

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

تحلیل تاب آوری نوار نقاله ماشین حفاری تمام مقطع تونل (TBM)؛ مطالعه موردی: تونل مترو

خط دو تبریز

نگارنده: علی حسین زاده آهنگر

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر فرهنگ سرشکی

استاد مشاور

دکتر علی نوری قراحسنلو

بهمن ۱۳۹۹

## تقدیم اثر

پدرو مادر مهربانم که کلمات از وصف فداکاری ایشان ناتوان هستمند و برادر و خواهر عزیزم که همیشه مشوق من بوده اند و همچنین همی

زحمکشان عرصه علم و امنیت، دکتر فخری زاده و سردار سہبد قاسم سلیمانی و همی زحمکشان بی نام و نشان.

## شکر و قدردانی

اکنون که با فضل و احسان خداوند متعال به این درجه از علم نائل می‌شوم بر خود لازم می‌دانم که از تمامی عزیزانی که در طی دوران تحصیل این حقیر، زحمات زیادی متقبل شده اند اعم از خانواده و هم‌پیمایی دبیران و اساتید که اقدر کمال شکر را داشته باشم.

ایجناب از تمامی اساتید گران‌بایه و پرسنل محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که منیربان شایسته‌ای برای حقیر در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد بودند نهایت قدردانی را می‌نمایم.

همچنین بر خود واجب می‌دانم از زحمات دکتر محمد عطایی و دکتر فریادنگ سرشکلی به عنوان اساتید راهنما و همچنین دکتر علی نوری قراحتلو به عنوان استاد مشاور که در طول دوران تحصیلی مطالب علمی و مکاتبات اخلاقی ارزنده‌ای از ایشان آموختم کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم و برای ایشان و خانواده محترمشان سلامتی و طول عمر آرزو مندم.

در نهایت از جناب آقای مهندس موسی زاده و مهندس عادل متحدی به خاطر کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغشان برای تکمیل این پایان‌نامه صمیمانه سپاس گزارم.

## تعهد نامه

اینجانب علی حسین زاده آهنگر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن گرایش استخراج دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله ماشین حفاری تمام مقطع تونل (TBM)؛ مطالعه موردی: تونل مترو خط دو تبریز تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می‌شوم:

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

تاریخ:

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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .  
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

استفاده از سیستم حمل و نقل قطار درون شهری یا مترو به دلیل سرعت و امنیت زیاد، در سال‌های اخیر همواره در حال افزایش بوده است. یکی از گام‌های اصلی در استفاده از این سیستم حمل و نقل، حفر تونل‌های مورد نیاز این سیستم است. برای حفر این تونل‌ها معمولاً از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (TBM) استفاده می‌شود چرا که این ماشین‌ها دو پارامتر اصلی در یک پروژه تونل‌سازی یعنی کاهش زمان اجرا و کاهش هزینه را به شدت تحت تأثیر خود قرار داده و با ایجاد محیطی ایمن برای پرسنل، حداقل تأثیر ممکن را بر سازه‌های سطح زمین و محیط زیست می‌گذارند. اما با تمام پیشرفت‌های حاصل شده در این ماشین‌ها، همواره این ماشین‌ها با مخاطراتی مواجه هستند که اجتناب ناپذیر است. لذا باید رویکردی برای مقابله با این مخاطرات در نظر گرفته شود تا عملیات حفاری به بهترین شکل و در کم‌ترین زمان صورت پذیرد. یکی از جدیدترین رویکردهای ارائه شده برای مقابله با این مخاطرات در حوزه مهندسی، رویکرد تاب‌آوری می‌باشد که عموماً به توانایی بازگشت سیستم به حالت عادی بعد از وقوع حادثه دلالت دارد. در این پایان‌نامه تاب‌آوری سیستم نوار نقاله ماشین TBM خط دو مترو تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم از سه نوار نقاله که به صورت سری قرار گرفته‌اند تشکیل شده است که طول هر نوار نقاله ۷۷۶۱ متر می‌باشد. بر اساس رابطه استفاده شده در این پایان‌نامه، گام اصلی در تحلیل تاب‌آوری، تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی است که به این منظور تمام اطلاعات و داده‌های توقف‌های ناشی از خرابی‌ها و تعمیرات صورت گرفته مربوط به حدود ۱۵ ماه عملیات نوار نقاله‌ها جمع‌آوری گردید. در ادامه تحلیل‌های آماری بر روی داده‌ها انجام گرفت و مقادیر قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی محاسبه شد. مقادیر تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت نیز به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات، با توجه به نظر اساتید و کارشناسان مجرب برای مقادیر ۸۰ تا ۹۵ درصد تحلیل حساسیت شد. تحلیل‌ها نشان داد که تاب‌آوری هر سه نوار نقاله در بازه ۲۰۰ ساعت بعد از شروع کار بیش از ۶۰ درصد است

که این نشان از تاب‌آوری بالای نوار نقاله‌ها است. تاب‌آوری کل سیستم نوار نقاله‌ها نیز نشان داد که تاب‌آوری برای حالتی که مقدار تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد در نظر گرفته شده بیش از ۷۰ درصد و برای حالتی که مقدار این دو پارامتر ۸۰ درصد در نظر گرفته شده بیش از ۲۵ درصد است. همچنین تحلیل‌ها نشان داد نقش تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت با گذشت زمان بیشتر شده و تفاوت بیشتری در مقدار تاب‌آوری ایجاد می‌کند.

**کلمات کلیدی:** TBM، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، مترو خط دو تبریز

## مقاله مستخرج از پایان نامه

عنوان مقاله	Resilience analysis of TBM Conveyor System: A case Study
مجله	Tunneling and underground space technology
مرحله	Under review



# فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات ..... ۱

۱-۱- مقدمه ..... ۲

۱-۲- تعریف موضوع و بیان مسئله ..... ۴

۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق ..... ۵

۱-۴- اهداف تحقیق ..... ۶

۱-۵- ساختار پایان نامه ..... ۷

۲- فصل دوم: مبانی نظری ..... ۹

۲-۱- مقدمه ..... ۱۰

۲-۲- تاب آوری ..... ۱۰

۲-۳- روش‌های تحلیل تاب آوری ..... ۱۴

۲-۴- مفاهیم قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی (RMS) ..... ۱۹

۲-۵- برخی از اصطلاحات و پارامترهای حوزه‌ی RMS ..... ۲۰

۲-۶- توابع احتمالاتی خرابی - زمان ..... ۲۲

۲-۶-۱- تابع توزیع چگالی احتمال ..... ۲۲

۲-۶-۲- تابع توزیع تجمعی ..... ۲۳

۲-۶-۳- تابع قابلیت اطمینان ..... ۲۳

۲-۶-۴- تابع نرخ خرابی ..... ۲۳

- ۲۴..... ۱-۴-۶-۲ مفهوم نمودار وان حمام و نرخ خرابی
- ۲۵..... ۱-۱-۴-۶-۲ مرحله اول (آببندی تجهیزات)
- ۲۵..... ۲-۱-۴-۶-۲ مرحله دوم (عمر طبیعی)
- ۲۵..... ۳-۱-۴-۶-۲ مرحله سوم (فرسایش)
- ۲۶..... ۵-۶-۲ توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال
- ۲۶..... ۱-۵-۶-۲ توزیع نمایی
- ۲۷..... ۲-۵-۶-۲ توزیع ویبول
- ۲۸..... ۳-۵-۶-۲ توزیع نرمال
- ۲۸..... ۴-۵-۶-۲ توزیع لاگ لجستیک
- ۲۹..... ۷-۲ قابلیت تعمیر و نگهداری
- ۳۰..... ۱-۷-۲ توابع قابلیت تعمیر و نگهداری
- ۳۱..... ۸-۲ قابلیت پشتیبانی
- ۳۱..... ۱-۸-۲ توابع قابلیت پشتیبانی
- ۳۲..... ۹-۲ انواع سیستم‌ها
- ۳۲..... ۱-۹-۲ شبکه سری
- ۳۳..... ۲-۹-۲ شبکه موازی
- ۳۴..... ۱۰-۲ مدلسازی و تحلیل RMS
- ۳۶..... ۱-۱۰-۲ مدلسازی RMS با استفاده از روش آماری
- ۳۸..... ۱-۱-۱۰-۲ آزمون روند
- ۳۹..... ۲-۱-۱۰-۲ آزمون همبستگی سری
- ۳۹..... ۱۱-۲ جمع‌بندی

۴۱	فصل سوم: مروری بر تحقیقات انجام شده
۴۲	۳-۱- مقدمه
۴۲	۳-۲- تاریخچه تاب‌آوری
۴۴	۳-۳- تحقیقات صورت گرفته در حوزه تاب‌آوری
۵۴	۳-۴- جمع‌بندی
۵۵	فصل چهارم: مطالعه موردی و تهیه پایگاه داده‌ها
۵۶	۴-۱- مقدمه
۵۶	۴-۲- پیشینه مطالعات و اجرای طرح سازمان قطار شهری تبریز
۵۷	۴-۳- مشخصات خطوط مصوب قطار شهری تبریز
۵۹	۴-۴- زمین‌شناسی منطقه
۶۰	۴-۵- خط دو مترو تبریز
۶۱	۴-۶- روش‌های مختلف حمل مصالح حفر شده در تونل‌ها
۶۲	۴-۶-۱- سیستم ترابری ریلی
۶۲	۴-۶-۲- سیستم ترابری نوار نقاله
۶۴	۴-۷-۱- اجزای اصلی نوار نقاله
۶۴	۴-۷-۱- تسمه نوار نقاله
۶۵	۴-۷-۲- غلطک هرزگرد حمل بار
۶۶	۴-۷-۳- غلطک هرزگرد مسیر برگشت
۶۶	۴-۷-۴- غلطک‌ها (تویی، درام)

۶۷	سیستم‌های رگلاژ..... ۴-۷-۵
۶۷	قطعات متحرک سیستم انتقال نیرو..... ۴-۷-۶
۶۸	سیستم‌های باردهی..... ۴-۷-۷
۶۹	سیستم‌های تخلیه..... ۴-۷-۸
۷۰	سیستم‌های تمیز کردن تسمه و تویی..... ۴-۷-۹
۷۰	منطقه انحنای (خمش)..... ۴-۷-۱۰
۷۰	منطقه تغییر جهت حرکت تسمه (گذار)..... ۴-۷-۱۱
۷۰	مکانیزم تغییر جهت..... ۴-۷-۱۲
۷۱	نوار نقاله خط دو مترو تبریز..... ۴-۸-۸
۷۲	تحلیل پارتو..... ۴-۹-۹
۷۲	تهیه پایگاه داده‌های خرابی و تعمیر نوار نقاله‌های تونل خط دو مترو تبریز..... ۴-۱۰-۱۰
۷۲	نوار نقاله ۱..... ۴-۱۰-۱-۱
۷۳	نوار نقاله ۲..... ۴-۱۰-۲-۲
۷۳	نوار نقاله ۳..... ۴-۱۰-۳-۳
۷۴	جمع‌بندی..... ۴-۱۱-۱۱
۷۵	<b>فصل پنجم: تحلیل داده‌ها..... ۵-۷۵</b>
۷۶	۱- مقدمه..... ۵-۱-۷۶
۷۶	۲- تحلیل پارتو..... ۵-۲-۷۶
۷۷	۳- تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی نوار نقاله TBM در خط دو مترو تبریز..... ۵-۳-۷۷

۷۸.....	۵-۳-۱- تحلیل قابلیت اطمینان نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۸۴.....	۵-۳-۲- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۹۱.....	۵-۳-۳- تحلیل قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۹۳.....	۵-۴-۴- تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۹۴.....	۵-۴-۱- تاب‌آوری نوار نقاله ۱ ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۹۷.....	۵-۴-۲- تاب‌آوری نوار نقاله ۲ ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۹۸.....	۵-۴-۳- تاب‌آوری نوار نقاله ۳ ماشین حفار خط دو مترو تبریز.....
۱۰۱.....	۵-۵- بحث و نتیجه‌گیری.....
۱۰۲.....	۵-۶- جمع‌بندی.....
۱۰۳.....	۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۱۰۴.....	۶-۱- مقدمه.....
۱۰۴.....	۶-۲- نتایج.....
۱۰۸.....	۶-۳- پیشنهادات.....
۱۱۰.....	فهرست منابع.....
۱۱۶.....	پیوست‌ها.....

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- پروژه‌های حفاری با EPB-TBM در کشور ..... ۶
- جدول ۱-۲- برخی از تعاریف حوزه تاب‌آوری ..... ۱۰
- جدول ۲-۲- توابع مختلف توزیع ویبول ..... ۲۷
- جدول ۳-۲- توابع مختلف توزیع نرمال ..... ۲۸
- جدول ۴-۲- توابع مختلف توزیع لاگ لجستیک ..... ۲۹
- جدول ۱-۴- مشخصات فنی دستگاه TBM مترو خط دو تبریز ..... ۶۱
- جدول ۲-۴- مشخصات فنی نوار نقاله‌های تونل خط دو مترو تبریز ..... ۷۱
- جدول ۱-۵- نتایج آزمون‌های روند برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ ..... ۷۹
- جدول ۲-۵- پارامترهای توزیع PLP برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ ..... ۷۹
- جدول ۳-۵- مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی نوار نقاله ۱ ..... ۷۹
- جدول ۴-۵- نتایج آزمون‌های روند داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۰
- جدول ۵-۵- تابع برازش شده و پارامترهای آن برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۱
- جدول ۶-۵- نتایج آزمون‌های روند برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ ..... ۸۵
- جدول ۷-۵- پارامترهای تابع لاک لجستیک سه پارامتری برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ ..... ۸۶
- جدول ۸-۵- مقدار تعمیرپذیری و نرخ تعمیر برای نوار نقاله ۱ ..... ۸۷
- جدول ۹-۵- نتایج آزمون‌های روند داده‌های تعمیر برای نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۷
- جدول ۱۰-۵- تابع برازش شده و پارامترهای آن برای داده‌های تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۸
- جدول ۱۱-۵- نتایج آزمون‌های روند داده‌های تحویل نوار نقاله‌ها ..... ۹۲
- جدول ۱۲-۵- پارامترهای تابع PLP برای داده‌های تحویل نوار نقاله‌ها ..... ۹۲

جدول ۵-۱۳- مقدار پشتیبانی نوار نقاله‌ها ..... ۹۲

جدول ۵-۱۴- مقادیر تاب‌آوری نوار نقاله ۱ ..... ۹۵

جدول ۵-۱۵- مقادیر تاب‌آوری نوار نقاله ۲ ..... ۹۷

جدول ۵-۱۶- مقادیر تاب‌آوری نوار نقاله ۳ ..... ۹۹

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ - تصویر کلی از مفهوم تاب‌آوری ..... ۱۲
- شکل ۲-۲ - روش‌های تحلیل تاب‌آوری ..... ۱۴
- شکل ۳-۲ - نمودار وان حمام نرخ خرابی ..... ۲۴
- شکل ۴-۲ - یک شبکه سری با  $n$  زیرسیستم ..... ۳۲
- شکل ۵-۲ - یک شبکه موازی با  $n$  زیرسیستم ..... ۳۳
- شکل ۶-۲ - روندنمای فرآیند تحلیل RMS ..... ۳۷
- شکل ۷-۳ - خوشه‌بندی تاب‌آوری بر اساس رشته ..... ۴۱
- شکل ۸-۳ - تعداد مقالات منتشر شده تاب‌آوری در سال‌های مختلف ..... ۴۱
- شکل ۹-۳ - طرح کلی مدل تاب‌آوری مکان محور ..... ۴۳
- شکل ۱۰-۴ - نقشه خطوط مترو تبریز ..... ۵۷
- .....
- شکل ۱۱-۴ - دست‌گاه TBM خط دو مترو ..... ۵۸
- تبریز.....
- شکل ۱۲-۴ - سیستم ترابری ..... ۶۰
- ریلی.....
- شکل ۴-۴ - اجزای اصلی نوار نقاله ..... ۶۲
- شکل ۵-۴ - بخش‌های مختلف تسمه نقاله لاستیکی ..... ۶۳
- شکل ۶-۴ - غلطک‌های هرزگرد نوار نقاله ..... ۶۴
- شکل ۷-۴ - طبلک نوار نقاله ..... ۶۵



- شکل ۴-۸- سیستم انتقال نیرو نوار نقاله ..... ۶۶
- شکل ۴-۹- سیستم ضربه گیر: سمت راست بشقابی و سمت چپ هرزگرد ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰- سیستم باردهی نوار نقاله ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۱- مکانیزم تغییر جهت نوا نقاله ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۱ ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۳- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۲ ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۳ ..... ۷۲
- شکل ۵-۱۳- نمودار تحلیل پارتو برای نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو  
تبریز..... ۷۴
- شکل ۵-۲- روندنمای استفاده شده در پایان‌نامه برای تحلیل RMS ..... ۷۵
- شکل ۵-۳- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۲ و ۳ ..... ۷۸
- شکل ۵-۴- منحنی قابلیت اطمینان نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۰
- شکل ۵-۵- منحنی نرخ خرابی نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۱
- شکل ۵-۶- منحنی قابلیت اطمینان کل سیستم نوار نقاله‌ها ..... ۸۲
- شکل ۵-۷- آزمون همبستگی سری برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ ..... ۸۴
- شکل ۵-۸- برازش مناسب تابع لاگ لجستیک سه پارامتری بر داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ ..... ۸۴
- شکل ۵-۹- آزمون‌های همبستگی سری داده‌های تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۳ ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰- منحنی تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۱- منحنی نرخ تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۲- منحنی پشتیبانی نوار نقاله‌ها ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۳- منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۱ ..... ۹۴

- شکل ۵-۱۴- منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری نوار نقاله ۱..... ۹۴
- شکل ۵-۱۵- منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۲..... ۹۶
- شکل ۵-۱۶- منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری نوار نقاله ۲..... ۹۶
- شکل ۵-۱۷- منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۳..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸- تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری نوار نقاله ۳..... ۹۸
- شکل ۵-۱۹- منحنی تاب‌آوری کل سیستم نوار نقاله‌ها..... ۹۹

# ۱- فصل اول: کلیات

## ۱-۱- مقدمه

آهنگ رشد بی سابقه جمعیت شهرهای بزرگ کشور از یک سو و فقدان سیستم حمل و نقل مناسب از سوی دیگر مدیریت حمل و نقل شهری را با مشکلات زیادی مواجه نموده و موجب تأخیر و طولانی شدن سفرهای درون شهری، آلودگی هوا، اتلاف وقت شهروندان، افزایش مصرف سوخت، افزایش هزینه سفر و ... شده است. پیشرفت روزافزون دانش صنعت حفاری، استفاده از قطار شهری زیرزمینی (مترو) را به گزینه مناسبی برای کاهش این مشکلات مبدل ساخته است [۱].

