

الحمد لله الذي
أعطى الدنيا والآخرة
الحمد لله الذي
أعطى الدنيا والآخرة
الحمد لله الذي
أعطى الدنيا والآخرة



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایانامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

تحلیل تاب آوری سامانه بارگیری در معدن بوکسیت جاجرم

نگارنده: میثم نوایی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رامین رفیعی

استاد مشاور:

دکتر علی نوری قراچسنلو

بهمن ۱۳۹۹

تقدیم به:

خدای رابسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسیم و از ریشه آن ها شاخ و برگ گیرم و از

سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودندشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این

دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند. دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پراز فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم

زندگی کردن و انسان بودن را معنا کردند.

تقدیم به وجود بارزیشان...

شکرو قدردانی

از دست و زبان که برآید کز همه شکرش بدرآید...

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و دشتی من، قلم عفو کشیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و

یاروی بی چشم داشت برای من بوده اند.

از استادان با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمد عطایی و دکتر اسین رفیعی که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیج گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند

و زحمات را بهمانی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد محترم، جناب آقای دکتر علی نوری قراحتلو که زحمات مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب

نمی رسید؛

همچنین از جناب آقای مهندس عادل متحدی به خاطر کمک ها و راهنمایی های بی دریغشان برای تکمیل این پایان نامه صمیمانه سپاس گزارم.

و نیز از تمام دوستان و همراهان همیشگی زندگیم کمال شکرو قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

یشم نوالی - بهمن ۱۳۹۹

تعهد نامه

اینجانب میثم نوایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن گرایش استخراج دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تحلیل تاب آوری سامانه بارگیری در معدن بوکسیت جاجریم تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رامین رفیعی متعهد می شوم:

- 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 می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه 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: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶

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 .

تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی را می‌توان توانایی حفظ عملکرد آن‌ها برای ارائه سرویس در شرایط مواجهه با چالش‌هایی دانست که این عملکرد را با اختلال مواجه می‌کنند. در حوزه‌ی معدنکاری با توجه به حجم بالای عملیات در معادن، حفظ توان تولید، ایمنی و مدیریت ماشین‌آلات از جمله مواردی هستند که می‌توانند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی را تحت تأثیر قرار دهند. با توجه به اهمیت سیستم بارگیری در معادن و هزینه‌های سنگین توقف‌های ناشی از خرابی و نقش حیاتی ماشین‌های بارگیری در معادن، این ضرورت وجود دارد که در این تحقیق، مفهوم تاب‌آوری که در حیطه‌ی مهندسی معدنی تأثیر بسزایی در افزایش ایمنی و بهره‌وری دارد مورد ارزیابی قرار گیرد. بر همین اساس در این پژوهش ابتدا مفاهیم تاب‌آوری معرفی شده و ضمن جمع‌آوری داده‌های خرابی سیستم بارگیری معدن بوکسیت جاجرم، داده‌های خرابی دو زیرسیستم بارگیری (لودر ۰۱ مدل ۴۷۰ و لودر ۰۳ مدل ۷۷۰) جهت ارزیابی تاب‌آوری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین ترتیب تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های کارکرد ماشین لودر در طی مدت زمان ۲۴ ماه صورت گرفت. سپس برای محاسبه تاب‌آوری کل سیستم لودر، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی هر لودر محاسبه شده و همچنین با استفاده از معیارهایی همچون تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت، تاب‌آوری هر دستگاه به‌دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که تاب‌آوری سیستم بارگیری زمانی که تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد باشد در بالاترین سطح خود قرار می‌گیرد، به طوری که سیستم بارگیری بعد از ۱۰۰ ساعت از شروع فعالیت، تاب‌آوری کل سیستم بیشتر از ۹۲ درصد است. این بدان معناست که سیستم بارگیری لودر بعد از خرابی به احتمال ۹۲ درصد قابل بازیابی بوده و به شرایط قبل از خرابی بر می‌گردد.

کلمات کلیدی: لودر، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، معدن بوکسیت جاجرم

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات تحقیق ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ بیان مسئله ۲

۳-۱ ضرورت تحقیق ۵

۴-۱ روش گردآوری اطلاعات ۵

۵-۱ ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: مبانی نظری ۷

۱-۲ مقدمه ۸

۲-۲ تاب آوری ۸

۳-۲ تاب آوری در رشته های علمی مختلف ۱۱

۴-۲ روش های تحلیل تاب آوری ۱۲

۵-۲ تعاریف و مفاهیم رایج در ارزیابی تاب آوری ۱۸

۱-۵-۲ قابلیت اطمینان $R(t)$ ۱۸

۲-۵-۲ قابلیت تعمیر پذیری $M(t)$ ۱۹

۳-۵-۲ قابلیت پشتیبانی $S(t)$ ۲۱

۶-۲ توابع و کمیت های موجود در مهندسی تاب آوری ۲۱

۱-۶-۲ تابع چگالی توزیع احتمال $f(t)$ ۲۱

۲-۶-۲ تابع توزیع تجمعی $F(t)$ ۲۲

۳-۶-۲ تابع قابلیت اطمینان $R(t)$ ۲۲

۴-۶-۲ تابع قابلیت تعمیر پذیری $M(t)$ ۲۳

۵-۶-۲ تابع قابلیت پشتیبانی $S(t)$ ۲۴

۲۴.....	۶-۶-۲ تابع نرخ خرابی $\lambda(t)$
۲۷.....	۷-۶-۲ تابع نرخ تعمیر $\mu(t)$
۲۷.....	۷-۲ روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS)
۲۸.....	۸-۲ توزیع‌های آماری پر کاربرد در ارزیابی قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS)
۲۸.....	۱-۸-۲ توزیع ویبول
۳۰.....	۱-۱-۸-۲ کاربرد توزیع ویبول
۳۱.....	۲-۱-۸-۲ برآورد پارامترهای توزیع ویبول
۳۲.....	۳-۱-۸-۲ بسط‌های توزیع ویبول
۳۵.....	۹-۲ روش تحلیل آماری با استفاده از توزیع ویبول
۳۸.....	۱۰-۲ انواع سیستم‌ها
۳۸.....	۱-۱۰-۲ سیستم‌های متوالی (سری)
۳۹.....	۲-۱۰-۲ سیستم موازی
۳۹.....	۱۱-۲ جمع بندی
۴۱.....	فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته
۴۲.....	۱-۳ مقدمه
۴۲.....	۲-۳ تاریخچه تاب‌آوری
۴۲.....	۳-۳ مطالعات انجام شده در زمینه تاب‌آوری
۵۲.....	۴-۳ مطالعات انجام شده قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) در حوزه تجهیزات معدنی
۶۵.....	۵-۳ جمع بندی
۶۷.....	فصل چهارم: مطالعه موردی
۶۸.....	۱-۴ مقدمه
۶۹.....	۲-۴ آشنایی با معدن بوکسیت جاجرم
۶۹.....	۳-۴ تاریخچه و سوابق معدن بوکسیت جاجرم

۴-۴ معرفی ماشین آلات بارگیری.....	۷۰
۴-۴-۱ ماشین بارگیری لودر.....	۷۰
۴-۴-۱-۱ انواع لودر.....	۷۱
۴-۵ جمع بندی.....	۷۳
فصل پنجم: تحلیل داده ها.....	۷۵
۵-۱ مقدمه.....	۷۶
۵-۲ داده های خرابی ماشین.....	۷۶
۵-۳ تحلیل پارتو.....	۷۶
۵-۴ تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) لودرهای سیستم بارگیری.....	۷۷
۵-۴-۱ تحلیل قابلیت اطمینان لودرهای ۰۱ و ۰۳.....	۷۹
۵-۴-۲ تحلیل قابلیت تعمیرپذیری لودرهای ۰۱ و ۰۳.....	۸۵
۵-۴-۳ تحلیل قابلیت پشتیبانی لودرهای ۰۱ و ۰۳.....	۹۱
۵-۵ تحلیل تاب آوری لودرهای سیستم بارگیری.....	۹۲
۵-۵-۱ تحلیل تاب آوری لودر ۰۱.....	۹۳
۵-۵-۲ تحلیل تاب آوری لودر ۰۳.....	۹۶
۵-۶ جمع بندی.....	۹۹
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۰۱
۶-۱ نتیجه گیری.....	۱۰۲
۶-۲ پیشنهادات.....	۱۰۴
منابع.....	۱۰۶
پیوست.....	۱۱۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. تعاریف مختلف از اصطلاح تاب‌آوری ۹
- جدول ۲-۲. تابع‌های مختلف توزیع ویبول ۳ پارامتری ۲۹
- جدول ۱-۵. مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین، رنج یا دامنه داده‌های خرابی ۸۰
- جدول ۲-۵. پارامترهای محاسبه شده با مناسب‌ترین تابع برازش شده ۸۱
- جدول ۳-۵. مقادیر قابلیت اطمینان لودر ۰.۱ و ۰.۳ ۸۲
- جدول ۴-۵. مقادیر نرخ خرابی لودر ۰.۱ و ۰.۳ ۸۲
- جدول ۵-۵. مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه داده‌های تعمیر لودرها ۸۶
- جدول ۶-۵. پارامترهای تابع توزیع ویبول برای داده‌های تعمیر لودر ۰.۱ و ۰.۳ ۸۷
- جدول ۷-۵. مقدار تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودر ۰.۱ و ۰.۳ ۸۸
- جدول ۸-۵. مقادیر تاب‌آوری لودر ۰.۱ ۹۴
- جدول ۹-۵. مقادیر تاب‌آوری لودر ۰.۳ ۹۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. روش‌های تحلیل تاب‌آوری ۱۳
- شکل ۲-۲. منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک دستگاه ۲۵
- شکل ۳-۲. نمودار راهنما برای انتخاب مدل مناسب تابع توزیع ویبول ۳۷
- شکل ۴-۲. آرایش سری یک سیستم با m زیرسیستم ۳۸
- شکل ۵-۲. شبکه موازی با m زیر سیستم ۳۹
- شکل ۱-۴. لودر چرخ زنجیری ۷۲
- شکل ۲-۴. لودر چرخ لاستیکی ۷۳
- شکل ۱-۵. نمودار تحلیل پارتو برای لودرهای بوکسیت جاجرم ۷۷
- شکل ۲-۵. نمودار احتمال ویبول (wpp) لودر ۰۱ ۸۰
- شکل ۳-۵. نمودار احتمال ویبول (wpp) لودر ۰۳ ۸۰
- شکل ۴-۵. منحنی قابلیت اطمینان لودرهای ۰۱ و ۰۳ ۸۳
- شکل ۵-۵. منحنی نرخ خرابی لودرهای ۰۱ و ۰۳ ۸۴
- شکل ۶-۵. منحنی قابلیت اطمینان سیستم لودرهای معدن بوکسیت جاجرم ۸۵
- شکل ۷-۵. نمودار احتمال ویبول (WPP) داده‌های تعمیر لودر ۰۱ ۸۷
- شکل ۸-۵. نمودار احتمال ویبول (WPP) داده‌های تعمیر لودر ۰۳ ۸۷

- شکل ۵-۹. منحنی تعمیرپذیری لودرهای ۰۱ و ۰۳ به ازای ۲۰۰ ساعت کار..... ۸۹
- شکل ۵-۱۰. منحنی نرخ تعمیر لودرهای ۰۱ و ۰۳ ۹۰
- شکل ۵-۱۱. منحنی قابلیت تعمیرپذیری سیستم لودر معدن بوکسیت جاجرم ۹۱
- شکل ۵-۱۲. منحنی تاب‌آوری لودر ۰۱ ۹۴
- شکل ۵-۱۳. منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری لودر ۰۱ ۹۵
- شکل ۵-۱۴. منحنی تاب‌آوری لودر ۰۳ ۹۷
- شکل ۵-۱۵. منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری لودر ۰۳ ۹۷
- شکل ۵-۱۶. منحنی تاب‌آوری کل سیستم لودرها ۹۸

فصل اول: کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

مخاطرات ناگهانی، پتانسیل این امر را دارند که در نبود سیستم‌های تقلیل مخاطرات، به بحران‌هایی با پیامدهای ترسناک تبدیل شوند [۱]. امروزه در تمامی صنایع، یک عامل مهم و بحرانی، پیوستگی در سیستم است. این پیوستگی در امر بهره‌وری یک رابطه مستقیم با عملکرد زیر سیستم‌های آن مجموعه دارد. از این رو امروزه استراتژی بسیاری از واحدهای تولیدی بر این مبناست تا حد الامکان از وقفه و خرابی‌های غیرقابل انتظار سیستم‌ها به منظور داشتن تولیدی پیوسته جلوگیری کنند. یکی از سیستم‌های حیاتی در معدنکاری روباز، سیستم بارگیری معدن است که بطور مستقیم با تولید رابطه دارد و توقف در این سیستم باعث توقف در امر تولید و در نهایت منجر به توقف عملیات در کارگاه استخراج می‌شود. با توجه به حجم بالای سرمایه‌گذاری ماشین‌آلات معدنی و همچنین هزینه‌های بالای عملیات معدنکاری روباز، داشتن یک عملیات استخراجی با نرخ و توان بهره‌وری بالا و نیز پیوستگی در تولید یک امر ضروری و حیاتی محسوب می‌شود. با توجه به این موارد ضرورت عملکرد صحیح سیستم بارگیری معادن به خوبی آشکار است. به منظور جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش راندمان عملکرد سیستم بارگیری، اطلاع از شرایط کاری ماشین‌آلات معدنی و کنترل آماری دقیق آنها یکی از رهیافت‌های عملی به شمار می‌آید. یکی از روش‌های بسیار توانمند برای پیش‌بینی خرابی‌ها و عملکرد مناسب سیستم در زمان وقوع خرابی، ارزیابی تاب‌آوری سیستم است. با استفاده از این روش می‌توان احتمال بازگشت سیستم به شرایط عادی و پایدار اولیه خود یا نزدیک به آن را تخمین زد.

۱-۲ بیان مسئله

در حوزه‌ی معدنکاری با توجه به محیط خشن و فاجعه خیز آن، مسئله ایمنی و پیوستگی در بهره‌وری جزء موارد لاینفک بوده و از سویی دیگر افزایش تقاضا مواد معدنی، تولید بالا را ملزم داشته که این امر در گرو بکارگیری

سیستم‌های مکانیکی و ماشین‌آلات عظیم الجثه معدنی با بهره‌وری بالا است. سیستم استخراج معادن متشکل از سیستم‌های حفاری، تسطیح، بارگیری و باربری بوده که تحت پشتیبانی سیستم‌های خدمات فنی همچون سیستم تهویه، آبکشی و... فرایند معدنکاری را تکمیل می‌کنند، که عملکرد صحیح هر کدام از آنها برای حفظ تولید پیوسته معدن ضروری است [۲]. این سیستم‌ها به شدت وابسته به موقعیت و اندازه معدن، روش معدنکاری، تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز هستند. یکی از سیستم‌های اساسی معدن سیستم بارگیری است که در فرایند معدنکاری نقش مهمی ایفا می‌کند. در صورت توقف ناخواسته‌ی سیستم بارگیری به دلیل آشفستگی ناگهانی و تعمیرات، بازده تولید معدن به شدت کاهش می‌آید. پس از وقوع چنین آشفستگی‌هایی در یک سیستم، اولین مسئله‌ای که به ذهن می‌رسد، توانایی بازگشت سیستم (بازیابی) به شرایط عادی و پایدار اولیه یا نزدیک به عادی است؛ به شکلی که وضعیت فعلی سیستم از جهات مختلف تقریباً نزدیک به حالت قبل از وقوع آشفستگی یا خرابی باشد. در این حالت برای بازگردانی وضعیت به شرایط اولیه، باید توانایی مشخصی در سیستم بارگیری وجود داشته باشد. توانایی بازگشت وضعیت سیستم به شرایط قبل از خرابی یا نزدیک به آن با استفاده از مفهوم (تاب‌آوری) مورد بررسی قرار می‌گیرد. تاب‌آوری یکی از مفاهیم جدید در حوزه‌ی سیستم‌های مهندسی و غیرمهندسی است و استفاده از آن موجب افزایش ایمنی و بهره‌وری سیستم خواهد شد.

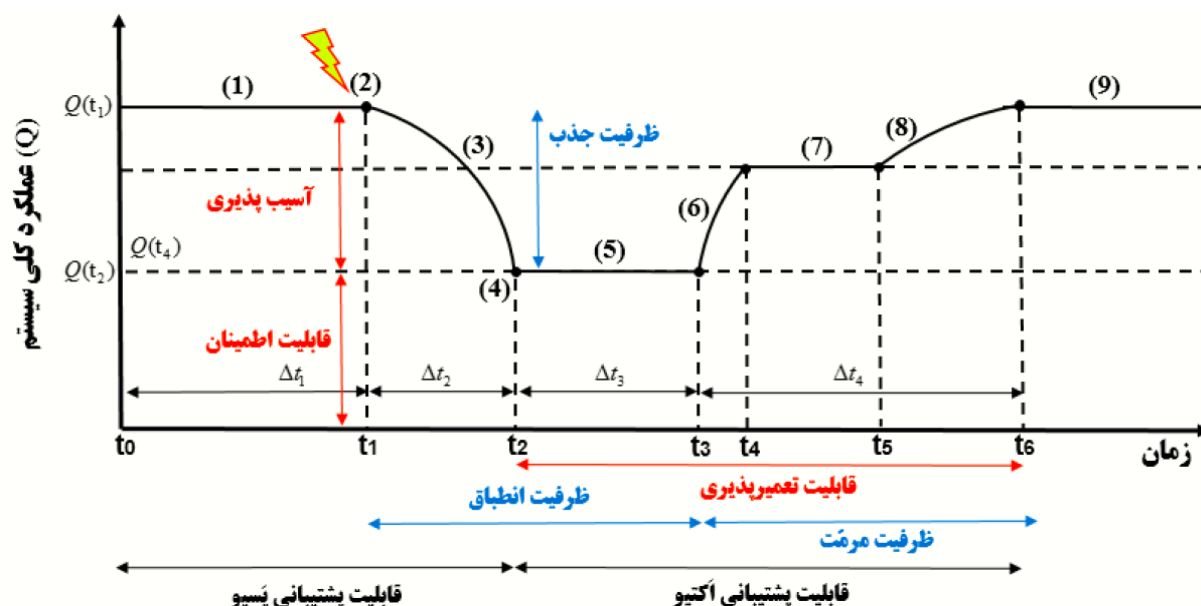
همانطور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود، به طور مثال در سیستم بارگیری پس از وقوع خرابی سطح عملکرد سیستم کاهش می‌یابد و سیستم برای مدتی در شرایط آشفته قرار می‌گیرد. اینکه چه مدت پس از وقوع آشفستگی عملیات بازیابی سیستم آغاز شود به عوامل مختلفی مانند قابلیت پشتیبانی و عملکرد مدیریت بستگی دارد. پس از آنکه بازیابی سیستم آغاز شد این عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سطح عملکرد سیستم به شرایط اولیه بازگردد. شاخص‌های مختلفی همچون، قابلیت اطمینان^۱، قابلیت تعمیرپذیری^۲ و قابلیت پشتیبانی^۳،

^۱ Reliability

^۲ Maintainability

^۳ Supportability

بر روی تاب‌آوری سیستم موثر 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 [۳].



شکل ۱-۱. نمای کلی از مفهوم تاب‌آوری سیستم‌ها [۳]

حالت‌های مختلف شکل ۱-۱ در ادامه توضیح داده شده است:

- ۱- وضعیت عادی تا رویداد ۲- رویداد خرابی ۳- گسترش خسارت ۴- تکمیل خرابی ۵- وضعیت آشفته شده (مرحله تصمیم‌گیری) ۶- ترمیم‌سازی سیستم ۷- وضعیت ثابت اولیه ۸- بهبود سیستم ۹- وضعیت بازیابی شده.
- Δt_۱: زمان تا رویداد Δt_۲: مدت زمان انتشار خرابی Δt_۳: مدت زمان خرابی Δt_۴: مدت زمان بازیابی.

۱-۳ ضرورت تحقیق

خط تولید معادن متشکل از مجموعه‌ای از سیستم‌ها است که عملکرد صحیح هر کدام از آن‌ها برای حفظ تولید پیوسته معدن ضروری است. این سیستم‌ها به شدت وابسته به موقعیت و اندازه معدن، روش معدنکاری، تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز هستند. یکی از سیستم‌های اساسی معادن، سیستم بارگیری (لودر) است که در فرآیند معدنکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مطالب گفته شده، عدم تولید یکی از آن‌ها در اثر خرابی یا آشفستگی و عدم توانایی در بازگرداندن آن به شرایط قبل از خرابی، منجر به کاهش تولید خواهد شد. لذا در این تحقیق به منظور بازگرداندن سیستم به شرایط و کارکرد اولیه خود از تحلیل "تاب‌آوری" استفاده می‌شود، که استفاده از تاب‌آوری در حوزه‌ی سامانه‌های مهندسی و غیر مهندسی موجب افزایش ایمنی و بهره‌وری سیستم خواهد شد.

۱-۴ روش گردآوری اطلاعات

شیوه گردآوری اطلاعات پژوهش از روش ترکیبی کتابخانه‌ای-میدانی است. اصولاً تهیه و تدوین پژوهش‌هایی از این دست اقدامات همه جانبه‌ای را از حیث پژوهش طلب می‌کند، لذا در بخش مبانی نظری با توجه به کمبود اطلاعات راجع به این موضوع در سطح کشور به روش کتابخانه‌ای با استفاده از منابع اینترنتی، کتاب‌ها، مقالات علمی و پایان‌نامه‌ها دامنه‌ای از اطلاعات راجع به رویکرد تاب‌آوری جمع‌آوری شده است.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

در پژوهش حاضر، پس از پرداختن به بیان مسئله و ضرورت تحقیق در فصل اول، به مرور در فصل دوم پایان‌نامه مبانی نظری تحقیق شامل کلیاتی در مورد تاب‌آوری، قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی آورده شده است. سپس روش‌های مختلفی که برای تحلیل این پارامترها استفاده می‌شوند به طور مختصر شرح داده شده است و توابع مهم توزیع آماری که در این زمینه کاربرد دارند اشاره شده است. در فصل سوم این پایان‌نامه به مطالعات

گذشته در زمینه تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف و همچنین مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی پرداخته شده است. در فصل چهارم پایان‌نامه به معرفی مطالعه موردی که معدن بوکسیت جاجرم است و همچنین به معرفی زیرسیستم بارگیری لودر پرداخته شده است. در فصل پنجم پایان‌نامه به تحلیل و تفسیر قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی برای هر یک از لودرها پرداخته شده است. سپس با توجه به رابطه مورد استفاده برای محاسبه تاب‌آوری در این پایان‌نامه، تاب‌آوری لودر، تحلیل و ارزیابی می‌شود. در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آورده شده است.

فصل دوم: مبانی نظری

۲-۱ مقدمه

در محیط‌های پرخطر برای اینکه سیستم بتواند به کار خود ادامه دهد، داشتن یک فضای امن بسیار مهم است. برای ایجاد ایمنی در این محیط‌ها، روش‌های متعددی ارائه شده است. مهندسی تاب‌آوری یکی از روش‌هایی است که در این موضوع پر کاربرد است. از این رو در این فصل ابتدا به تشریح موضوع مفهوم تاب‌آوری پرداخته شده است و تعاریف مختلف آن در حوزه‌های علمی مختلف بیان می‌شود. سپس به بررسی روش‌های محاسبه تاب‌آوری پرداخته شده است. در نهایت با توجه به فرمول استفاده شده برای محاسبه تاب‌آوری در این پایان‌نامه، روش آماری محاسبه تاب‌آوری که شامل محاسبه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی است به طور کامل شرح داده شده است.

۲-۲ تاب‌آوری

تاب‌آوری مفاهیم زیادی از قبیل استحکام، قابلیت اطمینان و قابلیت بازیابی را پوشش می‌دهد. تاب‌آوری را می‌توان به عنوان توان قابلیت مقاومت، جذب و بازیابی سامانه در برابر یک یا چندین حادثه مخرب در نظر گرفت. واژه تاب‌آوری اغلب به مفهوم (بازگشت به گذشته) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اصطلاح در اوایل قرن ۱۷ از ریشه لاتین "resilic" به معنی "جهش به عقب"^۱ وارد زبان انگلیسی شد [۴].

تاب‌آوری در رشته‌های مختلف تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در اینکه این واژه مربوط به کدام حوزه علمی است بحث وجود دارد. عده‌ای در یک قرن اخیر آن را به حوزه علم فیزیک و مکانیک و تست مواد نسبت می‌دهند و عده‌ای در دهه ۱۹۶۰ معتقدند که ریشه‌هایی در روانشناسی کودک و مطالعات زیست محیطی و بوم‌شناسی دارد.

^۱ Bounce Back

تاب‌آوری توسط هالینگ^۱ در سال ۱۹۷۳ در زمینه اکولوژی ارائه شد [۵]. در واقع ادبیات تاب‌آوری از مطالعات تعادل زیست محیطی در سال ۱۹۷۰ سرچشمه می‌گیرد و مطالعات مربوط به تاب‌آوری از همین دوره با تمرکز بر بهبود اختلالات زیست محیطی در مقیاس بزرگ و دستیابی سیستم اکولوژیک به تعادل و حالت پایدار بود. در دهه ۲۰۰۰ مفهوم تاب‌آوری به طور گسترده در شاخه کاهش خطرپذیری سوانح طبیعی به کار گرفته شد. مفهوم تاب‌آوری بیشتر در برخورد با ناشناخته‌ها و عدم قطعیت‌ها به کاربرده می‌شود. در جدول ۱-۲ تعریف تاب‌آوری از افراد و مؤسسات مختلف آورده شده است.

جدول ۱-۲. تعاریف مختلف از اصطلاح تاب‌آوری

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	تعریف
۱	Holling	۱۹۷۳	ظرفیت یک سیستم در تحمل اختلال و حفظ و کنترل عملکردش [۶].
۲	Bruneau et al	۲۰۰۳	رابطه‌ای کمی شامل تنومندی، تندی، تدبیر و افزونگی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری زیرساخت‌های عمرانی جوامع در زمان وقوع زمین لرزه ارائه کردند [۷].
۳	Orwin and wardle	۲۰۰۴	شاخصی برای کمی سازی تاب‌آوری جانداران ویژه خاک در مقابل آشفتگی‌های خارجی ارائه کردند [۸].
۴	Ash and Newth	۲۰۰۷	بهینه‌سازی تاب‌آوری سیستم شبکه‌های زیرساختی بزرگ مقیاس شهرها که تأمین کننده منابع مورد نیاز ساکنین هستند را مورد بررسی قرار دادند [۹].
۵	Cutter et al	۲۰۰۸	تاب‌آوری در بستر مفهوم پایداری است. تاب‌آوری جامعه به طور جدایی ناپذیری در ارتباط با وضعیت محیط زیست و توانای بهبود بر اساس منابع محلی خود است. مفهوم پایداری هسته مطالعات تاب‌آوری است. در چارچوب بلایای طبیعی تاب‌آوری به عنوان توانایی عمل و غلبه بر آسیب و کاهش بهره‌وری و کیفیت زندگی ناشی از رویدادهای شدید طبیعی است [۱۰].
۶	Whitson and Marquez	۲۰۰۹	رابطه کمی برای محاسبه تاب‌آوری وابسته به قابلیت اطمینان شبکه ارائه کردند [۱۱].

^۱ Holling

۷	Wang et al	۲۰۱۰	روشی کمی برای محاسبه ی تاب‌آوری با تمرکز اصلی بر روی توانایی بازیابی سیستم پس از وقوع خرابی است و زمان مورد نیاز برای بازیابی، موفقیت عملیات بازیابی، وزن یا ضریب اهمیت فعالیتی که سیستم‌های اطلاع رسانی ارائه کردند [۱۲].
۸	Cox et al	۲۰۱۱	تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل عمومی را در برابر حملات تروریستی بر اساس ریسک پذیری ارزیابی کردند [۱۳].
۹	رفیعیان و همکاران	۱۳۹۰	توانایی تحمل و ایستادگی سیستم‌های فیزیکی، اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و سکونتگاه‌ها در برابر بلایای به وجود آمده به طوریکه بتواند به سرعت به عقب بازگردد [۴].
۱۰	Henry and Marquez	۲۰۱۲	معیارهای عمومی و رویکردهای کمی برای تاب‌آوری سیستم به عنوان تابعی از زمان ارائه دادند [۱۴].
۱۱	Taşan-Kok et al	۲۰۱۳	مروری مفهومی بر روی تاریخچه و مفهوم تاب‌آوری از دیدگاه مدنی انجام دادند [۱۵].
۱۲	Li and Xi	۲۰۱۴	رابطه‌ی ریاضی برای کمی سازی تاب‌آوری مهندسی با الهام از رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش ارائه کردند [۱۶].
۱۳	Woods	۲۰۱۵	مفاهیم موجود برای تاب‌آوری مهندسی را شامل جهش کردن، تنومندی، انعطاف پذیری و تطبیق پذیری مورد بررسی قرار داد [۱۷].
۱۴	Urruty et al	۲۰۱۶	مروری بر روی مفاهیم پایداری، تنومندی، ریسک‌پذیری و تاب‌آوری در زمینه‌ی سیستم‌های کشاورزی انجام دادند [۱۸].
۱۵	Wang et al	۲۰۱۷	تعاریف رایج تاب‌آوری را مورد بررسی قرار داده و محدودیت‌های خود را به ویژه در موقعیت‌های کنترل تئوری نشان می‌دهد [۱۹].
۱۶	Bostick et al	۲۰۱۸	بحث تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی جامعه را در مقابل فجایع طبیعی و غیرطبیعی مورد بررسی قرار دادند [۲۰].
۱۷	Jufri et al	۲۰۱۹	تعاریف، چارچوب‌ها، روش‌های ارزیابی کمی و استراتژی‌های افزایش تاب‌آوری شبکه برق در برابر رخدادهای آب و هوایی ارائه دادند [۲۱].

جنبه مشترک در همه رویکردهای تاب‌آوری توانایی ایستادگی، استحکام و واکنش مثبت به فشار یا تغییر و سرعت بازگشت به ثبات است. درواقع از تعاریف فوق برمی‌آید که تاب‌آوری دارای دو مؤلفه اصلی است: کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ظرفیت انطباق. به عبارتی تاب‌آوری نه تنها ظرفیت سیستم برای بازگشت به حالت و شرایط قبل از آشفتگی است بلکه بهبود و ارتقاء سیستم از طریق یادگیری و انطباق نیز می‌باشد. در دوره‌ای که عدم اطمینان، غیرقابل پیش‌بینی بودن و تغییر از ویژگی‌های اصلی جهان در حال رشد می‌باشد، تاب‌آوری به عنوان رویکردی برای مواجهه با اختلالات، غافلگیری‌ها و تغییرات معرفی می‌شود.

۲-۳ تاب‌آوری در رشته‌های علمی مختلف

اکولوژی: از این دیدگاه تاب‌آوری عبارت است از سرعت بازگشت سیستم به حالت اولیه، ظرفیت سیستم برای جذب آشفتگی و سازماندهی مجدد، مقدار آشفتگی که سیستم می‌تواند جذب کند و هنوز در همان وضعیت باقی بماند [۵].

