

سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

تحلیل تاب آوری سامانه حفاری در معدن بوکسیت جاجرم

نگارنده: عادل ظاهری عبده‌وند

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رامین رفیعی

استاد مشاور:

دکتر علی نوری قراحسنلو

بهمن ۱۳۹۹

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم

بوده اند و همچنین

تقدیم به دانشمند هسته ای و دفاعی کشورمان شهید حاج محسن فخری زاده، سردار شهید قاسم سلیمانی

و

به تمام آزاد مردانی که نیک می اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، مدنی

ندارند. دانشمندان، بزرگان، و جوان مردانی که جان و مال خود را در حفظ و اعتلای این مرز و بوم فدا نموده و می نمایند.

تشکر و قدردانی

باسپاس و تقدیر ویژه از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد عطایی و دکتر اسین رفیعی که در مراحل مختلف این پژوهش،

راهنمایی‌های ارزنده و سازنده خود را بر من ارزانی داشته و از هیچ کوششی در این زمینه دریغ ننمودند.

و نیز از دکتر علی نوری قراحتلو که با مشاوره و نظارت دقیق بر پژوهش مرا یاری نمودند، تشکر ویژه دارم.

در پایان بر خود لازم می‌دانم از بھکاری دوست عزیزم آقای مهندس عادل متحدی و مهندس علی حسین زاده که در امر

مکاترش این پایان نامه مرا یاری کردند صمیمانه تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب عادل ظاهری عبده وند دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن گرایش استخراج مواد معدنی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تحلیل تاب آوری سامانه حفاری در معدن بوکسیت جاجرم تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رامین رفیعی متعهد می‌شوم:

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

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۲/۴

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

سامانه استخراج معادن متشکل از سیستم‌های متعددی است که عملکرد صحیح هر کدام از آن‌ها برای حفظ تولید پیوسته معدن ضروری است. اولین فرآیند در تولید ماده معدنی در معادن روباز، عملیات حفاری است که در این عملیات از سیستم‌های حفاری مانند دریل‌واگن استفاده می‌شود. به همین دلیل خرابی، از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها، می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و سودآوری معدن محسوب شود. توقف ناخواسته‌ی سامانه حفاری معادن در اثر خرابی یا آشفستگی و عدم توانایی در بازگرداندن سیستم به شرایط قبل از خرابی، منجر به خسارات جبران‌ناپذیری خواهد شد. بنابراین از رویکردی جدیدی به عنوان تاب‌آوری استفاده شده است تا سیستم باید قادر باشد تا هر چه سریع‌تر به شرایط اولیه و حالت کارکرد خود بازگردد. در این پایان‌نامه به تحلیل تاب‌آوری بر روی سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم پرداخته شده است. از سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم، چهار زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل‌واگن ساتو هیدرولیک برای تحلیل تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفته شد. برای محاسبه و تحلیل تاب‌آوری از دو راهکار استفاده شد. در روش اول تحلیل، تاب‌آوری را در هر لحظه و بر اساس دو پارامتر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری محاسبه می‌شود که برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری از روش تحلیل آماری و نرم‌افزار minitab19 استفاده شد. در روش دوم تحلیل، تاب‌آوری را در یک بازه‌ی زمانی مشخص محاسبه می‌کند اما نمی‌توان تاب‌آوری سیستم را در لحظه محاسبه نمود.

تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم‌ها از روش اول نشان داد که دو زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ و دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ از تاب‌آوری بسیار بالایی برخوردار هستند و زیرسیستم‌های دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل‌واگن ساتو هیدرولیک، تاب‌آوری زیرسیستم‌ها

با گذشت ۵۰ ساعت به ۹۶ درصد می‌رسد. در نتیجه پارامتر قابلیت تعمیرپذیری تأثیر بیشتری بر تاب‌آوری زیرسیستم‌ها دارد. همچنین نتایج محاسبه تاب‌آوری زیرسیستم‌ها از روش دوم تحلیل تاب‌آوری نشان داد که دو زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ و دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ از تاب‌آوری بالاتری نسبت به دیگر زیرسیستم‌ها برخوردار هستند. تحلیل تاب‌آوری کل سامانه حفاری نشان می‌دهد که سامانه حفاری معدن کاملاً تاب‌آور بوده و تمام خرابی‌های زیرسیستم‌ها به سرعت بازیابی می‌شوند.

کلمات کلیدی: تاب‌آوری، قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، سامانه حفاری، minitab19

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات پژوهش.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- بیان مسئله.....	۲
۱-۳- ضرورت انجام پژوهش.....	۴
۱-۴- اهداف پژوهش.....	۵
۱-۵- روش پژوهش.....	۵
۱-۶- ساختار پایان نامه.....	۵
۲- فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق.....	۷
۲-۱- مقدمه.....	۸
۲-۲- تاب‌آوری.....	۸
۲-۳- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری.....	۱۳
۲-۴- جمع‌بندی.....	۱۵
۳- فصل سوم: مبانی نظری.....	۱۷
۳-۱- مقدمه.....	۱۸
۳-۲- تاب‌آوری.....	۱۸
۳-۳- مفهوم تاب‌آوری.....	۲۰
۳-۳-۱- تاب‌آوری و پایداری.....	۲۲
۳-۳-۲- تاب‌آوری و بازیابی سیستم.....	۲۳

- ۳-۳-۳- تاب‌آوری و دگرگونی در برابر تغییرات ۲۳
- ۳-۴- عوامل مؤثر بر تاب‌آوری ۲۵
- ۳-۵- روش‌های تحلیل تاب‌آوری ۲۶
- ۳-۶- تعاریف و اصطلاحات ۳۳
- ۳-۷- تعاریف ریاضی کمیت‌های موجود در مهندسی قابلیت اطمینان ۳۴
- ۳-۷-۱- تابع چگالی توزیع احتمال $f(t)$ ۳۴
- ۳-۷-۲- تابع توزیع تجمعی احتمال $F(t)$ ۳۴
- ۳-۷-۳- تابع قابلیت اطمینان $R(t)$ ۳۵
- ۳-۷-۴- نرخ خرابی $\lambda(t)$ ۳۵
- ۳-۷-۵- تابع قابلیت تعمیرپذیری ۳۶
- ۳-۷-۶- نرخ تعمیرات (μ) ۳۷
- ۳-۷-۷- توزیع آماری متداول در مهندسی قابلیت اطمینان ۳۷
- ۳-۸- روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری ۳۸
- ۳-۸-۱- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA) ۳۸
- ۳-۸-۲- روش مارکوف ۳۹
- ۳-۸-۳- روش تحلیل درخت خطا (FTA) ۴۰
- ۳-۸-۴- روش تحلیل آماری ۴۰
- ۳-۹- شبکه‌های تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سامانه ۴۳
- ۳-۹-۱- سیستم‌های سری ۴۳

۴۴	۳-۹-۲- سیستم‌های موازی
۴۵	۳-۱۰- جمع‌بندی
۴۷	۴- فصل چهارم: مطالعه موردی (معدن بوکسیت جاجرم)، معرفی سامانه حفاری معدن
۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- موقعیت جغرافیایی معدن
۴۹	۴-۳- مشخصات ماده معدنی معدن
۵۰	۴-۴- سامانه حفاری
۵۲	۴-۵- انواع سیستم حفاری
۵۲	۴-۵-۱- سیستم حفاری ضربه‌ای
۵۳	۴-۵-۲- سیستم‌های حفاری چرخشی-ضربه‌ای
۵۴	۴-۵-۳- سیستم‌های حفاری چرخشی
۵۴	۴-۵-۴- سیستم حفاری هیدرولیکی و پنوماتیکی
۵۶	۴-۶- عملکرد دریل واگن‌ها در انواع خاک و سنگ
۵۶	۴-۷- معرفی سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم
۵۷	۴-۸- اجزای سیستم دریل واگن اطلس کوپکو هیدرولیک
۵۹	۴-۹- تجهیزات اصلی کاربردی و مورد نیاز در حفاری با دریل واگن‌ها
۵۹	۴-۹-۱- مته
۶۱	۴-۹-۲- راد
۶۲	۴-۹-۳- شانگ

۴-۹-۴- کوپلینگ	۶۳
۴-۱۰- داده‌های خرابی سیستم‌های دریل واگن معدن بوکسیت جاجرم	۶۳
۴-۱۱- جمع‌بندی	۶۴
۵- فصل پنجم: مدل‌سازی و تحلیل نتایج آن	۶۵
۵-۱- مقدمه	۶۶
۵-۲- تحلیل پارتو	۶۶
۵-۳- روند کلی تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری	۶۷
۵-۴- تحلیل قابلیت اطمینان سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم	۶۹
۵-۴-۱- نرخ خرابی	۷۴
۵-۴-۲- قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری	۷۶
۵-۵- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری سامانه حفاری	۷۸
۵-۵-۱- نرخ تعمیر	۸۴
۵-۶- تحلیل تاب‌آوری سامانه حفاری	۸۶
۵-۶-۱- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱	۸۷
۵-۶-۲- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲	۸۹
۵-۶-۳- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳	۹۱
۵-۶-۴- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک	۹۳
۵-۶-۵- تاب‌آوری کل سامانه حفاری	۹۵
۶- فصل ششم: نتایج و پیشنهادات	۹۷

۹۸ ۶-۱- نتایج

۱۰۳ ۶-۲- پیشنهادات

۱۰۵ ۷- منابع

۱۱۲ پیوست‌ها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱ تصویری کلی از مفهوم تاب‌آوری در سیستم ۲۱
- شکل ۳-۲ روند نمای مدل ارزیابی ریسک (PAR) ۲۳
- شکل ۳-۳ روند نمای مدل ارزیابی تاب‌آوری ۲۴
- شکل ۳-۴ روش‌های ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌ها ۲۷
- شکل ۳-۵ نمایش مفهومی تاب‌آوری برای یک واحد خرابی در دوره زمانی کل ۳۰
- شکل ۳-۶ LOR در یک سری خرابی‌های مخرب و LOR های مرتبط ۳۱
- شکل ۳-۷ نمودار میزان نرخ خرابی در طول عمر در یک سیستم (منحنی وان حمام) ۳۶
- شکل ۳-۸ روند نمای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با داده‌های زمانی ۴۳
- شکل ۳-۹ سیستم سری ۴۴
- شکل ۳-۱۰ سیستم موازی ۴۵
- شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجرم ۴۹
- شکل ۴-۲ معدن بوکسیت جاجرم ۵۰
- شکل ۴-۳ سیستم دریل‌واگن هیدرولیکی معدن بوکسیت جاجرم ۵۷
- شکل ۴-۴ سیستم دریل‌واگن اطلس کوپکو هیدرولیک ۵۸
- شکل ۴-۵ قسمت‌های مختلف مته‌ها ۶۰
- شکل ۴-۶ انواع مته‌های حفاری ۶۱
- شکل ۴-۷ انواع مختلف رادهای سیستم دریل واگن ۶۲
- شکل ۴-۸ انواع شنگ‌های سیستم دریل واگن ۶۲
- شکل ۴-۹ کوپلینگ یا واسطه ۶۳
- شکل ۵-۱ تحلیل پارتو زیرسیستم‌های سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم ۶۷
- شکل ۵-۲ روند نمای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با داده‌های زمانی ۶۸

- شکل ۳-۵ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ به صورت گرافیکی ۷۰
- شکل ۴-۵ نتایج آزمون همبستگی سری زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس ۰۳ و ساتو ۷۵
- شکل ۵-۵ منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های سامانه حفاری ۷۳
- شکل ۶-۵ منحنی‌های نرخ خرابی زیرسیستم‌ها ۷۵
- شکل ۷-۵ قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری ۷۷
- شکل ۸-۵ نتایج آزمون همبستگی سری زیرسیستم دریل واگن ساتو ۷۹
- شکل ۹-۵ تابع برازش شده برای زیرسیستم دریل واگن ساتو (ویبول سه پارامتری) ۸۰
- شکل ۱۰-۵ نتایج آزمون همبستگی زیرسیستم اطلس هیدرولیک ۰۳ ۸۵
- شکل ۱۱-۵ منحنی قابلیت تعمیرپذیری تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری ۸۳
- شکل ۱۲-۵ منحنی نرخ تعمیر تمامی زیرسیستم‌ها ۸۵
- شکل ۱۳-۵ منحنی تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ ۸۸
- شکل ۱۴-۵ منحنی تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ ۹۰
- شکل ۱۵-۵ منحنی تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۳ ۹۲
- شکل ۱۶-۵ منحنی تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو ۹۴
- شکل ۱۷-۵ تاب‌آوری کل سامانه حفاری ۹۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳ تعاریف مختلف تاب‌آوری	۱۹
جدول ۱-۵ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱	۶۹
جدول ۲-۵ پارامترهای توزیع PLP برای زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱	۷۰
جدول ۳-۵ مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ برای ۵۰ ساعت	۷۱
جدول ۴-۵ نتایج آزمون روند تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری	۷۱
جدول ۵-۵ توابع برازش شده و پارامترهای هر یک از آن‌ها برای تمامی زیرسیستم‌ها	۷۲
جدول ۶-۵ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل‌واگن ساتو	۷۸
جدول ۷-۵ پارامترهای تابع برازش شده ویبول سه پارامتری برای زیرسیستم دریل‌واگن ساتو	۸۰
جدول ۸-۵ مقادیر قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن ساتو برای ۵۰ ساعت..	۸۱
جدول ۹-۵ نتایج آزمون روند تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری برای داده‌های TTR	۸۱
جدول ۱۰-۵ توابع برازش شده و پارامترهای آن‌ها برای تمامی زیرسیستم‌ها	۸۲
جدول ۱۱-۵ مقادیر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ برای ۵۰ ساعت کارکرد سیستم	۸۷
جدول ۱۲-۵ مقادیر تاب‌آوری سیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲ برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم	۸۹
جدول ۱۳-۵ مقادیر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم	۹۱
جدول ۱۴-۵ مقادیر تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم...	۹۳

فصل اول: کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

به علت رشد روزافزون جمعیت و برپایی صنایع کوچک و بزرگ، استفاده از انواع ماشین‌آلات، تجهیزات، فرایندها و مواد شیمیایی، امری گریزناپذیر شده است. در دنیای امروزی که همه امور متکی به فناوری پیشرفته است، همواره بیم آن می‌رود که در اثر بروز حوادث و وقایع ناگوار ناشی از کار، خسارت جبران‌ناپذیری به بار آید. همان‌گونه که علم و صنعت در جهان توسعه‌یافته است و بشر با استفاده از آن راه ترقی و پیشرفت را پیموده، حوادث ناشی از کار به مراتب زیان‌بارتر از دوره‌های قبل از پیشرفت علم و صنعت شده است. چنانچه برای پیشگیری و رفع حوادث، اقدامی به عمل نیاید و چاره‌اندیشی نشود، عواقب دردناکی را در پی خواهد داشت که جبران آن غیرممکن خواهد بود. عملیات معدنکاری از جمله فعالیت‌هایی است که در مقایسه با دیگر بخش‌های صنعت با خطرات زیادی همراه است. از این رو ارزیابی حوادث و پیامدهای مربوط به آن‌ها در طول دوره معدنکاری کمک مؤثری برای مدیران و مهندسان در تصمیم‌گیری و طراحی سیستم‌های مختلف محسوب می‌شود به همین دلیل برای مدیریت مؤثر چالش‌ها مربوط به زیرسیستم‌های معدنکاری، رویکردهای از جمله مدیریت ریسک و تاب‌آوری^۱ توصیه شده است. برای جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر در صنعت معدنکاری، سیستم باید در برابر آشفتگی‌ها و خرابی‌های مختلفی که ایجاد می‌شوند قابلیت از خود نشان دهد که باعث شود عملکرد آن هر چه سریع‌تر به حالت عادی خود بازگردد. تاب‌آوری خاصیتی از سیستم است که در این شرایط به کار مهندسان می‌آید.

۱-۲- بیان مسئله

سامانه استخراج معادن متشکل از سیستم‌های متعددی است که عملکرد صحیح هرکدام از آن‌ها برای حفظ تولید پیوسته معدن ضروری است. این سیستم‌ها به شدت وابسته به موقعیت و اندازه معدن،

^۱ Resilience

روش معدنکاری، تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز هستند. سیستم‌های اساسی معادن شامل سیستم‌های حفاری (دریل واگن، چالزن و شارژر)، دپوکاری و تسطیح (بلدوزر و گریدر)، بارگیری (لودر، بیل مکانیکی و شاول) و باربری (دامپتراک، نوارنقاله و ریلی) بوده است. اولین فرآیند در تولید ماده معدنی در معادن روباز، عملیات حفاری است که در این عملیات از سیستم‌های حفاری مانند دریل‌واگن استفاده می‌شود. به همین دلیل خرابی، از کار افتادن کل و یا بخشی از آن‌ها، می‌تواند به عنوان تهدیدی در کاهش تولید و سودآوری معدن محسوب شود. توقف ناخواسته‌ی سامانه حفاری معادن در اثر خرابی یا آشفته‌گی و عدم توانایی در بازگرداندن سیستم به شرایط قبل از خرابی، منجر به خسارات جبران‌ناپذیری خواهد شد. لذا سیستم باید قادر باشد تا هر چه سریع‌تر به شرایط اولیه و حالت کارکرد خود بازگردد. این مفهوم تحت عنوان "تاب‌آوری" بیان می‌شود. تاب‌آوری یکی از مفاهیم جدید در حوزه‌ی سیستم‌های مهندسی و غیرمهندسی است و استفاده از آن موجب افزایش ایمنی و بهره‌وری سیستم خواهد شد. به‌طور کلی، تاب‌آوری به صورت توانایی ایستادگی سیستم در مقابل وقوع خرابی و بازیابی سریع به شرایط اولیه خود و یا نزدیک به آن تعریف می‌شود. این واژه برای نخستین بار در سال ۱۹۷۳ توسط هولینگ^۱ در زمینه‌ی بوم‌شناسی مطرح شده است [۱]. از آن زمان تا به امروز، به علت کاهنده‌ی تاب‌آوری در ریسک‌های ناشی از وقوع آشفته‌گی و خرابی در سیستم‌ها، حجم تحقیقات مرتبط با این بحث به ویژه در سیستم‌های غیر مهندسی رو به افزایش بوده است [۲]. شاخص‌های مختلفی همچون قابلیت اطمینان^۲، قابلیت تعمیرپذیری^۳ و قابلیت پشتیبانی^۴، بر روی تاب‌آوری سیستم مؤثر هستند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی سابقه‌ی موضوع، تا به امروز بحث تاب‌آوری در حیطه‌ی سیستم‌های موجود در مهندسی معدن مورد استفاده قرار نگرفته است؛ بنابراین، این ضرورت وجود دارد تا از این مفهوم در بررسی ایمنی سیستم‌های مهم مهندسی معدن مانند سامانه حفاری استفاده شود. بر همین اساس، در این پایان‌نامه به تحلیل تاب‌آوری بر روی سامانه حفاری

¹ Holling

² Reliability

³ Maintainability

⁴ Supportability

معدن بوکسیت جاجرم پرداخته شده است.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

معدنکاری روباز با نرخ تولید بالا نیازمند به کارگیری ماشین آلات بزرگ و فراهم کردن و به کارگیری این ماشین آلات و حفظ و نگهداری آن ها نیازمند سرمایه گذاری کلان است. عملیات واحد معدنکاری شامل چالزنی، انفجار، بارگیری و با باربری است. یکی از اجزای سیستم تولید در این روش، سامانه حفاری است. در این روش حفاری و چالزنی توسط سیستم های حفاری از جمله دریل واگن، چالزن و ... انجام می شود. محیط سخت و شرایط عملیاتی تأثیرگذار معدن بر روی ماشین آلات و اپراتورها، باعث کاهش عملکرد و عمر ماشین آلات و در پی آن باعث افزایش هزینه های عملیاتی می شود. خرابی هر یک از این تجهیزات موجب توقف کل عملیات تولید یعنی ضرر اقتصادی و همچنین ایجاد پتانسیل خطر در معدن می شود. بروز هر گونه خرابی در سامانه حفاری، باعث توقفات پیش بینی نشده کل ماشین آلات مرتبط با استخراج خواهد شد. نکته ای که در اینجا اهمیت دارد این است که در چنین شرایطی سیستم های موجود باید دارای حد مطلوبی از تاب آوری باشند تا در صورت وقوع خرابی در مدت زمانی مناسب به ظرفیت عملیاتی خود بازگردند. در این شرایط تاب آور بودن سیستم باعث کاهش مدت زمان توقف عملیات می شود. کاهش مدت زمانی که عملیات متوقف است باعث می شود تا از نزول بیش از حد بهره وری عملیات جلوگیری شود. قابل اطمینان بودن سامانه حفاری، داشتن برنامه تعمیر و نگهداری مناسب برای دستگاه، وجود قطعات یدکی ضروری، کیفیت و سرعت تصمیمات مدیریتی، وجود دستگاه مشابه، قابلیت تعمیر دستگاه و سرعت انجام تعمیرات از جمله مسائلی هستند که بر روی تاب آوری سامانه حفاری مؤثر هستند. تاب آوری افزایش ایمنی و بهره وری، وجود برنامه ی کارا و منظم تعمیر و نگهداری (نت)، تدارکات، منابع کافی و در دسترس را به دنبال خواهد داشت.

۱-۴- اهداف پژوهش

در طی این تحقیق سعی خواهد شد تا با ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم، راهکارهای عملی برای پیش‌بینی خرابی و بازیابی سیستم‌ها به عملکرد طبیعی خود پس از خرابی ارائه شود. سایر اهداف این تحقیق به‌طور کلی عبارتند از:

- تحلیل قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های موجود در یک سامانه
- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های موجود در یک سامانه
- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم‌های موجود در یک سامانه
- استفاده از دو راهکار برای محاسبه و ارزیابی تاب‌آوری سامانه

۱-۵- روش پژوهش

مراحل انجام تحقیق به شرح زیر است:

- مطالعات کتابخانه‌ای پیرامون تمامی روش‌ها انجام شده در سایر رشته‌ها
- جمع‌آوری داده‌ها در پایگاه اطلاعاتی معدن بوکسیت جاجرم
- محاسبه تاب‌آوری برای سامانه حفاری
- تحلیل و تفسیر داده‌ها

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پژوهش به شش فصل تقسیم‌بندی شده است. در فصل اول به بیان کلیات پژوهش از قبیل بیان و تعریف مسئله، ضرورت و اهداف انجام تحقیق و روش انجام آن پرداخته شده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات در حوزه‌های مختلف در مورد تاب‌آوری سیستم‌ها انجام شده و نتایج برخی از

مطالعات آورده شده است. در فصل سوم در ابتدا به تعریف، مفهوم، روش‌های ارزیابی و عوامل مؤثر در مورد تاب‌آوری سیستم‌ها پرداخته شده است. در ادامه فصل روش‌های تحلیل و روش‌های محاسبه قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری که دو پارامتر مهم در مورد تاب‌آوری سیستم‌ها می‌باشند، آورده شده است. در فصل چهارم برای آشنایی بیشتر و بهتر با مطالعه موردی انتخاب شده، موقعیت جغرافیایی، اطلاعات زمین‌شناسی مورد بحث قرار گرفته است و همچنین آشنایی با سامانه حفاری، انواع سیستم‌ها حفاری و داده‌های پایگاه اطلاعاتی معدن پرداخته شده است. در فصل پنجم به مدل‌سازی و تحلیل و تفسیر نتایج قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و تاب‌آوری سیستم‌ها پرداخته شده است. در انتها و در فصل ششم به نتیجه‌گیری کلی از پژوهش صورت گرفته و پیشنهادهایی برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی سابقه موضوع، تحلیل تاب‌آوری در حیطه‌ی سامانه‌های مهندسی معدن کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در این فصل به مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تاب‌آوری پرداخته خواهد شد و همچنین پژوهش‌هایی که در زمینه قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری که از عوامل مؤثر بر تاب‌آوری هستند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۲- تاب‌آوری

هولینگ (۱۹۷۳) تاب‌آوری و پایداری را برای اولین بار در زمینه‌ی بوم‌شناسی مطرح کرد. تاب‌آوری را به صورت اندازه‌گیری پایداری سیستم‌ها و توانایی آن‌ها در جذب تغییر و آشفتگی و همچنان حفظ روابط یکسان بین متغیرها تعریف کرد [۱].

آلن‌بی^۱ و فینک^۲ (۲۰۰۵) تاب‌آوری را به صورت توانایی سیستم در حفظ و نگهداری فعالیت و ساختار خود در مقابل تغییرات بیرونی و درونی، جمع و جور کردن عملکرد سیستم به هنگام نیاز تعریف کردند [۳].

هایمس^۳ (۲۰۰۹) تاب‌آوری را به صورت توانایی ایستادگی سیستم در برابر آشفتگی‌های بزرگ همراه با میزان انحطاط قابل قبول سیستم و بازبایی^۴ آن در زمان مناسب و با هزینه و ریسک معقول بیان کرد. تعریفی که توسط هایمس ارائه شده است، نشانگر چند بعدی بودن در اندازه‌گیری تاب‌آوری است. به علاوه، هایمس تأکید می‌کند که تاب‌آوری در برابر یک سیستم وابسته به تهدید است [۴].

ویتسون^۵ و مارکوئز^۶ (۲۰۰۹) رابطه‌ای کمی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری وابسته به قابلیت اطمینان

^۱ Allenby

^۲ Fink

^۳ Haimes

^۴ Recovery

^۵ Whitson

^۶ Marquez

شبکه ارائه کردند. در این رابطه از احتمال وقوع آشفته‌گی خارجی و همچنین احتمال اینکه سطح عملکرد سیستم تحت تأثیر وقوع آشفته‌گی خارجی کمتر از مقدار از پیش تعیین شده بشود، برای محاسبه تاب‌آوری شبکه استفاده می‌کند. از نظر آن‌ها شبکه‌ای که علی‌رغم وقوع آشفته‌گی‌ها خارجی توانایی فراهم کردن خدمات و بازیابی خود را دارد تاب‌آور خواهد بود [۵].

یون و همکاران^۱ (۲۰۱۱) یک چارچوب طراحی سیستم محور تاب‌آوری را با هدف طراحی سیستم‌های مهندسی پیچیده با ویژگی‌های تاب‌آوری پیشنهاد دادند. قابلیت اطمینان و ظرفیت مرمت^۲ سیستم را دو مشخصه اصلی تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی معرفی کردند. قابلیت اطمینان به صورت توانایی سیستم در اجرای عملکرد مورد نیاز تحت شرایط مشخص و در بازه‌ی زمانی معین و همچنین ظرفیت مرمت به صورت توانایی بازیابی سیستم هنگام خرابی سیستم یا یکی از اعضای آن، تعریف می‌شود [۶].

موکر^۳ (۲۰۱۲) از منطق فازی برای تاب‌آوری زیرساخت‌های بحرانی استفاده کرد و این رویکرد جدید به طراحان سیستم کمک می‌کند تا با توجه به تاب‌آوری در برابر ارزیابی طراحی برای پذیرش در طراحی سیستم نهایی نتیجه‌گیری می‌کند [۷].

لی و ژی^۴ (۲۰۱۴) رابطه‌ای ریاضی برای کمی‌سازی تاب‌آوری مهندسی با الهام از رابطه‌ی ارائه شده توسط یون و همکارانش ارائه کردند. در این مقاله چارچوبی برای تعیین کمی‌تاب‌آوری مهندسی ارائه شده است که از قابلیت اطمینان، ترمیم و بازیابی استفاده شده است. از این چارچوب نتیجه گرفتند که تاب‌آوری مهندسی نه تنها به زمان و سرعت بازیابی بستگی دارد بلکه بسیاری از عوامل دیگر مانند دقت تشخیص، عدم موفقیت، فهرست منابع، در دسترس بودن نیروی کار و ... نیز وجود دارد و چارچوب پیشنهادی بسیار کلی است [۸].

¹ Youn et al

² Restoration

³ Muller

⁴ Li & Xi

راد و همکاران^۱ (۲۰۱۶) به بررسی ویژگی‌های تاب‌آوری در زیرساخت‌های قطب شمال پرداختند. هدف از این مطالعه، توسعه و نشان دادن یک رویکرد عملی برای توصیف آسیب‌پذیری و تاب‌آوری در برابر سیستم‌های زیربنایی قطب شمال بر اساس نظر متخصصان است، چالش‌های اصلی برای تحلیل تاب‌آوری در منطقه قطب شمال، عدم وجود روش‌های مشخص برای تحلیل تاب‌آوری و عدم وجود داده و اطلاعات هستند [۹].

حسینی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) روش‌های تحلیل تاب‌آوری و محاسبه تاب‌آوری را مورد بررسی قرار دادند. هدف این مطالعه، ارائه یک طبقه‌بندی و بررسی رویکردها برای تعیین کمیت تاب‌آوری در سیستم است که دو طبقه‌بندی، ارزیابی کمی و کیفی ارائه کردند [۱۰].

هانگ و ژانگ^۳ (۲۰۱۶) تاب‌آوری پوشش تونل را تحت افزایش شدید بار تحلیل کردند. آن‌ها بیان کردند که یک سیستم تاب‌آور باید توانایی کاهش اختلال ناشی از محیط نامطلوب را داشته باشد و به سرعت بهبود یابد و به یک سطح عملکرد قابل قبول برسد. شاخص تاب‌آوری را نسبت انتگرال عملکرد تغییر یافته سیستم به عملکرد طبیعی سیستم تعریف کردند. آسیب‌پذیری بالای پوشش تونل به دلیل افزایش زیاد بار و مدت‌زمان طولانی بین اقدامات بازپایی می‌تواند به تضعیف تاب‌آوری تونل منجر شود [۱۱].

یودو و وانگ^۴ (۲۰۱۶) چارچوبی بر پایه‌ی شبکه بیزین (BN^5) بر اساس ارتباط بین قابلیت اطمینان، ترمیم و تاب‌آوری برای ارزیابی کمی تاب‌آوری زنجیره تأمین یک موتور الکتریکی تحت تأثیر رویدادهای آشفته کننده ارائه کردند. روش اندازه‌گیری تاب‌آوری پیشنهادی با استفاده از شبکه بیزین، طراحان سیستم را قادر می‌سازد تا از ضعف و قدرت سیستم‌های خود در مقابل اختلال ناشی از حوادث

¹ Rød et al

² Hosseini et al

³ Huang & Zhang

⁴ Yodo & Wang

⁵ Bayesian Network

خرابی نامطلوب، درک بهتری داشته باشند [۱۲].

حسینی و برکر^۱ (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه‌های بیزین تاب‌آوری بنادر آبراه‌های داخل شهر را مدل‌سازی کردند و در این مقاله ابزاری برای تعیین کمیت تاب‌آوری به عنوان تابعی از ظرفیت‌های جذب، منطبق پذیر و ترمیم‌کننده با شبکه‌های بیزین ارائه شد [۱۳].

وانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۷) تعاریف رایج تاب‌آوری را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از طریق تجزیه و تحلیل تاب‌آوری تعاریف مختلف از تاب‌آوری، مشخص شده که علی‌رغم معیارهای کمی تعریف شده از تاب‌آوری می‌توانند تاب‌آوری سیستم‌ها را ارزیابی کنند [۱۴].

بارود و برکر^۳ (۲۰۱۸) با استفاده از روش کرنل بیزین، توزیع احتمال اهمیت و هر کدام از اجزاء شبکه را مدل کردند و با استفاده از آن تأثیر هر جزء را بر روی تاب‌آوری شبکه محاسبه کردند [۱۵].

بوستیک و همکاران^۴ (۲۰۱۸) بحث تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی جامعه را در مقابل فجایع طبیعی و غیرطبیعی مورد بررسی قرار دادند و انگیزه‌های اقتصادی را برای اجرای ارزیابی و مدیریت تاب‌آوری در جوامع آسیب دیده و سیستم‌های پیچیده در مقیاس بزرگ شرح دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تاب‌آوری تکامل شرایط در دوره بهبود را تصدیق می‌کند و مستلزم درک کاملی از سیستم است و از شناسایی استراتژی‌های مدیریت تاب‌آوری در کل سیستم پشتیبانی می‌کند [۱۶].

سرور و همکاران^۵ (۲۰۱۸) با ارائه یک شبکه بیزین (BN) مشخصه‌های تاب‌آوری یک سیستم مهندسی و عواملی که بر روی آن‌ها تأثیرگذار هستند را معرفی کردند. در این شبکه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و آسیب‌پذیری به عنوان مشخصه‌های اصلی تاب‌آوری شده‌اند. آسیب‌پذیری به میزان افت عملکرد سیستم پس از وقوع آشفتگی گفته شده و متمم قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود و

¹ Hosseini & Barker

² Wang et al

³ Baroud & Barker

⁴ Bostick et al

⁵ Sarwar et al

همچنین عوامل را به دو گروه واکنشی و پیشگیرانه تقسیم‌بندی کرده‌اند [۱۷].