در سال‌های اخیر استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (TBM)<sup>۱</sup> به سرعت در حال افزایش بوده است. چرا که این ماشین‌ها در واقع یک کارخانه عظیم تونل‌سازی هستند و توانسته‌اند دو پارامتر اصلی در یک پروژه تونل‌سازی یعنی کاهش زمان اجرا کاهش هزینه را به شدت تحت تأثیر خود قرار بدهند. این ماشین‌ها، کمترین تأثیر ممکن بر سازه‌های سطح زمین داشته و همچنین به دلیل حفاری با کیفیت و سرعت بالا، ایمنی بسیار بالا برای پرسنل و کمترین تأثیرات زیست محیطی روز به روز بر کاربرد آن‌ها افزوده می‌شود. این ماشین‌ها هم برای حفاری در سنگ و هم در زمین‌های سست شهری کاربرد دارند که برای حفاری در زمین‌های سست شهری که غالباً جهت حفر تونل‌های مترو می‌باشد ماشین‌های حفاری از نوع تعادل فشار زمین (EPB)<sup>۲</sup> از کاربرد بسیار زیادی برخوردارند. با توجه به افزایش روز افزون جمعیت کشورمان و ضرورت استفاده از مترو و فضاهای زیرزمینی، این ماشین‌ها در کشورمان نیز با استقبال زیادی رو به رو شده‌اند و در حال حاضر چندین دستگاه از این ماشین‌ها در تونل‌های مترو تهران، اصفهان، تبریز، مشهد و اهواز مشغول به حفاری هستند [۱]. این ماشین‌آلات از زیرسیستم‌های مختلفی تشکیل شده است که در ارتباط با هم و به صورت یکپارچه مشغول به فعالیت هستند که اختلال در یک زیرسیستم باعث توقف کل دستگاه حفاری می‌شود. یکی از این زیرسیستم‌ها که وظیفه حمل مواد حفاری شده را به خارج از تونل به عهده دارد، زیرسیستم نوار نقاله است. اما با تمام پیشرفت‌های حاصل شده در این ماشین‌ها همواره مخاطرات زیادی این

<sup>۱</sup> Tunnel Boring Machine

<sup>۲</sup> Earth Pressure Balance

ماشین‌ها را تهدید می‌کنند که می‌توانند باعث اخلاف در عملکرد این ماشین‌ها شوند. از منظر استادان مدرسه عالی کسب و کار هاروارد مخاطرات به سه دسته تقسیم می‌شوند: مخاطرات قابل پیشگیری؛ مثل شکست فرآیندها یا خطاهای انسانی، مخاطرات راهبردی؛ که به نوعی انتخاب داوطلبانه مخاطره است با دریافت پاداش بالقوه‌ای که برای خودمان متصور می‌شویم و مخاطرات بیرونی که خارج از کنترل و تأثیرگذاری ما هستند.

برای مواجهه با مخاطرات اول و دوم، بهترین مواجهه، مدیریت ریسک<sup>۱</sup> است، اما در مخاطرات بیرونی، بهترین انتخاب یا شاید تنها انتخاب برای ما رویکرد تاب‌آوری<sup>۲</sup> است [۲].

کلمه تاب‌آوری در اصل از کلمه لاتین *resilier* به معنی (( بازگشت به عقب<sup>۳</sup> )) نشأت گرفته است [۳]. تاب‌آوری در زمینه‌های گوناگون مانند محیط‌زیست، علم مواد، روانشناسی، اقتصاد و مهندسی تعریف می‌شود [۳]. تعاریف زیادی برای تاب‌آوری ارائه شده است که تعداد زیادی شبیه به هم اند گرچه بسیاری از آن‌ها با مفاهیمی مانند تنومندی<sup>۴</sup>، تحمل شکست<sup>۵</sup>، انعطاف‌پذیری<sup>۶</sup>، بقا<sup>۷</sup> و چابکی<sup>۸</sup> همپوشانی دارند [۳]. برخی از تعاریف تاب‌آوری عبارت‌اند از:

❖ یک سیستم، زمانی تاب‌آور است که در حین آشفتگی‌ها بتواند کارکرد خودش را حفظ کند؛ شوک‌های مثبت و منفی را جذب و به یک سازگاری با شرایط جدید برسد [۲].

❖ تاب‌آوری به عملکرد زمانی یک سیستم شامل استقامت، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری در شرایط وقوع یک اغتشاش شدید اشاره دارد [۴].

---

<sup>۱</sup> . Risk Management

<sup>۲</sup> . Resilience

<sup>۳</sup> . Bounce Back

<sup>۴</sup> . Robustness

<sup>۵</sup> . Tolerance

<sup>۶</sup> . Flexibility

<sup>۷</sup> . Survivability

<sup>۸</sup> . Agility

❖ تاب‌آوری به عنوان توانایی بازگشت سیستم به شرایط عادی پس از وقوع خرابی تعریف می‌شود [۵].

❖ تاب‌آوری توانایی یک سیستم در جذب تنش‌های بیرونی است [۶].

❖ تاب‌آوری توانایی انطباق با تغییر شرایط و مقاومت و بازیابی سریع از اختلال است [۷].

به طور کلی یک سیستم زمانی تاب‌آور است که در صورت بروز اختلال توانایی بازیابی از شرایط نامساعد را داشته باشد.

## ۱-۲- تعریف موضوع و بیان مسئله

امروزه بسیاری از حفاری‌های زیرزمینی با دستگاه‌های مکانیکی انجام می‌گیرد. در این میان رایج‌ترین نوع حفاری مکانیکی هم در سنگ و هم در خاک، استفاده از TBMها است که برای حفاری تونل‌های با مقطع دایره‌ای به کار می‌روند. TBMها نسبت به تغییر شرایطی مانند نوع سنگ، جریان آب زیرزمینی، وجود گسل و درزه و سایر ویژگی‌های ساختاری بسیار حساس اند [۸]. با توجه به کاربرد روزافزون TBMها به ویژه در محیط‌های شهری، شناخت نحوه عملکرد اجزاء مختلف ماشین ضروری می‌باشد تا با اصلاح و رفع خرابی‌ها امکان فعال بودن و در دسترس بودن ماشین افزایش یابد و توقف‌های ماشین به حداقل ممکن برسد [۹]. با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری بالا برای به کارگیری TBMها استفاده صحیح از آنها با کارایی مناسب بسیار حائز اهمیت است [۸]. استفاده موفقیت‌آمیز از این ماشین مستلزم طراحی دقیق و منطبق با شرایط تونل، اپراتور و پرسنل ماهر پشتیبانی عملیات حفاری، گروه مجرب تعمیرات و نگهداری تحت نظر یک مدیریت منسجم است که در نتیجه آن هم پروژه طبق زمان‌بندی مورد نظر پیش رود و هم هزینه عملیاتی کاهش یابد [۱۰]. یکی از زیرسیستم‌های حیاتی این ماشین‌ها که وظیفه حمل مواد حفاری شده را به خارج از تونل به عهده دارند، زیرسیستم نوار نقاله است که باید به درستی به کار گرفته شود تا کمترین میزان توقف را دارا باشد. اما با تمام پیشرفت‌های حاصل شده در این ماشین‌ها، همواره مخاطراتی این ماشین‌ها را تهدید می‌کنند. از این رو مطالعه و تحلیل تاب‌آوری این ماشین‌ها امری ضروری است زیرا مطالعه و تحلیل تاب‌آوری این امکان را می‌دهد که با شناسایی مخاطرات مربوط به سیستم و نحوه برخورد و رفع آنها، توقف‌های ماشین

به حداقل رسانده شود.

### ۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

در دنیای امروز و با توجه به پیشرفت‌های حاصل شده در زمینه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و فناوری، همچنان حوادث مخربی این پیشرفت‌ها را تهدید می‌کنند. از آنجا که نمی‌توان از بروز برخی حوادث جلوگیری کرد لذا باید سیستم‌ها و دستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شوند که یا در برابر این حوادث مقاومت کنند و یا در صورت بروز افت در کارایی آنها، قابل بازیابی باشند. این مفهوم تاب‌آوری است. در سال‌های گذشته تاب‌آوری در حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و فرهنگی بازتاب بیشتری داشته و دانشمندان زیادی تاب‌آوری را در این حوزه‌ها مورد بررسی قرار دادند. اما در حوزه مهندسی، تاب‌آوری مسئله نسبتاً جدیدتری است و کار چندانی در حوزه‌های مهندسی انجام نشده است. یکی از این حوزه‌های مهندسی، مهندسی معدن می‌باشد که با توجه به افزایش روزافزون تقاضا برای منابع معدنی و گسترش بیش از پیش معادن و کارهای معدنی، استفاده از ماشین‌آلات مختلف در این کارها افزایش پیدا کرده است و حوادث مختلفی نیز این ماشین‌آلات را تهدید می‌کنند. یکی از زیرشاخه‌های مهندسی معدن، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی می‌باشد. تونل‌ها کاربردهای مختلفی همچون حمل و نقل و دسترس، تونل‌های آب‌بر، مغارها، فضاهای زیرزمینی (ایستگاه‌های مترو، نیروگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی و کارگاه‌های استخراج مواد معدنی) دارند که اکثر این تونل‌ها با TBM‌ها حفاری می‌شوند. استفاده از فن‌آوری پیشرفته حفاری مکانیزه در کشورمان روز به روز در حال گسترش است. قبل از سال ۱۳۵۷ سه دستگاه TBM از نوع باز ساخت شرکت کاوازاکی ژاپن جهت حفاری در پروژه تونل کوه‌رنگ ۳ وارد کشور شدند که البته به دلیل در نظر نگرفتن شرایط ساختگاه تونل در طراحی این ماشین‌ها، استفاده از آنها با موفقیت همراه نبود [۱]. سابقه استفاده از EPB – TBM نیز به سال ۱۳۷۷ برمی‌گردد که در تونل خیام (تونل جمع‌آوری آب‌های تهران) با قطر ۴/۶۶ و به طول ۵۶۰۰ متر به کار گرفته شد [۹]. اما از اوایل دهه ۸۰، استفاده از این ماشین‌ها به سرعت افزایش یافته و همان‌طور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است در حال حاضر چندین پروژه در کشور در

حال اجرا با این ماشین‌ها هستند که به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد این پروژه‌ها و نقش اساسی زمان اجرای این پروژه‌ها که رابطه مستقیم با هزینه‌های عملیاتی دارد نیاز جدی متولیان امر و مهندسين به آشنایی کامل با این ماشین‌ها و تهدیدات مربوط به آن‌ها و چگونگی رفع این تهدیدها برای جلوگیری از آسیب‌پذیری این ماشین‌ها یا بازیابی سریع کارایی آن‌ها در صورت بروز اختلال را می‌طلبد. یکی از بخش‌های اصلی TBMها، زیرسیستم نوار نقاله است که نیاز به بررسی و آشنایی کامل با آن ضروری است. پایین بودن فاکتور بهره‌وری و زیاد بودن میزان توقف‌های ناشی از اختلال و بازیابی کارایی این ماشین در پروژه‌های مختلف، ضرورت انجام یک تحقیق جامع در حوزه تاب‌آوری را بیشتر نشان می‌دهد [۱].

جدول ۱-۱- پروژه‌های حفاری با EPB-TBM در کشور [۱]

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

## ۱-۴- اهداف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، آشنایی با سیستم نوار نقاله دستگاه TBM و بررسی اجزاء و زیر سیستم‌های آن است تا با جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات خرابی و تعمیرات صورت گرفته در این نوارها، تاب‌آوری محاسبه و با تحلیل تاب‌آوری این دستگاه و انجام اقدامات و برنامه‌ریزی‌های لازم از توقف‌های بیش از حد دستگاه



جلوگیری شود.

## ۱-۵- ساختار پایان نامه

در فصل دوم پایان نامه 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. همچنین دو آزمون مهم وجود یا عدم وجود روند و همبستگی سری در داده‌ها توضیح داده شده است.

در فصل سوم این پایان نامه مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف و همچنین مطالعات صورت گرفته در زمینه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی آورده شده است.

در فصل چهارم پایان نامه به معرفی مطالعه موردی که تونل مترو خط دو تبریز می‌باشد و همچنین به معرفی انواع و اجزا نوار نقاله پرداخته شده است. همچنین پایگاه داده جامع نوار نقاله‌ها، شامل اطلاعات خرابی و تعمیر در مدت حدود ۱۵ ماه ارائه شده است.

در فصل پنجم پایان نامه به تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی برای هر یک از نوارها و همچنین برای کل سیستم نوار نقاله‌ها پرداخته شده است. سپس با توجه به رابطه مورد استفاده برای محاسبه تاب‌آوری در این پایان نامه، به محاسبه تاب‌آوری پرداخته شده است.

در فصل ششم پایان نامه نتایج به دست آمده از این تحقیق آورده شده است و پیشنهادات لازم برای مطالعه بیشتر در حوزه تاب‌آوری نوار نقاله‌های ماشین حفار تونل مترو خط دو تبریز ارائه شده است.



## ۲- فصل دوم: مبانی نظری

## ۲-۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت روز افزون فناوری‌ها و افزایش کاربرد این فناوری‌ها در کارهای روزانه، همواره این فناوری‌ها با یک سری از مشکلات و مخاطرات رو به رو هستند. این مخاطرات می‌توانند موجب بروز مشکل و خرابی در سیستم‌ها شوند و فعالیت آنها را دچار مشکل کنند. از این رو همواره دانشمندان به دنبال پیدا کردن راه حلی برای جلوگیری یا مقابله با این مخاطرات بوده‌اند. یکی از مباحث جدید در حوزه مهندسی که به این موضوع کمک می‌کند مبحث تاب‌آوری است. از این رو در این فصل ابتدا به تشریح موضوع تاب‌آوری پرداخته می‌شود و تعاریف مختلف آن در حوزه‌های 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 قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی به طور کامل شرح داده شده است.

## ۲-۲- تاب‌آوری

اصطلاح تاب‌آوری به فراوانی در ادبیات تحقیق و ادبیات علمی مشهور به خاطر نقش آن در کاهش ریسک‌های مرتبط با اختلال اجتناب‌ناپذیر سیستم دیده می‌شود. استفاده رایج اصطلاح تاب‌آوری بر توانایی نهاد یا سیستم برای برگشت به وضعیت نرمال بعد از وقوع یک حادثه مخرب در حالت آن دلالت دارد. تاب‌آوری در زمینه‌های گوناگون تعریف شده است که مفهوم آن در مهندسی در مقایسه با دیگر حوزه‌ها نسبتاً جدید است. تاب‌آوری به عنوان توانایی یک سیستم در جذب تغییرات پیوسته و غیر قابل پیش‌بینی و همچنین حفظ عملکردهای اساسی خود تعریف شده است [۱۰]. برخی دیگر از تعاریف ارائه شده در حوزه تاب‌آوری در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲- برخی از تعاریف حوزه تاب‌آوری

تعریف	نویسنده
بازگشت یک سیستم به حالت اولیه بعد از نابسامانی.	Pimm, 1984 [11]
معیاری از توانایی سیستم برای جذب تغییرات، در حالی که هنوز مقاومت قبلی را دارد.	Holing, 1973 [12]

Allenby & fink,2000 [13]	توانایی سیستم در حفظ و نگهداری فعالیت و ساختار خود در مقابل تغییرات بیرونی و درونی و جمع و جور کردن عملکرد سیستم به هنگام نیاز.
Davis,2006 [11]	توانایی جوامع، سیستم‌های فیزیکی، سیاسی و اقتصادی، ساختمان‌ها و سکونتگاه‌های آنها و تحمل ایستادگی در برابر خطرهای به وجود آمده از تنش‌ها و فشارها که بتواند به طور سریعی به عقب برگشت کرده، تهدیدهای آتی را بپذیرد و با آنها رویارویی کند.
Haimes,2009 [6]	توانایی ایستادگی سیستم در برابر آشفتگی‌های بزرگ همراه با میزان انحطاط قابل قبول سیستم و بازیابی آن در زمان مناسب و با هزینه و ریسک معقول.
Cimellaro et al. ,2010 [14]	قابلیت حفظ عملکرد و بازیابی از ضررهای ناشی از وقایع شدید.
Vugrin et al. ,2010 [15]	با توجه به وقوع یک رویداد مخرب ( یا مجموعه‌ای از وقایع) تاب‌آوری سیستم نسبت به آن رویداد (یا وقایع) توانایی سیستم در کاهش اثرات آن هم از نظر میزان و هم از نظر مدت زمان انحراف از هدف سطح عملکرد سیستم می‌باشد.
Pregenzer,2011 [10]	توانایی یک سیستم در جذب تغییرات مداوم و غیر قابل پیش‌بینی و همچنین حفظ عملکردهای اساسی خود.
Hollnagel 2011 [16]	توانایی ذاتی یک سیستم برای تنظیم عملکردش قبل، حین یا در پی تغییرات و اختلالات تا بتواند عملیات موردنیاز را هم در شرایط مورد انتظار و هم غیر منتظره حفظ کند.
Cutter et al. 2013 [17]	توانایی پیش‌بینی، آماده‌سازی، پاسخ و سازگاری با اختلالات و کاهش پیامدهای آن و همچنین بازیابی به موقع و کارآمد شامل حفظ ترمیم خدمات ( احیاء خدمات).
Yodo&wang,2016 [18]	توانایی یک سیستم مهندسی شده برای احساس استقلال و پاسخ به تغییرات منفی در شرایط سلامتی، مقاومت در برابر وقایع ناکامی و بازیابی از تأثیرات این رویدادهای پیش‌بینی نشده.
Barker et al. 2017 [7]	توانایی انطباق با تغییر شرایط و مقاومت و بازیابی سریع از اختلال.