اکولوژی اجتماعی^۱: این دیدگاه تاب‌آوری را یادگیری برای زندگی با وجود تغییرات و عدم قطعیت که باعث افزایش قابلیت یادگیری از سوانح می‌شود، ترکیب انواع گوناگون دانش به منظور یادگیری و ایجاد فرصت برای خود سازماندهی، تعریف می‌کند [۵].

اجتماعی^۲: علوم اجتماعی تاب‌آوری را توانایی جوامع برای انطباق با تنش‌ها و آشفتگی‌ها، انجام فعالیت‌های بازیابی برای کاهش از هم گسیختگی اجتماعی، ظرفیت برگشت پذیر با استفاده از منابع فیزیکی و اقتصادی، توسعه‌ی منابع برای بالا بردن ایمنی ساکنان و میزان ظرفیت یک سیستم یا بخشی از آن برای جذب حوادث مخاطره انگیز و بازتوانی سریع، تعریف می‌کنند [۵].

^۱ Social ecology

^۲ Social

اقتصاد^۱: از این دیدگاه تاب‌آوری عبارت است از واکنش و سازگاری ذاتی جوامع در برابر مخاطرات به طوری که آنها را قادر به کاهش خسارت‌های ناشی از مخاطرات سازد[۵].

روانشناسی^۲: علم روانشناسی تاب‌آوری را توانایی فرد برای عقب نشینی در مقابل مصایب، جریانی از ظرفیت برای سازگاری موفق علی‌رغم چالش و عملکرد مثبت در پی شوک‌های طولانی مدت و شدید، تعریف می‌کند.

علوم پایه^۳: تاب‌آوری عبارت است از سرعتی که با آن سیستم صرف نظر از نوسان مورد نیاز بعد از جابجایی به حالت تعادل بر می‌گردد[۵].

۴-۲ روش‌های تحلیل تاب‌آوری

شکل ۱-۲ تقسیم‌بندی ارائه شده توسط حسینی و همکارانش^۴ را در سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد[۲۲]. در این تقسیم‌بندی روش‌های تحلیل تاب‌آوری به دو گروه عمده‌ی کیفی^۵ و کمی^۶ طبقه‌بندی می‌شوند. در این بین، روش‌های کمی در حوزه‌ی سیستم‌های مهندسی کاربرد بیشتری دارند. این روش‌ها به دو دسته‌ی اندازه‌گیری کلی^۷ و مدل‌های مبتنی بر ساختار^۸ 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 آشفتگی با عملکرد آن پس از وقوع آشفتگی مقایسه می‌شود. این روش‌ها نیز به دو بخش قطعی و احتمالی تقسیم می‌شوند.

^۱ Economy

^۲ Psychology

^۳ Science

^۴ Hoseini et al

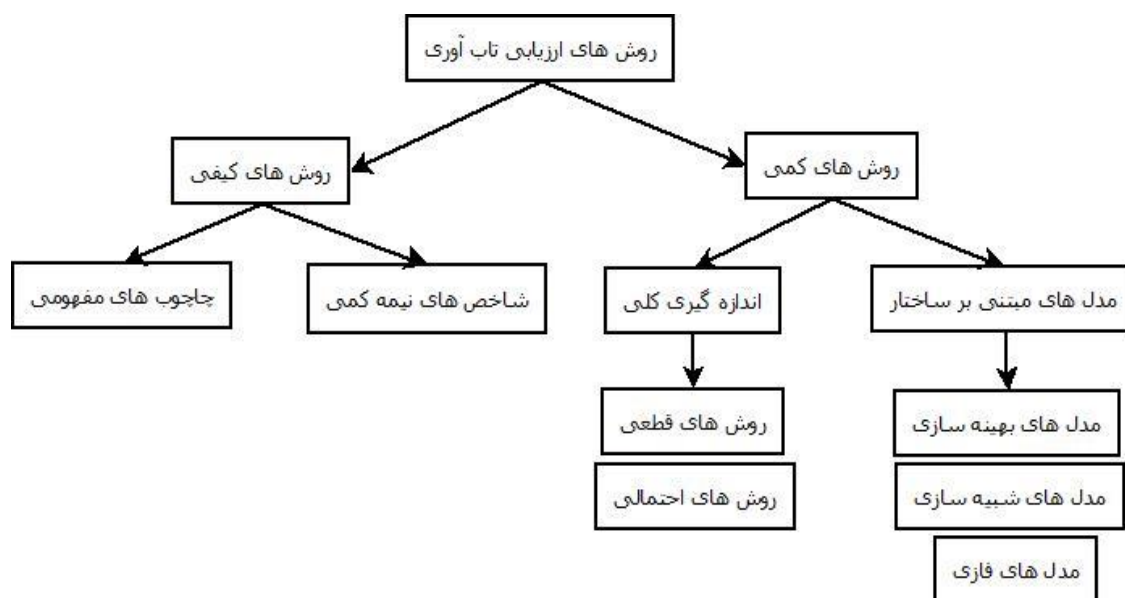
^۵ Qualitatively

^۶ Quantitative

^۷ General measurement

^۸ structure

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. در این بخش، برخی از روابط کمی ارائه شده در سال‌های گذشته شرح داده شده است [۲].



شکل ۱-۲. روش‌های تحلیل تاب‌آوری [۲]

برونئو^۱ و همکارانش رابطه‌ای کمی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری زیرساخت‌های عمرانی در زمان وقوع زمین لرزه ارائه کردند. آنها چهار بُعد برای تاب‌آوری سیستم در نظر گرفتند که شامل تنومندی^۲، تندی^۳، تدبیر^۴ و افزونگی

^۱ Bruneau

^۲ Robustness

^۳ sharpness

^۴ resourcefulness

^۱ می‌شود. رابطه‌ی ارائه شده توسط برونو و همکارانش به صورت رابطه (۱-۲) است. در این رابطه R مقدار تاب‌آوری، $Q(t)$ کیفیت عملکرد زیرساخت‌ها در زمان t ، t_0 زمان وقوع آشفستگی در سیستم و t_1 زمان رسیدن سیستم به حالت عادی پس از آشفستگی است [۲].

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1-2)$$

رز^۲ رابطه‌ای کمی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری در زمینه‌ی اقتصاد ارائه کرد (رابطه ۲-۲) که در آن R مقدار تاب‌آوری، $\% \Delta DY^m$ حداکثر درصد تغییر در خروجی مستقیم در اثر وقوع 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 [۲].

$$R = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY} \quad (2-2)$$

ویتسون و رامیرز-مارکوئز^۳ سعی کردند تا تاب‌آوری را به عنوان یک اندازه‌گیری مهم که وابسته به قابلیت اطمینان شبکه است، تعریف کنند. از نظر آن‌ها شبکه‌ای که علیرغم وقوع آشفستگی‌های خارجی توانایی فراهم کردن خدمات و بازیابی خود را دارد تاب‌آور خواهد بود. آن‌ها رابطه‌ای کمی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری شبکه‌ها ارائه کردند. این رابطه از احتمال وقوع آشفستگی خارجی و همچنین احتمال اینکه سطح عملکرد سیستم تحت تأثیر وقوع آشفستگی خارجی کمتر از مقدار از پیش تعیین شده بشود، برای محاسبه تاب‌آوری شبکه استفاده می‌کند. آن‌ها رابطه (۳-۲) را برای اندازه‌گیری تاب‌آوری شبکه‌ها ارائه کردند. در این رابطه x بردار وضعیت سیستم و هر کدام از مؤلفه‌ی این بردار بیانگر وضعیت کمان‌های شبکه هستند. P بردار احتمال مقادیری است که هر کدام از مؤلفه‌های بردار x به خود اختصاص می‌دهند. $\varphi(x)$ تابع ساختار شبکه و d

^۱ redundancy

^۲ Rose

^۳ witson and ramirez-marquez

عملکرد خواسته شده از شبکه است. R_α نیز تاب‌آوری شبکه است (هنگامی که تعداد α شکست خارجی در نظر گرفته شود)، β نیز شاخص توصیف کننده یک شکست خاص از بین تعداد شکست‌های خارجی است [۲].

$$R_\alpha = \sum_{\beta} P(\varphi(x) \geq d, \alpha, \beta) P(\beta) \quad (3-2)$$

کیملارو^۱ و همکارانش با استفاده از چهار شاخصه اصلی تاب‌آوری یعنی تندی، تنومندی، تدبیر و افزونگی رابطه‌ای کمی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی پیچیده در مقابل آشفته‌گی‌هایی لرزه‌ای ارائه کردند (رابطه ۲-۴). آنها از رابطه ارائه شده برای بررسی تاب‌آوری شش بیمارستان در شهر ممفیس 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 هر زمان کنترل سیستم و ضریب اهمیت خدمات قبل و بعد از وقوع خرابی هستند [۲].

$$R = \alpha \int_{T_{LC}} \frac{Q_1(t)}{T_{LC}} dt + (1-\alpha) \int_{T_{LC}} \frac{Q_2(t)}{T_{LC}} dt \quad (4-2)$$

یون^۲ و همکارانش رابطه‌ای کمی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم ارائه کردند. آنها تاب‌آوری را به صورت مجموع قابلیت اطمینان و نرخ بقا کنشگرای سیستم (مرمت^۳) 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 برای افزایش قابلیت اطمینان بوسیله‌ی تشخیص، پیش‌بینی و اصلاح خرابی انجام می‌شود. رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش معروف به تاب‌آوری مهندسی است و به صورت رابطه (۲-۵) نوشته می‌شود که در آن Ψ برابر با تاب‌آوری سیستم، R قابلیت اطمینان سیستم، ρ برابر با مرمت و K, Λ_p, Λ_D برابر با احتمالات شرطی موفقیت عملیات بازیابی، پیش‌بینی و تشخیص صحیح

^۱ cimellaro

^۲ Youn

^۳ Restoration

هستند. با توجه به اینکه رابطه تاب‌آوری از قابلیت اطمینان سیستم استنتاج شده است، با استفاده از قواعد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیر سیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد [۲].

$$\Psi = R + \rho = R + K \cdot \Lambda_p \cdot \Lambda_D \cdot (1 - R) \quad (5-2)$$

راد^۱ 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 تشکیلات نیز باید در محاسبات مدنظر قرار بگیرد. بر همین اساس، آنها رابطه (۶-۲) را برای تحلیل تاب‌آوری سیستم در زمان t ارائه کردند. در این رابطه، $\Lambda_I(t)$ حاصلضرب 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 قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیرسیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد. در رابطه‌ی ارائه شده توسط راد و همکارانش علاوه بر عدم قطعیت‌ها به عامل زمان نیز توجه شده است [۲].

$$\Psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + \Lambda(t) \cdot (1 - R(t)) = R(t) + (\Pi_1^4 \beta_i) \cdot (1 - R(t)) \quad (6-2)$$

ایوب^۲ رابطه‌ای کمی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری ارائه کرد رابطه (۷-۲) رابطه‌ی ارائه شده از چهار خصوصیت تندی، تنومندی، افزونگی و تدبیر و همچنین زمان شروع خرابی، زمان کامل شدن خرابی، مدت زمان صرف شده برای بازیابی و زمان اتمام بازیابی برای محاسبه‌ی تاب‌آوری استفاده می‌کند. در این رابطه T_i زمان وقوع، T_f زمان خرابی، T_r زمان بازیابی، $\Delta T_f = T_i - T_f$ مدت زمان خرابی و $\Delta T_r = T_r - T_i$ مدت زمان بازیابی هستند. F برابر با پروفایل خرابی بوده و تنومندی و افزونگی سیستم را اندازه می‌گیرد. همچنین R پروفایل بازیابی بوده و قابلیت بازیابی سیستم را اندازه‌گیری می‌کند [۲].

^۱ Rød

^۲ Ayyub

$$R_e = \frac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r} \quad (۷-۲)$$

کای^۱ 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 تعیین کننده خصوصیات وابسته به عملکرد مانند تنومندی، افزونگی، تطبیق پذیری، انعطاف پذیری و قابلیت بقاء است و منابع نت تعیین کننده 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 نهاده‌اند. آنها تاب‌آوری را به صورت رابطه (۸-۲) تعریف کردند. در این رابطه I برابر با شماره آشفستگی و همچنین n برابر با تعداد کل آشفستگی وارد شده به سیستم است. قابلیت‌های دسترسی قبل از آشفستگی (A_1)، بعد از آشفستگی (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 زمانی است که آشفستگی روی می‌دهد و t_3 معرف زمان اتمام بازیابی سیستم است. نسبت $A / \ln(t)$ برابر با درجه تاب‌آوری است. رابطه ارائه شده نشان دهنده این موضوع است که با افزایش قابلیت دسترسی سیستم (A) و کاهش زمان بازیابی (t) مقدار تاب‌آوری افزایش می‌یابد [۲].

$$\Psi = \frac{A_1}{n \ln(t_1)} \sum_{i=1}^n \frac{A_2 A_3}{\ln(t_3 - t_2)} \quad (۸-۲)$$

همان طور که مشاهده شد، برخی از روش‌های ارائه شده در این بخش مانند روش ارائه شده توسط برونو و همکارانش به صورت قطعی با مسئله تاب‌آوری برخورد می‌کنند و عدم قطعیت‌ها را در نظر نمی‌گیرند. در مقابل روش‌هایی مانند روابط ارائه شده توسط یون و همکارانش با استفاده از علم احتمالات، عدم قطعیت را نیز وارد

^۱ Cai

مسئله می‌کنند. همچنین در برخی از روش‌ها مانند رابطه ارائه شده توسط راد و همکارانش هم به عامل زمان و هم به عدم قطعیت‌ها توجه شده است. بر همین اساس، در این پژوهش از معادله ۲-۶ استفاده خواهد شد [۲].

۲-۵ تعاریف و مفاهیم رایج در ارزیابی تاب‌آوری

ارزیابی تاب‌آوری با استفاده از سه مفهوم اصلی قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی (RMS)^۱ یک سیستم اطلاق می‌شود که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

۲-۵-۱ قابلیت اطمینان^۲ $R(t)$

قابلیت اطمینان یک شاخص مهندسی و ریاضی برای بررسی کمی خرابی‌ها^۳ و پیشبینی زمان عملیات مفید هر دستگاه یا سیستم مهندسی می‌باشد. در تحلیل قابلیت اطمینان، مجموعه‌ای از مفاهیم، کمیت‌ها و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و پرکاربرد مطرح است. برخی از کمیت‌های مورد استفاده در مهندسی قابلیت اطمینان به شرح زیر است [۲۳]:

خرابی: عدم توانایی یک بخش یا یک قطعه از سیستم یا دستگاه در انجام وظایف مشخص شده.

حادثه^۴: وقوع رویداد مضر در صورت عدم کنترل موثر منبع انرژی یا عوامل رفتاری.

نرخ خرابی یا نرخ حادثه: تعداد خرابی یا حادثه در واحد زمان.

^۱ Reliability&Maintainability&supportability

^۲ Reliability

^۳ failure

^۴ event

تعمیرات و نگهداری: کلیه فعالیت‌های لازم برای نگهداری و آماده‌سازی یک سیستم یا دستگاه در یک شرایط مشخص.

زمان بین خرابی‌ها (TBF)^۱: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه.

میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)^۲: متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌های یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه (نسبت مجموع زمان کارکرد بخش موردنظر از دستگاه به تعداد کل خرابی‌های آن بخش).

زمان تا خرابی^۳ (TTF): عمر مفید یک بخش یا یک قطعه غیر قابل تعمیر از دستگاه.

میانگین زمان تا خرابی (MTTF): متوسط عمر یک بخش یا یک قطعه غیر قابل تعمیر از دستگاه.

زمان تعمیر (TTR)^۴: زمان مورد نیاز برای تعمیر یا رفع اشکال قطعه یا بخش خراب شده دستگاه.

میانگین زمان تعمیرات (MTTR): متوسط زمان صرف شده برای تعمیرات یک قطعه یا یک بخش از دستگاه.

نرخ تعمیر: تعداد تعمیر در واحد زمان

زمان کارکرد دستگاه: مدت زمانی که دستگاه در حال انجام کار است.

۲-۵-۲ قابلیت تعمیرپذیری^۵ $M(t)$

عملکرد یک دستگاه علاوه بر طراحی و شرایط محیط کار، به میزان سرویس و تعمیر و نگهداری انجام شده در طی عمر عملیاتی دستگاه بستگی کامل دارد. سرویس کاری مطلوب مثل تعویض روغن به موقع، تعمیر یا

^۱ Time between failure

^۲ mean time between repairs

^۳ Time to failure

^۴ Time to repairs

^۵ Maintainability

تعویض مناسب قطعات خراب شده و نگهداری دستگاه در محل مناسب در ساعات غیر کاری، از جمله عواملی هستند که باعث افزایش عمر مفید دستگاه می‌شوند [۲۴].

به هر عملیاتی (غیر از سرویس کاری عادی مثل تعویض روغن یا سوخت‌گیری) که به منظور حفظ یک دستگاه در شرایط عملیاتی موجود یا بازگرداندن دستگاه به شرایط قبل از خرابی انجام گیرد، تعمیر و نگهداری گفته می‌شود [۲۴]. اهداف اصلی تعمیر و نگهدار عبارت اند از:

- افزایش دوره عمر مفید دستگاه
 - افزایش قابلیت اطمینان و کارایی
 - کاهش تعمیرات اتفاقی
 - کاهش هزینه توقف‌های تولید و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از خرابی‌های دستگاه
- در هر پروژه صنعتی بسته به اهداف پروژه و مشخصات تجهیزات مورد استفاده، هر یک از اهداف مذکور می‌تواند پررنگ‌تر و یا کم اهمیت‌تر باشد. در حالت کلی، افزایش طول عمر دستگاه، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های توقف‌های تولید، معمولاً سه هدف عمده تعمیر و نگهداری در تمامی صنایع به شمار می‌آیند. در این میان، کاهش هزینه به عنوان یک هدف بالادستی، دو هدف دیگر را نیز پوشش می‌دهد. لذا در بهترین حالت، برای افزایش طول عمر ماشین، حداقل نمودن هزینه‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد، اما در برخی دستگاه‌ها و فرآیندهای مهندسی، گاهی به دلیل وجود محدودیت‌های بسیار جدی در منابع در دسترس، مهندسين مجبور به پذیرش هزینه بالای یک استراتژی به جای یک استراتژی کم هزینه‌تر می‌شوند. لذا، تعیین هدف تعمیر و نگهداری، تعیین کننده بسیاری از خط و مشی‌های اجرایی در مدیریت ماشین‌آلات است [۶].

قابلیت تعمیرپذیری تحت تأثیر عوامل طراحی از قبیل پیچیدگی تجهیزات، تعویض‌پذیری و در دسترس بودن قطعات قرار دارد. دیگر عوامل مؤثر بر قابلیت تعمیرپذیری، عوامل مرتبط با محیط عملیات مانند تجربه کاری، آموزش و مهارت متصدی، شرایط فیزیکی کار و نظارت بر عملکرد کارکنان نت آن است.

۲-۵-۳ قابلیت پشتیبانی^۱ $S(t)$

پشتیبانی از نگهداری و تعمیرات، به عنوان توانایی گروه نت برای تأمین تقاضای منابع مورد نیاز برای نگهداری از یک وسیله تحت شرایط مشخص و استراتژی نت معین تعریف می‌شود. تعیین و توسعه فرآیند نگهداری، تدارکات قطعات یدکی، خرید ابزارآلات و تسهیلات نت، تدارکات و مدیریت، ثبت اسناد، توسعه و آموزش برنامه‌های نت به کارکنان برخی از موارد ضروری برای پشتیبانی نت است. علاوه بر این، برای سیستم‌های پیچیده، پیشرفته و سیستم‌های پیوسته تولید، پشتیبانی خارجی مانند پشتیبانی از طرف کارخانه تولیدکننده نیز ضروری است.

۲-۶-۲ توابع و کمیت‌های موجود در مهندسی تاب‌آوری

تاب‌آوری که خود شامل سه مفهوم اصلی قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) است، تا حد بسیار زیادی بر مفاهیم علم آمار و جمع‌آوری داده‌های آماری استوار است و در کلیه مراحل مدلسازی و تحلیل از تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود. برخی توابع پرکاربرد در مهندسی تاب‌آوری در ادامه ارائه شده است.

۲-۶-۱ تابع چگالی توزیع احتمال^۲ $f(t)$

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 این محاسبات، "زمان بین خرابی‌ها" به عنوان متغیر تصادفی در نظر

^۱ Suportability

^۲ Probability distribution density function

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 [۲۵].

۲-۶-۲ تابع توزیع تجمعی^۱ $F(t)$

تابع توزیع تجمعی، توزیع احتمال وقوع یک متغیر را بیان می‌کند. تابع توزیع تجمعی سطح زیر منحنی تابع چگالی احتمال است. رابطه این تابع با تابع چگالی تجمعی احتمال به صورت رابطه (۲-۹) است.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (۲-۹)$$

که در رابطه (۲-۹)، $f(t)$ تابع توزیع احتمال، $F(t)$ تابع توزیع تجمعی و t زمان است.

لازم به ذکر است که در انتگرال فوق، مقدار کران پایین در واقع از $-\infty$ می‌باشد. ولی در بحث RMS زمان خرابی از لحظه شروع به کار یعنی زمان صفر در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

۲-۶-۳ تابع قابلیت اطمینان $R(t)$

تعریف ریاضی قابلیت اطمینان یک دستگاه یا سیستم به طور کلی به صورت رابطه (۲-۱۰) قابل ارائه است.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (۲-۱۰)$$

این تابع در حالت ساده به صورت قابلیت اطمینان در زمان خوانده می‌شود، همچنان که شرح داده شده این کمیت از جنس احتمال بوده و به صورت درصد بیان می‌شود [۲۷].

^۱ Cumulative distribution function

۲-۶-۴ تابع قابلیت تعمیرپذیری $M(t)$

قابلیت تعمیر و نگهداری از جنس احتمال است و برای محاسبه آن از توابع توزیع احتمالی زمان‌های تعمیر که متغیر تصادفی در بحث قابلیت تعمیر و نگهداری است استفاده می‌شود. در اینجا نیز بعد از تعیین تابع توزیع تعمیر، تابع قابلیت تعمیر و نگهداری محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در بحث قابلیت اطمینان متغیر تصادفی، زمان بین خرابی‌ها (TBF) بود و تابع چگالی خرابی محاسبه می‌شد در حالی که در تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری متغیر تصادفی، زمان تعمیرات (TTR) است و تابع چگالی تعمیر (fdr) محاسبه می‌شود. فرمول ریاضی قابلیت تعمیر و نگهداری به صورت رابطه (۲-۱۱) است [۲۸].

$$M(t) = \int_0^t f_{dr}(t) dt \quad (2-11)$$

در رابطه بالا t زمان مورد نیاز، f_{dr} تابع چگالی احتمال برای زمان تعمیر و $M(t)$ تابع قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد. در واقع تابع قابلیت تعمیر و نگهداری همان توزیع تجمعی احتمال زمان‌های تعمیر می‌باشد و فرمول آن برای توزیع‌های نمایی^۱، ویبول^۲، نرمال^۳، لاگ نرمال^۴ و گاما^۵ که نسبت به سایر توابع توزیع کاربرد بیشتری در تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری دارند همان روابط توزیع تجمعی این توابع در تحلیل قابلیت اطمینان است که پارامترهای آن بر اساس زمان‌های تعمیر تعیین می‌شوند.

^۱ Exponential

^۲ Weibull

^۳ Normal

^۴ Log Normal

^۵ Gamma

۲-۶-۵ تابع قابلیت پشتیبانی $S(t)$

قابلیت پشتیبانی از جنس احتمال است و برای محاسبه آن از توابع توزیع احتمالی زمان‌های تحویل که متغیر تصادفی در بحث قابلیت پشتیبانی می‌باشد استفاده می‌شود. در اینجا نیز بعد از تعیین تابع توزیع تحویل، تابع قابلیت پشتیبانی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در بحث قابلیت پشتیبانی متغیر تصادفی، زمان تحویل (TTD) می‌باشد و تابع چگالی تحویل^۱ (f_{dd}) محاسبه می‌شود. رابطه ریاضی قابلیت پشتیبانی به صورت رابطه (۱۲-۲) است.

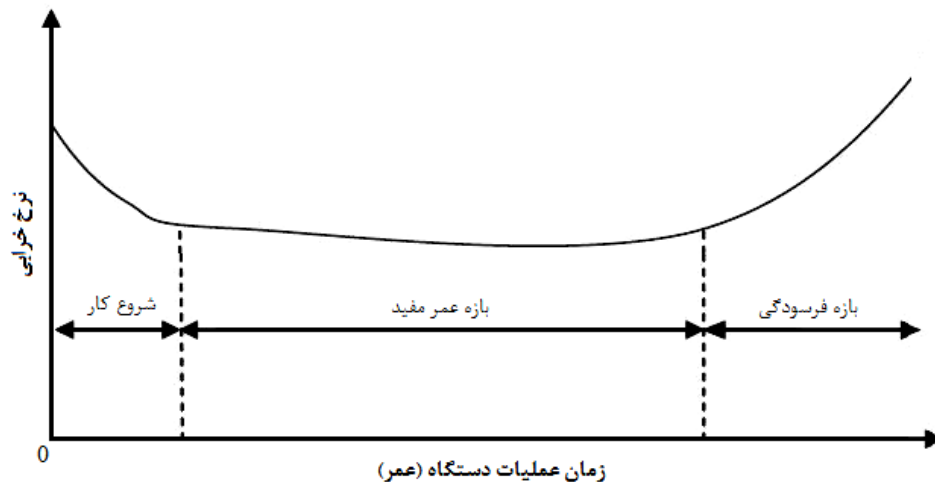
$$S(t) = \int_0^t f_{dd}(t) dt \quad (12-2)$$

در معادله بالا t زمان مورد نظر، f_{dd} تابع چگالی احتمال برای زمان تحویل و $S(t)$ تابع قابلیت پشتیبانی است. در واقع تابع قابلیت پشتیبانی همان توزیع تجمعی احتمال زمان‌های تحویل می‌باشد و فرمول آن برای توزیع‌های نمایی، ویبول، نرمال، لاگ نرمال و گاما که نسبت به سایر توابع توزیع کاربرد بیشتری در تحلیل قابلیت پشتیبانی دارند همان روابط توزیع تجمعی این توابع در تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری می‌باشد که پارامترهای آنها بر اساس زمان‌های تحویل تعیین می‌شوند [۲۹].

۲-۶-۶ تابع نرخ خرابی $\lambda(t)$

میزان خرابی‌های هر دستگاه در طول عمر خود به طور خاص از یک روند تبعیت می‌کند. نرخ خرابی، به عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی کارآمدی دستگاه و وضعیت عملیاتی آن، در مبحث RMS از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. هر دستگاه در طول عمر خود به صورت کلی سه بازه زمانی مشخص را طبق شکل (۲-۲) سپری می‌نماید. این منحنی به منحنی وان حمامی مشهور است [۳۰].

^۱ Delivery density function



شکل ۲-۲. منحنی وان شکل میزان نرخ خرابی در طول مدت عمر یک دستگاه [۳۰]

طبق شکل مذکور، در اوایل عمر دستگاه (بازه شروع کار)، ابعاد فنی و مشخصات عملیاتی بخش‌های مختلف برای کاربر به طور کامل مشخص نبوده و رفتار دستگاه تا حدودی ناشناخته است. این امر باعث بروز خرابی‌ها و توقف‌هایی در تولید در اوایل عمر دستگاه می‌شود. همچنین کنترل کیفیت ضعیف، مواد و لوازم یدکی ناسازگار با دستگاه، نقاط ضعف موجود در ساخت دستگاه، تعمیر نامناسب و خطاهای انسانی از جمله دلایل دیگر بالا بودن نرخ خرابی در اوایل عمر دستگاه می‌باشند [۳۰].

مدتی پس از شروع و راه‌اندازی دستگاه، نرخ خرابی با گذشت زمان کمتر می‌شود. در اواسط عمر دستگاه با توجه به شناخت کافی کاربر و همچنین برنامه‌ریزی صحیح برای تعمیر و نگهداری، دستگاه از نظر خرابی به حالت پایداری نسبی رسیده و نرخ خرابی در بازه زمانی کار مفید تقریباً ثابت می‌ماند. با نزدیک شدن به انتهای عمر دستگاه، کلیه بخش‌های دستگاه دچار فرسودگی و کاهش کیفیت می‌شوند. در نتیجه قطعات دستگاه دچار خرابی‌های غیرملموس شده و قطعات تحت تنش‌های بالاتر از توان خود قرار می‌گیرند و با گذشت زمان، نرخ خرابی دستگاه افزایش می‌یابد. در تحلیل‌ها، تعریف ریاضی نرخ خرابی یک دستگاه به طور کلی به صورت رابطه (۲-۱۳) است:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (۱۳-۲)$$

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

- پیش‌بینی زمان بهینه و هزینه دوره ضمانت دستگاه
- پیش‌بینی و مدیریت قطعات یدکی
- تخمین زمان پایان بازه شروع کار.

هرکدام از دو مورد اول به تنهایی زمینه پیچیده و وسیعی از مهندسی ماشین آلات و مهندسی RMS را شامل می‌شوند، لذا برای ارزیابی هر یک از آنها تحقیق جداگانه ای لازم است. اما مورد سوم یک پارامتر مدیریتی است که می‌توان با ارزیابی رفتار دستگاه و داده‌های خرابی، برای هر بخش یا کل دستگاه تعریف و محاسبه شود.

داده‌های خرابی به دو دسته داده‌های کامل^۱ و سانسور شده^۲ تقسیم می‌شوند که در ادامه شرح داده شده است [۲۹]:

الف- داده‌های کامل: تمام زمان‌های خرابی مربوط به دستگاه مورد نظر که در یک بازه زمانی اتفاق می‌افتد، مشخص باشد.

^۱ Complete data

^۲ Censored data

ب- داده‌های سانسور شده: زمان خرابی دستگاه مورد نظر خارج از دوره زمانی مورد مطالعه باشد. در این صورت تعداد دقیق خرابی که در یک بازه اتفاق می‌افتد معلوم نیست. در این حالت سانسور رخ داده است.

۷-۶-۲ تابع نرخ تعمیر $\mu(t)$

در بحث قابلیت تعمیر و نگهداری با نرخ تعمیر (μ) سر و کار داریم که در بحث قابلیت اطمینان نرخ خرابی (λ) مطرح بود و نرخ تعمیر ثابت بصورت رابطه (۷-۶-۲) است [۲۸].

$$M = \frac{1}{MTTR} \quad (۷-۶-۲)$$

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

۷-۲ روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS)

روش‌ها و تکنیک‌های مختلف و متنوعی برای بررسی و تحلیل قابلیت RMS دستگاه‌ها ارائه شده است که در ادامه، چهار روش اصلی مورد استفاده در تحلیل‌ها معرفی خواهد شد.

- روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تاثیرات آنها^۱ FMEA

- روش مارکوف^۲

- روش تحلیل درخت خطا^۳

^۱ Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

^۲ Marcov Theory

^۳ feilur tree analysis

• روش تحلیل آماری^۱

در تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی کامل‌ترین و جامع‌ترین روش، روش تحلیل آماری می‌باشد، به این دلیل که طبق تعاریف ارائه شده قابلیت (RMS) یک کمیت آماری و از جنس احتمال است. لذا، روش تحلیل آماری، توانمندترین روش تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی به شمار می‌آید. به دلیل استفاده از روش تحلیل آماری در این پژوهش، توضیحات این روش به صورت بخش جداگانه در ادامه بحث ارائه شده است.

۲-۸ توزیع‌های آماری پرکاربرد در ارزیابی قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS)

برای محاسبه‌ی شاخص‌های (RMS)، ابتدا باید تابع توزیع طول عمر را بدست آورد. توزیع‌های آماری به دو نوع متغیرهای گسسته و پیوسته تقسیم‌بندی می‌شوند. توزیع‌های پیوسته پرکاربرد در (RMS) شامل، توزیع‌های ویبول، نمایی، نرمال و گاما است. در ادامه توزیع ویبول که در این پژوهش از آن استفاده شده است بررسی می‌کنیم.

۲-۸-۱ توزیع ویبول

توزیع ویبول در سال ۱۹۳۹ توسط والدی ویبول^۲ ابداع گردید. امروزه، متداول‌ترین مدل مورد استفاده در مطالعات قابلیت RMS، توزیع ویبول است. این توزیع به طور وسیع در شاخه‌های مختلف مهندسی برای مدل‌بندی زمان‌های شکست کاربرد زیادی دارد. دلیل اهمیت این توزیع رفتار تابع نرخ شکست آن است که با

^۱ statistical analysis

^۲ Waldi Weibull

تغییر پارامترهای ویبول می‌تواند تابع صعودی، نزولی یا ثابت باشد و به خاطر رفتار تابع نرخ شکست^۱ آن، این توزیع برای الگوسازی داده‌های مختلف دارای انعطاف پذیری زیادی است. همچنین از تابع توزیع ویبول در بررسی عملکرد و پیشبینی رفتار ماشین‌آلات و تجهیزات و نیز سیاست گذاری نگهداری و تعمیرات آنها استفاده می‌شود [۳۱]. اگر متغیر تصادفی t دارای توزیع ویبول سه پارامتری^۲ باشد تابع چگالی^۳، چگالی تجمعی^۴، قابلیت اطمینان، نرخ شکست، قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر^۵ توزیع ویبول به شرح جدول (۲-۲) است.

جدول ۲-۲. تابع‌های مختلف توزیع ویبول ۳ پارامتری [۲۹]

$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$	تابع چگالی
$F(t) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right)$	تابع چگالی تجمعی
$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$	قابلیت اطمینان
$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1}$	نرخ خرابی
$M(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$	قابلیت تعمیرپذیری
$\mu(t) = \frac{f(t)}{M(t)} = \frac{\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]}{M(t)}$	نرخ تعمیر

^۱ Failure rate

^۲ Three-parameter Weibull distribution

^۳ Density function

^۴ Cumulative density

^۵ Repair rate

در جدول (۲-۲)، β پارامتر شکل، α پارامتر مقیاس و γ پارامتر مکان یا گارانتی نام دارد. هرگاه در رابطه‌ی بالا مقدار γ برابر با صفر باشد، توزیع ویبول دو پارامتری با پارامترهای β و α بدست می‌آید.

۲-۸-۱-۱ کاربرد توزیع ویبول

توزیع ویبول یکی از پرکاربردترین توزیع‌های آماری در نظریه قابلیت اطمینان و مدل‌سازی داده‌های مربوط به طول عمر است. از مطالعات مربوط به مرگ و میر و طول عمر قطعات و دستگاه‌های پیچیده گرفته تا میزان استحکام مواد در مقابل فشار، همه و همه از توزیع ویبول برای مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌کنند [۳۲].

تابع ویبول اولین بار در سیستم‌های مهندسی نت^۱ پیشنهاد شده است، اما تاکنون به بسیاری از سیستم‌های دیگر مهندسی هم گسترش یافته است. در مورد ابزارها و دستگاه‌ها کاربرد بسیاری دارد. و معمولاً می‌بایست به طور تجربی امکان انطباق آن مورد آزمایش قرار گیرد. یکی از کاربردهای خاص آن برای سیستم‌هایی که از اجزای متعددی تشکیل شده‌اند و سیستم زمانی خراب می‌شود که هر یک از اجزای آن خراب شود، می‌باشد. می‌توان از آن برای تخمین توزیع نرمال هم استفاده کرد البته محدود به مقادیر مثبت می‌شود. مثالی که تجربه شده است و از توزیع ویبول استفاده وفور می‌شود در مورد عمر لامپ‌ها است. همچنین این توزیع شامل مزایایی است که در ادامه به آن پرداخته شده است [۳۲].

۱- این توزیع می‌تواند یک مدل دقیق برای مشخصه‌های مورد مطالعه ارائه دهد و انعطاف‌پذیری آن باعث می‌شود که برای تحلیل داده‌هایی که توزیع آنها دقیقاً مشخص نیست و مورد تردید است، ابزاری ایده‌آل باشد.

۲- پارامترهای α و β دارای تفسیر فیزیکی مناسبی هستند.

۳- زمانی که متغیر مورد نظر، دارای داده‌های کمی است، می‌توان پیش‌بینی‌های دقیقی با این توزیع داشت.

^۱ Net Engineering

۴- با این توزیع مشخصه‌ای چون ریسک همراه با سیستم مثل احتمال رسیدن به یک مقدار معین و مورد انتظار را می‌توان ارزیابی و آنالیز کرد.

۲-۸-۱-۲ برآورد پارامترهای توزیع ویبول

توزیع ویبول یکی از توزیع‌های مهم احتمال به ویژه برای آنالیز قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری است که می‌تواند در دو گروه کلی روش‌های گرافیکی و تحلیلی^۱ طبقه‌بندی شود.

الف- روش‌های گرافیکی: معمولاً روش‌های گرافیکی در اکثر موارد به کار برده می‌شوند زیرا این روش‌ها آسان و سریع هستند. به هر حال استفاده از آنها با یک احتمال خطای زیاد همراه است. در اینجا ما دو روش گرافیکی مهم را بررسی می‌کنیم [۳۲].

۱- نمودار احتمال ویبول: برای توصیف طول عمر یا زمان‌های شکست سیستم‌های مشخص، اغلب از توزیع ویبول استفاده می‌کنند. نمودار احتمال ویبول یک روش گرافیکی برای بررسی این فرضیه می‌باشد که آیا داده‌ها از توزیع ویبول پیروی می‌کنند. همچنین برای برآورد پارامترهای توزیع ویبول از این نمودار استفاده می‌شود.

۲- رسم نمودار خطر: رسم نمودار خطر یکی از روش‌های ارائه برآوردی برای پارامترهای توزیع ویبول است، که بوسیله رسم نمودار تابع تجمعی $H(x)$ در برابر زمان‌های شکست روی یک کاغذ خطر انجام می‌گیرد.

از معایب روش گرافیکی می‌توان به مطالب زیر اشاره کرد:

۱- این روش فقط برای توزیع ویبول دو پارامتری استفاده می‌شود و برای توزیع ویبول سه پارامتری نمی‌توان استفاده نمود.

۲- این روش از دقت کمی برخوردار است.

^۱ Graphic and analytical

ب- روش‌های تحلیلی^۱: مقتضی احتمال خطای زیاد در استفاده از روش گرافیکی، ترجیح می‌دهیم از روش‌های تحلیلی استفاده کنیم. این انگیزه با استفاده از سرعت بالای کامپیوتر امکان‌پذیر است. روش‌های کلاسیک برآورد پارامترهای یک توزیع ویبول^۲ یعنی استفاده از روش گشتاورها^۳، ماکزیمم درستنمایی و کمترین مربعات، هیچ یک فرم بسته‌ای برای برآورد پارامتر شکل توزیع ویبول فراهم نمی‌کنند و همگی در برآورد پارامترهای توزیع ویبول اریب هستند. از این رو است که مساله یافتن برآوردهایی با خواص آماری بهتر کماکان مورد توجه پژوهشگران است. این مساله با در نظر گرفتن اهمیت این توزیع در مطالعات کاربردی جلوه خاصی پیدا می‌کند.

۲-۸-۱-۳ بسط‌های توزیع ویبول

خانواده توزیع ویبول شامل توزیع ویبول دو پارامتری، سه پارامتری، اصلاح شده و آمیخته است که در این پژوهش به ویبول دو پارامتری، سه پارامتری و آمیخته می‌پردازیم.

الف) توزیع ویبول ۳ پارامتری^۴: توزیع‌های ویبول سه پارامتری یکی از مورد استفاده‌ترین توزیع‌های کاربرد در زمینه‌ی (RMS) می‌باشند. زیرا تغییرات پارامترهای شکل و مقیاس آنها انعطاف پذیر بوده و امکان برازش این توزیع‌ها به انواع متفاوتی از داده‌ها وجود دارد. تابع چگالی و قابلیت اطمینان توزیع ویبول سه پارامتری به شرح رابطه (۱۵-۲) و (۱۶-۲) است.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (15-2)$$

^۱ analytical

^۲ Weibull distribution

^۳ Torques

^۴ 3-parameter Weibull distribution

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (۱۶-۲)$$

$F(t)$ تابع چگالی توزیع ویبول سه پارامتری نامیده می‌شود که β پارامتر شکل^۱، α پارامتر مقیاس^۲ و γ پارامتر مکان^۳ یا گارانتی نام دارد. هرگاه در رابطه‌ی (۱۵-۲) مقدار γ برابر با صفر باشد، توزیع ویبول دو پارامتری^۴ با پارامترهای β و α بدست می‌آید [۲۹].

ب) توزیع ویبول آمیخته^۵: کاربرد و استفاده از توزیع‌های آمیخته به عنوان یکی از روش‌های داده کاوی، سابقه بسیار طولانی در اغلب زمینه‌های علمی از جمله پزشکی، مدیریت و غیره دارد. مزیت استفاده از این گونه توزیع‌ها زمانی که داده‌ها دارای پراکندگی زیاد و حتی گم شده باشند، به دلیل انعطاف پذیری فوق العاده آنها به خوبی معلوم است.

یک توزیع آمیخته ترکیبی از دو یا چند توزیع آماری است. وقتی نمونه گیری از یک جامعه غیر همگن متشکل از دو یا چند زیر جامعه هر یک با توزیعی متفاوت انجام می‌گیرد، با توزیعی آمیخته سرو کار داریم. برای مثال، توزیع زمان از کار افتادگی آمیخته‌ای از مؤلفه‌های سالم و معیوب و یا مدت زمانی که بیماران قلبی در گروه‌های سنی متفاوت پس از یک عمل جراحی زنده می‌مانند. در چنین حالاتی نمودار منحنی مربوط به تابع چگالی اندازه خصوصیت مورد نظر جامعه آماری می‌تواند دارای چند مد یا نما باشد. در بسیاری موارد با رسم منحنی فراوانی نسبی داده‌ها و مشاهده دو یا چند نقطه ماکسیمم در آنها، پی می‌بریم که جامعه آماری از لحاظ خصوصیت مورد بررسی یک جامعه ناهمگن می‌باشد.

^۱ shape

^۲ scale

^۳ location

^۴ 2-parameter Weibull distribution

^۵ Mixed Weibull distribution

توزیع آمیخته ویبول که با نام ویبول چند نمایی نیز شناخته می‌شود برای مدل‌سازی داده‌ای که در نمودار احتمالاتی ویبول، روی یک خط مستقیم قرار نمی‌گیرد، استفاده می‌شود، داده‌هایی از این نوع، به ویژه اگر نقاط داده در نمودار احتمالاتی از شکل S تبعیت کنند، ممکن است نشانه حالت شکست بیشتر از یک در جامعه زمان‌های شکست باشد. بنابراین برای انجام این کار به یک عملیات ریاضی خاصی احتیاج است. دلیل دیگر این است که برای اصلاح یا افزایش مؤلفه‌های قابلیت اطمینان، به تغییرات و یا اجرای طرح خاصی، نیاز است. وقتی که مؤلفه‌های غیر استاندارد شکست خورده و از جامعه حذف شوند، نرخ شکست کاهش می‌یابد که معمولاً در اوایل عمر واحدها یا اجزای سازنده یک فرایند رخ می‌دهد. این کاهش تا زمانی که همه زیر مؤلفه‌های استاندارد از بین بروند ادامه می‌یابد. توزیع ویبول دارای $(\alpha < 1)$ است که اغلب برای نمایش مشخصه عمر استفاده می‌شود [۳۳].

دومین نوع شکست زمانی مطرح می‌شود که مؤلفه‌ها صرفاً بر حسب اتفاق یا تصادف شکست می‌خورند و نرخ شکست آنها تقریباً ثابت است، که این به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. چنین شکست‌هایی ممکن است در تمام طول عمر یک واحد اتفاق بیفتد. اغلب توزیع‌هایی که برای شرح این طبقه‌بندی نرخ شکست استفاده شده‌اند، معمولاً توزیع نمایی و ویبول با $(\alpha \approx 1)$ هستند.

سومین نوع شکست، زمانی که چندین ساعت عملیات متراکم انجام شود، رخ می‌دهد. معمولاً فرسودگی رفته رفته بیشتر می‌شود و این موجب عملکرد خارج از استاندارد مؤلفه‌ها، با گذشت زمان می‌شود، این پیشرفت فرسودگی یک یا بیشتر واحدها را حذف می‌کند تا زمانی که مؤلفه‌ها شکست بخورند. از توزیع نرمال و توزیع ویبول با $(\alpha > 1)$ برای مدل توزیع زمان شکست در دوره فرسودگی استفاده می‌شود. چندین حالت شکست مختلف ممکن است در طول دوره عمر رخ دهد. ترکیب چندین توزیع ویبول، یکی از وسیله‌های رسیدن به نرخ مخاطره غیر یکنواخت است، اما هرگز شکل وان حمامی را نخواهد داشت. توزیع گسسته یا آمیخته ترکیب خطی

از دو یا چند توزیع ویبول است. یک توضیح ساده تر اینکه جامعه مورد بررسی متشکل از $(n \geq 2)$ زیر جامعه است. تابع چگالی، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی توزیع آمیخته دو لایه ویبول به شرح زیر است:

$$f(t) = \gamma_1 \left(\frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\alpha_1^{\beta_1}} \right) \exp \left(-\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + (1-\gamma_1) \left(\frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\alpha_2^{\beta_2}} \right) \exp \left(-\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \quad (۱۷-۲)$$

$$R(t) = \gamma_1 \exp \left[-\left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right] + (1-\gamma_1) \exp \left[-\left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right] \quad (۱۸-۲)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \gamma_1 \left(\frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\alpha_1^{\beta_1}} \right) \exp \left(-\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + (1-\gamma_1) \left(\frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\alpha_2^{\beta_2}} \right) \exp \left(-\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} / R(t) \quad (۱۹-۲)$$

در روابط بالا α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و احتمال آمیختگی است.

۹-۲ روش تحلیل آماری با استفاده از توزیع ویبول

همان طور که در روابط RMS دیده شد، تابع توزیع احتمال، زمان بین خرابی‌ها (TBF)، زمان تعمیرات (TTR) و زمان تحویل (TTD) به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در محاسبات قابلیت RMS مطرح است، لذا یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال ویبول سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات قابلیت RMS است. سپس با استفاده از روابط RMS معادله بر اساس زمان به دست می‌آید. از آنجایی که تنها در روش تحلیل آماری می‌توان به یک معادله تابع زمان دست یافت، لذا این روش مدل‌سازی قابلیت RMS نامیده می‌شود. همچنین در این پایان‌نامه روش آماری توزیع ویبول برای تحلیل داده‌ها و انتخاب مدل مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش آماری شامل چهار مرحله اصلی است [۳۴]:

۱- **جمع‌آوری داده‌ها:** در این مرحله تمام داده‌های خرابی موجود در معدن مورد نظر باید جمع‌آوری شوند. جمع‌آوری داده‌ها یک عنصر مهم در تحلیل قابلیت RMS است که از مهمترین این داده‌ها می‌توان به زمان بین خرابی (TBF) و زمان تعمیرات (TTR) اشاره کرد.

۲- **تجزیه و تحلیل مقدماتی داده‌ها:** پس از جمع‌آوری داده‌های خرابی مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین^۱ و دامنه^۲ مجموعه داده‌های خرابی را محاسبه می‌کنیم. این روش می‌تواند بهترین مدل ریاضی برای مدل‌سازی باشد. از این رو، اگر دامنه داده (حداقل - حداکثر = دامنه) در مقایسه با میانگین نمونه کم باشد، می‌توان از تنوع داده‌ها چشم‌پوشی کرد و از میانگین داده خرابی برای مدل‌سازی داده‌ها استفاده کرد. حال اگر مقدار دامنه داده‌های خرابی در مقایسه با میانگین داده‌ها دارای فاصله‌ی قابل توجهی بود به مرحله بعد می‌رویم.

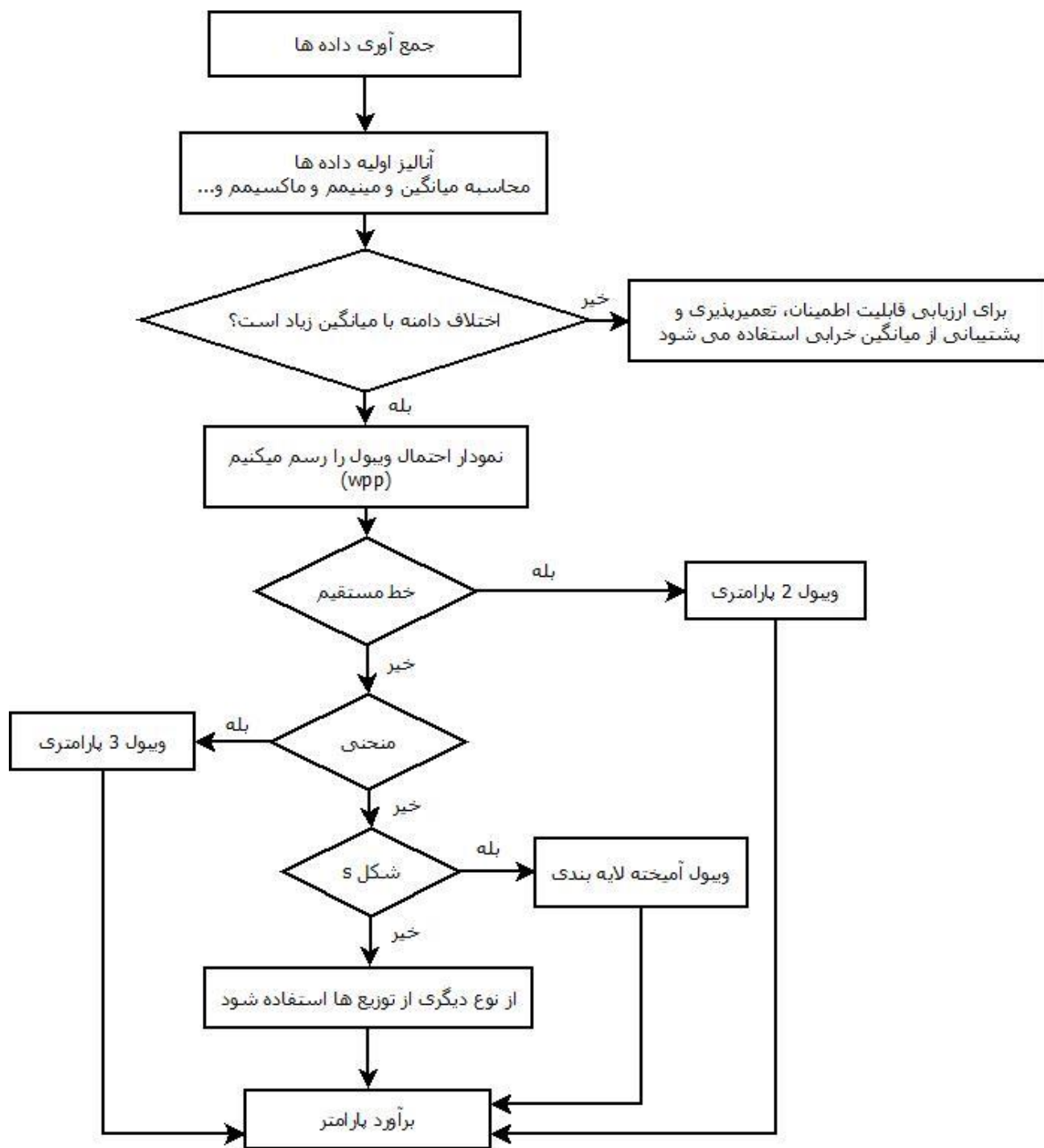
۳- **انتخاب مدل مناسب:** در این مرحله ابتدا نمودار احتمال داده‌های خرابی در نرم افزار Minitab رسم می‌شود که این نمودار می‌تواند اشکال مختلفی مثل خط مستقیم، منحنی و S شکل تولید کند سپس با توجه به شکل نمودار، توزیع احتمال مناسب برای تحلیل قابلیت RMS مشخص خواهد شد.

۴- **برآورد پارامتر:** پس از انتخاب مدل، پارامترهای مدل باید تخمین زده شوند. این تخمین با استفاده از نرم‌افزارهای minitab و Weibull++ انجام می‌شود. روش‌های عددی (به عنوان مثال: زمان‌های خرابی، حداکثر احتمال و روش‌های گرافیکی) وجود دارند که برای برآورد پارامتر استفاده می‌شوند. دقت برآورد به اندازه مجموعه داده‌ها و روش برآورد بستگی دارد.

در شکل (۲-۳) نمودار راهنما برای انتخاب مدل مناسب تابع توزیع ویبول شرح داده شده است:

^۱ mean

^۲ domain



شکل ۲-۳. نمودار راهنما برای انتخاب مدل مناسب تابع توزیع ویول [۳۴]

۲-۱۰ انواع سیستم‌ها

یک سیستم که می‌تواند مکانیکی، الکتریکی و غیره باشد، از مجموعه‌ای از زیرسیستم‌ها تشکیل شده است. برای تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی (RMS) یک سیستم لازم است که ارتباط بین هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل دهنده آن، مشخص باشد. در ادامه به ساختار انواع سیستم‌ها پرداخته شده است.

۲-۱۰-۱ سیستم‌های متوالی (سری)

آرایش سری یکی از عمومی‌ترین آرایش‌ها برای بیان اجزا سیستم است. در این آرایش، باید تمامی زیرسیستم‌ها درست کار کنند تا در نهایت سیستم بتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد. بنابراین از کار افتادن هر یک از زیر سیستم‌ها باعث از کار افتادن سیستم می‌شود. آرایش سری در شکل (۲-۵) نشان داده شده است [۳۵].



شکل ۲-۴. آرایش سری یک سیستم با m زیرسیستم [۳۵]

قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، در سیستم متوالی مطابق معادله (۲-۲۰) محاسبه می‌شود. در این فرمول $R(t)$ قابلیت اطمینان، $M(t)$ قابلیت تعمیر و $S(t)$ قابلیت پشتیبانی کل سیستم است.

$$R(t) = R_1(t).R_2(t)...R_m(t) = \prod_{i=1}^m R_i(t) \quad (2-20)$$

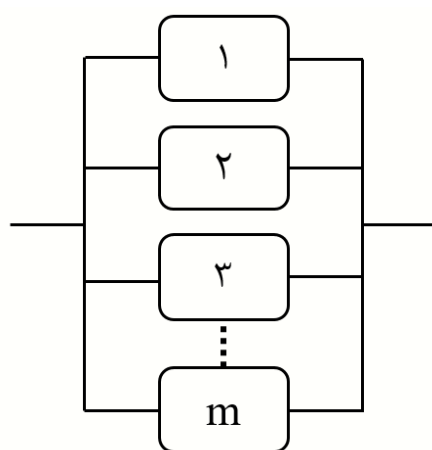
$$M(t) = M_1(t).M_2(t)...M_m(t) = \prod_{i=1}^m M_i(t)$$

$$S(t) = S_1(t).S_2(t)...S_m(t) = \prod_{i=1}^m S_i(t)$$

۲-۱۰-۲ سیستم موازی

در آرایش موازی، تمامی زیرسیستم‌ها فعال‌اند و حداقل باید یک زیرسیستم درست کار کند تا دستگاه عملکرد موفقیت آمیزی داشته باشد. نمونه آرایش موازی در شکل ۲-۶ و نحوه محاسبه قابلیت RMS کل سیستم به صورت رابطه ۲-۲۱ قابل ارائه است [۳۵]:

$$RMS(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - RMS_i(t)) \quad (2-21)$$



شکل ۲-۵. شبکه موازی با m زیر سیستم [۳۵]

۲-۱۱ جمع بندی

در این فصل مفهوم تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به تعاریف ارائه شده برای تاب‌آوری مشخص شد که همه تعاریف در یک وجه مشترک می‌باشند و آن توانایی بازیابی سیستم بعد از وقوع خرابی است. در ادامه برخی از روابط موجود برای محاسبه تاب‌آوری ارائه شد که در این پایان‌نامه از رابطه ارائه شده توسط راد و همکارانش استفاده شده است. با توجه به رابطه مورد استفاده در این پایان‌نامه به تشریح مفاهیم و روش آماری محاسبه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی پرداخته شد. داده‌های مورد نیاز برای این روش شامل زمان بین خرابی‌ها (TBF)، زمان تعمیرات (TTR) و زمان تحویل (TTD) است. در روش آماری محاسبه‌ی RMS، گام

اول، جمع آوری داده‌های خرابی (TBF) و تعمیر (TTR) بود سپس دامنه داده‌های خرابی و تعمیر بدست می‌آید و اگر اختلاف آن در مقایسه با میانگین داده‌ها کم بود از میانگین داده‌ها برای مدل سازی و تحلیل RMS استفاده می‌شود و اگر اختلاف میانگین با دامنه داده‌های خرابی و تعمیر زیاد بود از روش‌های آماری با استفاده از نرم افزارهای Minitab و Weibull++ برای تحلیل داده‌ها استفاده می‌کنیم.

فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته

۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا مستندات و پیشینه‌ای مختصر از تاب‌آوری و سپس تحقیقات انجام شده در حوضه‌های مختلف آن بیان می‌گردد. همچنین در ادامه بحث گریزی به مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) بر روی ماشین‌آلات معدنی زده شده است.

۳-۲ تاریخچه تاب‌آوری

تاب‌آوری یکی از مهم‌ترین عوامل تحقق پایداری است. ورود واژه‌ی تاب‌آوری به مباحث مدیریت سوانح از سال ۲۰۰۵ میلادی در همایش هیوگو مطرح شد و به تدریج در هر دو زمینه‌ی نظری و عملی کاهش خطرهای سوانح، جایگاه بیش‌تری را به خود اختصاص داد. در سال‌های اخیر مفاهیمی مانند جوامع تاب‌آور به صورت معمول در مقالات علمی به کار رفته است. به علت عدم پیش‌بینی کامل آسیب‌پذیری سیستم‌های اجتماعی و فراهم کردن ارزیابی‌های جامع و کلی‌نگر در مقابل مخاطرات، تاب‌آوری می‌تواند به عنوان توانایی سازگاری سیستم‌ها در برابر تغییرات، بدون فروپاشی در زمان سوانح مطرح شود. تاب‌آوری به دلیل پویا بودن واکنش جوامع در برابر مخاطرات، نوعی آینده‌نگری است و به گسترش گزینش‌های سیاستی هم برای رویارویی با عدم قطعیت و تغییر کمک می‌کند. در این صورت افزایش تاب‌آوری در برابر سوانح می‌تواند به ایجاد افزایش ظرفیت سازگاری و معیشت پایدار جامعه منجر شود.

۳-۳ مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تاب‌آوری

برونوو^۱ در سال ۲۰۰۳ در پژوهش خود یک چارچوب مفهومی برای تعریف تاب‌آوری جوامع و اقدامات کمی از تاب‌آوری ارائه کرد که می‌تواند برای یک تلاش تحقیقاتی هماهنگ با تمرکز بر تقویت این تاب‌آوری مفید باشد

^۱ Bruneau

که شامل چارچوب‌هایی چون: ۱- کاهش احتمال شکست ۲- کاهش عواقب ناشی از شکست ۳- کاهش زمان بهبودی است و از چارچوب‌های کمی همچون: استحکام، سرعت، توانمندی و افزونگی استفاده می‌کند و این چارچوب‌ها را در چهار بعد تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی، سازمانی استفاده کرده است [۷].

اوروین و واردل^۱ در سال ۲۰۰۴ بر این باور بودند که پایداری سیستم خاک یک عامل اصلی است که بر خصوصیات و فرآیندهای اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. برای مقایسه پایداری سیستم‌های مختلف، لازم است شاخص‌هایی وجود داشته باشد که اندازه‌گیری تاب‌آوری در برابر یک متغیر پاسخ در کلیه سناریوهای ممکن را ارائه دهند. با این حال، شاخص‌های موجود در حال استفاده، اغلب نمی‌توانند این کار را انجام دهند، یا تفسیر آن دشوار است. در اینجا شاخص‌های جدیدی ارائه می‌شود که از این مشکلات جلوگیری می‌کند، بدین صورت که شاخص‌های جدید را با شاخص‌های ثابت منتشر شده قبلی مقایسه می‌کنند [۸].

اش و نئوس^۲ در سال ۲۰۰۷ معتقد بود جامعه مدرن، به شبکه‌های زیربنایی در مقیاس بزرگ وابسته شده است تا منابع خود را به شیوه‌ای کارآمد به خانه‌ها و مشاغل تحویل دهد. آن‌ها توانستند با استفاده از یک الگوریتم تکاملی برای تکامل شبکه‌های پیچیده که در برابر چنین خرابی مقاومت می‌کنند، استفاده کنند. سپس این شبکه‌ها را برای موارد توپولوژیکی که منشأ چنین تاب‌آوری را توضیح می‌دهد، تجزیه و تحلیل کنند [۹].

کاتر^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۸ معنی و اندازه‌گیری تاب‌آوری از دیدگاه‌های مختلف را بررسی کردند. شناسایی استانداردها و معیارهای سنجش تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی یکی از چالش‌های پیش روی آژانس‌های محلی، ایالتی و فدرال به ویژه در ایالات متحده بود. در این پژوهش یک چارچوب جدید از تاب‌آوری با استفاده از مدل (DROP) برای بهبود ارزیابی تاب‌آوری در برابر حوادث در سطح محلی ارائه می‌دهد [۱۰].