کای و همکاران^۱ (۲۰۱۸) رابطه‌ای کمی مبتنی بر قابلیت دسترسی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی ارائه کردند و تاب‌آوری را به صورت یک توانایی ذاتی و صفت درونی در نظر گرفتند که از دو خصوصیت تشکیل شده است. خصوصیت‌های وابسته به عملکرد و خصوصیت‌های وابسته به زمان. ساختار سیستم تعیین شده خصوصیات وابسته به عملکرد مانند تنومندی^۲، افزونگی^۳، تطبیق‌پذیری^۴، انعطاف‌پذیری^۵ و قابلیت بقاء^۶ است و منابع نت تعیین‌کننده خصوصیات وابسته به زمان مانند تعمیرپذیری، قابلیت بازیابی، تندی^۷ و تدبیر^۸ هستند [۱۸].

برتیس و مک اویلی^۹ (۲۰۱۹) تاب‌آوری را در سیستم‌های مهندسی بررسی کردند. در این مطالعه به دو مقوله مهم برای بهبود توانایی سیستم‌های مهندسی در ارائه سیستم‌های تاب‌آور پرداخته شد که عبارت‌اند از: چگونگی ایجاد الزامات کیفی برای تاب‌آوری سیستم و چگونگی تقویت چرخه عمر سیستم‌های مهندسی برای پرداختن به تاب‌آوری [۱۹].

شیائو و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۰) به ارزیابی تاب‌آوری اکولوژیکی یک منطقه استخراج زغال‌سنگ در معدن زغال‌سنگ شاندونگ^{۱۱} چین با استفاده از شاخص آنتروپی و تجزیه و تحلیل وزن خطی پرداختند. که نتایج نشان داد که فعالیت‌های معدنی و همچنین محیط طبیعی بر تاب‌آوری زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد [۲۰].

حسینی و همکاران (۲۰۲۰) مفهوم تاب‌آوری در بخش معدن، به ویژه در ماشین‌آلات استخراج و

¹ Cai et al

² Robustness

³ Redundancy

⁴ Adaptability

⁵ Flexibility

⁶ Survivability

⁷ Rapidity

⁸ Resourcefulness

⁹ Brtis & McEvelley

¹⁰ Xiao et al

¹¹ Shandong

سیستم‌های تولید، استفاده کردند. از روش تجزیه و تحلیل کمی با استفاده از تابع بازیابی خطی استفاده شده است. به عنوان بخش اصلی روش پیشنهادی، فرض بر این است که در ناوگان ماشین‌آلات معدن، تابع عملکرد بلافاصله پس از وقوع خرابی به مقدار "صفر" می‌رسد. بنابراین، فرآیند محاسبه تاب‌آوری از طریق مفهوم زمان برای تعمیر و قابلیت نگهداری ماشین انجام می‌شود. به عنوان مفهوم در حال توسعه می‌تواند به اندازه کافی در سیستم‌های استخراج زغال‌سنگ به عنوان اندازه‌گیری پشتیبانی برای اطمینان از تولید استفاده شود [۲۱].

متحدی و همکاران (۱۳۹۹) به تحلیل تاب‌آوری سیستم استخراج مس سونگون پرداختند و در این تحلیل از شاخص‌های عملکردی سیستم شامل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی به منظور تحلیل تاب‌آوری استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تاب‌آوری کل سیستم برای یک ساعت کارکرد آن برابر با ۸۳/۱ درصد است و این مقدار بعد از گذشت ۱۰ ساعت به ۳۷/۱ درصد کاهش می‌یابد [۲۲].

متحدی و همکاران (۱۳۹۹) به شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم تهویه معادن پرداختند. در این مقاله، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و آسیب‌پذیری سیستم مشخصه‌های اصلی تاب‌آوری سیستم تهویه در نظر گرفته شدند. همچنین، با ایجاد تغییرات مثبت در وضعیت این عوامل می‌توان تاب‌آوری سیستم را بهبود بخشید [۲۳].

۲-۳- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

الولی و همکاران^۱ (۲۰۰۸) قابلیت تعمیرپذیری سیستم‌های مکانیکی هفت دستگاه شاول کابلی را مورد مطالعه قرار داد که داده‌های زمان انجام تعمیرات برای بازه ۱۲ ماه از معادن زغال‌ترکیه جمع‌آوری شده بود. در این تحقیق برای ارزیابی فرض توزیع مستقل داده‌ها (خود همبستگی) از روش

^۱ Elevli et al

آزمون ریشه واحد استفاده شده است. نتیجه تحقیق حاکی از آن بود که دو دستگاه در وضعیت بحرانی قرار دارند و نیازمند توجه بیشتری می‌باشند [۲۴].

عباس برآبادی و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت دسترسی ناوگان استخراجی معدن بوکسیت جاجرم را تحت بررسی قرار دادند. در این تحقیق پس از محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از مدل PHM^۱ برای اجزای ناوگان، قابلیت تعمیرپذیری اجزای نیز با استفاده از مدل PRM^۲ محاسبه شده است. در نهایت پس از مدل کردن پیکربندی پویای سیستم و محاسبه قابلیت دسترسی اجزا و سیستم، مقدار ظرفیت عملیاتی سیستم محاسبه شده است [۲۵].

برآبادی و همکاران (۲۰۱۱) برای تحلیل قابلیت تعمیرپذیری سرنده بخش سنگ‌شکنی معدن بوکسیت جاجرم از روش مدل تعمیرات متناسب و مدل نرخ مخابرات استفاده شد [۲۶].

حسینی و همکاران (۲۰۱۲) قابلیت اطمینان سیستم کابل دستگاه شیرر درام را تجزیه و تحلیل کردند. در این تحقیق، آزمون‌ها برای روند و همبستگی سری نشان می‌دهد که زمان بین خرابی‌های پی‌درپی برای سیستم کابل مستقل نیستند و به طور یکسان توزیع می‌شوند. یک آزمون برازش نشان می‌دهد که مدل فرآیند قانون توان مناسب برای داده‌های خرابی این سیستم فراهم می‌کند. بر اساس تجزیه و تحلیل و نتایج، یک دوره ۱۲۵ ساعته به عنوان فاصله نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای سیستم کابل شیرر تعریف شد. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد، با استفاده از این استراتژی، قابلیت اطمینان سیستم حداقل ۵۰٪ بهبود می‌یابد [۲۷].

گوستافسون و همکاران^۳ (۲۰۱۳) به مقایسه تحلیل قابلیت اطمینان برای دو دستگاه لودر معمولی و لودر LHD پرداختند [۲۸].

رحیم دل و همکاران (۲۰۱۳) سیستم هیدرولیک حفاری چرخشی معدن مس سرچشمه را مورد

^۱ Prognostics and Health Management (PHM)

^۲ Predictive Risk Model

^۳ Gustafson et al

مطالعه قرار دادند. در این مقاله با در نظر گرفتن پنج زیرسیستم هیدرولیک، چالزن، الکتریکی، انتقال قدرت و پنوماتیک به مدل سازی قابلیت اطمینان به روش آماری پرداختند. در انتها برای سطح قابلیت اطمینان ۸۰ درصد به عنوان قابلیت اطمینان آرمانی، ۱۰ ساعت را به عنوان تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد کرده است [۲۹].

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۶، به ارزیابی و تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه های حفاری دورانی در معدن سنگ آهن شماره ۱ گل گهر سیرجان با روش مارکوف که بر اساس نظریه فرآیندهای تصادفی بنا نهاده شده است، پرداختند [۳۰].

نجف عزیزاده و همکاران (۱۳۹۵) مدل سازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین های حفاری را مورد بررسی قرار دادند. از جمله تکنیک های توانمند برای پیش بینی خرابی ها و عملکرد مناسب دستگاه در یک زمان مشخص، ارزیابی آماری و احتمالاتی قابلیت اطمینان است. برای ارزیابی قابلیت اطمینان پنج زیرسیستم های عملیاتی سیستم های حفاری بررسی شد. بر اساس برنامه تعمیر و نگهداری ارائه شده، قابلیت اطمینان ناوگان حفاری معدن تا ۹۸٪ بهبود خواهد یافت. در پایان، جزئیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر زیرسیستم به صورت مجزا ارائه شد [۳۱].

۲-۴- جمع بندی

در این فصل به بررسی مطالعات انجام شده در مورد تاب آوری سیستم ها در زمینه ها و حوزه های مختلف پرداخته شد و نتایج آن ها مورد بحث قرار گرفت. کمبود مطالعه این موضوع در معادن به شدت احساس می شود. در این مطالعات به روش های مختلف ارزیابی و تحلیل تاب آوری و همچنین عوامل مؤثر بر تاب آوری آشنا شدیم و در بخش آخر مطالعاتی در زمینه های قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری که دو عامل مؤثر بر تاب آوری سیستم ها است مورد بررسی قرار گرفتند. در فصل بعد به مبنای نظری پژوهش خواهیم پرداخت.

فصل سوم: مبانی نظری

۳-۱- مقدمه

سیستم‌های تاب‌آور در مقابل آشفتگی و خرابی‌ها، آسیب‌پذیری کمتری دارند. برای این فرض معتبر و مفید، آگاهی از اینکه تاب‌آوری به چه صورت تعریف می‌شود، سنجیده می‌شود، ارتقاء می‌یابد و محافظت می‌شود، ضروری است. چالش اصلی این است که این مفهوم چگونه باید تعریف و شاخص‌های آن بسط داده شود و یا چگونه باید طرح‌ریزی شود. از این‌رو داشتن چارچوبی نظری که در آن بتوان شاخص‌های تاب‌آوری را تعریف و اندازه‌گیری کرد، ضرورت دارد. در این فصل تعاریفی از مفاهیم اصلی در ارتباط با موضوع و انواع روش‌های ارزیابی در زمینه تاب‌آوری بررسی خواهد شد.

۳-۲- تاب‌آوری

واژه "resilience" به معنای تاب‌آوری برگرفته از واژه‌ی لاتین "resilio" به معنی بازگشت به عقب است [۳۲]. تاب‌آوری در زمینه‌های مختلفی از جمله نظامی، روان‌شناسی، علوم اجتماعی، علوم محیط‌زیست و... کاربرد دارد که مطالعات در دهه اخیر نشان می‌دهد تاب‌آوری در سیستم‌های مهندسی روبه افزایش است. تاب‌آوری مفهوم فیزیکی است که از طریق علوم محیط‌زیست به علوم اجتماعی منتقل شده است، در جریان این انتقال در میان علوم مختلف تاب‌آوری مفهوم و تعریف متنوعی دارد. در حوزه‌ی مهندسی که جدیدتر از سایرین است، تعاریف مختلفی برای تاب‌آوری ارائه شده است. یکی از تعاریف ارائه شده مربوط به تاب‌آوری زیرساخت‌های مهندسی است که توسط شورای مشاوره زیرساخت ملی کشور ایالات متحده آمریکا ارائه شده است. این شورا، تاب‌آوری را به صورت توانایی پیش‌بینی، جذب، تطبیق و بازیابی سریع وضعیت سیستم پس از وقوع آشفتگی تعریف کرده است [۱۰]. در جدول (۳-۱) تعاریف مختلفی از تاب‌آوری ذکر شده است.

جدول ۱-۳ تعاریف مختلف تاب‌آوری

تاب‌آوری به توانایی و میزان استرس و فشاری که سیستم قبل از ناپایداری می‌تواند تحمل یا جذب کند تعریف می‌شود [۳۳].	بیتلی ^۱ ، ۲۰۱۳
توانایی یک سیستم برای بازیابی سریع از اختلالات [۳۴].	جفری ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹
توانایی سیستم در حفظ و نگهداری فعالیت و ساختار خود در مقابل تغییرات بیرونی و درونی و جمع و جور کردن عملکرد سیستم به هنگام نیاز [۳].	آلنبی و فنیک، ۲۰۰۵
توانایی ایستادگی سیستم در برابر آشفتگی‌های بزرگ همراه با میزان انحطاط قابل قبول سیستم و بازیابی آن در زمان مناسب و با هزینه و ریسک معقول [۴].	هایمس، ۲۰۰۹
توانایی سیستم در جذب تغییرات پیوسته و غیرقابل پیش‌بینی به طوری که کماکان فعالیت‌های ضروری خود را حفظ کند [۳۵].	پرگنزر ^۳ ، ۲۰۱۱
تاب‌آوری به توانایی سیستم‌های موجود برای پیش‌بینی، انطباق با یک حادثه و بازیابی سریع از آن رویداد معرفی می‌شود [۳۶].	غلامی و همکاران، ۲۰۱۶
توانایی و ظرفیت بازگشت به وضعیت پایدار پس از اختلال [۳۷].	بهامرا ^۴ ، ۲۰۱۱
تاب‌آوری را معیار استقامت سیستم‌ها و توانایی آن‌ها در جذب تغییرات و اختلالات تعریف می‌کند، توانایی سیستم در پاسخ و بازیابی در برابر فجایع [۱].	هولینگ، ۱۹۷۳
تاب‌آوری، توانایی یک سیستم در واکنش نشان دادن و بهبود بخشیدن به اختلالات در مراحل اولیه، با حداقل تأثیر بر ثبات پویا تعریف می‌شود [۳۸].	هولناگل ^۵ ، ۲۰۰۶
تاب‌آوری به توانایی سیستم برای بازگشت به حالت پیشین و اولیه خود از تغییرات عوامل استرس و فشار روی سیستم است [۳۹].	مک انتی ^۶ ، ۲۰۱۵

تمام تعاریف ارائه شده بر این نکته تأکید دارند که سیستم توانایی بازیابی شرایط اولیه یا نزدیک

¹Beatley

²Jufri

³Pregenzer

⁴Bhamra

⁵Hollnagel

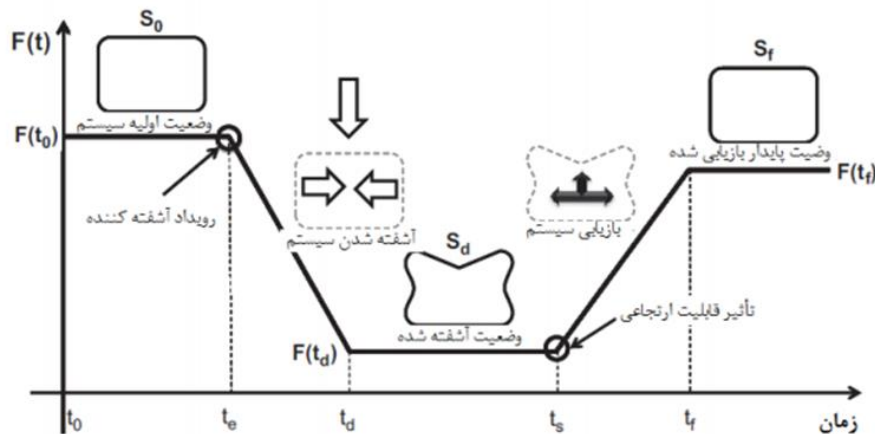
⁶McEntire

خود را داشته باشد. به طور کلی، تاب‌آوری به صورت توانایی ایستادگی سیستم در مقابل وقوع خرابی و بازیابی شرایط اولیه خود و یا نزدیک به آن تعریف می‌شود. برخی از تعاریف بر روی شرایط بعد از وقوع آشفته‌گی تمرکز داشته و برخی دیگر نیز شرایط قبل و هم شرایط بعد از وقوع آشفته‌گی را در نظر گرفته‌اند که در بحث تاب‌آوری، عملیات بعد از آشفته‌گی و قبل از آشفته‌گی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. تاب‌آوری لزوماً منحصر به دفع تنش‌ها نیست، بلکه یک سیستم زمانی تاب‌آور است که در حین آشفته‌گی بتواند کارکرد خودش را حفظ کند، شوک‌های مثبت و منفی را جذب کند و به یک سازگاری با شرایط جدید برسد [۴۰].

۳-۳- مفهوم تاب‌آوری

در شکل (۳-۱) تصویر کلی و ساده شده‌ای از ارتباط وضعیت سیستم با مفهوم تاب‌آوری و همچنین تغییرات تابع عملکرد سیستم بر حسب زمان $F(t)$ طی وضعیت‌های متفاوت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح عملکرد سیستم پس از وقوع آشفته‌گی شروع به کاهش یافتن کرده و پس از مدت‌زمان مشخص وضعیت عملکردی سیستم در پایین‌ترین سطح خود قرار می‌گیرد. در مقابل، پس از شروع بازیابی سطح عملکرد سیستم شروع به زیاد شدن کرده و سطح سیستم به وضعیت بازیابی شده ارتقا می‌یابد. اینکه چه مدت پس از وقوع آشفته‌گی عملیات بازیابی سیستم آغاز شود، به عوامل مختلفی مانند قابلیت پشتیبانی و عملکرد مدیریت بستگی دارد. پس از آنکه بازیابی سیستم آغاز شد این عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سطح عملکرد سیستم به شرایط اولیه باز گردد حال این سطح می‌تواند نزدیک به وضعیت پایدار اولیه و یا برابر با آن باشد. روند کاهش و یا افزایش سطح عملکرد سیستم تحت تأثیر آشفته‌گی و بازیابی، می‌تواند به صورت غیرخطی یا خطی باشد [۴۱]. شاخص‌های مختلفی همچون آسیب‌پذیری، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، بر روی تاب‌آوری سیستم مؤثر هستند. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در بحث تاب‌آوری، ویژگی‌های سیستم قبل و بعد از آشفته‌گی هر دو از اهمیت بالایی برخوردار هستند، در واقع یکسری از

تمهیدات باید از قبل در سیستم در نظر گرفته شوند تا سیستم قابل اطمینان شود و یکسری دیگر از تمهیدات نیز باید به نحوی در نظر گرفته شوند که پس از وقوع آشفته‌گی یا خرابی سیستم قابل تعمیر و پشتیبانی باشد.



شکل ۳-۱ تصویری کلی از مفهوم تاب‌آوری در سیستم [۴۱]

برای مثال در فرآیند استخراج یک معدن روباز، شش مرحله عملیات به ترتیب صورت می‌پذیرند که شامل چالزنی، خرج‌گذاری، انفجار، بارگیری، باربری و بازسازی می‌شوند. در طی این چرخه با توجه به سطح مکانیزاسیون عملیات، ماشین‌آلات یا سیستم‌ها مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حال اگر دستگاه چالزنی دچار خرابی شود و عملیات چالزنی انجام نشود تمام چرخه‌ی حفاری با مشکل مواجه می‌شود. در این شرایط تاب‌آور بودن سیستم باعث کاهش مدت‌زمان توقف عملیات می‌شود. کاهش مدت‌زمانی که عملیات متوقف است باعث می‌شود تا از نزول بیش از حد بهره‌وری عملیات جلوگیری شود. قابل اطمینان بودن دستگاه چالزن، داشتن برنامه تعمیر و نگهداری مناسب برای دستگاه، وجود قطعات یدکی ضروری، کیفیت و سرعت تصمیمات مدیریتی، وجود دستگاه مشابه، قابلیت تعمیر دستگاه و سرعت انجام تعمیرات از جمله مسائلی هستند که بر روی تاب‌آوری دستگاه چالزن مؤثر هستند. برای مثال اگر قطعه یدکی برای دستگاه چالزنی در دسترس نباشد و یا دستگاه چالزنی دیگری برای مواقع ضروری در نظر گرفته نشده باشد، اگرچه باقی مسائل به درستی صورت گرفته باشند به طور حتم سیستم دارای تاب‌آوری بسیار ضعیفی خواهد بود. در نتیجه برای تاب‌آور شدن سیستم باید

به موارد بسیاری توجه کرد. افزایش تاب‌آوری دستگاه چالزن باعث افزایش تاب‌آوری مرحله‌ی چالزنی می‌شود و به همین ترتیب افزایش تاب‌آوری هر کدام از سیستم‌های مراحل دیگر باعث افزایش تاب‌آوری مراحل خود شده و در نهایت تاب‌آوری کل چرخه‌ی حفاری معدن افزایش پیدا می‌کند [۴۰].

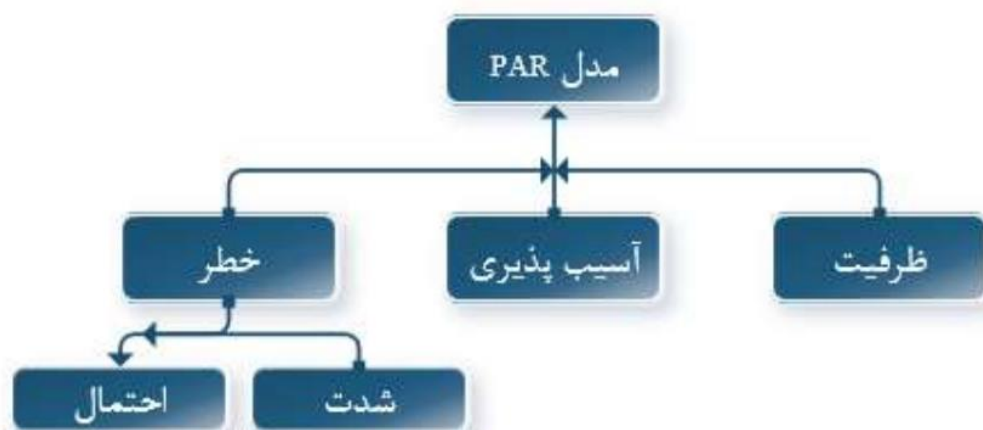
مفاهیم تاب‌آوری در سیستم‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی که وجه مشترک همه آن‌ها ایستادگی، مقاومت و واکنش مثبت به تغییرات و فشار است به شکل زیر دسته‌بندی نمود.

۳-۳-۱- تاب‌آوری و پایداری

در این دسته‌بندی تاب‌آوری به توانایی و میزان استرس و فشاری که سیستم قبل از ناپایداری می‌تواند تحمل یا جذب کند تعریف می‌شود [۳۳]. برخی از محققان شدتی از آسیب را که سیستم قادر به بازگشت به حالت عادی عملکردی خود نیست را در نظر می‌گیرند، چرا که یک سیستم تاب‌آور از آستانه تحمل بالایی در جذب استرس پیش از عبور از آستانه پایداری‌اش برخوردار است [۴۲].

تحت تأثیر این رویکرد مدل‌های مختلفی برای معرفی، سنجش و ارزیابی مفهوم تاب‌آوری ارائه شده است. یکی از این مدل‌ها، مدل ارزیابی ریسک (PAR)^۱ است که روند نمای آن در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. از معایب مدل PAR استفاده از مدل ارزیابی ریسک برای سنجش میزان تاب‌آوری شبکه بر مبنای احتمال، آمار و داده‌های حوادث پیشین است در صورتی که حوادث از جنس تاب‌آوری نادر، شدید و معمولاً غیرقابل‌پیش‌بینی هستند. این مدل به دلیل نگاه تک‌بعدی و اتکا به داده‌های پیشین ثبت شده از حوادث گذشته، دچار نارسایی در پوشش دادن همه حوادث سهمگین غیرقابل‌پیش‌بینی است که تاکنون رخ نداده است اما احتمال وقوع آن دور از ذهن نیست [۴۳].

^۱ Pressure and Release



شکل ۲-۳ روندنمای مدل ارزیابی ریسک (PAR) [۴۴]

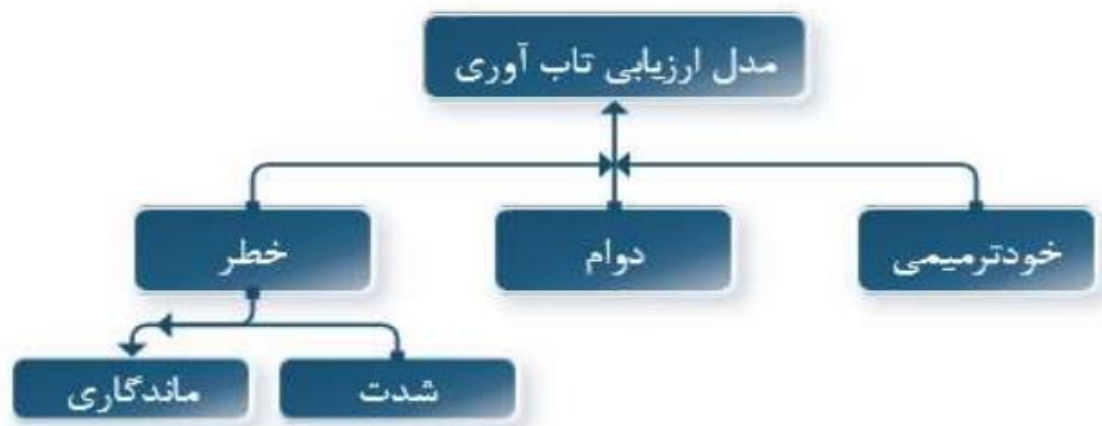
۲-۳-۳- تاب آوری و بازیابی سیستم

رویکرد بازیابی سیستم در مفهوم تاب آوری به توانایی سیستم برای بازگشت به حالت پیشین و اولیه خود از تغییرات و عوامل استرس و فشار روی سامانه است. تاب آوری در اینجا یک شاخص و معیاری مناسب به عنوان زمانی است که یک سیستم صرف می کند تا به طور کامل بازیابی به حالت پیشین خود شود [۳۹]. سیستم تاب آور از سرعت مناسبی برای بازگشت به وضعیت قبلی خود برخوردار است در صورتی که سیستمی که تاب آوری کمتری دارد یا به طور کلی فاقد تاب آوری است و قادر به بازیابی نیست و یا باید زمان بیشتری را صرف بازیابی خود کند [۴۵].

۳-۳-۳- تاب آوری و دگرگونی در برابر تغییرات

در کنار مفاهیم ارائه شده که بیشتر به حفظ حالت پایدار و بازیابی به حالت پایدار گذشته تأکید دارد، این رویکرد بیشتر به ظرفیت سیستم برای واکنش به تغییرات و منطبق ساختن ساختار خود با این تغییرات تعریف می شود [۴۶]. این دگرگونی به جای بازگشت ساده به حالت پایدار قبلی با ایجاد تغییراتی در خود به سمت حالتی جدید که در محیط موجود پایدارتر باشد حرکت می کند و سیستم در نقطه کار پایدار جدیدی قرار می گیرد. تحت تأثیر رویکرد بازیابی و رویکرد دگرگونی در برابر تغییرات، مدل ارزیابی تاب آوری معرفی می شود که برخلاف مدل ارزیابی ریسک (PAR) تعریف

کامل‌تری از مفهوم تاب‌آوری ارائه می‌کند. روندنمای این مدل در شکل (۳-۳) ملاحظه می‌شود. این مدل در مقایسه با مدل ارزیابی ریسک، خطر را نه از حیث احتمال وقوع آن بلکه از منظر ماندگاری حادثه ایجاد شده به همراه شدت وقوع آن مورد بررسی و ارزیابی قرار داده و با جایگزین کردن مفهوم خودترمیمی^۱ با ظرفیت و دوام به ازای آسیب‌پذیری، مفهوم جدیدی از ارزیابی تاب‌آوری سیستم معرفی می‌کند [۴۴].



شکل ۳-۳ روندنمای مدل ارزیابی تاب‌آوری [۴۴]

در ادبیات موضوع برای سنجش میزان تاب‌آوری سیستم‌ها مدل‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل PAR و مدل ارزیابی تاب‌آوری، مدل‌هایی متداول و مناسبی در مطالعه تاب‌آوری هستند.

وجه تشابه این دو مدل در توجه به شدت خطری است که تاب‌آوری سیستم را به چالش کشیده است، البته در کنار این تشابه تفاوت‌های چشمگیری نیز وجود دارد. در مدل ارزیابی تاب‌آوری ماندگاری خطر و حادثه مخرب، جایگزین احتمال و داده‌های آماری در مدل PAR شده و نقطه ضعف این مدل به این وسیله اصلاح می‌شود لذا احتمال در مدل ارزیابی تاب‌آوری از اهمیت چندانی برخوردار

^۱ Self healing

نیست. از طرفی مفهوم دوام سامانه در برابر سوانح و مفهوم خودترمیمی به عنوان راهکاری مناسب در بازگشت دوباره سیستم پس از وقوع حادثه به حالتی پایدار جایگزین آسیب‌پذیری و ظرفیت سیستم شده است و انعطاف و تاب‌آوری سیستم را در مواجهه با حوادث بالاتر می‌برد [۴۴].

۳-۴- عوامل مؤثر بر تاب‌آوری

در سال‌های گذشته، محققین مختلفی سعی کرده‌اند تا عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی را مورد بررسی قرار بدهند. یون و همکارانش قابلیت اطمینان و ظرفیت مرمت سیستم را دو مشخصه‌ی اصلی تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی معرفی کردند. قابلیت اطمینان به صورت توانایی سیستم در اجرای عملکرد مورد نیاز تحت شرایط مشخص و در بازه‌ی زمانی معین و همچنین ظرفیت مرمت به صورت توانایی بازیابی سیستم هنگام خرابی سیستم با یکی از اعضای آن، تعریف می‌شوند [۶]. یودو و وانگ نیز قابلیت اطمینان و مرمت را مشخصه‌ی تاب‌آوری سیستم‌ها در نظر گرفتند [۱۲]. حسینی و برکر [۱۳] و همچنین آبیملولا و خان^۱ [۴۷] ظرفیت جذب^۲، انطباق^۳ و مرمت سیستم را از مهم‌ترین مشخصه‌های تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی معرفی کردند. ظرفیت جذب به صورت توانایی سیستم در جذب یا ایستادگی در مقابل تأثیرات رویداد آشفته‌کننده و حداقل سازی عواقب ناشی از آن و همچنین ظرفیت انطباق به صورت توانایی سیستم در تطبیق سریع خود با شرایط حین وقوع آشفتگی تعریف می‌شوند. تفاوت بین ظرفیت مرمت و انطباق در این است که مرمت یک خصیصه‌ی دائمی بوده اما انطباق یک خصیصه‌ی موقتی از سیستم است. به عبارت دیگر، در مرحله انطباق راهکارهایی که استفاده می‌شوند، جنبه‌ی موقتی دارند. به‌طور کلی، ظرفیت جذب، انطباق و مرمت به ترتیب سه خط دفاعی سیستم در برابر خرابی‌ها و آشفتگی‌ها هستند [۴۸]. در مطالعه‌ی دیگر، راد و همکارانش قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی را از جمله مشخصه‌های

¹ Abimbola & Khan

² Absorption

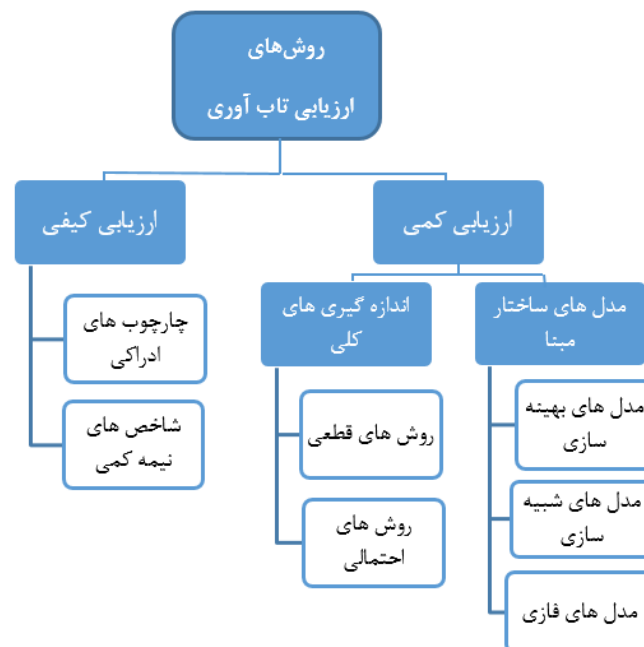
³ Adaptation

تاب‌آوری سیستم‌ها در نظر گرفتند [۹]. اما یکی از کامل‌ترین تحقیقات در این زمینه توسط سرور و همکارانش صورت پذیرفته است. آن‌ها با ارائه یک شبکه بیزین (BN) مشخصه‌های تاب‌آوری یک سیستم مهندسی و عواملی که بر روی آن‌ها تأثیرگذار هستند را معرفی کردند. در این شبکه قابلیت اطمینان، تعمیر پذیری و آسیب‌پذیری به عنوان مشخصه‌های اصلی تاب‌آوری معرفی شده‌اند. آسیب‌پذیری به میزان افت عملکرد سیستم پس از وقوع آشفتگی گفته شده و متمم قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. سرور و همکارانش سه مشخصه‌ی ذکر شده را نیز متأثر از برخی عوامل عملیاتی و طراحی در نظر گرفتند. عوامل عملیاتی به عواملی گفته می‌شود که برای ارتقاء شرایط سیستم مورد نیاز هستند. برای مثال آموزش کافی از جمله عوامل مؤثر عملیاتی است که منجر به بهبود وضعیت سیستم می‌شود. همچنین به عواملی که در مرحله‌ی طراحی سیستم باید برای ارتقا شرایط سیستم مورد ملاحظه قرار گیرند، عوامل طراحی گفته می‌شود. سرور و همکارانش همچنین عوامل طراحی را به دو گروه واکنشی و پیشگیرانه تقسیم‌بندی کرده‌اند. عوامل واکنشی عواملی هستند که بایستی حین وقوع خرابی و بعد از آن مورد ملاحظه قرار بگیرند. در واقع این عوامل ظرفیت انطباق سیستم حین وقوع خرابی و ظرفیت مرمت آن پس از وقوع خرابی را نشان می‌دهند. در مقابل، عوامل پیشگیرانه عواملی هستند که باید قبل از وقوع خرابی و یا در حین آغاز آن مورد ملاحظه قرار بگیرند. در واقع این عوامل ظرفیت جذب تأثیرات رویداد خرابی و ظرفیت انطباق سیستم با شرایط جدید در حین وقوع خرابی را نشان می‌دهند [۱۷]. در این رساله از دو مشخصه‌ی اصلی تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری استفاده شد.

