طور اتوماتیک خاموش گردید، وجود مشکل در مقاومت حسگر آب	21
2301/8	257/85	خرابی و از کارافتادگی کامل حسگر سطح روغن	22
2304/4	2/58	وجود مشکل در بلوک برق اصلی دستگاه، بازکردن و نصب مجدد سوکتها و تعویض دوشاحه اصلی	23
2615/7	311/33	قطع اتوماتیک جریان، خرابی و تعویض حسگر آب شیرر	24

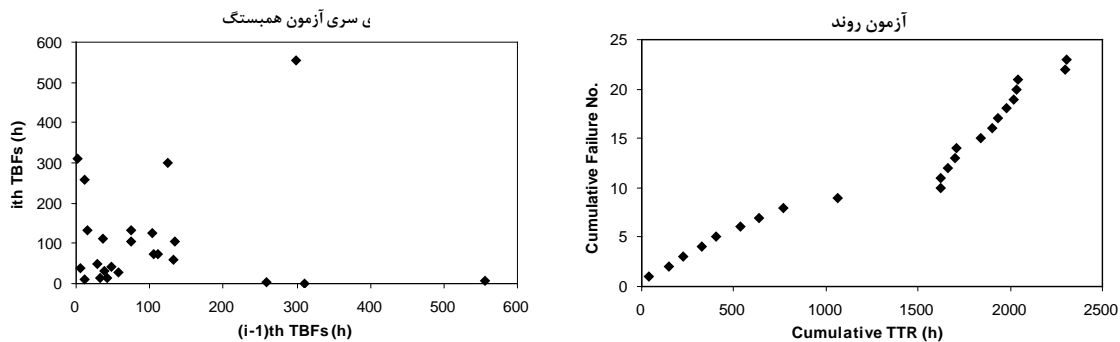
با دقت در نتایج فوق مشخص می‌گردد که 40 درصد از خرابیهای سیستم برق به طور پراکنده در بخشهای مختلف دستگاه رخ داده که قابل دستهبندی در یک بخش خاص نمیباشند. اما، تنها با کنترل مرتب اتصالات برقی مهم دستگاه و حصول اطمینان از عملکرد مناسب آنها و یا تعویض به موقع، میتوان خرابیهای ناخواسته حین کار دستگاه به مقدار 32 درصد کاهش داد که این عدد میزان قابل تأملی است.



شکل 5-20- مهمترین دلایل خرابی سیستم برق شیرر

ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

نتایج آزمونهای روند و همبستگی سری انجام شده بر روی دادههای خرابی سیستم برق در شکل 21-5 و جدول 8-5 ارائه شده است، چنانچه در شکل دیده میشود، دادههای خرابی سیستم برق شیرر دارای دو بخش مجزا در آزمون روند میباشدند. بخش اول دادهها نشاندهنده روند بوده ولی بخش دوم تقریباً حالت خطی دارد. اما، طبق رهیافت جعبه سیاه، در این سیستم نیز نتایج آزمون تحلیلی به عنوان ملاک عمل قرار میگیرند و لذا تمامی دادهها به صورت یکجا در نظر گرفته میشوند.



شکل 21-5- نتایج آزمونهای مستقل و مانا بودن دادههای خرابی سیستم برق

طبق جدول 8-5، نتایج آزمون تحلیلی نشان دهنده عدم وجود روند در دادههاست. لذا با توجه به عدم وجود همبستگی، فرض iid بودن دادهها صحیح بوده و روش فرآیند تجدیدشونده بهترین روش برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم میباشد.

جدول 8-5- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی سیستم برق

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند تجدید شونده	رد نمیشود ( $31/29 > U$ )	46/45	46	24

### ج- تحلیل دادهها

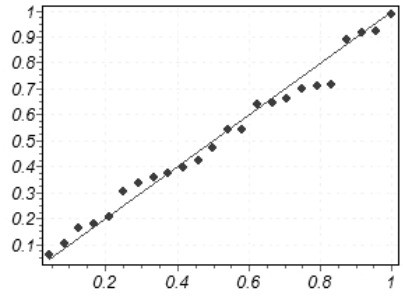
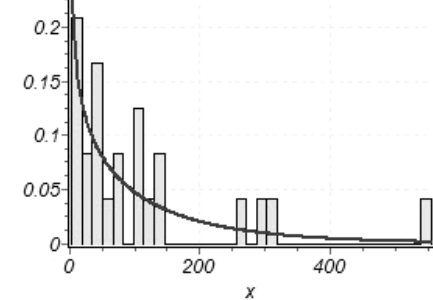
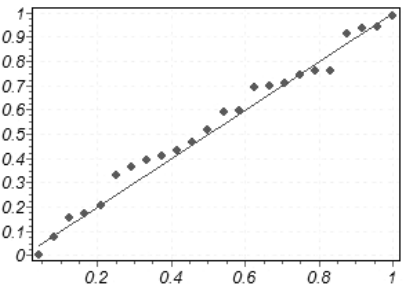
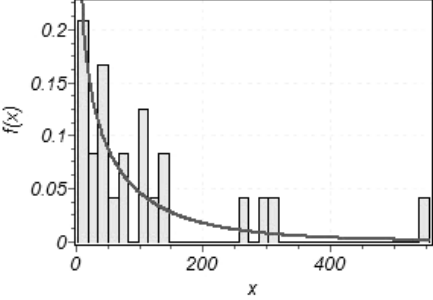
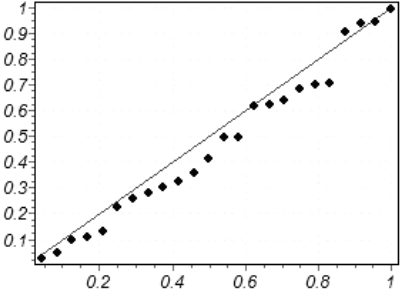
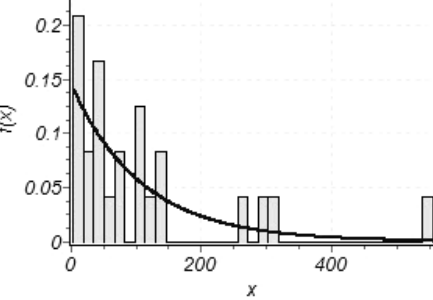
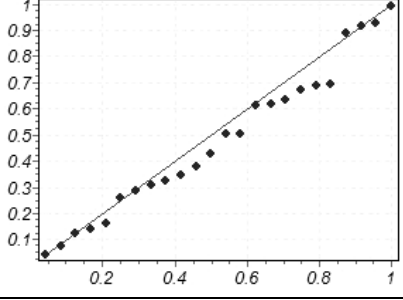
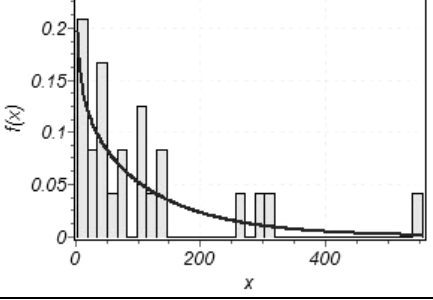
نتایج تحلیل آماری دادههای خرابی سیستم برق شیرر طیس در شکل 22-5 نشان داده شده است. با دقت در هیستوگرامهای این شکل و اطلاعات جدول 7-5 مشاهده میشود که خرابیهای این سیستم با فواصل زمانی بیشتر از 500 ساعت نیز رخ داده و دادهها از پراکندگی نسبتاً زیادی برخوردارند. پنج تابع دارای کمترین K-S که بر دادهها منطبق میباشدند به ترتیب عبارتند از: لاگنرمال، گاما، وایبول

سه پارامتری، توزیع نمایی و گامای تعمیم یافته. هیستوگرامهای حاصل از تحلیل دادهها مبین آن است که شکل توابع توزیع گاما، گاما تعمیم یافته و وایبول سه پارامتری بسیار شبیه به هم بوده و همچنین مقادیر K-S نزدیک به هم دارند. منحنی توزیع لاگنرمال نیز از تطابق بسیار خوبی با دادهها برخوردار است. در این میان، تنها شکل منحنی توزیع تابع نمایی از واقعیت و پراکندگی دادهها دور بوده و نمودار P-P متناظر با این تابع نیز نسبت به سایر توابع پراکندهتر است. با در نظر گرفتن شکل منحنی توابع چگالی و نیز میزان K-S هر کدام از توابع، چنین نتیجهگیری میشود که تابع لاگنرمال میتواند رفتار خرابی سیستم برق شیرر معدن طبس را به خوبی منعکس کند. اگرچه، میانگین زمان خرابیهای پیشبینی شده توسط این توزیع بالاتر از سایر توابع بوده و از میزان واقعی  $MTBF$  که برابر با 109 ساعت است، فاصله دارد.

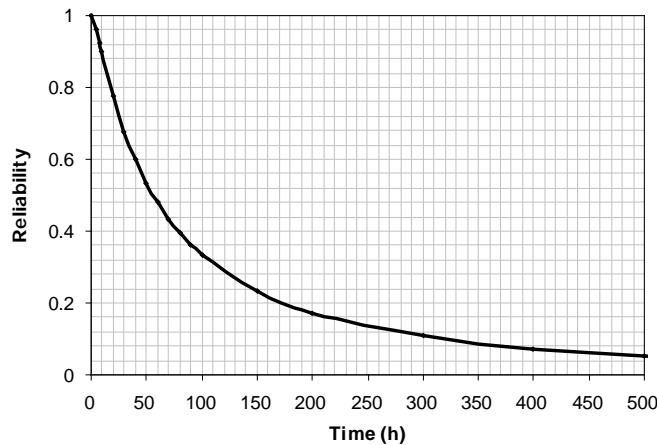
#### د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل دادهها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم برق شیرر طبس به صورت روابط 5-7 و 5-8 میباشند. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 5-23 و 5-24 ارائه شدهاند.

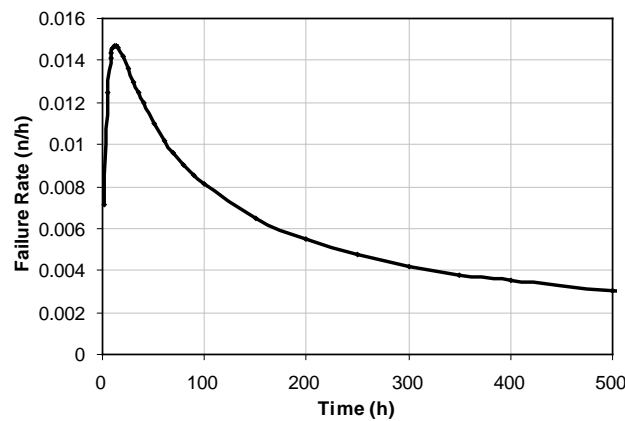
نام	تابع توزیع چگالی احتمال	نمودار P-P	آزمون K-S	میانگین (ساعت)
Lognormal			0/1017	127/47

109	0/1173			Gamma
98	0/1211			Weibull-3P
108/7	0/1275			Exponential
113/84	0/1214			G. Gamma
		<p>پارامترهای توزیع انتخاب شده: MTBF واقعی: 109 ساعت  <math>\sigma = 1/282</math> <math>\mu = 4/0261</math></p>		

شکل 5-22- نتایج تحلیل دادههای خرابی سیستم برق شیرر



شکل 5-23- نمودار قابلیت اطمینان سیستم برق درام شیرر معدن طبس



شکل 5-24- نمودار نرخ خرابی سیستم برق درام شیرر معدن طبس

$$R_{electrical}(t) = 1 - \int_{-\infty}^{(\ln t - \mu)/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - \Phi\left[\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln t - 4.0261}{1.282}\right] \quad (7-5)$$

$$\lambda_{electrical}(t) = \frac{\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma t \cdot R(t)} = \frac{\Phi\left(\frac{\ln t - 4.0261}{1.282}\right)}{1.282 t \cdot \left(1 - \Phi\left[\frac{\ln t - 4.0261}{1.282}\right]\right)} \quad (8-5)$$

محاسبات نشان میدهد که قابلیت اطمینان سیستم برق شیرر پس از 1300 ساعت عملیات پیوسته برش، تقریباً به صفر میرسد. این کمیت بدین معنی است که طبق آمار خرابی دستگاه، پس از طی 1300 ساعت سیستم برق شیرر به احتمال قریب به یقین خراب شده و عملکرد آن متوقف خواهد شد. همچنین منحنی نشان میدهد که پس از طی حدود 50 ساعت، قابلیت اطمینان سیستم به

حدود 50٪ میرسد که افت قابل ملاحظه‌های به شمار می‌آید.

شکل 5-24 نشان دهنده نوع بارز و مرسوم از نرخ خرابی تابع توزیع لاگنرمال است. طبق مدل خرابی به دست آمده، مشخص میشود که نرخ خرابی سیستم برق شیرر طبس، از زمان شروع به کار تا حدود زمان 10 ساعت، افزایشی است. اما پس از این بازه، نرخ خرابی دستگاه سیر نزولی به خود می‌گیرد. در مرحله افزایشی، نرخ خرابی از 0/007 تا 0/014 افزایش می‌یابد ولی پس از این فاز، نرخ خرابی تا حدود 0/001 (در زمان 2500 ساعت) کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که اندکی پس از بارگذاری سیستم برق دستگاه، این سیستم به تعادل نسبی رسیده و نرخ خرابیهای آن رو به کاهش خواهد بود.

### 5-5-5- مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم کابل

#### الف- دادههای خرابی

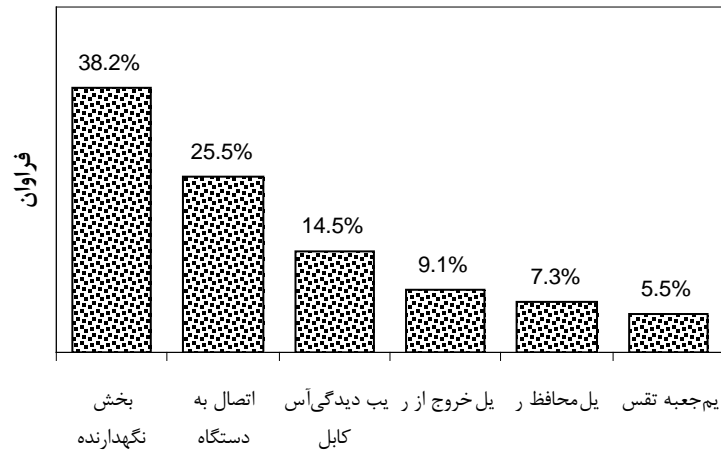
همانگونه که در شکل 5-3 نشان داده شده است، سیستم کابل، به عنوان دومین زیرسیستم مهم شیرر طبس از نظر فراوانی خرابی است. این سیستم شامل 2000 عدد نگهدارنده کابل بوده و از وزن بسیار زیادی برخوردار است. نتایج جمع‌آوری و طبقه‌بندی دادههای خرابی مربوط به سیستم کابل شیرر طبس به صورت جدول 5-9 می‌باشد. با دقت در اطلاعات ارائه شده در جدول مذکور، مشخص میشود که شش نوع خرابی معمولاً در این سیستم اتفاق می‌افتد (شکل 5-25). در این میان، خرابی بخشهای نگهدارنده کابل، بخش اتصال کابل به دستگاه و آسیب‌دیدگی کابل و روکش آن، سه عامل اصلی خرابی و توقف سیستم کابل دستگاه به شمار می‌آیند.

سه عامل دیگر که در مجموع 22 درصد خرابیها را شامل میشوند، عبارتند از: خروج کابل از ریل، شکستگی محافظ ریل و خرابی جعبه تقسیم. لذا، برای بهبود عملکرد و کاهش توقفهای این سیستم، بازرسی و کنترل سه بخش نگهدارنده کابل، بخش اتصال کابل به دستگاه و آسیب‌دیدگی کابل و روکش آن که به صورت چشمی و به سادگی امکانپذیر است، تا 80 درصد میتواند توقفهای ناشی از این زیرسیستم را کاهش دهد.

جدول 5-9- دادههای خرابی مربوط به سیستم کابل

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	آسیبیدگی کابل	146/2	146/2
2	بیرون آمدگی کابل از پوشش	159/1	305/3
3	تعویض نگهدارندههای کابل مابین شیلد 10 الی 30	231/2	536/3
4	قطع اتصال کابل با بخش متصل کننده کابل و بدنه ماشین	22/5	559
5	بیرونزدگی ضامن ایمنی کابل از محل خود	74/87	633/87
6	تعویض سه عدد نگهدارنده کابل، تعمیر پوشش کابل	6	639/82
7	تعویض چهار صفحه محافظ ریل کابل	97/25	737/07
8	تعویض 15 صفحه محافظ ریل کابل و 10 نگهدارنده کابل، تعمیر پوشش کابل	73/63	810/7
9	تنظیم و تعمیر دو بخش نگهدارنده کابل	34/83	845/53
10	نیم متر از کابل از نگهدارندههای خویش بیرون آمده بود	259	1104/6
11	تعویض 12 عدد نگهدارنده کابل	94/62	1199/2
12	سفت کردن کابل و بازرسی نگهدارندههای کابل	173/6	1372/7
13	تعویض سه عدد نگهدارنده کابل، تعمیر پوشش کابل	198/6	1571/4
14	تعویض شش عدد نگهدارنده کابل	14/02	1585/4
15	کابل در بخش جعبه تقسیم کشده شده و یک فاز آن قطع شده بود	33/5	1618/9
16	تعمیر جعبه تقسیم و پوشش آسیب دیده کابل	77/87	1696/7
17	تعمیر و تعویض بخشهای نگهدارنده آسیب دیده	3/75	1700/5
18	خروج کابل از ریل محافظ	12/83	1713/3
19	آسیبیدگی کابل	2/33	1715/7
20	خروج کابل از ریل، تعمیر محافظهای ریل و نگهدارندهها کابل در چندین نقطه	8/75	1724/4
21	تعمیر کابل و پوشش آن	4/5	1728/9
22	خروج کابل از بخش اتصال به دستگاه، تنظیم و تعمیر آن	38/42	1767/3
23	سفت کردن کابل و تعویض دو نگهدارنده	21/17	1788/5
24	آسیب دیدگی کابل	19/78	1808/3
25	شل بودن کابل در بخش اتصال به دستگاه	5/62	1813/9
26	شکستگی پین اتصال کابل به بدنه و تعویض آن	41/55	1855/4
27	بازرسی جعبه تقسیم و بخشهای آسیب دیده کابل	55/83	1911/3
28	شکستگی پین اتصال کابل به بدنه و تعویض آن	118/7	2029/9
29	خروج کابل از نگهدارنده	72/83	2102/8
30	خروج کابل از نگهدارنده	24/17	2126/9
31	تعمیر نگهدارنده کابل	45/6	2172/5
32	شکستگی پین اتصال کابل به بدنه و قطع اتوماتیک برق	7/33	2179/9
33	آسیبیدگی کابل و تعمیر آن	19/92	2199/8
34	شکستگی سه محافظ کابل	29/25	2229
35	اشکال در اتصال کابل به بدنه، شکستگی دو نگهدارنده کابل	59/27	2288/3
36	تعویض سه نگهدارنده کابل	4/5	2292/8
37	پوشاندن سیم و تعمیر روکش کابل	91/07	2383/9
38	قرار دادن کابل در محل خود، بازرسی و تعمیر کابل	54/03	2337/9
39	تعمیر ترمزهای کابل	5/5	2443/4
40	تعویض شش صفحه محافظ ریل و دو عدد نگهدارنده کابل، تنظیم کابل	3/17	2446/6
41	خروج کابل از ریل	48/35	2494/9
42	شکستگی پین اتصال کابل به بدنه و قطع اتوماتیک برق	16/92	2511/8
43	شل بودن کابل در بخش اتصال به دستگاه	1/67	2513/5
44	خروج 12 متر کابل از ریل	81/37	2594/9
45	آسیبیدگی کابل و تعمیر آن	30/33	2625/2

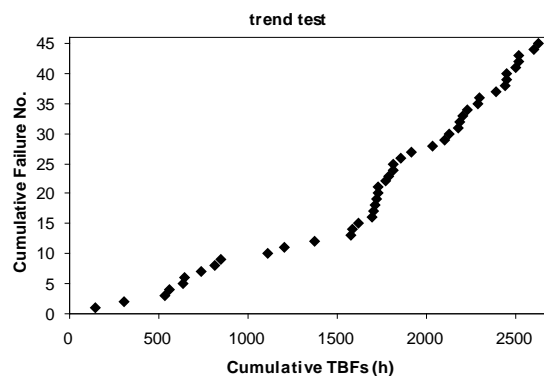




شکل 5-25- فراوانی مهمترین دلایل خرابی سیستم کابل شیرر

### ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی انجام شده بر روی دادههای خرابی سیستم کابل، به ترتیب در شکل 5-26 و جدول 5-10 ارائه شده است. با توجه به حالت غیرخطی نقاط در آزمون روند گرافیکی و کوچکتر بودن شاخص  $U$  از میزان نقطه بحرانی (67/59)، مشخص میشود که دادههای خرابی سیستم کابل شیرر دارای روند میباشند. لذا بدون نیاز به آزمون همبستگی سری، iid بودن دادهها به طور قطع رد میشود. بنابراین، روش فرآیند پواسون ناهمگن بهترین روش برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم میباشد. روش فرآیند قانون توان که یکی از روشهای پرکاربرد فرآیند پواسون ناهمگن میباشد، برای مدلسازی این زیرسیستم از دستگاه شیرر مورد استفاده قرار میگیرد.



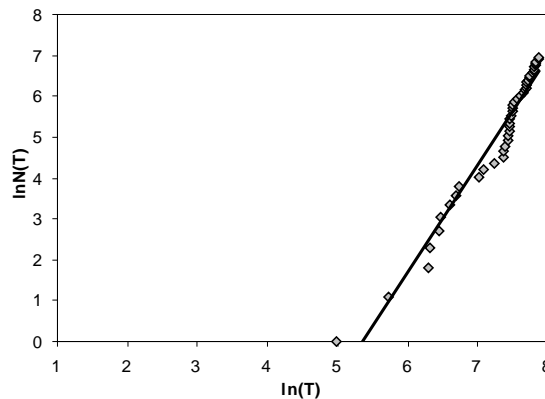
شکل 5-26- نتایج آزمون گرافیکی روند بر روی دادههای خرابی سیستم کابل

جدول 5-10- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی سیستم کابل

تعداد خرابی ثبت شده	درجه آزادی	U محاسبه شده	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95٪	روش مدلسازی انتخابی
45	88	50/54	رد میشود ( $U < 67/59$ )	فرآیند پواسون

### ج- تحلیل دادهها

برای ارزیابی تطابق دادهها با مدل قانون توان، آزمون گرافیکی بر روی دادهها انجام شد (شکل 5-27). طبق شکل، از آنجایی که دادههای خرابی این سیستم از حالت خطی مناسبی برخوردارند، لذا مشخص میشود که دادهها تطابق خوبی با مدل قانون توان دارند و میتوان از این مدل برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم کابل بهره جست.