^۱ Orwin and wardle

^۲ Ash and Newth

^۳ Cutter

ویتسون^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ مفهوم تاب‌آوری را به عنوان یک اقدام مهم برای مؤثر بودن تاب‌آوری که شامل موارد زیر است، تعریف کردند: ۱- توانایی یک شبکه در ارائه خدمات علی‌رغم خرابی‌های خارجی ۲- زمان بازگرداندن سرویس در صورت وجود خرابی. اگرچه تاب‌آوری به طور گسترده در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است، در این تحقیق جنبه‌های خاص تاب‌آوری شبکه قابل اندازه‌گیری هنگامی که شبکه در حال تجربه خرابی‌های فاجعه‌آمیز بالقوه از حوادث خارجی است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تعریف رسمی برای تاب‌آوری رده I ارائه شده است و یک رویکرد گام به گام بر اساس شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه آن تعریف شده است. برای نشان دادن رویکرد، شبکه‌های دو ترمینال با درجات مختلف افزونگی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده برای شبکه‌های آزمایشی نشان می‌دهد که این مفهوم کمی از تاب‌آوری شبکه را فراهم می‌کند [۱۱].

وانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰ در پژوهش خود، یک معیار برای تاب‌آوری در برابر سیستم‌های اطلاعات سازمانی یا سیستم‌های خدماتی ارائه کردند، که تاب‌آوری سیستم، خاصیتی است که بر توانایی بازیابی سیستم پس از آسیب جزئی سیستم متمرکز می‌شود. سیستم‌های اطلاعاتی سازمانی از جمله برنامه‌ریزی منابع سازمانی، مدیریت زنجیره تأمین، مدیریت ارتباط با مشتری، سیستم اجرایی ساخت و غیره با تحویل به موقع و پایدار اطلاعات، نقش اساسی در عملکرد روزانه شرکت‌های مدرن دارند. بنابراین، تاب‌آوری به ویژه برای سیستم‌های اطلاعاتی شرکت مهم است [۱۲].

^۱ Whitson and Marquez

^۲ Wang

زوبل^۱ در سال ۲۰۱۱ مفهوم تاب‌آوری در برابر فاجعه را با ارائه یک رویکرد برای نمایش بصری و تحلیلی بیانگر تصورات یک تصمیم‌گیرنده از ارزش تاب‌آوری واقعی در ارتباط با ضرر اولیه پیشبینی شده و زمان بازیابی را گسترش داد. این امر امکان پشتیبانی بهتر از برنامه‌ریزی و کاهش بحران استراتژیک را فراهم کرد [۳۶].

شیرعلی^۲ و همکاران (۲۰۱۲)، مقاله‌ای تحت عنوان "چالش‌هایی در ساختار مهندسی تاب‌آوری و ظرفیت انطباقی: مطالعه‌ای میدانی در یک کارخانه شیمیایی" ارائه کردند. هدف از این پژوهش، شناسایی چالش‌هایی در روند ساختار مهندسی تاب‌آوری و ظرفیت انطباقی آن در یک کارخانه‌ی مواد شیمیایی، است. داده‌های اولیه از طریق مشاهدات موجود در سایت و مصاحبه از پرسنل، جمع‌آوری شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که چالش‌های اصلی را می‌توان به ۸ دسته تقسیم‌بندی کرد: ۱- فقدان تجربه صریح درباره‌ی مهندسی تاب‌آوری، ۲- ناملوس بودن سطوح مهندسی تاب‌آوری، ۳- ترجیح دادن تولید بیشتر به ایمنی، ۴- فقدان سیستم گزارش‌دهی، ۵- اعتقادات دینی، ۶- روش‌ها و دفترچه راهنمای تاریخ گذشته، ۷- حلقه بازخورد ضعیف و ۸- مشکلات اقتصادی. بر اساس نتایج این تحقیق بینش مدیران درباره‌ی ایمنی در چنین سیستم‌هایی، باید از سوءگیری (۸) گرایش نا آگاهانه‌ی فرد به با خبر شدن و استفاده از داده‌های هر رویداد پس از رخ دادن آن) جلوگیری کند و به سمت پیشبینی خطر متمایل شود. تغییر این بینش می‌تواند منجر به دستیابی تاب‌آوری و قابلیت اطمینان بالا در کارخانه شود [۳۷].

کافل در سال ۲۰۱۲ یک رویکرد یکپارچه، شامل ملاحظات آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، که ایجاد یک شاخص برای اندازه‌گیری جوامع مقاوم در برابر فاجعه است، در نظر گرفت. وی به تشریح روشی برای سنجش قابلیت‌های تاب‌آوری جامعه با استفاده از شاخص‌های فرایند و نتیجه در ۴۳ جامعه ساحلی در اندونزی پرداخت. شاخص با استفاده از ۱۰ شاخص فرآیند و ۲۵ شاخص نتیجه، بر اساس ده مرحله فرآیند کاهش خطر مبتنی بر جامعه

^۱ Zobel

^۲ Shir ali

انتخاب شد، و ویژگی‌های اصلی جوامع تاب‌آور در برابر حوادث از ادبیات مختلف گرفته شد. ارزش کل ۴۳ انجمن ۶۳، در حالی که ارزش شاخص فرآیند و شاخص نتیجه به ترتیب ۶۳ و ۶۱/۵ اندازه‌گیری شد [۳۸].

او یانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک چارچوب چند مرحله‌ای جدید برای تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌ها پیشنهاد کردند. برای هر مرحله، مجموعه‌ای از استراتژی‌های بهبود مبتنی بر تاب‌آوری مشخص می‌شوند و ارتباط مناسب با تاب‌آوری شناسایی شده و سپس برای ایجاد یک معیار تاب‌آوری سالانه مورد انتظار برای هر دو نوع خطرات منفرد و خطر چندگانه ترکیب می‌شوند. با در نظر گرفتن شبکه انتقال قدرت در هریس کانتی، تگزاس و آمریکا به عنوان یک مطالعه موردی، این مقاله یک مدل شبکه اصلی برق را با چندین مدل بهبود یافته تاب‌آوری فرضی مقایسه کرده تا میزان اثربخشی آنها در مراحل مختلف پاسخ آنها به خطرات تصادفی و خطرات طوفان را تعیین کند. نتایج نشان می‌دهد که تاب‌آوری سالانه پیش‌بینی شده عمدتاً به دلیل خطرات تصادفی ناشی از فرکانس بالای وقوع آنها نسبت به خطر طوفان بیشتر در خطر است. به علاوه تحت منابع محدود، توانایی بازیابی نقش حیاتی در بهبود تاب‌آوری ایفا می‌کنند، در حالی که تحت دسترسی کافی منابع، به کارگیری افزونگی، تقویت اجزای بحرانی و تضمین بازیابی سریع، همگی پاسخ‌های مؤثری هستند. تاب‌آوری سالانه مورد انتظار شبکه برق با پیشرفت هر سه مرحله بهبود، ۰/۰۳۴ درصد نسبت به شبکه اصلی افزایش می‌یابد [۳۹].

تاسانکوک و همکاران در سال ۲۰۱۳ در یکی از فصل‌های کتاب تفکر تاب‌آوری در برنامه‌ریزی شهری به بررسی ریشه‌های تاریخی مفهوم تاب‌آوری در متن برنامه‌ریزی شهری پرداختند. ساده‌ترین تعریف از تاب‌آوری در این حالت، ظرفیت یک سیستم برای تحمل تغییر و حفظ عملکرد و ساختار اصلی خود پس از مواجهه با آشفتگی خارجی می‌باشد [۱۵].

^۱ Ouyang

لی و ژی^۱ در سال ۲۰۱۴ در مطالعه ای اقدامات زیر را انجام داد [۱۶]:

۱- تعریف تاب‌آوری مهندسی بر اساس مفاهیم مختلف تاب‌آوری در زمینه‌های مختلف.

۲- پیشنهاد توانایی بازیابی مهندسی به عنوان یک مؤلفه جدید در چارچوب طراحی سیستم‌های تاب‌آور مهندسی.

۳- معرفی یک فرمول ریاضی کلی برای تعیین میزان تاب‌آوری مهندسی.

آنها در این مطالعه از یک سیستم تولید ماشین CNC برای نشان دادن طراحی سیستم‌های تاب‌آور مهندسی استفاده کردند. آنها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که تاب‌آوری مهندسی نه تنها به زمان و سرعت بازیابی بستگی دارد بلکه بسیاری از فاکتورهای دیگر مانند دقت تشخیص شکست، منابع و در دسترس بودن نیروی نیز مؤثر هستند.

وودز^۲ در سال ۲۰۱۵ رویکردهای مختلف فنی برای پاسخ به این سوال که چگونه مهندسی تاب‌آوری در سیستم‌های پیچیده کاربرد دارد می‌پردازد. او در پژوهش خود استفاده از مفهوم تاب‌آوری را در چهار گروه تقسیم بندی کرده است: (۱) تاب‌آوری در برابر ایجاد تنش و بازگشت به تعادل. (۲) تاب‌آوری به عنوان مترادف استحکام. (۳) تاب‌آوری به عنوان نقطه مقابل شکنندگی. (۴) تاب‌آوری به عنوان معماری شبکه‌ای که می‌تواند توانایی تحقق شگفتی‌های آینده را با تحول شرایط حفظ کند [۱۷].

آزاده^۳ و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله‌ای تحت عنوان "یک الگوریتم منحصر به فرد برای ارزیابی و بهبود رضایت شغلی با استفاده از مهندسی تاب‌آوری: آزمایشگاه‌های خطرناک" به تعیین نقش و تاثیر مهندسی تاب‌آوری بر بهبود رضایت و ایمنی شغلی در آزمایشگاه دانشگاه‌ها پرداختند. در این تحقیق، یک الگوریتم هوشمند برای

^۱ Li & Xi

^۲ Woods

^۳ Azadeh

اندازه‌گیری و رتبه‌بندی امتیازات رضایت شغلی با توجه به عوامل RE و مفاهیم ارگونومیک و HSE در آزمایشگاه‌های یک دانشگاه، پیشنهاد شده است. برای انجام این کار پرسشنامه‌های مربوط به HSE و RE توسط اپراتورهای آزمایشگاه پر می‌شوند. عوامل RE و HSE به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته در حالی که رضایت شغلی به عنوان یک متغیر خروجی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به عملکرد HSE مفاهیم ارگونومیک و عوامل مهندسی تاب‌آوری، از نمرات ۱ تا ۵ رای نشان دادن میزان رضایت شغلی استفاده شده است. سپس، آزمایشگاه‌ها توسط الگوریتم رتبه‌بندی شدند و بعد نمودار احتمال نرمال برای همه‌ی آزمایشگاه‌ها رسم شد تا آزمایشگاه‌های پرت و خارج از محدوده شناسایی شوند. نتایج این تحقیق به مدیران کمک می‌کند تا ابزارهای لازم، برای بررسی کردن دلایل تعیین و تخصیص آزمایشگاه‌ها را مهیا کنند تا از ناکارآمدی اپراتورها جلوگیری کنند [۴۰].

نیکولاس اوروتی^۱ در سال ۲۰۱۶ معتقد بود که گرم شدن کره زمین و عدم ثبات قیمت‌ها عدم اطمینان برای آینده کشاورزی را افزایش می‌دهد. بنابراین، سیستم‌های کشاورزی نه تنها تحت شرایط متوسط بلکه در اثر تغییرات شدید بهره‌وری، اقتصاد، محیط زیست و بستر اجتماعی نیز باید پایدار باشند. سپس با استفاده از چهار مفهوم پایداری، استحکام، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری توانست نقش این مفاهیم را در پرداختن به مسائل زراعی بدست آورد. یافته‌های اصلی به شرح زیر است: (۱) سیستم‌های کشاورزی با انواع مختلفی از آشفتگی‌ها روبرو هستند، از آشفتگی‌های کوچک و معمولی گرفته تا تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی. (۲) پایداری، استحکام، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری به طور فزاینده‌ای برای تجزیه و تحلیل زمینه کشاورزی به منظور پیش‌بینی پاسخ سیستم در شرایط تغییر استفاده شده است. (۳) چهار مفهوم با ماهیت اجزای سیستم و نوع آشفتگی مورد مطالعه متمایز می‌شوند. (۴) روش‌های ارزیابی باید در شرایط متضاد آزمایش شوند. (۵) گزینه‌های اصلی امکان سازگاری سیستم تحت تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی افزایش تنوع و افزایش ظرفیت تطبیقی است [۱۸].

^۱ Nicolas Urruty

ماکوزیک^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقاله‌ای تحت عنوان (یک مدل فازی دو مرحله‌ای برای ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل تاب‌آوری سازمانی در صنعت پردازش) ارائه کردند. هدف اصلی این پژوهش توسعه یک مدل ریاضی و ارائه پیامدهای عملی آن برای ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل تاب‌آوری سازمانی است. در این تحقیق، اهمیت نسبی فرآیندهای کسب و کار و اهمیت نسبی عوامل تاب‌آوری تحت هر فرآیند کسب و کار به وسیله ماتریس مقایسه زوجی فازی بیان شده است. عناصر این ماتریس اعداد فازی مثلثی (TFNS) هستند. برای تعیین وزن نسبی متغیرهای موجود، از فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی فازی (FAHP) استفاده شده است و رتبه‌بندی عوامل تاب‌آوری با استفاده از تکنیک تاپسیس فازی انجام شده است. نتایج این تحقیق بیان می‌کند که با بهبود ارزش عوامل تاب‌آوری با استفاده از روش ذکر شده می‌توان روابط همکاری با تأمین کننده فعلی ایجاد کرد و پتانسیل انبار منابع را حتی اگر بازار در شرایط ناپایدار اقتصادی و سیاسی باشد، افزایش داد و از این طریق ایمنی را در سازمان، توسعه بخشید [۴۱].

وانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به طور انتقادی به تجزیه و تحلیل تعاریف موجود برای تاب‌آوری پرداختند و محدوده‌ها و دامنه‌های کاربردی آن‌ها به ویژه در موقعیت‌های نظری کنترل را نشان دادند. آنها همچنین چند تعریف کیفی را به تعاریف کمی تبدیل کردند [۱۹].

بوستیک و همکاران در سال ۲۰۱۸ انگیزه‌های اقتصادی را برای اجرای ارزیابی و مدیریت تاب‌آوری در جوامع آسیب دیده و سیستم‌های پیچیده در مقیاس بزرگ شرح دادند. آنها بر این باور بودند که سیاست‌های مبتنی بر ریسک باید در کنار فلسفه و علم تاب‌آوری در نظر گرفته شوند [۲۰].

^۱ Macuzic

^۲ Wang

بارود و بارکر^۱ در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش بیزین، توزیع احتمال اهمیت و هر کدام از اجزاء شبکه را مدل کرده و با استفاده از آن تأثیر هر جزء را بر روی تاب‌آوری شبکه محاسبه کردند [۴۲].

جفری^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک بررسی پیشرفته از تحقیقات موجود در زمینه تحقیق در مورد تاب‌آوری شبکه ارائه کردند که به نقطه نظر مهندسی سیستم نیرو با توجه به حوادث شدید آب و هوایی می‌پردازد. در این مطالعه، ابتدا اصطلاحات مورد استفاده در مطالعه تاب‌آوری شبکه، مانند تعاریف، تفاوت در قابلیت اطمینان شبکه، حوادث شدید هوا و تأثیر شدید آنها بر سیستم‌های برق مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، یک چارچوب تاب‌آوری شبکه به عنوان یک ماده کلی برای درک موضوعات در مطالعه تاب‌آوری شبکه ارائه شده است. در مرحله بعد، چندین روش ارزیابی تاب‌آوری تابشی شبکه و برخی از شاخص‌های کمی را توصیف می‌کند. سرانجام، پیاده سازی استراتژی‌های مختلف ارتقاء شبکه مورد بحث قرار گرفته است [۲۱].

متحدی و همکاران در سال ۱۳۹۸ عوامل مختلفی که بر روی تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه معادن تأثیرگذار هستند را مورد بررسی قرار دادند. آنها قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و آسیب پذیری سیستم را به عنوان مشخصه‌های اصلی تاب‌آوری سیستم تهویه در نظر گرفتند. با توجه به نتایج، دریافتند که مشخصه‌های تاب‌آوری سیستم تهویه نیز به عوامل عملیاتی و طراحی مختلفی وابسته هستند که طیف وسیعی از عوامل مثل ابزار آموزشی، برنامه نگهداری و تعمیرات، تدارکات قطعات یدکی، انگیزش، پایش سیستم، تحریم و ... را شامل می‌شوند. با توجه به وضعیتی که هر کدام از این عوامل مؤثر دارند، تاب‌آوری سیستم قابل تحلیل است همچنین، با ایجاد تغییرات مثبت در وضعیت این عوامل می‌توان تاب‌آوری سیستم را بهبود بخشید [۳].

متحدی و همکاران در سال ۱۳۹۸ مفهوم تاب‌آوری را معرفی کردند و سپس به تحلیل تاب‌آوری سیستم استخراج معدن مس سونگون پرداختند. در این تحلیل از شاخص‌های عملکردی سیستم شامل قابلیت اطمینان،

^۱ Baroud and Barker

^۲ Jufri

تعمیرپذیری و پشتیبانی به منظور تحلیل تاب‌آوری استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان دادند که تاب‌آوری کل سیستم برای یک ساعت کارکرد آن برابر ۸۳٫۱ درصد است و این مقدار بعد از گذشت ۱۰ ساعت به ۷۳/۱ درصد کاهش می‌یابد [۲].

محتشم و میرزائی در سال ۱۳۹۸ به ارزیابی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری مدل تخصیص کامیون‌ها با توجه به خرابی و عدم دسترسی به آنها پرداختند. برای این کار مدل برنامه‌ریزی آرمانی ارائه شده توسط تمنگ (۱۹۹۷) برای تخصیص کامیون‌ها در نظر گرفتند. شاخص بهینه‌سازی این مدل، به حداکثر رساندن تولید و کنترل کیفیت ماده معدنی با در نظر گرفتن خرابی ناوگان کامیون‌ها می‌باشد. در این راستا برای ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده و نرخ تردد کامیون‌ها در مسیرهای مختلف، سناریوهای مختلفی در معدن مس سونگون توسعه داده شد. سناریو اول بدون در نظر گرفتن خرابی کامیون‌ها و سناریوهای دوم و سوم به ترتیب و عدم دسترسی کامیون‌ها در حالت معمولی و بدبینانه به ترتیب برابر ۳۵۷۲/۱۴ و ۵۹۶۷/۷۲ تن می‌باشد. نکته قابل توجه این است که علی‌رغم کاهش قابل توجه میزان تولید و نرخ تردد مسیرها به خاطر خرابی برخی از کامیون‌ها، مدل تخصیص به کار رفته با توزیع مجدد کامیون‌های در دسترس در مسیرهای مناسب با انعطاف‌پذیری قادر است عیار مورد نیاز کارخانه فرآوری را تأمین کند؛ به عبارت دیگر تاب‌آوری مدل تخصیص تحت تأثیر خرابی بعضی کامیون‌ها با توجه به عیار مورد نیاز کارخانه مطلوب می‌باشد [۴۳].

حسینی و همکاران در سال ۲۰۲۰، تاب‌آوری ماشین جبهه کار طولانی معدن پروده را محاسبه کردند. ایشان برای محاسبه تاب‌آوری از فرمول (۱-۳) استفاده کردند. طبق این فرمول، آنها عملکرد سیستم بلافاصله بعد از خرابی را صفر در نظر گرفتند. برای انجام این کار داده‌های مربوط به استخراج یک دیواره را به مدت دو سال استخراج کردند. در نهایت مشخص شد که داده‌ها بیش از ۲۶۰۰ ساعت زمان فعال و ۱۷۱/۸ ساعت زمان تعمیر داشتند و با این حساب تاب‌آوری برای شیرر میزان ۹۶/۷ درصد محاسبه شد [۴۴].

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1-3)$$

۳-۴ مطالعات انجام شده قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) در حوزه تجهیزات معدنی

اولین کاربردهای قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی در مهندسی معدن به اواخر دهه ۱۹۶۰ بر می‌گردد و از آن زمان تا کنون، مطالعه بر روی قابلیت (RMS) سیستم‌های معدنی به طور پیوسته ادامه داشته است. مقالات مربوط به دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۹۰ میلادی عمدتاً مقالاتی کوتاه، مفهومی و کلی می‌باشند که به دلیل فقدان نرم‌افزارهای پیشرفته و نیز سیستم‌های جمع‌آوری داده قوی از محتوای آماری و مدلسازی ضعیفی برخوردارند. تا اواسط دهه ۱۹۸۰، این روند ادامه یافته ولی از آن تاریخ به بعد توجه جدی‌تری به این موضوع معطوف شده و تحولی اساسی در کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن رخ داده است. از اواخر دهه ۱۹۹۸ تحقیقات قابلیت اطمینان وارد مرحله پیشرفته‌تری گردیده و مفاهیم آمار کاربردی با قدرت بیشتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از دلایل مهم این موضوع می‌توان به افزایش تقاضای بین‌المللی برای مواد معدنی، افزایش قیمت ماشین‌آلات و هزینه‌های عملیاتی و پیچیده تر شدن تجهیزات معدنی اشاره نمود [۴۵].

کومار^۱ و گرانهوم برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ به طور جدی مفاهیم پایه، روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و کاربردهای آن‌ها را در مهندسی معدن به طور عمومی مطرح نمودند [۲۷]. پس از آن کومار و همکارانش طی پنج سال با انتشار مقالات کاربردی در این حوزه‌ها کاربرد قابلیت اطمینان را در ماشین‌آلات معدنی گسترش دادند. یک سال بعد، پاولویچ اولین کتاب در زمینه قابلیت اطمینان سیستم‌های معدنی را در سال ۱۹۹۸ به چاپ

^۱ komar

رسانید. در این کتاب مفاهیم و نظریه‌های اصلی قابلیت اطمینان و ارتباط و کاربردهای آن را با سیستم‌ها و ماشین آلات معدنی به صورت بسیار مدون و سازمان یافته ارائه شده است. از ویژگی‌های بارز این کتاب می‌توان مبنای بسیار قوی ریاضی و دیدگاه کاملاً محاسباتی و مدل‌سازی را برشمرد [۴۶].

موخوپادی^۱ در سال ۱۹۹۸، برای اولین بار مجموعه عملیات استخراج در معادن روباز را به عنوان یک سیستم در نظر گرفت. وی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان، معادن روباز را از نظر تولید به دو دسته کلی: الف- معادن با یک محل استخراج و ب- معادن با محل‌های استخراج متعدد تقسیم بندی نمود و برای هر محل استخراج، چهار زیرسیستم به شرح زیر پیشنهاد کرد [۴۷]:

الف- زیرسیستم بارگیری (قابلیت اطمینان شاول)

ب- زیرسیستم باربری (قابلیت اطمینان کامیون)

ج- محل استخراج (قابلیت اطمینان سینه‌کار)

د- مقصد بار (دمپ باطله یا کارخانه فرآوری)

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

^۱ Mukhopadhyay

گودمن^۱ در سال ۱۹۸۸، با توجه به حساسیت صنایع و دولت آمریکا نسبت به آتش‌سوزی‌ها و انفجارات مرگبار در معادن زغالسنگ آمریکا، قابلیت اطمینان راه‌های فرار در معادن اتاق و پایه آمریکا را با استفاده از روش آنالیز درخت خطا مورد تحلیل قرار داد. وی با استفاده از درخت پیشنهادی خود، دلایل و عوامل کاهش ایمنی در معادن زغالسنگ آمریکا را ارائه کرد [۴۸].

استانک و نکاتا^۲ با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در طی ۱۰ سال در چهار معدن زغالسنگ آمریکا، قابلیت اطمینان سیستم‌های برق دستگاه‌های برقی مختلف موجود در معادن را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. این مطالعه به دو بخش عمده تقسیم می‌شود. قسمتی از این تحقیق، تجزیه و تحلیل به روش درخت خطا برای پیش‌بینی احتمال خطر در قسمت‌های مختلف از تجهیزات می‌باشد. تاکید اصلی این مطالعه، بر روی معادن زیرزمینی زغالسنگ بوده اما برخی نتایج برای انواع دیگر عملیات‌های معدنی قابل توسعه می‌باشد [۴۹].

کومار در سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ به ترتیب در یک مقاله و نیز پایان‌نامه دکتری خویش، نتایج مطالعات خود را بر روی تحلیل و مدلسازی قابلیت اطمینان دستگاه LHD در معادن زیرزمینی ارائه نمود. این مطالعه بر روی شش دستگاه LHD دیزلی طی مدت یک سال، در معدن سنگ آهن کایرونا صورت گرفته است. در این تحقیق ماشین LHD به چهار زیرسیستم از جمله موتور، سیستم هیدرولیک، سیستم ترمز و سیستم حرکت که به صورت سری با هم در ارتباط می‌باشند تقسیم شده و آنالیز داده‌ها به روش گرافیکی و تحلیلی صورت گرفته است. با استفاده از داده‌های خرابی، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی هر یک از این زیرسیستم‌ها تعیین شده و در نهایت قابلیت اطمینان کل دستگاه و تدابیر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای لودرهای معدنی پیشنهاد شده است [۵۰].

^۱ Goodman

^۲ stanek & venkata

در سال ۱۹۹۲، کومار^۱ و همکارانش قابلیت اطمینان و نرخ خرابی کابل لودرهای برقی را مورد ارزیابی قرار داده و تابع نرخ خرابی این کابل‌ها را ارائه نمودند. در این مطالعه تأثیر طراحی و تعمیرات مختلف بر روی قابلیت اطمینان دو نوع کابل مورد بررسی قرار گرفته است [۵۱].

کومار و کلفسجو^۲ در ادامه تحقیقات سال‌های گذشته خویش، مدل قابلیت اطمینان سیستم هیدرولی LHDهای معدنی را در سال ۱۹۹۲ ارائه نمودند. برای مدلسازی این بخش از دستگاه، تمامی مراحل آزمایش داده‌ها به طور مناسبی انجام شده و در نهایت از روش مدلسازی تصادفی برای تعیین توزیع خرابی‌ها و ارائه مدل استفاده شده است [۵۲].

در سال ۱۹۹۳ کومار و هوانگ^۳، قابلیت اطمینان سیستم تولید یک معدن زیرزمینی را مورد تحلیل قرار دادند. در این تحقیق معدن کایرونا سوئد که به روش تخریب در طبقات فرعی^۳ استخراج می‌شود، به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. برای تحلیل قابلیت اطمینان تولید در معدن، عملیات استخراج شامل دو زیرسیستم اصلی به شرح زیر تعریف شده است:

الف) دسترسی به ماده معدنی خرد شده شامل: مشکلات سقف، نیرو و تهویه، پایداری چال‌های انفجاری و میزان سنگ تولید شده (نسبت به توان تولید لودرهای معدن)

ب) فرآیند بارگیری شامل: اپراتور و LHD

نتیجه کلی تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، نشان داده است که از دیدگاه قابلیت اطمینان، LHDها بحرانی‌ترین زیرسیستم معدن مورد مطالعه بوده و بیشترین نقش را در قابلیت اطمینان و تولید معدن دارند. همچنین قابلیت دسترسی کل سیستم ۷۶ درصد به دست آمد [۵۳].

^۱ komar

^۲ Klefsjo

^۳ Huang

در سال ۱۹۹۴، نیک واگناس^۱ به همراه کومار، به تحلیل داده‌های نت برای چهار کامیون از شرکت کاترپیلار مدل ۷۸۹ در معدن روباز آیتیک^۲ در سوئد پرداخته است. در این بررسی با استفاده از روش‌های ترسیمی و تحلیلی داده‌های خرابی نت، به ارزیابی عملکرد کامیون‌ها پرداخته شده است و قابلیت دسترسی ذاتی تجهیزات محاسبه شده است. برای اجرای کار، ابتدا سیستم کامیون براساس موده‌های خرابی به هشت زیرسیستم تقسیم می‌شود و داده‌های جمع‌آوری شده از خرابی سیستم‌ها بر اساس ساعت کارکرد تجهیزات ثبت می‌شود. برای تحلیل داده‌ها، پارامترهایی نظیر تعداد کل خرابی برای هر نوع خرابی و مدت زمان متوسط بین تعمیرات، مدت زمان متوسط تعمیرات و مدت زمان کلی تعمیرات برای زیرسیستم‌های هر دامپتراک تعیین شده و در نهایت، قابلیت دسترسی ذاتی تجهیزات محاسبه شده است. سپس با استفاده از روش‌های ترسیمی و تحلیلی به بیان نتایج بدست آمده می‌پردازد [۵۴].

دی و همکارانش در سال ۱۹۹۴ قابلیت اطمینان لاستیک کامیون‌های معدنی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تابع چگالی خرابی لاستیک‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و لذا میزان ثابتی نیست. در این مطالعه تاکید شده است که کم باد بودن، پر باد بودن، فشرده شدن لاستیک، گرم شدن، سرعت و طول مسیر باربری پارامترهایی هستند که عمر مفید لاستیک کامیون‌های معدنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایشان اعلام کردند سرعت بیش از ۸۵ کیلومتر بر ساعت و مسافت حمل بیش از ۵ کیلومتر، قابلیت اطمینان و عمر مفید لاستیک را کاهش می‌دهد [۵۵].

در سال ۱۹۹۶ مندل و بانیک میزان تولید ازدست رفته (ریسک تولید) و نیز قابلیت دسترسی کارگاه‌های استخراج و نیز ماشین‌آلات موجود در شش کارگاه واقع در چهار معدن جبهه‌کار طولانی کشور هند را مورد تحلیل

^۱ Nick Vagenas

^۲ Aitik

و مطالعه قراردادند. در این بررسی، شیرر، ناو زنجیری، بارگیر مرحله‌ای، نوار نقاله‌ها، شرایط زمین شناسی و نیز نگه داری قدرتی به عنوان زیرسیستم‌های اصلی کارگاه‌های استخراج در نظر گرفته شدند. این محققان با انجام مطالعات آماری، احتمال توقف تولید مربوط به هر یک از ماشین آلات مذکور را محاسبه نمودند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در سه کارگاه از شش کارگاه مورد مطالعه، شیرر بیشترین میزان تأخیر را در تولید ایجاد نموده و در سه کارگاه دیگر ناو زنجیری بحرانی ترین زیرسیستم از نظر تأخیر در تولید بوده است. در این تحقیق، گرچه مطالعه بسیار خوبی بر روی آمار خرابی و تأخیرهای به وجود آمده انجام شده است. با این حال هیچ گونه مدل قابلیت اطمینان برای دستگاه‌های مورد اشاره ارائه نشده است [۵۶].

در سال ۱۹۹۷، نیک واگناس و همکاران، با استفاده از روش ثبت کامپیوتری نت و داده‌های خرابی جمع‌آوری شده، به تحلیل و ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات پرداخته و کاربرد کامپیوتر را به عنوان یک روش سودمند در ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات ارائه کرده اند. داده‌های جمع‌آوری شده در این تحقیق از سه دستگاه LHD مورد استفاده در معدن زیرزمینی سادبوری در کانادا است. برای اجرای کار، ابتدا هر سیستم LHD به ۱۰ زیرسیستم (بر اساس مودهای خرابی) تقسیم شده است. برای تحلیل داده‌ها با استفاده از روش ترسیمی، باید تعداد تعمیر، زمان و درصد کل تعمیرات برای هر زیرسیستم مشخص شود. در روش تحلیلی نیز پارامترهای متوسط زمان تعمیرات، تعیین تعداد و مدت زمان تعمیرات برای هر نوع خرابی (در یک بازه زمانی ۱۲ ماهه) محاسبه شده و در نتیجه، قابلیت دسترسی ماشین یا ناوگان تجهیزات بدست می‌آید. در مرحله بعد، قابلیت اطمینان هر LHD و زیرسیستم‌های آن‌ها محاسبه می‌شود، که این کار با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیلی، آماری و ترسیمی انجام می‌گیرد. به طوری که در تحلیل آن، ابتدا مدت زمان بین تعمیرات برای هر ماشین محاسبه می‌شود. سپس، داده‌ها از نظر مستقل بودن و عدم وجود روند، با استفاده از توزیع تئوری احتمال تست می‌شود. در نهایت، مناسب‌ترین توزیع به همراه پارامترهای آن، بدست می‌آید. بدین ترتیب، قابلیت اطمینان برای LHD محاسبه می‌شود [۵۷].