۳-۵- روش‌های تحلیل تاب‌آوری

با توجه به شکل (۳-۴)، به‌طور کلی روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی و غیر مهندسی به دو گروه عمده‌ی کیفی و کمی طبقه‌بندی می‌شوند. در این بین، روش‌های کمی در حوزه‌ی سیستم‌های مهندسی کاربرد بیشتری دارند. این روش‌ها به دو دسته‌ی اندازه‌گیری کلی و

مدل‌های مبتنی بر ساختار تقسیم‌بندی می‌شوند. روش اندازه‌گیری کلی به وسیله‌ی محاسبه‌ی عملکرد سیستم جدای از ساختار آن، شرایطی را فراهم می‌کند که تاب‌آوری به صورت کمی ارزیابی شود. در واقع این روش‌ها مبتنی بر عملکرد سیستم هستند؛ بنابراین، در این روش عملکرد سیستم قبل از وقوع آشفته‌گی با عملکرد آن پس از وقوع آشفته‌گی مقایسه می‌شود. این روش‌ها نیز به دو بخش قطعی و احتمالی تقسیم می‌شوند. در روش‌های قطعی برخلاف روش‌های احتمالی، عدم قطعیت‌ها مانند احتمال وقوع آشفته‌گی در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین برخی از روش‌های قطعی و احتمالی ارائه شده نیز پویا یا ایستا نسبت به زمان هستند. مدل‌های مبتنی بر ساختار، چگونگی تأثیر ساختار سیستم بر روی تاب‌آوری را مورد بررسی قرار می‌دهند. در این روش‌ها باید رفتار سیستم مورد مشاهده قرار بگیرد و ویژگی‌های آن نیز مدل‌سازی یا شبیه‌سازی شوند. بر این اساس، مدل‌های مبتنی بر ساختار به مدل‌های بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و منطق فازی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰]. به بعضی از روش‌ها و روابط کمی برای ارزیابی تاب‌آوری را شرح داده شده است.



شکل ۳-۴ روش‌های ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌ها [۳۲]

رز^۱ رابطه‌ای کمی برای محاسبه تاب‌آوری در زمینه اقتصاد ارائه کرد. رابطه‌ی (۱-۳) که در آن R مقدار تاب‌آوری، $\% \Delta DY^m$ حداکثر درصد تغییر در خروجی مستقیم در اثر آشفستگی، $\% \Delta DY$ مقدار تخمین زده شده‌ی درصد تغییر در خروجی مستقیم در اثر وقوع آشفستگی هستند. درصد دوری از حداکثر آشفستگی اقتصادی ایجاد شده بر اثر یک بحران ماهیت اصلی این رابطه را تشکیل می‌دهد [۴۹].

$$R = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^m} \quad (1-3)$$

کیملارو و همکارانش^۲ با استفاده از چهار شاخصه‌ی اصلی تاب‌آوری یعنی تندی، تنومندی، تدبیر و افزونگی رابطه‌ای کمی برای محاسبه تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی پیچیده در مقابل آشفستگی‌های لرزه‌ای ارائه کردند. آن‌ها از رابطه‌ی (۲-۳) ارائه شده برای بررسی تاب‌آوری شش بیمارستان در شهر ممفیس^۳ کشور ایالات متحده آمریکا استفاده کردند. در این رابطه $Q_1(t)$ و $Q_2(t)$ معرف کیفیت خدمات سیستم قبل و بعد از وقوع خرابی هستند. همچنین T_{LC} زمان کنترل سیستم و α ضریب اهمیت خدمات قبل و بعد از وقوع خرابی هستند [۵۰].

$$R = \alpha \int_{T_{LC}} \frac{Q_1(t)}{T_{LC}} dt + (1 - \alpha) \int_{T_{LC}} \frac{Q_2(t)}{T_{LC}} dt \quad (2-3)$$

ایوب^۴ رابطه‌ای کمی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری ارائه کرد. رابطه‌ی (۳-۳) ارائه شده از چهار خصوصیت تنومندی، تندی، افزونگی و تدبیر و همچنین زمان شروع خرابی، زمان کامل شدن خرابی، مدت‌زمان صرف شده برای بازیابی و زمان اتمام بازیابی برای محاسبه تاب‌آوری استفاده می‌کند. در این رابطه T_i زمان وقوع، T_f زمان خرابی، T_r زمان بازیابی، مدت‌زمان خرابی ($\Delta T_f = T_i - T_f$) و مدت‌زمان بازیابی ($\Delta T_r = (T_r - T_i)$) هستند. F برابر با پروفیل خرابی بوده و تنومندی و افزونگی سیستم را اندازه

¹ Rose

² Cimellaro et al

³ Memphis

⁴ Ayyub

می‌گیرد. همچنین R پروفیل بازیابی بوده و قابلیت بازیابی سیستم را اندازه‌گیری می‌کند [۵۱].

$$R_e = \frac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r} \quad (3-3)$$

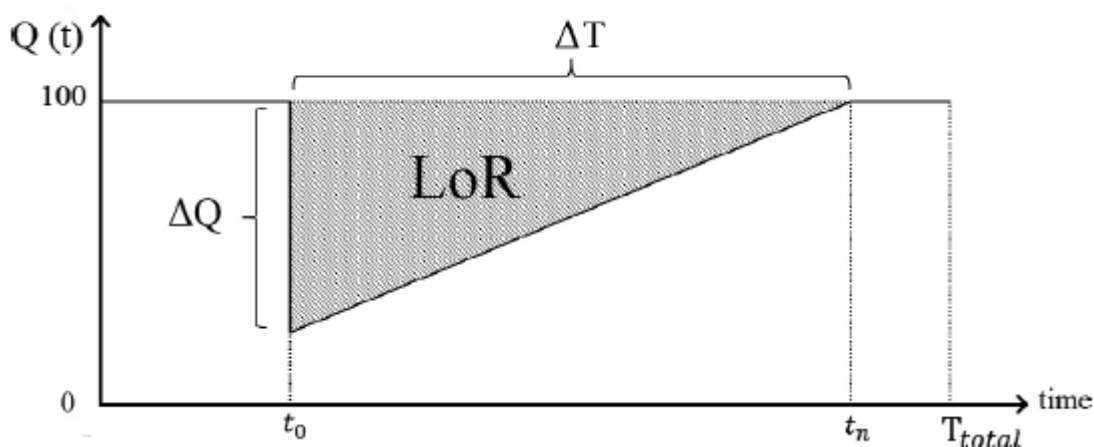
کای و همکارانش رابطه‌ای کمی مبتنی بر قابلیت دسترسی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی ارائه کردند. کای و همکارانش، تاب‌آوری را به صورت یک توانایی ذاتی و صفت درونی سیستم در نظر گرفتند که از دو خصوصیت تشکیل شده است؛ خصوصیت‌های وابسته به عملکرد و خصوصیت‌های وابسته به زمان. ساختار سیستم تعیین‌کننده خصوصیات وابسته به عملکرد مانند تنومندی، افزونگی، تطبیق‌پذیری، انعطاف‌پذیری و قابلیت بقا است و منابع نگهداری و تعمیرات (نت) تعیین‌کننده خصوصیات وابسته به زمان مانند تعمیرپذیری، قابلیت بازیابی، تندی و تدبیر هستند. کای و همکارانش رابطه خود برای محاسبه تاب‌آوری را بر پایه قابلیت دسترسی بنا نهادند. آن‌ها تاب‌آوری را به صورت رابطه‌ی (۳-۴) تعریف کردند (رابطه برای هر عضو از سیستم می‌تواند به کار برده شود). در این رابطه i برابر با شماره آشفتگی و همچنین n برابر با تعداد کل آشفتگی وارد شده به سیستم است. قابلیت‌های دسترسی قبل از آشفتگی (A_1)، بعد از آشفتگی (A_2) و بعد از رسیدن به شرایط عادی (A_3). T_1 معرف زمانی است که قابلیت دسترسی سیستم ثابت است، t_2 معرف زمان اتمام بازیابی سیستم است. نسبت $A/\ln(t)$ برابر با درجه تاب‌آوری است. رابطه ارائه شده نشان‌دهنده این موضوع است که با افزایش قابلیت دسترسی سیستم (A) و کاهش زمان بازیابی (t) مقدار تاب‌آوری افزایش می‌یابد [۱۸].

$$\Psi = \frac{A_1}{n \ln(t_1)} \sum_{i=1}^n \frac{A_2^i A_3^i}{\ln(t_3^i - t_2^i)} \quad (4-3)$$

مطابق شکل (۳-۵) تاب‌آوری را می‌توان از نظر ریاضی رابطه‌ی (۳-۵) تعریف کرد [۵۲]. این رابطه را می‌توان برای اندازه‌گیری از دست دادن تاب‌آوری برای یک خرابی واحد در یک سیستم استفاده کرد. مزیت این اقدام پیشنهادی سادگی آن است.

$$LOR = \int_{t_0}^{t_n} [100 - Q(t)] dt = \frac{\Delta T \times \Delta Q}{2} \quad (5-3)$$

در این رابطه، LOR از دست دادن تاب‌آوری سیستم، $Q(t)$ تابع عملکرد سیستم، t_0 زمان که خرابی رخ می‌دهد، t_n زمانی که سیستم به حالت طبیعی خود بازگردد، ΔT زمان تعمیر سیستم و ΔQ میزان عملکرد سیستم بین خرابی‌ها است.



شکل ۵-۳ نمایش مفهومی تاب‌آوری برای یک واحد خرابی در دوره زمانی کل [۲۱]

مقادیر LOR هرچه بیشتر باشند، مقدار تاب‌آوری کمتری دارند و بالعکس. کیملارو و همکاران [۵۳]، LOR با تقسیم بر T_{total} که کل زمان تجزیه و تحلیل سیستم است، باید نرمال شود و تا مستقل از زمان باشد. بنابراین، رابطه‌ی (۵-۳) را می‌توان با رابطه‌ی (۶-۳) جایگزین کرد.

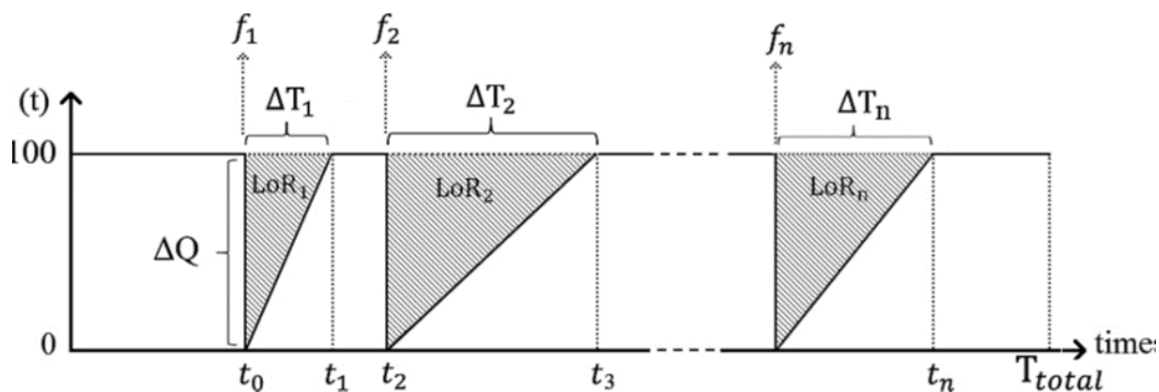
$$LOR = \int_{t_0}^{t_n} \frac{[100 - Q(t)]}{T_{total}} dt \quad (6-3)$$

در مدت زمان طولانی، ماشین‌آلات با حوادث و خرابی زیادی روبرو می‌شوند. بنابراین، LOR با جمع‌آوری LOR های تمام خرابی‌ها محاسبه می‌شود. رابطه‌ی (۶-۳) را می‌توان برای اندازه‌گیری از دست دادن تاب‌آوری به دلیل مجموعه فرآیند بازیابی توسعه داد. بنابراین، جمع‌بندی تمام فرآیندهای بازیابی پیشنهادی از نظر فنی برابر با از دست دادن کلی تاب‌آوری سیستم است [۲۱]. این مفهوم در

شکل نشان داده شده است و با استفاده از رابطه‌های (۷-۳) و (۸-۳) محاسبه می‌شود.

$$LOR_{overall} = \sum_{i=1}^I LOR_i \quad (۷-۳)$$

$$LOR_{overall} = \sum_{i=1}^I \frac{(\Delta T_i \times \Delta Q_i)}{T_{total}} = \frac{1}{2T_{total}} \sum_{i=1}^I \Delta T_i \times \Delta Q_i \quad (۸-۳)$$



شکل ۶-۳ LOR در یک سری خرابی‌های مخرب و LOR های مرتبط [۲۱]

در ناوگان ماشین‌آلات استخراج، بیشتر خرابی‌ها منجر به خاموش شدن و توقف کامل یا سریع تولید (حتی در ماشین‌آلات پیشرفته معدن، دستگاه به طور خودکار توسط برخی از سیستم‌های کنترل سلامت ماشین یا بر اساس سیستم‌عامل‌ها و مقررات ایمنی معدن متوقف می‌شود) می‌شود. بلافاصله پس از وقوع خرابی، عملکرد سیستم به صفر می‌رسد. بنابراین، در ارزیابی رابطه‌ی (۷-۳) برای ماشین‌آلات معدن، ΔQ تمام وقایع خرابی‌ها برابر با 100 است و می‌توان رابطه‌ی (۸-۳) را با رابطه‌ی (۹-۳) جایگزین کرد. بنابراین تاب‌آوری از رابطه‌ی (۱۰-۳) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$LOR_{overall} = \frac{50}{T_{total}} \times \sum_{i=1}^I \Delta T_i \quad (۹-۳)$$

$$\psi = 100 - LOR \quad (۱۰-۳)$$

یون و همکارانش رابطه‌ای کمی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم ارائه کردند. آن‌ها تاب‌آوری را به

صورت مجموع نرخ بقا منفعل سیستم (قابلیت اطمینان) و نرخ بقا کنشگرای سیستم (مرمت) بیان کردند. وجود عملیات مرمت در سیستم باعث بازیابی وضعیت سیستم شده و از نزول بیش از حد مجاز عملکرد سیستم جلوگیری می‌کند. در این رابطه عملیات مرمت بر اساس فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت^۱ برای افزایش قابلیت اطمینان به وسیله تشخیص، پیش‌بینی و اصلاح خرابی انجام می‌شود. رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش معروف به تاب‌آوری مهندسی است و به صورت رابطه‌ی (۳-۱۱) نوشته می‌شود که در آن Ψ برابر با تاب‌آوری سیستم، R قابلیت اطمینان سیستم، ρ برابر با مرمت و k و Λ_P و Λ_D برابر با احتمالات شرطی موفقیت عملیات بازیابی، پیش‌بینی و تشخیص صحیح هستند. با توجه به اینکه رابطه تاب‌آوری از قابلیت اطمینان سیستم استنتاج شده است، با استفاده از قواعد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیرسیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد [۶].

$$\Psi = R + \rho = R + \kappa \cdot \Lambda_P \cdot \Lambda_D \cdot (1 - R) \quad (11-3)$$

راد و همکارانش با الهام از رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش، رابطه‌ی جدیدی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها ارائه کردند. آن‌ها اعتقاد داشتند که قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی سیستم و همچنین تاب‌آوری تشکیلات نیز باید در محاسبات مد نظر قرار بگیرد. بر همین اساس، آن‌ها رابطه‌ی (۳-۱۲) را برای تحلیل تاب‌آوری سیستم در زمان t ارائه کردند. در این رابطه $\Lambda_{ij}(t)$ حاصل ضرب تاب‌آوری تشکیلات (β_1)، قابلیت تعمیرپذیری (β_2)، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت (β_3) و قابلیت پشتیبانی (β_4) است. در این رابطه نیز با استفاده از قواعد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیرسیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد. در رابطه ارائه شده توسط راد و همکارانش علاوه بر عدم قطعیت‌ها به عامل زمان نیز توجه شده است [۹].

$$\Psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + \Lambda(t) \cdot (1 - R(t)) = R(t) + \left(\prod_{i=1}^4 \beta_i \right) \cdot (1 - R(t)) \quad (12-3)$$

¹ Prognostics and health management (PHM)

۳-۶- تعاریف و اصطلاحات

- 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" آن دستگاه نامیده می‌شود.
- قابلیت تعمیرپذیری: احتمال توانایی دوباره سیستم یا دستگاه به انجام دادن صحیح مأموریت مشخص در شرایط معین بعد از تعمیر توسط پرسنل تعمیر و نگهداری است.
- خرابی : ناتوانایی یک بخش یا یک قطعه از دستگاه در انجام وظایف تعریف شده "خرابی" یا نقص نامیده می‌شود.
- نرخ خرابی^۱ : تعداد خرابی در واحد زمان "نرخ خرابی" خوانده می‌شود.
- زمان بین خرابی‌ها (TBF)^۲: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر (تعمیرپذیر) از دستگاه را "زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.
- میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)^۳: میانگین فاصله زمانی بین خرابی‌های یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه را "میانگین زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.
- زمان تعمیرات (TTR)^۴: زمان مورد نیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه را "زمان تعمیرات" می‌نامند.
- میانگین زمان تعمیرات (MTTR)^۵: میانگین زمانی صرف شده برای تعمیرات یک بخش از سیستم را "میانگین زمان تعمیرات" می‌نامند.

¹ Failure Rate

² Time Between Failure (TBF)

³ Mean Time Between Failure (MTBF)

⁴Time To Repair (TTR)

⁵Mean Time To Repair (TTR)

۳-۷- تعاریف ریاضی کمیت‌های موجود در مهندسی قابلیت

اطمینان

قابلیت اطمینان یک شاخص مهندسی و ریاضی برای کمی خرابی‌ها و پیش‌بینی زمان عملیات مفید هر دستگاه سیستم مهندسی است. در تحلیل قابلیت اطمینان، مجموعه‌ای از مفاهیم، کمیت‌ها و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و پرکاربرد مطرح هستند.

۳-۷-۱- تابع چگالی توزیع احتمال $f(t)$

این تابع بیان‌کننده شکل توزیع متغیر تصادفی است و تصویر کلی آن را می‌توان با ترسیم نمودار فراوانی متغیرهای پیش آمده به دست آورد. در مهندسی قابلیت اطمینان، تابع چگالی احتمال به نام (تابع چگالی خرابی) خوانده می‌شود. در این محاسبات، (زمان بین خرابی‌ها) به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. از ویژگی‌های کلیه توابع چگالی این است که سطح زیر منحنی آن‌ها برابر با یک است. گفته فوق منطبق با این واقعیت است که احتمال رخداد هر حادثه حداکثر ۱۰۰ درصد یا یک است. توابع چگالی احتمال دارای تنوع و اشکال مختلفی هستند که در ادامه ارائه شده است [۵۴].

۳-۷-۲- تابع توزیع تجمعی احتمال $F(t)$

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) خوانده می‌شود. برای یک متغیر پیوسته، تابع توزیع احتمال با انتگرال‌گیری تابع چگالی احتمال به دست می‌آید، بنابراین رابطه این تابع با تابع چگالی احتمال به صورت رابطه‌ی (۳-۱۳) است [۵۴].

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (3-13)$$

در آن $f(x)$: تابع توزیع احتمال، $F(t)$: تابع توزیع تجمعی و t : زمان است. با توجه به اینکه، زمان

($-\infty$) در مهندسی قابلیت اطمینان مفهوم و معنای واقعی ندارد، در این حیطه تابع چگالی احتمال به صورت رابطه‌ی (۱۴-۳) بیان می‌شود.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \text{احتمال وقوع خرابی یا زمان تعمیر تا زمان } t \quad (14-3)$$

۳-۷-۳- تابع قابلیت اطمینان $R(t)$

با فرض اینکه متغیر تصادفی نامنفی پیوسته‌ای است که عمر مفید (طول عمر با زمان پیش از خرابی) یک سیستم را نشان می‌دهد، قابلیت اطمینان که با $R(t)$ نمایش داده می‌شود، عبارت است از احتمال فعال و سالم باقی ماندن یک سیستم بیش از دوره‌ی زمانی t و در برخی موارد، تابع قابلیت اطمینان را به تابع بقا نیز می‌شناسند. تعریف ریاضی قابلیت اطمینان یک دستگاه با سیستم به‌طور کلی به صورت رابطه‌ی محاسبه می‌شود [۵۵].

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (15-3)$$

در این رابطه $f(x)$ تابع چگالی احتمال داده‌های خرابی سیستم و $R(t)$ قابلیت اطمینان در زمان t است. همچنین این کمیت از جنس احتمال بوده و به صورت درصد بیان می‌شود.

۳-۷-۴- نرخ خرابی $\lambda(t)$

نرخ خرابی، به صورت احتمال وقوع خرابی یک دستگاه در بازه زمانی به شرط آنکه تا زمان t هنوز خرابی اتفاق نیفتاده باشد، تعریف می‌شود. نرخ خرابی هر دستگاه در هر لحظه از زمان را می‌توان نسبت تعداد دستگاه‌های از کار افتاده در یک فاصله زمانی به تعداد کل دستگاه‌های مورد بررسی در ابتدا آن فاصله زمانی، دانست. به این ترتیب نرخ خرابی دستگاه در زمان t ، عبارت است از چگالی احتمال خرابی دستگاه در فاصله زمان بعدی، به شرط صحت کارکرد سیستم در ابتدای آن فاصله

زمانی. که عبارت فوق به زبان ریاضی به صورت رابطه‌ی (۱۶-۳) است [۵۴].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{F(t)}{R(t)} \quad (16-3)$$

تجربه نشان داده است که اکثر ماشین‌آلات، در طول مدت بهره‌برداری، دارای تابع نرخ خرابی مشخصی هستند. بدین ترتیب تابع عمر (نرخ خرابی) ماشین‌آلات به صورت شکل (۷-۳) خواهد بود که منحنی "وان حمام" نامیده می‌شود. در آغاز دوره بهره‌برداری (فاز ۱)، دستگاه نیاز به تنظیم شدن و رفع نواقص و سازگار شدن با محیط اطراف دارد. با گذشت دوران طفولیت، دستگاه در دوران طبیعی عمر خود (فاز ۲) قرار گرفته، در این دوران سرعت خرابی لحظه‌ای ثابت می‌ماند. پس از طی دوره عمر طبیعی و نزدیک شدن به دوران فرسایش (فاز ۳) سرعت خرابی دستگاه، روندی افزایشی به خود گرفته و در نتیجه هر مقدار که از عمر دستگاه می‌گذرد، سرعت خرابی لحظه‌ای (احتمال خرابی) در آن بیشتر خواهد شد [۵۶].



شکل ۷-۳ نمودار میزان نرخ خرابی در طول عمر در یک سیستم (منحنی وان حمام) [۶۲]

۳-۷-۵- تابع قابلیت تعمیرپذیری

قابلیت تعمیرپذیری که نشان‌دهنده‌ی توانایی بازگشت سیستم به وضعیت در حال کار است. به عنوان مثال وقتی گفته می‌شود که قابلیت تعمیرپذیری جزئی در طول یک ساعت ۹۰ درصد است، به

معنای وجود احتمال ۹۰ درصدی برای تعمیر شدن آن جزء در طول یک ساعت است. تعریف علمی این شاخص عبارت است از: توانایی یک سیستم برای ادامه حیات یا بازگشت به حالت توانمندی برای انجام فعالیت مورد انتظار تحت شرایط معین در صورت انجام نت تحت این شرایط با استفاده از روش و منابع مشخص [۵۷]. تابع قابلیت تعمیرپذیری همان تابع توزیع تجمعی است که آن را با $M(t)$ نشان می‌دهند و به صورت رابطه‌ی (۱۷-۳) بیان می‌شود.

$$M(t) = \int_0^t f_{dr}(t) dt \quad (17-3)$$

که t زمان مورد نیاز، $f_{dr}(t)$ تابع چالی احتمال برای زمان تعمیر (تابع چگالی تعمیر) و $M(t)$ تابع قابلیت تعمیر و نگهداری است.

۳-۷-۶- نرخ تعمیرات (μ)

نرخ تعمیر به تعداد تعمیر در واحد زمان گفته می‌شود و به صورت رابطه‌ی (۱۸-۳) به دست می‌آید. در این رابطه μ نرخ تعمیر، میانگین زمان تعمیر ($MTTR$) است.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (18-3)$$

۳-۷-۷- توزیع آماری متداول در مهندسی قابلیت اطمینان

مشخصات هر یک از توابع توزیع رایج در مهندسی قابلیت اطمینان به صورت خلاصه در جدول (۳-۲) آورده شده است.

جدول ۳-۲ مشخصات توابع توزیع متغیرهای پیوسته

نام توزیع	تابع چگالی	تابع توزیع تجمعی
نمایی	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda \geq 0$	$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda t}$

$F(t) = 1 - \exp[-(\frac{t-\lambda}{\alpha})^\beta]$	$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t-\lambda)^{\beta-1} \exp[-(\frac{t-\lambda}{\alpha})^\beta]$	ویبول
$F(t) = \frac{1}{\{1 + \exp[-(\ln(t-\lambda) - \mu)/\sigma]\}}$	$f(t) = \frac{1}{\sigma(t-\lambda)} \cdot \frac{\exp(\frac{\ln(t-\lambda) - \mu}{\sigma})}{[1 + \exp(\frac{\ln(t-\lambda) - \mu}{\sigma})]^2}$	لاگ لجستیک
$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}] dt$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2})$	لاگ نرمال

۳-۸- روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

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

➤ روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA)^۱

➤ روش مارکوف^۲

➤ روش تحلیل درخت خطا (FTA)^۳

➤ روش تحلیل آماری

۳-۸-۱- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آن‌ها (FMEA)

این روش یکی از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. روش FMEA یک روش کیفی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌ها است. مراحل اجرای این روش از فاز طراحی سیستم شروع شده و در تمامی مراحل عمر سیستم ادامه می‌یابد [۵۸]. گام‌های پیاده‌سازی این روش به شرح زیر است :

^۱ Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

^۲ Markov Theory

^۳ Fault Tree Analysis (FTA)

- ✓ تعریف و تعیین مرزهای سیستم و جزئیات مورد نیاز
 - ✓ تهیه لیست تمامی زیرسیستم‌ها و اجزای سیستم
 - ✓ شناسایی انواع خرابی‌های مربوط به هر زیرسیستم و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به آن‌ها
 - اختصاص احتمال یا نرخ خرابی به هر کدام از انواع خرابی‌ها
 - ✓ پیش‌بینی تأثیرات هر یک از انواع خرابی‌ها بر اجزاء مجاور، زیرسیستم‌های دیگر یا کل سیستم
 - ✓ وارد کردن توضیحات و ملاحظات مناسب در اطلاعات مربوط به هر نوع خرابی
 - ✓ مرور تک‌تک مدهای خرابی بحرانی و اتخاذ و اجرای تدابیر مناسب برای کاهش تأثیر آن‌ها
- با استفاده از گام‌های هفت‌گانه روش FMEA، متخصصان تعمیر و نگهداری هر سیستم می‌توانند به یک پایگاه اطلاعاتی مناسب و قوی در مورد آن سیستم دست یابند. اساس این روش کیفی بوده و هیچ‌گونه بحث کمی در تحلیل‌ها وارد نشده است. به همین دلیل، یکی از بزرگ‌ترین نقاط ضعف و محدودیت‌های این روش کیفی بودن آن است. زیرا با توجه به پیچیدگی روزافزون سیستم‌ها صنعتی، استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر بوده و با خطا همراه است.

۳-۸-۲- روش مارکوف

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 می‌کند. فرضیات زیر در روش مارکوف در نظر گرفته می‌شود [۵۹].

- ✓ نرخ خرابی و نرخ تعمیر ثابت هستند.
- ✓ تمامی رخدادها مستقل از هم هستند.
- ✓ احتمال انتقال سیستم از یک حالت به حالت دیگر در بازه زمانی Δt برابر است با $t\Delta\lambda$ که λ نرخ انتقال سیستم (نرخ خرابی) است.

✓ احتمال رخداد دو تغییر وضعیت از حال عملیاتی به حالت خرابی، در یک بازه زمانی محدود، بسیار کم و یا قابل صرف نظر کردن است.

۳-۸-۳- روش تحلیل درخت خطا (FTA)

روش تحلیل درخت خطا یکی از جامع‌ترین روش‌های مهندسی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری سیستم‌هاست. این روش به صورت نظام‌مند، تمامی دلایل خرابی و قطعات مربوط به هر دستگاه را در یک ساختار بالا به پایین که شبیه به درخت است، مرتب کرده و از این ساختار برای محاسبه احتمال خرابی یا سالم بودن دستگاه یا مجموعه استفاده می‌کند. روش درخت خطا یک روش کیفی و کمی بوده و به همین دلیل به طور بسیار مناسبی شرایط فنی و خرابی‌های دستگاه را تحلیل می‌کند. این روش دارای شش گام اصلی برای تشکیل درخت خطاست که در زیر به طور خلاصه ارائه شده است [۶۰]:

- ✓ تعریف سیستم و تشریح رخداد‌های نامطلوب در آن
- ✓ ساخت درخت خطا با استفاده از منطق ریاضی و سایر علائم استاندارد
- ✓ ارزیابی کیفی درخت خطای تشکیل شده
- ✓ کسب و جمع‌آوری اطلاعات پایه شامل نرخ خرابی اجزاء مختلف و احتمال وقوع خرابی در آن‌ها
- ✓ ارزیابی کمی درخت خطا
- ✓ پیشنهاد اقدامات لازم برای اصلاح و بهبود درخت

۳-۸-۴- روش تحلیل آماری

با توجه به تعاریف ارائه شده، قابلیت اطمینان یک کمیت آماری و مبتنی بر تئوری احتمالات است. بنابراین، روش تحلیلی آماری کامل‌ترین و جامع‌ترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌آید.

همان‌طور که در رابطه‌ی (۳-۱۵) دیده شد، تابع توزیع احتمال زمان بین خرابی‌ها (TBF) به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در محاسبات قابلیت اطمینان مطرح است. لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان است. سپس با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۵) معادله تابع زمان قابلیت اطمینان به دست می‌آید. از آنجایی که تنها در روش تحلیل آماری می‌توان به یک معادله تابع زمان دست یافت، لذا این روش "مدل‌سازی قابلیت اطمینان" نامیده شده و سایر روش‌ها بیشتر به نام تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می‌شوند. معمولاً برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان یک سیستم از سه روش عمده زیر استفاده می‌شود.