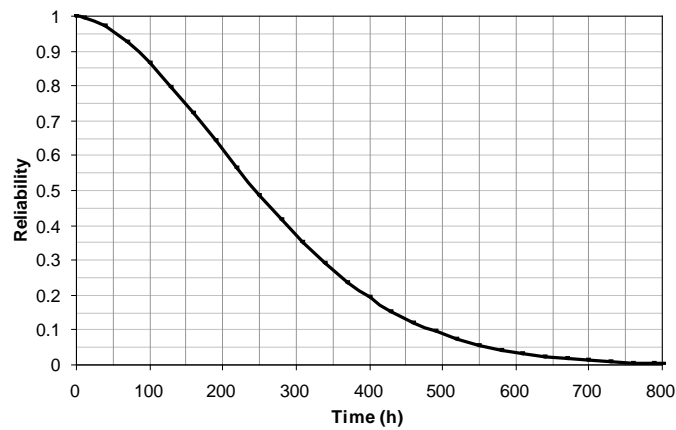


شکل 5-27- آزمون گرافیکی تطابق دادههای خرابی سیستم کابل با مدل قانون توان

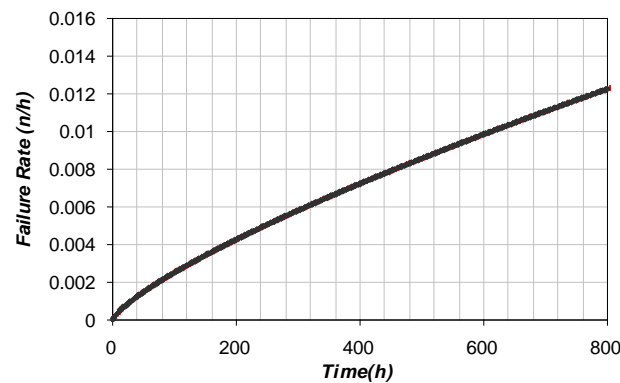
در ادامه، دادههای خرابی ارائه شده در جدول 5-9، وارد نرمافزار Excel گردیده و با توجه به اینکه دادهها "برشخورده بر مبنای خرابی" میباشد، پارامترهای فرآیند پواسون با استفاده از روابط 2-14 و 2-15 محاسبه شدهاند. نتایج محاسبات نشان داد که پارامتر مقیاس برابر با  $301/45$  (301/45)  $\theta =$  بوده و پارامتر شکل  $1/76$  میباشد (  $\beta = 1/76$  ).

### د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحلیل دادهها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم کابل شیرر طبعاً به صورت روابط 5-9 و 5-10 حاصل میشوند. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 5-28 و 5-29 ارائه شدهاند.



شکل 5-28- نمودار قابلیت اطمینان سیستم کابل درام شیرر معدن طبس



شکل 5-29- نمودار نرخ خرابی سیستم کابل درام شیرر معدن طبس

$$R_{cable}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{301.45}\right)^{1.76}\right] \quad (9-5)$$

$$\lambda_{cable}(t) = 0.0058\left(\frac{t}{301.45}\right)^{0.76} \quad (10-5)$$

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم کابل شیرر طبس نشان میدهد که قابلیت اطمینان این سیستم پس از حدود 800 ساعت، به صفر میرسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان در ساعات اولیه کار دستگاه با شیب کمی کاهش مییابد، لذا طی 100 ساعت اول عملیات، قابلیت اطمینان فقط 15 درصد کاهش مییابد. با گذشت زمان، شیب کاهش منحنی بیشتر شده و در فاصله زمانی بین 100 تا 200 ساعت، قابلیت اطمینان 25 درصد کاهش مییابد. این تغییرات مبین آن

است که در صورتی که سیستم کابل شیر در بازه‌های زمانی کمتر از 100 ساعت بازرسی و کنترل شود، میتوان قابلیت اطمینان آن را در سطح بسیار خوبی حفظ نمود.

نمودار نرخ خرابی سیستم (شکل 5-29) نشان میدهد که سیستم کابل شیر، نرخ خرابی افزایش یافته و شتابداری دارد. این امر به دلیل بزرگتر از یک بودن پارامتر شکل ( $\beta$ ) مدل قانون توان در سیستم کابل رخ میدهد. بدین شرح که با انجام هر تعمیر اصلاحی، خرابی مورد نظر در حافظه سیستم میماند و احتمال رخداد خرابی  $i$ ام به صورت شرطی به وقوع خرابی  $(i-1)$ ام وابسته میباشد. طبق این رفتار، پس از عملیات تعمیر و نگهداری، سیستم به حالت "به-بدی-کهنه"<sup>1</sup> باز میگردد. منحنی نشان میدهد که سیستم کابل همواره 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.

### 5-5-6- مدلسازی قابلیت اطمینان بازوهای برش

#### الف- دادههای خرابی

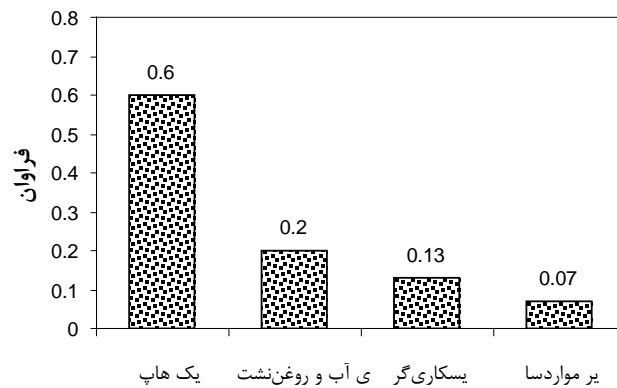
طبق نمودار پارتو نشان داده شده در شکل 5-3، بازوهای برش به همراه سیستم حرکت، دارای کمترین فراوانی خرابی در بین زیرسیستمهای دستگاه میباشد و لذا خرابیهای این سیستم از جامعه آماری کوچکی برخوردارند. دادههای خرابی مربوط به بازوهای برش شیر طبس در جدول 5-11 ارائه شده است.

با دقت در اطلاعات ارائه شده، مشخص میشود که سه نوع خرابی عمده در این سیستم اتفاق میافتد (شکل 5-30). خرابی پیکها که شامل سائیدگی و شکستگی پیک و نیز شکستگی پایه پیکها میشود، 60 درصد خرابیهای ثبت شده را به خود اختصاص داده است. لذا، برای بهبود قابلیت اطمینان و کاهش توقفهای دستگاه، بازرسی برنامه‌ریزی شده پیکها و ملزومات وابسته، به شدت میتواند تأثیر گذار باشد.

<sup>1</sup>. As-bad-as-old

جدول 5-11- دادههای خرابی مربوط به بازوهای برش

شماره	توضیحات	TBF (ساعت)	TTF (ساعت)
1	تعویض هفت عدد پیک شکسته	310/72	310/72
2	کنترل نشتی روغن در درام سمت چپ	158/15	468/87
3	گریسکاری درامها، بازکردن و تمیزکاری پوشش فولادی پشت بازوها	497/45	966/32
4	کنترل و تعمیر نشتی روغن از بازوی سمت راست	241/12	1207/43
5	تعویض کاسه نمد پشت درام سمت چپ	23/25	1230/68
6	تعویض یک پایه پیک و دو عدد پیک در درام سمت راست	191/12	1421/8
7	وجود نشتی آب در جعبه دنده درام سمت چپ، تعمیر شد ولی باید مجدداً بازرسی شود.	132/45	1554/25
8	تعمیر و بازرسی پیکها	151/8	1706/05
9	تعویض تعدادی پیک و پایه پیک	188/92	1894/97
10	تعویض چهار پیک	115/15	2010/12
11	گریسکاری و رفع عیب درام سمت چپ	26/75	2036/87
12	نصب یک پیک و پایه پیک در درام راست، پیک کننده شده و با زغال حمل شده بود	15/17	2052/03
13	تعویض 13 عدد پیک شکسته و سائیده شده	178/27	2230/3
14	تعمیر یک عدد پایه پیک	209/12	2439/42
15	تعویض هشت عدد پیک در درام سمت راست	9/82	2449/23

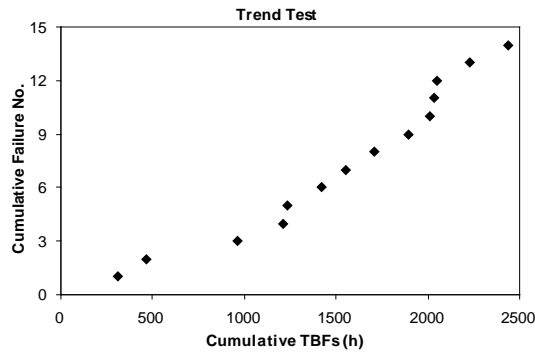


شکل 5-30- فراوانی مهمترین دلایل خرابی بازوهای برش شیر

### ب- آزمونهای مستقل و مانا بودن دادهها

نتایج آزمون گرافیکی و تحلیلی انجام شده بر روی دادههای خرابی سیستم کابل به ترتیب در شکل 31-5 و جدول 5-12 ارائه شده است. با توجه به حالت منحنی ایجاد شده در بخش میانی دادهها در شکل 5-32، آزمون گرافیکی تا حدودی وجود روند در دادهها را نشان میدهد. اما با توجه به مقدار شاخص  $U$  که به مقدار اندکی کوچکتر از مقدار نقطه بحرانی (16/93) است، وجود روند در دادهها را میتوان پذیرفت. لذا بدون نیاز به آزمون همبستگی سری، iid بودن دادهها به طور قطع مردود است و

برای مدلسازی قابلیت اطمینان این سیستم نیز باید از روش فرآیند پواسون ناهمگن (مدل قانون توان) استفاده شود.



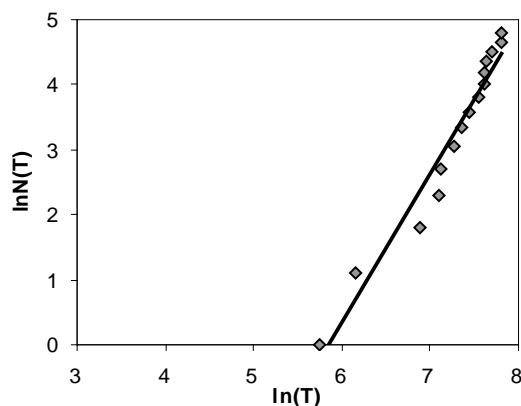
شکل 5-31- نتایج آزمون گرافیکی روند بر روی دادههای خرابی بازوهای برش

جدول 5-12- نتایج آزمون تحلیلی روند بر روی دادههای خرابی بازوهای برش

روش مدلسازی انتخابی	رد فرض صفر در سطح اعتماد 95٪	U محاسبه شده	درجه آزادی	تعداد خرابی ثبت شده
فرآیند پواسون	رد میشود ( $U < 16/93$ )	16/63	28	15

### ج- تحلیل دادهها

در این بخش، ابتدا آزمون گرافیکی تطابق دادهها با مدل قانون توان انجام شد. نتایج آزمون که در شکل 5-32 ارائه شده است، نشاندهنده آن است که دادههای از حالت خطی مناسبی برخوردار بوده و تطابق خوبی با مدل قانون توان دارند.



شکل 5-32- آزمون گرافیکی تطابق دادههای خرابی بازوهای برش با مدل قانون توان

پس از کنترل تطابق، با توجه به اینکه دادهها همانند سیستم کابل "برشخورده بر مبنای خرابی"

میباشند، پارامترهای فرآیند پواسون با استفاده از روابط 14-2 و 15-2 محاسبه گردیدند. نتایج محاسبات نشان داد که پارامتر مقیاس برابر با  $301/45$  ( $\theta=443/8$ ) بوده و پارامتر شکل  $1/58$  میباشد ( $\beta=1/5$ ).

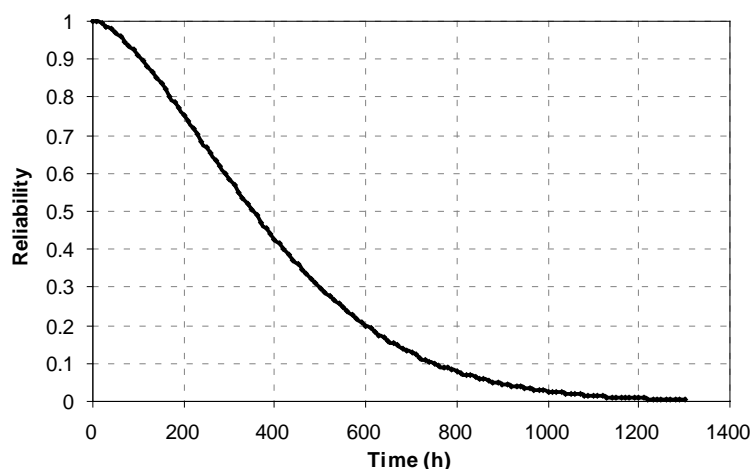
#### د- مدل قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی

با در نظر گرفتن پارامترهای محاسبه شده در بخش قبل، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی بازوهای برش شیرر طبس به صورت روابط 11-5 و 12-5 خواهند بود. منحنیهای معادل با این نمودارها در شکلهای 33-5 و 34-5 ارائه شدهاند.

$$R_{arms}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] = \exp\left[-\left(\frac{t}{443.8}\right)^{1.58}\right] \quad (11-5)$$

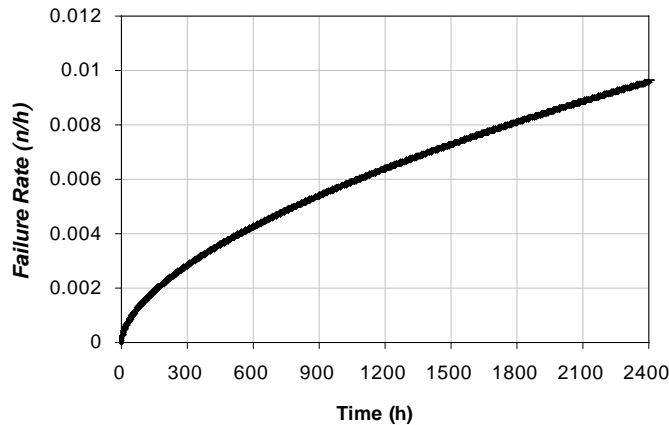
$$\lambda_{arms}(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} = 0.00356\left(\frac{t}{443.8}\right)^{0.58} \quad (12-5)$$

نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان نشان میدهد که قابلیت اطمینان بازوهای برش پس از حدود 1300 ساعت به حدود صفر میرسد. منحنی بیانگر آن است که قابلیت اطمینان این سیستم از ساعات اولیه کار دستگاه، با شیب یکنواخت کاهش مییابد و پس از 100 ساعت، قابلیت اطمینان آن به 90 درصد میرسد. پایداری قابلیت اطمینان در بازه 200 ساعت اول عملکرد، به اندازه سیستم کابل از پایداری برخوردار نیست. قابلیت اطمینان بازوهای برش دستگاه پس از 350 ساعت به نصف کاهش مییابد.



شکل 33-5- نمودار قابلیت اطمینان سیستم کابل درام شیرر معدن طبس

با دقت در نمودار نرخ خرابی سیستم (شکل 5-34)، مشخص میشود که این سیستم همانند سیستم کابل، نرخ خرابی افزایشی دارد. در این سیستم نیز پس از عملیات تعمیر و نگهداری، سیستم به حالت به-بدی-کهنه باز میگردد.



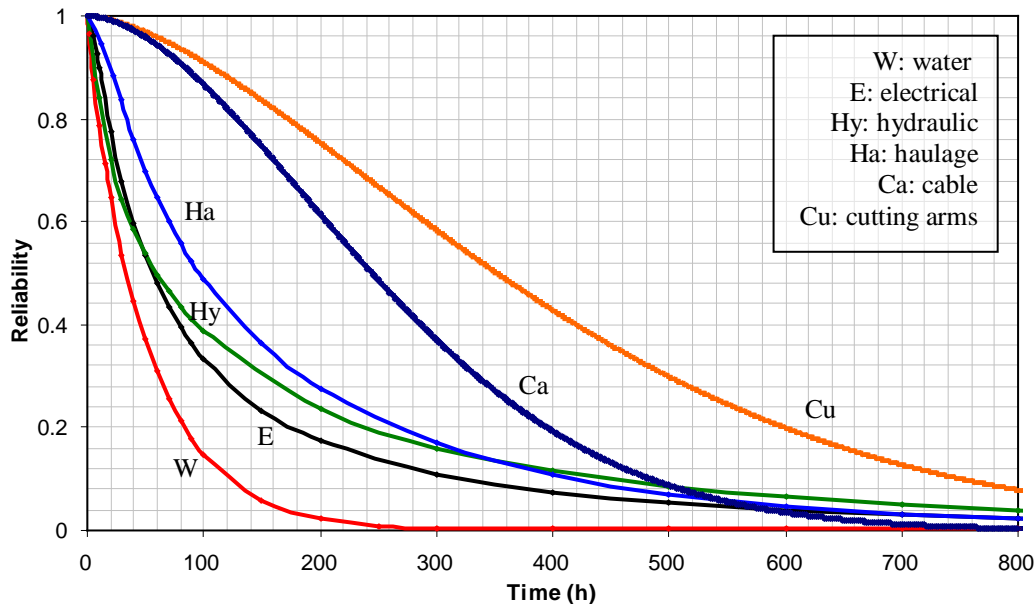
شکل 5-34- نمودار نرخ خرابی بازوهای برش درام شیرر معدن طبس

## 5-6-مدلسازی قابلیت اطمینان کل دستگاه درام شیرر

در بخشهای قبل، قابلیت اطمینان زیرسیستمهای ششگانه درام شیرر به طور جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته و مدلسازی گردیدند. چنانکه در فصل قبل ذکر شد، مدل‌های قابلیت اطمینان مذکور، پایه و اساس دستیابی به قابلیت اطمینان کل دستگاه میباشند. برای بررسی بیشتر و مطالعه ارتباط قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف دستگاه، منحنیهای قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف درام شیرر معدن طبس در شکل 5-35 به صورت یکجا ارائه شدهاند. با دقت در این شکل، مشاهده میشود که بازوهای برش در تمام طول عمر دستگاه از قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سایر زیرسیستمها برخوردارند. پس از سیستم بازوها، سیستم کابل، تا زمان 500 ساعت بالاتر از سایر زیرسیستمها قرار دارد اما، پس از 500 ساعت، به جایگاه پائینتر از سیستمهای حرکت، هیدرولیک و برق دستگاه نزول میکند. قابلیت اطمینان سیستم برق دستگاه تا زمان 20 ساعت، بینابین قابلیت اطمینان سیستم حرکت و هیدرولیک دستگاه قرار دارد اما، پس از این زمان، افت شدیدتری نسبت به دو زیرسیستم



دیگر داشته و تا آخر دوره قابلیت اطمینان دستگاه، در سطح پائینتری نسبت به سیستم حرکت و هیدرولیک قرار میگیرد.



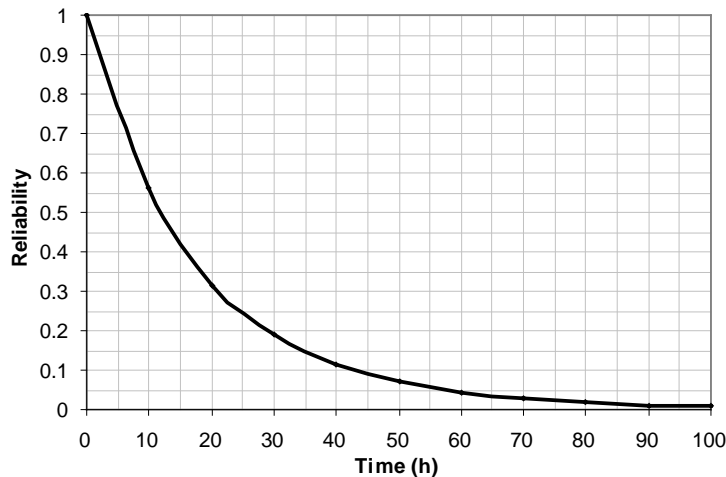
شکل 5-35- منحنیهای قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف درام شیرر

500 اختلاف قابلیت اطمینان سیستمهای کابل، حرکت، هیدرولیک و برق دستگاه پس از زمان ساعت به حداقل ممکن رسیده و از آن زمان به بعد از پتانسیل خرابی نسبتاً برابری برخوردارند. اما بحرانیترین و ضعیفترین زیرسیستم دستگاه که در شکل جلب توجه مینماید، سیستم آب میباشد. این سیستم با دارا بودن دوره قابلیت اطمینان 300 ساعت، در تمام طول عمر دستگاه از کمترین قابلیت اطمینان برخوردار است. با توجه به میزان بالای پتانسیل خرابی سیستم آب، این زیرسیستم همواره به عنوان مهمترین عامل بازدارنده و کاهنده قابلیت اطمینان دستگاه به شمار میرود. با توجه به اینکه ساختار و شبکه قابلیت اطمینان و عملیات درام شیرر به صورت سری تعریف شده است، لذا، قابلیت اطمینان کل دستگاه را میتوان با استفاده از رابطه 5-13 محاسبه نمود.

(13-5)

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

که در آن،  $R_{system}$  نشان دهنده قابلیت اطمینان کل دستگاه در زمان  $t$ ، قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در زمان  $t$  و  $n$ ، تعداد زیرسیستمها میباشد. با استفاده از رابطه فوق، قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس محاسبه گردیده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل 5-36 ارائه شده است.



شکل 5-36- منحنی قابلیت اطمینان درام شیرر

چنانکه در شکل دیده میشود، قابلیت اطمینان کل دستگاه شیرر پس از طی 100 ساعت تقریباً به صفر میرسد. قابلیت اطمینان دستگاه در طی 10 ساعت اول، 45 درصد کاهش مییابد و پس از 12 ساعت، احتمال خرابی و کارکرد مناسب دستگاه برابر میشود. با دقت در منحنی قابلیت اطمینان دستگاه مشخص میشود که به طور میانگین در هر ساعت یک درصد از قابلیت اطمینان دستگاه کاسته میشود.

### 5-7- شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس

از آنجایی که قابلیت اطمینان از جنس احتمال میباشد، همواره با عدم قطعیت همراه است. لذا تعیین سطح اعتماد قابلیت اطمینان محاسبه شده برای درام شیرر، یکی از اهداف اصلی این تحقیق به شمار میآید. برای این منظور از روش شبیهسازی قابلیت اطمینان استفاده میشود. چنانکه در فصل دوم اشاره گردید، در این رساله از روش شبیهسازی مونت کارلو استفاده خواهد شد. در شبیهسازی قابلیت اطمینان شیرر که یک دستگاه تعمیرپذیر میباشد، میتوان از روش کامات و

فرانزمیر (Kamat & Franzmeier, 1976) که عمومیت‌ترین و منعطف‌ترین روش شبیهسازی دستگاه‌های تعمیرپذیر به حساب می‌آید، استفاده کرد. اما، در دستگاه‌های تعمیرپذیر، فرآیند محاسبات به دلیل شبیهسازی همزمان زمان عملکرد ماشین (TBF) با زمان تعمیرات خرابیها (TTR)، با دشواریهایی نسبت به دستگاه‌های غیرقابل تعمیر همراه است. روش کامات و فرانزمیر بر مبنای مفهوم و تئوری روش K-R که برای دستگاه‌های غیرقابل تعمیر پیشنهاد شده، ارائه شده است. در مواردی که زمانهای صرف شده برای تعمیر و نگهداری در مقابل زمان کارکرد دستگاه قابل نظر کردن باشند، از نظر منطق روشهای مذکور، دستگاه تعمیرپذیر همانند دستگاه تعمیرناپذیر تلقی میشود و در این مواقع میتوان روش کامات و رایلی (K-R) را به جای کامات و فرانزمیر استفاده نمود.