سامانتا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ با تاکید بر اهمیت شاول در عملیات استخراج معادن روباز، خرابی‌ها و عوامل توقف تولید مربوط به شاول را با استفاده از روش درخت خطا تحلیل نمودند. طبق این مطالعه، شاول به شش زیرسیستم شامل: جام بارگیری، سیستم حرکت، هیدرولیک، بدنه و کابین، موتور و چرخ زنجیری تقسیم شده است. خرابی هر یک از این بخش‌ها باعث توقف تولید شاول می‌شود. ضمناً سامانتا و همکارانش در یکی از معادن زغالسنگ هند، احتمال بروز هر یک از عوامل خرابی را تعیین کرده و در نتیجه احتمال خرابی در شاول را تعیین نمودند [۵۸].

در سال ۲۰۰۲، تاوسون طی انجام پایان‌نامه دکتری خویش، جنبه‌های تازه‌ای از کاربرد مهندسی قابلیت اطمینان در مهندسی معدن ارائه نمود. وی در این تحقیق، میزان بارگیری عملیاتی دراگلاین را در یکی از معادن استرالیا از دیدگاه قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری بهینه‌سازی نمود. تاوسون در این تحقیق تاکید کرده است که گرچه با افزایش توان و نیروی عملیاتی دستگاه تولید افزایش می‌یابد، اما درعین حال وارد آوردن فشار به دستگاه باعث افزایش خرابی و در نتیجه افزایش نیاز به تعمیر و نگهداری می‌شود. لذا توان عملیاتی دستگاه باید در یک حد بهینه هم از نظر تولید و هم از نظر تعمیر و نگهداری متعادل باشد. برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری، تاوسون دراگلاین را به بیست و پنج زیرسیستم مختلف تقسیم بندی نموده و جمع‌آوری داده‌های مدل را با استفاده از این ساختار انجام داد [۵۹].

هال و دانشمند^۲ در سال ۲۰۰۳ با انجام دو تحقیق مجزا در معادن روباز و زیرزمینی آمریکا و شیلی، تحقیقات در زمینه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی در سال‌های اخیر را مجدداً به سمت مدل‌سازی سوق دادند. در اولین تحقیق که در معادن روباز آمریکا انجام شده است، ایشان منابع و روش‌های جمع‌آوری داده‌های مربوط به ماشین‌آلات معدنی و منابع اطلاعاتی ممکن را به شرح زیر پیشنهاد نموده‌اند [۶۰]:

^۱ Samanta

^۲ hall & daneshmand

- حسگرهای نصب شده روی دستگاه‌ها

- اطلاعات ثبت شده توسط اپراتور

- سیستم‌های گسیل ناوگان ترابری

- گزارش‌های تولید

- گزارش‌های واحد تعمیر و نگهداری

در ادامه تحقیق با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف مورد اشاره در یکی از معادن آمریکا، مدل قابلیت اطمینان برای پنج دستگاه شاول هیدرولیکی فعال در آن معدن ارائه گردید. نتایج مدل سازی نشان داد که تابع چگالی شاول‌های مذکور، همگی از نوع ویبول بوده و تنها پارامترهای مقیاس و پارامتر شکل توزیع‌ها تفاوت دارند. همچنین، تابع چگالی زمان‌های از دست رفته و توقف‌های تولید مربوط به همه دستگاه‌ها، از نوع لاگ‌نرمال با میانگین و واریانس مختلف بودند.

در دومین تحقیق، هال^۱ و دانشمند، قابلیت اطمینان ماشین‌آلات سیار موجود در یک معدن زیرزمینی در کشور شیلی را مدل‌سازی نمودند. برای این منظور، از داده‌های تعمیر و نگهداری ۱۵ ماه معدن استفاده شد. معدن مورد نظر دارای چهار خاک انداز و یازده کامیون بوده است. در تحلیل‌های آماری برای کامیون‌ها سه زیرسیستم: موتور، بخش‌های حرکتی و هیدرولیک در نظر گرفته شده و بهترین توزیع مرتبط با هر کدام به دست آمده است. در نهایت با در نظر گرفتن شبکه سری بین کلیه اجزاء مدل، قابلیت اطمینان برای هر کامیون ارائه شده است [۶۱].

^۱ hall & daneshmand

در سال ۲۰۰۵، ام.کومرال^۱ به بررسی مسئله تخصیص قابلیت اطمینان در سیستم معدن پرداخته است. طراحی کلی برای سیستم معدن براساس ارزیابی قابلیت اطمینان انجام می‌گیرد، به طوری که انتخاب طرح تولید معدن، نیازمند دستیابی به حداکثر قابلیت اطمینان سیستم‌ها است. بنابراین، حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز برای اجزاء سیستم، باید با قابلیت اطمینان هدف و حداقل هزینه منطبق باشد. در این مقاله، سیستم معدن به اجزاء چالزنی، آتشباری، بارگیری و باربری تقسیم می‌شود. روند کار، براساس شناسایی اجزاء سیستم و انتخاب توزیع آماری مناسب است. در نتیجه، قابلیت اطمینان محاسبه خواهد شد. سپس، تخصیص قابلیت اطمینان بهینه برای اجزاء سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از تخصیص قابلیت اطمینان بهینه، ایجاد توازن مابین هزینه قابلیت اطمینان و قابلیت اطمینان هدف برای عملیات است. برای حل مشکل بهینه سازی نیز از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این الگوریتم، با استفاده از روش تکرار به یک مقدار بهینه مناسب خواهد رسید. در نهایت، حداقل قابلیت اطمینان، برای دستیابی به قابلیت اطمینان هدف با ملاحظه حداقل هزینه بدست می‌آید. با این حال، بهبود مقادیر قابلیت اطمینان سیستم‌ها وابسته به عوامل دیگری مانند پیچیدگی سیستم، زمین‌شناسی، فاکتورهای ژئوتکنیکی و محدودیت‌های فنی موجود در معادن است [۶۲].

قدرتی در سال ۲۰۰۵ در رساله دکتری خویش تحلیل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن محیط و شرایط عملیاتی ماشین‌آلات معدنی را ارائه نمود. وی در مطالعات خود با توجه به شرایط محیطی و عملیاتی (از قبیل وضعیت آب و هوایی، دما، رطوبت و گرد و خاک محیط کار، مهارت پرسنل، موقعیت قرارگیری کارگاه عملیات به منظور قابلیت تعمیرپذیری و دسترسی و تأمین قطعات در بازار) به شناسایی قطعات یدکی ضروری پرداخته است تا با توجه به قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری دستگاه یا سیستم، با پیشبینی صحیح میزان لوازم و قطعات یدکی مورد نیاز دستگاه، از تأخیرها و توقف‌های پیشبینی نشده جلوگیری به عمل آید و همچنین با کاهش انبار کردن قطعات غیر ضروری، از هزینه‌های عملیاتی اضافی کاسته شود [۶۳].

^۱ M.Kumral

در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸، جواد برآبادی^۱ و کومار، به بررسی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری سنگ شکن معدن بوکسیت جاجرم پرداخته‌اند و با اندازه‌گیری اهمیت اجزاء و تغییر فواصل نت پیشگیرانه، سبب تغییر در قابلیت اطمینان سیستم شده‌اند. در این تحقیق، ابتدا خرابی‌های مهم و قابل توجه شناسایی می‌شود. بنابراین، سیستم سنگ شکن به شش زیر سیستم تقسیم می‌شود و داده‌های خرابی مورد نیاز برای هر زیرسیستم جمع‌آوری می‌شود. در گام بعد، مستقل بودن مدت زمان بین خرابی و عدم وجود روند در آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایطی که داده‌ها، دارای روند باشند، از روش فرآیند پواسون غیر همگن برای محاسبات قابلیت اطمینان استفاده می‌شود و در شرایط عدم وجود روند، از توزیع‌های آماری مختلف به تخمین قابلیت اطمینان اجزاء پرداخته می‌شود و مناسب‌ترین توزیع بر اساس آزمون (K-S) انتخاب می‌شود. بنابراین، قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. سپس مهمترین زیرسیستم، از نقطه نظر خرابی و قابلیت اطمینان بدست می‌آید و در نهایت نیز قابلیت دسترسی اجزاء سیستم محاسبه شده است [۶۲]، [۶۴].

از دیگر تحقیقات در مورد قابلیت اطمینان LHD ها می‌توان به کار واگناس و زیانگزی^۲ در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد. ایشان در این تحقیق، ناوگانی متشکل از ۱۳ ماشین LHD را در یک معدن سنگ سخت در کانادا مورد مطالعه قرار دادند. طی این تحقیق مشکلات تعمیر و نگهداری و دلایل توقف‌های این ماشین‌آلات مورد بحث قرار گرفت [۶۵].

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۹، شارما و همکارانش^۳، قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن روباز را مورد مطالعه قرار داده و برآوردی آماری از هزینه‌های صرف شده برای تعمیر و نگهداری در یک معدن روباز ارائه

^۱ Javad Barabady

^۲ Vagenas & Xiangxi

^۳ Sharma et al.

نمودند. ایشان با مطالعه تأخیرهای پیش آمده شاول، سنگشکن، آشکاری و غیره، اعلام کردند که هزینه متوسط برای تعمیر و نگهداری ماشین آلات مورد مطالعه ۶,۱۲ میلیون دلار در سال است [۶۶].

جلالی و فروهنده، در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار در زمینه قابلیت اطمینان سیستم‌های موجود در معدن، روش مارکوف را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تهویه تونل‌های در حال ساخت به کار بردند. ایشان با محاسبه نرخ خرابی و نرخ تعمیر فن‌های به کار رفته در یک تونل در ایران و با مدلسازی تصادفی حالات کار و خرابی فن‌ها و نیز جایگزینی فن در حال انتظار به جای فن خراب، احتمال خرابی سیستم را تعیین نمودند. به استناد این گزارش، در ۳۵۸ روز از سال نشانه‌ای از خرابی در سیستم مشاهده نشد [۶۷].

در سال ۲۰۱۱، حسینی و همکاران در مقاله‌ای به مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم آب درام شیرر پرداخته اند. در این مقاله سه زیرسیستم: جت اسپری، فیلتر و لوله‌ها برای سیستم آب در نظر گرفته شده است. در انتها نیز برای سطوح مختلف قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی مناسب تعمیرات پیشنهاد گردیده است [۶۸].

همچنین در سال ۲۰۱۱، حسینی در مقالاتی جداگانه به بررسی قابلیت اطمینان سیستم هیدرولیک، سیستم الکتریکی و سیستم حرکت درام شیرر پرداخته است. وی در این مقالات با استفاده از روش مدلسازی به ارزیابی قابلیت اطمینان هر یک از سیستم‌های اشاره شده پرداخته است و در نهایت نیز استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری را ارائه نموده است [۶۹].

در سال ۲۰۱۲، حسینی و همکاران به مدلسازی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری کابل شیرر معدن طبس پرداختند که در این مقاله از روش قانون توان برای ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم کابل شیرر استفاده شده است. همچنین در این مقاله با در نظر گرفتن مقدار ۸۰ درصد به عنوان حداقل میزان قابل قبول قابلیت اطمینان، زمان مناسب برای تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد گردیده است [۴۵].

در سال ۲۰۱۳، رحیمدل و همکاران سیستم هیدرولیک دریل‌های چرخشی معدن مس سرچشمه را مورد مطالعه قرار دادند. وی در این مقاله با در نظر گرفتن پنج زیرسیستم هیدرولیک، چالزن، الکتریکی، انتقال قدرت و پنوماتیک به مدلسازی قابلیت اطمینان به روش آماری پرداخته است و در انتها برای سطح قابلیت اطمینان ۸۰ درصد به عنوان قابلیت اطمینان آرمانی، ۱۰ ساعت را به عنوان تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد کرده است [۷۰].

در سال ۲۰۱۳ برآبادی به انتخاب و اعتبارسنجی مدل قابلیت اطمینان با استفاده از نمودار احتمال ویبول (WPP) در یک سیستم انتقال نیرو ترانسفورماتور قدرت (PT)^۱ برای شرکت انتقال نیرو جاجرم پرداخت. در این تحلیل به این نتیجه رسید که توزیع آمیخته ویبول مناسب ترین مدل برای PT است. در واقع، مدل پیش بینی می‌کند که PT ممکن است به دلیل دو حالت مختلف خرابی خراب شود. نتیجه تجزیه و تحلیل نشان داد که استفاده از توزیع ویبول دو پارامتر (سیاست فعلی شرکت) در قابلیت اطمینان PT دست کم گرفته شده است. طبق نتیجه، ۱۲ درصد PT ها قبل از ۱۰ سال شکست خورده‌اند [۳۴].

جواد و عباس بردآبادی در سال ۲۰۱۳ با انتشار مقاله‌ای نشان دادند که یکی از مهم ترین پارامترهای موثر و تاثیرگذار بر روی قابلیت اطمینان شرایط کاری محیط حاکم بر ماشین معدنی می‌باشد، که این شرایط شامل محیط اطراف، مهارت اپراتور و پرسنل تعمیرکار، مجموعه فعالیت‌های تعمیراتی انجام شده بر روی ماشین، دمای محیط کاری و رطوبت آب و هوایی منطقه می‌باشند. در این مقاله اشاره گردیده که بسیاری از مطالعات صورت گرفته در زمینه قابلیت اطمینان تنها با در نظر گرفتن زمان بین خرابی‌ها و یا زمان تا وقوع خرابی ارزیابی گردیده و توجه زیادی به پارامترهای موثر بر آن صورت نگرفته است. لذا روش‌های موجود به منظور تاثیر دادن شرایط محیطی نیاز به تغییرات و اصلاحاتی دارند. بنابراین یک مدل آماری مناسب به منظور آنالیز و تحلیل تاثیر شرایط محیطی بر روی قابلیت اطمینان باید انتخاب گردد که در این مطالعه از روش (PHM)^۲ استفاده شده است [۷۱].

^۱ Power transformer

^۲ Proportional Hazard Model

در سال ۲۰۱۴ عطایی و نوری قابلیت اطمینان سنگ شکن و آسیاب را در کارخانه سیمان آذربادگان با استفاده از آنالیز درخت خطا^۱ ارزیابی کردند؛ نتایج این مطالعه که بر روی داده‌های مربوط به ۲۰۰ ساعت کارکرد دستگاه می‌بود نشان داد که احتمال وقوع خرابی برای سنگ شکن، نوار نقاله و آسیاب به ترتیب برابر است با ۶۴، ۷۳، ۹۵ درصد و نوار نقاله به عنوان سیستم با احتمال خرابی بالا ارزیابی گردید. نهایتاً برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به منظور افزایش قابلیت اطمینان ماشین ارائه گردید [۷۲].

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به افزایش بهره‌وری ماشین دراگلین یکی از معادن زغال هند توسط تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و دسترسی پرداختند. در این تحقیق دراگلین به هفت زیرسیستم اصلی تقسیم شد که به صورت سری در نظر گرفته شدند سپس قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری هر زیر سیستم محاسبه شدند. نتایج نشان داد قابلیت دسترسی دراگلین پایین بوده (حدود ۰/۸۴) که علت آن زیر سیستم ساختاری با حداکثر میانگین زمان تعمیر ۸۸ ساعت و زیرسیستم سطل با حداقل میانگین زمان تا خرابی ۵۴ ساعت می‌باشد [۷۳].

کومار و همکاران در سال ۲۰۱۹ قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت دسترسی ماشین حفر تونل (TBM) در یک تونل آب هند را با استفاده از روش مارکوف محاسبه کردند. در این تحقیق دستگاه به چهار زیر سیستم، شامل زیر سیستم کله حفار، زیر سیستم هیدرولیک، زیر سیستم نوار نقاله و زیر سیستم ساختاری تقسیم شده است که به صورت سری قرار گرفته‌اند. قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و دسترسی هر کدام از زیرسیستم‌ها محاسبه شده و در نهایت با توجه به سری قرار گرفتن زیر سیستم‌ها قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و دسترسی کل دستگاه محاسبه گردید [۷۴].

^۱ Failure Tree Analysis

اگورلا و کامرال^۱ در سال ۲۰۲۰ به کنترل عملیات حفاری توسط تحلیل قابلیت اطمینان و شبیه‌سازی پرداختند. در این تحقیق قابلیت اطمینان دستگاه حفار و بیت‌های سرمته به دست آورده شد و روشی برای تعیین تعداد بیت‌های مورد نیاز در یک دوره معین ارائه شد [۷۵].

احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بازنگری روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات تونل‌زنی، شامل روش تحلیل آماری، روش تحلیل درخت خطا، روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آنها و روش مارکوف پرداختند [۷۶].

۳-۵ جمع بندی

در این فصل مروری بر کارهای انجام شده در زمینه تاب‌آوری و تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) صورت گرفت. تعداد مقالات منتشر شده در زمینه تاب‌آوری نشان از افزایش مطالعات در این زمینه در سال‌های اخیر دارد. با این کار گامی در بهبود سودآوری و میزان تولید معادن مختلف برداشته می‌شود. پژوهش حاضر نیز تلاش می‌کند تا با ارزیابی تاب‌آوری به بهبود عملکرد عملیاتی سیستم بارگیری معدن کمک کند.

^۱ ugurlu & kumral

فصل چهارم: مطالعه موردی

۴-۱ مقدمه

انجام پروژه‌های صنعت ساخت به خصوص پروژه‌های بزرگ نظیر سد، راه، معادن، سیستم‌های انتقال آب، ساختمان و بسیاری دیگر از پروژه‌های عظیم در عصر حاضر با تحولات بی‌سابقه‌ای مواجه بوده است. شناخت انواع روش‌های مختلف اجرای پروژه و انواع ماشین‌آلات و تجهیزات مدرن این صنعت و نحوه صحیح انتخاب و استفاده از آنها، می‌تواند نقش موثری در موفقیت طرح‌ها و پروژه‌ها داشته باشد. همچنین می‌توان ادعا کرد قسمت عمده‌ای از هزینه پروژه‌ها مربوط به ماشین‌آلات و تجهیزات است. از این رو یکی از عوامل مهم در انجام موفق طرح‌ها و پروژه‌ها نقش ماشین‌آلات و تجهیزات و به تبع آن نحوه انتخاب و مدیریت صحیح آنها می‌باشد. با این حال در دنیا چه از نظر مباحث نظری و چه عملی (کارگاهی) اطلاعات جامع و کاملی درباره تمام ماشین‌آلات و تجهیزات که پوشش دهنده مباحث مربوط به معرفی کامل، موارد استعمال، انواع، مشخصات فنی، نحوه انتخاب مناسب، سرویس و نگهداری، ایمنی و سایر موارد مربوط به آنها باشد، وجود نداشته و تنها چند مرجع، آن هم با تکیه بیشتر در مورد ماشین‌آلات مربوط به عملیات خاکی وجود دارد. به صورت کلی درباره وضعیت ماشین‌آلات و تجهیزات در داخل کشور می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۶۷].

۱- در بین منابع مختلف پروژه‌های عمرانی ماشین‌آلات سهم قابل توجه‌ای از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهند (بین ۳۰ الی ۷۰ درصد).

۲- طبق برآورد و بررسی‌های انجام شده، راندمان واقعی ماشین‌آلات در ایران حداکثر ۵۰ درصد می‌باشد.

۳- اکثر ماشین‌آلات با خروج مبالغ هنگفتی ارز از خارج وارد می‌شود.

۴- اطلاعات نظری بسیار کمی درباره انواع ماشین‌آلات نوین و همچنین اطلاعات کارگاهی واقعی بسیار اندکی درباره ماشین‌آلات موجود در کشور وجود دارد.

۵- از طرفی تجارب حاکی از آن است که در کشور ما مدیریت ماشین‌آلات و تجهیزات (اعم از مسائل خرید، انتخاب نوع ماشین‌آلات و تجهیزات مناسب، بهره‌برداری، نگهداری) به صورت مناسبی صورت نمی‌گیرد.

۶- سیستم‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات بسیار ضعیف بوده و پرسنل متخصص و کارآزموده با دانش کافی در ابعاد مدیریت، سازماندهی، راهبری و پشتیبانی از نظر کمی و کیفی وجود ندارد. در ادامه به بررسی کلی ماشین‌آلات بارگیری می‌پردازیم.

۴-۲ آشنایی با معدن بوکسیت جاجرم

معدن بوکسیت جاجرم در ۱۵ کیلومتری شمال شرق جاجرم در طول جغرافیایی ۲۵، ۵۶ تا ۴۵، ۵۶ شرقی و عرض جغرافیایی ۲، ۳۷ تا ۳ و ۳۷ شمالی واقع شده است. گسترش طولی معدن بوکسیت جاجرم که از غرب به شرق به نام‌های محلی گل‌بینی، زو، تاگوئی و سنگ تراش نام گذاری شده است، حدود ۱۶ کیلومتر است. گسترش معادن گل‌بینی ۴/۷ کیلومتر بوده و معادن زو ۳/۳ کیلومتر است. گسترش تاگوئی حدود ۵ کیلومتر و سنگ تراش حدود ۳ کیلومتر است. ماده معدنی آن بوکسیت سخت دیاسپوری به رنگ‌های قهوه‌ای روشن تا کرم، خاکستری و سبز است میزان ذخیره قابل معدنکاری آن ۱۲/۶ میلیون تن است که ۵/۸ میلیون تن آن به صورت روباز و بقیه به صورت زیرزمینی استخراج می‌شود. میزان استخراج سالیانه ۴۰۰ هزارتن است. این معدن از سال ۱۳۷۷ با سرمایه گذاری ثابت به میزان ۲۸/۵ میلیارد ریال توسط طرح تولید آلومینا و شرکت آلومینای ایران بهره برداری شده است [۷۷].

۴-۳ تاریخچه و سوابق معدن بوکسیت جاجرم

کانسار جاجرم برای اولین بار در سال ۱۳۴۷ شناسایی شد. نمونه برداری‌های انجام شده در سال های ۱۳۴۹ و ۱۳۵۱ نشان داد که بوکسیت جاجرم دارای ارزش اقتصادی بوده و به عنوان ماده اولیه تولید آلومینا قابل استفاده و بهره‌برداری است. مطالعات امکان سنجی از سال ۱۳۶۲ با همکاری سازمان توسعه ملل متحد (یونیدو)

آغاز شد. تا سال ۱۳۶۲ اکتشافات در معادن جاجرم توسط شرکت‌های دولتی، کارشناسان داخلی و خارجی عمدتاً به صورت مطالعه عکس‌های هوایی، جمع‌آوری اطلاعات سطحی، نمونه‌برداری و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس حداکثر ۱/۲۵۰۰۰۰ بوده است. از سال ۱۳۶۲ طرح تولید آلومیناء عملیات اکتشاف سیستماتیک منطقه را به اجراء درآورد. نتایج این مطالعات منجر به کشف ذخیره ای معادل ۵ میلیون تن شد. طرح بهره‌برداری ۱۰ ساله معدن در سال ۱۳۷۶ توسط شرکت سهامی آلومینیوم ایران صادر گردید. در مجموع تا پایان سال ۱۳۸۶، ۱،۳۸۵،۳۵۵ تن بوکسیت از معادن بوکسیت جاجرم استخراج شده است [۷۷].

۴-۴ معرفی ماشین‌آلات بارگیری

ماشین‌آلات سیستم بارگیری معدن بوکسیت جاجرم شامل ۳ دستگاه لودر KL01 مدل ۴۷۰ و KL02 و KL03 مدل ۷۷۰ و همچنین ۴ دستگاه بولدوزر KS02، KS05، KS06 و KS07 مدل ۴۷۰ است که لودر را به عنوان ماشین بارگیری مورد مطالعه در این پایان‌نامه بررسی خواهیم کرد.

۴-۴-۱ ماشین بارگیری لودر

لودرها بطور وسیعی در کارهای ساختمانی برای حمل توده مواد (نظیر خاک و سنگ)، بارگیری کامیون‌ها، خاکبرداری، حفاری و گاهی تسطیح (به عنوان بولدوزر) و غیره به کار گرفته می‌شوند. بر خلاف اسکرپرها که به طور همزمان برای بارگیری و حمل استفاده می‌شوند، لودرها همواره باید به همراه ماشین‌های انتقال دهنده مانند کامیون‌ها به کار گرفته شوند. به طور کلی لودرها قادرند کارهای مختلفی را که در ادامه به آن اشاره می‌شود، انجام دهند [۷۸]، [۷۷]:

۱- بارگیری ماشین آلات حمل مواد خاکی: با لودر می توان مواد خاکی نظیر شن، خاک معمولی، سنگ شکسته، پسماند کارخانجات و واحدهای صنعتی و غیره را داخل کامیون و سایر وسایل باربر ریخته و آنها را پرکرد.

۲- بلندکردن بار و انتقال آن در کارهای ساختمانی با لودر می توان مصالح ساختمانی را از قبیل آجر، بلوک بتنی پیش ساخته و غیره در محوطه کارگاه حمل و جابجا نمود.

۳- خاکبرداری: این ماشین در کارهای خاکبرداری ساختمان ها به خصوص گودبرداری خاک های سست تا متوسط بسیار سودمند تشخیص داده شده است، زیرا کندن و جابجا کردن خاک و انباشته و بارگیری کردن آن با لودر سریعتر از سایر ماشین آلات صورت می گیرد.

۴- تمیز کردن قشر سطحی زمین کارگاه: در زمین هایی که جنس آن زیاد سخت نبوده و تا حدودی نرم باشد، از لودر برای کندن و تمیز کردن محل کار استفاده می کنند.

لودرها را می توان برحسب حجم داخل جام و همچنین وزنی که می توانند بلند کنند، تقسیم بندی کرد. لودرها دارای جام هایی به ظرفیت ۶ متر مکعب تا ۲۰ متر مکعب بر اساس استاندارد SAE و ۰/۷۵ تا ۳/۵ متر مکعب برای چرخ زنجیری و ۰/۱۵ تا ۱۵ متر مکعب برای چرخ لاستیکی می باشند. اما آنچه بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و رایج می باشد، لودر با ظرفیت جام ۰/۷۶ تا ۴ متر مکعب می باشد. توان لودرها معمولاً از ۵۰ تا ۱۲۵۰ اسب بخار متغیر است که این محدوده بر حسب کیلووات از ۳۵ تا ۹۳۵ تغییر می کند.

۴-۱-۱ انواع لودر

دو نوع لودر چرخ زنجیری و لودر چرخ لاستیکی وجود دارد که در ادامه به آن می پردازیم:

الف- لودر چرخ زنجیری:

مطابق شکل (۴-۱) لودرهای چرخ زنجیری مزایایی نظیر مانور خوب و قدرت کشش زیاد در زمین‌های نرم و ناهموار را دارا می‌باشند. عملکرد این دستگاه‌ها در روی زمین‌های سنگلاخی نسبت به نوع چرخ لاستیکی که به شدت ممکن است آسیب ببینند، بسیار مناسب می‌باشد. همچنین این نوع ماشین‌ها طراحی مناسبی برای مانور در محیط‌های محدود دارند. نقل و انتقال این لودرها بین پروژه‌های مختلف، نیازمند تریلر است.



شکل ۴-۱. لودر چرخ زنجیری

ب- لودر چرخ لاستیکی

مطابق شکل (۴-۲) لودرهای چرخ لاستیکی دارای سرعت بالاتری نسبت به لودرهای چرخ زنجیری بوده و بسیار بهتر از آنها در زمین‌های سفت عمل می‌کنند. آنها می‌توانند در راه‌های ساخته شده حرکت کنند و در فواصل نسبتاً کوتاه بدون نیاز به تریلر انتقال یابند. از جهت اندازه انواع گسترده‌تری نسبت به لودرهای چرخ زنجیری دارند و از این رو می‌توانند سازگارتر با نیازها انتخاب شوند و همچنین هزینه نگهداری آنها در زمین‌های مرطوب و خاک‌های ماسه‌ای که خاصیت ساییده برای لودرهای چرخ زنجیری دارند، کمتر می‌باشد. همچنین در زمین‌های مرطوب اگر نوع زنجیر لودر مناسب نباشد در اثر چسبندگی خاک به زنجیر، راندمان آن پایین می‌آید.

لودرهای چرخ لاستیکی قدرت کشش کمتری نسبت به لودرهای چرخ زنجیری هم وزن خود دارا بوده و در نتیجه قدرت مفید آنها در کندن خاک‌ها و بالا رفتن با پایین آمدن از شیب‌ها محدود است.



شکل ۴-۲. لودر چرخ لاستیکی

۴-۵ جمع بندی

در این فصل ابتدا درباره موقعیت جغرافیایی و همین‌طور به تاریخچه و سوابق معدن بوکسیت جاجرمد بحث شد. سپس به بررسی ماشین بارگیری لودر و آن پرداخته شد. در فصل بعد با توجه به داده‌های خرابی ماشین‌های بارگیری لودر، تاب‌آوری لودرها را مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌دهیم.

فصل پنجم: تحلیل داده‌ها

۵-۱ مقدمه

در این فصل با توجه به طبقه‌بندی داده‌های جمع‌آوری شده، ابتدا تحلیل پارتو برای شناسایی بحرانی‌ترین زیرسیستم‌ها صورت گرفته است. پس از آن تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، پشتیبانی و در نتیجه آن محاسبه تاب‌آوری با استفاده از روش‌های آماری و توزیع ویبول انجام شد. در انتهای فصل نیز نتایج نمودارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۵-۲ داده‌های خرابی ماشین

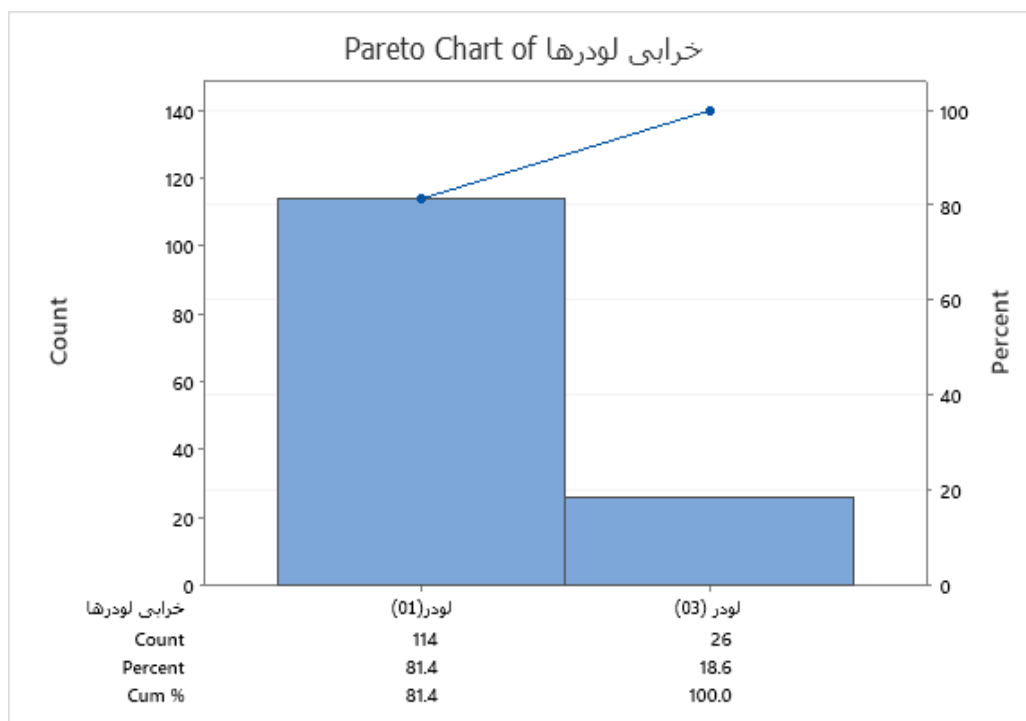
مهمترین ابزار در تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی، داده‌های خرابی است. در این تحقیق زیر سیستم‌های سامانه بارگیری مورد مطالعه معدن بوکسیت جاجرم شامل دو دستگاه (لودر ۰۱ مدل ۴۷۰ و لودر ۰۳ مدل ۷۷۰) است. در این تحقیق، از اطلاعات خرابی موجود در تعمیرگاه معدن به مدت ۲۴ ماه، استفاده شده است. لذا در این فصل به تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی و در نهایت محاسبه تاب‌آوری لودرهای سامانه بارگیری معدن بوکسیت جاجرم پرداخته شده است.

۵-۳ تحلیل پارتو^۱

به منظور تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم بارگیری از تحلیل پارتو استفاده شده است. با توجه به این روش، پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های خرابی، درصد خرابی هر زیرسیستم نسبت به تمام خرابی‌ها محاسبه شده و نمودار ستونی فراوانی خرابی زیر سیستم‌ها به ترتیب از بیشترین مقدار فراوانی به کمترین مقدار رسم می‌شود. به این ترتیب امکان تعیین بحرانی‌ترین زیرسیستم وجود خواهد داشت. نمودار ستونی تحلیل پارتو برای زیرسیستم

^۱ Parato

لودر ۰۱ و لودر ۰۳ در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، زیر سیستم لودر ۰۱ با فراوانی ۸۱/۴ درصد، بحرانی ترین زیرسیستم می باشد. بنابراین، در تمام مسائل مدیریتی مربوط به تعمیر و نگهداری، زیر سیستم لودر ۰۱ باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۵-۱. نمودار تحلیل پارتو برای لودرهای بوکسیت جاجرم

۵-۴ تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی (RMS) لودرهای سیستم بارگیری

در این پایان نامه با توجه به کاربرد گسترده روش تحلیل و مدل سازی آماری در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، از این روش برای تحلیل RMS لودرهای بارکننده بوکسیت جاجرم استفاده شده است. لذا جزئیات مراحل مدل سازی قابلیت (RMS) در ادامه ارائه شده است.

الف: جمع‌آوری داده‌های خرابی

به منظور تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی در این تحقیق از داده‌های خرابی لودرهای معدن بوکسیت جاجرم استفاده شده است. با استفاده از این داده‌ها، خرابی‌ها به ترتیب زمان وقوع مرتب شده، سپس زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان انجام تعمیرات (TTR)، محاسبه شده تا در مراحل بعدی از آن‌ها استفاده شود.

ب: تجزیه و تحلیل مقدماتی داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌های خرابی مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه مجموعه داده‌های خرابی محاسبه می‌شود. سپس اگر دامنه داده (حداقل - حداکثر = دامنه) در مقایسه با میانگین نمونه کم باشد، می‌توان از تنوع داده‌های خرابی چشم‌پوشی کرد و از میانگین داده خرابی برای مدل‌سازی داده‌ها استفاده کرد. همچنین اگر مقدار دامنه داده‌های خرابی در مقایسه با میانگین داده‌ها دارای فاصله‌ی قابل توجهی بود از میانگین صرف نظر کرده و به مرحله بعد می‌رویم.

ج: انتخاب توزیع مناسب

برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار Minitab که نرم‌افزار تخصصی آماری برای کنترل کیفیت، کار بر روی اعداد و تجزیه و تحلیل داده‌های خام می‌باشد استفاده شده است. این نرم‌افزار با محاسبه پارامترهای آماری، کاربر را در انتخاب بهترین تابع برازش‌شده بر داده‌های موجود یاری می‌نماید. در این نرم‌افزار توابع نمایی، ویبول (دوپارامتری و سه پارامتری)، لاگ نرمال^۱ (دو پارامتری و سه پارامتری)، لجستیک^۲، لاگ لجستیک (دو پارامتری و سه پارامتری) و نرمال به عنوان توابع شناخته شده در تحلیل RMS استفاده می‌شوند. همچنین با استفاده از

^۱ Log normal

^۲ Logistics

نرم افزار Weibull++ که یک نرم افزار آماری است و می تواند توزیع هایی از خانواده ویبول (به عنوان مثال توزیع هایی مثل ویبول آمیخته، ویبول اصلاح شده^۱، ویبول معکوس^۲ و چند توزیع دیگر) که در نرم افزار Minitab موجود نمی باشد را بدست آورد. در این پایان نامه نیز از این دو نرم افزار ذکر شده برای تحلیل داده ها استفاده شده است. سپس با استفاده از بهترین توزیع، پارامترهای (α) ، (β) و (γ) که به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و نسبت آمیختگی نام دارند محاسبه می گردند.

د: محاسبه و ترسیم قابلیت اطمینان، تعمیر پذیری و پشتیبانی (RMS)

در آخرین مرحله مدلسازی (RMS) تابع قابلیت اطمینان، تعمیر پذیری و پشتیبانی و تابع نرخ خرابی آنها محاسبه شده و منحنی های آنها رسم می شود. سپس، منحنی های قابلیت RMS و نرخ خرابی ها به دست آمده، مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.

۵-۴-۱ تحلیل قابلیت اطمینان لودرهای ۰۱ و ۰۳

همانطور که قبلا اشاره شد بعد از تهیه داده و طبقه بندی داده های خرابی هر لودر، گام بعدی برای تحلیل، محاسبه و برآورد مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه داده های خرابی است.

طبق جدول (۵-۱) فاصله ی دامنه داده ها در مقایسه با میانگین داده های خرابی لودر ۰۱ و ۰۳ زیاد است و از میانگین داده ها برای مدلسازی و تحلیل، صرف نظر شده و از روش توزیع ویبول برای تحلیل استفاده می شود.

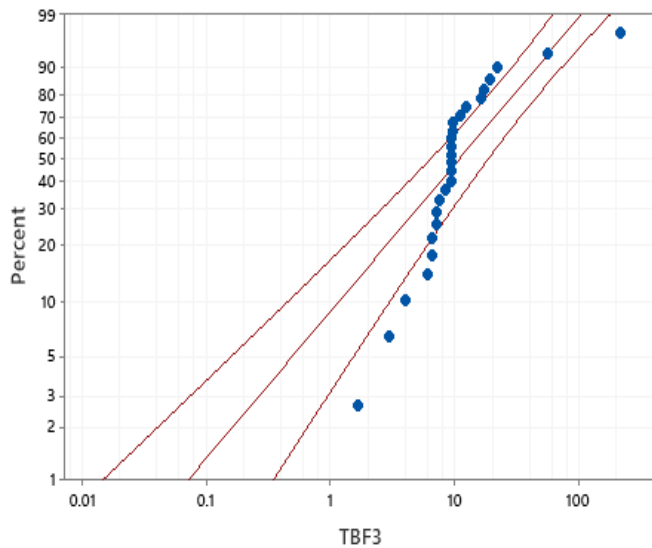
^۱ Modified Weibull

^۲ Reverse Weibull

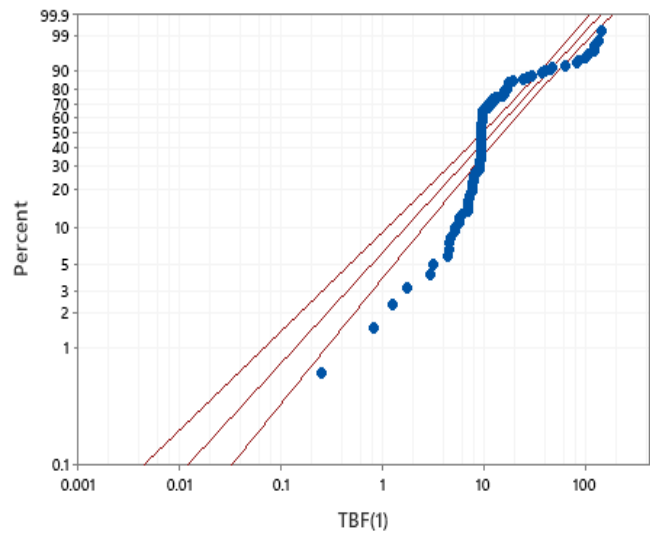
جدول ۵-۱. مقادیر زمان حداکثر، حداقل، میانگین، رنج یا دامنه داده‌های خرابی بر حسب ساعت

داده‌های خرابی	حداکثر	حداقل	دامنه	میانگین	اختلاف میانگین با دامنه
TBF ₁	۱۴۳/۸۷	۰/۲۵	۱۴۳/۶۲	۹/۴۵	۱۳۴/۱۷
TBF ₃	۲۱۸/۶۲	۱/۶۶	۲۱۶/۶۶	۹/۴۵	۲۰۷/۲۱

گام بعدی در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت RMS رسم نمودار احتمال ویبول (wpp) است. در این پایانه با استفاده از نرم افزار minitab نمودار احتمال ویبول لودرها رسم شده است و نتایج آن برای داده‌های خرابی (TBF) در شکل‌های (۲-۵) و (۳-۵) آورده شده است.



شکل ۵-۳. نمودار احتمال ویبول (wpp) لودر ۰۳



شکل ۵-۲. نمودار احتمال ویبول (wpp) لودر ۰۱

با توجه به مطالب گفته شده در بخش‌های قبل، هرگاه نمودار احتمال ویبول (WPP) حاصله از نرم افزار مینی‌تب شکل (S) را به خود بگیرد، بهترین توزیع مناسب داده‌های خرابی توزیع آمیخته ویبول است که به کمک نرم افزار Weibull++ پارامترهای آن محاسبه می‌گردد. لذا پارامترهای بدست آمده از توزیع ویبول آمیخته برای داده‌های خرابی لودر ۰۱ و ۰۳ با استفاده از نرم‌افزار Weibull++ در جدول (۲-۵) آورده شده است.

جدول ۵-۲. پارامترهای محاسبه شده با مناسب‌ترین تابع برازش شده

دستگاه	لودر ۰۱	لودر ۰۳
بهترین برازش	2-fold Weibull Mixture	3-fold Weibull Mixture
پارامتر	$\alpha_1=9/49 \quad \beta_1=37/45 \quad \gamma_1=0/44$ $\alpha_2=17/39 \quad \beta_2=1/07 \quad \gamma_2=0/56$	$\alpha_1=8/01 \quad \beta_1=3/02 \quad \gamma_1=0/33$ $\alpha_2=9/57 \quad \beta_2=49/99 \quad \gamma_2=0/3$ $\alpha_3=24/68 \quad \beta_3=1/04 \quad \gamma_3=0/37$

طبق جدول (۵-۲) با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و

نرخ خرابی لودر ۰۱ و ۰۳ به صورت روابط زیر محاسبه می‌شود.

معادله قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لودر ۰۱ به ترتیب به صورت رابطه‌ی (۵-۱) و (۵-۲) است:

$$R_1(t) = \gamma_1 \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right] + \gamma_2 \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right] = 0.44 \exp \left[- \left(\frac{t}{9.49} \right)^{37.45} \right] + 0.56 \exp \left[- \left(\frac{t}{17.39} \right)^{1.07} \right] \quad (۵-۱)$$

$$\lambda_1(t) = \frac{f_1(t)}{R_1(t)} = \gamma_1 \left(\frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\alpha_1^{\beta_1}} \right) \exp \left(- \frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + (1 - \gamma_1) \left(\frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\alpha_2^{\beta_2}} \right) \exp \left(- \frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} / R_1(t) \quad (۵-۲)$$

$$\lambda_1(t) = 0.44 \left(\frac{37.45 t^{37.45-1}}{9.49^{37.45}} \right) \exp \left(- \frac{t}{9.49} \right)^{37.45} + 0.56 \left(\frac{1.07 t^{1.07-1}}{17.39^{1.07}} \right) \exp \left(- \frac{t}{17.39} \right)^{1.07} / R_1(t)$$

و همچنین معادله قابلیت اطمینان و نرخ خرابی لودر ۰۳ به ترتیب به صورت رابطه‌ی (۵-۳) و (۵-۴) است:

$$R_3(t) = 0.33 \exp \left[- \left(\frac{t}{8.01} \right)^{3.02} \right] + 0.3 \exp \left[- \left(\frac{t}{9.57} \right)^{49.99} \right] + 0.37 \exp \left[- \left(\frac{t}{24.68} \right)^{1.004} \right] \quad (۵-۳)$$

$$\lambda_3(t) = 0.33 \left(\frac{3.02t^{3.02-1}}{8.01^{3.02}} \right) \exp \left(-\frac{t}{8.01} \right)^{3.02} + 0.3 \left(\frac{49.99t^{49.99-1}}{9.57^{49.99}} \right) \exp \left(-\frac{t}{9.57} \right)^{49.99} + 0.37 \left(\frac{1.004t^{1.004-1}}{24.68^{1.004}} \right) \exp \left(-\frac{t}{24.68} \right)^{1.004} / R_3(t) \quad (4-5)$$

طبق جدول (۳-۵) قابلیت اطمینان لودرهای ۰.۱ و ۰.۳ در بازه زمانی ۱ تا ۱۴۰ ساعت، با جایگذاری در معادلات، بدست آمد. همچنین طبق جدول (۴-۵) نرخ خرابی لودرهای ۰.۱ و ۰.۳ در بازه زمانی ۱ تا ۲۰۰ ساعت با توجه به معادلات تابع نرخ خرابی بدست آمد.

جدول ۳-۵. مقادیر قابلیت اطمینان لودر ۰.۱ و ۰.۳

قابلیت اطمینان	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۸۰	۱۴۰
$R_1(t)$	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۳۲	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۰۳	۵/۰۴E-۵
$R_3(t)$	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۲۹	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۰۱

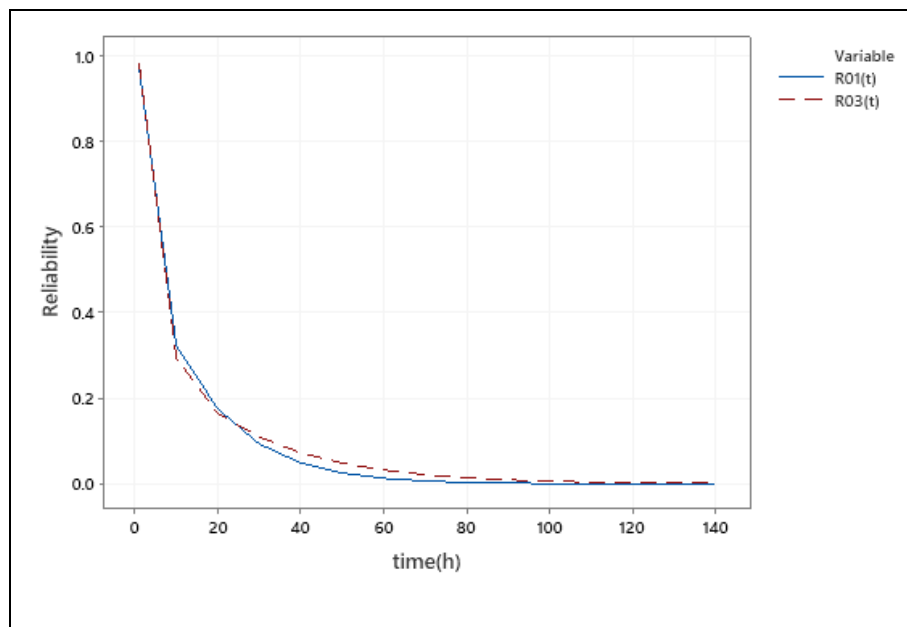
جدول ۴-۵. مقادیر نرخ خرابی لودر ۰.۱ و ۰.۳

نرخ خرابی	۱	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
$\lambda_1(t)$	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۷
$\lambda_3(t)$	۰/۰۱	۰/۰۴۰	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱	۰/۰۴۲

نتایج مدل سازی قابلیت اطمینان لودرها به صورت شکل (۴-۵) نشان داده شده است و با توجه به نمودار، قابلیت اطمینان لودر ۰.۳ اندکی بیشتر از لودر ۰.۱ است. بدین صورت که قابلیت اطمینان لودر ۰.۱ در شروع کار خود حدود ۹۷ درصد بوده و با شیبی تندی کاهش می یابد و با گذشت ۱۰ و ۶۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ترتیب حدودا به ۳۲ و ۱ درصد می رسد و سپس بعد از گذشت حدودا ۸۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به صفر

میل می‌کند. به عبارت دیگر چنانچه هیچ‌گونه برنامه‌ای برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیش‌گیرانه درلودر ۰۱ وجود نداشته باشد این لودر به احتمال قریب به یقین بعد از ۸۰ ساعت عملیات، دچار خرابی شده و از کار خواهد افتاد.

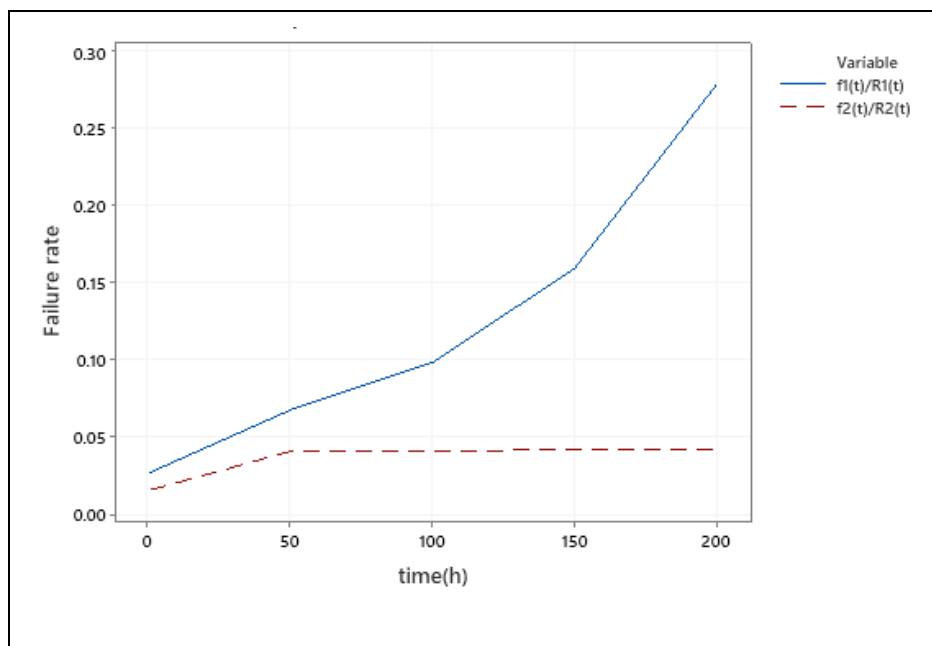
همچنین برای لودر ۰۳ قابلیت اطمینان آن در ساعت اولیه فعالیت حدود ۹۸ درصد بوده و باشیب تندی کاهش می‌یابد سپس با گذشت ۸۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۱ درصد می‌رسد در نهایت با گذشت ۱۰۰ ساعت از فعالیت خود، قابلیت اطمینان آن به صفر می‌رسد. لذا چنانچه هیچ‌گونه برنامه‌ای برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیش‌گیرانه درلودر ۰۳ وجود نداشته باشد این لودر به احتمال قریب به یقین بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت عملیات، دچار خرابی شده و از کار خواهد افتاد. بنابراین برای پرهیز از توقفات ناخواسته در لودرهای ۰۱ و ۰۳ اتخاذ تمهیدات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ضرورت دارد.



شکل ۵-۴. منحنی قابلیت اطمینان لودرهای ۰۱ و ۰۳

منحنی نرخ خرابی لودر ۰۱ و ۰۳ به صورت شکل (۵-۵) است. با توجه به این منحنی با این که لودر ۰۱ قابلیت اطمینان کمتری نسبت به لودر ۰۳ دارد ولی نرخ خرابی لودر ۰۱ بسیار بیشتر از لودر ۰۳ است. لودر ۰۱ در شروع

کار خود دارای نرخ خرابی ۲ درصد بوده و بعد از گذشت زمان، رفته رفته افزایش می‌یابد. اما لودر ۰۳ در ابتدا نرخ خرابی آن ۱ درصد بوده و تا قبل از ۵۰ ساعت صعودی و بعد از ۵۰ ساعت تقریباً ثابت شده است. در واقع این منحنی نشان می‌دهد که طبق منحنی وان حمامی، لودر ۰۱ دارای نرخ خرابی صعودی و در دوره فرسایش قرار دارد. همینطور لودر ۰۳ ابتدا در دوره فرسایش سپس به طور ثابت عمر طبیعی خود را طی می‌کند.



شکل ۵-۵. منحنی نرخ خرابی لودرهای ۰۱ و ۰۳

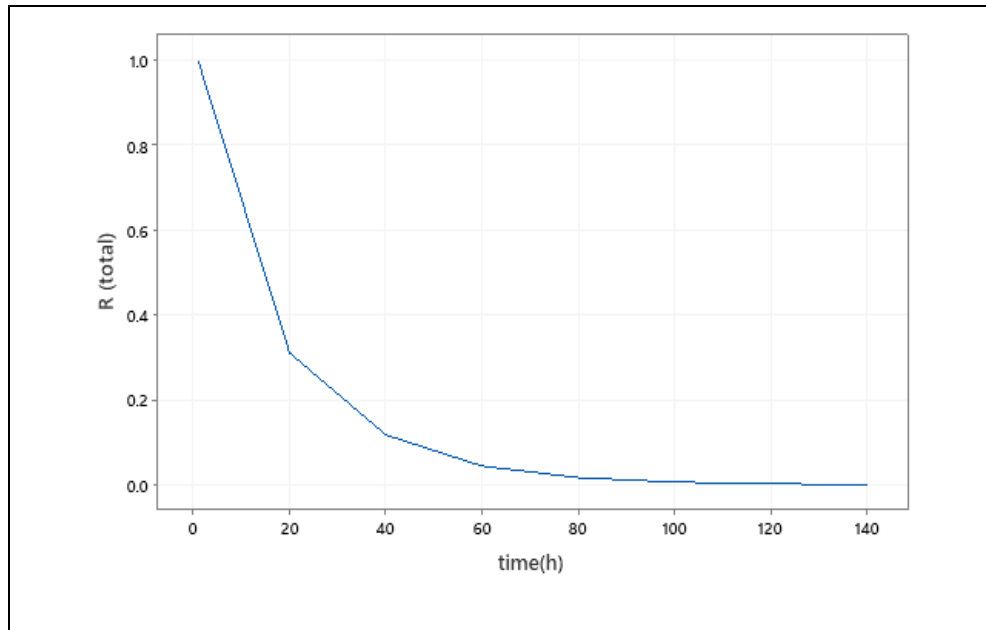
با توجه به قابلیت اطمینان لودرها و موازی قرار گرفتن آن‌ها در سیستم بارگیری معدن بوکسیت جاجرم قابلیت اطمینان کل سیستم لودر از رابطه‌ی (۵-۵) بدست می‌آید.

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i(t)) \quad (5-5)$$

$$R(t) = 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_3)]$$

با استفاده از رابطه‌ی (۵-۵) قابلیت اطمینان سیستم لودر معدن بوکسیت جاجرم محاسبه شده و منحنی قابلیت اطمینان مربوطه در شکل (۶-۵) ارائه شده است. با توجه به منحنی قابلیت اطمینان، سیستم لودر بعد از

گذشت ۱۰ ساعت از شروع فعالیت قابلیت اطمینان آن به کمتر از ۵۰ درصد می‌رسد و بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به صفر میل می‌کند.



شکل ۵-۶. منحنی قابلیت اطمینان سیستم لودرهای معدن بوکسیت جاجرم

۵-۴-۲ تحلیل قابلیت تعمیرپذیری لودرهای ۰۱ و ۰۳

در صنعت معدنکاری، نگهداری و تعمیرات (نت) سهم قابل توجهی از کل هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد. نت یکی از هزینه‌های بزرگ مقیاس اما قابل کنترل در صنعت معدنکاری بوده و تقریباً ۳۰ الی ۵۰ درصد هزینه‌های مستقیم معدن را در بر می‌گیرد. از سویی دیگر، وقوع خرابی‌ها با توجه به رشد فزاینده سیستم‌ها از لحاظ پیچیدگی و گسترش سرمایه‌گذاری‌های بزرگ مقیاس حالت بحرانی‌تر پیدا کرده و لذا اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات دقیق‌تر و منظم‌تر را دیکته می‌نماید. از لحاظ اقتصادی وقوع خرابی در سیستم (یا زیر سیستم‌ها)، چهار نتیجه منفی را به دنبال خواهد داشت که عبارتند از: ایجاد توقف‌های غیر مرقبه در فرایند تولید، افزایش هزینه‌های نیروی کاری، منابع انسانی و اقتصادی رخ داده در پشتیبانی غیر مستقیم یگان‌ها

به سبب تعلیق‌های پدید آمده در تولید، افزایش هزینه‌های نت و نهایتاً تأخیر در اتمام تولید محصول سفارش شده و تحویل آن به مشتری که در واقع عامل مؤثر در اعتبار و سابقه کاری تولید کننده می‌باشد. این نتایج منفی حاصل از وقوع خرابی را می‌توان به وسیله اجرای سیاست نت مناسب کاهش داد. در این بخش 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 شده می‌شود.

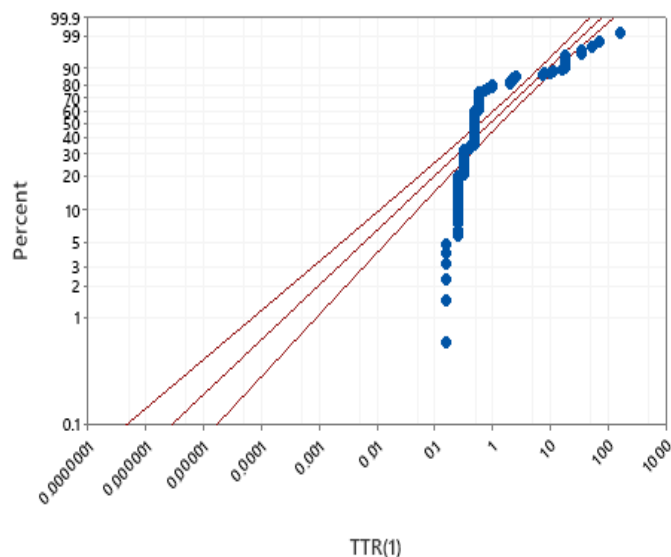
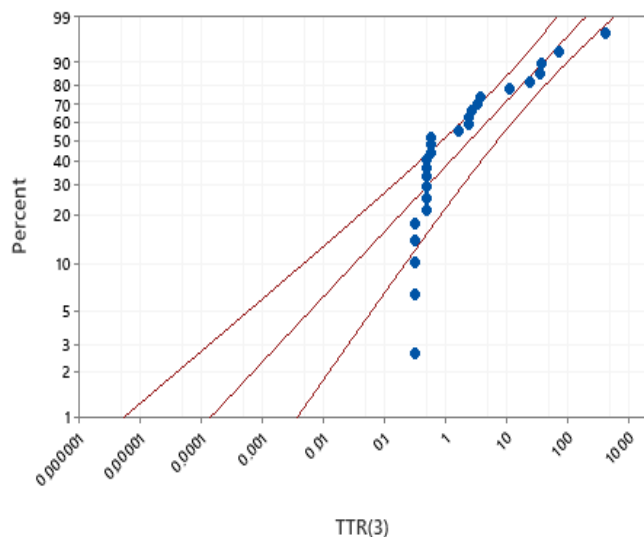
بنابراین بعد از تهیه پایگاه داده و طبقه‌بندی داده‌های تعمیر هر لودر، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدلسازی قابلیت تعمیرپذیری لودرهای بارکننده، برآورد مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه داده‌های تعمیر است. آنگاه در صورت اختلاف معنادار میانگین با دامنه داده‌های تعمیر به سراغ رسم نمودار احتمال ویبول داده‌های تعمیر (TTR) با استفاده از نرم افزار minitab می‌رویم. سپس با دانستن اینکه که توزیع‌های مختلف ویبول دارای اشکال مختلفی هستند، بهترین مدل توزیع بر اساس اشکال مختلف انتخاب می‌شود.

همانطور که گفته شد ابتدا مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه داده‌های تعمیر لودرهای ۰۳ و ۰۱ مطابق جدول ۵-۵ بدست آمد و استنباط شد که اختلاف مقدار میانگین با دامنه داده‌ها زیاد است پس می‌توان از میانگین داده‌های تعمیر چشم پوشی کرد و در گام بعد نمودار احتمال ویبول^۱ همانند شکل‌های ۵-۷ و ۵-۸ رسم شود.

جدول ۵-۵. مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و دامنه داده‌های تعمیر لودرها برحسب ساعت

داده‌های خرابی	حداکثر	حداقل	دامنه	میانگین	اختلاف میانگین با دامنه
TTR ₁	۱۶۲/۳۳	۰/۱۶	۱۶۲/۱۷	۰/۵	۱۶۱/۶۷
TTR ₃	۴۳۲	۰/۳۳	۴۳۱/۶۸	۰/۵۸	۱۳۱/۱

^۱ Weibull probability plot



شکل ۵-۷. نمودار احتمال و ویبول (WPP) داده‌های تعمیر لودر ۰۱. شکل ۵-۸. نمودار احتمال و ویبول (WPP) داده‌های تعمیر لودر ۰۳.

بعد از رسم نمودار احتمال و ویبول (WPP) لودرهای ۰۱ و ۰۳ در نرم‌افزار Minitab می‌توان دریافت که شکل حاصل از نمودار، یک منحنی مقعر است و با توجه به روند کلی گفته شده در بخش قبلی می‌توان تابع توزیع ویبول ۳ پارامتری را به آن اطلاق کرد. پارامترهای تابع توزیع ویبول ۳ پارامتری حاصل از نرم‌افزار Minitab برای داده‌های تعمیر لودر ۰۱ و ۰۳ در جدول (۵-۶) آورده شده است.