➤ فرآیند تجدیدشونده (RP)

➤ فرآیند پواسون همگن (HPP)

➤ فرآیند پواسون ناهمگن (NHPP)

انتخاب هر یک از روش‌های مدل‌سازی فوق بستگی به نوع داده‌های جمع‌آوری شده دارد. تحلیل الگوریتم کلی برای انتخاب روش مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با داده‌های زمانی در سه بخش کلی به شرح زیر بیان می‌شود:

➤ تشکیل بانک داده

➤ تعیین تابع یا مدل آماری مناسب

➤ تعیین شاخص‌های عملکردی سیستم یا زیرسیستم

در نخستین گام بعد از جمع‌آوری داده‌ها باید اساس فرض‌های مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان^۱ (iid) داده‌های خرابی، مورد بررسی قرار گیرد. در آمار و احتمالات دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی، مستقل با توزیع یکسان نامیده می‌شوند که همه آن‌ها دارای توزیع یکسان بوده و دو به دو مستقل باشند. مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان به این مفهوم است که یک عنصر در یک دنباله

^۱ Independent and identically distributed (iid)

مستقل از متغیرهای تصادفی است که قبل از آن ظاهر شده‌اند [۶۱]. برای ارزیابی این فرض از دو آزمون معمول یعنی آزمون روند^۱ و آزمون خودهمبستگی^۲ استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۳-۸) حالت‌های مختلف برای توصیف رفتار خرابی‌های زیرسیستم اجزا و برازش تابع قابلیت اطمینان از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود.

❖ در صورت وجود روند، مدل‌های نامانا مانند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توانی (PLP)^۳)،

❖ در صورت عدم وجود روند و وجود خودهمبستگی، فرایند پواسون منشعب

❖ در صورت عدم وجود روند و عدم وجود خودهمبستگی، توابع توزیع کلاسیک مانند توزیع

نرمال، لاگ نرمال، ویبول،...

آزمون روند تعیین می‌کند که آیا نحوه پراکنش داده‌های خرابی به طور معنی‌داری (تنزل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده است یا خیر، برای توصیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد که رویکردی مطابق (۳-۸) پیشنهاد شده است که با دو آزمون تحلیلی روند لاپلاس^۴ و کتابچه نظامی^۵ آغاز می‌شود [۶۲].

در خروجی آزمون‌های تحلیل‌های روند در صورت وجود روند در داده‌ها از فرآیند قانون توانی برای توصیف رفتار داده‌ها استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود روند در آزمون‌های کتابچه نظامی و لاپلاس، آزمون من-کندال استفاده می‌شود. اگر آزمون من-کندال عدم وجود روند را مشخص کرد، آزمون فرض وابستگی (خودهمبستگی) انجام می‌گیرد. خودهمبستگی به صورت همبستگی بین اعضای سری‌های مشاهداتی که در زمان (مانند داده‌های سری زمان) یا مکان (مانند داده‌های مقطعی) ردیف شده‌اند، تعریف می‌شود. برای تعیین خودهمبستگی نمودار i امین TBF(TTR) در برابر $(i-1)$

¹ Trend Test

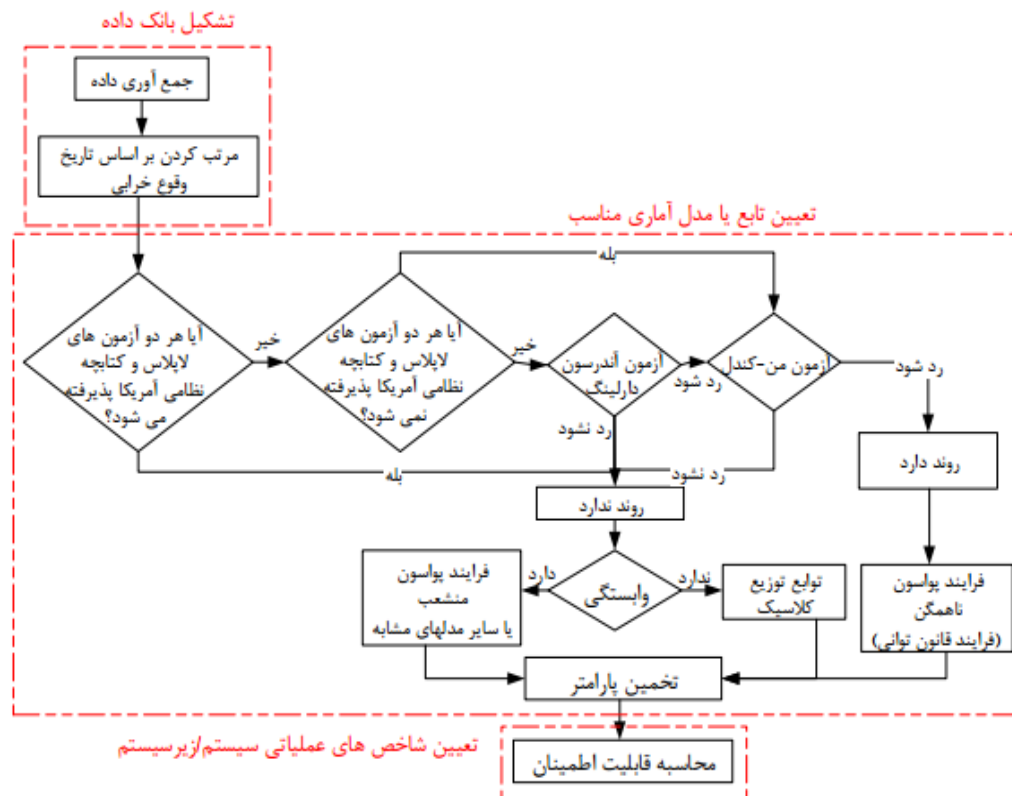
² Autocorrelation test

³ Poisson low process (PLP)

⁴ Laplace

⁵ Military Hand book

امین TBF(TTR) ترسیم می‌شود که در صورت نامستقل و همبسته بودن داده‌ها نقاط در امتداد یک خط واقع خواهند شد. نکته مهمی که در رابطه با آزمون باید تست شود، ترسیم داده‌ها به ترتیب وقوع است، چرا که مرتب‌سازی داده‌ها سبب همگرایی می‌شود [۲۷].



شکل ۳-۸ روند نمای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با داده‌های زمانی [۶۳، ۶۴]

۳-۹- شبکه‌های تاب‌آوری و قابلیت اطمینان سامانه

سیستم‌ها معمولاً از تعدادی عضو یا زیرسیستم تشکیل می‌شوند. نحوه ارتباط و قرارگیری این زیرسیستم‌ها نسبت به هم روی قابلیت اطمینان و تاب‌آوری کل سیستم تأثیرگذار است. در ادامه انواع ارتباط زیرسیستم‌ها و شبکه‌های قابلیت اطمینان و تاب‌آوری بیان شده است [۵۵].

۳-۹-۱- سیستم‌های سری

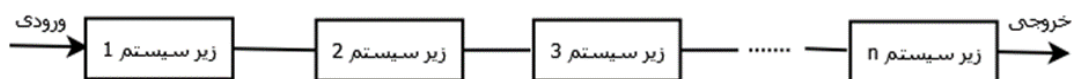
در این آرایش زیرسیستم‌ها به صورت متوالی باهم ارتباط دارند و برای این که سیستم بتواند به

فعالیت خود ادامه دهد باید تمام زیرسیستم‌ها به درستی فعالیت کنند به عبارت دیگر از کار افتادن یک زیرسیستم سبب رکود کل سیستم می‌شود. تاب‌آوری کل سامانه از رابطه‌ی (۱۹-۳) قابل محاسبه است. اگر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها به ترتیب $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ باشد آنگاه قابلیت اطمینان کل سیستم به صورت رابطه‌ی (۲۰-۳) محاسبه می‌شود.

$$\Psi_s = \Psi_1 \Psi_2 \Psi_3 \dots \Psi_n = \prod_{i=1}^n \Psi_i \quad (۱۹-۳)$$

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (۲۰-۳)$$

در شکل (۹-۳) نمونه‌ای از یک سیستم سری را نشان داده شده است. در صورتی که هریک از زیرسیستم‌ها دچار خرابی شود، تولید متوقف شده و هزینه‌هایی را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۹-۳ سیستم سری

۳-۹-۲- سیستم‌های موازی

در صورتی که عملکرد یک سیستم مستلزم عملکرد حداقل یکی از زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده آن باشد، سیستم موازی نامیده می‌شود. نمونه‌ای از یک سیستم موازی در شکل (۱۰-۳) آورده شده است. در صورتی که یک سیستم از n زیرسیستم موازی که تاب‌آوری هر کدام از آن‌ها Ψ_i و همچنین قابلیت اطمینان هر کدام از آن‌ها R_i است تشکیل شده باشد، تاب‌آوری سامانه و قابلیت اطمینان سامانه به ترتیب از رابطه‌های (۲۱-۳) و (۲۲-۳) قابل محاسبه است.

$$\Psi_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Psi_i) \quad (۲۱-۳)$$

$$R_{system} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (۲۲-۳)$$



شکل ۳-۱۰ سیستم موازی

۳-۱۰- جمع بندی

در این فصل، در ابتدا تعاریف مختلفی از تاب‌آوری آورده شد و سپس به مفهوم تاب‌آوری سیستم‌ها و عوامل مؤثر بر تاب‌آوری پرداخته شد. روش‌های مختلفی برای ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری مورد بررسی قرار دادیم. روش‌های مورد استفاده در این پژوهش را تشریح داده شد. در ادامه فصل، مفاهیم پایه مورد استفاده در قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری معرفی شده و مورد بحث قرار گرفتند. روش و روندنمای مدل‌سازی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مورد استفاده در این پایان‌نامه که دو عامل مؤثر بر تاب‌آوری سیستم‌ها هستند، معرفی و تشریح شد. در فصل بعد به معرفی مطالعه موردی و با سیستم‌های حفاری در معادن بیشتر آشنا خواهیم شد.

فصل چهارم: مطالعه موردی (معدن بوکسیت جاجرم)، معرفی سامانه حفاری

معدن

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و معرفی کلی معدن بوکسیت جاجرم، موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین‌شناسی معدن پرداخته می‌شود. برای تسلط کامل بر طراحی سیستم‌ها، آشنایی با نحوه عملکرد نهایی سیستم‌ها و اجزای آن‌ها، نیاز به شناخت کامل از بخش‌های مختلف سیستم‌های حفاری معادن است. به همین دلیل، برای تحلیل تاب‌آوری و قابلیت اطمینان این زیرسیستم‌ها، به معرفی زیرسیستم‌های سامانه حفاری معادن روباز پرداخته شده است.

۴-۲- موقعیت جغرافیایی معدن

شهرستان جاجرم در شمال غربی استان خراسان و در فاصله تقریبی ۱۷۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان بجنورد، ۱۶۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان سبزوار و ۱۹۴ کیلومتری شمال شرقی شاهرود، در حاشیه شمالی کویر و در کوه‌های زو و تاگوئی قرار گرفته است (شکل (۴-۱)). ارتباط جاجرم با شهرستان شاهرود و سبزوار و بجنورد توسط راه آسفالت‌ه برقرار است. راه آهن سراسری تهران - مشهد از ۳۶ کیلومتری جنوب جاجرم عبور می‌کند و کارخانه تولید آلومینا به وسیله یک خط آهن فرعی به این راه‌آهن متصل می‌شود [۶۵]. کوه‌های زو و تاگوئی یال شمالی تاقدیسی با روند شرقی-غربی را تشکیل می‌دهند. از آنجا که بال جنوبی این تاقدیس در اثر عملکرد یک گسل معکوس فروافتاده و سپس توسط رسوبات کواترنری پوشیده شده است، افق بوکسیت با روند شرقی-غربی به طول چندین کیلومتر فقط در یال شمالی تاقدیس مشاهده می‌شود. این منطقه که در جنوبی‌ترین بخش ناحیه ساختاری البرز شرقی و جنوب غربی کپه داغ قرار گرفته است از غرب و شمال توسط کوه‌های گدار گز، از شرق و جنوب شرقی توسط کوه‌های اسفراین و از شمال توسط کوه‌های آلا‌داغ محصور شده است. در منطقه جاجرم کانسار بوکسیت به صورت استراتیفرم با ضخامت متغیر (۵ الی ۷۰ متر) بوده و در دو بخش دیده می‌شود: الف: بخش گل بینی که در کوه تاگوئی واقع شده و دارای ۷ بلوک معدنی و ب: بخش زو که در کوه زو واقع شده و دارای ۵ بلوک معدنی است [۶۶].



شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجریم

۴-۳- مشخصات ماده معدنی معدن

کانسار بوکسیت جاجریم (شکل ۴-۲) در روی سنگ‌های دولومیتی سازند الیکا و زیر شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک قرار گرفته است. واحد بوکسیت کانسار جاجریم ساختار لایه‌ای غالب داشته که در آن عدسی‌های بوکسیت نیز تشکیل شده‌اند. امتداد تقریبی آن شرقی - غربی و بیش از ۱۲ کیلومتر گسترش دارد که در شرق با یک زون برشی محدود شده است. به طرف غرب و جنوب غرب، بوکسیت توسط نهشته‌های آبرفتی پوشیده می‌شود. ماده‌ی معدنی در کانسار بوکسیت جاجریم شامل دو افق A و B است. افق A یک واحد بوکسیت شیلی با ضخامت متوسط ۰.۵ تا ۱۰ متر است که بین سنگ‌های کربناتی سازند مبارک و شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ شیل قرار دارد و فاقد ارزش اقتصادی است. افق B با روند عمومی شرقی - غربی در منطقه‌ای به طول ۱۴ کیلومتر و با ضخامت ۱ تا حدود ۴۰ متر، بیشتر به صورت توده‌های عدسی شکل در حفره‌های کارستی سازند الیکا تشکیل شده است. مرز زیرین این عدسی‌ها با دولومیت‌های الیکا نامنظم بوکسیت شیلی با ضخامت

متوسط ۰/۵ تا ۱۰ متر است که بین سنگ‌های کربناتی سازند مبارک و شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ شیل قرار دارد و فاقد ارزش اقتصادی است. افق B با روند عمومی شرقی - غربی در منطقه‌ای به طول ۱۴ کیلومتر و با ضخامت ۱ تا حدود ۴۰ متر، بیشتر به صورت توده‌های عدسی شکل در حفره‌های کارستی سازند الیکا تشکیل شده است. مرز زیرین این عدسی‌ها با دولومیت‌های الیکا نامنظم و مرز بالایی آن با شیل و ماسه‌سنگ‌های شمشک منظم و همخوان است. گسترش طولی افق B بر اثر عملکرد گسل‌های راستا لغز، به ۴ بخش اصلی قابل تقسیم است که به ترتیب از شرق به غرب به نام‌های سنگ‌تراش، تاگوئی، زو و گلپینی نام‌گذاری شده‌اند. استخراج در معادن بوکسیت جاجرم به روش روباز و زیرزمینی انجام می‌شود [۶۶].



شکل ۴-۲ معدن بوکسیت جاجرم

۴-۴- سامانه حفاری

حفاری به معنی نفوذ در سنگ است. نفوذ در سنگ‌ها گاهی به منظور خرد کردن آن‌ها صورت

می‌گیرد. برای خرد کردن سنگ‌ها باید چال‌های انفجاری حفر کرد و در داخل آن‌ها مواد منفجره قرار داد. با منفجر کردن چال‌ها سنگ‌ها خرد می‌شوند. با خرد شدن سنگ‌ها، استخراج و برداشت آسان‌تر و با هزینه کمتری انجام می‌گیرد. در استخراج کلیه معادن به استثنای موارد نادر، مانند استخراج سنگ‌های ساختمانی با برداشت بعضی از سنگ‌های سست، حفاری جزء عملیات اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. این نوع حفاری را حفاری استخراجی می‌گویند. حفاری در معادن تنها به منظور استخراج نیست، بلکه قبل از استخراج یا به هنگام استخراج، برای اکتشاف نیز انجام می‌پذیرد. حفاری اکتشافی ممکن است به منظور کشف و پی بردن به وجود کانی یا ماده معدنی، یا به منظور پی بردن به شرایط کیفی سنگ‌ها صورت گیرد. با توجه به بالا بودن هزینه‌های حفاری اکتشافی و بعضی از مشکلات فنی توصیه می‌شود که هر دو گروه متخصصانی که به دنبال کشف کانی یا در جستجوی کشف شرایط کیفی سنگ‌ها هستند، مطالعات خود را همزمان شروع کنند. علاوه بر حفاری استخراجی و اکتشافی، حفاری به منظور عملیات تکنیکی برای تزریق سیمان در داخل درزه‌ها، برای خارج کردن گازها از لایه زغال، به منظور منجمد کردن آب در داخل طبقات نیز صورت می‌گیرد. لذا عملیات حفاری در زمینه‌های مختلف مهندسی و علوم کاربرد وسیعی دارد.

امروزه بیش از ۹۵ درصد حفاری‌ها به روش مکانیکی و یا ماشین‌های ضربه‌ای، چرخشی و ماشین‌های ضربه‌ای چرخشی انجام می‌گیرد. در روش مکانیکی نفوذ در سنگ با انرژی مکانیکی و از طریق اعمال ضربه‌های پی در پی، یا در اثر تماس انجام می‌گیرد. قطر چال‌هایی که با روش مکانیکی حفر می‌گردند، بین ۲ تا ۲۴ اینچ و عمق آن‌ها از چند سانتیمتری تا چند متری متغیر است. عمق غالب چال‌های انفجاری کمتر از ۲۰ متر و قطر آن‌ها در معادن زیرزمینی کم است. اما امروزه در معادن روباز، برای پایین نگه داشتن هزینه‌های حفاری و انفجار و نهایتاً کاهش هزینه استخراج قطر چال‌های انفجاری را زیاد می‌گیرند، از این رو بین ماشین‌هایی که چال‌های انفجاری در معادن روباز حفر می‌کنند و ماشین‌های اکتشافی و ماشین‌هایی که به منظور استخراج نفت، گاز و آب به کار می‌روند، شباهت زیادی وجود دارد [۶۷].

۴-۵- انواع سیستم حفاری

به دلیل تنوع سنگ انواع مختلف سیستم حفاری نیز برای حفر چال در سنگ توسعه داده شده است که انتخاب آن‌ها به اندازه پروژه، طبیعت و نوع سنگ، عمق و قطر چال، مقدار استخراج و... بستگی دارد. ابتدایی‌ترین شکل از سیستم حفاری، پتک بوده که میله فلزی است که برای شکستن و کاهش ابعاد سنگ به کار گرفته شده است. ولی به تدریج با تکامل فناوری و افزایش تقاضا برای مواد معدنی و غیره این نوع سیستم‌های اولیه جای خود را به سیستم‌های پیشرفته‌تری داده‌اند. به نحوی که بعضی از سیستم‌های حفاری (چرخشی یا دورانی) قادرند در ازای هر شیفت ۲۰۰۰ فوت (حدود ۶۰۰ متر) حفاری کنند [۶۷]. به طور کلی بر اساس مکانیزم نفوذ در سنگ، چهار گروه سیستم حفاری تاکنون تقسیم‌بندی شده‌اند که عبارتند از:

❖ سیستم حفاری دستی

❖ سیستم حفاری ضربه‌ای

❖ سیستم حفاری چرخشی

❖ سیستم حفاری ضربه‌ای-چرخشی

۴-۵-۱- سیستم حفاری ضربه‌ای

دریل واگن نوعی از سیستم حفاری ضربه‌ای است که چالزن از طریق تسمه‌ها به دکل نصب شده و به صورت خشاب وار بر روی دکل بالا و پایین می‌شود و مجموعه دکل و چالزن بر روی ارابه دو یا سه چرخ لاستیکی یا چرخ زنجیری سوار شده‌اند که به همین دلیل به آن دریل واگن نیز می‌گویند. دریل واگن با زوایایی مختلف می‌تواند چال حفر کند، در مجموع حفر چال با دریل واگن در مقایسه با انواع چکش‌های حفاری در شرایط یکسان از نظر سنگ با سهولت و کیفیت بهتری صورت می‌گیرد. از دریل واگن می‌توان برای حفر چال‌هایی تا عمق ۴۵ متر (۱۵۰ فوت) و قطر تا ۴ اینچ برای سنگ‌های نیمه سخت و سخت استفاده کرد. اما به طور رایج عمق چال‌هایی که با دریل واگن حفاری می‌شوند تا ۹

متر (۳۰ فوت) است. بعضی از دریل واگن‌ها پایه‌های زنجیری دارند. علت استفاده از پایه‌های زنجیری، سرعت در انتقال آن‌ها بخصوص در شرایط صعب‌العبور است. این نوع دریل واگن‌ها قادر هستند چال‌هایی تا قطر ۶ اینچ (۱۵ متر) را حفاری کنند. آن دسته از دریل واگن‌ها را که پیش از یک چالزن دارند را جامبودریل می‌نامند که در سرعت عملیات بسیار موثراند، و در حفر تونل غالباً از آن‌ها استفاده می‌شود. باید توجه داشت که آنچه تاکنون از انواع سیستم‌های حفاری ضربه‌ای ذکر شد آن گروهی بودند که به کمک آن‌ها می‌توان چال‌هایی با قطر و عمق کم حفاری کرد و ضربه زن آن‌ها در بیرون از دهانه چال قرار دارد SMD از این نظر این گروه با DTH که ضربه زن آن‌ها پشت مته و در چال قرار دارد متفاوت هستند [۶۷].

۴-۵-۲- سیستم‌های حفاری چرخشی-ضربه‌ای

دریل‌واگن نوعی سیستم حفاری ضربه‌ای - چرخشی است که در آن ضربه زن به جای آنکه در سطح به بازو یا پایه ماشین نصب شده باشد بلافاصله بعد از مته قرار می‌گیرد و با مته به ته چال می‌رود لذا اتلاف انرژی (افت فشار) که از طریق لوله‌ها در انواع دیگر ماشین‌ها حفاری مشاهده می‌شود در این نوع سیستم حفاری وجود ندارد و این امر موجب می‌شود تا ماشین توانایی حفر چال‌های عمیق‌تر و قطورتر را داشته باشد.

یکی از سیستم‌های چالزنی برای چال‌های با قطر بین ۴ تا ۹ اینچ (۱۰۱ تا ۲۳۰ میلی‌متر) است. فشار هوای مورد نیاز معمولاً بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ psi متغیر و سرعت هوا برای انتقال ذرات حفاری از ته چال حدوداً ۴۰۰۰ فوت در دقیقه (۱۲۰۰ متر در دقیقه) است. تراست یا بار روی مته مورد نیاز برای این گونه سیستم چالزنی DTH معمولاً به قطر مته و دور مته بستگی دارد. به طور رایج برای دور مته بین ۱۰ تا ۱۰۰ دور در دقیقه بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ پوند متغیر نیرو لازم است. عامل چرخش مته غالباً در منتهی‌الیه رشته حفاری ماشین قرار دارد از آنجایی که به دلیل عدم ارتباط بین مته و ضربه زن افت انرژی وجود ندارد از یک سو سرعت چالزنی در چال‌های عمیق و یا نیمه عمیق زیاد است و از

سوی دیگر لوله‌ها نیز از طول عمر بیشتری برخوردارند. چون تنها انرژی که آن‌ها از خود عبور می‌دهند انرژی ناشی از تراست است نه انرژی ضربه زن. همچنین در حفاری DTH سر و صدا بسیار کم است چون ضربه زن که خود عامل سرو صدا است در داخل چال قرار دارد. از مشکلات این ماشین در چال‌ها دارای حفره و یا درزه است که اگر مته گیر کند و انتقال آن با روش‌های رایج امکان‌پذیر نباشد ضربه زن نیز از دست خواهد رفت. حداقل قطر چالی که با DTH می‌توان حفاری نمود معمولاً ۴ اینچ است و سرعت چالزنی این سیستم در چال‌های کم‌عمق در مقایسه با ماشین‌های حفاری که ضربه‌زن آن‌ها در سطح قرار دارد و طول زیادتری نیز دارند کمتر است [۶۷].

۴-۵-۳- سیستم‌های حفاری چرخشی

از ماشین‌های حفاری چرخشی (دورانی) از سالیان پیش در معادن روباز برای حفر چال‌هایی با قطر بین ۴ الی ۵ اینچ استفاده شده است اولین بار نیرپیک این سیستم را در فرانسه در سال ۱۸۶۳ مورد آزمایش قرار داد که به تدریج در معادن برای حفر چال‌های انفجاری برای انتقال سنگ‌های پوششی زغال سنگ رایج و متداول شد. در اوایل قرن نوزدهم به دلیل نوع مته‌ای که به کار گرفته می‌شد بیشتر از این سیستم برای حفر چال در طبقات نرم یا سنگ‌هایی با مقاومت کم (کمتر از ۶۰۰ psi) استفاده می‌شد. اما به تدریج با توسعه انواع روش‌ها کاربرد این سیستم برای انواع مختلف سنگ توصیه شد. برای پژوهش‌های با تولید زیاد به دلیل سرعت چالزنی آن مورد تأیید قرار گرفت لازم به توضیح است که تا سال ۱۹۲۰ تقریباً ۹۰ درصد چال‌های عمیق به وسیله سیستم حفاری ضربه‌ای عمدتاً از نوع کابلی حفاری شده بودند اما در سال ۱۹۸۰ این روند عوض شده است و حدود ۹۰ درصد این‌گونه چال‌ها توسط سیستم حفاری چرخشی یا دورانی حفاری شده‌اند [۶۷].

۴-۵-۴- سیستم حفاری هیدرولیکی و پنوماتیکی

سیستم حفاری هیدرولیکی اولین بار در سال ۱۹۷۰ در معادن بالاکس در معادن زیرزمینی رایج شد. علت این امر کاهش مقدار صدا و مقدار گرد و خاک در منطقه استخراج است. چون در این نوع

سیستم علیرغم آنکه برای انتقال ذرات حفاری از هوا استفاده می‌شود اما انرژی آن توسط مایع عمدتاً روغن تحت فشار تأمین می‌شود. روغن هیدرولیکی با پمپ‌های پیستونی که توسط موتور دیزلی با برق رانده می‌شود پمپاژ می‌شود. ماشین حفاری هیدرولیکی از نظر اسکلت‌بندی شبیه ماشین حفاری پنوماتیکی است و علیرغم آنکه در ابتدا تصور بر آن بود که کاربرد این ماشین عمدتاً در معادن زیرزمینی و به‌طور کلی حفاریات زیرزمینی باشد اما به تدریج در معادن عملیات سطحی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در نوع سیستم‌های پنوماتیکی عمدتاً انرژی برای در آوردن و همچنین موتور دستگاه از هوای فشرده است [۶۷].

ماشین حفاری هیدرولیکی از نظر فناوری در مقیاس با ماشین حفاری پنوماتیکی اولویت دارد. دلایل این برتری عبارتند از:

❖ در ماشین‌های هیدرولیکی مصرف انرژی پایین‌تر است. انرژی که ماشین حفاری هیدرولیکی تولید می‌کند در مقیاس با ماشین حفاری پنوماتیکی بازدهی بیشتر و هزینه کمتر دارد. لذا از نظر عملکرد با انرژی مساوی، بازدهی ماشین‌های هیدرولیکی زیاده‌تر از ماشین‌های پنوماتیکی است.

❖ در ماشین‌های حفاری هیدرولیکی مصرف میله و هزینه تأمین آن کمتر است در ماشین‌های حفاری هیدرولیکی پیستون‌ها نسبت به پیستون‌های ماشین‌های حفاری پنوماتیکی قطر کمتر و طول بیشتری دارند. این امر باعث توزیع یکنواخت انرژی و افزایش طول عمر میله (راد) ماشین می‌شود.

❖ ماشین حفاری هیدرولیکی دارای سرعت حفاری بیشتری است.

❖ محیط کار ماشین‌های هیدرولیکی وضعیت مطلوب‌تری دارند.

❖ انعطاف‌پذیری در ماشین‌های هیدرولیکی زیاده‌تر است علیرغم مزیت‌های یاد شده ماشین‌های حفاری هیدرولیکی معایب و مشکلاتی نیز دارند که تعدادی از آن‌ها عبارت‌اند

از: قیمت اولیه ماشین بسیار بالا است. تعمیر و سرویس آن دشوار و هزینه آن بالا است؛ به‌طورکلی سرویس و نگهداری و تعمیر ماشین‌های حفاری هیدرولیکی نیاز به سازمان‌دهی خاص و آموزش دارد.

۴-۶- عملکرد دریل واگن‌ها در انواع خاک و سنگ

دریل واگن‌ها برای حفاری در هر نوع سنگی استفاده می‌شوند و از این لحاظ هیچ نوع محدودیتی در آن‌ها وجود ندارد. البته برای رسیدن به یک نرخ نفوذ بهینه باید بسته به نوع بستر سنگی محل حفاری نوع مته حفاری مناسب را انتخاب نمود، تا علاوه بر اقتصادی کردن حفاری، عمر مفید ماشین‌آلات نیز افزایش داده شود. استفاده از سرمته‌های ضعیف در نواحی دارای بسترهای سنگی با مقاومت بالا باعث کاهش عمر مفید سرمته‌ها خواهد شد. از این ماشین برای حفاری سنگ استفاده می‌شود، ولی با برقراری یک جریان هوا که در برخی از این مدل‌ها وجود دارد حفاری در بسترهای دارای خاک نیز انجام‌پذیر است.

در زمین‌های با شیب زیاد و مناطق سنگی بایستی از نوع چرخ زنجیری این ماشین استفاده نمود. در زمین‌های هموار یا در شرایطی که ماشین باید به دفعات جابجا شود می‌توان از انواع چرخ لاستیکی استفاده نمود. از آنجا که ترکیب‌های بسیار متفاوتی از قدرت ماشین، قطر چال، عمق چال، نوع بستر سنگی، غیره وجود دارد، نمی‌توان به صورت دقیق برای سنگ‌های مختلف میزان نفوذ را به صورت دقیق به دست آورد، این در حالی است که استفاده از تجربه‌های پیمانکاران پروژه‌های حفاری بهترین راهنما در این خصوص خواهد بود [۶۷].

۴-۷- معرفی سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم

در معدن بوکسیت جاجرم، حفاری چال‌های انفجاری و استخراجی توسط سیستم‌های دریل‌واگن انجام می‌شود. از سامانه حفاری معدن چهار زیرسیستم دریل‌واگن اطلس کوپکو هیدرولیک ۱۰،

زیرسیستم دریل واگن اطلس کوپکو هیدرولیک ۰۲، زیرسیستم دریل واگن اطلس کوپکو هیدرولیک ۰۳ و زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک مورد بررسی قرار گرفتند. این چهار زیرسیستم به صورت موازی در حال کار هستند. به دلیل اینکه تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری هیدرولیک می‌باشند، به معرفی اجزای سیستم‌های دریل واگن هیدرولیکی پرداخته شده است. در شکل (۳-۴) یک سیستم دریل واگن معدن بوکسیت جاجرم نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ سیستم دریل واگن هیدرولیکی معدن بوکسیت جاجرم

۴-۸- اجزای سیستم دریل واگن اطلس کوپکو هیدرولیک

اجزای سیستم دریل واگن کوپکو هیدرولیک در شکل (۴-۴) آورده شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۴ سیستم دریل واگن اطلس کوپکو هیدرولیک

این مدل مجهز به یک دکل تمام هیدرولیک است. توسط یک نفر اپراتور به راه انداخته می‌شود و در کارهای عمرانی و معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دکل دستگاه قابلیت چرخش تا ۸۲ درجه به پهلوها را دارد. اجزای اصلی این دستگاه عبارتند از:

- شاسی
- چرخ‌های زنجیری هیدرولیکی
- کمپرسور

قسمت نیروی محرکه سیستم که توسط موتور دیزل به حرکت در می‌آید نیروی مورد نیاز آن را تأمین می‌کند. فشار هوای داخل چال توسط کمپرسور نصب شده روی دستگاه تأمین می‌شود. این کمپرسور توسط موتور دیزلی به کار انداخته می‌شود. این دستگاه مجهز به یک نمایشگر اتوماتیک در برابر ذرات فلز و فولاد که سوراخ سر مته را مسدود کرده است، است. اگر سرعت چرخش بیش از میزان مورد نظر باشد فشار روی سر مته متوقف می‌شود همزمان فشار ضربه کاهش می‌یابد تا زمانی که چرخش نوک مته به طور طبیعی بچرخد کار حفاری ادامه پیدا می‌کند. به محض مسدود شدن سوراخ سر مته به طور طبیعی این سیکل ادامه پیدا می‌کند. مشخصات راد مورد استفاده این دستگاه، راد ۳۲

تا ۳۸ میلی‌متری به طول ۳۰۵۰ تا ۳۶۶۰ میلی‌متر و قطر سرمته ۴۸ تا ۷۶ میلی‌متر است [۶۷].