در این مطالعه، با توجه به مطالعات عملی انجام شده در معدن، در ابتدا قبل از شروع مراحل شبیهسازی، میزان دقیق زمان عملکرد و توقفهای شیرر در طی پهنه اول معدن طبس محاسبه شد. محاسبات نشان داد که دستگاه در مجموع 2643/5 ساعت کار مفید داشته و عملیات برش انجام داده است و در مجموع 136/33 ساعت توقف داشته است. بنابراین، مشخص میشود که کل توقفهای دستگاه 5/16٪ زمان کل کارکرد دستگاه بوده است. لذا، به منظور سادهسازی و کاهش زمان مراحل شبیهسازی، میتوان از زمان توقفهای دستگاه صرفنظر کرد. در این حالت به راحتی میتوان از روش K-R برای شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس استفاده نمود. نکته شایان توجه دیگر در امر شبیهسازی درام شیرر، آرایش سری شبکه قابلیت اطمینان آن است. اولین گام، در اجرای شبیهسازی K-R، یافتن تمامی مسیرها شامل زیرسیستم‌های مختلف و نیز کوتاهترین مسیر است که کل سیستم را از ابتدا به انتها می‌رساند. با توجه به سری بودن ساختار زیرسیستمهای شیرر، تنها یک مسیر برای حصول عملکرد دستگاه وجود دارد و لذا نیازی به جستجوی کوتاهترین مسیر وجود ندارد. همین امر، باعث سادهتر شدن محاسبات و کاهش چشمگیر زمان اجرای الگوریتم میشود.

با توجه به تمامی موارد ذکر شده، فرضیات به کار رفته در شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیر معدن طبس به شرح زیر میباشند:

الف) تمامی زیرسیستمها و خود دستگاه شیر تعمیرپذیر میباشند.

ب) زمانهای صرف شده برای تعمیر و نگهداری در مقایسه با زمان عملکرد دستگاه قابل صرف نظر کردن هستند.

ج) دستگاه دارای شبکه قابلیت اطمینان سری بوده و نیازی به یافتن کوتاهترین مسیر در طی فرآیند شبیهسازی نیست.

با در نظر گرفتن فرضیات فوق و گامهای اجرای شبیهسازی قابلیت اطمینان کامات و رایلی، روندنمای<sup>۱</sup> مراحل شبیهسازی انجام شده بر روی درام شیر معدن طبس در شکل 5-37 نشان داده شده است.

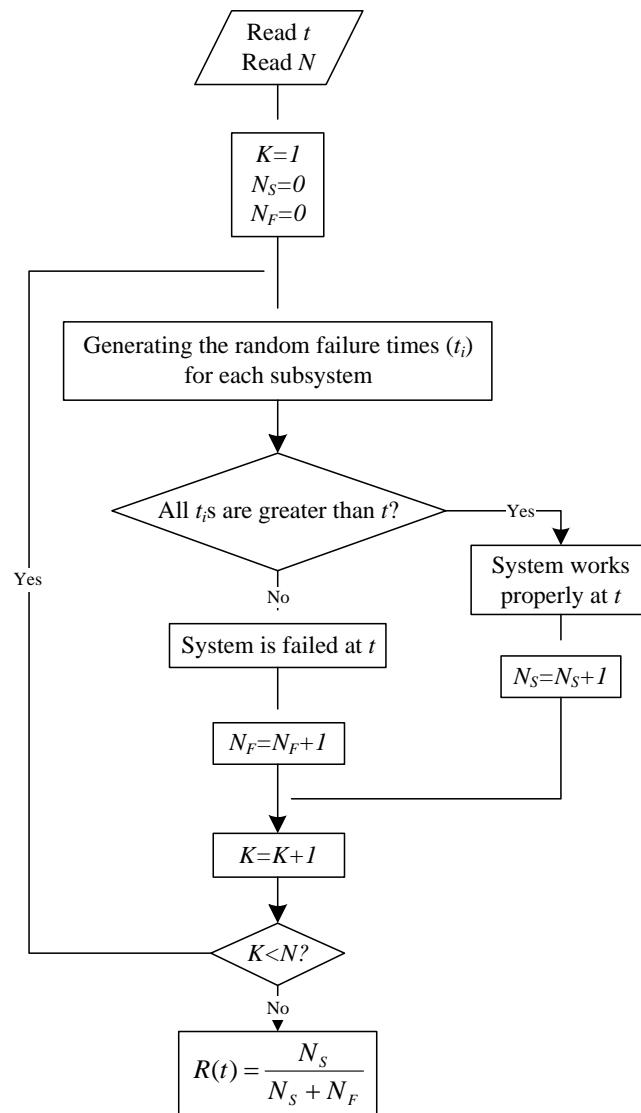
گام بعدی در انجام شبیهسازی قابلیت اطمینان، انتخاب نرمافزار و اجرای مراحل شبیهسازی توسط کامپیوتر میباشد. در این رساله برای انجام شبیهسازی، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرمافزار Matlab-7.5 (MathWorks, 2007) تهیه گردید. این نرمافزار، ابزار حرفهای برای برنامه نویسی عملیات ریاضی در اختیار کاربر قرار میدهد و با توجه به پیشترتاریف بسیاری از دستورهایی ریاضی و نیز در دسترس بودن بستههای پشتیبان همچون بسته تحلیلهای آماری و به ویژه توابع توزیع، برنامه نویسی بسیار آسانتر از سایر نرم افزارها حتی نرم افزارهای تخصصی مثل Mathematica انجام میشود. کاهش حجم برنامه و کنترل آسان مراحل اجرای آن، دو ویژگی مهمی بودند که برای انتخاب این نرم افزار در اولویت قرار گرفتند.

این برنامه، قابلیت اطمینان (R) دستگاه را در زمان  $t$  و با دور تکرار  $r^2$  محاسبه مینماید. این برنامه دارای سه ورودی اصلی است: زمان، دور تکرار و توابع احتمال خرابی تجمعی زیرسیستمهای دستگاه. در فاز نخست اجرای شبیهسازی، توابع توزیع تجمعی خرابی زیرسیستمها با استفاده از نتایج

<sup>1</sup>. Flowchart

<sup>2</sup>. Iteration number

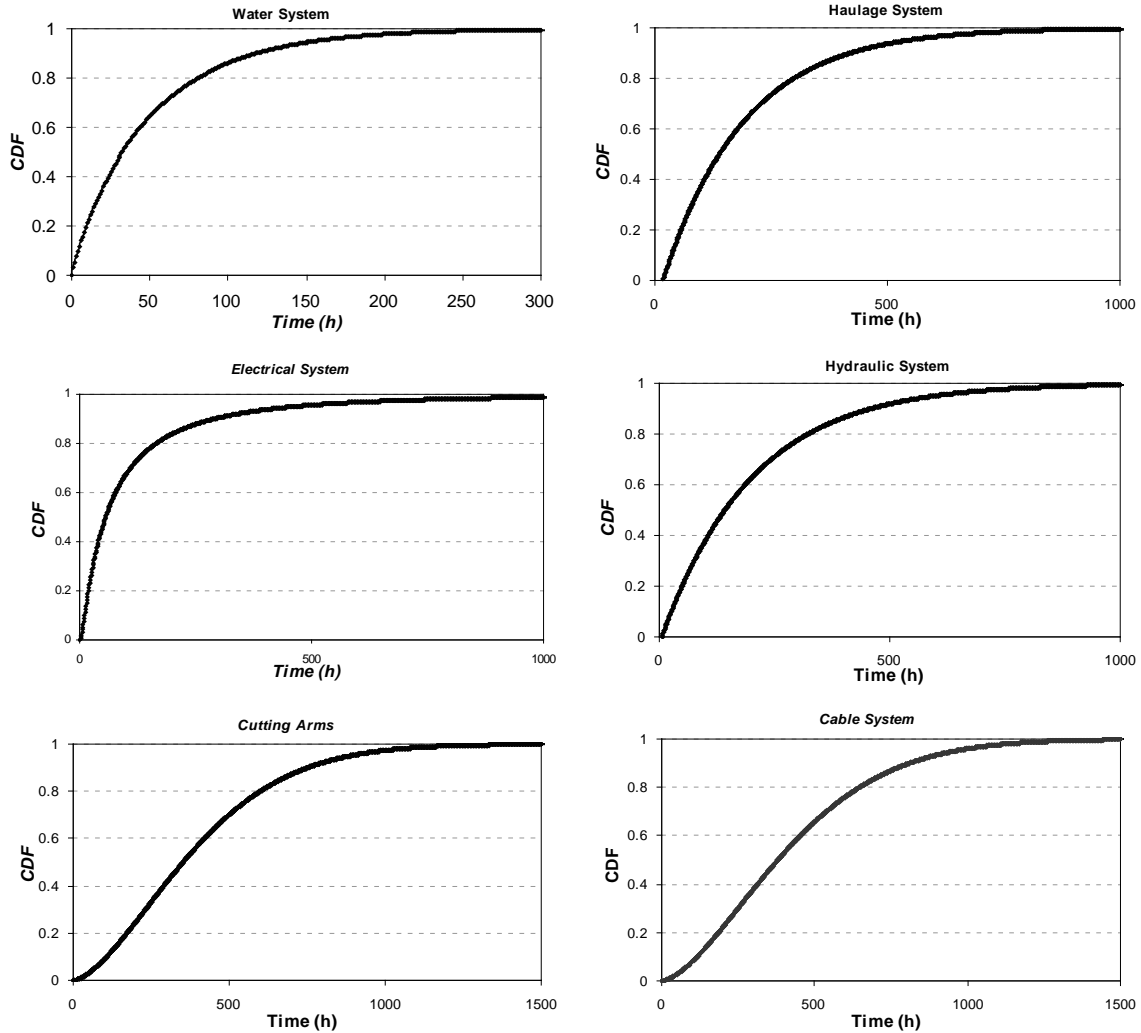
تحلیلهای آماری انجام شده محاسبه شدند. این توابع در شکل 5-38 ارائه شدهاند.



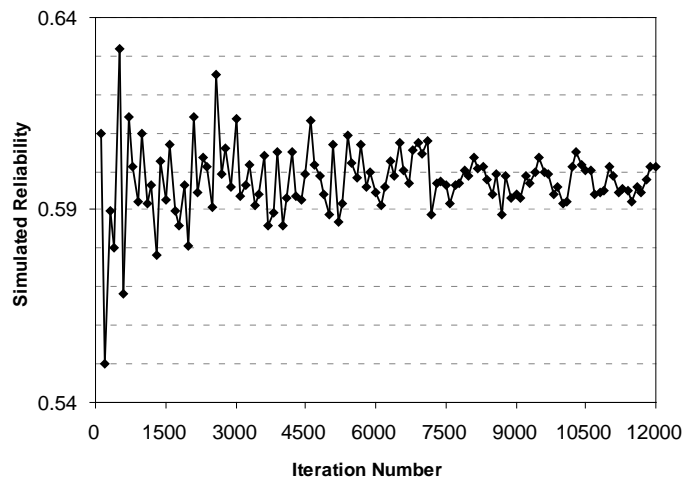
شکل 5-37- روندنمای شبیهسازی مونت کارلو انجام شده بر روی شیرر معدن طبس

ورودی بعدی، دور تکرار (r) اجرای برنامه میباشد. دور تکرار را شاید بتوان مهمترین پارامتر اجرایی هر شبیهسازی دانست. این پارامتر، دقت خروجی برنامه و زمان اجرای آن را به شدت تحت تأثیر قرار میدهد. هر چه دور تکرار بیشتر باشد، دقت خروجی برنامه افزایش مییابد. اما از طرفی با بیشتر شدن دور تکرار، زمان اجرای برنامه افزایش مییابد. لذا تعیین دور تکرار مناسب که تأمین کننده دقت مناسب و زمان کم باشد، قبل از اجرای برنامه و حصول نتایج الزامی است. لذا، در این تحقیق نیز قبل از آغاز شبیهسازی، مقدار مناسب دور تکرار برنامه تعیین گردید. برای این منظور، قابلیت اطمینان

دستگاه در زمان  $t=10$ ، با استفاده از دور تکرارهای 100 الی 12000 با افزایش پلهای 100 واحدی اجرا گردید. نتایج این محاسبات در شکل 5-39 ارائه شده است



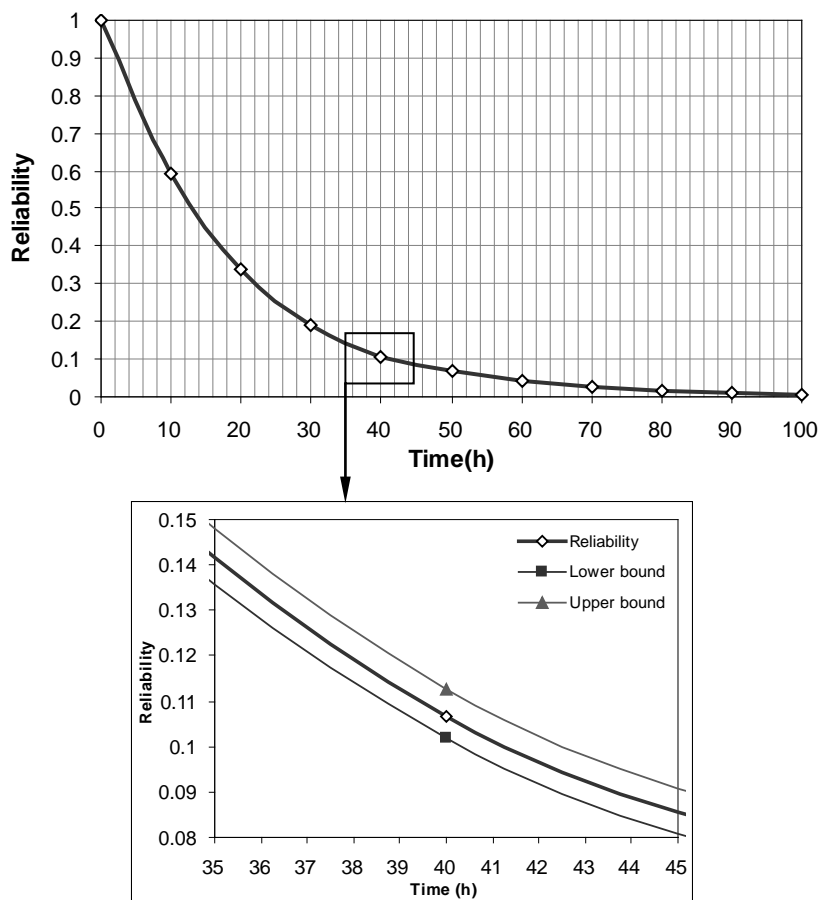
شکل 5-38- توابع توزیع احتمال خرابی تجمعی زیرسیستمهای ششگانه دستگاه شیرر معدن طیس



شکل 5-39- تأثیر دور تکرار بر قابلیت اطمینان شبیهسازی شده دستگاه در زمان  $t=10$  چنانکه در شکل مشاهده میشود، با افزایش دور تکرار برنامه، مقادیر قابلیت اطمینان محاسبه شده به سمت بازه بین 0/59 و 0/6 تمایل پیدا کرده و پس از دور تکرار 7500 و بیشتر، مقدار قابلیت اطمینان شبیهسازی شده توسط نرمافزار تقریباً به طور کامل در این بازه ثابت میماند. لذا، برای اجرای شبیهسازی اصلی، عدد 7500 به عنوان دور تکرار برنامه تهیه شده انتخاب گردید.

پس از محاسبه توابع توزیع احتمال خرابی تجمعی زیرسیستمها و تعیین دور تکرار و کنترل نهایی، نوبت به اجرای برنامه میرسد. در ابتدای اجرای برنامه، زمانی را که کاربر میخواهد قابلیت اطمینان دستگاه را در آن زمان محاسبه کند، به صورت یک پرسش در صفحه کامپیوتر ظاهر میشود و زمان مورد نظر توسط کاربر به برنامه داده میشود. زمان ورودی در این مرحله در حافظه برنامه میماند و تمامی زمانهای خرابی تصادفی تولید شده برای زیرسیستمهای مختلف، با این زمان مقایسه شده و محاسبات تا حصول مقدار قابلیت اطمینان دستگاه در زمان مورد نظر، ادامه مییابد. بر مبنای همین فرآیند، مراحل شبیهسازی قابلیت اطمینان دستگاه شیر در زمانهای مختلف اجرا گردیده و قابلیت اطمینان دستگاه محاسبه شد. نتیجه اجرای برنامه به صورت منحنی قابلیت اطمینان به صورت شکل 5-40 ارائه شده است. چنانچه در شکل مشاهده میشود، قابلیت اطمینان دستگاه پس از 100 ساعت حدوداً به صفر میرسد. در ادامه این فصل، منحنی قابلیت اطمینان شبیهسازی شده و مدلسازی شده با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

تعیین حد بالا و حد پائین قابلیت اطمینان دستگاه در سطح اعتماد مشخص، دومین هدف مهم شبیهسازی به شمار میآید. در این تحقیق، محاسبه حد بالا و حد پائین قابلیت اطمینان دستگاه شیرر با سطح اعتماد 90 درصد مورد نظر میباشد. برای محاسبه این حدود، از نتایج شبیهسازی و نیز رابطه 20-2 استفاده شده است. نتایج محاسبات حد بالا و حد پائین قابلیت اطمینان دستگاه در زمانهای مختلف از عمر دستگاه در جدول 5-13 و نیز شکل 5-40 ارائه شده است.



شکل 5-40- منحنی قابلیت اطمینان شبیهسازی شده درام شیرر معدن طبس

چنانکه در جدول مشاهده میشود، قابلیت اطمینان دستگاه با سطح اعتماد 90 درصد، در بازه بسیار کوچکی قرار میگیرد که تفاوت مقادیر حد بالا و پائین و قابلیت اطمینان بسیار کم و در حد هزارم یا صدم است. به این دلیل، نمایش کامل (از صفر تا 100) این حدود بر روی منحنی قابلیت اطمینان ممکن نمیباشد و لذا فقط یک بخش از منحنی به صورت بزرگنمایی شده، شامل قابلیت اطمینان و



حدود بالا و پائین در شکل 5-40 ارائه شده است. اختلاف بسیار ناچیز حدود مذکور، نشان دهنده آن است که از منحنی قابلیت اطمینان حاصل از شبیهسازی انجام شده، میتوان با سطح اعتماد بالایی در امور برنامه‌ریزی و مدیریتی دستگاه استفاده نمود.

## 5-8- مقایسه نتایج مدلسازی و شبیهسازی مونت کارلو قابلیت اطمینان شیرر معدن طبس

در این تحقیق قابلیت اطمینان درام شیرر از دو رهیافت متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. با

جدول 5-13- نتایج محاسبات حد بالا و پائین قابلیت اطمینان شیرر

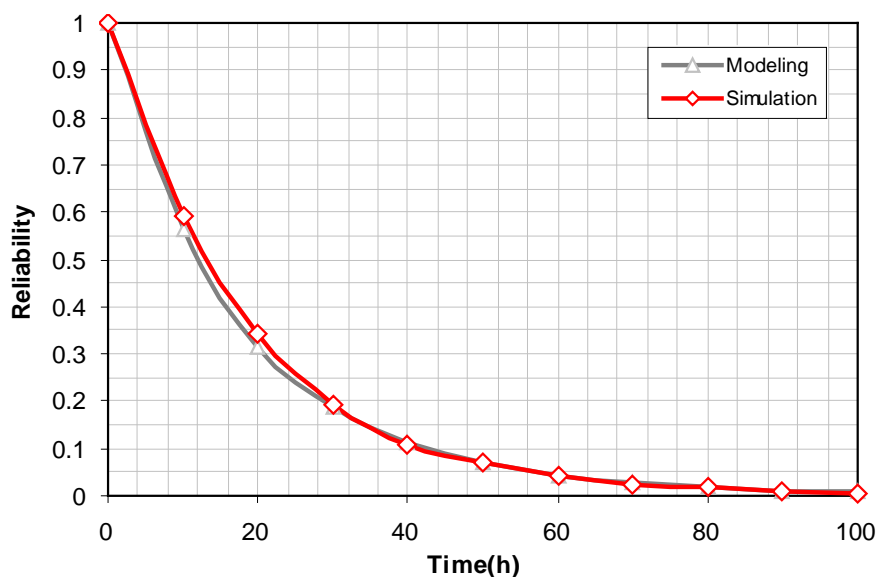
بازه اعتماد 90٪		قابلیت اطمینان (R)	زمان (ساعت)
5٪ حد بالا (R <sub>U</sub> )	5٪ حد پائین (R <sub>L</sub> )		
1	1	1	0
0/601	0/584	0/601	10
0/35	0/333	0/341	20
0/198	0/184	0/19	30
0/113	0/102	0/107	40
0/076	0/067	0/071	50
0/047	0/04	0/043	60
0/028	0/023	0/025	70
0/02	0/015	0/018	80
0/013	0/009	0/011	90
0/008	0/006	0/007	100

مقایسه تئوری و فرآیند محاسبات دو روش مذکور، مشخص میشود که نتایج حاصل از مدلسازی قابلیت اطمینان بر پایه محاسبات تحلیلی انجام میگردد، اما نتایج حاصل از شبیهسازی مبنای تصادفی<sup>1</sup> دارند. از آنجایی که رفتار خرابی ماشینآلات نیز مبنای تصادفی دارند، لذا، معمولاً نتایج حاصل از شبیهسازی، از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار بوده و رفتار دستگاه را بهتر معرفی مینماید. با تکیه بر این موضوع، میشود از نتایج شبیهسازی برای ارزیابی و راستی‌آزمایی نتایج مدلسازی نیز استفاده نمود. شایان ذکر است که نیمی از مراحل محاسبه قابلیت اطمینان در هر دو روش، مشابه هم میباشند. به این صورت که، ابتدا مراحل ارزیابی دادهها و تعیین تابع چگالی احتمال خرابی زیرسیستمها انجام میشوند. اما، برای تعیین قابلیت اطمینان کل دستگاه، در روش مدلسازی، قابلیت

<sup>1</sup>. Stochastic

اطمینان زیرسیستمها در همدیگر ضرب میشوند، ولی در روش شبیهسازی، زمانهای تصادفی بر مبنای توابع خرابی زیرسیستمها تولید شده و مراحل بعدی شبیهسازی ادامه پیدا میکند. به عبارت دیگر، تفاوت مدلسازی و شبیهسازی در نحوه ترکیب قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف دستگاه میباشد.

منحنی قابلیت اطمینان حاصل از مدلسازی و شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس در شکل 5-41 ارائه شده است. چنانچه در شکل مشاهده میشود، نتایج مدلسازی و شبیهسازی بسیار به هم نزدیک میباشد و تفاوت این دو منحنی بیشتر مربوط به بازه ساعت 10 الی ساعت 30 عملکرد ماشین میباشد. در اوایل کار و انتهای دوره قابلیت اطمینان، از آنجایی که دستگاه حالت پایدارتری دارد، این دو منحنی با هم انطباق کامل دارند، اما در بازه 10-30 ساعت که به نوعی بازه گذار از حالت قابل اعتماد به حالت خرابی دستگاه است، قابلیت اطمینان حاصل از مدلسازی از منحنی حاصل از شبیهسازی فاصله میگیرد. با دقت در هر دو منحنی مشخص میشود که منحنی قابلیت اطمینان حاصل از شبیهسازی، نرمتر، منظمتر و یکنواختتر از منحنی مدلسازی است و این امر دقیقاً نشان دهنده تطابق خیلی خوب شبیهسازی با طبیعت تصادفی خرابیهای دستگاه است. لذا، منحنی حاصل از شبیهسازی قابل استفادهتر از منحنی حاصل از مدلسازی به نظر میرسد.



شکل 5-41- منحنی قابلیت اطمینان مدلسازی و شبیهسازی شده درام شیرر معدن طبس

شایان ذکر است، تشابه بسیار زیاد نتایج مدلسازی و شبیهسازی، نشان دهنده این واقعیت است که تحلیل دادهها و مدلسازی قابلیت اطمینان دستگاه نیز در حد مناسب و خوبی انجام شده و خطای مدلسازی تا حد بسیار قابل قبولی کنترل شده است.