جدول ۵-۶. پارامترهای تابع توزیع ویبول برای داده‌های تعمیر لودر ۰۱ و ۰۳.

لودر ۰۳	لودر ۰۱	دستگاه
Weibull-3P	Weibull-3P	بهترین برازش
Shape(β)=۰/۲۹۸	Shape(β)= ۰/۴۱۸	پارامتر
Scale(α)= ۲/۴۶۲	Scale(α)= ۱/۱۳	
Threshold(γ)= ۰/۳۲۹	Threshold(γ)= ۰/۱۵۹	

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال تعمیر داده‌ها، مدل قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودر ۰۱ و ۰۳ در ادامه شرح داده شده است. معادله قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودر ۰۱ به ترتیب به صورت رابطه‌ی (۵-۶) و (۵-۷) است:

$$M_1(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^\beta \right] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 0.155}{1.13} \right)^{0.418} \right] \quad (۶-۵)$$

$$\mu_1(t) = \frac{f(t)}{M_1(t)} = \frac{0.418}{1.13} \left(\frac{t - 0.155}{1.13} \right)^{0.418-1} \exp \left[- \left(\frac{t - 0.155}{1.13} \right)^{0.418} \right] / M_1(t) \quad (۷-۵)$$

همچنین معادله قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودر ۰۳ به ترتیب به صورت رابطه‌ی (۸-۵) و (۹-۵) است:

$$M_3(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^\beta \right] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 0.329}{2.462} \right)^{0.298} \right] \quad (۸-۵)$$

$$\mu_3(t) = \frac{f(t)}{M_2(t)} = \frac{0.298}{2.462} \left(\frac{t - 0.329}{2.462} \right)^{0.298-1} \exp \left[- \left(\frac{t - 0.329}{2.462} \right)^{0.298} \right] / M_3(t) \quad (۹-۵)$$

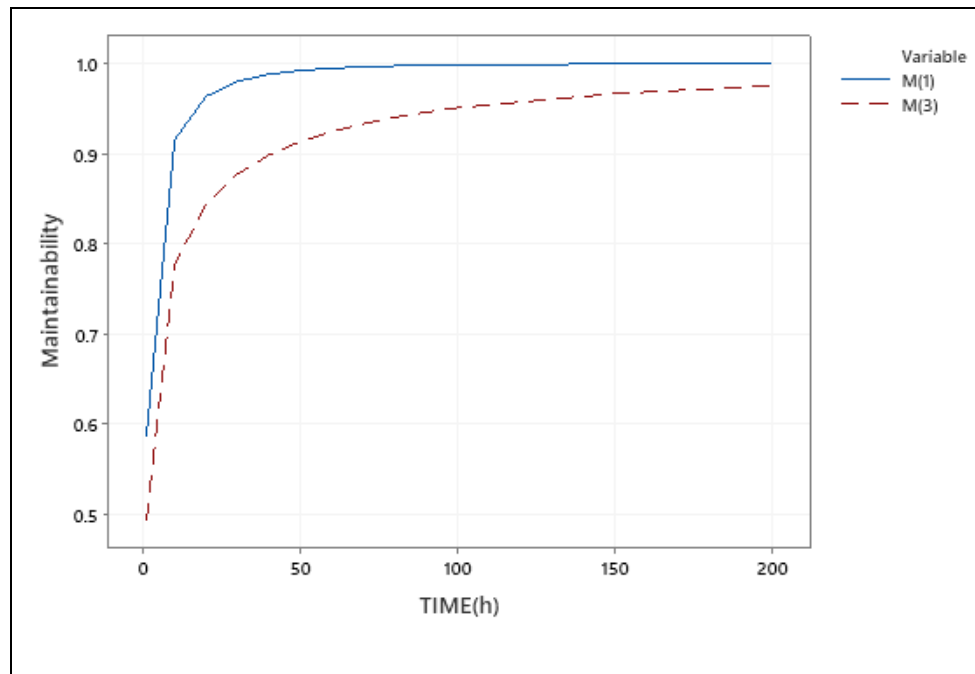
طبق جدول (۷-۵) قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودرهای ۰۱ و ۰۳ در بازه زمانی ۱ تا ۱۲۰ ساعت با جایگذاری در معادلات، بدست آمد.

جدول ۷-۵. مقدار تعمیرپذیری و نرخ تعمیر لودر ۰۱ و ۰۳

لودرها	M, μ	۱	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
لودر ۱	M _۱ (t)	۰/۵۸۷	۰/۹۶۳	۰/۹۸۸	۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹
	μ _۱ (t)	۰/۳۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۸/۲E-۰۵	۴/۱E-۰۵	۲/۱E-۰۵
لودر ۲	M _۲ (t)	۰/۴۹۲	۰/۸۴۳	۰/۸۹۸	۰/۹۲۴	۰/۹۴۰	۰/۹۵۰	۰/۹۵۸
	μ _۲ (t)	۰/۳۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳

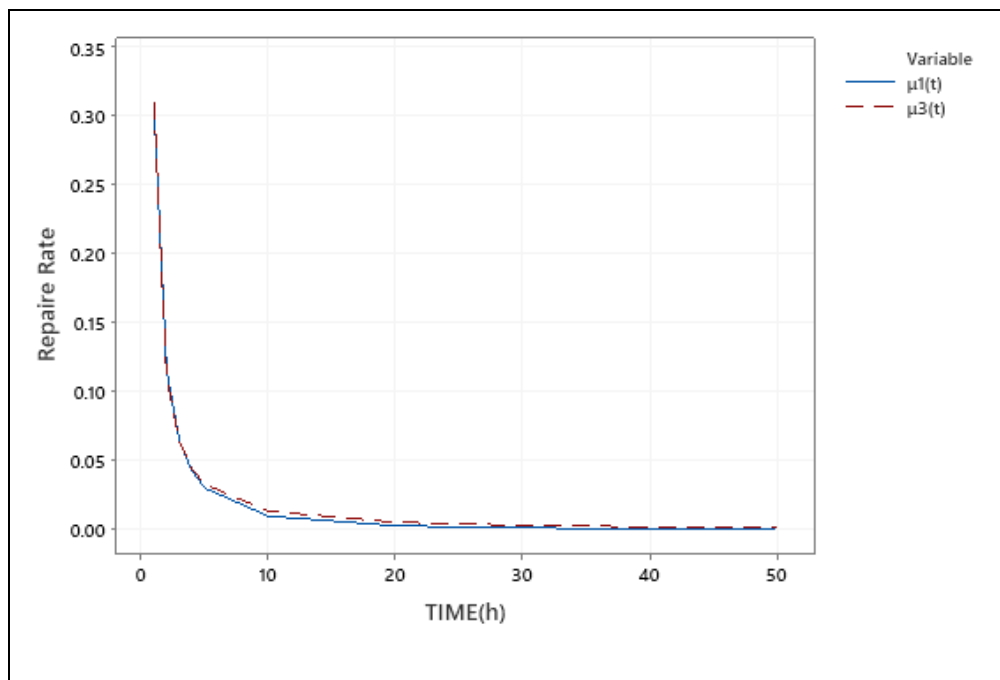
با توجه به شکل (۹-۵) که منحنی تعمیرپذیری لودرها را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که تعمیرپذیری لودر ۰۳ نسبت به لودر ۰۱ پایین‌تر است. برای لودر ۰۳ مدت زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در این لودر بیشتر از ۲۰۰ ساعت می‌باشد که زمان زیادی است. همچنین با وجود تعداد زیاد خرابی در لودر ۰۱

نسبت به لودر ۰۳ و با توجه به نمودار تعمیرپذیری آن، مشخص می‌شود که تعمیرات لودر ۰۱ ساده و جزئی بوده و در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شود.



شکل ۵-۹. منحنی تعمیرپذیری لودرهای ۰۱ و ۰۳ به ازای ۲۰۰ ساعت کار

با توجه به شکل (۵-۱۰) که منحنی نرخ تعمیر لودرها را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که دو لودر نرخ تعمیرپذیری تقریباً یکسانی دارند و در ابتدا نرخ تعمیر آنها حدود ۰/۳۱ تعمیر در ساعت بوده و سپس با کاهش شدید بعد از گذشت ۱۰ ساعت به حدود ۰/۰۱ تعمیر در ساعت می‌رسد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌شود. به عبارت دیگر تا ۱۰ ساعت تجهیزات در دوره آب‌بندی قرار دارند و بعد از آن وارد عمر طبیعی خود می‌شوند.



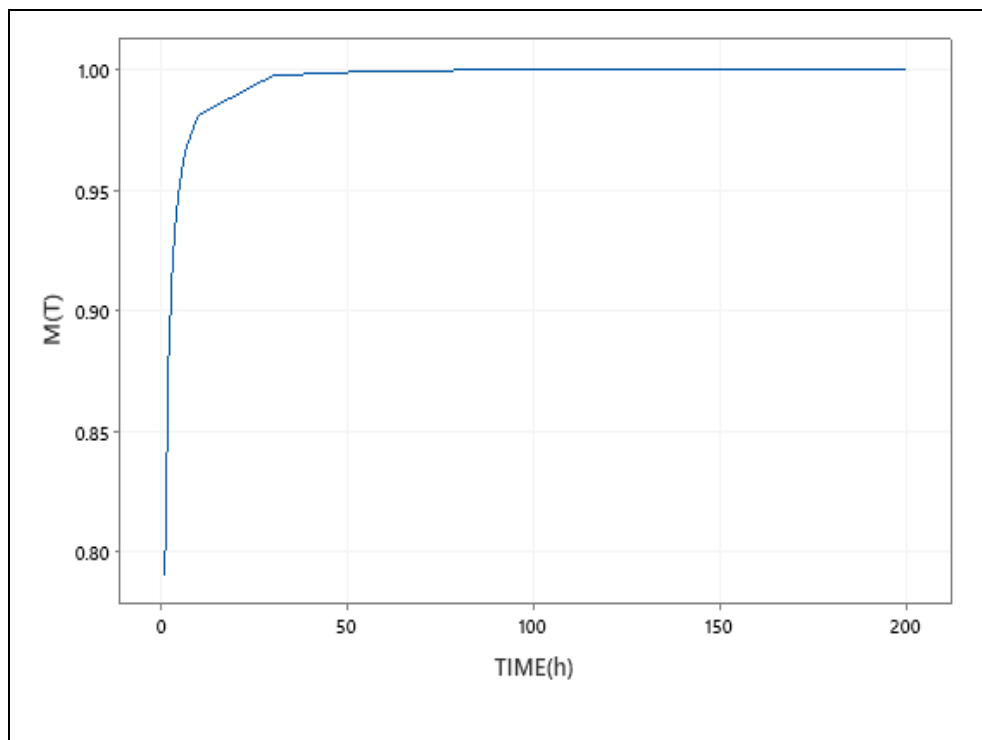
شکل ۵-۱۰. منحنی نرخ تعمیر لودرهای ۰۱ و ۰۳

با توجه به قابلیت تعمیرپذیری لودرها و موازی قرار گرفتن آنها در سیستم بارگیری معدن بوکسیت جاجرم قابلیت تعمیرپذیری کل لودرها از رابطه‌ی (۵-۱۰) بدست می‌آید.

$$M(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - M_i(t)) \quad (5-10)$$

$$M(t) = 1 - [(1 - M_1) \cdot (1 - M_3)]$$

با استفاده از رابطه‌ی (۵-۱۰) قابلیت تعمیرپذیری سیستم لودر معدن بوکسیت جاجرم محاسبه شده و منحنی قابلیت تعمیرپذیری مربوطه در شکل (۵-۱۱) ارائه شده است. با توجه به منحنی قابلیت تعمیرپذیری سیستم لودر در شروع فعالیت دارای قابلیت تعمیرپذیری ۸۰ درصد بوده، سپس بعد از گذشت ۲۰ ساعت به ۹۷ درصد می‌رسد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۵-۱۱. منحنی قابلیت تعمیرپذیری سیستم لودر معدن بوکسیت جاجرم

۵-۴-۳ تحلیل قابلیت پشتیبانی لودرهای ۰۱ و ۰۳

قابلیت پشتیبانی به عنوان توانایی تأمین منابع، خدمات و مدیریت ضروری جهت انجام تعمیرات تحت شرایط مشخص و زمان نقل و انتقالات منابع مورد نیاز تعریف می‌شود. قابلیت پشتیبانی به عواملی همچون در دسترس بودن قطعات یدکی، تبه‌ر پرسنل تعمیر و نگهداری، زمان ارسال قطعات، انبارداری و غیره بستگی دارد و همچنین دو لودر بارگیری بوکسیت جاجرم از انواع مختلف بوده و قطعات یدکی و پرسنل تعمیر و نگهداری یکسانی ندارند.

برای تحلیل قابلیت پشتیبانی لودرها نیز همانند تحلیل قابلیت تعمیرپذیری عمل می‌شود با این تفاوت که در این تحلیل به جای استفاده از داده‌های تعمیر (TTR)، از داده‌های تحویل (TTD) استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه

به دلیل در دسترس نبودن داده‌های تحویل لودرهای بارگیری بوکسیت جاجرم، قابلیت پشتیبانی در مرحله بعد (تحلیل تاب‌آوری) به صورت فرضی و با مشاوره از افراد با تجربه، ۸۰ درصد در نظر گرفته شد.

۵-۵ تحلیل تاب‌آوری لودرهای سیستم بارگیری

بعد از مشخص شدن توابع توزیع چگالی احتمال لودرها و محاسبه قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، به تحلیل تاب‌آوری لودرها پرداخته می‌شود. برای این منظور از رابطه بیان شده توسط راد و همکارانش استفاده شده است. رابطه بیان شده توسط راد و همکارانش به صورت رابطه (۵-۱۱) است.

$$\Psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + \Lambda(t).(1 - R(t)) = R(t) + (\Pi_1^4 \beta_i).(1 - R(t)) \quad (5-11)$$

در این رابطه، $\Lambda_I(t)$ حاصلضرب تاب‌آوری تشکیلات^۱ β_1 ، قابلیت تعمیرپذیری β_2 ، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت^۲ β_3 و قابلیت پشتیبانی^۴ β_4 است. در این رابطه نیز با استفاده از قواعد قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیرسیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد. در رابطه‌ی ارائه شده توسط راد و همکارانش علاوه بر عدم قطعیت‌ها به عامل زمان نیز توجه شده است [۲].

براساس فرمول ذکر شده برای تحلیل تاب‌آوری علاوه بر مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، به مقادیر تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت نیز احتیاج داریم. در ادامه توضیح مختصری از تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ارائه شده است.

^۱ Organizational resilience

^۲ prognostics and health management (PHM)

تاب‌آوری تشکیلات: مفهوم تاب‌آوری سازمانی به دلیل نیاز شرکت‌ها برای پاسخ به تغییرات سریع محیط کار ظهور پیدا کرده است. تاب‌آوری یک سازمان (تشکیلات) به عنوان توانایی ذاتی برای نگهداشتن یا بازیابی یک حالت ثابت که به سیستم اجازه می‌دهد فعالیت نرمال خود را بعد از یک حادثه مخرب یا ظهور یک تنش مداوم ادامه دهد، تعریف شده است.

کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت (PHM): این فناوری توانایی تشخیص و پیش بینی اثرات حوادث مخرب را دارد. استفاده از فناوری در مراحل اولیه طراحی، می‌تواند سیستم‌های غیر قابل اطمینان یا آسیب‌پذیری را به سیستم‌های قابل اطمینان (یا تاب‌آور) تبدیل کند و در عین حال هزینه چرخه عمر آنها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در این فناوری، نظارت بر شرایط^۱ (CM) و تشخیص شرایط سلامت بر اساس سیگنال‌های حسی و اندازه‌گیری‌های مرتبط آن است. ابزارهای رایج مورد استفاده برای CM شامل روش‌های آماری و هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی است. به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات برای محاسبه تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت، با توجه به نظر کارشناسان و اساتید مجرب برای این دو پارامتر تحلیل حساسیت بین مقادیر ۸۰ تا ۹۵ درصد صورت گرفت.

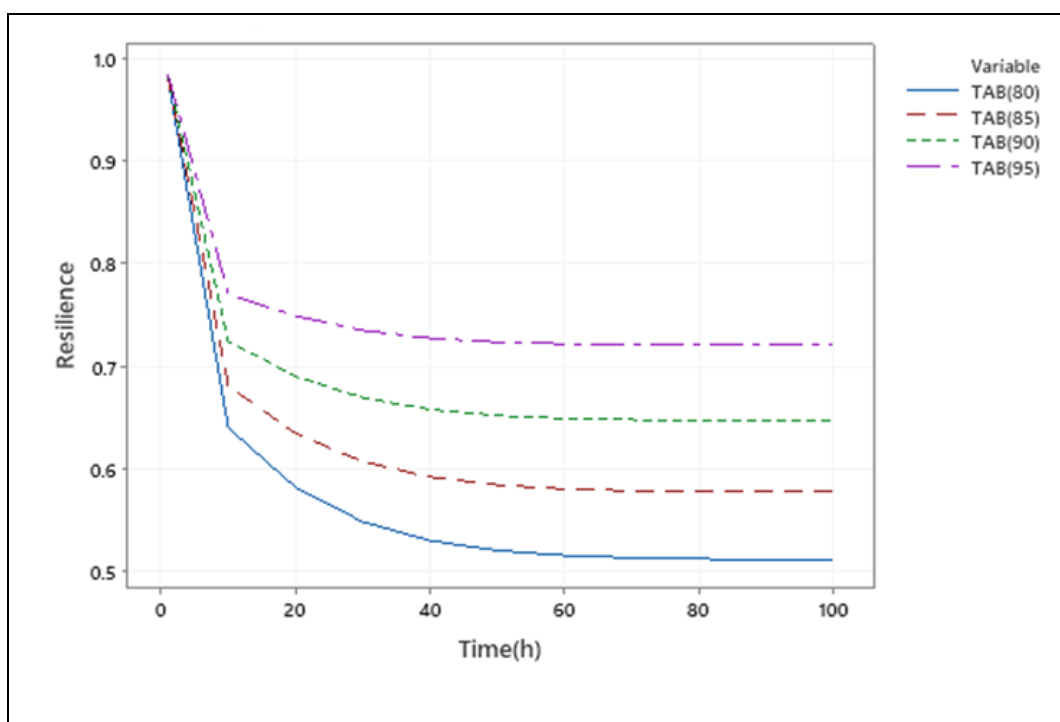
۵-۵-۱ تحلیل تاب‌آوری لودر ۰۱

با در اختیار داشتن مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای لودر و بر اساس رابطه (۵-۱۱)، تاب‌آوری لودر ۰۱ محاسبه می‌شود. مقادیر تاب‌آوری برای لودر ۰۱ در جدول (۵-۸) آورده شده است. در این جدول $1/80(t)$ یعنی تاب‌آوری برای حالتی که تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برابر ۸۰ درصد است.

^۱ condition monitoring (CM)

جدول ۵-۸. مقادیر تاب آوری لودر ۰.۱

t	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
R(t)	۰/۹۷	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
M(t)	۰/۵۸	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
S(t)	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\Psi(t)_{۸۰}$	۰/۹۸	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱
$\Psi(t)_{۸۵}$	۰/۹۸	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷
$\Psi(t)_{۹۰}$	۰/۹۸	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۴
$\Psi(t)_{۹۵}$	۰/۹۸	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲

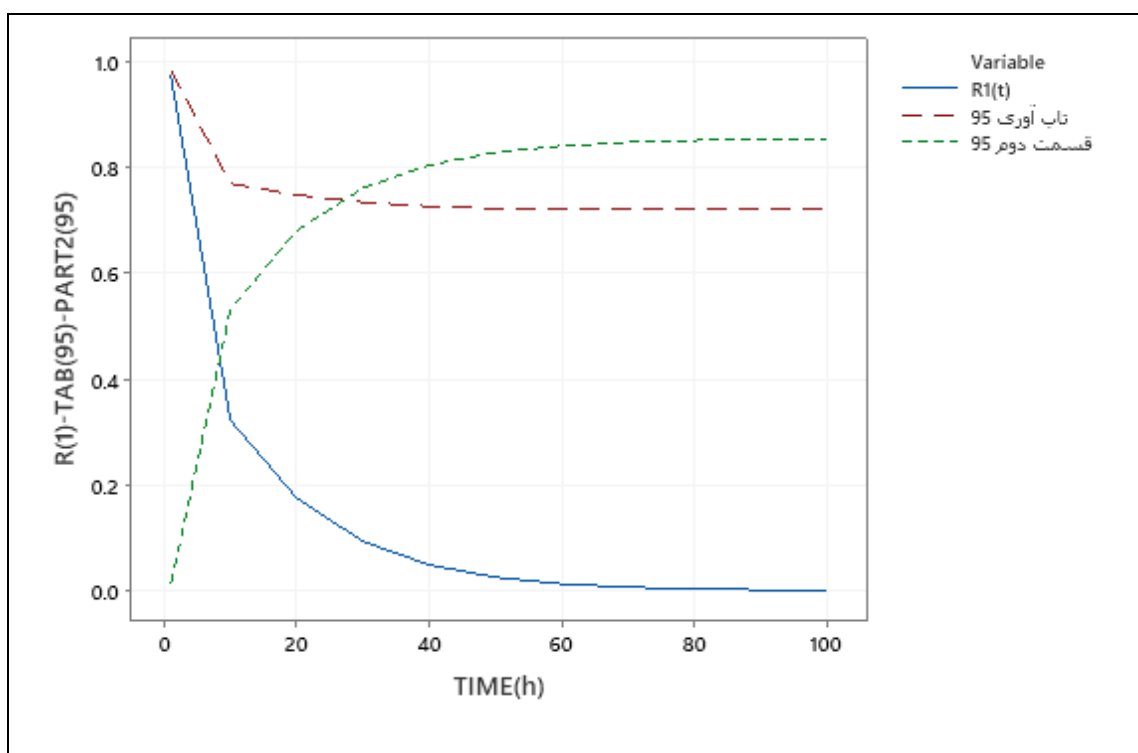


شکل ۵-۱۲. منحنی تاب آوری لودر ۰.۱

منحنی‌های شکل (۵-۱۲) نشان می‌دهد که لودر ۰.۱ دارای تاب آوری متوسط رو به بالا است به طوری که در بدترین حالت بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت بیش از ۵۰ درصد است یعنی بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت از فعالیت لودر، به احتمال ۵۰ درصد خرابی‌های لودر قابل بازیابی بوده و لودر می‌تواند به عملکرد نرمال خود بازگردد. همچنین

نمودار نشان می‌دهد که مقدار تاب‌آوری برای هر چهار مقدار ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ درصد تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در ساعات اولیه تقریباً یکسان است ولی با گذشت زمان تفاوت این مقادیر بیشتر شده و نقش تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در میزان تاب‌آوری لودر پررنگ‌تر شده و هر چه مقدار این دو پارامتر بیشتر باشد مقدار تاب‌آوری لودر نیز بیشتر می‌شود.

شکل (۵-۱۳) میزان تأثیر پارامترهای رابطه‌ی ارائه شده توسط راد و همکارانش، (رابطه ۵-۱۱) است. منظور از قسمت دوم ۹۵، حاصل ضرب قابلیت تعمیرپذیری $M(t)$ ، قابلیت پشتیبانی $S(t)$ ، تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد β_1 ، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد β_3 و $(1-R(t))$ است. طبق نمودار حالت کاهشی قابلیت اطمینان بوسیله‌ی حالت افزایشی قسمت دوم تاب‌آوری جبران شده و مقدار تاب‌آوری لودر ۰.۱ در سطح بالایی قرار گرفته است.



شکل ۵-۱۳. منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری لودر ۰.۱

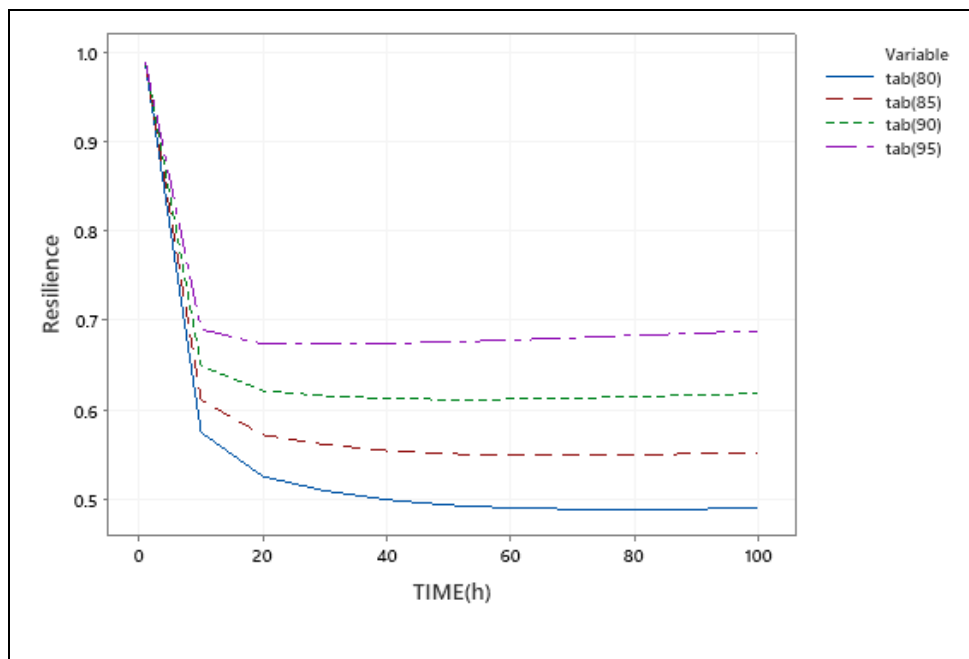
۵-۲ تحلیل تاب آوری لودر ۰۳

با در اختیار داشتن مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای لودر و بر اساس رابطه (۵-۱۱)، تاب آوری لودر ۰۳ محاسبه می‌شود. مقادیر تاب آوری برای لودر ۰۳ در جدول (۵-۹) آورده شده است. در این جدول $\psi(t)$ یعنی تاب آوری برای حالتی که تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برابر ۸۰ درصد است.

جدول ۵-۹. مقادیر تاب آوری لودر ۰۳

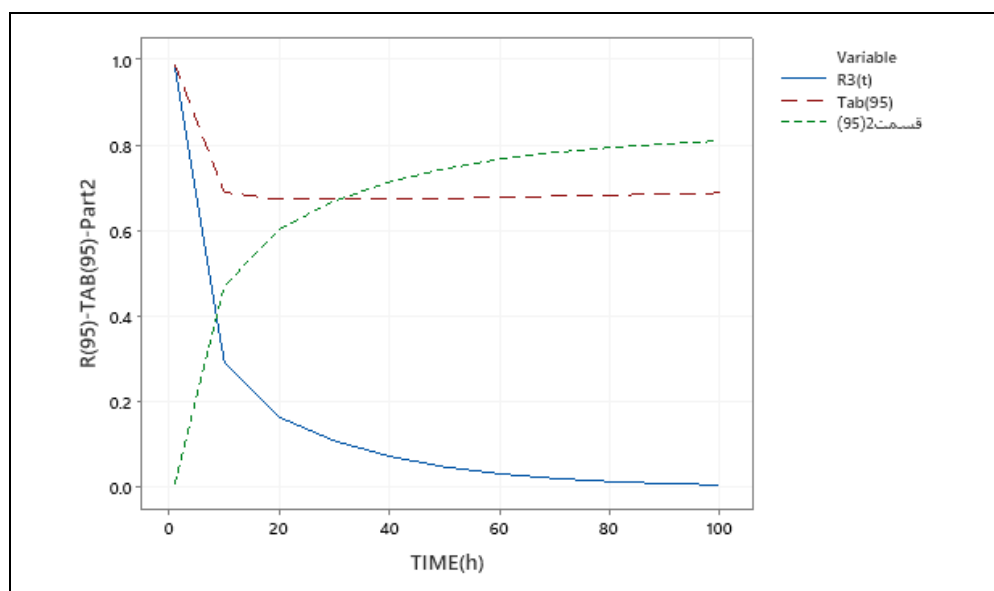
t	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
R(t)	۰/۹۸	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶
M(t)	۰/۴۹	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۵
S(t)	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\Psi(t)_{80}$	۰/۹۸	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸
$\Psi(t)_{85}$	۰/۹۸	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۵
$\Psi(t)_{90}$	۰/۹۸	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۱
$\Psi(t)_{95}$	۰/۹۹	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸

منحنی‌های شکل (۵-۱۴) نشان می‌دهد که لودر ۰۳ دارای تاب آوری پایین‌تری نسبت به لودر ۰۱ است به طوری که بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت در بدترین حالت تاب آوری آن به ۴۸ درصد می‌رسد یعنی بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت از فعالیت لودر، به احتمال ۴۸ درصد خرابی‌های لودر قابل بازیابی بوده و لودر می‌تواند به عملکرد نرمال خود بازگردد. همچنین نمودار نشان می‌دهد که مقدار تاب آوری برای هر چهار مقدار ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ درصد تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در ساعات اولیه تقریباً یکسان است ولی با گذشت زمان تفاوت این مقادیر بیشتر شده و نقش تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در میزان تاب آوری لودر پررنگ‌تر شده و هر چه مقدار این دو پارامتر بیشتر باشد مقدار تاب آوری لودر نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۵-۱۴. منحنی تاب آوری لودر ۰۳

شکل (۵-۱۵) میزان تأثیر هر یک از پارامترهای بکار رفته شده برای محاسبه تاب آوری را نشان می‌دهد. طبق نمودار حالت کاهش قابلیت اطمینان بوسیله‌ی حالت افزایشی قسمت دوم تاب آوری جبران شده و مقدار تاب آوری لودر ۰۳ در سطح بالایی قرار گرفته است.