تجهیزاتی که بر روی سیستم نصب می‌شوند عبارت‌اند از:

- گردگیر
- پایه نگهدارنده هیدرولیک
- عمق سنج
- ابزار خودکار برای جلوگیری از مسدود شدن سوراخ سر مته
- تجهیزات ضد یخ
- پایه فولادی مته
- رادگیر هیدرولیکی
- پمپ گازوییل برقی
- بازوی چرخان برای لیورهای دستگاه
- موتورهای کشش دو سرعت
- وینچ
- سرویس وینچ چهار تسمه‌ای
- تانک هوا

۴-۹- تجهیزات اصلی کاربردی و مورد نیاز در حفاری با دریل

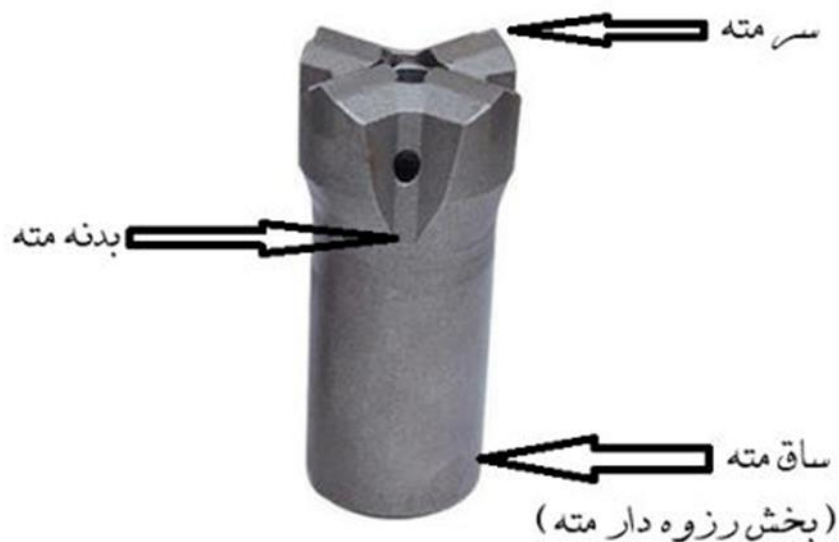
واگن‌ها

۴-۹-۱- مته

مته وسیله‌ای است در انتهای رشته حفاری به منظور کندن زمین بسته می‌شود. مته جزء اصلی

دستگاه حفاری محسوب می‌شود، زیرا تجهیزات اصلی برش و سایش سنگ‌ها و سازندهاست و بخش

فرسایش پذیر بوده و در مقایسه با سایر تجهیزات از عمر کمتری برخوردار است، زیرا بعد از مدتی کار کردن کند می شود و برای تعویض آن عملیات حفاری نیز متوقف می شود. مته حفاری اولین ابزاری است که برای حفر چال های حفاری و یا چال های نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرد. این وسیله در اثر چرخش رشته حفاری به حرکت در آمده و باعث سوراخ کردن زمین می شود. مته ها معمولاً از فولاد کربن دار با فولاد تندبر ساخته می شود. مته های ساخته شده از فولاد کربن دار برای کارهای تولیدی با سرعت بالا مناسب نیستند. تمام مته ها دارای سه بخش اصلی هستند. ساقه، بدنه و سر مته (نوک) که اندازه های آن ها بسیار گوناگون است [۶۷]. در شکل (۴-۵) قسمت های مختلف مته ها را نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ قسمت های مختلف مته ها

نوع مته ای که باید برای عملیات حفاری انتخاب شود در درجه اول به نوع سنگی بستگی دارد که باید حفاری شود. علاوه بر شاخص ذکر شده عامل اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. به طور کلی شیل های نرم، سنگ های جوان رسوبی توسط سیستم های حفاری که مجهز به مته های تیغه ای باشند بازدهی مناسبی دارند و متدهایی دندانه دار مناسب ترین مته برای شیل های سخت ماسه سنگ و آهک هستند و به دلیل سختی الماس نسبت به کانی ها و سنگ های معمولی از نظر اقتصادی از آن برای

شرایط بسیار سخت استفاده می‌شود (شکل ۴-۶) انواع مته‌ها عبارت‌اند از:

- مته‌های تیغه‌ای
- مته‌های چرخشی مخروطی یا غلطکی
- مته‌های الماسی



شکل ۴-۶ انواع مته‌های حفاری

۴-۹-۲- راد

میله‌ای فولادی که در ابعاد استاندارد برای انتقال انرژی چرخشی و ضربه‌ای موتور ضربه زن (چکش حفاری) به مته حفاری ساخته می‌شوند. رادها در اندازه‌های مختلف از یک متر الی ۵ متر است (شکل ۴-۷). انواع مختلفی دارند که عبارت‌اند از:

- راد چکش بالای چال
- راد چکش در داخل چال
- رادهای خود حفار (مته سر خود)
- رادهای اکتشافی یا مغزه‌گیری



شکل ۴-۷ انواع مختلف رادهای سیستم دریل واگن

۴-۹-۳- شانگ

قطعه‌ای فولادی با مقاومت بالا از جنس فولاد با کربور تنگستن که از یک سر به داخل چکش ضربه زن دستگاه متصل است و از سمت دیگر به وسیله کوپلینگ به راد وصل می‌شود. شانگ‌ها ممکن است در یک سمت دارای رزوه‌هایی به صورت نری رزوه دار و از سمت دیگر دارای مادگی که در داخلش رزوه داشته باشد و یا از یک سو نری رزوه دار و سوی دیگر به صورت گیردار در داخل چکش واقع شود و یا از دو سر دارای نری خاردار باشد (شکل ۴-۸). در برخی موارد که دارای دو سر نری است خارهایی بر روی نری قرار گرفته که به اشکال چهارپر، شش پر، هشت پر، ساخته شده است [۶۷].



شکل ۴-۸ انواع شانگ‌های سیستم دریل واگن

۴-۹-۴- کوپلینگ

لوله‌ای است تو خالی از جنس فولاد کربور تنگستن که از دو سمت به صورت مادگی و در داخل رزوه‌دار است که از یک سمت بخش نری شانگ و از سمت دیگر بخش نری راد در آن قرار می‌گیرد. مقاومت فشاری، کششی و چرخشی کوپلینگ‌ها باید بالا باشد. لازم به یادآوری است که یک کوپلینگ از یک سمت ممکن است دارای رزوه‌های R و از سمت دیگر دارای رزوه‌های T باشد و یا از هر دو طرف دارای یک نوع رزوه R و یا از هر دو طرف دارای رزوه T باشد (شکل ۴-۹). این مسئله به نوع رزوه‌های روی شانگ و راد مرتبط می‌شود [۶۷].



شکل ۴-۹ کوپلینگ یا واسطه

۴-۱۰- داده‌های خرابی سیستم‌های دریل واگن معدن بوکسیت

جاجرم

داده خرابی مهم‌ترین ابزار در تحلیل تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری هستند. در این تحقیق، برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به خرابی هریک از سیستم‌ها، گزارش روزانه با متن اطلاعات مورد نیاز از جمله : تاریخ و زمان خرابی، مدت‌زمان فعالی سیستم، مدت‌زمان خرابی و تعمیر سیستم، مدت‌زمان سرویس سیستم و ... بررسی شد. داده‌های مربوطه را به مدت دو سال از گزارش روزانه معدن استخراج شد و سپس با بررسی و جداسازی اطلاعات هر یک از سیستم‌های حفاری و تفکیک

داده‌های خرابی مربوط به هر یک از سیستم‌های حفاری در نظر گرفته شد و به ترتیب وقوع زمانی طبقه‌بندی شده‌اند. با معلوم شدن داده‌های هر سیستم، زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان تعمیرات (TTR) محاسبه شده است. داده‌های خرابی هر کدام از زیرسیستم‌ها در پیوست آورده شده است.

۴-۱۱- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی مطالعه موردی، موقعیت جغرافیایی و اطلاعات زمین‌شناسی معدن پرداخته شد. سپس به معرفی سامانه حفاری و انواع سیستم حفاری موجود در معادن روباز مورد بحث قرار گرفت. برای آشنایی با اجزای سیستم‌های حفاری که در بررسی قابلیت اطمینان و خرابی سیستم‌ها و شرایط تعمیرپذیری و تاب‌آوری آن‌ها مؤثر هستند، تشریح شد.

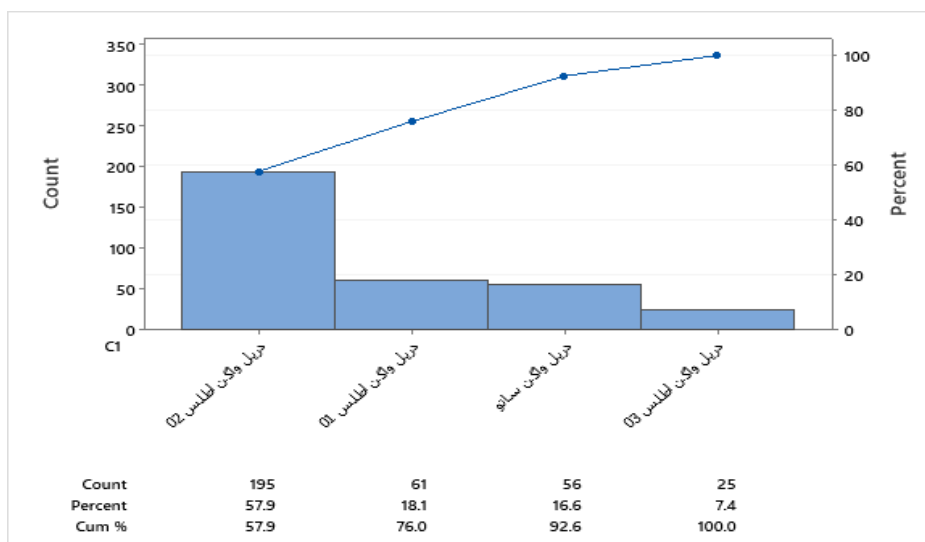
فصل پنجم: تجزیہ و تحلیل داده‌ها

۵-۱- مقدمه

در این فصل به تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیر پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم پرداخته شده است. در ابتدا قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری سیستم‌ها تعیین و مدل‌سازی و سپس با استفاده از دو روش به ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری را برای هر یک از سیستم‌ها پرداخته شده است.

۵-۲- تحلیل پارتو

برای تعیین میزان نسبی خرابی‌ها یا تعمیرات زیرسیستم‌های یک دستگاه از نمودار تحلیل پارتو استفاده می‌شود. برای این منظور، درصد خرابی یا تعمیر هر زیرسیستم نسبت به کل خرابی‌ها یا تعمیرات محاسبه می‌شود و نمودار ستونی فراوانی خرابی یا تعمیر هر کدام از زیرسیستم‌ها ترسیم می‌شود و زیرسیستم‌های بحرانی از لحاظ فراوانی خرابی‌ها و تعمیرات مشخص می‌شود تا برای بهبود قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی مناسب تعمیر و نگهداری آن‌ها تمهیدات لازم صورت گیرد. با توجه به شکل (۵-۱) تحلیل پارتو نشان می‌دهد، که زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲ بیشترین تعداد خرابی و تعمیر و بیشترین درصد خرابی دارا است، بنابراین زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲ بحرانی‌ترین زیرسیستم سامانه حفاری است و همچنین زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ کمترین تعداد خرابی و درصد خرابی را برخوردار است.



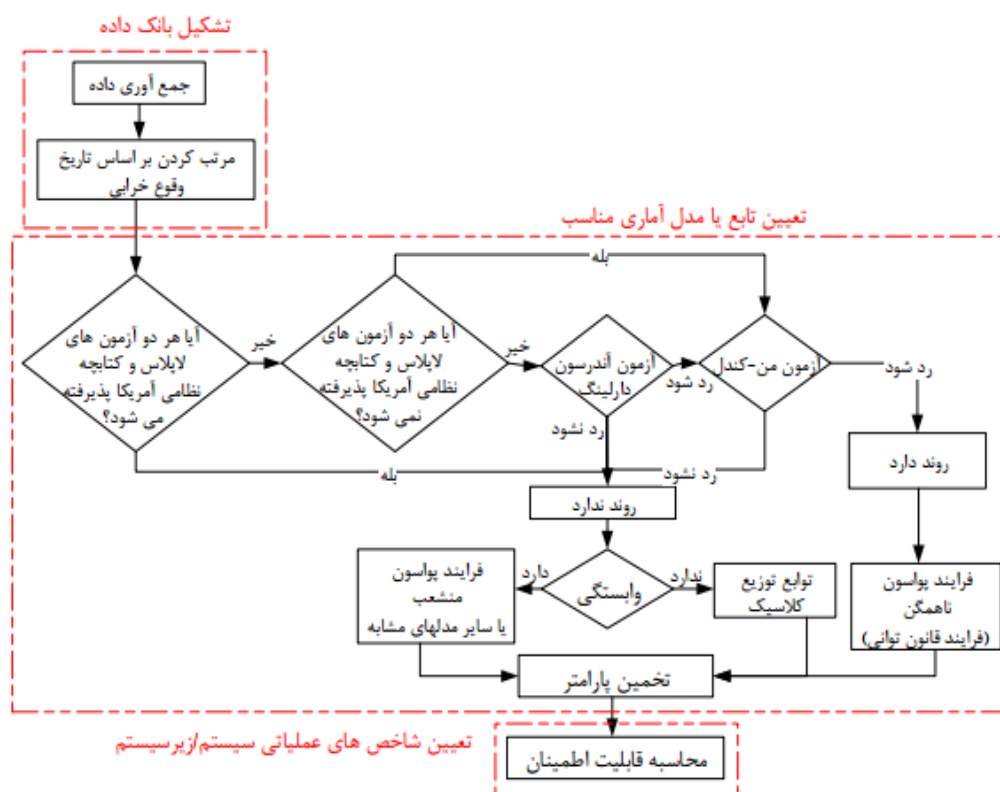
شکل ۵-۱ تحلیل پارتو زیرسیستم‌های سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم

۵-۳- روند کلی تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

در این پژوهش برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری از روش تحلیل آماری و همچنین از نرم‌افزار minitab19 استفاده شده است. minitab یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری و مناسب برای پروژه‌های شش سیگما و بهبود کیفیت است. این نرم‌افزار به عنوان یکی از نرم‌افزارهای تخصصی آمار برای کنترل کیفیت، کار بر روی اعداد و تجزیه و تحلیل داده‌های خام شناخته شده است و در بسیاری از واحدهای صنعتی بزرگ و کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و به وسیله آن می‌توان با تجزیه و تحلیل داده‌های آماری به طراحی آزمایش پرداخت. همچنین انجام برخی عملیات‌ها مانند تولید اعداد تصادفی که از توزیع‌های آماری خاصی مانند توزیع نرمال، کی دو، گاما، برنولی، پواسون، بتا، ویبول و ... پیروی می‌کنند، پرداخت.

برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری از روندنمای ارائه شده در شکل (۵-۲) استفاده شده است. اولین مرحله در این فرآیند جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی زیرسیستم‌ها است که در این بخش، خرابی هر زیرسیستم به ترتیب وقوع و زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان تعمیر هر یک از خرابی‌ها (TTR) محاسبه شده است. پس از دستیابی به داده‌های TBF زیرسیستم‌ها، این داده‌ها از نظر

روند و همبستگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. آزمون‌های روند و همبستگی سری به صورت گرافیکی، بر روی داده‌ها انجام می‌شوند و با توجه به نتایج حاصل شده، نوع داده‌ها و بهترین روش مدل‌سازی قابلیت اطمینان تعیین می‌شود. در این پژوهش از آزمون روند کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون-دالینگ و من-کندال استفاده شده است. داده‌های که دارای روند، از مدل‌سازی تصادفی فرآیند پواسون ناهمگن و در صورت عدم وجود روند و همبستگی در داده‌ها، فرآیند تجدیدشونده برای یافتن بهترین توابع توزیع چگالی احتمال خرابی، احتمال تعمیر و احتمال تحویل به کار گرفته شده است. برای بهترین تابع برازش در نرم‌افزار minitab19، از آزمون اندرسون - دارلینگ که اصلی و پرکاربردترین روش برای تطابق تابع برازش است، استفاده شده است.



شکل ۵-۲ روند نمای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری با داده‌های زمانی [۶۳، ۶۴]

۵-۴- تحلیل قابلیت اطمینان سامانه حفاری معدن بوکسیت

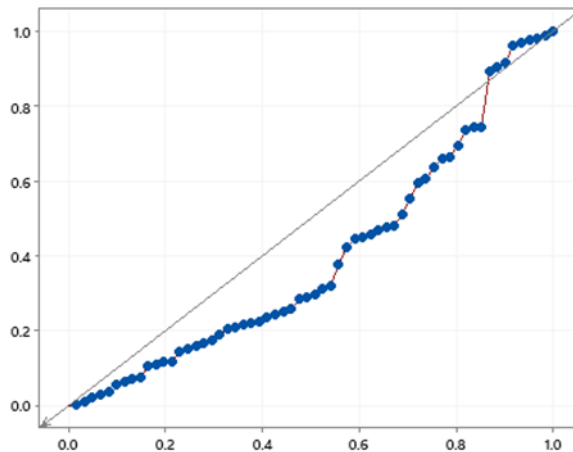
جایز

بعد از محاسبه TBF زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱، آزمون روند را برای داده‌ها انجام می‌دهیم. روش‌های مختلفی برای آزمون روند در داده‌ها وجود دارد که این روش‌ها در دو دسته‌ی نموداری و تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش نموداری زمان تجمعی در مقابل خرابی تجمعی رسم می‌شود. خط راست نشان‌دهنده‌ی عدم وجود روند و محدب یا مقعر بودن به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کاهش و افزایش نرخ خرابی است. این روش قابل اعتماد نبوده و فقط دید کلی از روند ارائه می‌دهد. در روش‌های تحلیلی برای آزمون روند، فرض صفر عدم وجود روند و فرض متقابل وجود روند در داده‌ها است. این روش‌ها شامل کتابچه نظامی آمریکا، آزمون لاپلاس، آندرسون-دارلینگ و من-کندال می‌باشند.

نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ در جدول (۵-۱) و شکل (۵-۳) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار p-value برای آزمون‌های کتابچه نظامی و لاپلاس کمتر از سطح معناداری (۰/۰۵) است لذا فرض صفر رد شده و باید آزمون من کندال برای بررسی وجود روند در داده‌ها انجام شود. مقدار p-value برای آزمون من کندال در حالت افزایشی ۰/۰۳۰۴ و در حالت کاهش ۰/۹۶۹ است و چون مقدار p-value افزایشی کمتر از سطح معناداری (۰/۰۵) است لذا این آزمون وجود روند در داده‌ها را تأیید می‌کند. به صورت گرافیکی هم نیز به وجود روند در داده‌ها را نشان داده شده است.

جدول ۵-۱ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱

آزمون	کتابچه نظامی	لاپلاس	آندرسون دارلینگ	من کندال افزایشی	من کندال کاهش
مقدار	۱۶۳/۸۷	-۲/۸۱	۴/۷۹	۱/۸۷۴	۱/۸۷۴
p-value	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰۴	۰/۹۶۹



شکل ۳-۵ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ به صورت گرافیکی

با توجه به وجود روند در داده‌ها، از فرآیند پواسون ناهمگن برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم اطلس ۰۱ استفاده می‌شود. پارامترهای تابع توزیع PLP (ویبول دو پارامتری) برای داده‌های خرابی زیرسیستم اطلس ۰۱ در جدول (۲-۵) آورده شده است.

جدول ۲-۵ پارامترهای توزیع PLP برای زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱

پارامتر	مقدار	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا
Shape	۰/۷۴۴	۰/۰۹۵	۰/۵۸۰	۰/۹۵۴
Scale	۴/۸۳۷	۳/۵۰۰	۱/۱۷۱	۱۹/۹۷۳

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ به ترتیب از روابط (۱-۵) و (۲-۵) محاسبه می‌شود. در جدول (۳-۵) مقدار قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای ۵۰ ساعت آورده شده است.

$$R_1(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] = \exp\left[-\left(\frac{t}{4.837}\right)^{0.744}\right] \quad (1-5)$$

$$\lambda_1(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{0.744}{101.368^{0.744}} (t)^{0.744} \quad (2-5)$$

جدول ۳-۵ مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ برای ۵۰ ساعت

زمان	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
قابلیت اطمینان	۰/۷۳۳	۰/۳۵۸	۰/۱۷۹	۰/۰۹۸	۰/۰۵۶	۰/۰۳۳	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳
نرخ خرابی	۰/۲۳۰	۰/۱۵۲	۰/۱۲۷	۰/۱۱۵	۰/۱۰۶	۰/۱۰۱	۰/۰۹۶	۰/۰۹۲	۰/۰۸۹	۰/۰۸۶	۰/۰۸۴

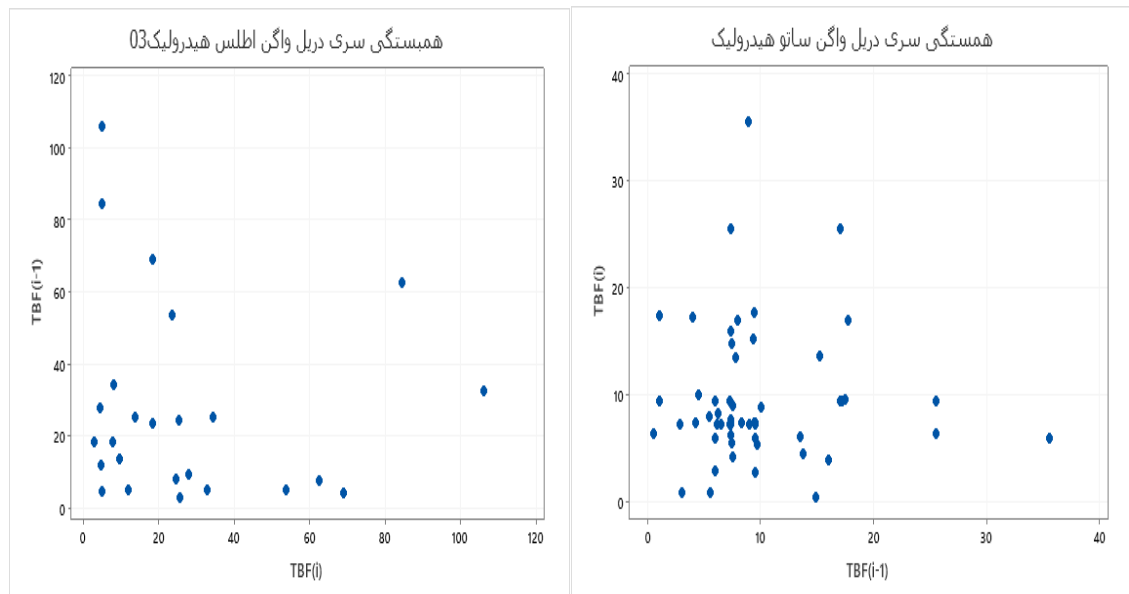
به همین ترتیب برای زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس ۰۲، دریل واگن اطلس ۰۳ و دریل واگن ساتو نیز همانند آنچه برای زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ بیان شد، آزمون‌ها روند و همبستگی بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس ۰۲، دریل واگن اطلس ۰۳ و دریل واگن ساتو نیز انجام گرفت و بعد از تعیین تابع مناسب و تخمین پارامترها، مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای زیرسیستم‌ها محاسبه شد. در جدول (۴-۵) آزمون روند هر کدام زیرسیستم‌ها آورده شده است همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های دریل واگن اطلس ۰۲ دارای روند می‌باشند ولی دریل واگن اطلس ۰۳ و دریل واگن ساتو دارای روند نیستند.

جدول ۴-۵ نتایج آزمون روند تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری

زیرسیستم	آزمون روند	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من کندال افزایشی	من کندال کاهشی	روند
دریل واگن اطلس ۰۱	مقدار	۱۶۳/۸۷	-۲/۸۱	۴/۷۹	۱/۸۷۴	۱/۸۷۴	روند دارد
	p-value	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰۴	۰/۹۶۹	
دریل واگن اطلس ۰۲	مقدار	۵۹۵/۱۷	-۸/۶۸	۳۸/۹۷	۴/۱۵۹	۴/۱۵۹	روند دارد
	p-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰	
دریل واگن اطلس ۰۳	مقدار	۳۲/۸۵	۱/۲۰	۱/۴۱	*	*	روند ندارد
	p-value	۰/۰۹۴	۰/۲۳۰	۰/۲۰۱	*	*	
دریل واگن ساتو	مقدار	۱۱۳/۵۹	-۰/۶۱	۰/۳۷	*	*	روند ندارد
	p-value	۰/۷۷۶	۰/۵۴۱	۰/۸۸۲	*	*	

با توجه عدم روند در داده‌های خرابی زیر سیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل واگن ساتو هیدرولیک، آزمون همبستگی سری را برای دریل واگن ساتو انجام می‌شود و که نتایج

آزمون همبستگی سری این زیرسیستم‌ها در شکل (۵-۴) نشان داده شده است. همان طور در شکل مشاهده می‌شود نقاط پراکنده می‌باشند که نشان دهنده این است داده‌ها همبستگی ندارند. در صورتی که در داده‌ها روند و همبستگی وجود نداشت، بهترین تابع توزیع برازش شده بر داده‌ها تابعی است که مقدار اندرسون – دارلینگ آن کوچکتر باشد.



شکل ۵-۴ نتایج آزمون همبستگی سری زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس ۰۳ و ساتو

تابع توزیع برازش شده بر داده‌های خرابی هر کدام از زیرسیستم‌ها و مقدار پارامترهای هر تابع نیز در جدول (۵-۵) آورده شده است.

جدول ۵-۵ توابع برازش شده و پارامترهای هر یک از آن‌ها برای تمامی زیرسیستم‌ها

دریل واگن ساتو	دریل واگن اطلس ۰۳	دریل واگن اطلس ۰۲	دریل واگن اطلس ۰۱	زیرسیستم
Log logistic-3P	Weibull-3P	Weibull-2P	PLP	تابع برازش شده
$\mu = 2/402$ $\sigma = 0/248$ $\lambda = -2/784$	$\alpha = 23/982$ $\beta = 0/908$ $\lambda = 2/272$	$\alpha = 1/105$ $\beta = 0/655$	$\alpha = 4/837$ $\beta = 0/774$	پارامتر

قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲،

دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل واگن ساتو به ترتیب با روابط (۵-۳)، (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶)

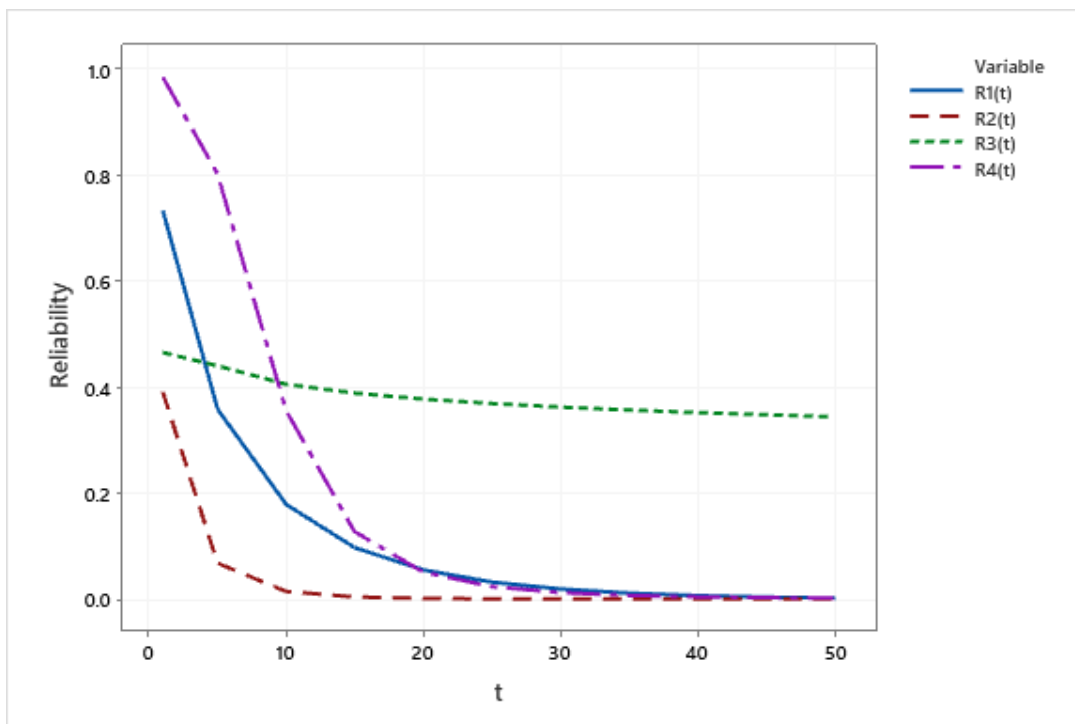
محاسبه می‌شوند. منحنی زیرسیستم‌های سامانه حفاری در شکل (۵-۵) آورده شده است.

$$R_1(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] = \exp[-(\frac{t}{4.837})^{0.744}] \quad (۳-۵)$$

$$R_2(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] = \exp[-(\frac{t}{1.105})^{0.655}] \quad (۴-۵)$$

$$R_3(t) = 1 - \exp[-(\frac{t - \lambda}{\alpha})^\beta] = 1 - \exp[-(\frac{t - 2.272}{23.982})^{0.908}] \quad (۵-۵)$$

$$R_4(t) = 1 - \frac{1}{\left[1 + \exp[-\frac{\ln(t - \lambda) - \mu}{\sigma}]\right]} = 1 - \frac{1}{\left[1 + \exp[-\frac{\ln(t + 2.784) - 2.402}{0.248}]\right]} \quad (۶-۵)$$



شکل ۵-۵ منحنی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های سامانه حفاری

با توجه به شکل (۵-۴)، در ابتدای شروع کار زیرسیستم دریل واگن ساتو ($R_4(t)$) بیشترین قابلیت اطمینان را نسبت به دیگر زیرسیستم‌ها دارد و قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار سیستم حدود ۹۸ درصد است و با شیبی تند کاهش می‌یابد و بعد از گذشت ۱۰ ساعت، قابلیت اطمینان حدود ۴۰ درصد می‌رسد و قابلیت اطمینان این زیرسیستم با گذشت ۵۰ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. زیرسیستم دریل واگن هیدرولیک ۰۲ ($R_2(t)$) کمترین قابلیت اطمینان را داراست و قابلیت اطمینان این زیرسیستم در ابتدای شروع کار زیرسیستم حدود ۳۹ درصد است و با گذشت ۲۰ ساعت قابلیت اطمینان تقریباً به صفر می‌رسد. بنابراین برای جلوگیری از کار افتادن این زیرسیستم، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد. زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ ($R_1(t)$) با قابلیت اطمینان حدود ۷۳ درصد شروع به کار کرد و با گذشت ۴۰ ساعت، قابلیت اطمینان این زیرسیستم تقریباً به صفر می‌رسد. زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ ($R_3(t)$) با قابلیت اطمینان حدود ۴۶ درصد در ابتدای عملکرد سیستم است و با گذشت زمان، شیب بسیار ملایمی کاهش می‌یابد. به همین دلیل بعد از گذشت ۵۰ ساعت از عملکرد زیرسیستم قابلیت اطمینان زیرسیستم به حدود ۳۴ درصد می‌رسد.