هر یک از تعاریف بالا سه ویژگی مشترک را برجسته می‌کند:

الف) تاب‌آوری یک اختلال فرضی را در نظر می‌گیرد.

ب) به کارایی سیستم قبل، حین و بعد از اختلال اشاره دارد.

ج) با ارزیابی تاب‌آوری در لحظات مختلف برای فرآیندهای تصمیم‌گیری گوناگون که به حفظ یک سطح

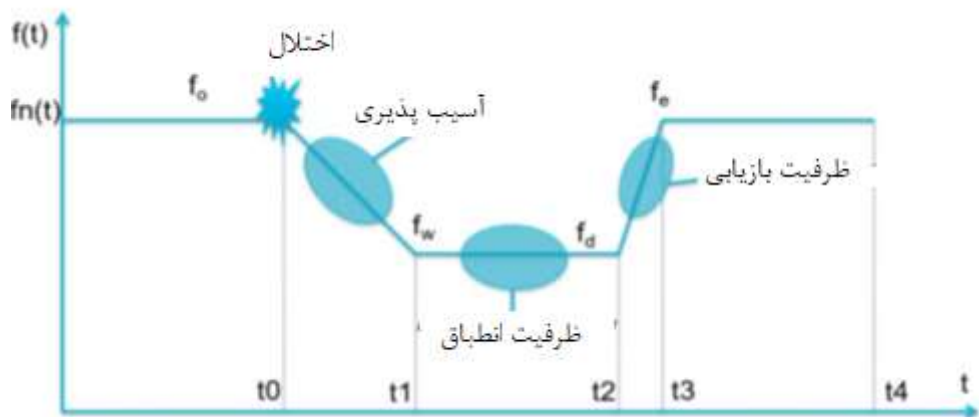
عملکرد مورد نیاز کمک می‌کنند، مرتبط است [۱۹].

در ادامه برای درک راحت تر اصطلاح تاب‌آوری مثالی ساده و قابل درک عنوان شده است. یک درخت را در زمستان در نظر بگیرید. زمانی که برف می‌بارد به علت سنگینی دانه‌های برف بر روی شاخه‌های درخت، شاخه‌ها به طرف زمین خم می‌شوند ولی نمی‌شکنند. با اتمام زمستان و آب شدن برف‌های روی شاخه‌ها، شاخه‌ها دوباره به حالت اولیه خود برگشته و به فعالیت خود ادامه می‌دهند.

بدن انسان را در نظر بگیرید. بدن در حالت طبیعی در حال فعالیت می‌باشد اما در صورت بروز مشکل مانند انواع بیماری‌ها یا از دست دادن یکی از عزیزان بدن از لحاظ فیزیکی یا روانی مقداری از کارایی اولیه خود را از دست خواهد داد ولی با گذشت زمان و انجام اقدامات لازم مانند استفاده از دارو یا مراجعه به روانپزشک به مرور بدن به حالت طبیعی خود برمی‌گردد.

در شکل ۱-۲ تصویر کلی و ساده شده‌ای از ارتباط وضعیت سیستم با مفهوم تاب‌آوری و همچنین تغییرات تابع عملکرد سیستم بر حسب زمان ( $f(t)$ ) طی وضعیت‌های متفاوت ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، سطح عملکرد سیستم پس از وقوع آشفتگی شروع به کاهش یافتن کرده و پس از مدت زمان مشخص وضعیت عملکردی سیستم در پایین‌ترین سطح خود قرار می‌گیرد. در مقابل، پس از شروع بازیابی سطح عملکرد سیستم شروع به زیاد شدن کرده و سطح سیستم به وضعیت بازیابی شده ارتقا می‌یابد. روند کاهش و یا افزایش سطح عملکرد سیستم تحت تأثیر آشفتگی و بازیابی، میتواند به صورت غیرخطی یا خطی باشد [۲۰].

در شکل ۱-۲،  $t_0$  زمان وقوع اختلال است،  $t_1$  با زمان وقوع بدترین عملکرد مطابقت دارد،  $t_2$  نشان‌دهنده شروع بهبود عملکرد است،  $t_3$  زمان حالت پایدار جدید و  $t_4$  زمان برای ارزیابی مقاومت در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۱- تصویر کلی از مفهوم تاب‌آوری [۲۰]

در مثال‌هایی که بیان شد (درخت و بدن از سان) دقت کنید. آیا همه‌ی درختان یا همه‌ی انسان‌ها در مقابل هر میزان از بارندگی برف یا هر نوع از بیماری‌ها و آسیب‌ها تاب‌آور هستند؟ آیا پیری یا جوانی سیستم و همچنین میزان اختلال، در تاب‌آوری سیستم موثر است؟ پاسخ مثبت خواهد بود زیرا به طور مثال اگر بارندگی برف زیاد باشد یا شاخه درخت نازک باشد امکان شکستن شاخه وجود خواهد داشت یا اگر فرد بیمار شونده پیر باشد یا جوان، میزان کاهش سطح عملکرد و زمان بازیابی هر کدام در مقابل بیماری متفاوت خواهد بود.

بنابراین مطالعه تاب‌آوری برای یک حادثه انجام می‌شود و تاب‌آوری یک سیستم برای هر نوع و هر شدت آسیب متفاوت است یعنی هر آسیب خاص می‌تواند تاب‌آوری خاصی نیز برای سیستم ایجاد کند [۶]. ممکن است طراحی سیستم به گونه‌ای باشد که تاب‌آوری سیستم در برابر یک حادثه بیشتر شود ولی همزمان تاب‌آوری آن در برابر یک حادثه دیگر کاهش یابد [۴].

یک سیستم تاب‌آور باید از مجموعه‌ای از زیر سیستم‌های کوچک‌تر تشکیل شده باشد که در حالت عادی به صورت یکپارچه و در حالت اضطراری به صورت جداگانه قابل بهره‌برداری باشند زیرا وابستگی متقابل بین و درون سیستم‌ها باعث می‌شود آنها تاب‌آوری کم‌تری نسبت به اختلالات پیدا کنند. به طور خاص، اختلال در یک سیستم به هم پیوسته می‌تواند منجر به تأثیر دومینو وار یا آبشار مانند شود که به دیگر سیستم‌های مرتبط با تأثیر اولیه ضربه می‌زند. برای مثال در جولای ۲۰۱۲ بزرگترین خاموشی تاریخ بر بیش از ۶۰۰

میلیون انسان در هند تأثیر گذاشت. از طریق یک تأثیر آبشاری چند سیستم دیگر (حمل و نقل، مخابرات، مالی و...) نیز با مشکل مواجه شدند. در سال ۲۰۱۱، جاری شدن سیل در جنوب شرقی آسیا منجر به کمبود هارد دیسک‌ها و افزایش قیمت این دستگاه‌ها در سراسر جهان شد [۱۹].

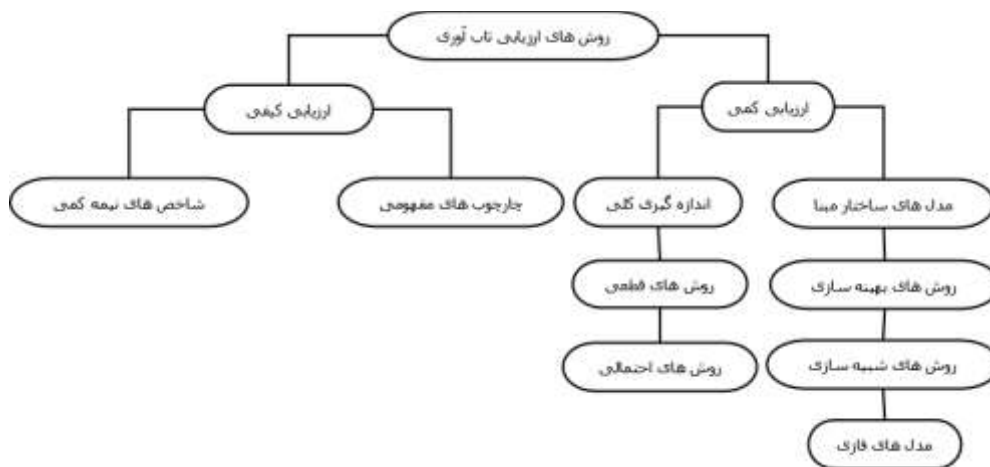
جهت ارزیابی یک ویژگی مانند تاب‌آوری از یک سیستم مهندسی، ابتدا باید شاخص‌های کمی برای توصیف میزان آن ویژگی و اجزای آن تعریف و محاسبه شود [۴]. در بحث تاب‌آوری، ویژگی‌های سیستم قبل و بعد از آشفستگی هر دو از اهمیت بالایی برخوردار هستند، در واقع یکسری از تمهیدات باید از قبل در سیستم در نظر گرفته شوند تا سیستم قابل اطمینان شود و یکسری دیگر از تمهیدات نیز باید به نحوی در نظر گرفته شوند که پس از وقوع آشفستگی یا خرابی سیستم قابل تعمیر یا پشتیبانی باشد [۵].

## ۲-۳- روش‌های تحلیل تاب‌آوری

بر طبق تقسیم‌بندی ارائه شده توسط حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۶، روش‌های تحلیل تاب‌آوری به دو گروه عمده‌ی کیفی و کمی طبقه‌بندی می‌شوند [۳]. در این بین، روش‌های کمی در حوزه سیستم‌های مهندسی کاربرد بیشتری دارند. این روش‌ها به دو دسته‌ی اندازه‌گیری کلی و مدل‌های مبتنی بر ساختار تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های اندازه‌گیری کلی به وسیله 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 آشفستگی با عملکرد آن پس از وقوع آشفستگی مقایسه می‌شود. این روش‌ها نیز به دو بخش قطعی و احتمالی تقسیم می‌شوند. در روش‌های قطعی برخلاف روش‌های احتمالی، عدم قطعیت‌ها مانند احتمال وقوع آشفستگی 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 منطق‌فازی تقسیم‌بندی می‌شوند [۵].



شکل ۲-۲ تقسیم‌بندی روش‌های تحلیل تاب‌آوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- روش‌های تحلیل تاب‌آوری [۳]

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

برونئو<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۱] رابطه کمی برای محاسبه تاب‌آوری زیرساخت‌های عمرانی جوامع در زمان وقوع زلزله ارائه کردند. آنها چهار بعد برای تاب‌آوری سیستم در نظر گرفتند که شامل تنومندی، تندی، تدبیر و افزونگی می‌شود. رابطه ارائه شده توسط برونئو و همکارانش به صورت رابطه (۲-۱) است. در این رابطه  $R$  مقدار تاب‌آوری،  $Q(t)$  کیفیت عملکرد زیر ساخت‌ها در زمان  $t$ ،  $t_0$  زمان وقوع آشفستگی در سیستم و  $t_1$  زمان رسیدن سیستم به حالت عادی پس از آشفستگی است.

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (۲-۱)$$

رز [۲۲] رابطه‌ای کمی برای محاسبه تاب‌آوری در زمینه اقتصاد ارائه کرد. او رابطه (۲-۲) را برای محاسبه تاب‌آوری ارائه کرد که در آن  $R$  مقدار تاب‌آوری،  $\Delta DY^m$  حداکثر درصد تغییر در خروجی مستقیم در اثر آشفستگی،  $\Delta DY$  مقدار تخمین زده شده درصد تغییر در خروجی مستقیم در اثر وقوع آشفستگی هستند. در صد دوری از حداکثر آشفستگی اقتصادی ایجاد شده بر اثر یک بحران ماهیت اصلی این رابطه را تشکیل می‌دهد.

<sup>۱</sup>.Bruneau

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

ویتسون و رامیرز-مارکوئز<sup>۱</sup> [۲۳] 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 آشفتگی‌های خارجی توانایی فراهم کردن خدمات و بازیابی خود را دارد تاب‌آور خواهد بود. آنها رابطه‌ای کمی برای محاسبه تاب‌آوری شبکه‌ها ارائه کردند. این رابطه از احتمال وقوع آشفتگی خارجی و همچنین احتمال اینکه سطح عملکرد سیستم تحت تأثیر وقوع آشفتگی خارجی کمتر از مقدار از پیش تعیین شده بشود، برای محاسبه تاب‌آوری شبکه استفاده می‌کند. آنها رابطه (۲-۳) را برای اندازه‌گیری تاب‌آوری شبکه‌ها ارائه کردند. در این رابطه  $x$  بردار وضعیت سیستم و هر کدام از مؤلفه‌های این بردار بیانگر وضعیت کمان‌های شبکه هستند.  $P$  بردار احتمال مقادیری است که هر کدام از مؤلفه‌های بردار  $x$  به خود اختصاص می‌دهند.  $\Phi(x)$  تابع ساختار شبکه و  $d$  عملکرد خواسته شده از شبکه است.  $R_a$  نیز تاب‌آوری شبکه است (هنگامی که تعداد  $a$  شکست خارجی در نظر گرفته شود).  $\beta$  نیز شاخص توصیف کننده یک شکست خاص از بین تعداد شکست‌های خارجی است.

$$R_a = \sum_{\beta} P(\varphi(x) \geq d | a, \beta) P(\beta) \quad (3-2)$$

کیمیلارو<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۴] با استفاده از چهار شاخص اصلی تاب‌آوری یعنی تندی، تنومندی، تدبیر و افزونگی رابطه‌ای کمی برای محاسبه تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی پیچیده در مقابل آشفتگی‌های 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  $T_{LC}$  زمان کنترل سیستم و  $\alpha$  ضریب اهمیت خدمات قبل و بعد از وقوع خرابی هستند.

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

<sup>۱</sup>. Witson and Ramirez-marquez

<sup>۲</sup>. Cimellaro

یون و همکارانش [۲۴] رابطه‌ای کمی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم ارائه کردند. آنها تاب‌آوری را به صورت مجموع نرخ بقا منفعل سیستم (قابلیت اطمینان) و نرخ بقا کنشگرای سیستم (مرمت) بیان کردند. وجود عملیات مرمت در سیستم باعث بازیابی وضعیت سیستم شده و از نزول بیش از حد مجاز عملکرد سیستم جلوگیری می‌کند. در این رابطه عملیات مرمت بر اساس فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای افزایش قابلیت اطمینان به وسیله تشخیص، پیشبینی و اصلاح خرابی انجام می‌شود. رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش معروف به تاب‌آوری مهندسی است و به صورت رابطه (۲-۵) نوشته می‌شود که در آن  $\Psi$  برابر با تاب‌آوری سیستم،  $R$  قابلیت اطمینان سیستم،  $\rho$  برابر با مرمت و  $k$  و  $\Lambda_P$  و  $\Lambda_D$  برابر با احتمالات شرطی موفقیت عملیات بازیابی، پیشبینی و تشخیص صحیح هستند. با توجه به اینکه رابطه تاب‌آوری از قابلیت اطمینان سیستم استنتاج شده است، با استفاده از قواعد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیر سیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد.

$$\Psi = R + \rho = R + \kappa \cdot \Lambda_P \cdot \Lambda_D \cdot (1 - R) \quad (۵-۲)$$

راد<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۵] با الهام از رابطه ارائه شده توسط یون و همکارانش، رابطه جدیدی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها ارائه کردند. آنها اعتقاد داشتند که قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی سیستم و همچنین تاب‌آوری تشکیلات<sup>۲</sup> نیز باید در محاسبات مد نظر قرار بگیرد. بر همین اساس، آنها رابطه (۲-۶) را برای تحلیل تاب‌آوری سیستم در زمان  $t$  ارائه کردند. در این رابطه  $\Lambda_j(t)$  حاصلضرب تاب‌آوری تشکیلات ( $\beta_1$ )، قابلیت تعمیرپذیری ( $\beta_2$ )، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت<sup>۳</sup> ( $\beta_3$ ) و قابلیت پشتیبانی ( $\beta_4$ ) است. در این رابطه نیز با استفاده از قواعد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان می‌توان تاب‌آوری زیر سیستم‌ها و در نهایت تاب‌آوری کل سیستم را تعیین کرد. در رابطه ارائه شده توسط راد و همکارانش علاوه بر عدم قطعیت‌ها به عامل زمان نیز توجه شده است.