## 5-9- نتیجهگیری

در این فصل، دادههای خرابی دستگاه درام شیرر معدن طبس مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف، تمامی دادهها به زیرسیستمهای ششگانه دستگاه مربوطه اختصاص داده شدند.

نتایج تحلیل پارتو نشان داد که سیستم آب با 30٪ کل خرابیها، دارای بالاترین فراوانی خرابی در بین سایر زیرسیستمها است. سیستم کابل و سیستم برق به ترتیب با 27٪ و 14٪ در ردههای بعدی قرار دارند.

نتایج تحلیلهای آماری نشان داد که رفتار خرابی سیستم آب از تابع گاما، سیستمهای حرکت و هیدرولیک از تابع وایبول سه پارامتری، سیستم برق از تابع لاگنرمال و دو سیستم کابل و بازوهای برش از مدل قانون توان تبعیت میکنند. در مرحله بعد، با استفاده از نتایج تحلیل داده و در نظر گرفتن ساختار سری برای زیرسیستمهای دستگاه، قابلیت اطمینان کل دستگاه محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد که قابلیت اطمینان درام شیرر طبس پس از طی 100 ساعت عملیات برش، تقریباً به صفر میرسد.

همچنین، در این فصل با استفاده از روش مونت کارلو کامات و رایلی (K-R)، قابلیت اطمینان درام شیرر شبیهسازی شد. مقایسه میان نتایج شبیهسازی و مدلسازی نشان داد که منحنیهای قابلیت اطمینان حاصل از هر دو روش بسیار به هم شبیه میباشند. اما منحنی حاصل از روش شبیهسازی نرمتر و یکنواختتر بوده و از توانایی بالاتری برای پیشبینی قابلیت اطمینان دستگاه برخوردار است.

در فصل آینده با استناد به نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان انجام شده در این فصل، استراتژی مناسب برای تعمیر و نگهداری شیرر طبس انتخاب گردیده و برنامه عملی برای اجرای این استراتژی ارائه خواهد شد.

## فصل ششم

# تعمیر و نگهداری شیرر معدن طبس

## 6-1- مقدمه

در جامعه صنعتی امروز، تعمیر و نگهداری به عنوان یکی از ارکان مهم تمامی صنایع، نقش تعیین کننده‌ای در میزان راندمان تولید و اقتصاد صنایع ایفا میکند. ماشینآلات و دستگاهها، به عنوان سرمایه اصلی هر صنعت، پیکره و ساختار تولید را تشکیل داده و کیفیت عملکرد آنها، تعیین کننده کیفیت نهایی محصول میباشد. تعمیر و نگهداری، یک رهیافت عملی برای حفظ کیفیت دستگاهها و دستیابی به تولید طراحی شده به حساب می‌آید.

در فصل قبل قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. چنانکه در فصول دوم و سوم اشاره گردید، قابلیت اطمینان یک دستگاه اطلاعات پایه در مورد رفتار خرابی و توقفهای دستگاه ارائه میکند که این اطلاعات کاربردهای بسیار زیادی در حوزه مدیریت ماشینآلات و تعمیر و نگهداری آنها برخوردار است.

در این فصل، ابتدا با تکیه بر آمار و اطلاعات موجود از سایر کشورهای جهان، اهمیت اقتصادی تعمیر و نگهداری ماشینآلات معدنی بررسی میشود. سپس در ادامه، انواع روشهای تعمیر و نگهداری و نحوه انتخاب روش تعمیر و نگهداری مناسب برای یک دستگاه مورد بحث قرار میگیرند. در پایان، استراتژی

مناسب برای تعمیر و نگهداری دستگاه شیرر طبس انتخاب شده و سپس برنامه اجرایی مناسب برای پیادهسازی استراتژی مورد نظر ارائه میشود.

## 6-2- اهمیت تعمیر و نگهداری ماشینآلات معدنی

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

- به طور کلی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات (در تمامی صنایع) از 20 الی 35 درصد کل هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود. اما، در ماشین‌آلات معدنی هزینه‌های تعمیر و نگهداری به 40 الی 50 درصد هزینه‌های تولید می‌رسد (Dhillon, 2008).

- در معادن زغال‌سنگ استرالیا که بزرگترین کشور صادرکننده زغال‌سنگ جهان به حساب می‌آید، 10 درصد زمان تولید، توسط تعمیرات برنامه‌ریزی نشده از دست می‌رود (Clark, 1990).

- در معادن روباز شیلی و اندونزی هزینه‌های تعمیر و نگهداری 60 درصد هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود (Hall & Daneshmend, 2000).

- به طور کلی با مطالعه صحیح سیستم‌های مهندسی می‌توان زمان تعمیرات و توقف‌های ناخواسته تولید را بسته به نوع هر صنعت از 40 الی 70 درصد کاهش داد (Unger & Conway, 1994).

- هزینه تعمیرات و نگهداری 40 الی 50 درصد هزینه عملیات معدن را شامل میشود (Forsman & Kumar, 1992).

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

### 6-3- تعمیر و نگهداری<sup>1</sup>

عملکرد یک دستگاه علاوه بر طراحی و شرایط محیط کار، به میزان سرویس و تعمیر و نگهداری انجام شده در طی عمر عملیاتی دستگاه بستگی کامل دارد. سرویسکاری مطلوب (مثل تعویض روغن به موقع)، تعمیر یا تعویض مناسب قطعات خراب شده و نگهداری دستگاه در محل مناسب در ساعات غیرکاری، از جمله عواملی هستند که باعث افزایش عمر مفید دستگاه میشوند (Blischke & Murthy, 2003).

به هر عملیاتی (غیر از سرویسکاری عادی مثل تعویض روغن یا سوختگیری) که به منظور حفظ یک دستگاه در شرایط عملیاتی موجود یا بازگرداندن دستگاه به شرایط قبل از خرابی انجام گیرد، تعمیر و نگهداری گفته میشود (Blischke & Murthy, 2003). اهداف اصلی تعمیر و نگهداری عبارتند از (Wang & Pham, 2006; Dhillon, 2006; Kececicyoglu, 2002):

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

<sup>1</sup>. Maintenance

نگهداری در تمامی صنایع به شمار می‌آیند. در این میان، کاهش هزینه به عنوان یک هدف بالادستی، دو هدف دیگر را نیز پوشش می‌دهد. لذا در بهترین حالت، برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان ماشین، حداقل نمودن هزینهها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. اما، در برخی دستگاهها و فرآیندهای مهندسی، گاهی به دلیل وجود محدودیتهای بسیار جدی در منابع در دسترس، مهندسین مجبور به پذیرش هزینه بالای یک استراتژی به جای یک استراتژی کم هزینهتر میشوند. لذا، تعیین هدف تعمیر و نگهداری، تعیینکننده بسیاری از خط و مشیهای اجرایی در مدیریت ماشینآلات است.

#### 6-4- انواع استراتژیهای تعمیر و نگهداری

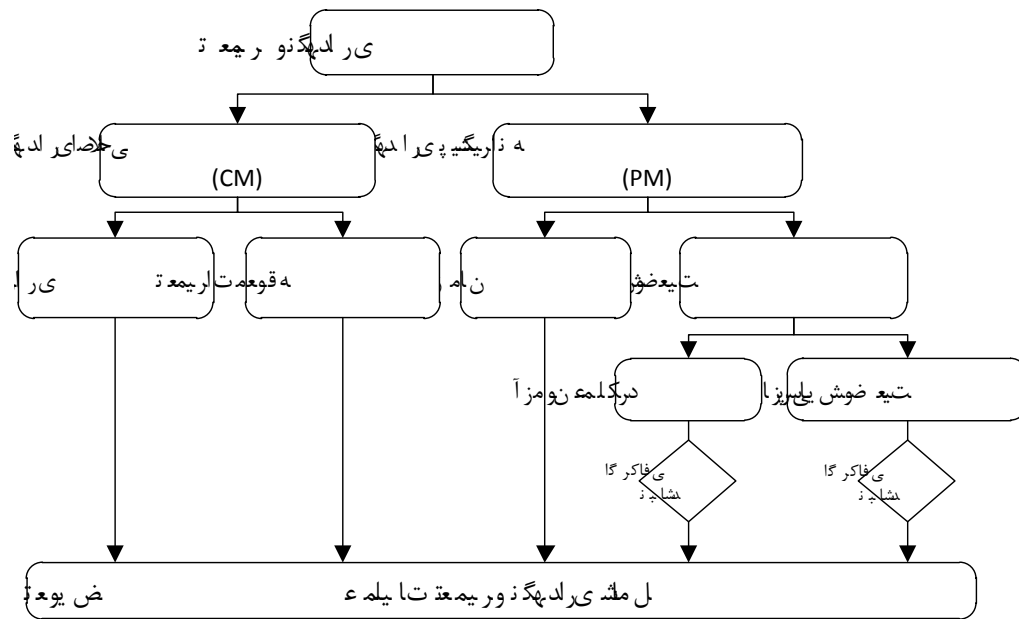
پس از تعیین هدف تعمیر و نگهداری یک دستگاه، مرحله بعدی انتخاب استراتژی یا سیاست تعمیر و نگهداری<sup>1</sup> مناسب با شرایط دستگاه، هدف مفروض و امکانات موجود است. در حالت کلی استراتژیهای تعمیر و نگهداری به دو نوع عمده تقسیم میشوند: تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM)<sup>2</sup> و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)<sup>3</sup>. هر یک از این روشها خود به زیرمجموعههایی از استراتژیهای مختلف تقسیم میشوند. شکل 6-1 انواع استراتژیهای تعمیر و نگهداری را به صورت خلاصه نشان میدهد. در ادامه هر یک از این استراتژیها به طور جداگانه مورد بررسی قرار میگیرند.

<sup>1</sup>. Maintenance policy

<sup>2</sup>. Corrective Maintenance

<sup>3</sup>. Preventive Maintenance





شکل 6-1- انواع استراتژیهای تعمیر و نگهداری ( Ahmadi, 2010; IEC-60300-3-14, 2004)

#### 6-4-1- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه عبارت است از یک برنامه ریزی و زمان بندی دقیق برای انجام فعالیتهای نگهداری مورد نیاز با هدف جلوگیری از فرسایش غیرعادی اجزای ماشین و کاهش توقفهای اضطراری. در این روش، دستگاه در بازه های زمانی خاص و بر اساس زمان بندی مشخصی مورد بازرسی و عیبیابی و یا تعمیر قرار می گیرد (Dhillon, 2006). به عبارتی، این استراتژی بیانکننده مجموعه های از عملیات برنامه ریزی شده بازرسی، سرویس و تعمیرات برای حفظ شرایط مطلوب کارکرد دستگاه و پیشگیری از خرابی جدی آن است (Pham, 2003). برنامه ریزی و تعیین زمان مناسب این تعمیرات به دو طریق عمده انجام می گیرد: الف) مبتنی بر پایش وضعیت و ب) مبتنی بر زمان. هر یک از این روشها موارد کاربرد خاصی دارند که در ادامه مورد بحث قرار می گیرند.

#### 6-4-1-1- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت (C.B.M)<sup>1</sup>

این نوع تعمیر و نگهداری به مجموعه فعالیتهایی اطلاق می گردد که جهت تعیین شرایط فنی کارکرد دستگاه (اندازه گیری میزان فرسایش اجزاء) در حین بهره برداری انجام شده و بر اساس نتایج

<sup>1</sup>. Condition Based Maintenance

حاصل از آن، زمان و نوع فعالیت تعمیر پیشگیرانه مورد نیاز تعیین می‌گردد. فعالیتهای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر پایش وضعیت عبارتند از (IEC-60300-3-14):

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

این روش در فواصل زمانی مشخص و در حین کارکرد ماشین، شرایط اجزاء دستگاه توسط متخصص پایش وضعیت و با استفاده از ابزار ویژه، اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده با محدوده کارکرد مجاز اجزاء مقایسه می‌شود. تصمیمگیری در مورد ادامه کار ماشین و یا توقف آن جهت فعالیتهای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، بر اساس نتایج حاصله از این تحلیل انجام میشود. از جمله پارامترهای مورد مطالعه در این روش میتوان به ارتعاش، حرارت و آنالیز روغن اشاره نمود. در این روش هیچ فعالیت اضافی انجام نمی‌گیرد و برهمین اساس عبارت تعمیر و نگهداری اقتصادی نیز به این روش اطلاق می‌شود.

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

#### 6-4-1-2- تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان (T.B.M)<sup>1</sup>

تعمیر و نگهداری 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 به

<sup>1</sup>. Time Based Maintenance

عنوان مثال هر 100 ساعت یکبار 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:

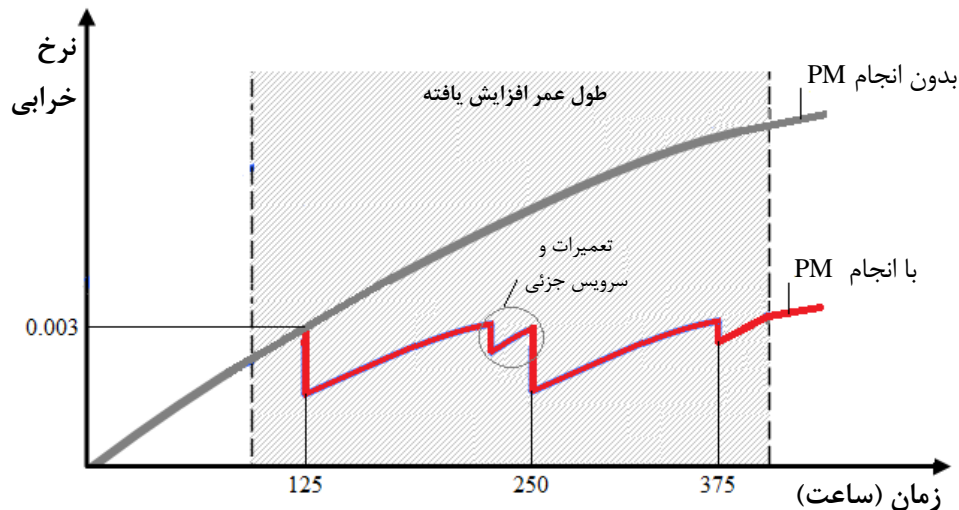
**الف) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان:**<sup>۲</sup> در این مورد با توجه به شرایط حاکم بر فرآیند تولید و نیز مشخصات طراحی دستگاه، یک سطح حداقل برای قابلیت اطمینان هر دستگاه یا زیرسیستمهای آن تعیین میشود و لذا قابلیت اطمینان دستگاه نباید از این حد پائینتر بیاید (Barabady & Kumar, 2008). تعمیرات پیشگیرانه در بازه‌های زمانی معادل با این حد قابلیت اطمینان انجام میگیرند. بنابراین، در این مورد هدف از تعمیر و نگهداری پیشگیرانه افزایش قابلیت اطمینان میباشد.

**ب) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر نرخ خرابی:**<sup>۳</sup> در این مورد نیز همچون مورد بالا، با توجه به سطح طراحی و نیز استانداردهای عملیاتی و ایمنی موجود در هر دستگاه، یک حد بیشینه برای نرخ خرابی دستگاه تعیین میشود. عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازه‌های زمانی که این دستگاه به نرخ مذکور میرسد بر روی دستگاه اجرا میشود تا از این طریق نرخ خرابی دستگاه بهبود یافته و در یک حد تقریباً ثابتی نگهداشته شود (Ghodrati, 2010). هدف تعمیرات پیشگیرانه در این مورد، کاهش نرخ خرابی دستگاه خواهد بود. شکل 6-2 تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را بر نرخ خرابی و عمر مفید دستگاه نشان میدهد.

<sup>1</sup>. Maintenance interval

<sup>2</sup>. Reliability-based maintenance scheduling

<sup>3</sup>. Failure-rate-based maintenance scheduling



شکل 6-2- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر نرخ خرابی و عمر مفید دستگاه (Ghodrati, 2010)

چنانکه در این شکل نشان داده شده است، اگر به عنوان مثال، هدف ما حفظ نرخ خرابی دستگاه در حدود 0/003 خرابی بر ساعت باشد، این دستگاه باید هر 125 ساعت یکبار مورد تعمیر پیشگیرانه قرار گیرد.

ج) **برنامهریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر حداقل هزینه**<sup>1</sup>: در این روش بهترین زمان تعمیر و نگهداری طوری انتخاب میشود که هزینه کل تعمیرات اعم از اصلاحی یا پیشگیرانه به حداقل برسد. این روش که "بهینهسازی تعمیر و نگهداری" نیز نامیده میشود، قطعیتین و مناسبترین روش تعیین تعمیرات پیشگیرانه به حساب میآید (Campbell et al. 2001). اما، باید توجه نمود در برخی دستگاهها با توجه به شرایط عملیاتی موجود، شاید روش مبتنی بر قابلیت اطمینان یا نرخ خرابی تنها راهکار باشد گرچه ممکن است از نظر هزینه این روشها بهینه نباشند.

در مجموع، هر یک از استراتژیهای PM که برای یک دستگاه انتخاب شوند، یک سری فعالیتهای پیشگیرانه استاندارد انجام میگیرند که به طور خلاصه عبارتند از (Campbell & Jardine, 2001):

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

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

<sup>1</sup>. Cost-effective maintenance scheduling

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

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

#### 6-4-2- تعمیر و نگهداری اصلاحی

این نوع تعمیر و نگهداری پس از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک بخش یا کل دستگاه به حالت عملیاتی به کار برده میشود. طی این عملیات قطعات معیوب تعمیر گردیده یا با یک قطعه جدید (یا کارکرده) جایگزین میشود (Blischke & Murthy, 2003). این روش کاملاً بر خلاف روشهای PM بدون برنامه‌ریزی بوده و پس از خرابی دستگاه انجام میشود. چنانکه در شکل 6-1 نشان داده شده است، عملیات CM بسته به سطح بحرانیبودن خرابی و نیز بسته به شرایط عملیات، میتواند به صورت اضطراری<sup>1</sup> یا معوقه<sup>2</sup> انجام شود. تعمیرات اضطراری زمانی انجام میشوند که خرابی، بسیار بحرانی بوده و باعث توقف 100 درصد عملیات گردد. در این حالت تعمیر و رفع عیب در همان لحظه انجام شده و عملیات پس از رفع عیب مجدداً آغاز میشود. رفع پنچری لاستیک خودرو مثالی برای این تعمیرات است.

تعمیرات معوقه زمانی انجام میشوند که خرابی دستگاه به صورت محدود و بخشی بوده و روند عملیات را دچار توقف ننماید. لذا، میتوان تعمیرات این بخش را تا آخر شیفت کاری یا هر زمان

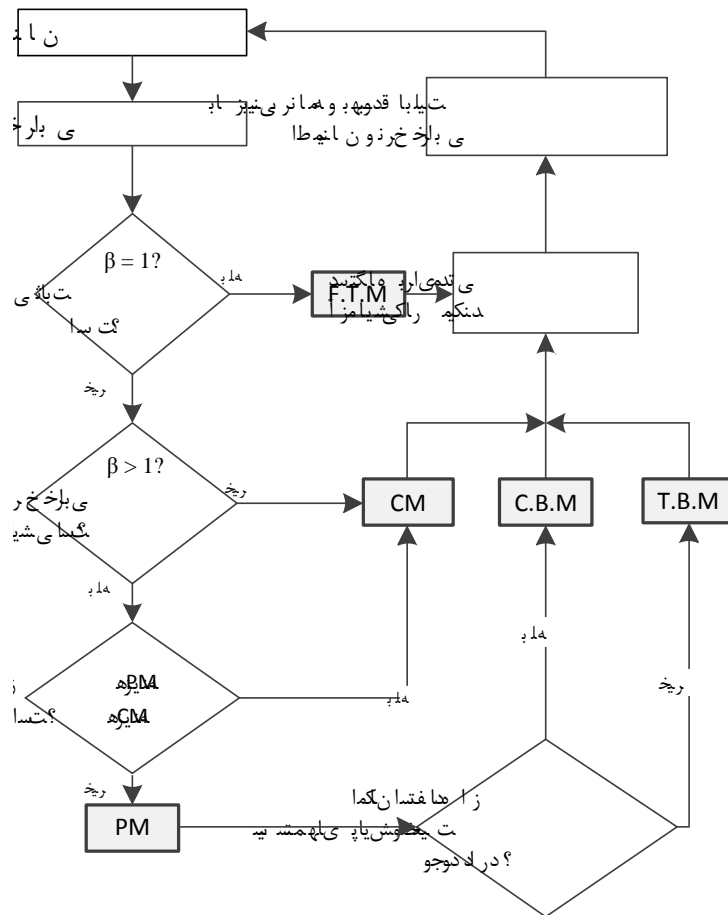
<sup>1</sup>. Emergency/Immediate maintenance

<sup>2</sup>. Deferred maintenance

مناسب دیگری به تعویق انداخت. ترک خوردن شیشه جلوی خودرو و تعویض آن، نمونه‌های از این نوع تعمیرات است.

## 5-6- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری

با توجه به تفویض‌های موجود در تعمیر و نگهداری، الگوریتم انتخاب استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری برای یک دستگاه به صورت شکل 3-6 قابل ارائه است.



شکل 3-6- الگوریتم انتخاب استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری (تعدیل شده از Barabady & Kumar, 2007)

چنانکه در شکل مشاهده میشود، اساس انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری بر تحلیل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی دستگاه استوار است. اگر نرخ خرابی دستگاه ثابت باشد، از آنجایی که گذشت زمان تأثیری بر کمیت خرابی ندارد، لذا تنها روش تعمیر و نگهداری مناسب در این سیستمها "تعمیر

در زمان ثابت (F.T.M)<sup>1</sup> "میباشد. در این روش عملیات بازدید سراسری<sup>2</sup> (بازکردن، پیادهکردن و بستن مجدد دستگاه یا بخشهای آن) یا تعویض قطعه بدون توجه به شرایط قطعه در زمانهای ثابت و مشخصی انجام میشود. نمونههای از این نوع تعمیر و نگهداری تعویض فیلتر روغن در خودروها است. اگر نرخ خرابی کاهشی باشد، از آنجایی که دستگاه رو به بهبود پیش میرود، تغییر در شرایط عملکرد آن، موجب به هم ریختن رفتار رو به بهبود دستگاه میشود. بنابراین، در این حالت بهترین انتخاب، تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM) خواهد بود. این بدین معناست که به دستگاه اجازه داده میشود تا به کار خویش ادامه دهد و هر وقت خرابی اتفاق افتاد، آن بخش تعمیر شده و مجدداً دستگاه شروع به کار میکند.

در صورتی که نرخ خرابی افزایشی باشد، از آنجایی که دستگاه رو به زوال پیش میرود، لذا باید در مقاطعی از پیشرفت این فرآیند مخرب جلوگیری شود. برای این منظور اگر هزینه CM کمتر از کل هزینه PM باشد، CM به عنوان بهترین استراتژی انتخاب میشود (Hauge, 2002). در غیر این صورت PM به عنوان بهترین گزینه برای تعمیر و نگهداری خواهد بود و بقیه فرآیند انتخاب طبق شکل 3-6 ادامه مییابد.

در حالتی که T.B.M به عنوان انتخاب اصلی مطرح باشد، برای تعیین بهترین زمان انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، بسته به شرایط دستگاه و درجه اهمیت عملیات، از یکی از رهیافتهای ارائه شده نظیر؛ تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، تعمیر مبتنی بر نرخ خرابی یا حداقل هزینه استفاده میشود.