۵-۴-۱- نرخ خرابی

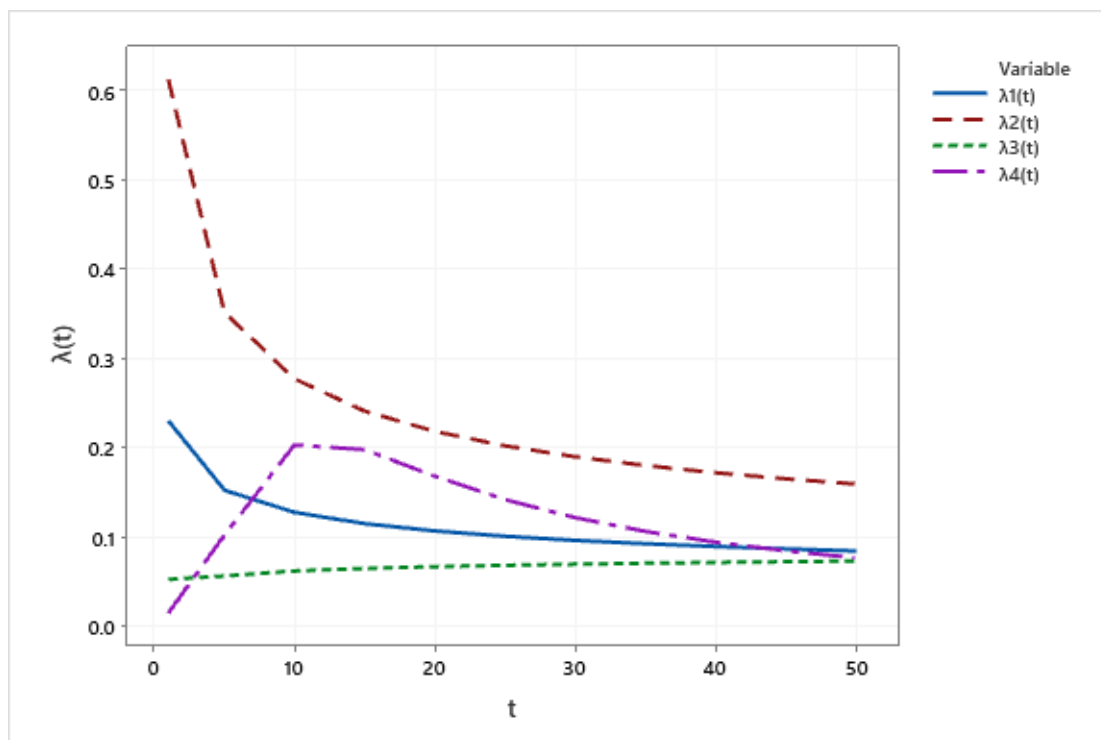
نرخ خرابی زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ و دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل واگن ساتو به ترتیب با روابط (۵-۷)، (۵-۸)، (۵-۹) و (۵-۱۰) محاسبه می‌شوند. منحنی نرخ خرابی زیرسیستم‌های سامانه حفاری را در شکل (۵-۵) آورده شده است.

$$\lambda_1(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{0.744}{101.368^{0.744}} (t)^{0.744-1} \quad (۵-۷)$$

$$\lambda_2(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{0.655}{1.105^{0.655}} (t)^{0.655-1} \quad (8-5)$$

$$\lambda_3(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t - \lambda)^{\beta-1} = \frac{0.908}{23.982^{0.908}} (t - 2.272)^{0.908-1} \quad (9-5)$$

$$\lambda_4(t) = \frac{\frac{\exp\left[\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right]}{\sigma(t-\lambda)\left[1+\exp\left[\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right]\right]^2}}{R_4(t)} = \frac{\frac{\exp\left[\frac{\ln(t+2.784)-2.402}{0.248}\right]}{0.248(t+2.784)\left[1+\exp\left[\frac{\ln(t+2.784)-2.402}{0.248}\right]\right]^2}}{R_4(t)} \quad (10-5)$$



شکل ۵-۶ منحنی‌های نرخ خرابی زیرسیستم‌ها

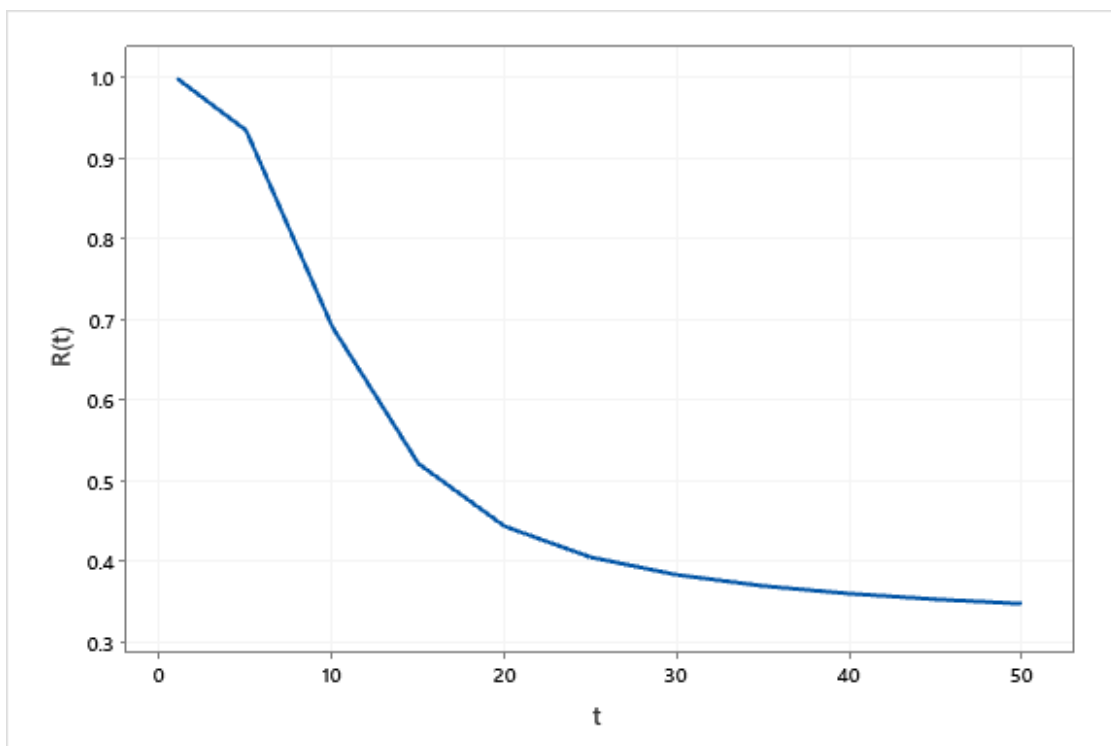
با توجه به شکل (۵-۶)، منحنی‌های نرخ خرابی زیرسیستم‌ها نشان می‌دهد که زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک $\lambda_2(t)$ دارای رفتار خرابی روبه بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار با بیشترین میزان خرابی حدود ۰/۶ خرابی در ساعت بوده و پس از گذشت ۲۵ ساعت، میزان خرابی به حدود ۰/۲ در ساعت می‌رسد و همچنین با یک روند ملایم‌تر کاهش

می‌یابد. نرخ خرابی زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ ($\lambda_1(t)$) نزولی است و در ساعات اولیه کار میزان خرابی حدود ۰/۲۳ در ساعت بوده و با گذشت ۲۵ ساعت، میزان خرابی به ۰/۱ در ساعت می‌رسد. نرخ خرابی با روند ملایمی کاهش یافته و در زمان ۵۰ ساعت به مقدار ۰/۰۸ می‌رسد. نرخ خرابی زیرسیستم دریل‌واگن ساتو ($\lambda_4(t)$) در لحظه شروع به کار زیرسیستم برابر با ۰/۰۱ خرابی در ساعت بوده پس از گذشت ۱۰ ساعت از فعالیت آن، نرخ خرابی افزایش یافته و به مقدار ۰/۲ خرابی در ساعت می‌رسد. پس از این زمان، نرخ خرابی کاهش یافته و در زمان ۳۵ ساعت، به ۰/۱۰۵ خرابی در ساعت می‌رسد. بنابراین نرخ خرابی این زیرسیستم در زمان شروع کار صعودی بوده و بعد از ۱۰ ساعت، زیرسیستم روبه بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی برای زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ ($\lambda_3(t)$) تقریباً ثابت بوده و در ساعات اولیه کار زیرسیستم، به میزان ۰/۰۵۲ خرابی در ساعت است و با گذشت ۵۰ ساعت از کار زیرسیستم به مقدار ۰/۰۷۲ خرابی در ساعت می‌رسد که نشان می‌دهد نرخ خرابی این زیرسیستم با شیب بسیار ملایمی روبه افزایش است.

۵-۴-۲- قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری

قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل‌واگن ساتو تحلیل و مدل‌سازی شد. در این بخش قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم، مدل‌سازی و ارائه شده است. با توجه به اینکه عملکرد دریل‌واگن‌های معدن، مستلزم عملکرد تنها یکی از زیرسیستم‌ها بوده و در صورت توقف هر یک از این چهار زیرسیستم، سامانه حفاری به طور کامل متوقف نمی‌شود، بنابراین ارتباط بین هر یک از دریل‌واگن‌ها به صورت موازی بوده و قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری معدن از رابطه‌ی (۵-۱۱) قابل محاسبه است. منحنی قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری را در شکل (۵-۷) آورده شده است.

$$R_{system} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (5-11)$$



شکل ۵-۷ قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری

با توجه به شکل (۵-۷)، منحنی قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری معدن نشان می‌دهد در ساعات شروع به کار زیرسیستم‌ها، حدود ۹۹ درصد است و به دلیل قابلیت اطمینان پایین دریل‌واگن هیدرولیک اطلس ۰۱ و دریل واگن هیدرولیک اطلس ۰۳، با گذشت ۱۰ ساعت قابلیت اطمینان سامانه حدود ۶۹ درصد می‌رسد. قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس ۰۱، دریل واگن اطلس ۰۲ و دریل واگن ساتو به ترتیب در زمان‌های ۴۰، ۲۰ و ۵۰ ساعت پس از شروع به فعالیت آن‌ها به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر پس از گذشت ۴۰ ساعت از شروع به کار زیرسیستم‌ها، زیرسیستم‌های دریل‌واگن اطلس ۰۲ و دریل‌واگن ساتو از فعالیت بازمانده و از این زمان به بعد، زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ و دریل‌واگن اطلس ۰۳ فعال هستند و قابلیت اطمینان سامانه حفاری در این لحظه حدود ۳۶ درصد است. و با گذشت ۵۰ ساعت کل سامانه حفاری حدود ۳۵ درصد

۵-۵- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری سامانه حفاری

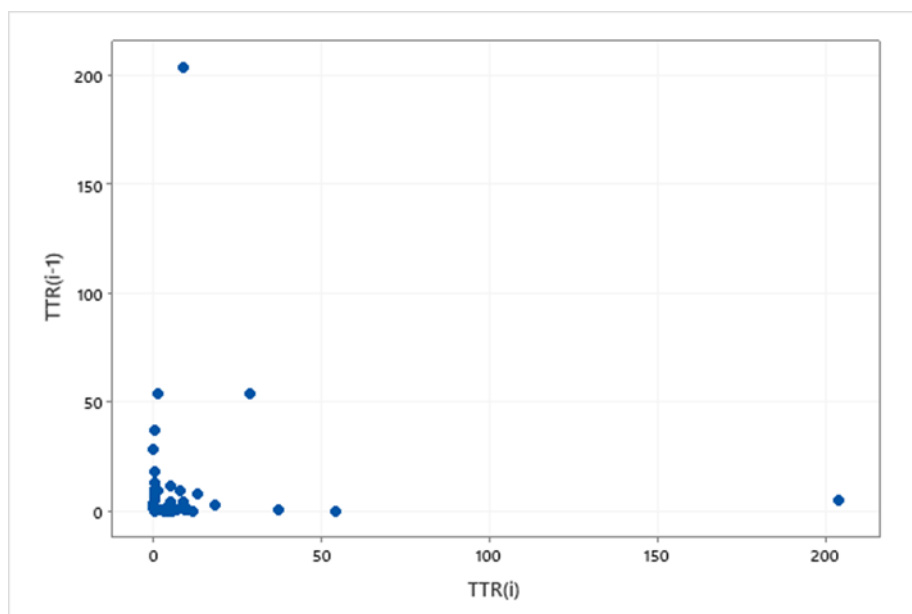
فرآیند مدل‌سازی و تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نیز همانند بحث قابلیت اطمینان است با این تفاوت که در این بخش به جای داده‌های خرابی (TBF) از داده‌های تعمیر (TTR) استفاده می‌شود. بنابراین بعد از تهیه پایگاه داده و طبقه‌بندی داده‌های تعمیر هر زیرسیستم‌ها، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های سامانه حفاری، انجام آزمون روند است. به دلیل حجم بالای تحلیل‌ها و همچنین تکراری بودن روند آن‌ها، برای بررسی قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌های سامانه حفاری فعال در عملیات استخراج در معدن جاجرم، از ذکر همه این اطلاعات و تحلیل‌ها در این پژوهش اجتناب شده و روند تحلیل قابلیت نگهداری فقط برای زیرسیستم دریل‌واگن ساتو به عنوان یک نمونه از این تحلیل‌ها در جدول (۵-۶) آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که مقدار p-value برای آزمون‌های کتابچه نظامی و لاپلاس کم‌تر از سطح معناداری (۰/۰۵) است لذا فرض صفر رد شده و باید آزمون من کندال برای بررسی وجود روند در داده‌ها انجام شود. مقدار p-value برای آزمون من- کندال در حالت افزایشی ۰/۱۷۳ و در حالت کاهش ۰/۸۲۶ است و چون مقدار p-value من- کندال افزایشی و کاهش از سطح معناداری (۰/۰۵) بیشتر می‌باشند پس فرض صفر (عدم وجود روند) پذیرفته می‌شود. لذا داده‌های زیرسیستم دریل‌واگن ساتو روند ندارند.

جدول ۵-۶ نتایج آزمون روند زیرسیستم دریل‌واگن ساتو هیدرولیک

آزمون	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من کندال افزایشی	من کندال کاهش
مقدار	۱۵۸/۹۰	۴/۷۶ -	۱۳/۱۳	۰/۹۴۰	۰/۹۴۰
p-value	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۷۳	۰/۸۲۶

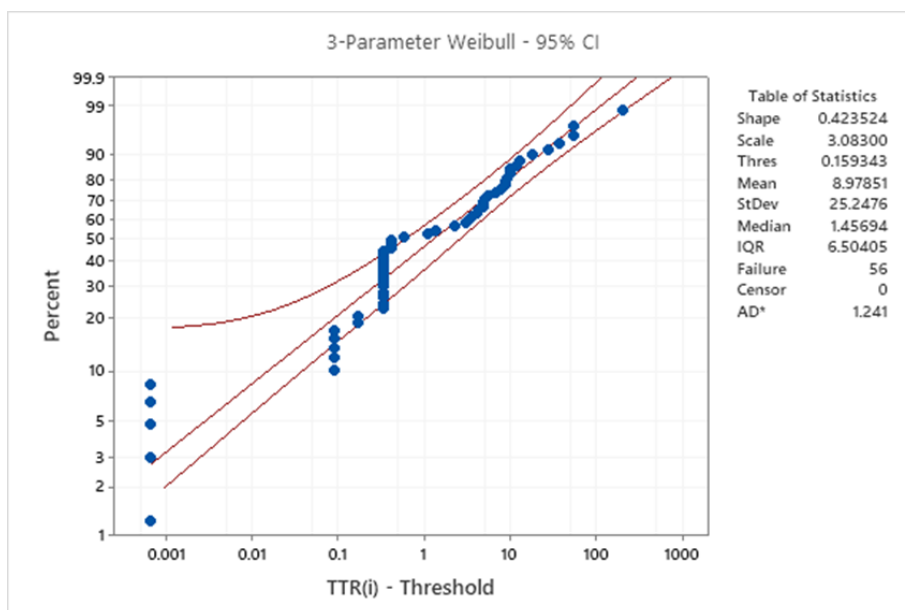
با مشخص شدن عدم وجود روند در داده‌ها، آزمون همبستگی سری بر روی داده‌ها انجام می‌شود. در این آزمون i امین داده TTR بر حسب $i-1$ امین داده TTR در یک فضای دو بعدی مطابق شکل (۸-۵) رسم می‌شود. همان‌طور در شکل زیر مشاهده می‌شود نقاط پراکنده هستند که نشان‌دهنده این است که داده‌ها همبستگی ندارند.



شکل ۸-۵ نتایج آزمون همبستگی سری زیرسیستم دریل‌واگن ساتو

در صورتی که داده‌ها روند و همبستگی نداشته باشند، از فرآیند تجدیدشونده استفاده می‌شود. در صورتی که در داده‌ها روند و همبستگی وجود نداشت، بهترین تابع توزیع برازش شده بر داده‌ها تابعی است که مقدار اندرسون - دارلینگ آن کوچکتر باشد.

نتایج این فرآیند در شکل (۹-۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع توزیع ویبول سه پارامتری دارای کمترین مقدار اندرسون دارلینگ برابر با $1/241$ در میان دیگر توابع توزیع است. بنابراین بهترین تابع برازش شده برای داده‌ها تابع توزیع ویبول سه پارامتری است.



شکل ۵-۹ تابع برازش شده برای زیرسیستم دریل واگن ساتو (ویبول سه پارامتری)

پارامترهای تابع توزیع ویبول سه پارامتری در جدول (۵-۷) آورده شده است.

جدول ۵-۷ پارامترهای تابع برازش شده ویبول سه پارامتری برای زیرسیستم دریل واگن ساتو

پارامتر	مقدار	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا
Shape	۰/۴۲۳	۰/۰۴۳	۰/۳۴۶	۰/۵۱۷
Scale	۳/۰۸۳	۱/۰۲۵	۰/۶۰۶	۵/۹۱۶
Threshold	۰/۱۵۹	۰/۰۰	۰/۱۵۹	۰/۱۵۹

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال تعمیر داده‌ها، مدل قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر زیرسیستم دریل واگن ساتو به ترتیب از رابطه‌های (۵-۱۲) و (۵-۱۳) محاسبه شده است. در جدول (۵-۸) مقادیر قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر برای ۵۰ ساعت آورده شده است.

$$M_3(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\lambda}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-0.159}{3.083}\right)^{0.423}\right] \quad (۵-۱۲)$$

$$\mu_4(t) = \frac{\frac{\beta}{\alpha^\beta} (t-\lambda)^{\beta-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t-\lambda}{\alpha}\right)^\beta\right]}{M_4(t)} = \frac{\frac{0.423}{3.083^{0.423}} (t-0.159)^{0.423-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t-0.159}{3.083}\right)^{0.423}\right]}{M_4(t)} \quad (۵-۱۳)$$

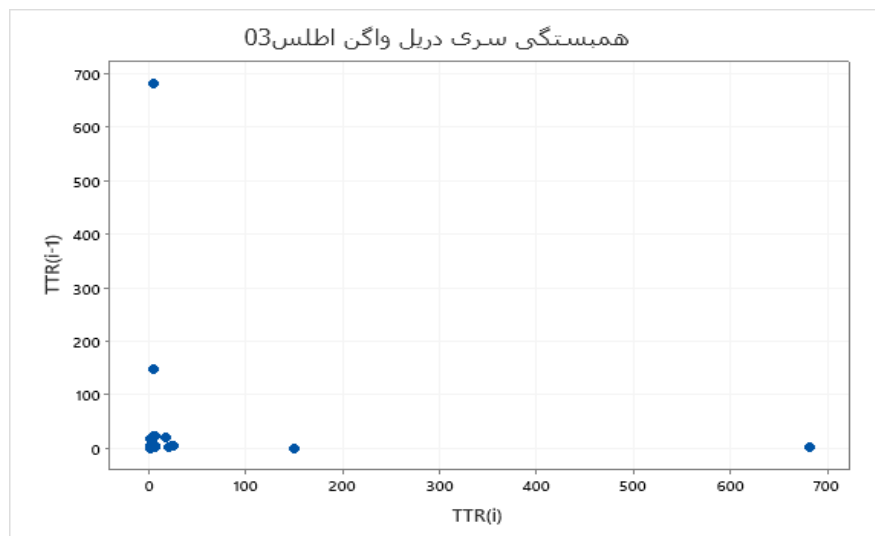
جدول ۵-۸ مقادیر قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر زیرسیستم دریل واگن ساتو برای ۵۰ ساعت

زمان	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
تعمیرپذیری	۰/۴۳۸	۰/۷۰۱	۰/۸۰۴	۰/۸۵۶	۰/۸۸۸	۰/۹۱۰	۰/۹۲۶	۰/۹۳۸	۰/۹۴۷	۰/۹۵۵	۰/۹۶۱
نرخ تعمیر	۰/۳۷۱	۰/۰۴۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱

به همین ترتیب برای زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ و دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ نیز همانند آنچه برای زیرسیستم دریل واگن ساتو بیان شد، آزمون‌های روند بر روی داده‌های خرابی زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ و دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ نیز انجام گرفت. در جدول (۵-۹) آزمون روند هر کدام زیرسیستم‌ها را آورده شده است. با توجه به عدم روند در داده‌های خرابی زیرسیستم اطلس هیدرولیک ۰۳، آزمون همبستگی سری بر روی این زیرسیستم انجام شده که نتایج آزمون همبستگی زیرسیستم اطلس هیدرولیک ۰۳ در شکل (۵-۱۰) آورده شده است. بعد از تعیین تابع مناسب و تخمین پارامترها، مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای زیرسیستم‌ها محاسبه شده است.

جدول ۵-۹ نتایج آزمون روند تمامی زیرسیستم‌های سامانه حفاری برای داده‌های TTR

زیرسیستم	آزمون روند	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من کنдал افزایشی	من کنдал کاهشی	روند
دریل واگن اطلس ۰۱	مقدار	۲۲۷/۸۵	-۷/۴۵	۳۳/۰۵	۲/۴۷۶	۲/۴۷۶	روند دارد
	p-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۶	۰/۹۹۳	
دریل واگن اطلس ۰۲	مقدار	۷۸۸/۹۶	-۱۰/۲۷	۶۹/۰۱	۹/۳۰۷	۹/۳۰۷	روند دارد
	p-value	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱	
دریل واگن اطلس ۰۳	مقدار	۴۳/۵۰	۱/۹۴	۸/۰۶	*	*	روند ندارد
	p-value	۰/۶۸۵	۰/۰۵۲	۰/۰۰	*	*	
دریل واگن ساتو	مقدار	۱۵۸/۹۰	-۴/۷۶	۱۳/۱۳	۰/۹۴۰	۰/۹۴۰	روند ندارد
	p-value	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۷۳	۰/۸۲۶	



شکل ۵-۱۰ نتایج آزمون همبستگی زیرسیستم اطلس هیدرولیک ۰۳

تابع توزیع برازش شده بر داده‌های تعمیر هر کدام از زیرسیستم‌ها و مقدار پارامترهای هر تابع نیز در جدول (۵-۱۰) آورده شده است.

جدول ۵-۱۰ توابع برازش شده بر روی داده‌های تعمیر و پارامترهای آن‌ها تمامی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	دریل واگن اطلس ۰۱	دریل واگن اطلس ۰۲	دریل واگن اطلس ۰۳	دریل واگن ساتو
تابع برازش شده	PLP	Weibull-2P	Log logistic-3P	Weibull-3P
پارامتر	$\alpha = ۰/۱۷۵$ $\beta = ۰/۵۳۵$	$\alpha = ۰/۰۱۷$ $\beta = ۰/۴۹۴$	$\mu = ۱/۵۱۱$ $\sigma = ۰/۸۱۹$ $\lambda = ۰/۱۸۷$	$\alpha = ۳/۰۸۳$ $\beta = ۰/۴۲۳$ $\lambda = ۰/۱۵۹$

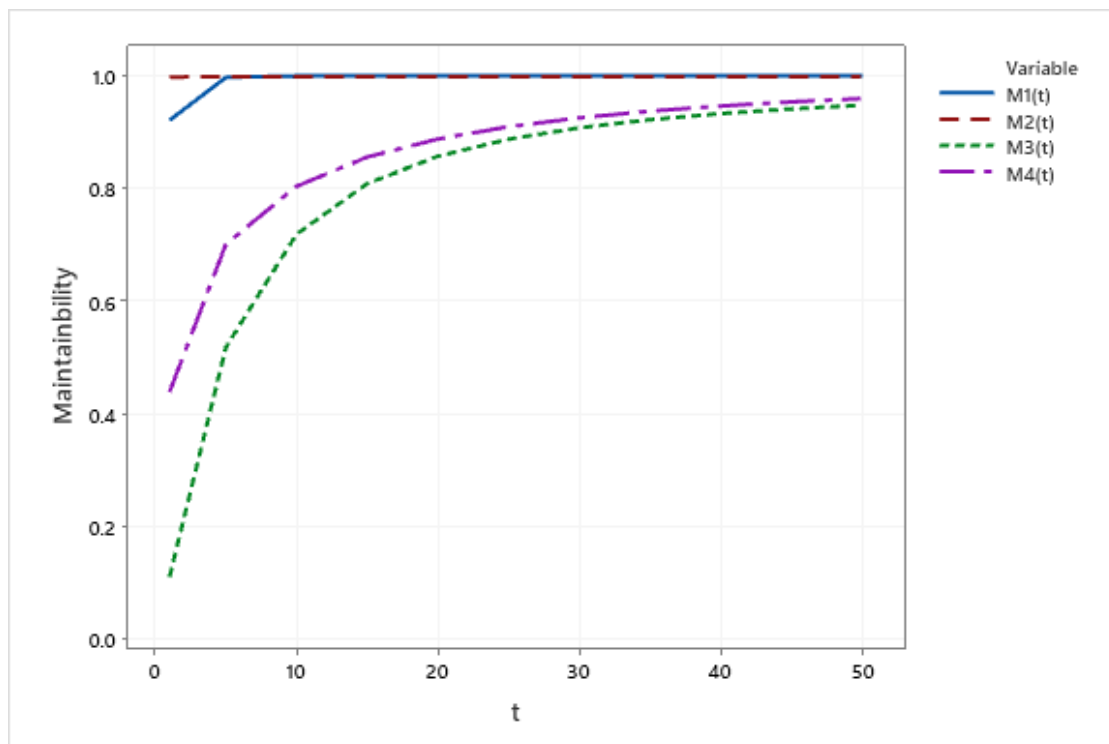
قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل واگن ساتو به ترتیب با استفاده از روابط محاسبه شده است. منحنی قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌ها سامانه حفاری در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است.

$$M_1(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{0.175}\right)^{0.535}\right] \quad (۵-۱۴)$$

$$M_2(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{0.017}\right)^{0.494}\right] \quad (15-5)$$

$$M_3(t) = \frac{1}{\left[1 + \exp\left[-\frac{\ln(t - \lambda) - \mu}{\sigma}\right]\right]} = \frac{1}{\left[1 + \exp\left[-\frac{\ln(t - 0.187) - 1.511}{0.819}\right]\right]} \quad (16-5)$$

$$M_4(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \lambda}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - 0.159}{3.083}\right)^{0.423}\right] \quad (17-5)$$



شکل ۵-۱۱ منحنی قابلیت تعمیرپذیری کل زیرسیستم‌های سامانه حفاری

با توجه به شکل (۵-۱۱)، منحنی قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ بیشترین قابلیت تعمیرپذیری در بین سایر زیرسیستم‌ها برخوردار است که تقریباً ثابت بوده و در مدت زمان خیلی کوتاهی کلیه خرابی‌های این زیرسیستم تعمیر می‌شوند. قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ در ابتدای شروع کار تعمیرات، حدود ۹۲ درصد است و با گذشت کمتر از

۱۰ ساعت، تمام خرابی‌های این زیرسیستم برطرف می‌شوند. قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ در ساعات اولیه شروع کار تعمیرات زیرسیستم، حدود ۱۰ درصد است و با گذشت ۵۰ ساعت قابلیت تعمیرپذیری به حدود ۹۵ درصد می‌رسد. زیرسیستم دریل‌واگن ساتو در ابتدای شروع کار تعمیرات قابلیت تعمیرپذیری آن حدود ۴۳ درصد است و که با گذشت ۵۰ ساعت از عملیات تعمیر و نگهداری، حدود ۹۶ درصد خرابی‌ها برطرف می‌گردند. این امر بیانگر آن است که تعمیرات این زیرسیستم تا حدودی زمان‌بر بوده و بایستی تمهیدات بیشتری در تعمیر این زیرسیستم لحاظ شود. با دقت در این منحنی‌ها مشخص می‌شود که در مدت‌زمان کمتر از ۱۰ ساعت، تقریباً تمامی تعمیرات دو زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ و دریل‌واگن اطلس ۰۲ صورت می‌گیرد. این در حالی است که در این مدت تنها حدود ۸۰ درصد احتمال تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن ساتو و همچنین ۷۲ درصد احتمال تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ وجود دارد. بنابراین ضروری است که با کنترل و نظارت بیشتر و انجام بازرسی‌های دوره‌ای و برنامه‌ریزی شده و اقدامات پیش‌گیرانه برای زیرسیستم‌های بحرانی، میزان وقوع خرابی و توقف‌های ناخواسته در این زیرسیستم‌ها کاهش یابد تا به تبع آن تعمیرات کمتری مورد نیاز باشد و عملکرد زیرسیستم‌ها بهبود یابد.

۵-۱-۵- نرخ تعمیر

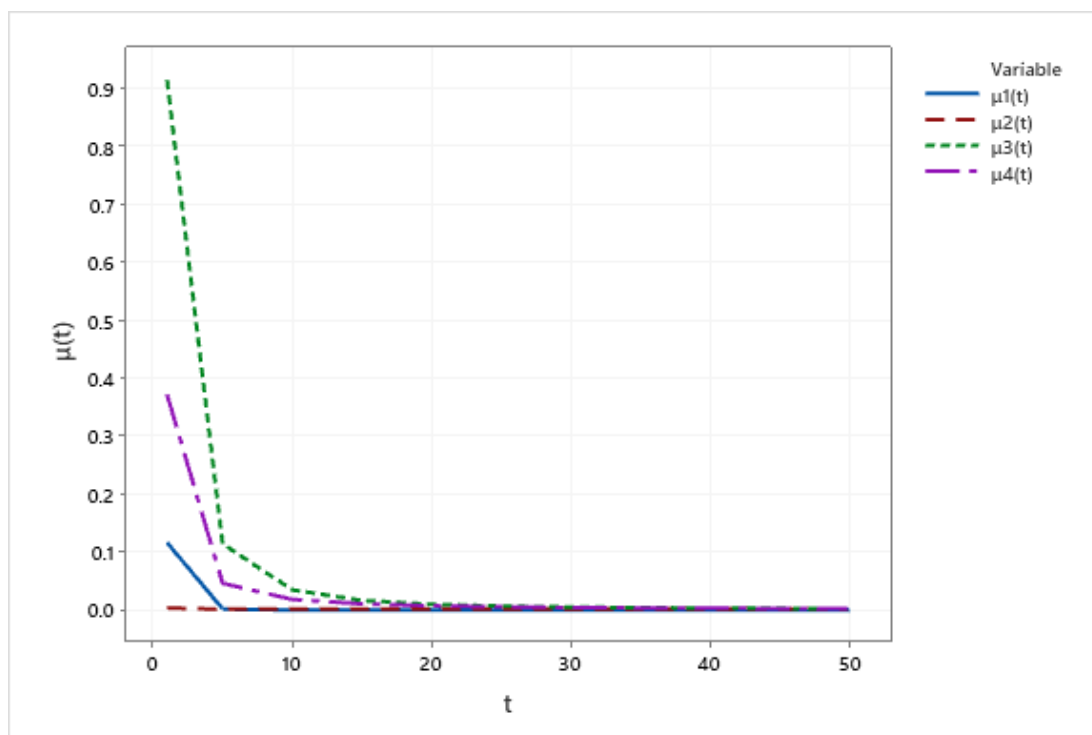
نرخ تعمیر زیرسیستم‌های دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲، دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ و دریل‌واگن ساتو به ترتیب با استفاده از روابط (۵-۱۸)، (۵-۱۹)، (۵-۲۰) و (۵-۲۱) محاسبه می‌شوند. منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم‌ها سامانه حفاری در شکل (۵-۱۲) آورده شده است.

$$\mu_1(t) = \frac{\frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]}{M_1(t)} = \frac{\frac{0.535}{0.175^{0.535}} (t)^{0.535-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{0.175}\right)^{0.535}\right]}{M_1(t)} \quad (۵-۱۸)$$

$$\mu_2(t) = \frac{\frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]}{M_2(t)} = \frac{0.494}{0.017^{0.494}} (t)^{0.494-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{0.017}\right)^{0.494}\right]}{M_2(t)} \quad (19-5)$$

$$\mu_3(t) = \frac{\frac{\exp\left[\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right]}{\sigma(t-\lambda)\left[1+\exp\left[\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right]\right]^2}}{M_3(t)} = \frac{\frac{\exp\left[\frac{\ln(t-0.187)-1.511}{0.819}\right]}{0.819(t-0.187)\left[1+\exp\left[\frac{\ln(t-0.819)-1.511}{0.819}\right]\right]^2}}{M_3(t)} \quad (20-5)$$

$$\mu_3(t) = \frac{\frac{\beta}{\alpha^\beta} (t-\lambda)^{\beta-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t-\lambda}{\alpha}\right)^\beta\right]}{M_4(t)} = \frac{0.423}{3.083^{0.423}} (t-0.159)^{0.423-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t-0.159}{3.083}\right)^{0.423}\right]}{M_4(t)} \quad (21-5)$$



شکل ۱۲-۵ منحنی نرخ تعمیر تمامی زیرسیستم‌ها

با توجه به شکل (۱۲-۵)، منحنی نرخ تعمیر زیرسیستم‌ها نشان می‌دهد که نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ نسبت به دیگر سیستم‌ها در ابتدا بالا بوده و به میزان ۰/۹۱ تعمیر در ساعت است. با گذشت ۵ ساعت به میزان ۰/۱۱ تعمیر در ساعت نزول پیدا می‌کند. نرخ تعمیر این زیرسیستم نزولی

بوده و با شیبی تند کاهش می‌یابد. نرخ بالای تعمیر در ابتدای کار این زیرسیستم نشان از دوره شروع به کار آن دارد که پس از زمان کوتاهی به بازه عمر مفید خود می‌رسد. زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ به صورت نزولی بوده و از حدود ۰/۱۱ تعمیر در ساعت در ابتدای کار به میزان ۰/۰۲ بعد از طی زمان حدود ۲ ساعت می‌رسد. نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲ ثابت بوده و صفر است. این به دلیل قابلیت تعمیرپذیری بالای این زیرسیستم است که در زمان کوتاهی تمام خرابی‌ها تعمیر شده است. نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن ساتو هم در ابتدا ۰/۳۷ تعمیر در ساعت و با گذشت ۵ ساعت به ۰/۰۴ تعمیر در ساعت می‌رسد.