<sup>۱</sup>.Rod

<sup>۲</sup>.Organization resilience

<sup>۳</sup>.Prognostics and Health Management (PHM)

$$\Psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + \Lambda(t) \cdot (1 - R(t)) = R(t) + \left( \prod_{i=1}^4 \beta_i \right) \cdot (1 - R(t)) \quad (6-2)$$

ایوب<sup>۱</sup> [۲۶] رابطه‌ای کمی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری ارائه کرد (رابطه (۷-۲)). رابطه ارائه شده از چهار خصوصیت تنومندی، تندی، افزونگی و تدبیر و همچنین زمان شروع خرابی، زمان کامل شدن خرابی، مدت زمان صرف شده برای بازیابی و زمان اتمام بازیابی برای محاسبه تاب‌آوری استفاده می‌کند. در این رابطه  $T_i$  زمان وقوع،  $T_f$  زمان خرابی،  $T_r$  زمان بازیابی،  $\Delta T_f = T_i - T_f$  مدت زمان خرابی و  $\Delta T_r = T_r - T_i$  مدت زمان بازیابی هستند.  $F$  برابر با پروفیل خرابی بوده و تنومندی و افزونگی سیستم را اندازه می‌گیرد. همچنین  $R$  پروفیل بازیابی بوده و قابلیت بازیابی سیستم را اندازه‌گیری می‌کند.

$$R_e = \frac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r} \quad (7-2)$$

کای<sup>۲</sup> و همکارانش [۲۷] 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، تطبیق‌پذیری، انعطاف‌پذیری و قابلیت بقا است و منابع نگهداری و تعمیرات (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 نهادند. آنها تاب‌آوری را به صورت رابطه (۸-۲) تعریف کردند (رابطه برای هر عضو از سیستم می‌تواند به کار برده شود). در این رابطه  $i$  برابر با شماره آشفتگی و همچنین  $n$  برابر با تعداد کل آشفتگی وارد شده به سیستم است. قابلیت‌های دسترسی قبل از آشفتگی (A1)، بعد از آشفتگی (A2) و بعد از رسیدن به شرایط عادی (A3).  $T1$  معرف زمانی است که قابلیت دسترسی سیستم ثابت است،  $t2$  معرف زمان اتمام بازیابی سیستم است. نسبت  $A/\ln(t)$  برابر با درجه تاب‌آوری است. رابطه ارائه

<sup>۱</sup>.Ayyub

<sup>۲</sup>.Cai

شده نشان دهنده این موضوع است که با افزایش قابلیت دسترسی سیستم (A) و کاهش زمان بازیابی (t) مقدار تاب‌آوری افزایش می‌یابد.

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

همان‌طور 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 قطعیت‌ها را نیز وارد 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 پایان‌نامه روش ارائه شده توسط راد و همکارانش (رابطه ۲-۶) استفاده شده است.

## ۲-۴- مفاهیم قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی

### ۱(RMS)

RMS شامل سه مشخصه قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی یک دستگاه یا سیستم می‌باشد. در ادامه هر یک از این مشخصه‌ها تعریف شده است:

قابلیت اطمینان: احتمال توانایی سیستم یا زیر سیستم برای انجام دادن صحیح و بدون خرابی مأموریت مشخص و از پیش تعریف شده در شرایط معین و در دوره زمانی مشخص می‌باشد که تحت عنوان مدل قابلیت اطمینان دستگاه یا سیستم به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود [۲۸].

قابلیت تعمیرپذیری: احتمال توانایی دوباره سیستم یا دستگاه به انجام دادن صحیح مأموریت مشخص در شرایط معین بعد از تعمیر توسط پرسنل تعمیر و نگهداری می‌باشد [۲۸].

---

۱. Reliability and Maintainability and Supportability (RMS)

قابلیت پشتیبانی: توانایی تأمین منابع، خدمات و مدیریت ضروری جهت انجام تعمیرات تحت شرایط مشخص و زمان نقل و انتقالات منابع مورد نیاز [۲۹].

لازم به ذکر است که قابلیت اطمینان تنها تابعی از خرابی سیستم یا زیر سیستم است [۱]. قابلیت اطمینان زمان فعال سیستم و قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی زمان غیرفعال شامل تعمیرات و خواب سیستم را کنترل می‌نماید [۳۰].

عوامل مهمی در RMS مطرح هستند که از آن جمله می‌توان طراحی سیستم، کیفیت ساخت، شرایط محیطی که سیستم در آن نگهداری می‌شود یا کار می‌کند، وضعیت سیستم نگهداری، میزان مهارت اپراتور، پرسنل تعمیرات و نگهداری و در دسترس بودن قطعات و تجهیزات جهت تعمیر سیستم را نام برد. شناخت صحیح این عوامل برای رسیدن به سطوح مورد انتظار RMS ضروری است. رسیدن به سطوح طراحی شده RMS موجب افزایش عملکرد سیستم، مهارت بیشتر پرسنل، بهبود وضعیت تعمیر و نگهداری سیستم، افزایش قابلیت دسترسی قطعات یدکی، افزایش ایمنی سیستم، موفقیت آمیز بودن عملیات، کاهش هزینه‌های عملیاتی و در نهایت موجب افزایش تاب‌آوری سیستم می‌شود [۱].

## ۲-۵- برخی از اصطلاحات و پارامترهای حوزه‌ی RMS

مهمترین اصطلاحات و پارامترهایی که در حوزه‌ی RMS کاربرد دارند به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۸، ۳۱-۳۳]:

خرابی<sup>۱</sup>: عدم توانایی یک بخش یا یک قطعه از سیستم یا دستگاه در انجام وظایف مشخص شده.

حادثه<sup>۲</sup>: وقوع رویداد مضر در صورت عدم کنترل مؤثر منبع انرژی یا عوامل رفتاری.

---

<sup>۱</sup>.Failure

<sup>۲</sup>.Hazard

نرخ خرابی یا نرخ حادثه<sup>۱</sup>: تعداد خرابی یا حادثه در واحد زمان.

تعمیرات و نگهداری<sup>۲</sup>: کلیه فعالیت‌های لازم برای نگهداری و آماده‌سازی یک سیستم یا دستگاه در یک شرایط مشخص.

تعمیرات و نگهداری اصلاحی<sup>۳</sup>: عملیات تعمیر و آماده‌سازی سیستم بعد از وقوع خرابی و از کار افتادن سیستم.

تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه<sup>۴</sup>: عملیات تعمیرات و نگهداری سیستم در یک فاصله زمانی معین (حتی اگر سیستم درست کار کند).

زمان بین خرابی‌ها (TBF)<sup>۵</sup>: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه.

میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)<sup>۶</sup>: 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 (TTF)<sup>۷</sup>: عمر مفید یک بخش یا یک قطعه غیر قابل تعمیر از دستگاه.

میانگین زمان تا خرابی (MTTF)<sup>۸</sup>: متوسط عمر یک بخش یا یک قطعه غیر قابل تعمیر از دستگاه.

زمان تعمیر (TTR)<sup>۹</sup>: زمان مورد نیاز برای تعمیر یا رفع اشکال قطعه یا بخش خراب شده دستگاه.

میانگین زمان تعمیرات (MTTR)<sup>۱۰</sup>: متوسط زمان صرف شده برای تعمیرات یک قطعه یا یک بخش از

---

<sup>۱</sup>.Failure rate

<sup>۲</sup>.Maintenance

<sup>۳</sup>.Corrective maintenance

<sup>۴</sup>.Preventive maintenance

<sup>۵</sup>.Time between failures

<sup>۶</sup>.Mean time between failures

<sup>۷</sup>.Time to failure

<sup>۸</sup>.Mean time to failures

<sup>۹</sup>.Time to repair

<sup>۱۰</sup>.Mean time to repair

دستگاه.

نرخ تعمیر<sup>۱</sup>: تعداد تعمیر در واحد زمان.

زمان پاسخگویی یا تحویل (TTD)<sup>۲</sup>: زمان مورد نیاز برای نقل و انتقالات منابع لازم برای تعمیر و نگهداری.

زمان کارکرد دستگاه<sup>۳</sup>: مدت زمانی که دستگاه در حال انجام کار است.

با درک مفاهیم اصلی حوزه RMS، از آنجایی که قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی هر سه از جنس احتمال هستند لذا در ادامه به توابع احتمالی که مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره می‌شود.

## ۲-۶- توابع احتمالاتی خرابی - زمان

تحلیل مناسب و تصمیم‌گیری در خصوص مسائل احتمالی در حوزه قابلیت اطمینان و تعمیرات و نگهداری، نیازمند آگاهی از زمان وقوع خرابی است. هر چند امکان پیش‌بینی و تعیین زمان خرابی دستگاه‌ها به طور قطع میسر نیست ولی این امکان وجود دارد که بر اساس مشاهدات قبلی، احتمال وقوع خرابی در یک سیستم یا دستگاه را تعیین نمود. توزیع احتمال برای زمان خرابی یا تعمیر (یک متغیر تصادفی پیوسته که زمان خرابی یا تعمیر یک بخش یا سیستم را نشان می‌دهد)، می‌تواند با تابع توزیع چگالی احتمال، تابع توزیع تجمعی، تابع قابلیت اطمینان، تابع قابلیت تعمیر و نگهداری، تابع نرخ خرابی یا تابع نرخ تعمیر مشخص شود که برای تحلیل RMS یک سیستم یا دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. این توابع به شرح زیر هستند:

### ۲-۶-۱- تابع توزیع چگالی احتمال<sup>۴</sup>

این تابع که تابع چگالی خرابی یا تابع چگالی تعمیر نیز نامیده می‌شود به جای نمودار فراوانی نسبی زمان بین خرابی‌ها یا زمان تعمیرات (متغیر تصادفی) استفاده می‌شود و شکل توزیع متغیر تصادفی را نشان

---

<sup>۱</sup>.Repair rate

<sup>۲</sup>.Time to delivery

<sup>۳</sup>.Up time

<sup>۴</sup>.Probability density function (pdf)



می‌دهد. در واقع تابع چگالی احتمال منحنی برازش شده به نمودار فراوانی نسبی متغیر تصادفی است [۳۴]. معادله این منحنی برای توزیع‌های مختلف، متفاوت است و برای متغیرهای تصادفی گسسته و پیوسته دارای اشکال مختلفی است. متغیر تصادفی در این بحث، از نوع پیوسته است لذا بعد از معرفی توابع توزیع تجمعی احتمال و نرخ خرابی، مهم‌ترین توابعی که در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند آورده شده است.

### ۲-۶-۲- تابع توزیع تجمعی<sup>۱</sup>

این تابع که تابع توزیع تجمعی خرابی یا تعمیر نیز نامیده می‌شود معرف مقادیر احتمال یک متغیر تصادفی تا قبل از یک زمان خاص،  $t$ ، می‌باشد و برابر است با [۱]:

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

احتمال وقوع خرابی یا تعمیر تا زمان  $t$

لازم به ذکر است که در انتگرال فوق، مقدار کران پایین در واقع از  $-\infty$  است ولی در بحث RMS، زمان خرابی از لحظه شروع به کار یعنی زمان صفر در نظر گرفته می‌شود [۳۲، ۳۴].

### ۲-۶-۳- تابع قابلیت اطمینان

تابع قابلیت اطمینان یک سیستم یا دستگاه به صورت زیر بیان می‌شود [۳۵]:

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

### ۲-۶-۴- تابع نرخ خرابی

نرخ خرابی معمولاً با  $\lambda$  نمایش داده می‌شود ولی تابع نرخ خرابی یا نرخ خطر یک سیستم یا دستگاه با  $\lambda(t)$  یا  $h(t)$  بیان می‌شود [۱].

تابع نرخ خرابی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱]:

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (11-2)$$

با توجه به رابطه (۹-۲) داریم:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow -\int_0^t \lambda(t) dt = \int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} \cdot dR(t) \Rightarrow \ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt \quad (12-2)$$

بنابراین رابطه قابلیت اطمینان و تابع نرخ خرابی به صورت زیر است [۳۵]:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (13-2)$$

از دیگر پارامترهایی که در حوزه RMS کاربرد دارد میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) و میانگین زمان تعمیرات (MTTR) است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (14-2)$$

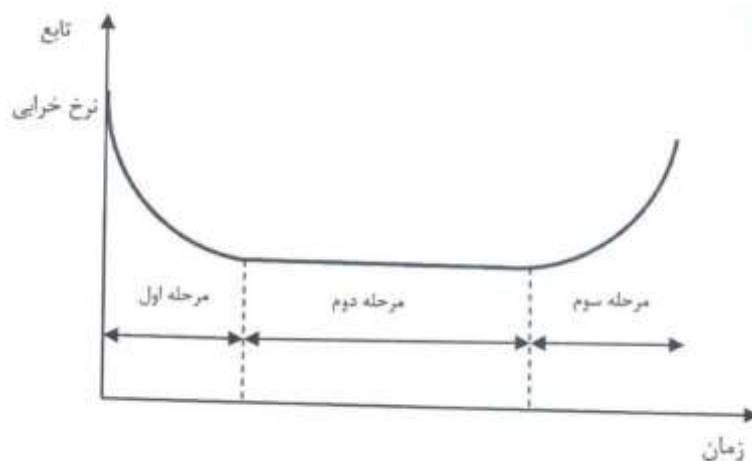
این رابطه نشان می‌دهد که MTBF در واقع مقدار امید ریاضی (میانگین) زمان بین خرابی‌ها است [۳۶].

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

## ۲-۶-۴-۱- مفهوم نمودار وان حمام<sup>۱</sup> و نرخ خرابی

نمودار وان حمام یک نمودار شناخته شده برای نمایش وضعیت خرابی یک دستگاه یا سیستم است. از آنجایی که با گذشت زمان، خرابی در دستگاه یا سیستم به وجود می‌آید لذا این نمودار چرخه عمر یک دستگاه یا سیستم را با گذشت زمان بر حسب نرخ خرابی یا نرخ خطر نشان می‌دهد. چرخه عمر بیشتر دستگاه‌ها و سیستم‌ها شامل سه بازه زمانی است که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۱]:

<sup>۱</sup>.Bathtub curve



شکل ۲-۳- نمودار وان حمام نرخ خرابی [۳۷]

#### ۲-۶-۴-۱-۱- مرحله اول (آببندی تجهیزات)

این مرحله مربوط به آغاز بهره‌برداری اولیه و یا بهره‌برداری مجدد تجهیزات بعد از تعمیرات اساسی است. چنانچه در شکل دیده می‌شود در این بازه، نرخ خرابی بالا است که از جمله دلایل این امر، نا آشنا بودن پرسنل و اپراتور با مشخصات فنی دستگاه، تعمیرات نادرست، کنترل کیفیت ضعیف، خطای انسانی و غیره هستند. که به تدریج با مهارت اپراتور و سایر پرسنل، تجهیزات با محیط و فرآیند تولید سازگاری پیدا کرده و حالت پایدار و تنظیم شده‌ای را به خود می‌گیرند و هر چقدر در این دوران تجهیزات بیشتر کار کنند از احتمال خرابی آنها کاسته می‌شود [۱].

#### ۲-۶-۴-۲-۱- مرحله دوم (عمر طبیعی)

در این مرحله تجهیزات پس از گذشتن از دوران آببندی وارد مرحله عمر طبیعی خود می‌شوند و با توجه به آشنایی پرسنل و برنامه‌ریزی صحیح تعمیرات و نگهداری، نرخ خرابی به حداقل رسیده و تقریباً ثابت خواهد بود [۱].

#### ۲-۶-۴-۳-۱- مرحله سوم (فرسایش)

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

می‌گردد [۱].

از مزایای این نمودار این است که با محاسبه قابلیت اطمینان دستگاه و در نظر گرفتن زمان‌های عمر دستگاه، برای تعمیر و نگهداری دستگاه برنامه‌ریزی کرد. همچنین با استفاده از نرخ خرابی و نمودار فوق وضعیت فرسودگی و نیز عمر مفید باقیمانده دستگاه مشخص می‌شود و می‌توان با کنترل آماری خرابی‌های یک بخش یا یک قطعه از دستگاه، زمان مناسب تعمیر یا تعویض یک قطعه از دستگاه را پیشبینی کرد [۳۷].