## 6-6- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر شرایط عملیاتی دستگاه

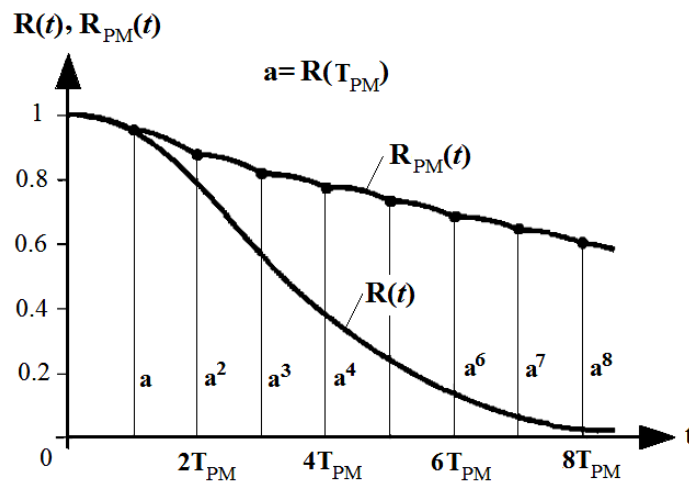
چنانکه در بخش 2-6 اشاره گردید، اهداف تعمیر و نگهداری یک دستگاه بر حسب شرایط دستگاه و محدودیتهای و نیازهای تولید در پنج مورد اصلی خلاصه میشوند. لذا، هر عملیات تعمیر و نگهداری

<sup>1</sup>. Fixed-time maintenance

<sup>2</sup>. Overhaul

نتایج و اثرات خاصی بر مشخصات عملیاتی دستگاه داشته و عموماً شرایط را بهبود میبخشد. از مهمترین پارامترهای دستگاه که با انجام تعمیر و نگهداری به ویژه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بهبود مییابند، قابلیت اطمینان را میتوان نام برد. در این بخش با توجه به اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه، تأثیرات این استراتژی بر دو کمیّت فوق مورد بررسی قرار میگیرد.

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به صورت مستقیم باعث افزایش قابلیت اطمینان دستگاه نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری میشود. اگر فرض کنیم که تعمیرات پیشگیرانه در بازه‌های زمانی  $T_{PM}$  بر روی دستگاه انجام شود، قابلیت اطمینان به صورتی که در شکل 4-6 نشان داده شده است، دچار تغییر میگردد. چنانچه در شکل ملاحظه میشود، قبل از انجام اولین PM، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً مشابه هم هستند اما پس از انجام اولین دوره تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تأثیر آن به وضوح آشکار میگردد و قابلیت اطمینان دستگاه تا حد چشمگیری افزایش مییابد (Kececiyoglu, 2002; Eberling, 2009). میزان این تغییر با استفاده از روابط (1-6) قابل محاسبه است.



شکل 4-6- تأثیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازه‌های زمانی  $T_{PM}$  بر قابلیت اطمینان دستگاه (Kececiyoglu, 2002)

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



که در آن:

$R(t)$ : قابلیت اطمینان در زمان  $t$

$R(T_{PM})$ : قابلیت اطمینان در زمان  $T_{PM}$  (بازه زمانی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه)

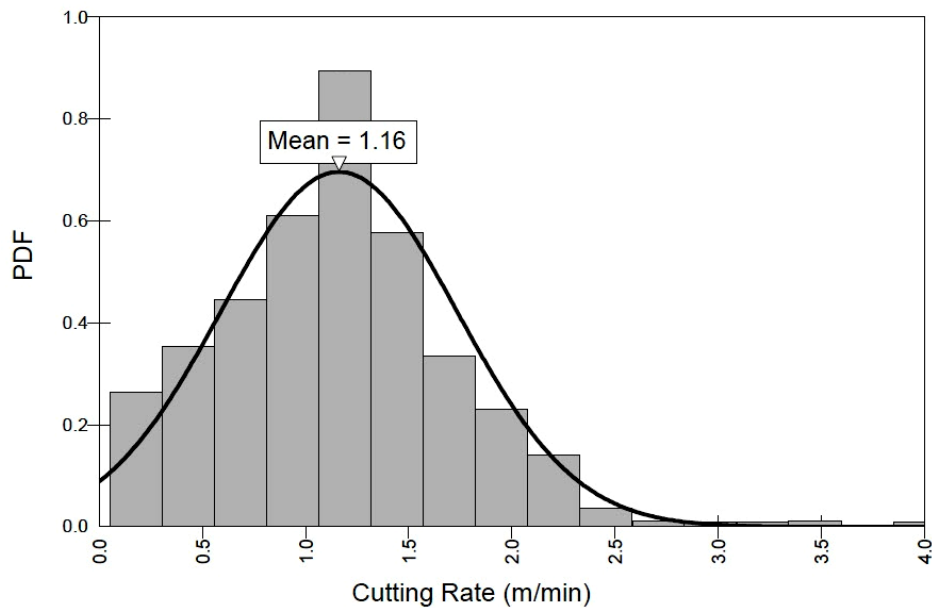
$n$ : تعداد تعمیر و نگهداری انجام شده

چنانکه مشاهده میشود، در صورت طراحی سیستم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، با استفاده از رابطه 1-6 به راحتی میتوان نتایج و تأثیرات این طرح را پیشبینی نموده و در مورد اجرا یا عدم اجرای آن تصمیمگیری کرد.

## 6-7- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری برای شیرر طبس

با دقت در مباحث ارائه شده، مشخص میشود که انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب برای یک دستگاه امری پیچیده بوده و تصمیمگیری چندمعیاره به حساب میآید. گاهی نیز، وجود برخی محدودیتها و پارامترهای تحمیل شده به دستگاه، کار تصمیمگیری و گزینههای پیش رو را محدودتر میکند و لذا نمیتوان مراحل انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری را به صورت نظاممند پیش برد. در سیستمهای تولید پیوسته و زنجیرهای مثل معادن جبههکار طولانی و پالایشگاهها و نیز در سیستمهای بسیار حساس و بحرانی مثل نیروگاههای اتمی و ماهوارهها، حفظ قابلیت اطمینان سیستم، هدف آرمانی و خدشهناپذیر به شمار میآید. این هدف، تمامی تصمیمات و برنامهریزیهای مربوط به این گونه سیستمها را به شدت تحت تأثیر قرار میدهد.

در این رساله، به منظور ارزیابی اهمیت پرهیز از توقفات ناخواسته در حین تولید در معدن زغالسنگ طبس، یک مطالعه آماری بر روی دادههای جمعآوری شده و عملکرد محاسبه شده دستگاه در معدن انجام شد. طبق دادههای موجود، هیستوگرام سرعت برش زغالسنگ و حرکت دستگاه در طول کارگاه به صورت شکل 5-6 میباشد.



شکل 6-5- هیستوگرام فراوانی سرعت برش زغال توسط شیرر در معدن طبس

چنانکه از شکل بر میآید، میانگین سرعت برش زغالسنگ در کارگاه اول معدن طبس،  $1/16$  متر بر دقیقه بوده است. با توجه به اینکه ارتفاع لایه زغال به طور متوسط  $1/8$  متر و عمق برش درام  $0/8$  متر میباشد، لذا به طور متوسط در هر دقیقه  $1/67$  متر مکعب زغالسنگ تولید میشود. با در نظر گرفتن وزن مخصوص  $1/6$  برای زغال استخراجی، میزان استخراج در هر دقیقه  $2/67$  تن زغالسنگ توسط شیرر تولید میشود. با احتساب قیمت 45 دلار برای هر تن زغالسنگ خام، ارزش زغالسنگ تولیدی در هر دقیقه،  $120/27$  دلار میباشد. لذا، در صورت هرگونه توقف ناخواسته در عملیات برش زغال،  $120/27$  دلار خسارت ناشی از تولید از دست رفته به معدن وارد میشود. این عدد، نشان دهنده این واقعیت است که کنترل خرابیها، کاهش توقفهای دستگاه و برنامه‌ریزی دقیق برای تعمیر و نگهداری شیرر تا چه اندازه میتواند شرایط عملیاتی و اقتصادی معدن را متحول نماید. با دقت در محاسبات فوق، مشخص میشود که برای حفظ پیوستگی تولید و کاهش توقفهای شیرر، باید قابلیت اطمینان آن در سطح بسیار بالایی حفظ شود تا همواره و در هر لحظه از تولید، احتمال بروز خرابی و توقف دستگاه کم باشد. لذا، این عامل به عنوان یک هدف آرمانی برای تمامی تصمیمگیریه‌ها در مورد مدیریت تولید و تعمیر و نگهداری شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی و به ویژه

در معدن طبس مطرح میباید.

با عنایت به موارد فوق و نیز استراتژیهای تعمیر و نگهداری شرح داده شده در شکل 6-1، تعمیر و

نگهداری اصلاحی (CM) از گزینههای تصمیمگیری حذف میشود. زیرا این نوع تعمیرات فقط در صورت وقوع خرابی بر روی دستگاه انجام میشود و این موضوع با هدف آرمانی این تحقیق که حفظ قابلیت اطمینان دستگاه در سطح بالا است، منافات دارد. لذا، خانواده تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) برای شرایط موجود دستگاه و عملیات تولید، مورد توجه قرار میگیرد. از آنجایی که هیچگونه سیستم تخصصی پایش وضعیت در معدن طبس برای دستگاه شیرر خریداری نشده و موجود نمیباشد، لذا تعمیر و نگهداری مبتنی بر پایش وضعیت هم از فرآیند تصمیمگیری حذف میشود و فقط تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر زمان، به عنوان گزینه اصلی مطرح میباشند. با توجه به سه روش زیرمجموعه تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر زمان، و از آنجایی که هدف آرمانی تصمیمگیری حفظ دستگاه در سطح قابلیت اطمینان بالا است، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان به عنوان استراتژی اصلی برای شیرر معدن طبس انتخاب میشود.

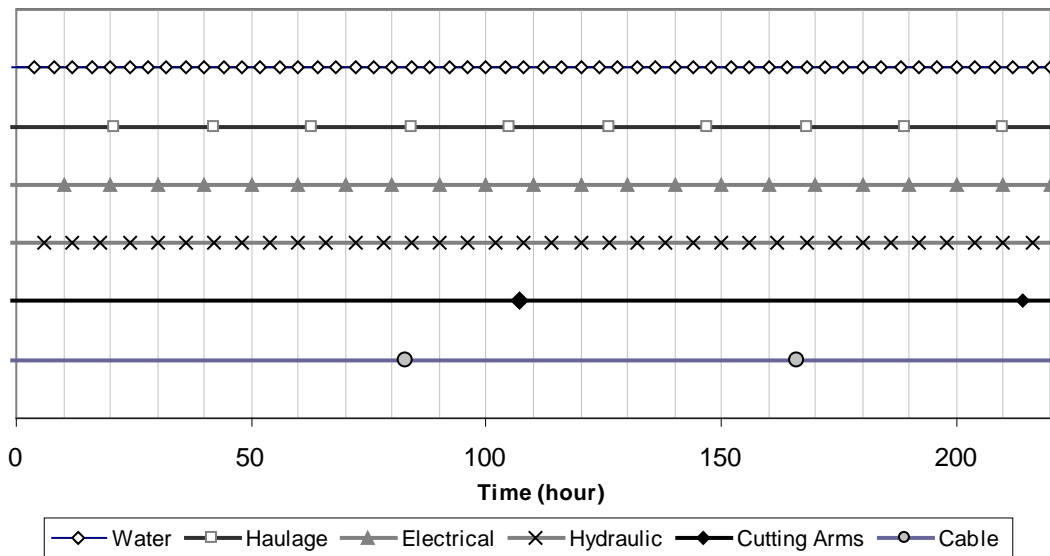
با انتخاب استراتژی مذکور، انتخاب سطح قابلیت اطمینان مطلوب برای دستگاه، دومین تصمیم حیاتی محسوب میشود. با توجه به سطح مدیریتی انتخاب شده برای مطالعه قابلیت اطمینان دستگاه شیرر، در این رساله تمامی برنامه‌ریزیها بر مبنای زیرسیستمهای دستگاه انجام میشود. به عبارت دیگر برای کنترل خرابیهای کل دستگاه، خرابیها و قابلیت اطمینان زیرسیستمها مورد هدف قرار گرفته و رهیافت "از جزء به کل" مد نظر قرار میگیرد. در این حالت، گسیل نیروهای تعمیر و نگهداری تخصصی (گروه تعمیرکاران برق و گروه تعمیرکاران مکانیک) به زیرزمین و بالای سر دستگاه به راحتی قابل برنامه‌ریزی و مدیریت میباید.

با در نظر گرفتن منحنیهای قابلیت اطمینان ارائه شده برای زیرسیستمهای مختلف در فصل پنجم و نیز امکانات اجرایی موجود در معدن و تخصص تعمیرکاران، قابلیت اطمینان 90 درصد، به عنوان قابلیت اطمینان هدف و حداقل سطح قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستمهای شیرر تعیین گردید.

لذا، برای حفظ قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در سطح حداقل 90 درصد، زمانی که هر زیرسیستم به قابلیت اطمینان 90 درصد میرسد، به عنوان دوره تعمیرات پیشگیرانه آن زیرسیستم انتخاب میشود. زمانهای محاسبه شده برای زیرسیستمهای مختلف در جدول 6-1 و به صورت گرافیکی در شکل 6-6 شده است.

جدول 6-1- زمان رسیدن به قابلیت اطمینان 90٪ و دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستمهای شیرر طبس

زیرسیستم						زمان قابلیت اطمینان 90٪ (ساعت)
بازوهای برش	کابل	برق	هیدرولیک	حرکت	آب	
107	83	10	6	21	4	



شکل 6-6- دوره تعمیرات پیشگیرانه برای زیرسیستمهای شیرر طبس

چنانکه در جدول 6-1 مشاهده میشود، سیستم آب با کوتاهترین زمان و بازوهای برش با طولانیترین زمان در بین سایر زیرسیستمها، به قابلیت اطمینان 90 درصد میرسند. با دقت در شکل 6-6، که زمانهای انجام تعمیر و نگهداری را برای زیرسیستمهای مختلف دستگاه نشان میدهد، پرواضح است که برنامه ریزی برای انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستمهای مختلف طبق این آرایش، بسیار مشکل بوده و پیادهسازی آن در واقعیت غیرممکن به نظر میرسد. زیرا تعمیرات زیاد باعث توقفهای بیش از حد گردیده و قابلیت دسترسی دستگاه و تولید معدن را کاهش میدهد. لذا،

تصحیح و بهبود طرح اولیه ارائه شده در شکل 6-6 الزامی است. برای بهبود کاربرد این طرح و سهولت اجرای آن در عمل، از رهیافت "بسته عملیات تعمیر و نگهداری"<sup>1</sup> استفاده میشود. برای این منظور، تعمیراتی که دوره زمانی نزدیک به هم دارند با هم ترکیب شده و طی یک عملیات واحد تعمیر و نگهداری، انجام میشوند. این روش باعث کاهش توقفهای دستگاه و کاهش هزینههای تعمیر و نگهداری میشود.

برای ایجاد بستههای عملیاتی، با توجه به جدول 6-1، تعمیرات سیستم آب و هیدرولیک با یکدیگر ترکیب شده و هر پنج ساعت یکبار انجام میشوند. در این صورت، تعمیرات سیستم آب یک ساعت دیرتر و تعمیرات سیستم هیدرولیک یک ساعت زودتر از زمان مطلوب انجام میشود. لذا، میزان کاهش قابلیت اطمینان ناشی از تأخیر در تعمیرات سیستم آب با افزایش ناشی از تعمیرات زود هنگام سیستم هیدرولیک جبران میشود.

برای ساماندهی تعمیرات سیستم حرکت و برق، سیستم حرکت شیرر باید هر 20 ساعت مورد تعمیر قرار گیرد و سیستم برق نیز هر 10 ساعت باید بازرسی و تعمیر گردد. این تغییر کوچک باعث میشود تا این دو سیستم به صورت یک در میان با هم مورد تعمیر قرار گیرند.

با توجه به مقادیر بالای دوره تعمیرات هر دو سیستم کابل و بازوهای برش، این دو سیستم هم در یک بسته به صورت مشترک قرار میگیرند. برای این منظور، دوره تعمیرات پیشگیرانه این دو سیستم به طور همزمان، هر 90 ساعت یکبار پیشنهاد میشود. در این صورت، تعمیرات سیستم کابل هفت ساعت با تأخیر و بازوهای برش 17 ساعت زودتر از زمان مورد نظر انجام میشوند. کاهش و افزایش قابلیت اطمینان ناشی از این جابجاییها، باعث خنثی شدن یکدیگر شده و حتی باعث بهبود قابلیت اطمینان میشود. طرح بهبود یافته تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی در جدول 6-2 و شکل 6-7 نشان داده شده است.

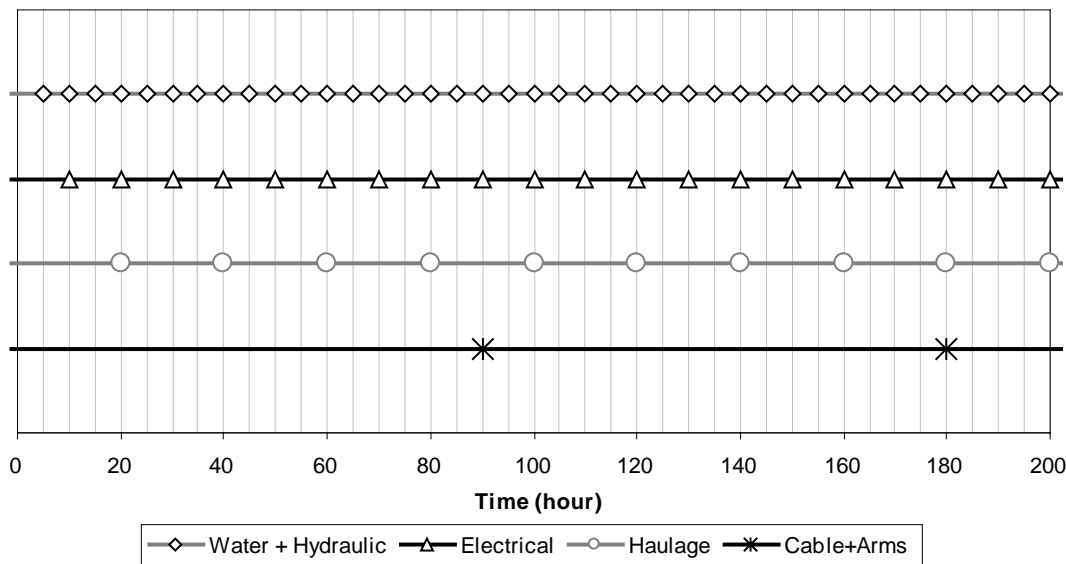
با استفاده از طرح بهبود یافته، مشخص میشود که هر 20 ساعت یکبار تمامی زیرسیستمهای شیرر

<sup>1</sup>. Maintenance task package

به غیر از دو سیستم کابل و بازوهای برش، باید مورد بازرسی و تعمیرات پیشگیرانه قرار گیرند. مهمترین نکته عملیاتی و اجرایی که از این طرح به دست میآید این است که هر 180 ساعت یکبار، تمامی زیرسیستمهای دستگاه یا به عبارتی کل دستگاه شیرر نیاز به تعمیرات پیشگیرانه دورهای دارد.

جدول 6-2- دورههای تعمیرات پیشگیرانه بهبود یافته برای زیرسیستمهای شیرر طبس

بسته عملیاتی				دوره تعمیرات پیشگیرانه (ساعت)
سیستم کابل + بازوهای برش	سیستم برق	سیستم حرکت	سیستم آب + سیستم هیدرولیک	
90	10	20	5	

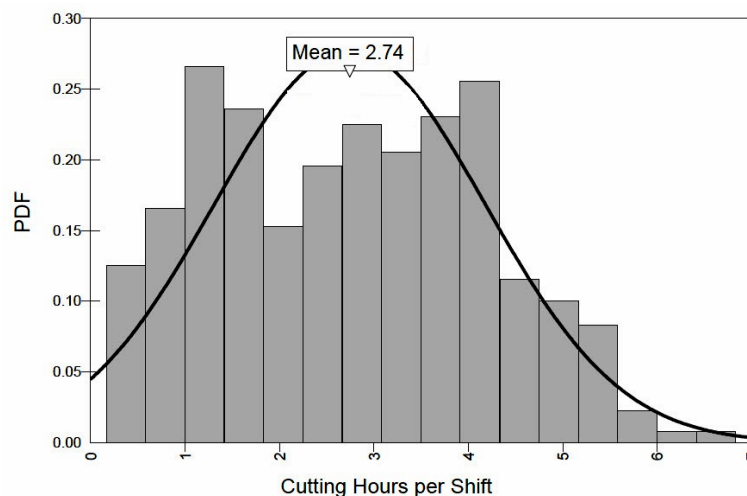


شکل 6-7- طرح بهبود یافته و بسته عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای زیرسیستمهای شیرر طبس

چنانکه در تمامی محاسبات فوق قابل مشاهده است، طرح تهیه شده برای تعمیر و نگهداری زیرسیستمهای شیرر طبس، بر مبنای ساعت میباشد. لذا، کنترل دقیق کارکرد شیرر امری ضروری است. البته این امر نیازمند محاسبه ساده زمانهای کارکرد دستگاه در طی شیفت توسط ناظر تولید کارگاه (با استفاده از فرم پیوست الف) و گزارش آن به واحد تعمیر و نگهداری میباشد. برای کنترل دقیق کارکرد دستگاه، میتوان یک عدد زمانسنج (کرونومتر) را در "مدار برق حالت برش" دستگاه به صورت سری نصب نمود. دکمه حالت برش دستگاه که بر روی صفحه کلید بخش کنترل دستگاه قرار دارد، برق دستگاه را به بخشهای درگیر در برش میرساند. همچنین با برنامه نویسی و تعبیه

نرمافزار بر روی این زمانسنج، میتوان زمانهای مناسب برای تعمیرات زیرسیستمهای مختلف دستگاه را با پخش پیغام نمایشی و صوتی، به اپراتور اطلاع داد. کنترل ساعتی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بر مبنای زمان عملکرد واقعی دستگاه، یک رهیافت بسیار مناسب و نوین برای رسیدن به اهداف پیشبینی شده و افزایش قابلیت اطمینان و تولید دستگاه است. ضرورت و اهمیت استفاده از زمانبندی ساعتی، زمانی بهتر مشخص میشود که بخواهیم برنامه زمانی ارائه شده در جدول 6-2 و شکل 6-7 را از دیدگاه سنتی و بر مبنای شیفت کاری انجام دهیم. در ادامه این روش قدیمی و خطای ایجاد شده ناشی از آن مورد بررسی قرار میگیرد.

برای تبدیل ساعات کار واقعی دستگاه به شیفت کاری، باید به آمار تولید و عملکرد دستگاه مراجعه نمود. با مطالعه آماری دادههای تولید در معدن مشخص میشود که هیستوگرام ساعات کار مفید دستگاه در طول پهنه اول معدن در هر شیفت به صورت شکل 6-8 میباشد.