۵-۶- تحلیل تاب‌آوری سامانه حفاری

بعد از به دست آوردن قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری سامانه حفاری به تحلیل تاب‌آوری سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم پرداخته می‌شود. در این پایان نامه تحلیل تاب‌آوری با استفاده از دو رابطه (۲۲-۵) و (۲۳-۵) محاسبه شده است. رابطه (۲۲-۵) تاب‌آوری را در زمان t و بر اساس دو پارامتر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری محاسبه می‌کند. رابطه (۲۳-۵) تاب‌آوری را در یک بازه‌ی زمانی مشخص محاسبه می‌کند اما نمی‌تواند تاب‌آوری سیستم را در لحظه محاسبه کند.

$$\psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + M(t) \times (1 - R(t)) \quad (22-5)$$

در این رابطه، $\psi(t)$ تاب‌آوری سیستم، $\rho(t)$ ترمیم سیستم، $R(t)$ قابلیت اطمینان سیستم و $M(t)$ قابلیت تعمیرپذیری سیستم است.

$$\psi = 100 - LOR_{\text{overal}} = 100 - \frac{50}{T_{\text{total}}} \times \sum_{i=1}^I \Delta T_i \quad (23-5)$$

در این رابطه، ψ تاب‌آوری کل سیستم، LOR_{overal} از دست دادن تاب‌آوری سیستم، T_{total} زمان

کل سیستم در دوره مورد مطالعه و ΔT_i زمان‌های تعمیر سیستم (TTR) است.

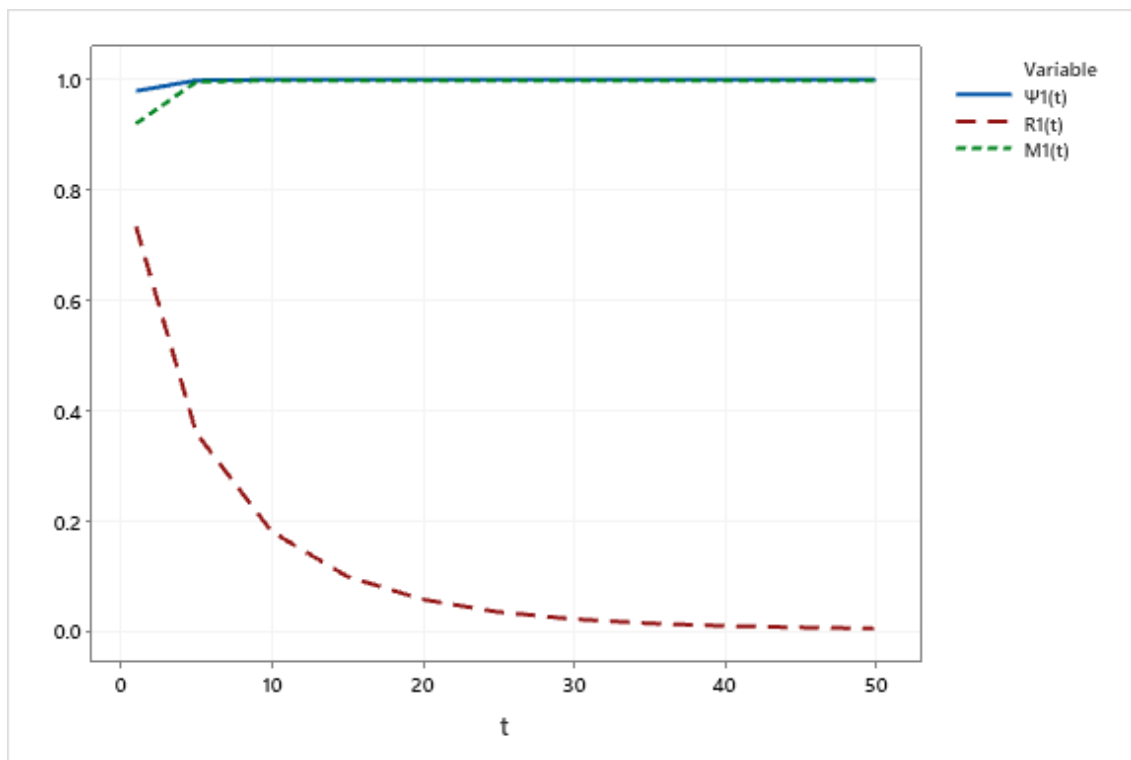
۵-۶-۱- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱

روش اول

بعد از مشخص شدن قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن هیدرولیک اطلس ۰۱، تاب‌آوری این زیرسیستم از رابطه‌ی (۵-۲۲) برای ۵۰ ساعت کارکرد سیستم محاسبه شد که نتایج در جدول (۵-۱۱) آورده شده است. منحنی تأثیر قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۱ مقادیر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ برای ۵۰ ساعت کارکرد سیستم

۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۱	T
۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۳۳	۰/۰۵۶	۰/۰۹۸	۰/۱۷۹	۰/۳۵۸	۰/۷۳۳	R(t)
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۲۱	M(t)
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۷۹	$\Psi(t)$



شکل ۵-۱۳ منحنی تأثیر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱

با توجه به شکل (۵-۱۳)، این زیرسیستم از تاب‌آوری بسیار بالایی برخوردار است و در ابتدای شروع کار سیستم، تاب‌آوری تقریباً ۹۸ درصد است و با گذشت ۱۰ ساعت تاب‌آوری سیستم به ۱۰۰ درصد می‌رسد که نشان می‌دهد احتمال بازیابی عملکرد سیستم سریع انجام می‌شود و سیستم در زمانی خیلی کوتاهی به حالت طبیعی خود باز می‌گردد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان این زیرسیستم حالت کاهشی داشته است و این حالت کاهشی توسط قابلیت تعمیرپذیری بسیار بالایی زیرسیستم جبران می‌شود و چون تاب‌آوری زیرسیستم از مجموع این دو پارامتر به دست می‌آید منجر به تاب‌آوری بسیار بالای زیرسیستم شده است.

روش دوم

در ادامه تاب‌آوری با استفاده از رابطه‌ی (۵-۲۳) محاسبه شد. در ۶۱ مورد خرابی زیرسیستم دریل

واگن اطلس هیدرولیک ۰۱، مدت زمان تعمیر سیستم ۳۷۹/۲۵ ساعت است و همچنین در مدت زمان مورد مطالعه بر روی این زیرسیستم، ۱۲۰۹/۷۵ ساعت سیستم مشغول به حفاری بوده است. دوره مطالعه تجزیه و تحلیل تاب‌آوری برای این زیرسیستم برابر با ۱۵۸۹ ساعت است. با توجه به این مقادیر، با استفاده از رابطه‌ی (۲۳-۵)، LOR کلی ۱۱/۹۳ درصد است. بنابراین تاب‌آوری کلی این زیرسیستم ۸۸/۰۶ درصد است.

$$\psi = 100 - LOR_{\text{overall}} = 100 - \frac{50}{1589} \times 379.25 = 88.06\%$$

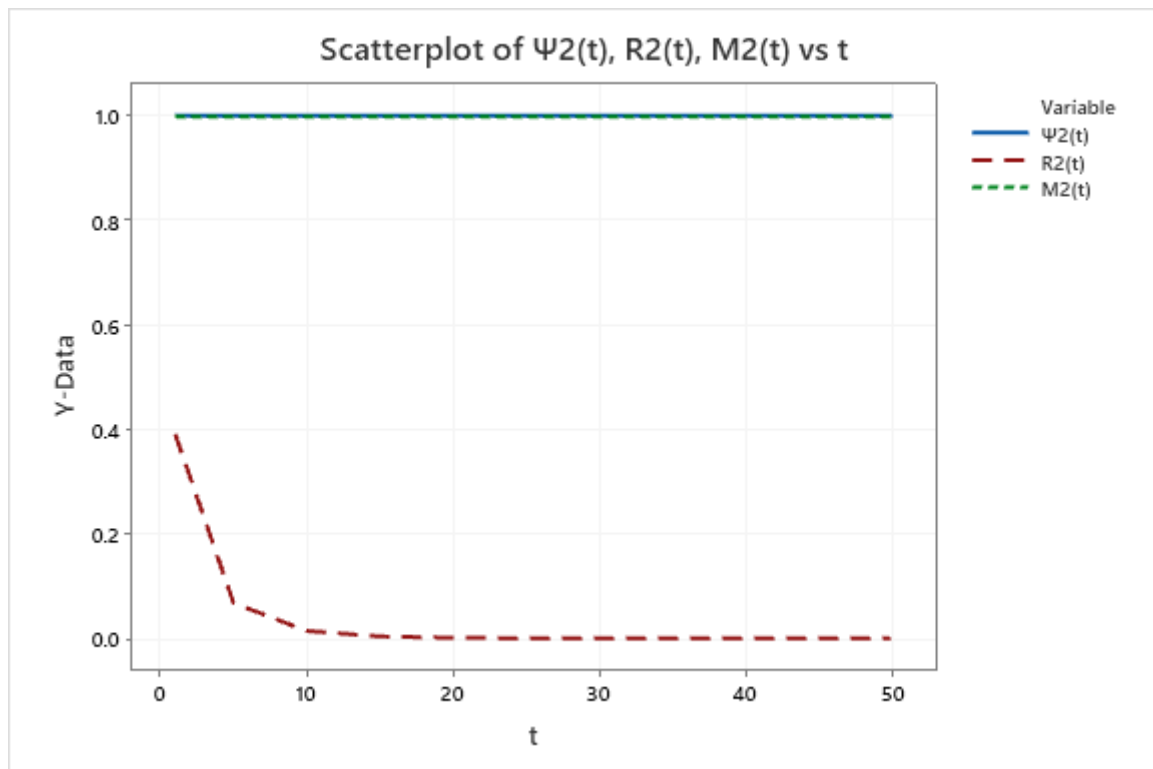
۵-۶-۲- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲

روش اول

بعد از مشخص شدن قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲، تاب‌آوری این زیرسیستم با استفاده از رابطه‌ی (۲۲-۵) برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم محاسبه شده است که نتایج درجدول (۱۲-۵) آورده شده است. منحنی تاب‌آوری این زیرسیستم در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است.

جدول ۱۲-۵ مقادیر تاب‌آوری سیستم دریل واگن اطلس ۰۲ برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم

T	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
R(t)	۰/۳۹۱	۰/۰۶۸۰	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
M(t)	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Ψ(t)	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱



شکل ۵-۱۴ منحنی تأثیر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲

با توجه به منحنی شکل (۵-۱۴)، زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ سیستمی کاملاً تاب‌آور است یعنی زیرسیستم بعد از هر خرابی خیلی سریع به بازیابی کامل عملکرد خود رسیده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم بسیار بالا بوده است و با گذشت کمتر از ۱۰ ساعت قابلیت اطمینان زیرسیستم به صفر رسیده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم است.

روش دوم

زمان کل تعمیرات این سیستم در ۱۹۵ مورد خرابی برابر با ۷۴۹/۷۷ ساعت است و همچنین زمان کارکرد این سیستم ۳۴۵۵/۵۶ ساعت است. بنابراین زمان کل مورد بررسی این سیستم برابر با ۴۲۰۵/۳۳ ساعت است. با توجه به این مقادیر و رابطه (۵-۲۳)، LOR کل سیستم در این دوره برابر با ۳۱/۱۱ درصد است. پس تاب‌آوری کل سیستم برابر با ۹۱/۰۸ درصد است. تجزیه و تحلیل نشان

می‌دهد که سیستم به احتمال ۹۱/۰۸ درصد به بازیابی عملکرد خود می‌رسد. نسبت به دیگر زیرسیستم‌ها از تاب‌آوری بالاتری برخوردار است.

$$\psi = 100 - LOR_{overall} = 100 - \frac{50}{4205.33} \times 749.77 = 91.08\%$$

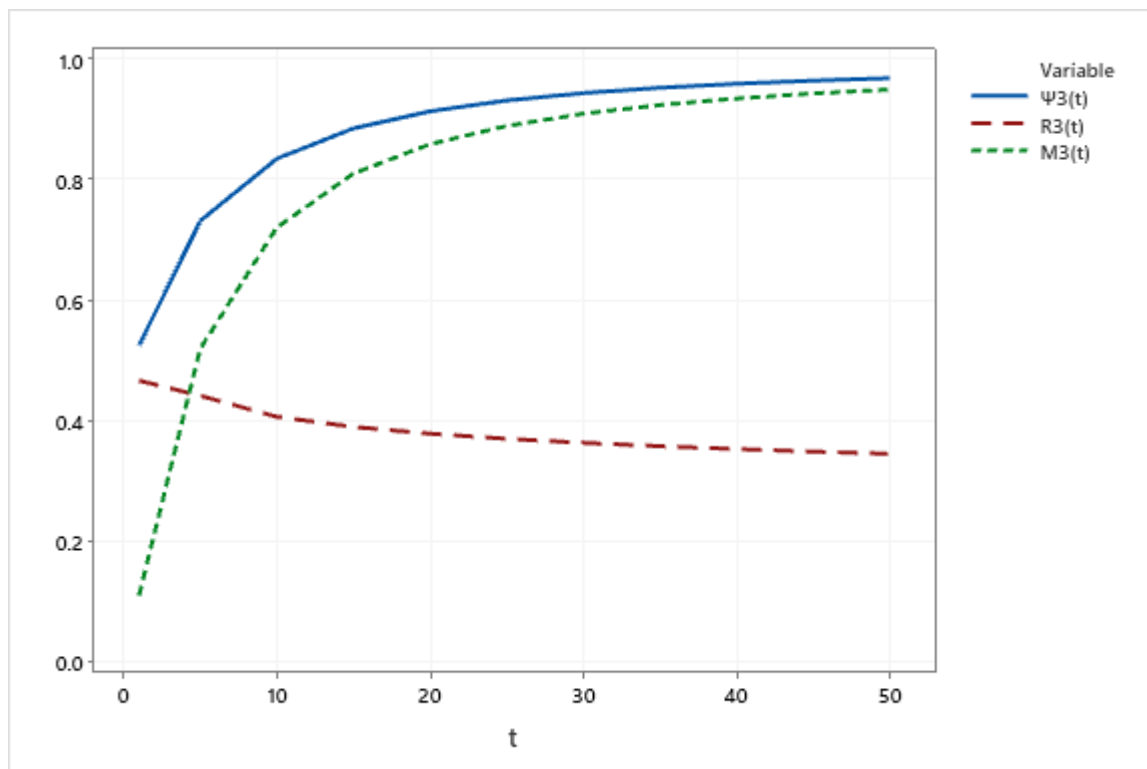
۵-۶-۳- تحلیل تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳

روش اول

بعد از مشخص شدن قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳، تاب‌آوری این زیرسیستم با استفاده از رابطه (۵-۲۲) برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم محاسبه شد که نتایج در جدول (۵-۱۳) آورده شده است. منحنی تأثیر قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری بر تاب‌آوری این زیرسیستم در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۳ مقادیر تاب‌آوری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۳ برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم

۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۱	T
۰/۳۴۴	۰/۳۴۸	۰/۳۵۲	۰/۳۵۷	۰/۳۶۳	۰/۳۶۹	۰/۳۷۸	۰/۳۸۹	۰/۴۰۶	۰/۴۴۱	۰/۴۶۶	R(t)
۰/۹۴۹	۰/۹۴۲	۰/۹۳۴	۰/۹۲۳	۰/۹۰۹	۰/۸۸۸	۰/۸۵۸	۰/۸۰۹	۰/۷۱۹	۰/۵۱۸	۰/۱۰۹	M(t)
۰/۹۶۷	۰/۹۶۲	۰/۹۵۷	۰/۹۵۰	۰/۹۴۲	۰/۹۲۹	۰/۹۱۲	۰/۸۳۳	۰/۸۳۳	۰/۷۳۰	۰/۵۲۴	Ψ(t)



شکل ۵-۱۵ منحنی تأثیر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳

با توجه به شکل (۵-۱۵) در ابتدای شروع کار زیرسیستم تاب‌آوری ۵۲ درصد می‌باشد و با گذشت ۵۰ ساعت به احتمال حدود ۹۶ درصد، زیرسیستم به بازیابی عملکرد خود می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان زیرسیستم با شیب بسیار کمی کاهش یافته است و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم حالت افزایشی داشته است که نشان می‌دهد حالت کاهشی قابلیت اطمینان توسط حالت افزایشی تعمیرپذیری جبران شده است و باعث حالت افزایشی تاب‌آوری زیرسیستم شده است.

روش دوم

زمان کل تعمیرات این سیستم در ۲۵ مورد خرابی برابر با ۹۸۱/۶۵ ساعت و همچنین زمان کارکرد این سیستم ۶۸۵/۱۱ ساعت بوده است. بنابراین زمان کل مورد بررسی این سیستم برابر با ۱۶۶۶/۷۶ ساعت و با توجه به این مقادیر و رابطه‌ی (۵-۲۳)، LOR کل سیستم در این دوره برابر با ۲۹/۴۴۷ درصد است. پس تاب‌آوری کل سیستم برابر با ۷۰/۵۵۲ درصد است.

$$\psi = 100 - LOR_{overall} = 100 - \frac{50}{1666.76} \times 981.65 = 70.552\%$$

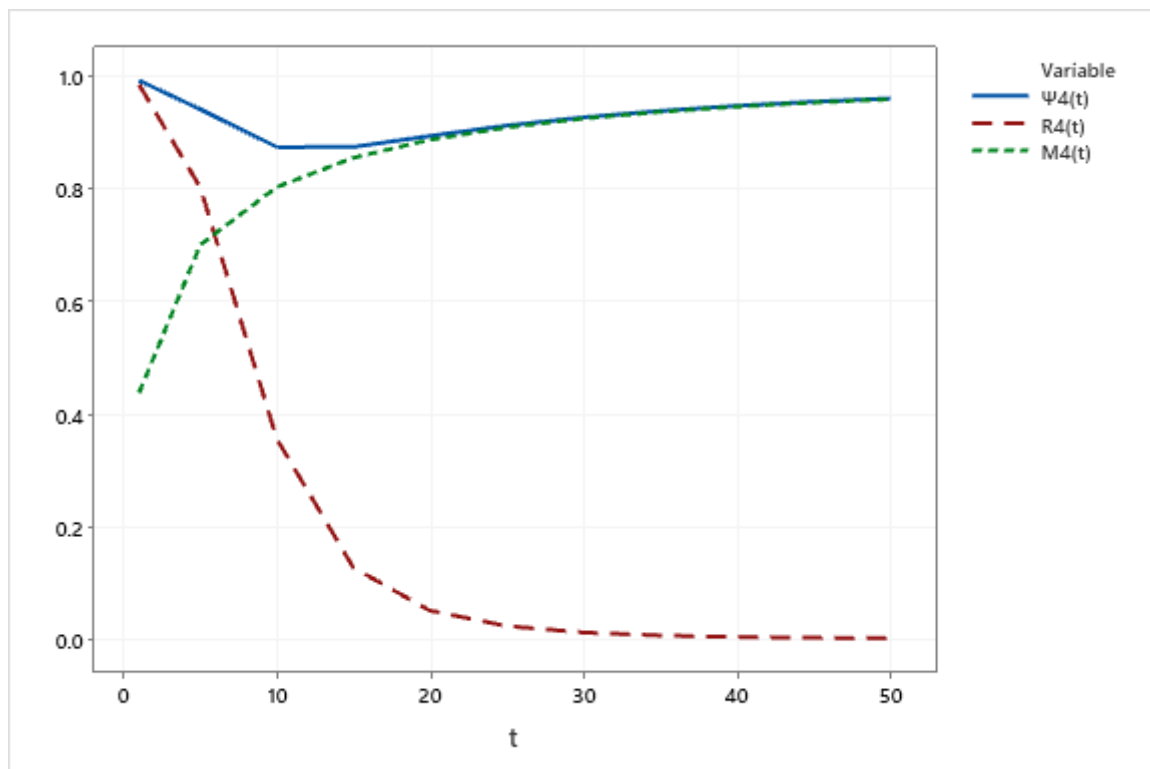
۵-۶-۴- تحلیل تاب آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک

روش اول

بعد از مشخص شدن قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک، تاب آوری این زیرسیستم با استفاده از رابطه (۵-۲۲) برای ۵۰ ساعت محاسبه شد که نتایج در جدول (۵-۱۴) آورده شده است. منحنی تاب آوری این زیرسیستم در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۴ مقادیر تاب آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو برای ۵۰ ساعت کارکرد زیرسیستم

۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۱	T
۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳	۰/۰۵۱	۰/۱۲۷	۰/۳۵۶	۰/۸۰۴	۰/۹۸۶	R(t)
۰/۹۶۱	۰/۹۵۵	۰/۹۴۷	۰/۹۳۸	۰/۹۲۶	۰/۹۱۰	۰/۸۸۹	۰/۸۵۶	۰/۸۰۵	۰/۷۰۱	۰/۴۳۸	M(t)
۰/۹۶۱	۰/۹۵۵	۰/۹۴۷	۰/۹۳۸	۰/۹۲۷	۰/۹۱۲	۰/۸۹۴	۰/۸۷۵	۰/۸۷۴	۰/۹۴۱	۰/۹۹۲	Ψ(t)



شکل ۵-۱۶ منحنی تاب آوری زیرسیستم دریل واگن ساتو

با توجه به منحنی شکل (۵-۱۶)، زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک در ساعات اولیه شروع کار تاب آوری ۹۹ درصد است و با گذشت ۱۰ ساعت، زیرسیستم به کمترین مقدار تاب آوری ۸۷/۴ درصد می‌رسد و بعد از گذشت ۱۰ ساعت تاب آوری سیستم افزایش پیدا کرده است و با گذشت ۵۰ ساعت تاب آوری سیستم به ۹۶ درصد رسیده است. تاب آوری زیرسیستم با گذشت ۱۰ ساعت از کارکرد خود حالت کاهشی داشته است به دلیل اینکه حالت کاهشی قابلیت اطمینان تأثیری بیشتری بر تاب آوری داشته است ولی بعد از ۱۰ ساعت از کارکرد سیستم، قابلیت سیستم با شیب تند کاهش یافته است و قابلیت تعمیرپذیری افزایش یافته است که نشان می‌دهد بعد از ۱۰ ساعت از عملکرد سیستم تأثیر تعمیرپذیری بر تاب آوری بیشتر است.

روش دوم

زمان کل تعمیرات این زیرسیستم در ۵۶ مورد خرابی برابر با ۵۴۱/۲۴ ساعت و زمان کل کارکرد این زیرسیستم در دوره مورد مطالعه برابر با ۵۳۷/۹۷ ساعت بوده است و دوره مطالعه تجزیه و تحلیل

تاب‌آوری برای این سیستم برابر با ۱۰۷۹/۲۱ ساعت است. پس با توجه به این مقادیر و رابطه‌ی (۵-۲۳)، LOR کل سیستم در این دوره برابر با ۲۵/۰۷ درصد است. بنابراین تاب‌آوری کل سیستم در این دوره برابر با ۷۴/۹۳ درصد است.

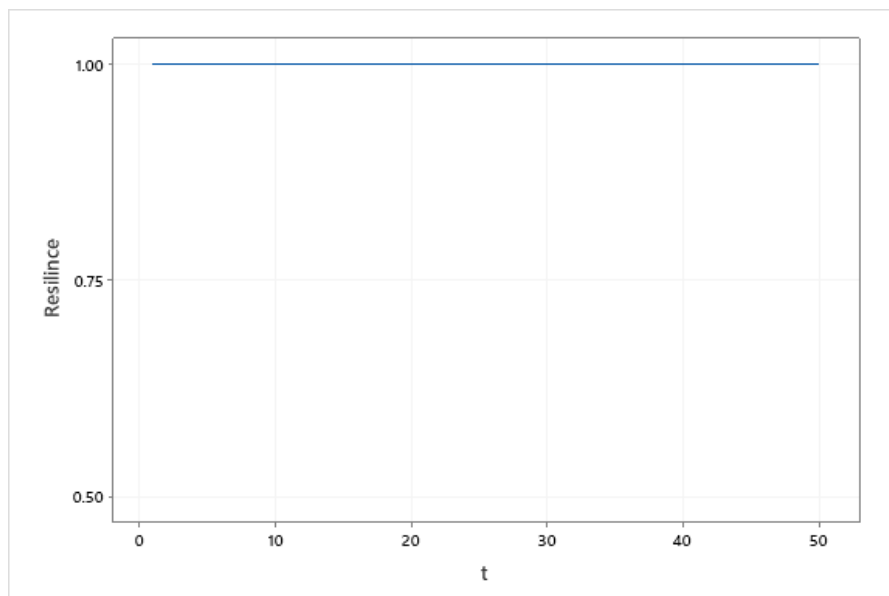
$$\psi = 100 - LOR_{\text{overal}} = 100 - \frac{50}{1079.21} \times 541.24 = 74.93\%$$

۵-۶-۵- تاب‌آوری کل سامانه حفاری

روش اول

تاب‌آوری هر یک از زیرسیستم‌های دریل واگن اطلس هیدرولیک ۱، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۲، دریل واگن اطلس هیدرولیک ۳ و دریل واگن ساتو تحلیل و مدل‌سازی شد. در این بخش تاب‌آوری کل سامانه حفاری معدن بوکسیت جاجرم، محاسبه شده است. با توجه به اینکه عملکرد دریل‌واگن‌های معدن، مستلزم عملکرد تنها یکی از زیرسیستم‌ها بوده و در صورت توقف هر یک از این چهار زیرسیستم، سامانه حفاری به طور کامل متوقف نمی‌شود، بنابراین ارتباط بین هر یک از دریل‌واگن‌ها به صورت موازی بوده و تاب‌آوری کل سامانه حفاری معدن از رابطه‌ی (۵-۲۴) قابل محاسبه است. منحنی تاب‌آوری کل سامانه حفاری در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است.

$$\Psi_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Psi_i) \quad (۵-۲۴)$$



شکل ۵-۱۷ تاب‌آوری کل سامانه حفاری

با توجه به شکل (۵-۱۷)، منحنی تاب‌آوری کل سامانه حفاری نشان می‌دهد که سامانه حفاری معدن کاملاً تاب‌آور بوده و تمام خرابی‌های زیرسیستم‌ها به سرعت بازیابی می‌شوند و دلیل تاب‌آور بودن سامانه حفاری معدن، تاب‌آوری بسیار بالای دو زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ و زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ است.

روش دوم

با به دست آوردن تاب‌آوری هر کدام از زیرسیستم‌ها با استفاده از روش دوم که تاب‌آوری را به صورت کلی بیان می‌کند می‌توان با استفاده از رابطه (۵-۲۴) تاب‌آوری کل سامانه حفاری را براساس روش دوم محاسبه کرد. همچنین با روش دوم نیز تاب‌آوری کل سامانه ۱۰۰ درصد بوده و یک سامانه حفاری کاملاً تاب‌آور است.

$$\Psi_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Psi_i) = 1 - [(1 - 0.8806) \times (1 - 0.9108) \times (1 - 0.7055) \times (1 - 0.7493)] = 100\%$$

فصل ششم: نتایج و مشاهدات

۶-۱- نتایج

به طور کلی نتایج حاصل از این پایان نامه به شرح زیر می باشد:

- ❖ در این پایان نامه تحلیل تاب آوری با استفاده از دو رابطه (۲۲-۵) و (۲۳-۵) محاسبه شده است رابطه (۲۲-۵) تاب آوری را در زمان t محاسبه می کند و دو پارامتر قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در نظر گرفته شده است. رابطه (۲۳-۵) تاب آوری را در یک بازه ی زمانی مشخص محاسبه می کند اما نمی توان تاب آوری سیستم را در لحظه محاسبه نمود.
- ❖ در این پژوهش برای تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری از روش تحلیل آماری و همچنین از نرم افزار minitab19 استفاده شده است.
- ❖ اساس این روش انجام آزمون روند و همبستگی سری می باشد. در این پایان نامه آزمون روند توسط چهار آزمون کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون - دارلینگ و من - کندال صورت پذیرفت.
- ❖ تحلیل پارتو نشان می دهد که زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ بیشترین تعداد خرابی و تعمیر و بیشترین درصد خرابی بوده است، بنابراین زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ بحرانی ترین زیرسیستم سامانه حفاری است و همچنین زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۳ کمترین تعداد خرابی و درصد خرابی را برخوردار است.
- ❖ تحلیل قابلیت اطمینان نشان داد که زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ با قابلیت اطمینان حدود ۷۳ درصد شروع به کار کرد و با گذشت ۴۰ ساعت، قابلیت اطمینان این زیرسیستم تقریباً به صفر می رسد. نرخ خرابی زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۱ نزولی است و در ساعات اولیه کار با زیرسیستم میزان خرابی حدود ۰/۲۳ در ساعت بوده و با گذشت ۲۵ ساعت، میزان خرابی به ۰/۱ در ساعت می رسد. نرخ خرابی با روند ملایمی کاهش یافته و در زمان ۵۰ ساعت به مقدار ۰/۰۸ می رسد.

❖ زیرسیستم دریل واگن هیدرولیک ۰۲ کمترین قابلیت اطمینان را داراست و قابلیت اطمینان این زیرسیستم در ابتدای شروع کار زیرسیستم حدود ۳۹ درصد است و با گذشت ۲۰ ساعت قابلیت اطمینان تقریباً به صفر می‌رسد. بنابراین برای جلوگیری از کار افتادن این زیرسیستم، اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه ضرورت دارد. زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ دارای رفتار خرابی روبه بهبود و نرخ خرابی نزولی است. نرخ خرابی در زمان شروع کار با بیشترین میزان خرابی حدود ۰/۶ خرابی در ساعت بوده و پس از گذشت ۲۵ ساعت، میزان خرابی به حدود ۰/۲ در ساعت می‌رسد و همچنین با یک روند ملایم‌تر کاهش می‌یابد.

❖ تحلیل قابلیت اطمینان نشان داد که زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ با قابلیت اطمینان حدود ۴۶ درصد در ابتدای عملکرد سیستم است و با گذشت زمان، شیب بسیار ملایمی کاهش می‌یابد. به همین دلیل بعد از گذشت ۵۰ ساعت از عملکرد زیرسیستم قابلیت اطمینان زیرسیستم به حدود ۳۴ درصد می‌رسد. نرخ خرابی برای زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ تقریباً ثابت بوده و در ساعات اولیه کار زیرسیستم، به میزان ۰/۰۵۲ خرابی در ساعت است و با گذشت ۵۰ ساعت از کار زیرسیستم به مقدار ۰/۰۷۲ خرابی در ساعت می‌رسد که نشان می‌دهد نرخ خرابی این زیرسیستم با شیب بسیار ملایمی روبه افزایش است.

❖ تحلیل قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که زیرسیستم دریل واگن ساتو بیشترین قابلیت اطمینان را نسبت به دیگر زیرسیستم‌ها دارد و قابلیت اطمینان این زیرسیستم از ساعات اولیه کار سیستم حدود ۹۸ درصد است و با شیبی تند کاهش می‌یابد و بعد از گذشت ۱۰ ساعت، قابلیت اطمینان حدود ۴۰ درصد می‌رسد و قابلیت اطمینان این زیرسیستم با گذشت ۵۰ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. نرخ خرابی زیرسیستم دریل واگن ساتو در لحظه شروع به کار زیرسیستم برابر با ۰/۰۱ خرابی در ساعت بوده پس از گذشت ۱۰ ساعت از

فعالیت آن، نرخ خرابی افزایش یافته و به مقدار $0/2$ خرابی در ساعت می‌رسد. پس از این زمان، نرخ خرابی کاهش یافته و در زمان ۳۵ ساعت، به $0/105$ خرابی در ساعت می‌رسد. بنابراین نرخ خرابی این زیرسیستم در زمان شروع کار صعودی بوده و بعد از ۱۰ ساعت، زیرسیستم روبه بهبود و نرخ خرابی نزولی است.