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

## ۲-۶-۵- توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال

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

### ۲-۶-۵-۱- توزیع نمایی<sup>۱</sup>

توزیع نمایی یکی از توابع بسیار کاربردی در قابلیت اطمینان است. این تابع دارای نرخ خرابی ثابت است و از آنجا که بیشتر تجهیزات و دستگاه‌ها در مرحله دوران طبیعی عمر خود دارای نرخ خرابی تقریباً ثابتی هستند لذا این توزیع کاربرد گسترده‌ای در توزیع زمان‌های خرابی دارد. توزیع نمایی تنها توزیع پیوسته‌ای است که دارای خاصیت بی‌حافظگی<sup>۲</sup> است یعنی توزیع سالم بودن قطعه در انتهای عمر آن با توزیع اصلی قطعه نو برابر است. در واقع قطعه به یاد نمی‌آورد که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته و در صورت تعمیر شدن نیز " به خوبی یک قطعه نو"<sup>۳</sup> است. تابع چگالی احتمال توزیع نمایی یک پارامتری به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda \geq 0 \quad (۱۵-۲)$$

<sup>۱</sup>. Exponential distribution

<sup>۲</sup>. Memory less

<sup>۳</sup>. As good – as – new

این توزیع فقط دارای پارامتر مقیاس ( $\frac{1}{\lambda}$ ) است و پارامتر شکل توزیع ندارد. تابع توزیع تجمعی توزیع نمایی برابر است با [۱]:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۱۶-۲)$$

مقدار میانگین (امید ریاضی) این توزیع که در واقع میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) می‌باشد برابر است با [۱]:

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (۱۷-۲)$$

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

تابع قابلیت اطمینان توزیع نمایی یک متغیره برابر است با [۱]:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (۱۸-۲)$$

تابع نرخ خرابی برای توزیع نمایی ثابت و برابر  $\lambda$  است [۳۸].

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

## ۲-۶-۵-۲- توزیع ویبول<sup>۱</sup>

توزیع ویبول به دلیل انعطاف‌پذیری و داشتن اشکال مختلف (برای مقادیر مختلف پارامتر تغییر شکل آن) یکی از پر کاربردترین توابع مرسوم در قابلیت اطمینان است. توابع مختلف توزیع ویبول سه پارامتری در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲- توابع مختلف توزیع ویبول

$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t - \lambda)^{\beta-1} \exp[-(\frac{t-\lambda}{\alpha})^\beta]$	تابع چگالی احتمال
---	-------------------

<sup>۱</sup>. Weibull distribution

$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\lambda}{\alpha}\right)^\beta\right]$	تابع توزیع تجمعی
--	------------------

در این روابط،  $\alpha$  پارامتر مقیاس<sup>۱</sup>،  $\beta$  پارامتر شکل<sup>۲</sup> و  $\lambda$  پارامتر آستانه<sup>۳</sup> توزیع ویبول است. چنانچه پارامتر آستانه صفر باشد توزیع ویبول سه پارامتری به ویبول دو پارامتری تبدیل می‌شود.

## ۲-۶-۵-۳- توزیع نرمال<sup>۴</sup>

توزیع نرمال نیز از توابع پرکاربرد در توزیع چگالی احتمال است. یک توزیع دو پارامتری توابع مختلف آماری آن در جدول ۲-۳ آورده شده است. در این روابط  $\mu$  پارامتر مکان<sup>۵</sup> و  $\sigma$  پارامتر مقیاس است.

جدول ۲-۳- توابع مختلف توزیع نرمال

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

## ۲-۶-۵-۴- توزیع لاگ لجستیک<sup>۶</sup>

این توزیع نیز دارای کاربرد گسترده‌ای در قابلیت اطمینان است. توابع مختلف توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری در جدول ۲-۴ آورده شده است.

<sup>۱</sup>.Scale parameter

<sup>۲</sup>.Shape parameter

<sup>۳</sup>.Threshold parameter

<sup>۴</sup>.Normal distribution

<sup>۵</sup>.Location parameter

<sup>۶</sup>.Loglogistic distribution

جدول ۲-۴- توابع مختلف توزیع لاگ لجستیک

$f(t) = \frac{1}{\sigma(t-\lambda)} \cdot \frac{\exp\left(\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right)}{\left[1 + \exp\left(\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right)\right]^2}$	تابع چگالی احتمال
$F(t) = \frac{1}{\{1 + \exp[-(\ln(t-\lambda)-\mu)/\sigma]\}}$	تابع توزیع تجمعی

در این روابط  $\mu$  پارامتر مکان،  $\sigma$  پارامتر مقیاس و  $\lambda$  پارامتر آستانه است. چنانچه پارامتر آستانه صفر باشد توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری به لاگ لجستیک دو پارامتری تبدیل می‌شود.

## ۲-۷- قابلیت تعمیر و نگهداری

امروزه نیاز به شناخت قابلیت تعمیر و نگهداری به دلیل هزینه‌های سرسام‌آور عملیاتی و نگهداری تجهیزات و سیستم‌ها بیشتر احساس می‌شود. بهبود قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم باعث افزایش کیفیت سیستم، کاهش زمان تعمیرات و نگهداری و کاهش هزینه‌های پروژه، کاهش زمان توقف‌ها در پروژه، افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم می‌شود. قابلیت تعمیر و نگهداری، احتمال اینکه یک بخش یا سیستم بتواند وظایف محوله خود را بعد از تعمیر، برای استفاده در شرایط مشخص، به درستی انجام دهد تعریف می‌شود. " شرایط مشخص " در این تعریف، شامل شرایط آب و هوایی، وضعیت نگهداری، نیروی انسانی، موقعیت جغرافیایی و غیره می‌باشد. از آنجایی که در این نوشتار با دو شاخص قابلیت تعمیر و نگهداری<sup>۱</sup> و تعمیرات و نگهداری<sup>۲</sup> مواجه هستیم بهتر است که وجه تمایز آنها مشخص شود. قابلیت تعمیر و نگهداری، مربوط به اندازه‌گیری شاخص‌هایی است که مربوط به فاز طراحی دستگاه هستند که باعث سهولت تعمیرات و نگهداری قطعات و دستگاه، اطمینان از کاهش زمان توقف‌ها (ناشی از خرابی) و کاهش هزینه‌های عملیاتی دستگاه در حین استفاده می‌شود ولی تعمیرات و نگهداری، شامل فعالیت‌هایی است که توسط پرسنل استفاده کننده از

<sup>۱</sup>.Maintainability

<sup>۲</sup>.Maintenance

دستگاه جهت عملیاتی نگه داشتن آن یا تعمیر دستگاه جهت برگرداندن آن به وضعیت عملیاتی باشد. به بیان ساده‌تر، قابلیت تعمیر و نگهداری، یک پارامتر طراحی جهت به حداقل رساندن زمان تعمیر است که با تحلیل نتایج تعمیرات و نگهداری دستگاه محاسبه می‌شود در حالی که تعمیرات و نگهداری عملیات سرویس و تعمیر دستگاه است [۳۹].

## ۲-۷-۱- توابع قابلیت تعمیر و نگهداری

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<sup>۱</sup> ( $f_{dr}$ ) محاسبه می‌شود. فرمول ریاضی قابلیت تعمیر و نگهداری به صورت زیر است [۴۰]:

$$M(t) = \int_0^t f_{dr}(t) dt \quad (19-2)$$

که  $t$  زمان مورد نیاز،  $f_{dr}$  تابع چگالی احتمال برای زمان تعمیر (تابع چگالی تعمیر) و  $M(t)$  تابع قابلیت تعمیر و نگهداری است. در واقع تابع قابلیت تعمیر و نگهداری همان توزیع تجمعی احتمال زمان‌های تعمیر است و فرمول آن برای توزیع‌های نمایی، ویبول، نرمال، لاگ نرمال و گاما که نسبت به سایر توابع توزیع کاربرد بیشتری در تحلیل قابلیت تعمیر و نگهداری دارند همان روابط توزیع تجمعی این توابع در تحلیل قابلیت اطمینان است که پارامترهای آن بر اساس زمان‌های تعمیر تعیین می‌شوند. همچنین لازم به ذکر است که در بحث قابلیت تعمیر و نگهداری با نرخ تعمیر ( $\mu$ ) سر و کار داریم که در بحث قابلیت اطمینان نرخ خرابی ( $\lambda$ ) مطرح بود و نرخ تعمیر ثابت برابر است با [۱]:

<sup>۱</sup>.Repair density function



$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (2-20)$$

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 [۱].

## ۲-۸- قابلیت پشتیبانی

قابلیت پشتیبانی به عنوان توانایی تأمین منابع، خدمات و مدیریت ضروری برای انجام تعمیرات تحت شرایط مشخص و زمان نقل و انتقالات منابع مورد نیاز تعریف می‌شود [۲۹]. در این تعریف وجه مهمی از "منابع" برای اجرای نت (نگهداری و تعمیرات) سامانه‌های صنعتی به عنوان قطعات یدکی در نظر گرفته می‌شوند. یک استراتژی مناسب پشتیبانی محصول به عنوان مجموعه فعالیت‌های لازمه جهت افزایش عمر ماشین‌آلات و قابلیت دسترسی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهره‌برداری بهینه از قابلیت‌های تولیدی تجهیزات، کسب حداکثر سهم بازار و سود بیشینه می‌توان در نظر گرفت. به بیان ساده پشتیبانی از محصول به عنوان تمامی فعالیت‌ها در راستای اطمینان از دسترسی به عملیات خالی از مشکل در طول عمر مفید تعریف می‌شود. همانطور که در تعریف قابلیت پشتیبانی اشاره شد، نت و مدیریت قطعات یدکی دو بعد اساسی این شاخص برای تضمین عملکرد هستند. نت در حالت‌های کلی به عنوان ترکیبی از تمام فعالیت‌های فنی و برنامه‌های مدیریتی است، که شامل فعالیت‌های نظارتی برای حفظ یک قلم یا بازگردانی آن به وضعیتی که قادر به انجام فعالیت مورد نظر باشد. مدیریت قطعات یدکی و تدارکات نیز دسترسی به قطعات یدکی را سهولت بخشیده و از این طریق زمان افت سیستم را کاهش می‌دهد تا کارایی افزایش یافته و در نتیجه آن سود حاصل از کل پروژه را ارتقا دهد [۴۱].

## ۲-۸-۱- توابع قابلیت پشتیبانی

قابلیت پشتیبانی از جنس احتمال است و برای محاسبه آن از توابع توزیع احتمالی زمان‌های تحویل که متغیر

تصادفی در بحث قابلیت پشتیبانی است استفاده می شود. در اینجا نیز بعد از تعیین تابع توزیع تحویل، تابع قابلیت پشتیبانی محاسبه می شود. لازم به ذکر است که در بحث قابلیت پشتیبانی متغیر تصادفی، زمان تحویل (TTD) است و تابع چگالی تحویل<sup>۱</sup> ( $f_{dd}$ ) محاسبه می شود. فرمول ریاضی قابلیت پشتیبانی به صورت زیر است:

$$S(t) = \int_0^t f_{dd}(t) dt \quad (21-2)$$

که  $t$  زمان مورد نظر،  $f_{dd}$  تابع چگالی احتمال برای زمان تحویل (تابع چگالی تحویل) و  $S(t)$  تابع قابلیت پشتیبانی است. در واقع تابع قابلیت پشتیبانی همان توزیع تجمعی احتمال زمان های تحویل است و فرمول آن برای توزیع های 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 است که پارامترهای آنها بر اساس زمان های تحویل تعیین می شوند.

## ۲-۹- انواع سیستم ها

هر دستگاه یا سیستم از بخش ها یا زیرسیستم های مختلفی تشکیل می شود که نحوه قرارگیری این زیرسیستم ها در تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت پشتیبانی کل سیستم مؤثر است. در این بخش شبکه های سری و موازی که مهم ترین آرایش زیرسیستم ها می باشند بحث می شود [۱].

### ۲-۹-۱- شبکه سری<sup>۲</sup>

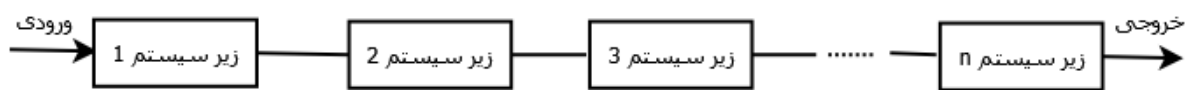
در این شبکه همه زیر سیستم های یک سیستم یا دستگاه به طور سری با همدیگر کار می کنند و هر زیر سیستم که دچار خرابی و توقف شود باعث خرابی و توقف کل سیستم خواهد شد. به عبارت دیگر برای موفقیت چنین سیستمی همه ی زیر سیستم های آن باید درست کار کند. نمودار بلوکی<sup>۳</sup> چنین شبکه ای

<sup>۱</sup>.Delivery density function

<sup>۲</sup>.Series network

<sup>۳</sup>.Block diagram

مطابق شکل ۴-۲ است [۳۹, ۴۲].



شکل ۴-۲- یک شبکه سری با n زیرسیستم [۳۹]

در این حالت قابلیت‌های RMS هر زیر سیستم محاسبه می‌شود و مقادیر آن برای کل سیستم برابر خواهد بود با [۱]:

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (22-2)$$

$$M_s = M_1 M_2 M_3 \dots M_n = \prod_{i=1}^n M_i \quad (23-2)$$

$$S_s = S_1 S_2 S_3 \dots S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (24-2)$$

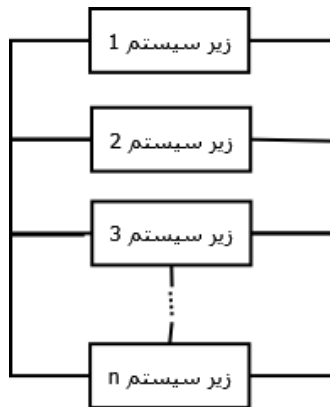
بنابراین در حالت کلی مقادیر RMS برای یک سیستم با n زیر سیستم در حالت سری برابر است با [۱]:

$$RMS_s = \prod_{i=1}^n RMS_i \quad (25-2)$$

## ۲-۹-۲- شبکه موازی<sup>۱</sup>

در این شبکه همه‌ی زیر سیستم‌ها هم زمان فعال هستند ولی در صورتی که فقط یک زیر سیستم درست کار کند کل سیستم فعال خواهد بود. آرایش زیر سیستم‌ها در چنین سیستمی مطابق نمودار بلوکی شکل ۵-۲ می‌باشد که هر بلوک یک زیر سیستم را نشان می‌دهد [۳۹, ۴۲].

<sup>۱</sup>.Parallel network



شکل ۲-۵- یک شبکه موازی با n زیرسیستم [۳۹]

در حالت کلی برای چنین شبکه‌ای قابلیت‌های RMS از رابطه زیر به دست می‌آیند [۱]:

$$RMS_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - RMS_i) \quad (۲۶-۲)$$

## ۲-۱۰- مدل سازی و تحلیل RMS

برخی از دستگاه‌ها و سیستم‌ها ساختمان بسیار حجیم و پیچیده‌ای دارند که مدیریت چنین سیستم‌ها و دستگاه‌هایی به شناخت کافی از قابلیت اطمینان آنها هم برای جلب رضایت مشتری و هم برای اطمینان از اجرای صحیح پروژه و رسیدن به تولید موردنظر در شرایط و مدت زمان معلوم نیاز اساسی دارد. روش‌های مختلفی برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌ها و دستگاه‌ها ارائه شده‌اند که اساس این روش‌ها تحلیل‌های کیفی، کمی و یا بر مبنای مدل سازی و شبیه سازی استوار است. در این میان، روش‌های مرسوم که بیشترین استفاده را در تحلیل RMS و تعمیرات و نگهداری دستگاه‌ها و سیستم‌ها دارند عبارتند از: روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آنها<sup>۱</sup>، روش تحلیل درخت خطا<sup>۲</sup>، روش مارکوف<sup>۳</sup> و روش آماری [۳۱]. همچنین روش‌های مبتنی بر شبیه سازی از جمله شبیه سازی مونت کارلو<sup>۴</sup> نیز در قابلیت اطمینان سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۴۳].

<sup>۱</sup>. Failure modes and effect analysis (FMEA)

<sup>۲</sup>. Fault tree analysis (FTA)

<sup>۳</sup>. Markov

<sup>۴</sup>. Monte carlo simulation

روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آنها در اوایل دهه ۱۹۵۰ برای توسعه سیستم‌های کنترل پرواز و تعیین قابلیت اطمینان سیستم و تحلیل خرابی‌ها در آمریکا به کار گرفته شد. هدف این روش شناسایی انواع خرابی‌های محتمل در زیر سیستم‌های مختلف سیستم و تأثیر آنها بر سایر زیر سیستم‌ها و در نهایت بر کل سیستم به منظور بالا بردن ایمنی سیستم و انجام صحیح مأموریت آن می‌باشد. این تحلیل در مراحل اولیه طراحی دستگاه و همچنین در مراحل مختلف چرخه عمر دستگاه قابل استفاده است. این روش یکی از روش‌های معروف تحلیل قابلیت اطمینان است. ولی بزرگ‌ترین کاستی این روش این است که تمامی تحلیل‌های آن کیفی است و همچنین استفاده از این روش در دستگاه‌ها و سیستم‌های پیچیده خیلی دشوار است [۳۲].

روش تحلیل درخت خطا نیز یکی از روش‌های پر کاربرد و دارای توانایی بالا در تحلیل خرابی‌های دستگاه‌ها است. این روش در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آزمایشگاه بل<sup>۱</sup> برای ارزیابی قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم کنترل پرتاب موشک مورد استفاده قرار گرفت. روش تحلیل انواع خرابی‌ها و تأثیرات آنها به عنوان روش تحلیل رخدادها از پایین به بالا<sup>۲</sup> و روش تحلیل درخت خطا به عنوان روش تحلیل رخدادها از بالا به پایین<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند. در روش تحلیل درخت خطا رخداد نامطلوب بالا (خرابی سیستم یا زیر سیستم) مشخص شده و به صورت ساختار یک درخت به سمت پایین دلایل و احتمال این رخداد نامطلوب را در سطوح مختلف سیستم بررسی می‌کند تا به پایین‌ترین جزء سیستم برسد. این روش هم کیفی و هم کمی می‌باشد و کاربرد گسترده‌ای در تحلیل خرابی‌ها و شناسایی رخدادهای بحرانی و احتمال وقوع آنها دارد ولی این روش نیز در دستگاه‌ها و سیستم‌های بزرگ و پیچیده بسیار زمان‌بر و مشکل است [۴۴].