شکل 6-8- هیستوگرام فراوانی ساعات کار مفید شیرر در هر شیفت

محاسبات نشان میدهد که دستگاه در هر شیفت به طور میانگین  $2/74$  ساعت عملیات برش انجام میدهد. لذا، به عنوان مثال سیستم آب و سیستم هیدرولیک دستگاه که هر پنج ساعت یکبار باید مورد تعمیر قرار گیرند، از دیدگاه برنامه‌ریزی سنتی تعمیر و نگهداری، باید هر دو شیفت یکبار مورد تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرند. این در حالی است که طبق هیستوگرام فراوانی تولید در شیفت، زمان عملکرد دستگاه در یک شیفت از  $0/2$  ساعت الی  $7$  ساعت متغییر بوده است. علت این

تغییرات، بروز خرابی در خود دستگاه یا توقف سایر تجهیزات موجود در کارگاه استخراج مثل ناوزنجیری یا نگهدارندههای قدرتی، میباشد. این بدین معنی است که در صورت برنامه‌ریزی شیفتی، سیستم آب و سیستم هیدرولیک دستگاه، ممکن است هر 0/4 ساعت یا هر 14 ساعت یکبار مورد بازرسی و تعمیرات پیشگیرانه قرار گیرند. پرواضح است که این اعداد با هر پنج ساعت یکبار بسیار تفاوت داشته و خطای بسیار زیادی در عملیات ایجاد مینمایند. چنانکه قبلاً اشاره شد، قابلیت اطمینان یکی از مهمترین پارامترهای دستگاه است که در اثر تعمیر و نگهداری به ویژه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بهبود مییابد. از آنجایی که هدف آرمانی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری در معدن طبس دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و حفظ پیوستگی تولید میباشد، در ادامه، تأثیرات برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه پیشنهاد شده در این رساله بر منحنی قابلیت اطمینان کل دستگاه مورد بررسی و تحلیل قرار میگیرد.

## 6-8- تأثیرات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان شیرر

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به دلیل جبران خرابی و بهبود شرایط عملیاتی دستگاه، باعث افزایش قابلیت اطمینان نسبت به حالت بدون تعمیر و نگهداری میشود. میزان افزایش، به طور مستقیم به رفتار خرابی و قابلیت اطمینان دستگاه و زیرسیستمهای آن بستگی دارد. با توجه به نتایج تحلیل دادههای خرابی، مشخص گردید که دادههای خرابی چهار زیرسیستم؛ آب، هیدرولیک، حرکت و برق، از نظر آماری مستقل و مانا (iid) 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>1</sup> بر میگردد (Acher & Feingold, 1984; Rausand & Hoyland, 2004; Modarres, 2006). در این صورت قابلیت اطمینان سیستم پس از هر تعمیر، مجدداً به 100٪ بر میگردد. اما، چنانکه در فصل قبل نیز اشاره گردید، در سیستمهایی که رفتار

<sup>1</sup>. As-good-as-new



خرابی آنها از فرآیند فرآیند قانون توان پیروی میکنند، سیستم پس از تعمیر اصلاحی به حالت به-بدی-کهنه بر میگردد (Acher & Feingold, 1984; Rausand & Hoyland, 2004; Modarres, 2006). لذا، قابلیت اطمینان آنها به قابلیت اطمینان قبل از خرابی برگشته و دیگر هرگز به 100٪ باز نمیگردد. معمولاً، قابلیت اطمینان این گونه سیستمها پس از تعمیرات پیشگیرانه، به حالت بهتر از حالت قبل و بدتر از حالت ایده‌آل<sup>1</sup> میرسند. البته میزان تغییرات در قابلیت اطمینان و حالت دستگاه، به شدت به راندمان و کیفیت تعمیر و نگهداری وابسته است (Ahmadi, 2010). در محاسبات این فصل، فرض میشود که قابلیت اطمینان سیستم کابل و بازوهای برش پس از تعمیر پیشگیرانه، 50 درصد نسبت به وضعیت موجود دستگاه بهبود مییابد. این بدین معنی است که راندمان تعمیر و نگهداری این سیستمها در معدن طبس 50٪ در نظر گرفته میشود.

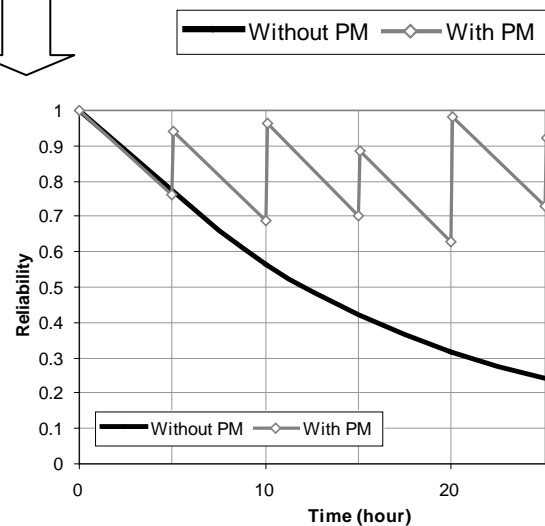
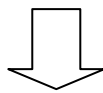
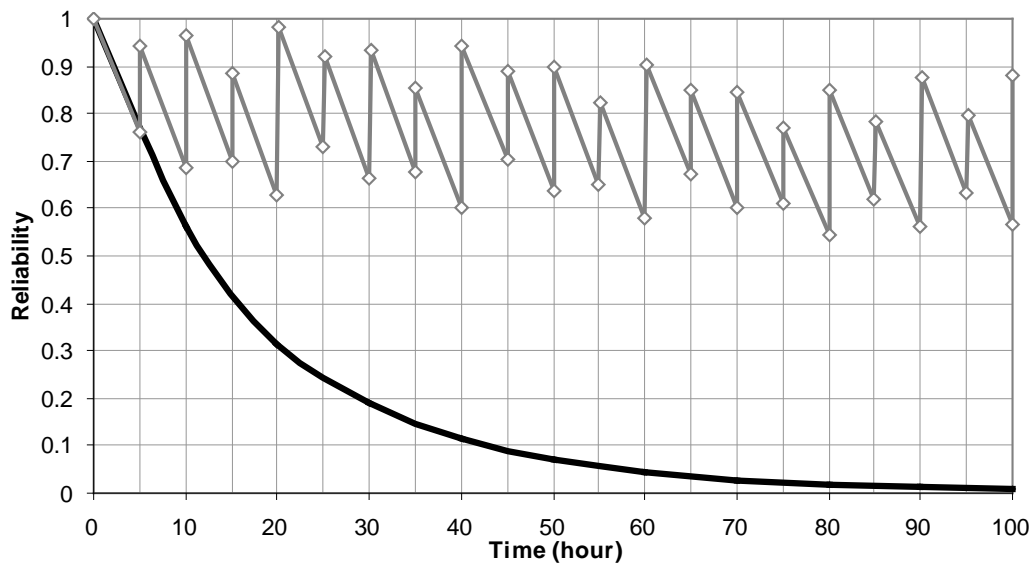
با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری پیشنهادی، قابلیت اطمینان کل دستگاه و زیرسیستمهای آن به شرح جدول 3-6 تغییر میکند. شکل 6-9 منحنی قابلیت اطمینان حاصل از تغییرات مذکور را در مقایسه با منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیر و نگهداری نشان میدهد.

چنانکه مشاهده میشود، قبل از اولین عملیات تعمیر و نگهداری در زمان 5 ساعت، دو منحنی قابلیت اطمینان دقیقاً با هم برابر میباشند. پس از انجام اولین تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، منحنی قابلیت اطمینان دستگاه دچار جهش شده و از مقدار 0/76 به 0/94 افزایش مییابد. با گذشت زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش یافته و دستگاه در زمان 10 ساعت مجدداً تحت تعمیر و نگهداری قرار میگیرد. در این زمان سه زیرسیستم آب، هیدرولیک و برق به طور همزمان مورد بازرسی و تعمیر قرار میگیرند. لذا، با توجه به افزایش توأم قابلیت اطمینان سه زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل دستگاه به میزان بیشتری افزایش مییابد. در زمان 20 ساعت که تمامی زیرسیستمهای دستگاه غیر از سیستم کابل و بازوهای برش تحت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار میگیرند، قابلیت اطمینان دستگاه تا حد

<sup>1</sup>. Better than old but worse than new

جدول 6-3- تغییرات قابلیت اطمینان دستگاه شیرر در اثر انجام عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه

قابلیت اطمینان دستگاه	قابلیت اطمینان زیرسیستمها						زمان
	بازوهای برش	کابل	برق	حرکت	هیدرولیک	آب	
1	1	1	1	1	1	1	0
0/745	1	1	0/96	0/98	0/91	0/87	5
0/941	1	1	0/96	0/98	1	1	5/01
0/681	1	1	0/898	0/965	0/91	0/87	10
0/965	1	1	1	0/965	1	1	10/01
0/7	0/995	0/995	0/96	0/93	0/91	0/87	15
0/884	0/995	0/995	0/96	0/93	1	1	15/01
0/628	0/992	0/99	0/898	0/9	0/91	0/87	20
0/982	0/992	0/99	1	1	1	1	20/01
0/728	0/99	0/988	0/96	0/98	0/91	0/87	25
0/92	0/99	0/988	0/96	0/98	1	1	25/01
0/664	0/986	0/982	0/898	0/965	0/91	0/87	30
0/934	0/986	0/982	1	0/965	1	1	30/01
0/677	0/981	0/977	0/96	0/93	0/91	0/87	35
0/855	0/981	0/977	0/96	0/93	1	1	35/01
0/6	0/969	0/971	0/898	0/9	0/91	0/87	40
0/941	0/969	0/971	1	1	1	1	40/01
0/703	0/978	0/965	0/96	0/98	0/91	0/87	45
0/888	0/978	0/965	0/96	0/98	1	1	45/01
0/639	0/972	0/958	0/898	0/965	0/91	0/87	50
0/898	0/972	0/958	1	0/965	1	1	50/01
0/651	0/969	0/951	0/96	0/93	0/91	0/87	55
0/823	0/969	0/951	0/96	0/93	1	1	55/01
0/578	0/958	0/943	0/898	0/9	0/91	0/87	60
0/903	0/958	0/943	1	1	1	1	60/01
0/671	0/954	0/945	0/96	0/98	0/91	0/87	65
0/848	0/954	0/945	0/96	0/98	1	1	65/01
0/602	0/947	0/926	0/898	0/965	0/91	0/87	70
0/846	0/947	0/926	1	0/965	1	1	70/01
0/61	0/942	0/917	0/96	0/93	0/91	0/87	75
0/77	0/942	0/917	0/96	0/93	1	1	75/01
0/54	0/935	0/907	0/898	0/9	0/91	0/87	80
0/848	0/935	0/907	1	1	1	1	80/01
0/621	0/93	0/897	0/96	0/98	0/91	0/87	85
0/785	0/93	0/897	0/96	0/98	1	1	85/01
0/562	0/923	0/887	0/898	0/965	0/91	0/87	90
0/875	0/961	0/943	1	0/965	1	1	90/01
0/635	0/956	0/939	0/96	0/93	0/91	0/87	95
0/797	0/951	0/939	0/96	0/93	1	1	95/01
0/565	0/946	0/934	0/898	0/9	0/91	0/87	100
0/879	0/941	0/934	1	1	1	1	100/01



شکل 6-9- منحنی قابلیت اطمینان پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه و بدون تعمیرات پیشگیرانه

رسیدن به 100٪ (با افزایش 40٪) نیز بهبود مییابد. با گذشت زمان، کاهش و افزایش قابلیت اطمینان به صورت دوره‌های ادامه مییابد. ولی، با دقت در منحنی مشخص میشود که روند کاهش قابلیت اطمینان پس از انجام تعمیرات، بسیار کندتر از منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیرات پیشگیرانه است. همچنین، شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان میدهد که با اعمال برنامه زمانبندی پیشنهادی در این رساله، میتوان قابلیت اطمینان شیرر معدن طبس را به طور متوسط در حد فاصل 70٪-80٪ و حداقل 60٪ حفظ کرد. حفظ قابلیت اطمینان دستگاه در این سطح، به معنی کنترل و کاهش پتانسیل خرابی دستگاه بوده و به شدت به حفظ پیوستگی تولید کمک میکند.

نکته حائز اهمیت در استفاده از نتایج تحلیلهای فوق آن است که تمامی دادههای مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به پهنه اول معدن طیس میباشند. از آنجایی که، تمامی تجهیزات استخراج موجود در کارگاه، پس از اتمام یک پهنه، به سطح زمین منتقل میشوند و تمامی بخشهای تجهیزات به ویژه شیرر از هم جدا شده و تحت تعمیرات اساسی قرار میگیرند و قطعات فرسوده عوض شده و سایر قطعات مورد بازرسی و تعمیر قرار میگیرند. لذا، میتوان دستگاه را در زمان شروع هر پهنه، دستگاه جدید و نویی محسوب کرد. در این صورت، منحنی قابلیت اطمینان به دست آمده و تمامی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری پیشنهادی در سایر پهنهها نیز قابل استفاده و اجرا خواهد بود. در بخشهای گذشته، استراتژی تعمیر و نگهداری درام شیرر معدن طیس انتخاب گردیده و برنامه‌ریزی اجرای عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بر روی دستگاه انجام شد. در ادامه، مجموعه کارهایی که باید در حین عملیات تعمیر و نگهداری زیرسیستمهای مختلف دستگاه انجام شود مورد بررسی قرار میگیرند.

## 6-9- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه زیرسیستمها

در کلیه صنایع درگیر با ماشینآلات سنگین و به ویژه معادن، کنترل ماشینآلات در دورههای مشخص زمانی همانند کنترل دستگاه قبل از روشن کردن و آغاز شیفت، سرویسهای هفتگی، ماهانه و ... بسیار مرسوم بوده و امری ضروری به حساب میآیند. اما، استراتژی و برنامه تعمیر و نگهداری، به یک سری فعالیتهای تعمیری تخصصی که نقاط ضعف دستگاه را هدف قرار میدهند، میپردازد و در سطحی عمیقتر و موشکافانهتر نواقص ماشینآلات را رفع میکند. یکی از نکات مهم در عملیات تعمیر و نگهداری، به حداقل رساندن زمان تعمیر و توقف دستگاه است. هر چه زمان صرف شده برای تعمیر کم باشد، قابلیت دسترسی دستگاه افزایش یافته و تولید از دست رفته کاهش مییابد. لذا، در برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه همراه سعی میشود تا مهمترین نقاط ضعف دستگاه و زیرسیستمهای شناسایی شوند و این نقاط به صورت تخصصی بیشتر از سایر بخشهای دستگاه مورد بازرسی قرار گیرند. زیرا، با توجه به فراوانی خرابیهای بخشهای بحرانی، با صرف زمان

کم، میتوان بهبود بسیار زیادی در سیستم ایجاد کرد. در این بخش، فعالیتهای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ضروری و مبتنی بر سوابق خرابی زیرسیستمهای مختلف شیر مورد بحث قرار میگیرند.

### 6-9-1- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم آب

چنانکه در فصل قبل اشاره شد، سیستم آب به عنوان مهمترین سیستم دستگاه از نظر خرابی به شمار میآید. لذا، در برنامه ریزی تعمیر و نگهداری دستگاه نیز، این سیستم دارای بالاترین تعداد دفعات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه میباشد.

با استناد به دادههای جمعآوری شده از معدن، مشخص گردید که چهار عامل: گرفتگی اسپری جتها، خرابی فیلترها و مشکلات شیلنگها و شیرها، مهمترین دلایل خرابی سیستم آب شیرر میباشدند. لذا، اگر در عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، این بخشها بیشتر مورد بازرسی و توجه قرار گیرند، نرخ خرابی سیستم آب بسیار کاهش یافته و قابلیت اطمینان آن نیز تا حد چشمگیری افزایش مییابد. به عنوان مثال اگر نازلهای اسپری جتها به طور مرتب و هر 5 ساعت یکبار مورد بازرسی و تمیزکاری قرار گیرند، 40٪ از خرابیهای سیستم آب (معادل 16٪ کل خرابیهای دستگاه) کاسته میشود. با توجه به نکات فوق، پیشنهاد میشود موارد زیر به صورت امور ضروری در عملیات تعمیر و نگهداری سیستم آب انجام شوند:

الف) بازرسی و کنترل گرفتگی نازلهای اسپری جتها و رفع گرفتگی در صورت وجود

ب) بازرسی و تمیزکاری فیلترهای آب دستگاه و کنترل عملکرد آنها

ج) کنترل شیلنگها و اتصالات ورودی و خروجی آب به بخشهای مختلف دستگاه

د) کنترل شیرهای آب موجود و کنترل شیر تخلیه اضطراری. کنترل نشتی واشرها و سفت بودن

شیرها

### 6-9-2- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم حرکت

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل پارتو، سیستم حرکت به همراه بازوهای برش، با داشتن 9٪ از کل خرابیهای شیرر، بهترین زیرسیستم دستگاه از نظر پتانسیل خرابی به شمار میآید. اما، نکته حائز

اهمیت در مورد این سیستم آن است که با توجه به قرار گرفتن بخشهای اصلی این سیستم در زیر بدنه اصلی دستگاه، این سیستم از قابلیت دستیابی<sup>1</sup> کمی برخوردار است و در نتیجه قابلیت تعمیرپذیری<sup>2</sup> پائینی دارد. همین موضوع باعث میشود تا زمان تعمیر این زیرسیستم گاهی بسیار طولانی شود. به عنوان مثال، طبق دادههای موجود، زمان تعمیر و رفع عیب یکی از خرابیهای چرخ خورشیدی، 11 ساعت به طول انجامیده و باعث توقف تولید در سه شیفت متوالی گردیده است. این میزان، زمان بسیار طولانی برای توقف یک سیستم تولید پیوسته همچون معدن جبههکار طولانی به حساب میآید و باعث خسارت سنگین به معدن میشود. با توجه به موارد فوق، پرواضح است که پیشگیری از وقوع چنین خرابیهای زینباری مطمئناً شرایط اقتصادی و عملیاتی دستگاه را متحول خواهد کرد.

مهمترین دلایل خرابی سیستم حرکت شیر عبارتند از: خرابی چرخ دنده خورشیدی، سیستم ترمز و نشتی روغن. در صورتی که کنترل و تعمیر این بخشها در لیست عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرد، به راحتی میتوان از بروز 80٪ از خرابیهای این سیستم تا حد مطلوبی جلوگیری کرد. با تکیه بر اطلاعات فوق، موارد زیر به صورت امور ضروری در عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه سیستم حرکت شیر پیشنهاد میشوند:

الف) تمیزکاری و رفع گل و زغال از چرخ دنده و ریل حرکت دستگاه

ب) بازرسی چرخ خورشیدی و مسیر حرکت دستگاه بر روی ناوزنجیری

ج) آزمایش عملکرد و بازرسی اتصالات سیستم ترمز

د) بازرسی اتصالات، شیلنگها، لولهها و جعبه دنده برای تشخیص زودهنگام نشتی روغن و رفع آن

### 6-9-3- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم هیدرولیک

سیستم هیدرولیک، با 11٪ کل خرابیهای دستگاه، جایگاه چهارم را از نظر اهمیت خرابیها در بین زیرسیستمهای دستگاه دارا است. دلایل مهم خرابی و توقف عملکرد این سیستم عبارتند از: خرابی

<sup>1</sup>. Accessibility

<sup>2</sup>. Maintainability

فیلترها، نشتی و کمکردن روغن و خرابی شیرها و شیلنگها. در این میان خرابی فیلترها با 44٪، مهمترین نوع خرابی سیستم هیدرولیک به شمار میآید. همانند آنچه در سیستم آب اشاره گردید، کنترل عملکرد و تعویض به موقع و طبق برنامه فیلترهای روغن، باعث کاهش 44٪ از خرابی این سیستم و حدوداً 5٪ از کل خرابیهای دستگاه میشود.

نشتی روغن یکی از شایعترین انواع خرابی در ماشینآلات معدنی به شمار میآید. این پدیده معمولاً به دلیل تحت فشار قرار گرفتن بیش از حد دستگاه و افزایش تنش وارده بر اتصالات هیدرولیکی اتفاق میافتد. برای کنترل این موضوع، گرچه بازرسی کل مدار و اتصالات سیستم هیدرولیک دستگاه امری دشوار به نظر میرسد، اما، کنترل نقاط بحرانی همچون خنککننده و ورودی و خروجی بخشهای مختلف دستگاه میتواند بسیار کارساز باشد. در مجموع با توجه به نتایج جمعآوری داده از معدن طبس، فعالیتهای پیشگیرانه زیر برای انجام بر روی سیستم هیدرولیک شیرر پیشنهاد میشوند:

الف) بازرسی فیلترهای روغن و ارزیابی کیفیت عملکرد آنها، تعویض فیلتر در صورت احساس هرگونه ضعف در آن

ب) کنترل اجزای اصلی مدار هیدرولیک و اتصالات مهم، برای تشخیص هرگونه نشتی و ریزش روغن

ج) بازرسی شیرها و شیلنگهای موجود در مدار

#### 6-9-4- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در سیستم برق

سیستم برق، پیچیدهترین و گستردهترین زیرسیستم دستگاه به شمار میآید. با توجه به وظیفه بسیار حساس این سیستم در عملکرد ماشین، قطعات به کار رفته در آن از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار میباشند. دقیقاً به همین دلیل، خرابیهای این سیستم به صورت پراکنده و در قطعات مختلف رخ میدهند و 40٪ کل خرابیهای این سیستم مربوط به خرابیهای پراکنده میباشد. کنترل رفتار این گونه سیستمها بسیار دشوار بوده و نتایج تضمین شدهای در پی ندارد. لذا، با علم به این موضوع و دقت پیشینه خرابی این سیستم، در مییابیم که برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم برق شیرر، تنها

دو گزینه عملی و قابل اجرا به نظر می‌رسد: الف) بازرسی حسگرهای مهم و حیاتی دستگاه و ب) بازرسی اتصالات، سوکتها و ترمینالهای توزیع برق. لذا، دو فعالیت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه عمده برای این زیرسیستم پیشنهاد میشوند:

الف) بازرسی، آزمون عملکرد و تمیزکردن حسگرهای مهم دستگاه از جمله حسگر فشار آب، درجه حرارت روغن، درجه حرارت آب و ... که خرابی آنها معمولاً به توقف خودکار دستگاه منجر میشود.

ب) بازرسی اتصالات، سوکتها و ترمینالهای توزیع مهم موجود در مدار و سفت کردن اتصالات شل. بازرسی پوشش محافظ سیمها و کابلهای اصلی مدار. با دقت در دادههای خرابی این سیستم، مشخص میشود که تنها با انجام صحیح دو مورد فوق، میتوان از وقوع 60٪ خرابیهای این سیستم جلوگیری نمود.

#### 6-9-5- سیستم کابل

سیستم کابل با دارا بودن 27٪ کل خرابیها، دومین زیرسیستم بحرانی دستگاه به شمار میآید. همچنین این سیستم با داشتن شش حالت مختلف خرابی، از تنوع بالایی در این مورد برخوردار بوده و از سایر زیرسیستمها متمایز است. تقریباً 68٪ خرابیها فقط به دو دلیل نقص در قطعات نگهدارنده کابل و بخش اتصال کابل به بدنه اصلی دستگاه رخ میدهد.

این سیستم از دو نظر با سایر زیرسیستمهای شیرر تفاوت دارد: اول آنکه، اکثر بخشهای این سیستم به سادگی در دسترس تعمیرکاران بوده و به راحتی قابل رویت است. لذا، مدیریت تعمیر و نگهداری آن بسیار سادهتر از سیستمهای مخفی مثل سیستم حرکت میباشد. تفاوت دوم این است که این سیستم بزرگترین و حجیمترین زیرسیستم دستگاه به شمار میآید. زیرا به طور کامل در طول کارگاه گسترده شده و شامل 2000 قطعه نگهدارنده کابل است. این موضوع، رسیدگی و تعمیر این بخش را مشکل میسازد. لذا، با ترکیب این دو مورد متضاد، میتوان به یک برنامه عملی برای تعمیر و نگهداری دستگاه دست یافت.