❖ ارتباط بین هر یک از دریل‌واگن‌ها به صورت موازی بوده و قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری معدن از رابطه‌ی (۵-۱۱) محاسبه شده است. قابلیت اطمینان کل سامانه حفاری معدن نشان می‌دهد در ساعات شروع به کار زیرسیستم‌ها، حدود ۹۹ درصد است و به دلیل قابلیت اطمینان پایین دریل‌واگن هیدرولیک اطلس ۰۱ و دریل واگن هیدرولیک اطلس ۰۳، با گذشت ۱۰ ساعت قابلیت اطمینان کل سامانه حدود ۶۹ درصد می‌رسد و با گذشت ۵۰ ساعت کل سامانه حفاری حدود ۳۵ درصد می‌رسد.

❖ تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نشان داد که قابلیت تعمیر پذیری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ در ابتدای شروع کار، حدود ۹۲ درصد است و با گذشت ۱۰ ساعت، تمام خرابی‌های این زیرسیستم برطرف می‌شوند. زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۱ به صورت نزولی بوده و از حدود $0/11$ تعمیر در ساعت در ابتدای کار به میزان $0/02$ بعد از طی زمان حدود ۲ ساعت می‌رسد.

❖ قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۲ بیشترین قابلیت تعمیرپذیری در بین سایر زیرسیستم‌ها برخوردار است که تقریباً ثابت بوده و حداکثر ۱ ساعت زمان لازم است که کلیه خرابی‌های این زیرسیستم تعمیر شوند. نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۲ ثابت بوده و صفر است. این به دلیل قابلیت تعمیرپذیری بالای این زیرسیستم است که در زمان کوتاهی تمام خرابی‌ها تعمیر شده است.

❖ قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ در ساعات اولیه شروع کار زیرسیستم، حدود ۱۰ درصد است و با گذشت ۵۰ ساعت قابلیت تعمیرپذیری به حدود ۹۵ درصد

می‌رسد. زیرسیستم دریل واگن ساتو در ابتدای شروع کار قابلیت تعمیرپذیری آن حدود ۴۳ درصد است و که با گذشت ۵۰ ساعت از عملیات تعمیر و نگهداری، حدود ۹۶ درصد خرابی‌ها برطرف می‌گردند. این امر بیانگر آن است که تعمیرات این زیرسیستم تا حدودی زمان‌بر بوده و بایستی تمهیدات بیشتری در تعمیر این زیرسیستم لحاظ شود. نرخ تعمیر زیرسیستم دریل‌واگن اطلس ۰۳ نسبت به دیگر سیستم‌ها در ابتدا بالا بوده و به میزان ۰/۹۱ تعمیر در ساعت است. با گذشت ۵ ساعت به میزان ۰/۱۱ تعمیر در ساعت نزول پیدا می‌کند. نرخ تعمیر این زیرسیستم نزولی بوده و با شیبی تند کاهش می‌یابد. نرخ بالای تعمیر در ابتدای کار این زیرسیستم نشان از دوره شروع به کار آن دارد که پس از زمان کوتاهی به بازه عمر مفید خود می‌رسد.

❖ زیرسیستم دریل واگن ساتو در ابتدای شروع کار قابلیت تعمیرپذیری آن حدود ۴۳ درصد است و که با گذشت ۵۰ ساعت از عملیات تعمیر و نگهداری، حدود ۹۶ درصد خرابی‌ها برطرف می‌شوند. این امر بیانگر آن است که تعمیرات این زیرسیستم تا حدودی زمان‌بر بوده و بایستی تمهیدات بیشتری در تعمیر این زیرسیستم لحاظ شود. نرخ تعمیر زیرسیستم دریل واگن ساتو هم در ابتدا ۰/۳۷ تعمیر در ساعت و با گذشت ۵ ساعت به ۰/۰۴ تعمیر در ساعت می‌رسد.

❖ تحلیل تاب‌آوری از روش اول نشان می‌دهد که زیرسیستم دریل‌واگن اطلس هیدرولیک از تاب‌آوری بسیار بالایی برخوردار است و در ابتدای شروع کار سیستم، تاب‌آوری تقریباً ۹۸ درصد است و با گذشت ۱۰ ساعت تاب‌آوری سیستم به ۱۰۰ درصد می‌رسد که نشان می‌دهد احتمال بازیابی عملکرد سیستم سریع انجام می‌شود و سیستم در زمانی خیلی کوتاهی به حالت طبیعی خود باز می‌گردد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان این زیرسیستم حالت کاهشی داشته است و این حالت کاهشی توسط قابلیت تعمیرپذیری بسیار بالایی زیرسیستم جبران می‌شود و چون تاب‌آوری زیرسیستم از

مجموع این دو پارامتر به دست می‌آید منجر به تاب‌آوری بسیار بالای زیرسیستم شده است. محاسبه تاب‌آوری از روش دوم برای این زیرسیستم نشان داد که این زیرسیستم در ۶۱ مورد خرابی، تاب‌آوری کل سیستم در این دوره مطالعه و بررسی سیستم برابر با ۸۸/۰۶ می‌باشد.

❖ تحلیل تاب‌آوری با روش اول نشان داد که زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۲ سیستمی کاملاً تاب‌آور است یعنی زیرسیستم بعد از هر خرابی خیلی سریع به بازیابی کامل عملکرد خود رسیده است. قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم بسیار بالا بوده است و با گذشت کمتر از ۱۰ ساعت قابلیت اطمینان زیرسیستم به صفر رسیده است که نشان دهنده تأثیر مثبت تعمیرپذیری بر تاب‌آوری زیرسیستم است. سپس تاب‌آوری کل سیستم با استفاده از روش دوم در یک دوره با ۱۹۵ مورد خرابی، برابر با ۹۱/۰۸ درصد است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که سیستم به احتمال ۹۱/۰۸ درصد به بازیابی عملکرد خود می‌رسد. نسبت به دیگر زیرسیستم‌ها از تاب‌آوری بالاتری برخوردار است.

❖ در ابتدای شروع کار زیرسیستم دریل واگن اطلس هیدرولیک ۰۳ تاب‌آوری ۵۲ درصد می‌باشد و با گذشت ۵۰ ساعت به احتمال حدود ۹۶ درصد، زیرسیستم به بازیابی عملکرد خود می‌رسد. قابلیت اطمینان زیرسیستم با شیب بسیار کمی کاهش یافته است و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم حالت افزایشی داشته است که نشان می‌دهد حالت کاهشی قابلیت اطمینان توسط حالت افزایشی تعمیرپذیری جبران شده است و باعث حالت افزایشی تاب‌آوری زیرسیستم شده است. با استفاده از روش دوم، تاب‌آوری کل سیستم برابر با ۷۰/۵۵۲ درصد است.

❖ زیرسیستم دریل واگن ساتو هیدرولیک در ساعات اولیه شروع کار تاب‌آوری ۹۹ درصد است و با گذشت ۱۰ ساعت، زیرسیستم به کمترین مقدار تاب‌آوری ۸۷/۴ درصد می‌رسد و بعد از گذشت ۱۰ ساعت تاب‌آوری سیستم افزایش پیدا کرده است و با گذشت ۵۰ ساعت

تاب‌آوری سیستم به ۹۶ درصد رسیده است. تاب‌آوری زیرسیستم با گذشت ۱۰ ساعت از کارکرد خود حالت کاهشی داشته است به دلیل اینکه حالت کاهشی قابلیت اطمینان تأثیری بیشتری بر تاب‌آوری داشته است ولی بعد از ۱۰ ساعت از کارکرد سیستم، قابلیت سیستم با شیب تند کاهش یافته است و قابلیت تعمیرپذیری افزایش یافته است که نشان می‌دهد بعد از ۱۰ ساعت از عملکرد سیستم تأثیر تعمیرپذیری بر تاب‌آوری بیشتر است. محاسبه شده از روش دوم برای این زیرسیستم در دوره مطالعه سیستم برابر با ۷۴/۹۳ درصد می‌باشد.

❖ به دلیل قرارگیری به صورت موازی زیرسیستم‌ها تاب‌آوری کل سامانه حفاری معدن محاسبه می‌شود و نشان می‌دهد که سامانه حفاری معدن کاملاً تاب‌آور بوده و تمام خرابی‌های زیرسیستم‌ها به سرعت بازیابی می‌شوند و دلیل تاب‌آور بودن سامانه حفاری معدن، بالا بودن تاب‌آوری دو زیرسیستم دریل واگن اطلس ۰۱ و زیرسیستم دریل واگن از اطلس ۰۲ است. همچنین با استفاده از روش دوم نیز تاب‌آوری کل سامانه ۱۰۰ درصد بوده و یک سامانه حفاری کاملاً تاب‌آور می‌باشد.

۲-۶- پیشنهادات

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

❖ در این پایان‌نامه برای تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری از روش آماری استفاده شد. پیشنهاد می‌شود از روش‌های دیگر برای تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری استفاده شود و نتایج آن با تحلیل‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه مقایسه شود.

❖ در این پایان‌نامه برای انجام تحلیل‌ها از نرم افزار minitab19 استفاده شد. پیشنهاد

می‌شود برای انجام تحلیل‌ها از نرم افزارهای دیگری همچون EasyFit و R استفاده شود و نتایج آن با این پایان‌نامه مقایسه شود.

❖ در این پایان‌نامه از دو رابطه برای محاسبه تاب‌آوری سیستم استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود از روابط موجود دیگر برای محاسبه تاب‌آوری استفاده شود و نتایج آن با این پایان‌نامه مقایسه شود.

❖ در این پایان‌نامه از دو پارامتر قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری برای تاب‌آوری در نظر گرفته شد. می‌توان از پارامترهای دیگری مانند قابلیت پشتیبانی، تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در نظر گرفته شود.

❖ در این پایان‌نامه تأثیر شرایط محیطی در نظر گرفته نشده است. پیشنهاد می‌شود تأثیر شرایط محیطی بر تاب‌آوری در نظر گرفته شود و نتایج آن با این پایان‌نامه مقایسه شود.

منابع

- [١] C. S. Holling, "Resilience and stability of ecological systems," *Annual review of ecology and systematics*, vol. 4, no. 1, pp. 1-23, 1973.
- [٢] T. Maurya, K. Karena, H. Vardhan, M. Aruna, and M. G. Raj, "Effect of heat on underground mine workers," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, pp. 491-498, 2015.
- [٣] B. Allenby and J. Fink, "Toward inherently secure and resilient societies," *Science*, vol. 309, no. 5737, pp. 1034-1036, 2005.
- [٤] Y. Y. Haimes, "On the definition of resilience in systems ", *Risk Analysis: An International Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 498-501, 2009.
- [٥] J. C. Whitson and J. E. Ramirez-Marquez, "Resiliency as a component importance measure in network reliability," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, no. 10, pp.1685-1693, 2009.
- [٦] B. D. Youn, C. Hu, and P. Wang, "Resilience-driven system design of complex engineered systems," *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, no. 10, 2011.
- [٧] G. Muller, "Fuzzy architecture assessment for critical infrastructure resilience," *Procedia Computer Science*, vol. 12, pp. 367-372, 2012.
- [٨] J. Li and Z. Xi, "Engineering recoverability: A new indicator of design for engineering resilience," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2014, vol. 46315, p. V02AT03A044: American Society of Mechanical Engineers.
- [٩] B. Rød, A. Barabadi, and O. T. Gudmestad, "Characteristics of Arctic Infrastructure Resilience: Application of Expert Judgement," in *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2016: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [١٠] S. Hosseini, K. Barker, and J. E. Ramirez-Marquez, "A review of definitions and measures of system resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 145, pp. 47-61, 2016.

- [۱۱] H.w. Huang and D.m. Zhang, "Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 51, pp. 301-312, 2016.
- [۱۲] N. Yodo and P. Wang, "Resilience modeling and quantification for engineered systems using Bayesian networks," *Journal of Mechanical Design*, vol. 138, no. 3, 2016.
- [۱۳] S. Hosseini and K. Barker, "Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 93, pp. 252-266, 2016.
- [۱۴] Z. Wang, M. S. Nistor, and S. W. Pickl, "Analysis of the definitions of resilience," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 10649-10657, 2017.
- [۱۵] H. Baroud and K. Barker, "A Bayesian kernel approach to modeling resilience-based network component importance," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 170, pp. 10-19, 2018.
- [۱۶] T. Bostick, E. B. Connelly, J. H. Lambert, and I. Linkov, "Resilience science, policy and investment for civil infrastructure," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 175, pp. 19-23, 2018.
- [۱۷] A. Sarwar, F. Khan, M. Abimbola, and L. James, "Resilience analysis of a remote offshore oil and gas facility for a potential hydrocarbon release," *Risk Analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1601-1617, 2018.
- [۱۸] B. Cai, M. Xie, Y. Liu, Y. Liu, and Q. Feng, "Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 172, pp. 216-224, 2018.
- [۱۹] J. S. Brtis and M. A. McEvilly, "Systems Engineering for Resilience," MITRE Technical Document 190495, 2019.
- [۲۰] W. Xiao, X. Lv, Y. Zhao, H. Sun, and J. Li, "Ecological resilience assessment of an arid coal mining area using index of entropy and linear weighted analysis: A case study of Shendong Coalfield, China," *Ecological Indicators*, vol. 109, p. 105843, 2020.
- [۲۱] S. H. Hoseinie, S. Heydari, B. Ghodrati, and U. Kumar, "Resilience measurement of longwall machinery," *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, vol. 35, no. 3, 2020.

[۲۲] متحدى،ع. سرشكى،ف.عطائى،م. برآبادى،ع. نورى قراحسنلو،ع.(۱۳۹۸) "تحليل تاب آورى

سیستم استخراج معدن (مطالعه موردی: معدن مس سونگون) " همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۳] متحدی، ع. سرشکی، ف. عطائی، م. برآبادی، ع. نوری قراحسنلو، ع. (۱۳۹۸) "شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی تاب آوری سیستم تهویه معادن" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۴] S. Elevli, N. Uzgoren, and M. Taksuk, "Maintainability analysis of mechanical systems of electric cable shovels," 2008.

[۲۵] A. Barabadi, J. Barabady, and T. Markeset, "A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 12, pp. 1637-1646, 2011.

[۲۶] A. Barabadi, J. Barabady, and T. Markeset, "Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 1, pp. 210-217, 2011.

[۲۷] S. H. Hoseinie, M. Ataei, R. Khalokakaie, B. Ghodrati, and U. Kumar, "Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model," *International journal of mining, reclamation and environment*, vol. 2, no. 4, pp. 309-323, 2012.

[۲۸] A. Gustafson, H. Schunnesson, and U. Kumar, "Reliability analysis and comparison between automatic and manual load haul dump machines," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 31, no. 3, pp. 523-531, 2015.

[۲۹] M. J. Rahimdel, M. Ataei, R. Khalokakaie, and S. H. Hoseinie, "Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines," *International journal of mining science and technology*, vol. 23, no. 5, pp. 771-775, 2013.

[۳۰] S. MOHAMMADI, M. GHIASI, M. ATAIEI, and E. POURZAMANI, "Reliability Analysis and Evaluating of Rotary Drilling Machine-Case Study: Mine No. 1 of Golgozar Iron Ore Mine," 2016.

[۳۱] نجف علیزاده، م. (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین های حفاری (مطالعه موردی: معدن سرب و روی راونج)" دانشگاه آزاد اسلامی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود - دانشکده مهندسی معدن.

- [۳۲] J. T. Yoon, B. D. Youn, M. Yoo, and Y. Kim, "A newly formulated resilience measure that considers false alarms," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 167, pp. 417-427, 2017.
- [۳۳] T. Beatley and P. Newman, "Biophilic cities are sustainable, resilient cities," *Sustainability*, vol. 5, no. 8, pp. 3328-3345, 2013.
- [۳۴] F. H. Jufri, V. Widiputra, and J. Jung, "State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1049-1065, 2019.
- [۳۵] A. Pregenzer, "Systems resilience: a new analytical framework for nuclear nonproliferation," *Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories*, 2011.
- [۳۶] A. Gholami, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Front lines against the darkness: Enhancing the resilience of the electricity grid through microgrid facilities," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 18-24, 2016.
- [۳۷] R. Bhamra, S. Dani, and K. Burnard, "Resilience: the concept, a literature review and future directions," *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 18, pp. 5375-539, 2011.
- [۳۸] E. Hollnagel, "Resilience: the challenge of the unstable," 2006.
- [۳۹] D. A. McEntire, *Disaster response and recovery: strategies and tactics for resilience*. John Wiley & Sons, 2015.
- [۴۰] عطائی، م. نوروزی مصیر، ر. متحدی، ع (۱۳۹۸)، "مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی"، همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۴۱] D. Henry and J. E. Ramirez-Marquez, "Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 99, pp. 114-122, 2012.
- [۴۲] G. Windle, "What is resilience? A review and concept analysis," *Reviews in clinical gerontology*, vol. 21, no. 2, p. 152, 2011.
- [۴۳] N. R. Romero, L. K. Nozick, I. D. Dobson, N. Xu, and D. A. Jones, "Transmission and generation expansion to mitigate seismic risk," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3692-3701, 2013.
- [۴۴] منعمی، م، ۱۳۹۶، پایان نامه کارشناسی ارشد، افزایش تاب آوری سیستم قدرت با در نظر

گرفتن کلیدزنی بهینه تولیدات پراکنده در مسأله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی،
دانشگاه صنعتی سجاد.

- [۴۵] H. R. Tewari and P. K. Bhowmick, "Livelihood vulnerability index analysis: An approach to study vulnerability in the context of Bihar," *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies*, vol. 6, no. 1, pp. 1-13, 2014.
- [۴۶] D. Matyas and M. Pelling, "Positioning resilience for 2015: the role of resistance , incremental adjustment and transformation in disaster risk management policy," *Disasters*, vol. 39, no. s1, pp. s1-s18, 2015.
- [۴۷] M. Abimbola and F. Khan, "Resilience modeling of engineering systems using dynamic object-oriented Bayesian network approach ", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 130, pp. 108-118, 2019.
- [۴۸] N. Morshedlou, K. Barker, C. D. Nicholson, and G. Sansavini, "Adaptive Capacity Planning Formulation for Infrastructure Networks," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 24, no. 4, p.04018022,2018.
- [۴۹] A. Rose, "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environmental Hazards*, vol. 7, no. 4, pp. 383-398, 2007.
- [۵۰] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau, "Seismic resilience of a hospital system," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 6, no. 1-2, pp. 127-144, 2010.
- [۵۱] B. M. Ayyub, "Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making," *Risk analysis*, vol. 34, no. 2, pp. 340-355, 2014.
- [۵۲] O. Kammouh, A. Zamani Noori, G. P. Cimellaro, and S. A. Mahin, "Resilience assessment of urban communities," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 04019002, 2019.
- [۵۳] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau, "Framework for analytical quantification of disaster resilience," *Engineering structures*, vol. 32, no. 11, pp. 3639-3649, 2010.

[۵۴] رحیم دل، م. (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: "مدلسازی قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد عملیاتی و تعمیراتی ماشین های حفاری (مطالعه موردی؛ معدن مس سرچشمه)"، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی معدن.

- [۵۵] B. S. Dhillon, *Mining equipment reliability*. Springer, 2008.
- [۵۶] B. S. Dhillon, *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC press, 2006.
- [۵۷] A. Ahmadi, R. Karim, and J. Barabady, "Prerequisites for a business-oriented fleet availability assurance program in aviation," in *International Workshop and Congress on eMaintenance: 22/06/2010-24/06/2010*. PP.168-175: Luleå tekniska universitet.
- [۵۸] R. F. Stapelberg, *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [۵۹] H. Pham, *System software reliability*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [۶۰] حسینی کیاسری، ج. محمدی، س. عطائی، م. کاکایی، ر. (۱۳۹۴)، "مدلسازی و تحلیل قابلیت اطمینان ماشینآلات بارگیری (مطالعه موردی: ناوگان بارگیری معدن مس سرچشمه)" سومین کنفرانس معادن روباز ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
http://www.civilica.com/Paper-IOPMC03-IOPMC03_014.html
- [۶۱] A. Clauset, "Inference, models and simulation for complex systems," Lecture Notes CSCI 70001003, 2011.
- [۶۲] A. H. S. Garmabaki, A. Ahmadi, Y. A. Mahmood, and A. Barabadi, "Reliability modelling of multiple repairable units," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 32, no. 7, pp. 2329-2343, 2016.
- [۶۳] A. N. Gharahasanlou, M. Ataei, R. Khalokakaie, A. Barabadi, and V. Einian, "Risk based maintenance strategy: a quantitative approach based on time-to-failure model," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 8, no. 3, pp. 602-611, 2017.
- [۶۴] A. Nouri Gharahasanloo, R. Khalokakaie, M. Ataei, and M. Mokhberdoran, "Mining Spare Parts Provision by Reliability Analysis, Case Study: Sungun Copper Mine," *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, vol. 8, no. 15, pp. 25-38, 2018.
- [۶۵] عطائی، م. حسینی، ه. (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر ساینده‌گی بر قابلیت حفاری سنگ‌ها". علوم زمین، شماره ۷۴، دوره ۱۹: ص ۱۳۷-۱۴۲.

[۶۶] رحیم پوربناب، ح. اسماعیلی، د. (۱۳۸۶)، "پتروگرافی و ژنز کانسار بوکسیت جاجرم". مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۱، دوره ۲۳: ۱۰۷-۱۲۳.

[۶۷] داورزنی، م. داورزنی، ح. (۱۳۹۵). "اصول و مبانی دریل واگن تهران"، چاپ اول، انتشارات ویهان، تهران، ص ۱۰۳.

سوستا

پیوست ۱ _ پایگاه داده‌ای زیرسیستم اطلس کوپکو هیدرولیک ۰۱

شماره	TTR(h)	TBF(h)
29	1.25	29.75
30	0.33	7.41
31	0.5	8
32	0.5	17
33	0.5	9.33
34	0.33	73.32
35	3.5	54.5
36	0.58	24.83
37	0.16	7.5
38	2	6.5
39	0.33	16.99
40	0.25	7.5
41	2	7.16
42	4	33.66
43	2.5	51.91
44	8	50.33
45	5	13
46	1.33	39.66
47	10.66	24.83
48	2	6
49	3.5	39.08
50	4	48.83
51	2.25	7.75
52	6	4
53	1.5	179
54	4	14
55	151.5	15
56	3.5	54.47

شماره	TTR(h)	TBF(h)
1	5.25	4.75
2	0.5	9.5
3	10.16	14.33
4	0.33	7.5
5	2.58	7.41
6	0.5	24.5
7	0.5	7.5
8	0.25	9.75
9	2.33	5
10	0.5	37
11	0.5	7
12	2.33	7
13	6.99	3
14	0.66	31.99
15	0.5	9.5
16	0.58	9.41
17	0.58	9.41
18	1.25	8.75
19	0.5	17.5
20	0.5	17.5
21	0.25	7.41
22	0.5	9
23	6.33	3.66
24	4	2.5
25	4.91	12.66
26	0.5	9.5
27	6.25	11.75
28	0.25	9.16

شماره	TTR(h)	TBF(h)
57	0.5	9.5
58	86	10
59	5	5
60	1.5	8.5
61	4	11.5

پیوست ۲_ پایگاه داده‌ای زیرسیستم اطلس کوپکو هیدرولیک ۰۲

شماره	TTR(h)	TBF(h)
21	0.58	9.41
22	0.16	7.66
23	0.58	9.41
24	0.25	13.91
25	0.25	9.75
26	0.25	9.75
27	0.33	6.33
28	0.25	3.75
29	0.33	4.66
30	0.33	19.16
31	0.33	9.66
32	0.25	9.75
33	0.25	9.75
34	0.08	9.91
35	10.25	9.75
36	0.5	7
37	0.25	9.75
38	3.5	14
39	0.33	9.66
40	0.5	7

شماره	TTR(h)	TBF(h)
1	0.33	8.83
2	0.33	9.5
3	1.99	8
4	0.33	9.5
5	0.33	7.5
6	0.25	8.75
7	0.58	9.41
8	0.33	9
9	0.58	2.08
10	0.25	12.75
11	0.25	16.75
12	0.58	9.4
13	0.33	2.66
14	0.58	9.41
15	0.33	5.16
16	0.25	12.75
17	0.33	12.16
18	0.25	8.5
19	0.58	9.41
20	0.58	9.41

TBF(h)	TTR(h)	شماره
9.5	0.5	72
9.41	0.58	73
17	0.5	74
9.75	0.25	75
9.5	0.5	76
8.5	0.5	77
1.33	6.16	78
5.5	4.5	79
14.16	0.25	80
4	3.5	81
9.25	0.75	82
7.33	0.33	83
9.25	0.75	84
7.83	2.16	85
0.66	8.83	86
9	0.5	87
17	0.5	88
7.33	0.33	89
4.5	5.5	90
9.5	0.5	91
8.5	1.5	92
7.75	0.25	93
7.66	2.33	94
13.5	3.5	95
7	0.33	96
5.5	3.74	97
17.41	0.58	98
15	3	99
3.5	6.5	100
13.33	4.58	101
13.5	0.5	102

TBF(h)	TTR(h)	شماره
9.66	0.33	41
6	0.33	42
3.16	0.33	43
9.66	0.33	44
9.75	0.25	45
17.66	18.33	46
7.5	2.5	47
15.33	0.33	48
9	0.33	49
14.58	0.33	50
17.41	0.85	51
9.16	0.83	52
7.5	0.33	53
15	0.5	54
5.5	4.5	55
9.33	0.5	56
7.41	0.33	57
9.5	0.5	58
7.41	0.33	59
9.66	0.33	60
17.08	0.33	61
6	1.66	62
9	0.5	63
14.58	1	64
9.5	0.5	65
13.33	4	66
3	7	67
17.5	0.5	68
15.33	0.33	69
13.75	4.75	70
7.41	0.25	71

TBF(h)	TTR(h)	شماره
14.75	1.66	134
16.91	2.5	135
17.16	16	136
6.5	3.5	137
45.66	22.5	138
31	4	139
7	3	140
15.5	2.5	141
33.83	5.5	142
6.16	3.83	143
7.25	0.75	144
11.25	156.5	145
4.5	5	146
15	5	147
8	2	148
6.5	11.5	149
4.5	5.5	150
3.5	4	151
5.08	4.5	152
3	2.5	153
15.5	1.5	154
52.74	0.5	155
15.58	2	156
57.24	1	157
67.23	14	158
35.66	10	159
24.16	1	160
115.75	2	161
22.5	5.5	162
3.5	6	163
36	3	164

TBF(h)	TTR(h)	شماره
7.33	0.16	103
9.5	0.5	104
9.5	0.5	105
8.66	0.5	106
6.5	3.5	107
9	0.5	108
9.5	0.5	109
6	0.5	110
2	1.5	111
9.25	0.5	112
6.5	3.25	113
6.66	3.08	114
6.08	4.08	115
17.25	0.5	116
7	11	117
17	0.5	118
9.5	18.5	119
8	2	120
9.5	0.5	121
8.5	0.5	122
9.5	0.5	123
9	0.5	124
7	1.99	125
7.16	0.33	126
5.5	2.5	127
9.58	1	128
23.5	4	129
33.41	0.5	130
7.33	0.25	131
9.5	0.5	132
5.33	0.25	133

TBF(h)	TTR(h)	شماره
4	14	165
43.66	1.5	166
5	1.5	167
73.32	3.33	168
22.66	1.83	169
22.75	5	170
9	1	171
34.58	2.5	172
138.82	4.5	173
13	5.5	174
64.33	1	175
30.75	2	176
66.66	1	177
54	6	178
160.91	3	179
115.16	8	180
25.25	4.5	181
31.16	18	182
53.16	6.5	183
48	28	184
6.5	2.5	185
80.32	18	186
5.5	4.5	187
56	34	188
22	6	189
128.57	1.83	190
7.5	2.5	191
10	8	192
20.66	2.33	193
46.33	18	194
66.5	13.5	195

پیوست ۳_ پایگاه داده‌ای زیرسیستم اطلس کوپکو هیدرولیک ۰۳

شماره	TTR(h)	TBF(h)
1	84.5	4
2	62.49	149.5
3	7.75	0.75
4	18.5	1.5
5	69	18
6	4.33	19.66
7	28	2
8	9.5	0.5
9	13.83	2.5
10	25.33	4.66
11	24.66	681
12	8	2
13	34.41	5.58
14	25.5	4.5
15	3	7
16	18.5	1.5
17	23.5	4.5
18	53.66	2.5
19	5	5
20	106.16	24.5
21	32.74	4
22	5	5
23	4.75	3
24	12	5.5
25	5	23

پیوست ۴- پایگاه داده‌ای زیرسیستم ساتو هیدرولیک

شماره	TTR(h)	TBF(h)
29	9.5	0.5
30	0.5	14.91
31	0.25	7.41
32	18.58	8.33
33	3.25	6.25
34	0.16	7.33
35	3.83	6.16
36	0.16	13.5
37	1.25	7.75
38	54	7.33
39	0.75	7.25
40	0.33	7.33
41	0.5	9.5
42	37.33	6
43	0.5	9.5
44	7	25.5
45	0.5	17
46	5.33	7.99
47	12	5.41
48	0.33	9.66
49	0.5	17.5
50	0.5	1
51	5	3
52	0.5	6
53	13	6
54	8	35.58
55	9.16	8.91
56	203.5	10

شماره	TTR(h)	TBF(h)
1	5.08	4.5
2	4.25	13.75
3	2.41	15.24
4	0.58	9.33
5	10	7.33
6	0.58	9
7	0.16	7.5
8	28.58	9.41
9	54.25	7.25
10	0.25	2.83
11	0.5	9.5
12	8.99	1
13	4.5	5.5
14	0.25	7.41
15	5.75	4.25
16	0.16	7.5
17	0.5	9.5
18	0.5	17
19	0.25	17.75
20	0.58	9.41
21	0.25	17.25
22	0.5	4
23	0.5	16
24	0.16	7.33
25	3.5	6.5
26	0.5	25.5
27	10	7.33
28	1.5	6.5

Abstract

mines extraction system consists of several systems whose proper functioning is necessary to maintain continuous mining production. the first process in producing mineral material in exposed mines is drilling operations which are used in the operation of drilling systems such as Drill Wagon. For this reason, failure of the whole or part of them can be regarded as a threat to the decline in production and profitability of the mine. Unintentional cessation of the mining drilling system due to failure or turbulence and inability to return the system to pre-failure conditions will result in irreparable damage. Therefore, a new approach has been used as resilience so that the system should be able to return to its original condition and mode of operation as soon as possible. This dissertation analyzes the resilience of the Jajarm bauxite mine drilling system. From Jajarm bauxite mine drilling system, four subsystems of Atlas Hydraulic Drill Wagon 01, Atlas Hydraulic Drill Wagon Drill, Atlas Hydraulic Drill Wagon Drill and Sato Hydraulic Drill Wagon were examined for resilience analysis. Two approaches were used to calculate and analyze resilience. In the first method of analysis, resilience is calculated at any time and based on two parameters of reliability and repairability. which were used For reliability and repairability analysis, statistical analysis method and minitab19 software. In the second method of analysis, the resilience is calculated over a period of time, but the resilience of the system cannot be calculated at the moment.

Subsystem resilience analysis of the first method showed that the two subsystems of Atlas Hydraulic Drill Wagon 01 and Atlas Hydraulic Drill Wagon 02 have very high resilience and Atlas Hydraulic Drilling Wagon Subsystems 03 and Sato Hydraulic Drilling Wagon, the resilience of the subsystems reaches 96% after 50 hours. As a result, the repairability parameter has a greater effect on the resilience of subsystems. Also, the results of calculating the resilience of subsystems from the second method of resilience analysis showed that the two subsystems of Atlas Hydraulic Drill wagon 01 and Atlas Hydraulic Drill Wagon have higher resilience than other subsystems. Resilience analysis of the entire drilling system shows that the mine drilling system is fully resilient and all subsystem failures are quickly recovered.

key words: Resilience, reliability, repairability, drilling system, minitab19



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

Resilience analysis of drilling system in Jajarm bauxite mine

Adel Zaheri Abdehvand

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Ramin Rafiee

Advisor:

Dr. Ali Nouri Qarahasanlou

February 2021