ساختار و منطق دو روش ذکر شده فوق بیشتر برای شناسایی انواع رخدادهای ممکن، احتمال وقوع هر رخداد، تأثیر متقابل رخدادها بر اجزاء مختلف سیستم به منظور بهبود قابلیت اطمینان مناسب هستند نه یک

---

<sup>۱</sup>.Bell

<sup>۲</sup>.Bottom - top

<sup>۳</sup>.Top - bottom

روش کمی که قابلیت اطمینان سیستم را به صورت تابعی از زمان ارائه دهند [۱].

از این روش مارکوف و روش آماری که با تحلیل داده‌های عملیاتی سیستم و دستگاه، یک رابطه مبتنی بر زمان برای تعیین قابلیت اطمینان ارائه می‌دهند روش‌هایی سودمند برای مدل سازی و تعیین قابلیت اطمینان هستند. فرآیندهای مارکوف در زمان پیوسته<sup>۱</sup> در مهندسی قابلیت اطمینان کاربرد گسترده‌ای دارند [۴۵-۴۷].

مشخصه‌ی اصلی فرآیندهای مارکوفی این است که فقط با داشتن وضعیت فعلی سیستم، رفتار آتی آن را می‌توان تعیین کرد یعنی رفتار آتی سیستم مستقل از عملکرد گذشته آن است. اساس این روش بر مبنای ماتریس انتقال یا گذر سیستم از حالت سالم به خرابی (با نرخ خرابی  $\lambda$ ) و از حالت خرابی به وضعیت سالم (با نرخ تعمیر  $\mu$ ) استوار است و همچنین نرخ خرابی و نرخ تعمیر ثابت فرض می‌شوند. در نهایت با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، رابطه قابلیت اطمینان سیستم یا دستگاه به صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود [۴۸].

از آنجایی که هدف این مطالعه تحلیل تاب‌آوری است و با توجه به فرمول استفاده شده در این مطالعه باید به تحلیل RMS پرداخته شود لذا همانطور که اشاره شد برای تعیین قابلیت اطمینان، نرخ خرابی، قابلیت تعمیر و نگهداری، نرخ تعمیر و قابلیت پشتیبانی نیاز به توابع توزیع چگالی احتمال خرابی و تعمیر و توابع توزیع تجمعی احتمال خرابی و تعمیر داریم که تحلیل‌ها بر اساس آنها صورت می‌گیرد. بنابراین همگی این محاسبات از جنس احتمال هستند و روش آماری جامع‌ترین روش تحلیل RMS است. لذا فرآیند استفاده از روش آماری برای تحلیل‌های مورد نظر در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲-۱۰-۱- مدل سازی RMS با استفاده از روش آماری

برای تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیر و نگهداری و قابلیت پشتیبانی یک سیستم که کمیت‌های احتمالی هستند داده‌های مورد نیاز شامل زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیرات و زمان تحویل<sup>۲</sup> (که متغیرهای تصادفی

<sup>۱</sup>.Markov processes in continuous times

<sup>۲</sup>.Time to delivery (TTD)

مدل سازی و تحلیل RMS هستند) جمع آوری می گردند. شکل ۲-۶ روند نمای کلی نحوه تعیین نوع فرآیند تحلیل داده‌ها در روش آماری، فرآیند مدل سازی و تحلیل RMS را نشان می دهد. مطابق این روندنا جهت تحلیل داده‌ها ابتدا آزمون روند<sup>۱</sup> صورت می پذیرد. آزمون روند تعیین می کند که آیا نحوه پراکنش داده‌های خرابی به طور معنی داری (تنزل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده است یا خیر. برای تو صیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد. مطابق روندنا شکل ۲-۶ در این مطالعه آزمون روند با دو آزمون تحلیلی روند لاپلاس<sup>۲</sup> و کتابچه نظامی<sup>۳</sup> آغاز می شود. در صورت تأیید روند تو سط هر دو آزمون وجود روند در داده‌ها مسلم است. اما در صورت رد شدن هر دو آزمون، آزمون من - کندال<sup>۴</sup> وجود یا عدم وجود روند را مشخص می کند. در صورت رد یکی از دو آزمون نیز آزمون اندرسون دارلینگ<sup>۵</sup> انجام گرفته و در صورت رد نشدن این آزمون، داده‌ها روند نخواهند داشت. در صورت رد آزمون اندرسون دارلینگ نیز مجدداً آزمون من - کندال انجام خواهد گرفت. در صورت وجود روند در داده‌ها روش فرآیند پواسون ناهمگن<sup>۶</sup> (مثل فرآیند قانون توان<sup>۷</sup>) برای تحلیل استفاده می شود و اگر داده‌ها از روند خاصی پیروی نکنند به عبارت دیگر داده‌ها به طور یکسان توزیع شده باشند آزمون همبستگی سری<sup>۸</sup>، وابستگی داده‌ها یا مستقل بودن آنها را مشخص می کند که در صورت وجود همبستگی، روش مورد استفاده فرآیند پواسون همگن<sup>۹</sup> (مثل فرآیند پواسون شاخه‌ای<sup>۱۰</sup>) خواهد بود و در صورتی که داده‌ها مستقل باشند (در این صورت که داده‌ها هم به طور یکسان توزیع شده و هم مستقل هستند در اصطلاح مانا و مستقل<sup>۱۱</sup> خوانده می شوند) روش آمار کلاسیک

---

۱. Trend test

۲. Laplace

۳. Military handbook

۴. Man - Kendal test

۵. Anderson - darling test

۶. Non-homogenous poisson process (NHPP)

۷. Power low process (PLP)

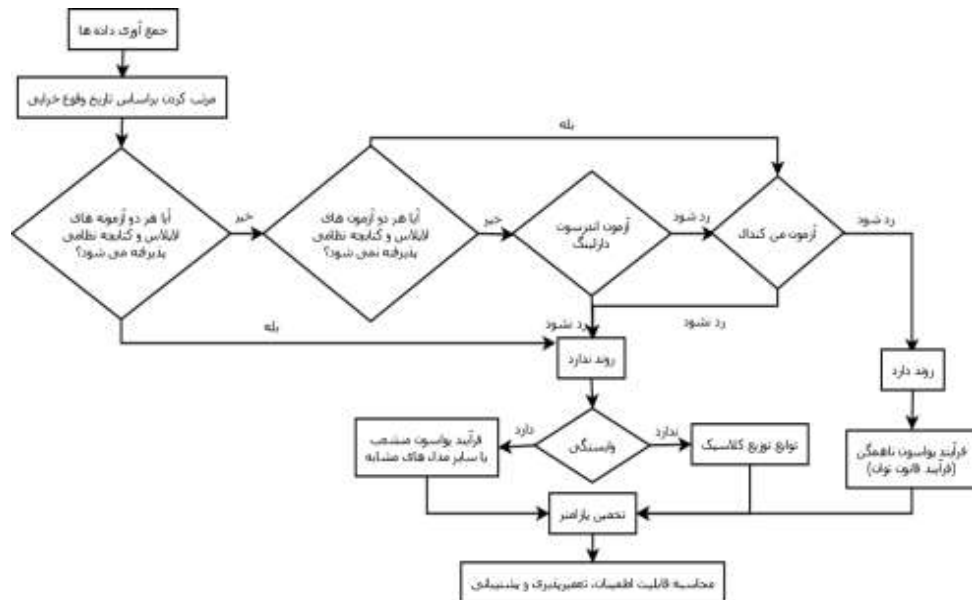
۸. Serial correlation test

۹. Homogenous poisson process (HPP)

۱۰. Branching poisson process

۱۱. Independent and identically distributed (iid)

(فرآیند تجدید شونده)<sup>۱</sup> بر مبنای توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیر و زمان تحویل که قبلاً اشاره گردید جهت تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این صورت، یافتن تابع توزیع چگالی احتمال که بر داده‌ها بهترین تطابق را داشته باشد اساسی‌ترین گام فرآیند تحلیل است.



شکل ۲-۶- روندنمای فرآیند تحلیل RMS [۴۹, ۴۱]

## ۲-۱۰-۱-۱- آزمون روند

آزمون روند یک روش آماری مرسوم برای بررسی وضعیت عملیاتی و اطلاعات خرابی‌ها و تعمیرات دستگاه یا سیستم با گذشت زمان است و نشان دهنده روند یکنواخت خرابی‌ها و تعمیرات یا روند کاهشی یا افزایشی در زمان خرابی‌های اتفاق افتاده و تعمیرات صورت گرفته است [۱]. مطابق الگوریتم شکل ۲-۶ در این مطالعه از آزمون‌های کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون دارلینگ و من کنдал برای تعیین روند در داده‌ها استفاده شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار minitab19 استفاده شده است. بر اساس این نرم افزار برای هر آزمون روند در صورتی که مقدار p-value آن بیشتر از سطح معناداری (۰/۰۵) باشد فرض صفر آزمون (فرض صفر همه آزمون‌ها عدم وجود روند می‌باشد) پذیرفته می‌شود در غیر این صورت فرض صفر رد شده و داده‌ها دارای روند می‌باشند.

<sup>۱</sup>.Renewal process



## ۲-۱۰-۱-۲- آزمون همبستگی سری

در این آزمون تأمین داده TBF یا TTR یا TTD بر حسب (i-1) آمین داده TBF یا TTR یا TTD در یک فضای دو بعدی رسم می شوند. چنانچه نقاط ترسیم شده دارای نظم و ترتیب خاصی نباشند و به صورت پراکنده توزیع شده باشند در این صورت داده‌ها دارای همبستگی سری نیستند به عبارت دیگر اگر داده‌های ترسیم شده در امتداد یک خط قرار بگیرند دارای همبستگی خواهند بود [۵۰].

## 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 چیز مشترک هستند 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 (رابطه ۲-۶) استفاده شد. 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 محاسبه RMS گام نخست بررسی مستقل و مانا بودن داده‌ها است. برای این منظور دو آزمون روند و خود همبستگی سری انجام می‌گیرد. آزمون‌های روند استفاده شده در این پایان‌نامه شامل آزمون کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون دارلینگ و من کندال است. اگر داده‌ها دارای روند باشند از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) برای تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود روند، آزمون همبستگی سری بر روی داده‌ها انجام می‌شود. اگر داده‌ها همبستگی سری داشته باشند از فرآیند پواسون منشعب برای تحلیل استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود روند و همبستگی سری در داده‌ها از فرآیند تجدید شونده (روش آمار کلاسیک) برای تحلیل استفاده می‌شود.



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

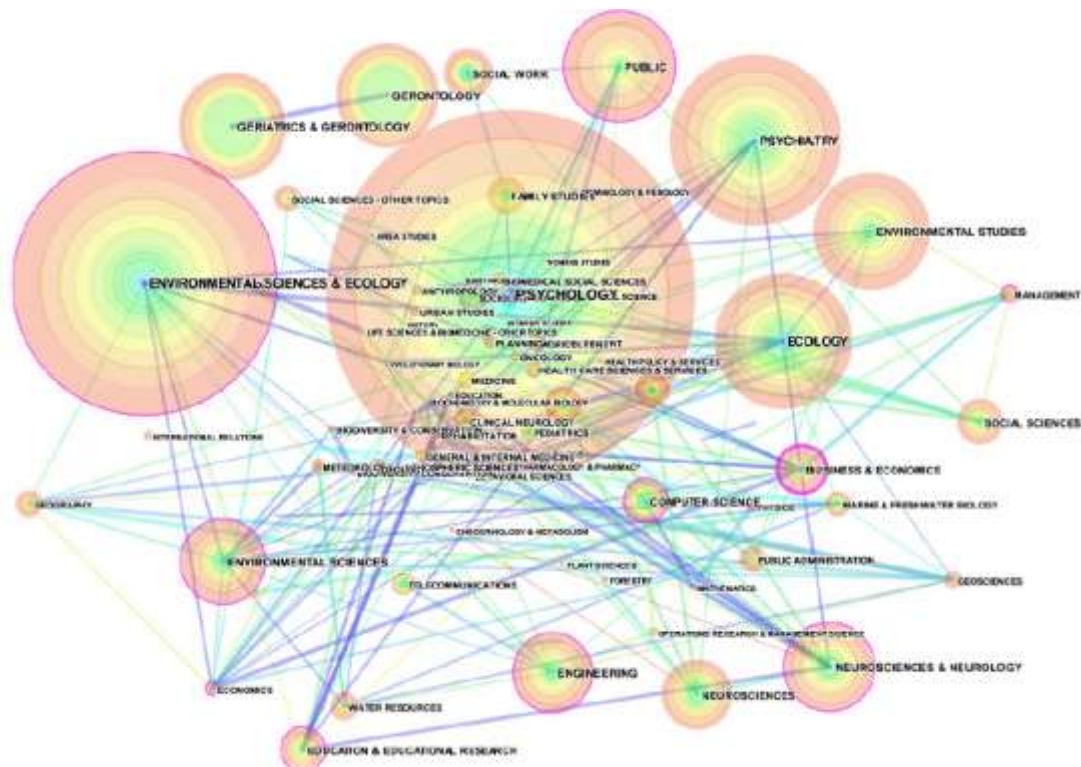
### ۳-۱- مقدمه

واژه تاب‌آوری به بازیابی عملیات سیستم بعد از وقوع خرابی نگاهی ویژه دارد از این رو مورد توجه بسیاری از دانشمندان حوزه مهندسی قرار گرفته است. اما این اصطلاح در حوزه مهندسی نسبت به سایر حوزه‌ها از تازگی بیشتری برخوردار است. در این فصل تاریخچه‌ای مختصر از تاب‌آوری و تعداد مقالات منتشر شده در حوزه‌های مختلف آن بیان می‌شود و به مرور برخی از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

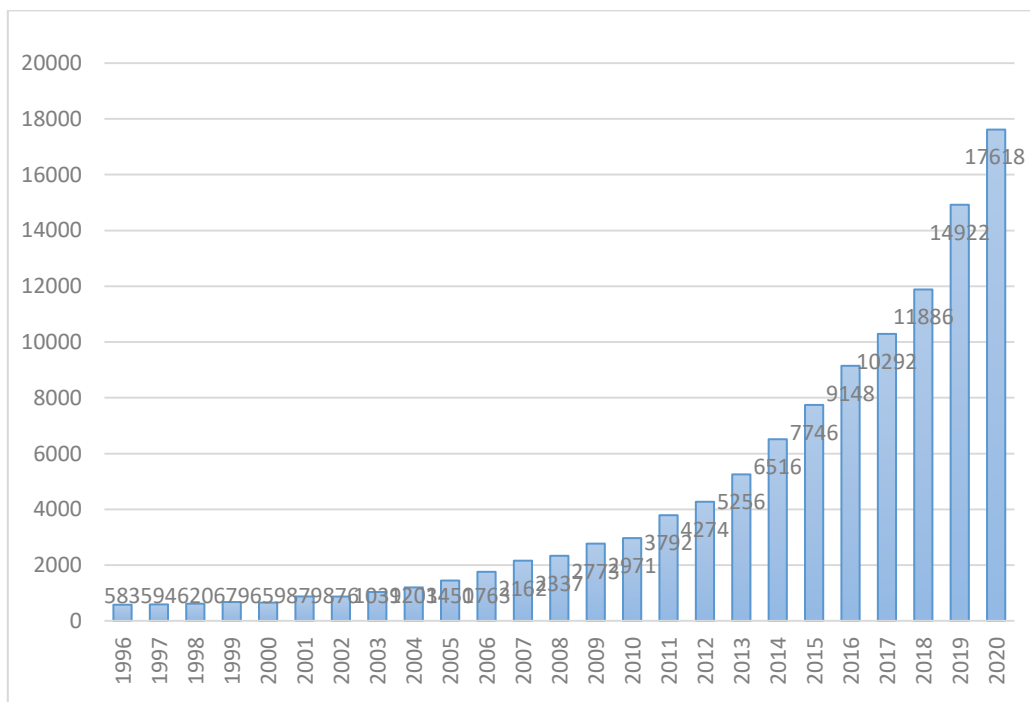
### ۳-۲- تاریخچه تاب‌آوری

در شکل ۳-۱ استفاده از تاب‌آوری در هر رشته توسط یک خوشه نشان داده شده است. این شکل مربوط به مقالات سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ است. بزرگترین خوشه به حوزه روانشناسی اختصاص یافته است و پس از آن حوزه محیط زیست، اجتماعی و اکولوژی قرار دارد. اندازه خوشه یک رشته مربوط به تعداد مقالات منتشر شده در آن رشته است. در همین حال، بخش کمتری از تحقیقات مرتبط با تاب‌آوری در حوزه مهندسی وجود دارد، و این نشان می‌دهد که گام‌های بیشتری در تعریف و تعیین تاب‌آوری در زمینه‌های غیر مهندسی در تاریخ انجام شده است. به این ترتیب، فرصت‌هایی در تأثیرپذیری از تاب‌آوری در حوزه مهندسی (به عنوان مثال، طراحی مهندسی) وجود دارد [۳].