با دقت در موارد فوق و فراوانی خرابیهای ثبت شده، فعالیتهای زیر برای انجام در عملیات تعمیر و نگهداری این سیستم پیشنهاد میشوند:

الف) بازرسی بخشهای محافظ کابل، بررسی وضعیت سلامت آنها و تعویض سریع بخشهای شکسته و یا ترکدار

ب) تمیزکاری ریل حرکت کابل و جمعآوری سنگ ریزهها از این فضا برای جلوگیری از گیرکردن سنگ در بخشهای باز بین محافظهای کابل

ج) بازرسی و سفت نمودن بخش اتصال کابل به دستگاه و ملزومات همراه آن

د) بازرسی بدنه و پوشش کابل برای کشف آسیب دیدگی کابل و رفع آن

#### 6-9-6- جزئیات عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در بازوهای برش

بازوهای برش شیرر، به دلیل اهمیت عملکرد و شدت تنشهای وارده، از طراحی بسیار خوب و قابلیت اطمینان بالایی برخوردارند. این زیرسیستم که دارای بالاترین قابلیت اطمینان در میان سایر زیرسیستمهای دستگاه میباشد، به گونهای طراحی شده که تمامی اجزای مکانیکی حساس آن در زیر صفحات محافظ ضخیمی در درون بازوها تعبیه شدهاند و این قطعات معمولاً از عملکرد بسیار مطلوبی برخوردار هستند. خرابی پیکهای برش زغال با 60٪ آمار خرابی یکی از بحرانیترین دلایل توقف این سیستم و کل دستگاه به شمار میآید. چنین درصد بالایی، نشان میدهد که اگر فقط همین مشکل به خوبی برنامهریزی و رفع شود، 60 درصد مشکلات این سیستم حل میشود. نشی آب و روغن و کمبود روانکننده از دیگر دلایل خرابی این سیستم میباشد. برای فائق آمدن بر عوامل فوق، باید تعمیرات پیشگیرانه با دوره تکرار 90 ساعت، به شرح زیر در معدن اجرایی شوند:

الف) بازرسی پیکهای روی درامها، پایههای پیک و بدنه اصلی درام

ب) بازرسی جعبه دنده، تسمه زنجیری و بخش اتصال درام به بازو

ج) بازرسی اتصالات و مدارهای آب و روغن در بدنه بازوها جهت کشف و تعمیر ریزش روغن و

نشی

د) گرسیکاری و روانکاری بخشهای مکانیکی درون بازو شامل چرخندهها، زنجیر و آلات دوار

درون مدار انتقال قدرت

## 6-10- نتیجهگیری

در این فصل با استفاده از نتایج تحلیل قابلیت اطمینان درام شیرر معدن طبس و منحنیهای قابلیت اطمینان به دست آمده در فصل قبل، استراتژی تعمیر و نگهداری دستگاه انتخاب گردید. علاوه بر عوامل فوق، حفظ پیوستگی تولید و جلوگیری از خرابیهای متعدد دستگاه نیز به عنوان عوامل تأثیرگذار در انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مد نظر قرار گرفتند. با تکیه بر موارد مذکور، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به عنوان گزینه اصلی برای بهبود قابلیت اطمینان و دستیابی به تولید بالای شیرر، به عنوان استراتژی اجرایی انتخاب گردید. هدف آرمانی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دستگاه، دستیابی به قابلیت اطمینان 90٪ برای تمامی زیرسیستمها، در نظر گرفته شد و برای رسیدن به این هدف، برنامه جامعی برای تعمیرات پیشگیرانه دستگاه پیشنهاد گردید. طبق برنامه پیشنهادی، زیرسیستمهای آب و هیدرولیک دستگاه باید هر پنج ساعت یکبار مورد بازرسی و تعمیرات پیشگیرانه قرار گیرند. برای سیستم برق، این دوره تعمیرات هر 10 ساعت، برای سیستم حرکت هر 20 ساعت و برای سیستم کابل و بازوهای برش هر 90 ساعت یکبار توصیه میشود. همچنین، با توجه به آمار خرابیهای هر زیرسیستم، توصیه میشود که در عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، تنها نقاط حساس و با آمار خرابی بالا مورد بازرسی و تعمیر قرار گیرند تا زمان تعمیرات پیشگیرانه به حداقل برسد.

## فصل هفتم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### 7-1- نتیجه‌گیری

روش جبهه‌کار طولانی به عنوان یک روش معدنکاری ویژه، دارای جنبه‌های مدیریتی و عملیاتی متعددی است که به طور مستقیم تولید معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این روش به دلیل مکانیزاسیون بالا، قابلیت تولید زیاد، زنجیره تولید پیوسته و ایمنی بالا، از سایر روشهای معدنکاری

متمایز میباشد.

دستیابی به تولید بالا و حفظ پیوستگی تولید، یک هدف آرمانی در معادن جبهه‌کار طولانی به شمار می‌آید. به دلیل وجود تجهیزات گرانبه‌قیمت در کارگاه استخراج و نیز اهمیت تولید از دست رفته در این معادن، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این رساله، قابلیت اطمینان درام شیرر به عنوان عضو مهمی از زنجیره تولید در معادن جبهه‌کار طولانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. ابتدا تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حوزه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات و سیستم‌های معدنی که در 45 سال اخیر ارائه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. با آگاهی از نکات ضعف و قوت مطالعات پیشین، چارچوب اصلی تحقیق تعیین گردید.

در فاز اول این رساله، برای اولین بار، زیرسیستم‌های عملیاتی دستگاه شیرر تعیین و معرفی گردیدند. برای این منظور، از اطلاعات حاصل از مطالعات صحرایی در معدن زغالسنگ طبس و نیز مشخصات و ساختار کلی 15 عدد شیرر با ابعاد و مدل‌های مختلف تولید شده توسط سه شرکت بین‌المللی تولید کننده تجهیزات جبهه‌کار طولانی استفاده شد. برای دستیابی به یک مرزبندی شفاف میان زیرسیستم‌های مختلف دستگاه، اطلاعات دقیق در مورد قطعات و اجزای مهم موجود در هر زیرسیستم مورد بحث قرار گرفته و نحوه ارتباطات این اجزاء برای دستیابی به عملکرد اصلی هر بخش مورد تحلیل و معرفی قرار گرفتند. در ادامه به منظور آشنایی کامل با جزئیات عملکرد و نیز تحلیل رفتار خرابی‌های دستگاه شیرر، درام شیرر معدن طبس به عنوان تنها دستگاه شیرر موجود در کشور مطالعه گردید. در این رساله، برای تحلیل قابلیت اطمینان شیرر دو روش مدلسازی و شبیهسازی مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر مقایسه گردیدند.

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

- 1- مطالعه تحقیقات گذشته نشان داد، اگر چه تاکنون مطالعاتی در مورد قابلیت اطمینان تجهیزات موجود در روش جبهه‌کار طولانی گزارش گردیده، لیکن، مطالعات قبلی از جامعیت و عمق علمی مطلوبی برخوردار نمی‌باشند و در برخی از آنها فرضیات نادرست باعث حصول نتایج غیرکاربردی شده

است. همچنین به رغم اهمیت بسیار زیاد دستگاه شیرر نسبت به بسیاری از ماشینآلات معدنی همچون LHDها و یا کامیونهای معدنی، قابلیت اطمینان این دستگاه به صورت اساسی مورد ارزیابی قرار نگرفته است و مطالعات انجام شده، متناسب با اهمیت این دستگاه و نقش انکارناپذیر آن در تولید زغالسنگ در جهان نمیباشد. لذا، انجام یک مطالعه پایه‌ای برای تعیین زیرسیستمهای اصلی دستگاه و تحلیل قابلیت اطمینان آنها، به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان کل دستگاه الزامی است.

2- با مطالعه مشخصات فنی 15 دستگاه شیرر ساخت سه شرکت؛ ماشینآلات معدنی جوی آمریکا، شرکت باسیروس روسیه و شرکت فامور لهستان مشخص گردید که تمامی شیررهای موجود در بازار، کامبیش دارای ساختار مشترک و بخشهای مشابه هستند و تفاوت دستگاههای مختلف معمولاً به ابعاد، قدرت و ظرفیت آنها مربوط است. لذا، برای این دستگاه میتوان یک ساختار کلی شامل چند زیرسیستم اساسی تعریف نمود. با تمرکز مطالعات بر روی تنها دستگاه درام شیرر موجود در معدن طبس که ساخت شرکت فامور لهستان میباشد، و نیز بررسی دادههای خرابی این دستگاه، برای اولین بار، شش زیرسیستم اصلی شامل: سیستم آب، سیستم حرکت، سیستم هیدرولیک، سیستم برق، سیستم کابل و بازوهای برش با آرایش سری برای درام شیررها معرفی گردیدند.

3- به منظور تحلیل قابلیت اطمینان یک درام شیرر با استفاده از زیرسیستمهای معرفی شده، همانند تمامی مطالعات قابلیت اطمینان، نیاز به یک مطالعه موردی برای جمعآوری داده میباشد. برای این منظور، درام شیرر معدن طبس به عنوان مطالعه موردی این رساله انتخاب گردید. اطمینان از کیفیت دادهها، تأکید بر جمعآوری دادهها از داخل کشور و ضرورت آشنایی و تثبیت تکنولوژی معدنکاری جبههکار طولانی مکانیزه در کشور، سه عامل مهم برای انتخاب معدن طبس و دستگاه شیرر آن بودند.

4- نتایج جمعآوری، طبقه‌بندی و بررسی دادههای خرابی شیرر معدن طبس نشان داد که سیستم آب با فراوانی 30٪، بالاترین آمار خرابی را در بین زیرسیستمهای شیرر دارد. و پس از آن، سیستم کابل با 27٪ در جایگاه دوم اهمیت قرار دارد. سیستم برق (14٪)، سیستم هیدرولیک (11٪)، سیستم حرکت (9٪) و بازوهای برش (9٪) در رتبههای بعدی از نظر آمار خرابی قرار دارند. لذا، در هر گونه

برنامه‌ریزی برای بهبود قابلیت اطمینان و افزایش تولید دستگاه باید سیستم‌های آب و کابل بیشتر از سایر زیرسیستمها مورد توجه قرار گیرند.

5- بررسی داده‌های خرابی نشان داد که گرفتگی اسپری جتها با فراوانی 40 درصد، عمده‌ترین دلیل خرابی سیستم آب شیر در معدن طبس میباشد. با انجام تحلیل آماری بر روی داده‌ها مشخص شد که رفتار خرابی سیستم آب شیر معدن طبس از تابع گاما با  $\alpha=58/36$  و  $\beta=0/88$  تبعیت میکند و قابلیت اطمینان سیستم آب شیر پس از 300 ساعت عملیات پیوسته برش به نزدیکی صفر میرسد. مطالعه نرخ خرابی نشان داد، سیستم آب شیر طبس دارای رفتار خرابی بسیار مشابه به منحنی وان شکل بوده و دارای طول عمر مفید بسیار کوتاهی (برابر با 55 ساعت) میباشد. نرخ خرابی این سیستم از حدود 0/029 خرابی در ساعت آغاز شده و پس از سپری نمودن 100 ساعت، مرحله فرسودگی سیستم آغاز میشود.

6- مطالعات آماری نشان داد، خرابی چرخ خورشیدی، اشکال فنی سیستم ترمز و نشستی روغن، سه عامل اصلی خرابی و توقفهای سیستم حرکت شیر به شمار می‌آیند و این سیستم دارای تابع چگالی خرابی وایبول سه پارامتری با  $\alpha=130/39$ ،  $\beta=0/742$  و  $\gamma=17/29$  میباشد. نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم حرکت شیر طبس نشان میدهد که قابلیت اطمینان این سیستم پس از حدود 1000 ساعت، تقریباً به صفر میرسد. با محاسبه تابع نرخ خرابی سیستم حرکت مشخص گردید که سیستم حرکت شیر طبس دارای رفتار خرابی رو به بهبود و نرخ خرابی کاهنده میباشد. نرخ خرابی این سیستم در طی 2000 ساعت از 0/016 خرابی در ساعت به مقدار 0/003 خرابی در ساعت کاهش مییابد.

7- مطالعه داده‌های خرابی سیستم هیدرولیک دستگاه نشان داد که خرابی انواع فیلترهای موجود در مدار سیستم هیدرولیک با فراوانی 44٪، مهمترین دلیل خرابی سیستم هیدرولیک شیر به شمار می‌آید. رفتار خرابی این سیستم نیز همانند سیستم حرکت از تابع وایبول سه پارامتری با مقادیر پارامترهای:  $\alpha=115/64$ ،  $\beta=0/584$  و  $\gamma=5/42$  تبعیت میکند. تابع قابلیت اطمینان محاسبه شده

نشان میدهد که قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک شیرر پس از عملکردی حدود 1600 ساعت، به نزدیکی صفر میرسد. همچنین، تغییرات نرخ خرابی این سیستم بسیار شبیه به سیستم حرکت بوده و سیستم رو به بهبود است. سیستم هیدرولیک شیرر با نرخ خرابی برابر با 0/022 خرابی در ساعت، کار خود را آغاز نموده و در اواخر پهنه اول استخراج، مرحله شروع به کار خود را سپری نموده و پس از 1000 ساعت وارد دوره عمر مفید خود شده است.

8- سیستم برق شیرر به عنوان مهمترین بخش تولید نیرو و حرکت دستگاه، از اجزای بسیار زیاد و ساختار پیچیده‌ای تشکیل شده است. به دلیل اهمیت بالا و بحرانی بودن نقش این سیستم، سیستم برق دستگاه از طراحی بسیار خوب و قابلیت اطمینان نسبتاً قابل قبولی برخوردار است. بررسی داده‌های خرابی این سیستم نشان میدهد که خرابی و توقف عملکرد سیستم برق دستگاه عمدتاً ناشی از خرابی حسگرهای دستگاه و نیز بروز مشکل در اتصالات برقی میباشد که عمدتاً مربوط به عوامل خارجی و لرزش دستگاه بوده و به طراحی سیستم مربوط نمیشوند. تحلیلهای آماری نشان میدهد که توزیع لاگنرمال (با  $\sigma=1/282$  و  $\mu=4/0261$ ) انطباق خوبی با داده‌های خرابی این سیستم دارد. مدل قابلیت اطمینان محاسبه شده نشان میدهد، که قابلیت اطمینان سیستم برق شیرر پس از 1300 ساعت عملیات پیوسته برش تقریباً به صفر میرسد. نرخ خرابی سیستم برق شیرر طبعاً از زمان شروع به کار تا حدود زمان 10 ساعت، از 0/007 تا 0/014 افزایش مییابد. ولی پس از این فاز، نرخ خرابی با یک روند کاهنده تا حدود 0/001 خرابی در ساعت کاهش مییابد.

9- داده‌های جمع‌آوری شده از معدن طبس نشان داد، خرابی بخشهای نگهدارنده کابل، بخش اتصال کابل به دستگاه و آسیدیدگی کابل و روکش آن روی هم رفته با 78٪ خرابیهای ثبت شده، سه عامل اصلی خرابی و توقف سیستم کابل دستگاه به شمار می‌آیند. با انجام آزمونهای مستقل و مانا بودن داده‌ها، مشخص شد که رفتار خرابی سیستم کابل شیرر از فرآیند پواسون تبعیت میکند. آزمون گرافیکی انجام شده بر روی داده‌ها نشان داد، که مدل قانون توان تطابق خوبی با داده‌های خرابی این سیستم دارد. نتایج محاسبات نشان داد که پارامتر مقیاس در مدل قانون توان برابر با 301/45

( $\theta=301/45$ ) بوده و پارامتر شکل  $1/76$  میباشد ( $\beta=1/76$ ). با توجه به بزرگتر از یک بودن پارامتر

شکل در مدل قانون توان منطبق با سیستم کابل، این سیستم نرخ خرابی افزایشده و شتابداری دارد.

همچنین، نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم کابل شیرر طبس نشان میدهد که قابلیت

اطمینان این سیستم پس از حدود 800 ساعت، تقریباً به صفر میرسد.

10- بازوهای برش دستگاه که وظیفه اصلی برش زغالسنگ را بر عهده دارند، طبق آمار، کمترین

فراوانی خرابی را دارد. این سیستم که از دو بخش مجزای کاملاً مشابه تشکیل شده است، بیشتر به

دلیل خرابی پیکهای روی درام که 60 درصد خرابیهای ثبت شده را به خود اختصاص دادهاند،

متوقف میشود. رفتار خرابی این سیستم نیز همانند سیستم کابل از فرآیند پواسون و قانون توان

تبعیت میکند. پارامتر مقیاس مربوط به مدل توان این سیستم برابر با  $301/45$  ( $\theta=443/8$ ) بوده و

پارامتر شکل  $1/58$  میباشد ( $\beta=1/58$ ). به استناد این ارقام، تابع قابلیت اطمینان محاسبه شده نشان

میدهد که قابلیت اطمینان بازوهای برش پس از حدود 1300 ساعت تقریباً به صفر میرسد. قابلیت

اطمینان این سیستم پس از 100 ساعت، به 90 درصد میرسد.

11- به طور کلی، توابع قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف درام شیرر به شرح ذیل میباشند:

$$R_{water}(t) = -6.78\Gamma(0.88, 0.00171t) \quad (1-7) \text{ زیرسیستم آب:}$$

$$R_{haulage}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-17.29}{130.39}\right)^{0.742}\right) \quad (2-7) \text{ زیرسیستم حرکت:}$$

$$R_{electrical}(t) = 1 - \Phi\left[\frac{\ln t - 4.0261}{1.282}\right] \quad (3-7) \text{ زیرسیستم برق:}$$

$$R_{hydraulic}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-5.42}{115.64}\right)^{0.0584}\right) \quad (4-7) \text{ زیرسیستم هیدرولیک:}$$

$$R_{arms}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{443.8}\right)^{1.58}\right] \quad (5-7) \text{ زیرسیستم بازوهای برش:}$$

$$R_{cable}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{301.45}\right)^{1.76}\right] \quad (6-7) \text{ زیرسیستم کابل:}$$

مقایسه منحنیهای قابلیت اطمینان متناظر با توابع فوق، نشان میدهد که سیستم بازوهای برش، در



تمامی طول عمر دستگاه بالاترین قابلیت اطمینان را نسبت به سایر زیرسیستمها دارد. پس از آن، سیستم کابل از شرایط برتری نسبت به سایر زیرسیستمها برخوردار است. زیرسیستمهای برق، هیدرولیک و حرکت از منحنیهای قابلیت اطمینان مشابه و نزدیک به هم برخوردارند. در طول عمر دستگاه، قابلیت اطمینان این زیرسیستمها نسبت به هم متغیر بوده و رتبهبندی آنها جابجا میشود اما اختلاف قابلیت اطمینان این سیستمها پس از زمان 500 ساعت به حداقل ممکن رسیده و از آن زمان به بعد به پتانسیل خرابی نسبتاً برابری میرسند.

12- هدف اصلی این رساله تحلیل قابلیت اطمینان درام شیر بوده است. برای محاسبه قابلیت اطمینان کل دستگاه، قابلیت اطمینان هر زیرسیستم با استفاده از روابط ششگانه معرفی شده در این رساله محاسبه شده و با توجه به سری بودن شبکه قابلیت اطمینان دستگاه، با ضرب قابلیت اطمینان زیرسیستمهای مختلف، قابلیت اطمینان کل دستگاه محاسبه گردید. منحنی حاصل، که برای اولین بار با استفاده از رویکرد زیرسیستمی در این رساله ارائه گردیده است، نشان میدهد که قابلیت اطمینان کل دستگاه شیر پس از طی 100 ساعت عملکرد، تقریباً به صفر میرسد و پس از 12 ساعت، احتمال خرابی و کارکرد مناسب دستگاه برابر میشود. بررسی نشان میدهد به طور میانگین، در هر ساعت یک درصد از قابلیت اطمینان دستگاه کاسته میشود.

13- یکی دیگر از بخشهای مهم این رساله، شبیهسازی قابلیت اطمینان درام شیر میباشد. نتایج حاصل از مطالعات تحقیقات گذشته، نشان داد که تاکنون از روش شبیهسازی برای تحلیل قابلیت اطمینان هیچ یک از ماشینآلات و سیستمهای معدنی استفاده نشده است. در این رساله، برای اولین بار از روش شبیهسازی برای تحلیل قابلیت اطمینان شیر استفاده شد. روش شبیهسازی، به طور کامل مبنای تصادفی داشته و لذا با طبیعت تصادفی بودن روند خرابیهای ماشینآلات تطابق کامل دارد. در این رساله، شبیهسازی درام شیر بر مبنای تابع توزیع تجمعی خرابیهای

زیرسیستمهای ششگانه و با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده در نرمافزار Matlab اجرا و محاسبه گردید. منحنی شبیهسازی شده قابلیت اطمینان نشان داد که همچون منحنی حاصل از

مدلسازی، قابلیت اطمینان دستگاه پس از گذشت 100 ساعت، تقریباً به صفر میرسد.

14- مقایسه منحنیهای قابلیت اطمینان حاصل از دو روش شبیهسازی و مدلسازی، نشان داد که این دو منحنی بسیار به هم نزدیک بوده و از همخوانی بسیار خوبی برخوردارند. در اوایل کار و انتهای دوره قابلیت اطمینان، این دو منحنی با هم انطباق کامل دارند، اما در بازه 10-30 ساعت، روش شبیهسازی، قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش مدلسازی تخمین میزند. مقایسه منحنیها نشان میدهد، منحنی قابلیت اطمینان شبیهسازی شده نسبت به منحنی حاصل از مدلسازی، از یکنواختی بهتری برخوردار بوده و منحنی نرمتری دارد. لذا، با توجه به تمامی موارد فوق، چنین به نظر میرسد که منحنی حاصل از شبیهسازی، قابل استنادتر و پرکاربردتر از منحنی حاصل از مدلسازی میباشد.

15- در آخرین بخش این رساله، به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری درام شیر پرداخته شد. در این بخش سعی شد تا با استفاده از مشخصات و رفتار خرابی زیرسیستمهای مختلف، برنامه زمانی مناسب برای تعمیر و نگهداری شیر پیشنهاد گردد. با توجه به اهمیت تولید پیوسته در معادن جبهه‌کار طولانی، در این مطالعه حفظ قابلیت اطمینان هر زیرسیستم شیر در سطح 90٪، به عنوان هدف آرمانی تحقیق انتخاب شد. بر طبق این هدفگذاری، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به عنوان استراتژی تعمیرات دستگاه شیر انتخاب گردید. با در نظر گرفتن منحنی قابلیت اطمینان هر زیرسیستم، زمان مناسب دوره تعمیرات هر کدام از آنها محاسبه شد. به منظور پرهیز از توقفهای متعدد و جلوگیری از کاهش قابلیت دسترسی دستگاه، دوره‌های تعمیر و نگهداری زیرسیستمهای مختلف با هم ادغام شده و بسته‌های عملیاتی تعمیر و نگهداری برای ترکیبی از زیرسیستمها پیشنهاد گردید. برای این منظور، پیشنهاد میشود، سیستم آب و سیستم هیدرولیک به طور همزمان هر پنج ساعت یکبار، سیستم برق هر 10 ساعت یکبار، سیستم حرکت هر 20 ساعت و سیستم کابل و بازوهای برش به طور همزمان هر 90 ساعت یکبار مورد بازرسی و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرند. در این حالت هر 180 ساعت یکبار، تمامی زیرسیستمهای دستگاه به طور یکجا مورد تعمیر و نگهداری

پیشگیرانه قرار میگیرند.