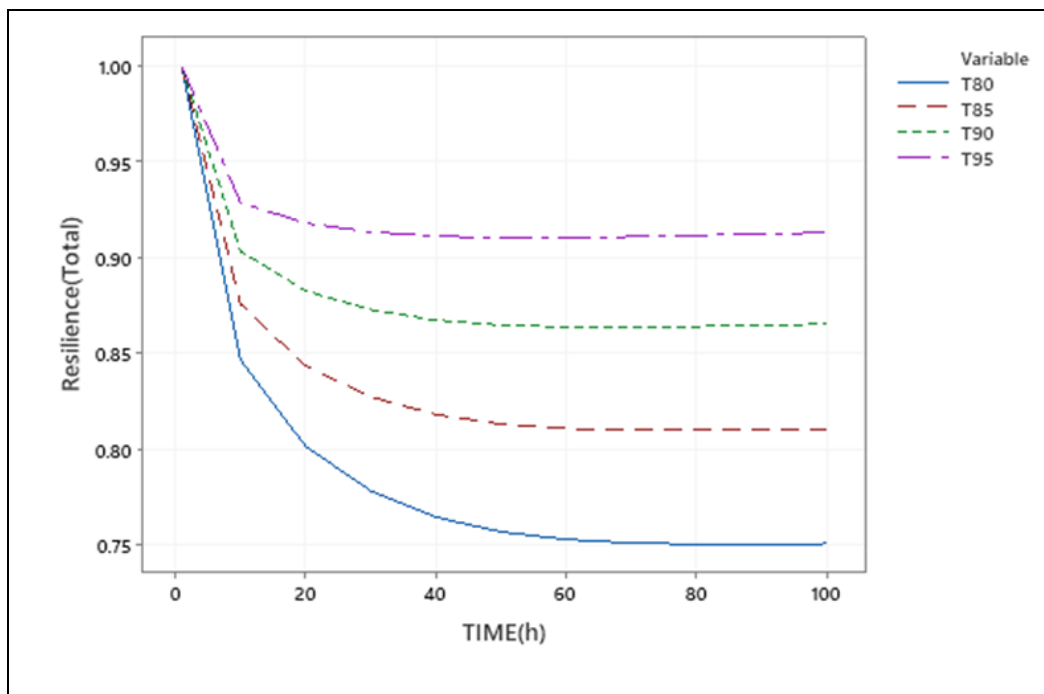
شکل ۵-۱۵. منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب آوری لودر ۰۳

تاب‌آوری کل سیستم با توجه به موازی قرار گرفتن لودرها از رابطه‌ی (۵-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\psi_{total}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \psi_i(t)) \quad (5-12)$$

$$\psi_{total}(t) = 1 - [(1 - \psi_1) \cdot (1 - \psi_2)]$$

منحنی تاب‌آوری کل سیستم، شکل (۵-۱۶) نشان می‌دهد که تاب‌آوری زیر سیستم لودر زمانی که کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت و تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد باشد در بالاترین سطح خود قرار می‌گیرد. مقدار تاب‌آوری ۹۵ بعد از ۱۰۰ ساعت بیشتر از ۹۰ درصد است در حالی مقدار تاب‌آوری ۸۰ بعد از ۱۰۰ ساعت تقریباً ۷۵ درصد است. در نهایت در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های تاثیر گذار در تاب‌آوری سیستم، نقاط ضعف و قدرت سیستم بارگیری بدست آمد. لذا با مشخص شدن درصد تاب‌آوری در زمان‌های مختلف، مدت زمان توقف سیستم در هنگام خرابی، میزان تعمیرپذیری و زمان بازیابی سیستم، به بهره‌برداران و طراحان سیستم بارگیری برای اقدامات لازم برای بعد از وقوع خرابی دید فنی مناسبی می‌دهد.



شکل ۵-۱۶. منحنی تاب‌آوری کل سیستم لودرها

۵-۶ جمع بندی

در این فصل، ابتدا به بررسی نمودار احتمال ویبول و انتخاب توزیع مناسب با استفاده از نرم افزار آماری پرداخته شد. سپس قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، پشتیبانی و در نتیجه‌ی آن‌ها تاب‌آوری لودرهای سیستم بارگیری به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

تحلیل قابلیت اطمینان لودرها نشان داد که قابلیت اطمینان لودر ۰۳ اندکی بیشتر از لودر ۰۱ است، به طوری که قابلیت اطمینان کل سیستم بارگیری لودر بعد از گذشت ۱۰ ساعت از شروع کار خود قابلیت اطمینان آن به کمتر از ۵۰ درصد می‌رسد و بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت قابلیت اطمینان آن تقریباً به صفر می‌رسد.

همچنین تحلیل تعمیرپذیری لودرها نشان داد که لودر ۰۳ کم‌ترین و لودر ۰۱ بیشترین میزان تعمیرپذیری را دارد. با توجه به منحنی قابلیت تعمیرپذیری، سیستم بارگیری لودرها در شروع فعالیت، دارای قابلیت تعمیرپذیری ۸۰ درصد بوده، سپس بعد از گذشت ۲۰ ساعت به ۹۷ درصد می‌رسد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند.

قابلیت پشتیبانی لودرها به دلیل شباهت لودرها از نظر نوع، قطعات یدکی، انبارداری و ... یکسان است. در این پایان نامه به دلیل در دسترس نبودن داده‌های تحویل لودرهای بارگیری بوکسیت جاجرم، قابلیت پشتیبانی را به صورت فرضی و با مشاوره از افراد خبره در این زمینه ۸۰ درصد در نظر گرفته شد.

تحلیل تاب‌آوری سیستم بارگیری لودرها نشان داد که زیر سیستم لودر بوکسیت جاجرم، از تاب‌آوری خوبی برخوردار است. همچنین تحلیل تاب‌آوری نشان داد که هر چه از زمان شروع کارکرد سیستم می‌گذرد، نقش تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت در تعیین تاب‌آوری بیشتر می‌شود و هر چه مقدار این دو پارامتر بیشتر باشد تاب‌آوری نیز افزایش می‌یابد، به طوری که تاب‌آوری سیستم لودرها زمانی که کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت و تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد باشد در بالاترین سطح خود قرار

می‌گیرد که باعث می‌شود بعد از ۱۰۰ ساعت فعالیت تاب آوری لودرها بیشتر از ۹۲ درصد باشد. در نهایت در این پژوهش با استفاده از شاخص های تاثیر گذار در تاب آوری سیستم، نقاط ضعف و قدرت سیستم بارگیری بدست آمد. لذا با مشخص شدن درصد تاب آوری در زمان های مختلف، مدت زمان توقف سیستم در هنگام خرابی، میزان تعمیرپذیری و زمان بازیابی سیستم، به بهره‌برداران و طراحان سیستم بارگیری برای اقدامات لازم برای بعد از وقوع خرابی دید فنی مناسبی می‌دهد.

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

نتایج کلی حاصل از این تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل می باشند:

- ۱- تحلیل پارتو لودرها نشان داد که لودر ۰۱ بیشترین میزان خرابی را داراست.
- ۲- تحلیل قابلیت اطمینان لودرها نشان داد که قابلیت اطمینان لودر ۰۳ اندکی بیشتر از لودر ۰۱ است، بطوری که قابلیت اطمینان لودر ۰۱ در شروع کار خود حدود ۹۷ درصد بوده و با گذشت ۶۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۱ درصد می رسد و سپس بعد از گذشت حدودا ۸۰ ساعت، قابلیت اطمینان لودر به صفر میل می کند. همچنین برای لودر ۰۳ قابلیت اطمینان آن در شروع فعالیت، حدود ۹۸ درصد است. سپس با گذشت ۸۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۱ درصد می رسد در نهایت با گذشت ۱۰۰ ساعت از فعالیت خود، قابلیت اطمینان آن به صفر میل می کند. لذا چنانچه هیچ گونه برنامه ای برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیش گیرانه در لودر ۰۱ و ۰۳ وجود نداشته باشد این لودرها به احتمال قریب به یقین به ترتیب بعد از گذشت ۸۰ و ۱۰۰ ساعت عملیات، دچار خرابی شده و از کار خواهند افتاد.
- ۳- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری لودرها نشان می دهد که تعمیرپذیری لودر ۰۳ نسبت به لودر ۰۱ پایین تر است. برای لودر ۰۳، مدت زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی های اتفاق افتاده در این لودر بیشتر از ۲۰۰ ساعت است که زمان زیادی است. همچنین با وجود تعداد زیاد خرابی در لودر ۰۱ نسبت به لودر ۰۳ مشخص می شود که تعمیرات لودر ۰۱ ساده و جزئی بوده و در زمان نسبتا کوتاهی انجام می شود.
- ۴- برای تحلیل قابلیت پشتیبانی در این پایان نامه به دلیل در دسترس نبودن داده های تحویل لودرهای بارگیری بوکسیت جاجرم، قابلیت پشتیبانی به صورت فرضی و با مشاوره از افراد خبره ۸۰ درصد در نظر گرفته شد.

۵- تحلیل تاب آوری لودر ۰۱ نشان داد که این لودر دارای تاب آوری متوسط رو به بالا است به طوری که تاب آوری آن بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت بیش از ۵۰ درصد می باشد یعنی بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت از عملکرد لودر، به احتمال ۵۰ درصد خرابی های لودر قابل بازیابی بوده و لودر می تواند به عملکرد اولیه و نرمال خود بازگردد. همچنین نمودار نشان می دهد که مقدار تاب آوری برای هر چهار مقدار ۸۰ ، ۸۵ ، ۹۰ و ۹۵ درصد تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگرمی و سلامت در ساعات اولیه تقریباً یکسان می باشد ولی با گذشت زمان تفاوت این مقادیر بیشتر شده و نقش تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگرمی و سلامت در میزان تاب آوری لودر پر رنگ تر شده و هر چه مقدار این دو پارامتر بیشتر باشد مقدار تاب آوری نیز بیشتر می شود.

۶- تحلیل تاب آوری لودر ۰۳ نشان می دهد که این لودر دارای تاب آوری پایین تری نسبت به لودر ۰۱ است به طوری که بعد از گذشت ۴۰ ساعت تاب آوری آن به ۵۰ درصد می رسد یعنی بعد از گذشت ۴۰ ساعت از فعالیت لودر، به احتمال ۵۰ درصد خرابی های لودر قابل بازیابی بوده و لودر می تواند به عملکرد نرمال خود بازگردد.

۷- بعد از محاسبه تاب آوری هر یک لودرها و با توجه به موازی قرار گرفتن آنها در سیستم بارگیری، تاب آوری کل سیستم لودر محاسبه شد. تحلیل تاب آوری نشان داد که تاب آوری سیستم زمانی که کارایی فناوری مدیریت پیشگرمی و سلامت و تاب آوری تشکیلات ۹۵ درصد باشد در بالاترین سطح خود قرار می گیرد. مقدار تاب آوری ۹۵ بعد از ۱۰۰ ساعت بیشتر از ۹۰ درصد است در حالی مقدار تاب آوری ۸۰ بعد از ۱۰۰ ساعت تقریباً ۷۵ درصد خواهد بود. لذا نقش این دو پارامتر در تعیین مقدار تاب آوری به خوبی مشهود است.

۶-۲ پیشنهادات

مطالعه تاب‌آوری و به طبع آن مطالعه‌ی قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، اولین و اساسی‌ترین مرحله در مطالعه عملکرد و قابلیت تولید یک دستگاه است. خروجی‌های تحلیل تاب‌آوری، به عنوان ورودی بسیاری از تحلیل‌های مهم دیگر مطرح بوده و مورد نیاز می‌باشند. لذا، تحلیل تاب‌آوری، بستر بسیار مناسب و پایه علمی برای شناخت مشخصات مهم دستگاه و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را فراهم می‌سازد؛ بنابراین، نتایج حاصل از این پایان‌نامه می‌توانند سرآغاز بسیار خوبی برای تحقیقات عمیق تر در مورد تاب‌آوری سیستم بارگیری معادن باشد. به طور خلاصه، موارد ذیل برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شوند:

۱- از ساختار کلی و الگوی تصمیم‌گیری ارائه شده در این پایان‌نامه می‌توان به راحتی برای تحلیل تاب‌آوری سایر معادن (زغالی، فلزی و غیرفلزی) استفاده نمود.

۲- در این پایان‌نامه به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات انبارداری و تحویل برای محاسبه قابلیت پشتیبانی، طبق نظر کارشناسان و اساتید مجرب به صورت فرضی ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌شود این مقدار برای درصدهای دیگری نیز محاسبه شده و در محاسبات وارد شود.

۳- در این پایان‌نامه مقدار تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت به صورت فرضی برای مقادیر ۸۰ تا ۹۵ درصد تحلیل شد. پیشنهاد می‌شود که این مقادیر به صورت دقیق محاسبه شود و در محاسبات مدنظر قرار گیرند.

۴- در این پایان‌نامه برای تحلیل RMS از روش آماری استفاده شد. پیشنهاد می‌شود برای تحلیل RMS از روش‌های دیگر تحلیل مانند روش مارکوف استفاده شود و نتایج آن با تحلیل‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه مقایسه گردد.

۵- در این پایان نامه برای انجام تحلیل ها از نرم افزارهای minitab19 و Weibull++ استفاده شد. پیشنهاد می شود برای انجام تحلیل ها از نرم افزارهای دیگری همچون EasyFit استفاده شود و نتایج آن با این پایان نامه مقایسه شود.

۶- در این پایان نامه برای محاسبه تاب آوری سیستم از رابطه بیان شده توسط راد و همکارانش استفاده شده است. پیشنهاد می شود از روابط موجود دیگر برای محاسبه تاب آوری استفاده شود و نتایج آن با این پایان نامه مقایسه شود.

۷- در این پایان نامه تأثیر شرایط محیطی در نظر گرفته نشده است. لذا پیشنهاد می شود تأثیر شرایط محیطی بر تاب آوری در نظر گرفته شود و نتایج آن با این پایان نامه مقایسه گردد.

شایان ذکر است هر یک از عناوین مذکور، نیاز به یک پژوهش مستقل و جامع داشته و در چهارچوب یک طرح پژوهشی و یا پایان نامه جداگانه می توانند مطرح شوند.

منابع

- [۱] بهتاش، ف.، مبانی و مفاهیم تاب‌آوری شهری. معاونت مطالعات و برنامه‌ریزی امور زیرساخت و طرح جامع مدیریت مطالعات و برنامه‌ریزی امور فنی و عمرانی، ۱۳۹۵. گزارش ۳۷۳.
- [۲] متحدی، ع. عطایی، م. سرشکی، برآبادی، ع.نوری، ع. تحلیل تاب‌آوری سیستم استخراج معدن، مطالعه موردی: معدن مس سونگون، همایش ملی مدیریت ریسک و تاب‌آوری در صنایع معدنی. ۱۳۹۸: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۳] متحدی، ع. عطایی، م. سرشکی، برآبادی، ع.نوری، ع. شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم تهویه معادن، همایش ملی مدیریت ریسک و تاب‌آوری در صنایع معدنی. ۱۳۹۸: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۴] رفیعیان، تبیین مفهوم تاب‌آوری و شاخص‌سازی آن در مدیریت سوانح اجتماع محور، فصلنامه مدرس علوم انسانی ۱۳۹۰: برنامه ریزی و آمایش فضا.
- [۵] قنبری، م. مدلسازی عوامل مهندسی تاب‌آوری با استفاده از نقشه شناختی فازی و تاپسیس فازی، پایانامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۵: دانشگاه یزد.
- [۶] Holling, C.S., *Resilience and stability of ecological systems*. Annual review of ecology and systematics, 1973. **4**(1): p. 1-23.
- [۷] Bruneau, M., et al., *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*. Earthquake spectra, 2003. **19**(4): p. 733-752.
- [۸] Orwin, K.H. and D.A. Wardle, *New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances*. Soil Biology and Biochemistry, 2004. **36**(11): p. 1907-1912.
- [۹] Ash, J. and D. Newth, *Optimizing complex networks for resilience against cascading failure*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007. **380**: p. 673-683.
- [۱۰] Cutter, S.L., et al., *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*. Global environmental change, 2008. **18**(4): p. 598-606.
- [۱۱] Whitson, J.C. and J.E. Ramirez-Marquez, *Resiliency as a component importance measure in network reliability*. Reliability Engineering & System Safety, 2009. **94**(10): p. 1685-1693.
- [۱۲] Wang, J., F. Gao, and W. Ip, *Measurement of resilience and its application to enterprise*

- information systems. *Enterprise information systems*, 2010. **4**(2): p. 215-223.
- [۱۳] Cox, A., F. Prager, and A. Rose, *Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics*. *Transport policy*, 2011. **18**(2): p. 307-317.
- [۱۴] Henry, D. and J.E. Ramirez-Marquez, *Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012. **99**: p. 114-1.۲۲
- [۱۵] Taşan-Kok, T., D. Stead, and P. Lu, *Conceptual overview of resilience: History and context*. *Resilience thinking in urban planning*, 2013: p. 39-51.
- [۱۶] Li, J. and Z. Xi. *Engineering recoverability: A new indicator of design for engineering resilience*. in *Asme 2014 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. 2014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [۱۷] Woods, D.D., *Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015. **141**: p. 5-9.
- [۱۸] Urruty, N., D. Tailliez-Lefebvre, and C. Huyghe, *Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review*. *Agronomy for sustainable development*, 2016. **36**(1): p. 15.
- [۱۹] Wang, Z., M.S. Nistor, and S.W. Pickl, *Analysis of the definitions of resilience*. *IFAC-PapersOnLine*, 2017. **50**(1): p. 10649-10657.
- [۲۰] Bostick, T., et al., *Resilience science, policy and investment for civil infrastructure*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018. **175**: p. 19-23.
- [۲۱] Jufri, F.H., 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*, 2019. **239**: p. 1049-1065.
- [۲۲] Hosseini, S., K. Barker, and J.E. Ramirez-Marquez, *A review of definitions and measures of system resilience*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016. **145**: p. 47-61.
- [۲۳] Blischke, W.R. and D.P. Murthy, *Case studies in reliability and maintenance*. Vol. 480. 2003: Wiley Online Library.
- [۲۴] Dhillon, B.S., *Introductory Mathematical Concepts for Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety Analysis*. *Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety*, 2008: p. 11-25.
- [۲۵] الهی، ن. آمار و احتمالات مهندسی. انتشارات دالفک ۳۳۷ صفحه. چ. نهم. ۱۳۸۷.
- [۲۶] محمدی، ح.ش. برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات (مدیریت فنی در صنایع) انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ صفحه. چ. شانزدهم. ۱۳۹۰.
- [۲۷] Kumar, U. and S. Granholm, *Reliability technique: A powerful tool for mine operators*.

- Mineral resources engineering, 1988. 1(1): p. 13-28.
- [۲۸] Wang, H., *A survey of maintenance policies of deteriorating systems*. European journal of operational research 139(3), 2002: p. 469-489.
- [۲۹] نوری قراחסنلو، ع. تعیین برنامه بهینه تعمیر و نگهداری با استفاده از بررسی قابلیت اطمینان، پایان نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۱: دانشگاه تهران.
- [۳۰] حسینی، ه.، مدل سازی و شبیه سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه، "مطالعه موردی: معدن زغالسنگ طبس، رساله دکتری. ۱۳۹۰: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۳۱] ثقفی، ا.، استنباط آماری در توزیع ویبول با استفاده از آنتروپی، پایان نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۱، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۳۲] کوشا، ح.، نگهداری و تعمیرات. فصل ۵ احتمالات و کاربردهای آن در نت-بخش توزیع ویبول. ۲۰۱۲.
- [۳۳] رحیمدل، مدلسازی قابلیت اطمینان ماشین‌های حفاری؛ مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه، پایان نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۱: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۳۴] Barabadi, A., *Reliability model selection and validation using Weibull probability plot—A case study*. Electric Power Systems Research, 2013. 101: p. 96-101.
- [۳۵] مرندی، بررسی قابلیت اطمینان ماشین‌آلات بارگیری در معادن روباز با تاکید بر عوامل خارجی تاثیرگذار، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن. ۱۳۹۶: دانشگاه تربیت مدرس.
- [۳۶] Zobel, C.W., *Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience*. Decision Support Systems, 2011. 50(2): p. 394-403.
- [۳۷] Shirali, G., et al., *Challenges in building resilience engineering (RE) and adaptive capacity: A field study in a chemical plant*. Process safety and environmental protection, 2012. 90(2): p. 83-90.
- [۳۸] Kafle, S.K., *Measuring disaster-resilient communities: a case study of coastal communities in Indonesia*. Journal of business continuity & emergency planning, 2012. 5(4): p. 316-326.
- [۳۹] Ouyang, M., L. Dueñas-Osorio, and X. Min, *A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems*. Structural safety, 2012. 36: p. 23-31.
- [۴۰] Azadeh, A., et al., *A unique algorithm for the assessment and improvement of job satisfaction by resilience engineering: Hazardous labs*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015. 49: p. 68-77.
- [۴۱] Macuzić, I., et al., *A two step fuzzy model for the assessment and ranking of organizational resilience factors in the process industry*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016. 40: p. 122-130.
- [۴۲] Baroud, H. and K. Barker, *A Bayesian kernel approach to modeling resilience-based network component importance*. Reliability Engineering & System Safety, 2018. 170: p.

- [۴۳] محتشم ، میرزایی، ارزیابی انعطاف‌پذیری مدل تخصیص کامیون در معادن روباز با توجه به خرابی کامیون ها، همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی. ۱۳۹۸: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۴۴] Hoseinie, S.H., et al., *Resilience measurement of longwall machinery*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 2020. 35(3).
- [۴۵] Hoseinie, S.H., et al., *Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model*. International journal of mining, reclamation and environment, 2012. 26(4): p. 309-323.
- [۴۶] Pavlovic, V., *Continuous mining reliability: design and operation of mechanized systems*. 1989.
- [۴۷] Mukhopadhyay, A., *Open pit system reliability*. J. Mines, Met. Fuels;(India), 1988. 36(8).
- [۴۸] Goodman ,G.V., *An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree analysis*. Mining Science and Technology, 1988. 7(2): p. 205-215.
- [۴۹] Stanek, E.K. and S. Venkata, *Mine power system reliability*. IEEE transactions on industry applications, 1988. 24(5) :p. 827-838.
- [۵۰] Kumar, U., B. Klefsjö, and S. Granholm, *Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine*. Reliability Engineering & System Safety, 1989. 26(4): p. 341-361.
- [۵۱] Kumar, D., B. Klefsjö, and U. Kumar, *Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model*. Reliability Engineering & System Safety, 1992. 37(3): p. 217-222.
- [۵۲] Kumar, U. and B. Klefsjö, *Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model*. Reliability Engineering & System Safety, 1992. 35(3): p. 217-224.
- [۵۳] Kumar, U. and Y. Huang. *Reliability analysis of a mine production system-A case study*. in *Annual Reliability and Maintainability Symposium 1993 Proceedings*. 1993. IEEE.
- [۵۴] Vagenas, N., U. Kumar, and E. Rönnkvist, *Analysis of truck maintenance characteristics in a Swedish open pit mine*. International Journal of Surface Mining and Reclamation, 1994. 8(2): p. 65-71.
- [۵۵] Dey, A., J. Bhattacharya ,and S. Banerjee, *Prediction of field reliability for dumper tyres*. International Journal of Surface Mining and Reclamation, 1994. 8(1): p. 23-25.
- [۵۶] Mandal, S., *Evaluation of reliability index of longwall equipment systems for production contingency*. Mining Technology, 1996. 78(897): p. 138-140.
- [۵۷] Vagenas, N., N. Runciman, and S.R. Clément, *A methodology for maintenance analysis of mining equipment*. International Journal o/Surface Mining, Reclamation and Environment,

1997. **11**(1): p. 33-40.
- [۵۸] Samanta ,B., B. Sarkar, and S. Mukherjee, *Reliability centered maintenance (RCM) strategy for heavy earth moving machinery in coal mine*. Industrial Engineering Journal, 2001. **30**(5): p. 15-20.
- [۵۹] Townson, P.G.A.L., *Load-maintenance interaction: modelling and optimisation*. 2002.
- [۶۰] Hall, R.A. and L.K. Daneshmend, *Reliability modelling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies*. International journal of surface mining, reclamation and environment, 2003. **17**(3): p. 139-155.
- [۶۱] Hall, R.A .and L.K. Daneshmend, *Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment*. CIM bulletin, 2003. **96**(1072): p. 159-165.
- [۶۲] KUMAR, J.B.U., *Reliability characteristics based maintenance scheduling: a case study of a crushing plant* .International Journal of Performability Engineering, 2007. **3**(3): p. 319.
- [۶۳] Ghodrati, B. and U. Kumar, *Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: A case study in Kiruna Mine, Sweden*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2005.
- [۶۴] Barabady, J. and U. Kumar, *Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran*. Reliability engineering & system safety, 2008. **93**(4): p. 647-653.
- [۶۵] Vayenas, N. and X. Wu, *Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2009. **23**(3): p. 227-238.
- [۶۶] Sharma, G., et al., *Bayesian statistics and production reliability assessments for mining operations*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2009. **23**(3): p. 180-205.
- [۶۷] Jalali, S. and S. Forouhandeh, *Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction* .Safety science, 2011. **49**(5): p. 664-669.
- [۶۸] Hoseinie, S.H., et al., *Reliability modeling of water system of longwall shearer machine*. Archives of mining sciences, 2011. **56**(2): p. 291-302.
- [۶۹] Seyed, H.H., et al., *Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers*. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2011. **17**(2): p. 192-197.
- [۷۰] Rahimdel, M.J., et al., *Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines*. International journal of mining science and technology, 2013. **23**(5): p. 771-775.
- [۷۱] FURULY, S., A. BARABADI, and J. BARABADY, *Reliability Analysis of Mining Equipment Considering Operational Environments-A Case Study*. International journal of

- performability engineering, 2013. **9**(3).
- [۷۲] Gharahasanlou, A.N., et al., *Fault tree analysis of failure cause of crushing plant and mixing bed hall at Khoy cement factory in Iran*. Case studies in engineering failure analysis, 2014. **2**(1): p. 33-38.
- [۷۳] Mohammadi, M., P. Rai, and S. Gupta, *Improving productivity of dragline through enhancement of reliability, inherent availability and maintainability*. Acta Montanistica Slovaca, 2016. **21**(1): p. 1-8.
- [۷۴] Agrawal, A.K., V. Murthy, and S. Chattopadhyaya, *Investigations into reliability, maintainability and availability of tunnel boring machine operating in mixed ground condition using Markov chains*. Engineering Failure Analysis, 2019. **105**: p. 477-489.
- [۷۵] Ugurlu, O.F. and M. Kumral, *Management of drilling operations in surface mines using reliability analysis and discrete event simulation*. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020. **20**(4): p. 1143-1154.
- [۷۶] Ahmadi, S., et al., *An Overview of the Reliability Analysis Methods of Tunneling Equipment*. The Open Construction and Building Technology Journal, 2020. **14**(1).
- [۷۷] گرزین، ر.، انتخاب تجهیزات بارگیری و باربری مناسب در معادن روباز با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی مطالعه موردی معدن بوکسیت جاجرم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۳: دانشگاه آزاد شاهرود.
- [۷۸] طاهرزاده، م.، بررسی قابلیت اطمینان سیستم ناوگان بارگیری معدن سنگ آهن سربون استان مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۲: دانشگاه آزاد شاهرود.

سوست

پایگاه داده‌ای ماشین بارگیری لودر بوکسیت جاجرم

لودر ۰۳		لودر ۰۱		*
TBF(h)	TTR(h)	TBF(h)	TTR(h)	شماره
16.5	0.5	9.25	0.75	1
4	0.5	9	0.5	2
21.91	2.5	9.41	18.25	3
9.41	0.58	17.66	0.16	4
7.16	2.83	15.33	18.25	5
6	3.75	9.25	0.25	6
9.5	0.5	8	18	7
9.5	0.5	8.33	1	8
9.5	0.5	9.25	18.25	9
19.5	0.5	27.16	0.58	10
8.5	72.5	7.33	0.33	11
11.16	0.58	8	0.58	12
9.66	0.33	0.25	7.41	13
9.4	0.33	7.58	10.16	14
9.66	0.33	17.5	0.16	15
7.16	0.33	9	0.58	16
9.41	0.58	7.58	0.16	17
1.66	0.33	9.33	0.33	18

17.08	39	7	0.33	19
3	25	5.66	2	20
6.5	11.5	9.41	0.58	21
6.5	3.5	16.66	0.33	22
12.5	36	3.16	0.16	23
55.66	432	9.66	0.33	24
7.5	2.5	7.66	0.16	25
218.62	1.66	9.41	0.58	26
		9.41	0.5	27
		5.25	0.41	28
		9	0.33	29
		38.08	0.33	30
		17.66	162.33	31
		7	2.5	32
		1.75	0.33	33
		10	0.25	34
		9.41	0.58	35
		11.24	0.58	36
		0.83	0.5	37
		8.5	0.5	38
		9.16	0.33	39
		11.83	0.5	40
		9.5	0.5	41
		9.41	0.58	42

		9.41	0.58	43
		24.25	0.25	44
		9.41	0.58	45
		9.41	0.58	46
		7.41	0.33	47
		1.25	0.25	48
		10.9	2.25	49
		4.5	0.25	50
		17	0.5	51
		16	1	52
		4.58	0.25	53
		7.66	0.33	54
		7	11	55
		9.41	0.58	56
		9.58	0.41	57
		10.57	0.5	58
		16.91	0.25	59
		9.75	0.25	60
		9.75	0.25	61
		7.25	0.25	62
		13.16	0.5	63
		12.16	0.5	64
		4.66	0.5	65
		9.66	0.33	66

		9.66	0.33	67
		9.33	0.58	68
		9.41	0.58	69
		9.5	0.5	70
		6.16	0.58	71
		12.25	0.25	72
		11	0.5	73
		9.5	0.5	74
		9.5	0.5	75
		9.5	0.5	76
		9.5	0.5	77
		9.75	0.25	78
		9.66	54.33	79
		9.75	0.58	80
		9.75	0.25	81
		15.66	0.33	82
		4.33	0.16	83
		8.25	0.5	84
		9.41	0.58	85
		13.66	0.5	86
		9.5	0.5	87
		5.75	0.25	88
		5.25	0.5	89
		8	0.25	90

		9.5	0.5	91
		19.33	0.5	92
		12.25	0.5	93
		7	0.25	94
		15.91	0.25	95
		9.25	0.5	96
		45.61	0.5	97
		85.16	18	98
		40.57	0.5	99
		19.5	0.5	100
		9.16	0.33	101
		9.41	0.58	102
		9.16	0.83	103
		47.08	0.5	104
		29.66	1	105
		124.8	2.33	106
		81.4	16	107
		63.58	36	108
		123.89	36	109
		3	18	110
		106.23	2	111
		143.87	2	112
		101.63	72	113
		134.65	8	114

Abstract

Resilience of engineering systems can be considered as the ability to maintain their performance to provide service in the face of challenges that disrupt this performance. In the field of mining, due to the high volume of operations in the mines, maintaining production capacity, safety and management of machinery are among the items that can seriously affect the economic and operational conditions. Given the importance of the mining loading system and the high costs of breakdowns due to failure and the vital role of loading machines in mines, it is necessary that in this study, the concept of resilience in the field of mining engineering is evaluated to increase safety and productivity. To take. Accordingly, in this study, the concepts of resilience were first introduced and while collecting failure data of Jajarm bauxite mine loading system, failure data of two loading subsystems (loader 01 model 470 and loader 03 model 770) were analyzed to evaluate resilience. Thus, statistical analyzes were performed on the performance data of the loader machine over a period of 24 months. Then, to calculate the resilience of the entire loader system, the reliability, repairability and support of each loader were calculated and also using criteria such as organizational resilience and efficiency of prevention and health management technology, the resilience of each device was obtained. The results of this study showed that the resilience of the loading system is at its highest level when the resilience, organization and efficiency of prevention and health management technology is 95%, so that the loading system after 100 hours of operation, the resilience of the whole system more than 92 Is a percentage. This means that the loader loading system is 92% recoverable after failure and returns to pre-failure condition.

Keywords: Loader, Resilience, Reliability, Repairability, Support, Jajarm Bauxite Mine



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Master Thesis in Mining Engineering

Resilience analysis of loading system in Jajarm bauxite mine

Author:

Meysam Navaei

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Ramin Rafie

Advisor:

Dr. Ali Nouri Gharahsanloo

February, 2021