در شکل ۳-۲ تعداد مقالات منتشر شده در زمینه تاب‌آوری از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۲۰ نشان داده شده است. این نمودار از طریق جست و جو کلمه کلیدی تاب‌آوری در سایت science direct به دست آمده است. همانطور که نشان داده شده تعداد مقالات در زمینه تاب‌آوری در سال‌های اخیر به دلیل گسترش مفهوم تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف و نقش کاهنده‌ی آن در ریسک‌های ناشی از وقوع آشفستگی و خرابی در سیستم‌ها، همواره رو به افزایش بوده است.



شکل ۱-۳- خوشه‌بندی تاب‌آوری بر اساس رشته [۵۱]



شکل ۲-۳- تعداد مقالات منتشر شده تاب‌آوری در سال‌های مختلف

### ۳-۳- تحقیقات صورت گرفته در حوزه تاب‌آوری

برونثو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۳ در مطالعه‌ای یک چارچوب مفهومی برای تعریف تاب‌آوری لرزه‌ای جوامع و مقیاس کمی از تاب‌آوری ارائه کردند. این چارچوب متکی بر اقدامات مکمل تاب‌آوری شامل کاهش احتمال شکست، کاهش عواقب ناشی از شکست‌ها و کاهش زمان بازیابی است [۲۱].

اوروین و واردل<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۴ شاخصی را ارائه کردند که یک ارتباط کمی از اندازه‌گیری مقاومت و تاب‌آوری در برابر یک پاسخ متغیر در همه‌ی سناریوهای ممکن را ارائه می‌دهد و تفسیر آن نیز راحت است. آن‌ها شاخص خود را با شاخص‌های پایداری منتشر شده قبلی مقایسه کردند و عملکرد آن را با استفاده از یک مجموعه داده واقعی تست کردند. این شاخص با دقت پاسخ خواص خاک (به عنوان مثال زیست توده میکروبی خاک) به یک اختلال را نشان می‌دهد و اینکه قادر به تعیین تفاوت در پایداری بین خاک‌های متضاد است [۵۲].

آش و نیوس<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۶ با توجه به وابستگی شدید جامعه مدرن به شبکه‌های زیربنایی در مقیاس بزرگ و تأثیر آبخاری و دومینووار اختلالات بر سیستم‌ها، یک الگوریتم تکاملی برای تکامل شبکه‌های پیچیده که در برابر چنین اختلالات آبخاری تاب‌آوری دارند، ارائه کردند. آن‌ها این شبکه‌ها را برای موارد توپولوژیکی که منشأ چنین تاب‌آوری را توضیح می‌دهد، تجزیه و تحلیل کردند. تجزیه و تحلیل نشان داد که خوشه‌بندی، مدولار<sup>۴</sup> و طول مسیرهای طولانی همگی نقش مهمی در طراحی زیرساخت‌های مقیاس بزرگ دارند [۵۳].

کاتر<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ در پژوهش خود به ارائه ارتباط بین آسیب‌پذیری و تاب‌آوری که تابعی از رویدادهای تجربه شده است و به مشکلات دنیای واقعی در جوامع محلی پرداختند. آن‌ها مدل تاب‌آوری

---

<sup>۱</sup> . Bruneau

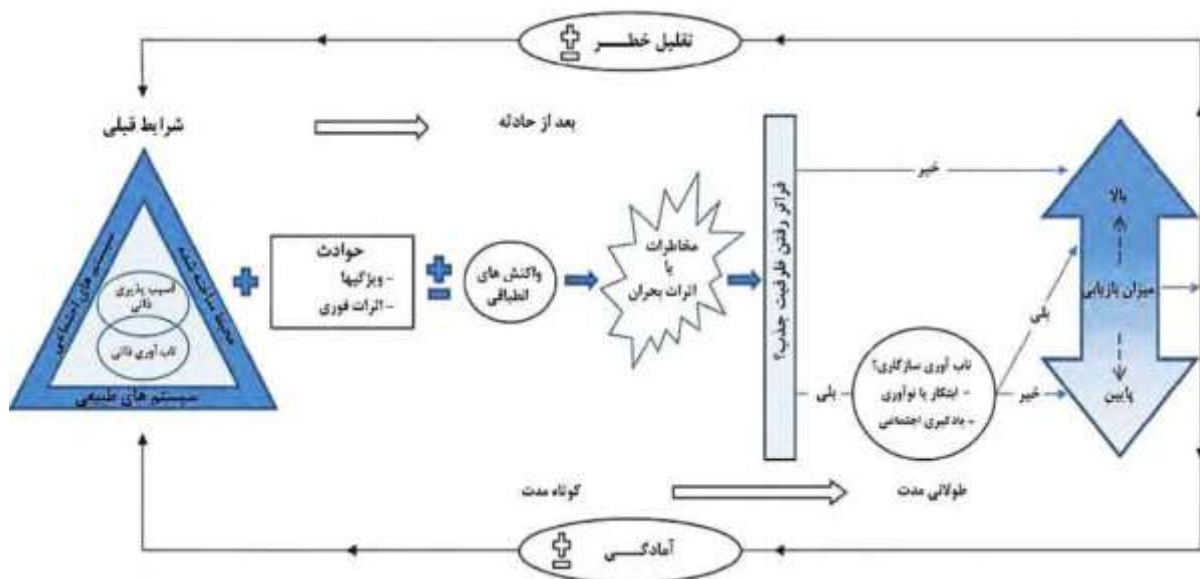
<sup>۲</sup> . Orwin & Wardle

<sup>۳</sup> . Ash & Newth

<sup>۴</sup> . Modularity

<sup>۵</sup> . Cutter

بحران مکان محور (DROP)<sup>۱</sup> (شکل ۳-۳) را برای ارزیابی تاب‌آوری در سطح جامعه در برابر رویدادهای طبیعی معرفی کرده‌اند. این مدل بر تاب‌آوری اجتماعی بیش از تاب‌آوری زیست‌محیطی تأکید دارد. نقطه شروع این مدل با بررسی سابقه رویداد است و سپس با بررسی آستانه جذب جامعه قدرت بازیابی را تعیین می‌کند. آن‌ها آستانه جذب جامعه را متأثر از دو عامل شدت رویداد و پاسخ‌های مقابله‌ای مؤثر نسبت به رویدادها می‌دانند و در نهایت اگر جامعه تاب‌آور باشد کاهش خطر و آمادگی برای رویدادهای بعدی وجود خواهد داشت [۵۴].



شکل ۳-۳ طرح کلی مدل تاب‌آوری مکان محور [۵۴]

ویتسون و مارکز<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ مفهوم تاب‌آوری را به عنوان یک اقدام مهم برای مؤثر بودن قابلیت اطمینان شبکه تعریف کردند. اگرچه، تاب‌آوری به طور گسترده در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در کار آن‌ها جنبه‌های خاص تاب‌آوری شبکه قابل اندازه‌گیری هنگامی که شبکه در حال تجربه خرابی‌های فاجعه آمیز بالقوه از وقایع خارجی و یا تاثیرات آن است، مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها یک تعریف رسمی برای تاب‌آوری و یک رویکرد گام به گام بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه آن ارائه کردند. نتایج به دست آمده برای شبکه‌های آزمایشی نشان می‌دهد که این مفهوم کمی قابل اندازه‌گیری

<sup>۱</sup> . Disaster Resilience of Place

<sup>۲</sup> . Whitson & Marquez

جدید از تاب‌آوری بینش عملکرد و توپولوژی شبکه را فراهم می‌کند [۲۳].

کاهان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ طبق برنامه‌های ارائه شده از وزارت امنیت ملی دولت وقت ایالات متحده آمریکا با هدف ایمن سازی هرچه بیشتر جامعه چهارچوبی عملیاتی از سه هدف مقاومت، جذب و ترمیم برای تاب‌آوری ارائه کردند [۵۵].

وانگ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ معیاری برای تاب‌آوری در زمینه سیستم‌های اطلاعات سازمانی یا سیستم‌های خدماتی ارائه کردند. معیار پیشنهادی برای تاب‌آوری بر مبنای توانایی بازیابی سیستم است که از رویکردهای موجود در ادبیات فاصله گرفته و کمک منحصر به فردی ارائه می‌دهد. به طور خاص آن‌ها از حداکثر توانایی بازیابی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری استفاده کردند. محدودیت این تحقیق این است که فقط توزیع مجدد منابع را برای راه حل‌های مختلف بازیابی در نظر می‌گیرد [۵۶].

زوبل<sup>۳</sup> 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 گسترش داد. این امر امکان پشتیبانی بهتر از برنامه‌ریزی و کاهش بحران استراتژیک را فراهم کرد [۵۷].

استر بنز<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ تاب‌آوری شبکه اینترنت را با استفاده از فنون تحلیلی و شبیه‌سازی با هدف بهبود قابلیت بقا شبکه اینترنت بررسی کردند [۵۸].

کاروالهو<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۱ مشخصه‌های تاب‌آوری سیستم مدیریت ترافیک هوایی را مورد بررسی قرار داد [۵۹]. کوکس<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ معیارهای عملیاتی برای تعیین تاب‌آوری سیستم حمل و نقل مسافر در

---

<sup>۱</sup> . Kahan

<sup>۲</sup> . Wang

<sup>۳</sup> . Zobel

<sup>۴</sup> . Sterbenz

<sup>۵</sup> . Carvalho

<sup>۶</sup> . Cox



برابر تروریسم ارائه کردند. معیارها از موارد خاص به تعداد سفرها تا اقدامات جامع تر که شامل سهم این سفرها به طور مستقیم و غیرمستقیم در فعالیت های اقتصادی است، متغیر است. آن‌ها همچنین چارچوبی را برای ارزیابی ریسک حمل و نقل، از جمله نقش مهم آگاهی در تقویت بالقوه این خطرات فراهم کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ۷۶/۹ درصد از کل کاهش سفر در حالت های حمله شده نتیجه "عامل ترس" است، بر خلاف کاهش ظرفیت [۶۰].

کافل<sup>۱</sup> 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 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 [۶۱].

اویانگ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک چارچوب چند مرحله‌ای جدید برای تحلیل تاب‌آوری زیرساخت 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

---

<sup>۱</sup> . Kafle

<sup>۲</sup> . Ouyang

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 [۶۲].

تاسانکوک<sup>۱</sup> 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 است [۶۳].

لی و ژی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۴ در مطالعه‌ای اقدامات زیر را انجام دادند:

- ❖ تعریف تاب‌آوری مهندسی بر اساس مفاهیم مختلف تاب‌آوری در زمینه‌های مختلف.
- ❖ پیشنهاد توانایی بازیابی مهندسی به عنوان یک مؤلفه جدید در چارچوب طراحی سیستم‌های تاب‌آور مهندسی.
- ❖ 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 [۶۴].

وودز<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۵ رویکردهای فنی متفاوتی را برای این سؤال که تاب‌آوری چیست و مهندسی آن در

---

<sup>۱</sup> . Tasan- Kok

<sup>۲</sup> . Li & Xi

<sup>۳</sup> . Woods

سیستم‌های پیچیده سازگار چگونه است، سازماندهی کرد. وی گروه‌های مختلفی از استفاده‌های مختلف از برچسب تاب‌آوری را حول ۴ مفهوم پایه دسته‌بندی کرد:

- ❖ مقاومت در برابر آسیب و بازگشت به تعادل.
- ❖ تاب‌آوری به عنوان یک مترادف تنومندی.
- ❖ تاب‌آوری به عنوان نقطه مقابل تردی ( شکنندگی) یعنی توانایی گسترش شکر ف هنگام چالش‌های مرزی غیرمنتظره.
- ❖ تاب‌آوری به عنوان معمارهای شبکه که می‌تواند با تحول شرایط، سازگاری با حوادث آینده را حفظ کند [۶۵].

هانگ و ژانگ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۶ یک مدل مفصل برای ارزیابی تاب‌آوری تونل سپردار با مطالعه بر یکی از تونل‌های مترو شانگهای ارائه کردند. همگرایی افقی تونل به عنوان شاخص عملکردی انتخاب و شاخص تاب‌آوری توسط نسبت انتقال تابع انتقال عملکرد به انتقال تابع عملکرد طبیعی تعریف شد. ۷۰ تا ۸۰ درصد عملکرد طبیعی به دلیل بار اضافه مختل شده، اما فقط ۱ درصد آن توسط تخلیه بار اضافی در ۹ روز و ۱۲/۴ درصد آن بعد از ۴ سال توسط دوغاب خاک در ۳۸ روز بازیابی شد. این مقادیر یک شاخص تاب‌آوری بین ۰/۲۸ تا ۰/۴۵ را ایجاد می‌کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تاب‌آوری تونل‌های سپردار به دلیل بار اضافی بیش از حد و مدت زمان طولانی بین اقدامات بازیابی کاهش می‌یابد. اگر مدت زمان بازیابی کوتاه شود، می‌توان مقدار شاخص تاب‌آوری را به طور متوسط ۷۳ درصد افزایش داد [۶۶].

حسینی<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقاله‌ای تحت عنوان "تعریف و اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم‌ها" ارائه دادند. هدف از این پژوهش تعریف، طبقه‌بندی و بررسی میزان محدودیت تاب‌آوری در سیستم‌های مختلف به خصوص سیستم‌های مهندسی بود. در این مطالعه تعریف تاب‌آوری در چهار حوزه سازمانی، اجتماعی،

---

<sup>۱</sup> . Huang & Zhang

<sup>۲</sup> . Hosseini

اقتصادی و مهندسی رده‌بندی شده است و چندین تعریف پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بسیاری از تعریف‌ها در داشتن عواملی مثل تنومندی، تحمل خطا، انعطاف‌پذیری، بقا و چابکی نسبت به سایر عوامل به یکدیگر شباهت دارند [۳].

اوروتی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ چهار مفهوم پایداری، تنومندی، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری را مرور کردند زیرا به دلیل عدم وجود مرزهای مشخص بین آنها، تشخیص آنها دشوار است. آنها نقش این مفاهیم در پرداختن به مسائل زراعی را روشن کردند. یافته‌های آنها به شرح زیر است:

❖ سیستم‌های کشاورزی با انواع مختلفی از آشفتگی‌ها روبرو هستند، از آشفتگی‌های کوچک و معمولی گرفته تا تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی.

❖ پایداری، تنومندی، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری به طور فزاینده‌ای برای تجزیه و تحلیل زمینه کشاورزی به منظور پیش‌بینی پاسخ سیستم در شرایط تغییر استفاده شده است.

❖ چهار مفهوم با ماهیت اجزای سیستم و نوع آشفتگی مورد بررسی متمایز می‌شوند.

❖ روش‌های ارزیابی باید در شرایط متضاد آزمایش شوند.

❖ گزینه‌های اصلی امکان‌سازگاری سیستم تحت تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی، افزایش تنوع و افزایش ظرفیت تطبیقی است [۶۷].

ماکوزیک<sup>۲</sup> 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)<sup>۳</sup> هستند. برای

---

<sup>۱</sup>. Urruty

<sup>۲</sup>. Macuzic

<sup>۳</sup>. Triangular Fuzzy Numbers

تعیین وزن نسبی متغیرهای موجود، از فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی فازی (FAHP)<sup>۱</sup> 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 تأمین‌کننده 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 [۶۸].

وانگ<sup>۲</sup> 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 [۶۹].

بوستیک<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ انگیزه‌های اقتصادی را برای اجرای ارزیابی و مدیریت تاب‌آوری در جوامع آسیب‌دیده 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 [۷۰].

بارود و بارکر<sup>۴</sup> 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 [۷۱].

جفری<sup>۵</sup> 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

---

<sup>۱</sup> . Fuzzy Analytic Hierarchy Process

<sup>۲</sup> . Wang

<sup>۳</sup> . Bostick

<sup>۴</sup> . Baroud & Barker

<sup>۵</sup> . Jufri

شبکه ارائه شده است. در مرحله بعد، چندین روش ارزیابی تاب‌آوری تابشی شبکه و برخی از شاخص‌های کمی را توصیف می‌کند. سرانجام، پیاده‌سازی استراتژی‌های مختلف ارتقاء شبکه مورد بحث قرار گرفته است [۷۲].

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 آسیب‌پذیری 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 [۷۳].

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، 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  $83/1$  درصد است و این مقدار بعد از گذشت  $10$  ساعت به  $37/1$  درصد کاهش می‌یابد [۵].

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

با در نظر گرفتن نرخ پایین و نرخ بالای خرابی کامیون‌ها در نظر گرفته شدند. برای حل مدل از نرم‌افزار بهینه‌ساز CPLEX استفاده شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که قابلیت دسترسی اثر قابل توجهی در نرخ تردد کامیون‌ها و دستیابی به ظرفیت تولید ناوگان کامیون‌ها در مسیرهای مختلف دارد؛ به طوری که میزان تولید از دست رفته به سبب خرابی و عدم دسترسی کامیون‌ها در حالت معمولی و بدبینانه به ترتیب برابر  $3572/14$  و  $5967/72$  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 [۷۴].