نتایج بررسیها نشان میدهد، در صورت اجرای برنامه تعمیر و نگهداری اشاره شده بر روی درام شیرر معدن طبس، روند کاهش قابلیت اطمینان پس از انجام تعمیرات، بسیار کندتر از منحنی قابلیت اطمینان بدون تعمیرات پیشگیرانه میشود. همچنین شدت تغییرات قابلیت اطمینان نشان داد که با اعمال برنامه زمانبندی پیشنهادی در این رساله، میتوان قابلیت اطمینان شیرر معدن طبس را به طور متوسط در حد فاصل 70٪-80٪ و حداقل 60٪ حفظ کرد.

در این رساله سعی شد تا فرآیند انتخاب استراتژی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دستگاه درام شیرر و به ویژه شیرر معدن طبس، به صورت نظاممند و مرحله‌ای انجام شده و ساختار کلی این فرآیند به خوبی تبیین شود. با توجه به اینکه تاکنون، برنامه تعمیر و نگهداری مشابهی برای درام شیرر ارائه نشده است، رهیافت ارائه شده در این رساله میتواند به عنوان یک الگوی پایه مبنای تصمیمگیریهای آینده برای سایر شیررها و حتی سایر ماشینآلات معدنی مطرح باشد.

## 7-2- پیشنهادات

مطالعه قابلیت اطمینان، اولین و اساسیترین مرحله در مطالعه عملکرد و قابلیت تولید یک دستگاه میباشد. خروجیهای تحلیل قابلیت اطمینان، به عنوان ورودی بسیاری از تحلیلهای مهم دیگر مطرح بوده و مورد نیاز میباشد. لذا، تحلیل قابلیت اطمینان، بستر بسیار مناسب و پایه علمی برای شناخت مشخصات مهم دستگاه و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را فراهم میسازد. بنابراین، نتایج حاصل از این رساله میتواند سرآغاز بسیار خوبی برای تحقیقات عمیقتر در مورد دستگاه شیرر باشند. به طور خلاصه، موارد ذیل برای تحقیقات آینده بر روی شیرر پیشنهاد میشوند:

1- تحلیل قابلیت دسترسی درام شیرر: با استفاده از دادههای خرابی جمعآوری شده در این رساله میتوان قابلیت دسترسی شیرر را محاسبه نموده و سپس با محاسبه تولید واقعی معدن، برنامه کوتاه مدت و میان مدت معدن را بازبینی و واقعی نمود.

- 2- تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری (تعمیرپذیری)<sup>1</sup>: برای این منظور ابتدا باید زمان توقف مربوط به هر خرابی (زمان تعمیر) از پایگاه داده اصلی معدن استخراج شود. سپس دادههای زمانهای تعمیر به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و سپس تحلیل آماری بر روی این دادهها انجام شود. نتیجه این تحقیق بیانگر این موضوع خواهد بود که با چه احتمالی میتوان عملیات تعمیر و نگهداری یک زیرسیستم را در کمتر از یک زمان مشخص (مثلاً نیم ساعت) به اتمام رساند.
- 3- مدلسازی و بهینه سازی هزینههای تعمیر و نگهداری شیرر: خروجی این تحقیق کمک خواهد کرد تا بهترین زمان ممکن برای انجام تعمیر و نگهداری دستگاه با حداقل هزینه را محاسبه نماییم. به عنوان مثال برای یافتن بهترین زمان تعویض فیلتر آب شیرر، میتوان مدل قابلیت اطمینان آن را محاسبه نموده و با تشکیل مدل هزینه عملیات تعمیر و نگهداری، دوره زمانی تعویض فیلتر آب با کمترین هزینه را محاسبه نمود.
- 4- مطالعه راندمان و بهرهوری تولید شیرر: برای این منظور با استفاده از دادههای تولید و توقفهای شیرر میتوان زمان کارکرد مفید و نسبت این زمان به زمان قابل دسترس ماشین را محاسبه نمود. همچنین با محاسبه راندمان تولید میتوان تولید واقعی دستگاه را بر مبنای آمار خرابی و تولید گذشته تعیین نمود. این پارامتر به دلیل تأثیر چشمگیر سرعت برش زغال توسط شیرر بر بار وارده بر سیستم نگهداری قدرتی و گام تخریب سقف از اهمیت فوق العادهای برخوردار است.
- 5- از ساختار کلی و الگوی تصمیمگیری ارائه شده در این رساله میتوان به راحتی برای تحلیل قابلیت اطمینان سایر دستگاههای حفاری سنگ نظیر رودهدرها و TBMها که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفتهاند، استفاده نمود.
- شایان ذکر است هر یک از عناوین مذکور، نیاز به یک پژوهش مستقل و جامع داشته و در چهار چوب یک طرح پژوهشی و یا رساله جداگانه میتوانند مطرح شوند.

<sup>1</sup>. Maintainability

## منابع و مراجع

- معدن زغالسنگ طیس، ( 1375)، "گزارشات زمینشناسی"، دفتر فنی، بخش زمینشناسی.
- چینلار ا.، (1380)، "آشنایی با فرآیندهای تصادفی"، ترجمه شاهکار غلام حسین. و ابوالقاسم بزرگنیا، انتشارات

دانشگاه صنعتی شریف، 522 صفحه.

شانون، ر.، (1371)، "علم و هنر شبیه‌سازی سیستم‌ها"، ترجمه علی‌اکبر عرب‌مازار، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، 450 صفحه.

Ahmadi A., (2010), "Aircraft scheduled maintenance program development: Decision support, methodologies and tools", Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

Albert H., Moore A. H., Hobbs J. R., Hasaballa M. S. B., (1985), "A Monte Carlo method for determining confidence bounds on reliability and availability of maintained systems". IEEE Trans. Reliab., Vol. R-34, Dec., pp: 197-498.

Alexander D., (2003), "Application of Monte Carlo Simulation to System Reliability Analysis", Proceeding of 12th International Pump User Symposium, 2003.

Altshuler V. M., (1969), "A Method of Constructing a Mathematical Model to Study the Reliability of Mine Transportation Systems", Soviet Mining Science, Vol. 5, No.1, pp. 72-76.

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

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

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

Bing-Yuan H., Gang S., Li-Xun K., (2009), "Reliability emulation of production system on longwall face". Journal of Coal Science & Engineering, Vol.15, No.1, pp 76–80.

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

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

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

Butorin Y. M., Gavrilenko V. A., (1976), "Some Aspects of the Reliability of Drilling Equipment", Soviet Mining Science, Vol. 12, pp. 62-65.

Campbell J. D., Jardine A., Marcel Dekker A. G., (2001), "Maintenance excellence; optimizing the equipment life-cycle decisions", New York. US, pp. 516,

Chao A. L., Huang C., (1987), "A modified Monte Carlo technique for confidence limits of system reliability using pass-fail data". IEEE Trans. Reliab., R-36:109-112.

Clark D., (1990), "Tribology – its applications to equipment reliability and maintainability

- design in the underground coal mining industry". In: Proceedings of the Institution of Engineers Australia Tribology Conference, pp. 38–44.
- Crow L. H., (1974), "Reliability analysis for complex repairable systems". Reliability and Biometry, Proschan F. and Serfling R.J. eds. Philadelphia, SIAM. pp. 379-410.
- Countinho J.C., (1964), "Failure effect analysis", Trans. N.Y. Acad. Sci. 26, 564–584.
- Dekking F. M., Kraaikamp C., Lopuhaa H. P., Meester L. E., (2005), "A Modern Introduction to Probability and Statistics, Understanding Why and How", Springer, pp: 484.
- Dey A., Bhattacharya J., Banerjee S., (1994), "Prediction of field reliability for dumper tires", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. Vol. 8, No. 1, pp. 23–25.
- Dhillon B. S., (2006), "Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers", CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 221.
- Dhillon B. S., (2007), "Applied reliability and quality; fundamentals, methods and applications", (Springer series in reliability engineering), Springer-Verlag London Limited.
- Dhillon B. S., (2008), "Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety", Springer, pp. 209.
- Dongpeng Y., Jinlin L., Lun R., (2008), "Research on Reliability of Complex Coal Mine Ventilation Networks", IEEE Transactions on Reliability, 978-1-4244-2108-4, 2008.
- Duane J. T., (1964), "Learning curve approach to reliability monitoring". IEEE Trans. Aerospace, AS-2:563-566.
- Ebeling C. E., (2009), "An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering", 2nd Edition, Waveland Press Inc. Illinois, USA, pp. 550.
- Faulin P., Juan A., Martorell S., Ramírez-Márquez J. E. (eds), (2010), "Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems", Springer, London.
- Finkelstein M., (2008), "Failure Rate Modeling for Reliability and Risk", Springer-Verlag London Limited, pp. 296.
- Fishman G. S., (1987), "A Monte Carlo sampling plan for estimating reliability parameters and related functions", Networks, 17:169-186.
- Forsman B., Kumar U., (1992), "Surface mining equipment and maintenance trends in the Scandinavian countries". J. Mines Minerals Fuels August/September, 266–269.
- Freidina E. V., Kovalenko A. S., Rudenko O. A., (1975), "Effect of Mine Transport Equipment Reliability on the Productivity of a Quarry System", Soviet Mining Science, Vol. 11, No.1, pp. 50-54.
- Garakavi A. L., Manevich I. Z., Merklin V. E., (1984), "Technological Reliability and its Safeguards in Mining Operation", Soviet Mining Science, Vol. 20, No. 6, pp. 49-55.

- Gendenka B., Ushakov I., (1995), "Probabilistic Reliability Engineering", Jone Wiely & Sons, pp: 537.
- Ghodrati B., Kumar U. (2005a), "Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 169-184.
- Ghodrati B., Kumar U. (2005b), "Operating environmental-based spare parts forecasting and logistic; a case study, *International Journal of Logistic; Research and Application*, Vol. 8, No. 2, pp. 95-105.
- Ghodrati, B. (2010), "Applied Reliability Engineering", PhD Course Booklet, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Gimelshein L. Y., Nikeshin B. S., (1967), "Quantitative Reliability Criteria for Electromechanical Systems in Mines", *Soviet Mining Science*, Vol. 3, NO.2, pp. 199-202.
- Goodman G. V. R., (1988), "An assessment of coal mine escape way reliability using fault tree analysis", *Mining Science and Technology*, Vol. 7, pp. 205-215.
- Gupta A. K., Zeng W., Wu Y., (2010), "Probability and Statistical Models Foundations for Problems in Reliability and Financial Mathematics", Springer Science, New York, USA. pp. 278.
- Gupta S., Ramkrishna N., Bhattacharya J., (2006), "Replacement and maintenance analysis of longwall shearer using fault tree technique", *Mining Technology*, Vol. 115, No.2, 49-58.
- Gupta S., Bhattacharya J., (2007), "Reliability Analysis of a Conveyor System using Hybrid Data", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 23:867-882.
- Hall R., Daneshmend L. K., (2003a), "Reliability Modeling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 17, No.3, pp. 139-155.
- Hall R., Daneshmend L. K., (2003b), "Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment", *CIM Bulletin*; 96, Jun/Jul, pp. 159-165.
- Haskayne I. D., Farmer S. D., (1982), "The Reliability Problems of Powered Supports", *Mining Technology*, Vol. 64, No. 6, pp. 84-87.
- Hauge B. S., (2002), "Optimizing Intervals for Inspection and Failure-finding Tasks", in *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA*, pp. 14-19.
- IEC (2004), 60300 (3-14), "Dependability Management - Part 3-14: Application Guide - Maintenance and Maintenance Support", Geneva: International Electrotechnical Commission.
- IEA (International Energy Agency), (2010), *Key World Energy Statistics*, Paris, France, 82 pages.
- Ivko V. L., Ovchinnikova L. K., Plontnikova V., (1973), "A Method of Estimating the



- Operational Reliability of Kinematics Mechanized Support Systems", Soviet Mining Science, Vol. 9, No.3, pp. 333-335.
- Jalali S. E., Forouhandeh S. F., (2011), "Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction", Safety Science, Vol. 49: 664–669.
- Kamat S. J., Franzmeier W. E., (1976), "Determination of reliability using event-based Monte Carlo simulation II". IEEE Trans. Reliab., R-25/4:254-255.
- Kamat S. J., Riley M. W., (1975), "Determination of Reliability Using Event-Based Monte Carlo Simulation". IEEE Transactions on reliability R-24/1:73-75.
- Kececiyoglu D. B., (2002), "Reliability Engineering Handbook" Vol. 1, DEStech Publication, USA, pp: 721.
- Kim C., Lee H. K., (1992), "A Monte Carlo simulation algorithm for finding MTBF". IEEE Trans. on Reliab., 41/2:193-195.
- Khalokakaie, R., (1999), "Computer-aided optimal open pit design with variable slope angels", PhD Thesis, The University of Leeds, UK.
- Klefsjö B., Kumar U., (1992), "Goodness-of-fit tests for the power-law process based on the TTT-plot", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 41, Dec., pp. 593-598.
- Kumamoto H., Kazuo T., Koichi I., Henley E. J., (1980a), "State transition Monte Carlo for evaluating large, repairable systems". IEEE Trans. Reliab., R-29:376-380.
- Kumamoto H., Tanaka T., Inoue K., (1977), "Efficient evaluation of system reliability by Monte Carlo method". IEEE Trans. Reliab., R-26:311-315.
- Kumamoto H., Tanaka T., Inoue K., Henley E. J., (1980b), "Dagger sampling Monte Carlo for system unavailability evaluation". IEEE Trans. Reliab., R-29:122-125.
- Kumar U., (1990), "Reliability Analysis of Load-Haul-Dump Machines", Ph.D thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Kumar U., Granholm S., (1988), "Reliability Technique: A Powerful Tool for Mine Operator", Mineral Ressource Engineering, Vol. 1: 13-28.
- Kumar U., Klefsjo B., (1992), "Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model", Reliability Engineering and System Safety 35; 217-224.
- Kumar D., Klefsjo B., Kumar U., (1992), "Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model", Reliability Engineering and System Safety, 37: 217-222.
- Kumar U., Huang Y., (1993), "Reliability Analysis of a Mine Production System-a Case Study", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 26-28 January, Atlanta, GA , USA, pp. 167-172.
- Kumral M., (2005), "Reliability-based optimization of a mine production system using genetic

- algorithms", *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, Vol. 18(3), 186-189.
- Kvaløy J. T., Lindqvist B., (1996), "An area based test for trend in repairable systems data". Available online at: <http://www.math.ntnu.no/preprint/statistics/1996>.
- Lannon R. G., (1972), "A Monte Carlo technique for approximating system reliability confidence limits using the Weibull distribution". AD-743633, Available from US NTIS.
- Levkovich P. E., Chalenko N. E., (1966), "Use of Reliability Theory to Calculate the Required Number of Resere Longwall", *Soviet Mining Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 65-71.
- Lin C. T., Duran B. S., Lewis T.O., (1988), "Estimating lower confidence limits on system reliability using a Monte Carlo technique on binomial data". *Microelectron. Reliab.*, 28/3:487-493.
- Lin J. Y., Donaghey C. E., (1993), "Monte Carlo simulation to determine minimal cut sets and system reliability". *Proc. Annu. Reliab. Maintainab. Symp.*, Atlanta, GA, USA.
- Lutton S. C., (1967), "A Monte Carlo technique for approximating system reliability confidence limits from component failure data". MS thesis (GRE/MA/67-9), Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, USA.
- MacDonald M. R., (1982), "A Monte Carlo Technique suitable for obtaining complex space system reliability confidence limits from component test data with three unknown parameters". MS thesis, Air force Institute of Technology, Available from NTIS.
- Makhinin A. I., (1969), "The Reliability and Service Life of the MS-50m Centrifugal Pit Pump", *Soviet Mining Science*, Vol.5, No.6, pp. 719-722.
- Mandal S. K., Banik P. K., (1996), "Evaluation of Reliability Index of Longwall Equipment Systems", *Mining Technology*, Vol. 78 (897); pp. 138-140.
- Mason N. S., (1983), "Monitoring the Reliability of Coal face Equipment", *The Mining Engineer*, Vol. 143, No. Z64, pp. 105-112.
- MathWave Technologies (2010), *EasyFit Profesional*, Version 5.5 (2010), <http://www.mathwave.com>.
- MathWorks In. (2007), *Matlab*, Version 7.5.0.342 (R2007b), <http://www.mathworks.com>.
- MIL-HDBK-189, (1981), "Reliability growth management". Headquarters, US Army Communication Research and Development Command, AITN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ.
- Misra K. B., (2011), "Principle of Reliability Engineering", RAMS Consultants, India, pp. 454.
- Modarres M., (2006), "Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trend". NW: Taylor & Francis.
- Moore A. H., Hobbs J. R., Hasaballa M. S. B., (1985), "A Monte Carlo method for determining confidence bounds on reliability and availability of maintained systems". *IEEE Trans. Reliab.*, R-34:497-498

- Moore A. H., Harter H. L., Snead R. C., (1980), "A comparison of Monte Carlo technique for obtaining system reliability confidence limits from component test data". IEEE Trans. Reliab., R-29:327-332.
- Mukhopadhyay A. K., (1988), "Open pit system reliability", Journal of Mines, Metals & Fuels, August, pp. 389-392.
- NIST (2011), "Sematech e-Handbook of Statistical Methods", <http://www.itl.nist.gov>.
- Pavlovic V., (1989), "Continuous Mining Reliability: Design and Operation of Mechanized Systems", 6 Ellis Horwood, Chichester, England.
- Petrov N. N., Butorina O. S., (1986), "Reliability Analysis of Ventilation Systems", Soviet Mining Science, Vol.26., No. 6, pp. 81-87, November-December, 1986.
- Pham H., (2003), "Handbook of reliability engineering", Springer-Verlag London Limited, pp. 696.
- Putz R. B., (1979), "A Unvaried Monte Carlo technique to approximate reliability confidence limits of systems with components characterized by the Weibull distribution". MS thesis (GORMAn9D-7), Air Force Institute of Technology. Available from NTIS.
- Rausand M., Hsyland A., (2004), "System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications", 2nd edition, Wiley & Sons, pp. 644.
- ReliaSoft (2002), Weibull ++, Version 6, [www.reliasoft.com](http://www.reliasoft.com).
- Rice R. E., Moore A. H., (1983), "A Monte Carlo technique for estimating lower confidence limits on system reliability using pass-fail data". IEEE Trans. Reliab. R-32:366-369.
- Ridgon S. E., Basu A. P., (2000), "Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems", John Wiley & Sons, (INC), pp. 281.
- Rubinshtein B. S., (1975), "Some Aspects of the Reliability of Mining Equipment", Soviet Mining Science, Vol. 11, No. 4, pp. 349-352.
- Rubinstein R. Y., Kroese D. P., (2007), "Simulation and the Monte Carlo Method", John Wiley & Sons, pp: 377.
- 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.
- Shpiganovich A. N., Maslovskaya T. N., (1987), "Effect of the Reliability of Electrical Equipment on the Parameters of Sectional Transport and the Performance of Mining Machinery", Soviet Mining Science, Vol.23, No. 6, pp. 503-506.
- Sharma G., Haukaas T., Hall R., Priyadarshini S., (2009), "Bayesian statistics and production reliability assessments for mining operations", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol.23: No. 3.
- Singh B. P., Tiwarl S. K., (1984), "Application of Reliability and Availability to Underground

- Mine Transport", *Indian Journal of Mines, Metals & Fuels*, Jan-Feb., pp. 23-30. Singpurwalla N. D., (2006), "Reliability and Risk, A Bayesian Perspective", John Wiley & Sons Ltd., pp.399.
- Soldatov A. N., (1969), "Reliability of Blasting Equipment", *Soviet Mining Science*, Vol.5, No.5, pp. 518-523.
- Stanek E. K., Venkata S. S., (1988), "Mine Power System Reliability", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 24, No. 5.
- Stefanko R., (1983), "Coal Mining Technology: Theory and Practice", Society of Mining Engineers (SME), New York.
- Townson P. G. A. L., (2002), "Load–Maintenance Interaction: Modeling and Optimization", Ph.D Thesis, University of Queensland, 2002, pp: 530.
- Unger R.L., Conway K., (1994), "Impact of maintainability design on injury rates and maintenance costs for underground mining equipment". In: *Improving Safety at Small Underground Mines*, compiled by R.H. Peters, Special Publication Report No. 18–94, US Bureau of Mines, Washington, DC, pp. 140–167.
- Vagenas N., Kazakidis V., Scoble M., Espley S., (2003), "Applying a Maintenance Methodology for Excavation Reliability", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol.17, No.1, pp. 4-19.
- Vagenas N., Runciman N., Clément S. R., (1997), "A methodology for maintenance analysis of mining equipment", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 11: 1, 33-40.
- Vagenas 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*, Vol.23, No. 3, pp. 227-238.
- Vesley W. E., Goldberg F. F., Roberts N. H., Haasal D. F., (1981), "Fault Tree Handbook", Report No. NUREG-0492, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, pp. 209.
- Walker A. J., (1982), "Engineering Reliability into AFCs", *Mining Technology*, Vol. 64, No. 736, pp. 91-94.
- Wang H., Pham H., (2006), "Reliability and Optimal Maintenance", Springer, pp: 352.
- Wang H., Pham H., (1997), "Survey of reliability and availability evaluation of complex networks using Monte Carlo techniques", *Microelectron. Reliab.*, Vol. 31, No. 2, pp. 187-209.
- Wijaya A., Lundberg Y., Kumar U., (2011), "Downtime analysis of a scaling machine", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Forthcoming article, available online 5 Aug. 2011.
- World Coal Association (2011), Uses of coal, [www.Worldcoal.org](http://www.Worldcoal.org)



## **Abstract**

Drum shearer is one of the most important and well-known machines in underground coal mining. This machine is the first component of production chain in longwall mining. In this thesis, the reliability of drum shearer has been modeled using the field time between failures data in the Tabas coal mine, Iran. The series network configuration with six subsystems including the water, haulage, electrical, hydraulic, cutting arms and cable systems have been assigned for analysis. The time between failure data was analyzed using Weibull++ and Easyfit softwares. The results showed that failure behavior of haulage and hydraulic systems follow the 3-parameters Weibull and the Gamma and lognormal distributions are the best-fitted distribution on the water and electrical systems respectively.

Power Law Process model was used for cutting arms and cable system. Pareto analysis showed that the 30% of failures and stoppages of shearer is related to water system and this system is the most critical subsystem of machine. The failure rate analysis on failure data shows that the failure rate of hydraulic, haulage and electrical systems are decreasing, meanwhile, failure rate of water system, cutting arms and cable system are increasing. In this research, the 90% is selected as desired reliability level for scheduling the preventive maintenance for each subsystem of drum shearer. The combination of maintenance tasks of different subsystems shows that preventive maintenance of water system and hydraulic system should be done every 5 hours. The electrical and haulage system should be maintained every 10 and 20 hours respectively. For cutting arms and cable system, maintenance tasks should done every 90 hours simultaneously.

Also, the Kamat-Riley (K-R) Event-Based Monte Carlo Simulation Method was used for reliability analysis of longwall shearer machine. With negligible assumption of time to repair, a flowchart was built for programming the simulation process. The Matlab mathematical programming software was used for reliability simulation process. Finally the reliability plot of longwall shearer machine was achieved and upper and lower bound reliability were calculated. The results illustrate that the reliability of shearer machine reduces to zero in a period of 100h.

**Keywords:** Coal, Longwall, Drum Shearer, Reliability, Maintenance, Tabas



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics

*Ph.D Thesis*

**Modeling and Simulation of Drum Shearer  
Machine's Reliability at Mechanized Longwall  
Coal Mines- case study: Tabas Coal Mine**

**Seyed Hadi Hoseinie**

Supervisor(s):  
**Prof. M. Ataie**  
**Prof. R. Khaloakakie**

Advisor:  
**Prof. Uday Kumar**

**December 2011**