صابر معاش و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی تأثیر تاب‌آوری سازمانی بر عملکرد سازمانی در مجتمع سنگ آهن سنگان پرداختند. این تحقیق بر حسب هدف، کاربردی و بر حسب شیوه گردآوری داده‌ها، توصیفی از نوع همبستگی می‌باشد که پرسشنامه‌های تحقیق در بین کارکنان مجتمع سنگ آهن سنگان که به صورت تصادفی انتخاب گردیدند، توزیع شد و تعداد ۱۶۰ پرسشنامه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش‌های آمار توصیفی و استنباطی استفاده شد. در قسمت آزمون فرضیات تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار آموس ابتدا از نرمال بودن داده‌ها اطمینان حاصل گردید و سپس با استفاده از آزمون‌های آماری و معادلات ساختاری، داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ضریب مسیر بین تاب‌آوری سازمانی و عملکرد سازمانی به میزان  $0/84$  و P-Value برابر صفر برآورد شد که نشان می‌دهد تاب‌آوری سازمانی بر عملکرد سازمانی تأثیر مثبتی دارد. به عبارت دیگر سازمان‌های تاب‌آور دارای عملکرد سازمانی بهتری می‌باشند. همچنین، مؤلفه‌های تاب‌آوری سازمانی شامل مدیریت نقاط آسیب‌پذیر، آگاهی از وضعیت و ظرفیت انطباق نیز به ترتیب به میزان  $0/62$  و  $0/71$  و  $0/58$  بر عملکرد سازمانی تأثیر مثبتی دارند [۷۵].

لطفی و تخم‌چی در سال ۱۳۹۸ به بررسی مفهوم تاب‌آوری و اعمال آن در راستای افزایش عملکرد دو دستگاه سیلاب‌زنی مغزه و اسیدزنی مغزه آزمایشگاه سنگ و سیال پرداختند. با توجه به مفهوم تاب‌آوری در سیستم،

چهار بخش شریانی هر یک از این دستگاه‌ها شناسایی شد. با مدیریت هوشمندانه کاستی‌های غیرقابل کنترل همانند تحریم‌های اقتصادی و به دنبال آن به تعویق افتادن مسائل فنی لازم در خصوص هر یک از دستگاه‌ها، عملکرد هر یک از آن‌ها در مقایسه با دوره مشابه سال گذشته افزایش قابل توجهی داشته است. ضمن اینکه تمامی موارد بدون تحمیل هیچگونه هزینه‌ای و به صورت فنی مهندسی انجام گرفته است [۷۶].

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 [۷۷].

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

### ۳-۴- جمع بندی

در این فصل مروری بر کارهای انجام شده در زمینه تاب‌آوری صورت گرفت. تعداد مقالات منتشر شده در زمینه تاب‌آوری نشان از افزایش مطالعات در این زمینه در سال‌های اخیر دارد به طوری که تعداد مقالات از ۵۸۳ در سال ۱۹۹۶ به ۱۷۶۱۸ در سال ۲۰۲۰ رسیده است. در این بین حوزه روانشناسی بیشترین تعداد مقالات را به خود اختصاص داده است و پس از آن حوزه محیط زیست، اجتماعی و اکولوژی قرار دارد.



## ۴- فصل چهارم: مطالعه موردی و تهیه پایگاه داده

## ۴-۱- مقدمه

عملیات حمل و انتقال مواد حفاری شده داخل تونل توسط ماشین TBM، از جمله عملیات مهم حفر تونل است که به صورت پیوسته در حال انجام است. این انتقال به روش‌های مختلفی از جمله انتقال از طرق راه‌آهن و انتقال از طریق نوار نقاله صورت می‌گیرد. در شهر تبریز نیز به دلیل وسعت و افزایش جمعیت در سال‌های اخیر نیاز به حمل و نقل ریلی و مترو بیش از پیش حس می‌شود. شهر تبریز دارای ۵ خط مترو می‌باشد که خط دو آن توسط دستگاه EPB-TBM حفر می‌شود و سیستم انتقال مواد به خارج از تونل نوار نقاله است. در این فصل علاوه بر معرفی تونل مترو خط دو تبریز، به معرفی اجمالی سیستم نوار نقاله پرداخته شده و پایگاه داده شامل داده‌های خرابی و تعمیر هر زیر سیستم تهیه شده است.

## ۴-۲- پیشینه مطالعات و اجرای طرح سازمان قطار شهری تبریز

تبریز یکی از شهرهای بزرگ ایران و مرکز استان آذربایجان شرقی است. این شهر بزرگ‌ترین شهر منطقه شمال غرب کشور بوده و قطب اداری، ارتباطی، بازرگانی، سیاسی، صنعتی، فرهنگی و نظامی این منطقه شناخته می‌شود. تبریز به دلیل جای دادن بسیاری از کارخانه‌های مادر و بزرگ صنعتی در خود و نیز وجود بیش از ۶۰۰ شرکت قطعه ساز در آن، دومین شهر آلوده و نیز دومین شهر صنعتی در ایران پس از تهران به شمار رفته و به دلیل صنعتی بودن، یکی از مهم‌ترین شهرهای مهاجرپذیر کشور محسوب می‌شود. همچنین این شهر رتبه دوم برج‌سازی را در بین شهرهای ایران دارد. شهر تبریز، به دلیل جذب سرمایه‌های کلان بخش خصوصی، به عنوان مهد سرمایه‌گذاری ایران شناخته می‌شود؛ آنچنان که به مدت پنج سال متوالی، دارنده رتبه نخست جذب سرمایه در بین شهرهای ایران است [۷۸].

با توجه به حجم و سبب مسافرت‌های درون شهری تبریز و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات ترافیکی این شهر، برای اولین بار در دی ماه ۱۳۶۹، موضوع مطالعه و احداث قطار شهری در مجلس شورای اسلامی مطرح شد ولی با مسکوت ماندن موضوع، بالأخره سازمان قطار شهری تبریز

در سال ۱۳۷۹ تأسیس و مطالعات امکان‌سنجی خطوط قطار شهری تبریز در اواخر سال ۱۳۸۰ آغاز گردید. در جلسه بیست و نهم شورای عالی ترافیک شهرهای کشور، احداث خط یک قطار شهری تبریز به تصویب رسید و عملیات اجرایی آن در سال ۱۳۸۱ آغاز شد. در جلسه شصت و پنجم شورای عالی ترافیک، در دی ماه ۱۳۸۵ احداث سایر خطوط درون شهری تبریز و خط حومه‌ای تبریز - سهند به تصویب رسید که شامل ۴ مسیر به طول ۷۰ کیلومتر با ۷۰ ایستگاه و یک خط برون شهری از تبریز به شهرک سهند به طول حدود ۲۰ کیلومتر است [۷۸].

### ۴-۳- مشخصات خطوط مصوب قطار شهری تبریز

مشخصات خطوط قطار شهری تبریز به شرح زیر می‌باشد [۷۸]:

خط یک: به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گولی آغاز و از طریق بلوار شهید باکری و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، میدان کهن (محققی سابق)، باغ گلستان (قونقا) و خیابان خیام به کوی لاله ختم می‌شود. حدود ۸ کیلومتر از مسیر به صورت تونل عمیق طراحی شده و با دو دستگاه حفار TBM در عمق حدود ۱۴ الی ۲۵ متری کف تونل، حفاری آن در سال ۱۳۹۳ به اتمام رسیده است. فاز نخست این خط از ایستگاه ائل‌گولی تا ایستگاه استاد شهریار در شهریور ۱۳۹۴، فاز دوم از ایستگاه استاد شهریار تا ایستگاه میدان ساعت با یک ایستگاه عبوری در میدان قطب در سال ۱۳۹۵ به بهره‌برداری رسید. در پاییز ۱۳۹۸، ریل‌گذاری کل خط یک تا پایان لاله به اتمام رسید و پس از سال‌ها انتظار، سوت قطار در ایستگاه پایانی خط یک به صدا درآمد. همزمان با قیام تاریخی ۲۹ بهمن مردم تبریز، در بهمن ماه ۱۳۹۸، فاز سوم خط یک نیز با چند ایستگاه عبوری از ایستگاه میدان کهن تا ایستگاه نور در شهرک نور لاله به بهره‌برداری رسید.

خط دو: به طول حدود ۲۲/۴ کیلومتر، در حال حاضر طولانی‌ترین مسیر از شبکه ریلی کلان‌شهر تبریز است. این خط، شامل ۲۰ ایستگاه است که از محدوده زمین‌های قراملک تبریز (کارخانه کود آلی) شروع شده، از طریق خیابان وحدت و میدان قراملک (اولین ایستگاه) و پس از عبور از زیر خیابان آخونی، خیابان قدس، در ایستگاه میدان کهن (محققی سابق) دارای ایستگاه تبادلی با خط یک بوده و از طریق میدان دانشسرا، وارد

خیابان عباسی شده و ضمن عبور از میدان شهید فهمیده باغ‌میشه به سمت شهرک نصر، مرزداران، دانشگاه آزاد، نمایشگاه بین‌المللی و نهایتاً در میدان بسیج خاتمه می‌یابد. در طرح توسعه این خط، گذر از منطقه خاوران و اتصال به ایستگاه راه‌آهن تبریز - میانه در نظر گرفته شده است.

خط سه: با امتداد شمالی و جنوبی و به طول ۸/۹ کیلومتر و شامل ۱۱ ایستگاه از پایانه بزرگ اتوبوس‌های بین شهری تبریز جنب بزرگراه شهید کسائی آغاز و با عبور از خیابان مشروطه، خیابان شریعتی، در منطقه میار میار با خطوط یک، دو و خط پنج دارای ایستگاه تبادلی بوده و پس از عبور هسته مرکزی و بازار تاریخی شهر به طرف مراکز پرتراکم جمعیتی در خیابان انقلاب و شهرک ارم امتداد پیدا کرده و با عبور از جنب بیمارستان عالی نسب به شهرک رضوانشهر منتهی می‌شود.

خط چهار: به صورت لوپ به طول ۴/۱۵ کیلومتر، شامل ۲۱ ایستگاه از میدان آذربایجان آغاز و پس از عبور از میدان جهاد (نصف راه)، در مسیر آزادی (کمربندی) از چهارراه آبرسان و بیلانکوه و چهارراه عباسی عبور کرده و به انتهای خیابان شهید رجایی جنب اتوبان پاسداران ختم می‌شود. از ویژگی‌های منحصر به فرد این خط، طراحی آن به صورت لوپ بوده و حلقه اتصالی بین تمامی خطوط ریلی مترو تبریز است. در طرح توسعه خط سه و چهار، اتصال این خطوط به فرودگاه بین‌المللی شهید مدنی تبریز به طول شش کیلومتر در نظر گرفته شده است.

خط پنج: این خط تراموایی در اصل توسعه خط یک تلقی می‌شود که هدف از طراحی و اجرای آن، احیای پیشینه تاریخی قونقا به راه آهن است. این خط با ۱/۵ کیلومتر شامل یازده ایستگاه، از راه آهن تبریز آغاز شده و با عبور چهارراه خطیب، نصف راه (جهاد)، تا باغ فجر (گلستان) جایگاه تاریخی قونقا امتداد می‌یابد و دارای ایستگاه تبادلی با ایستگاه ۱۳ (قونقا) خط یک است. این خط نهایتاً با عبور از منطقه اهراب، در مجاورت ارک علیشاه (چهارراه شریعتی) پایان می‌یابد.

خط برون شهری تبریز - سهند نیز در محل ایستگاه ۱۷ (شهید باکری) با خط یک دارای ایستگاه مشترک بوده و با عبور از مقابل کارخانه تراکتور سازی به سمت شهر جدید سهند ادامه خواهد یافت.

شکل ۴-۱ نقشه جامع قطار شهری تبریز را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- نقشه خطوط مترو تبریز [۷۸]

#### ۴-۴- زمین‌شناسی منطقه

با وجود تنوع پدیده‌های زمین‌شناسی در آذربایجان، شهر تبریز از لحاظ زمین‌شناسی دارای گستردگی زمانی زیادی نیست و سازندهای تشکیل دهنده شهر اغلب از دوران کرتاسه به بعد هستند. شهر تبریز در زون البرز قرار گرفته است و از رژیم تکتونیکی حاکم بر آن پیروی می‌کند. تشکیل دشت تبریز و رسوبگذاری در آن و ایجاد ساخت‌های تکتونیکی که اغلب به صورت شکستگی‌ها و گسلش تظاهر پیدا کرده است، پیرو همین سیستم است. دشت تبریز از شمال بوسیله کوه‌های عون ابن علی و از جنوب بوسیله ارتفاعات آتشفشانی سهند و رسوبات پیروکلاستیک مربوط به سهند احاطه شده است. طی سالیان دراز زلزله‌های سهمگینی در ارتباط با فعالیت گسل شمال تبریز روی داده است که در فاصله ۵۰۰ متری خط ۲ قطار شهری قرار دارد. بر اساس بررسی‌های صحرائی و نتایج حفاری‌ها، زمین محدوده پروژه از لایه‌های شن و ماسه سیلت دار پوشیده شده که تا اعماق بیش از ۱۸ متر امتداد داشته و متراکم هستند. لایه‌های سطحی از جنس آبرفت

بوده و در ادامه به لایه های سنگی ضعیف برخورد می کند. این لایه های سنگی به صورت مارن، رس سنگ، سیلتستون، ماسه سنگ و کنگلومرا شناسایی شده است. لایه های مارنی، سنگ کف زمین شناسی منطقه را تشکیل می دهند [۷۹].

#### ۴-۵- خط دو مترو تبریز

عملیات حفاری خط ۲ از سال ۹۳ آغاز شده که برخلاف خط یک که بصورت دو تونله اجرا شد، این خط به صورت تک تونله که دارای قطر حفاری بزرگی است، اجرا می شود. این تونل توسط ماشین حفاری تونل فشار تعادلی با زمین (EPB) حفاری شده است. در این تونل میانگین زمان حفاری در هر شیفت ۴ ساعت بوده و به طور متوسط در هر شیفت ۴ رینگ حفاری و نصب می شود. شکل ۴-۲ دستگاه TBM خط ۲ قطار شهری تبریز را نشان می دهد. همچنین در جدول ۴-۱ مشخصات فنی ماشین حفاری تونل خط ۲ قطار شهری تبریز آورده شده است [۷۹].



شکل ۴-۲- دستگاه TBM خط دو مترو تبریز [۸۰]

جدول ۴-۱- مشخصات فنی دستگاه TBM مترو خط دو تبریز [۷۹]

مدل	EPB-TBM
طول TBM	۸۶ متر
وزن TBM	۹۷۵ تن
وزن پشتیبانی	۳۵۰ تن
طول پشتیبانی	۷۷ متر
طول سپر	۹ متر
وزن سپر	۶۲۵ تن
قطر سپر	۹/۴۹ متر
تعداد دیسک کاتر	۴ سینگل
	۲۰ دبل
تعداد باکت	۱۶ (ساده و قوس دار)
تعداد نایف	۱۷۴
قطر سگمنت	داخلی ۸/۴۸ متر
	خارجی ۹/۱۸ متر
ضخامت سگمنت	۳۵ سانتی متر
عرض سگمنت	۱۴۷ تا ۱۵۳ سانتی متر
سرعت	۳۰ سانتی متر در دقیقه
تعداد دور کله حفار	۱/۸ دور در دقیقه
نرخ نفوذ	۱۶ سانتی متر در دور
بازه نیروی تراست <sup>۱</sup> حفاری	۲۰۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰

#### ۴-۶- روش های مختلف حمل مصالح حفر شده در تونل ها

حمل مواد در تونل از جمله عملیات خدماتی است که در تمام مدت حفاری و احداث تونل انجام می گیرد. هر پروژه تونل سازی به یک سیستم حمل و نقل اصلی برای جابجایی پر سنل و مواد به داخل و خارج تونل نیاز دارد. این سیستم معمولاً جهت حمل مواد حفاری شده از سینه کار به بیرون از تونل نیز مورد استفاده قرار می گیرد. برای حمل مواد در تونل ها روش های مختلفی وجود دارد که در قسمتهای زیر به آنها اشاره خواهد شد [۷۹].

<sup>۱</sup>.Thrust

#### ۴-۶-۱- سیستم ترابری ریلی

در این روش، مجموعه‌ای از ترن‌ها مصالح حفاری شده را تخلیه و سیمان، پی گراول، سگمنت و کابل‌ها و لوله‌ها را جهت ادامه عملیات حفاری به داخل تونل حمل می‌کنند. در صورت استفاده از این نوع سیستم برای پروژه، امکان باربری مواد حفاری شده، انتقال قطعات پوشش نگهداری و سایر تجهیزات مورد نیاز، به همراه جابجایی افراد، به آسانی و به وسیله سیستم واحدی در هر دو جهت فراهم می‌گردد. از سیستم ترابری ریلی در بازه وسیعی از اندازه قطر تونل‌ها می‌توان استفاده کرد [۸۱]. شکل ۳-۴ سیستم ترابری ریلی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- سیستم ترابری ریلی [۸۱]

لوکوموتیو، واگن‌های حمل خاک، سگمنت، مواد و مصالح، تجهیزات و پرسنل اجزای اصلی سیستم ترابری ریلی می‌باشند. قدرت لوکوموتیو با توجه به وزن واگن‌های پر و خالی، شیب تونل و مشخصات ریل محاسبه می‌شود. در صورت استفاده از سیستم ترابری ریلی، باید از لوکوموتیو با توان موتور بالاتری جهت کشیدن واگن‌های پر از مصالح استفاده کرد و لذا آلودگی هوای داخل تونل بالاتر رفته و در نتیجه نیاز به تهویه افزایش خواهد یافت [۸۱].

#### ۴-۶-۲- سیستم ترابری نوار نقاله

استفاده از سیستم ترابری پیوسته نظیر نوارنقاله به سبب برخورداری از مزایایی نظیر قابلیت دسترسی به



فضای آزاد بیشتر، کاهش هزینه پرسنلی، افزایش ایمنی، افزایش میزان حفاری روزانه و غیره همواره مورد توجه بوده است [۸۱]. نوار نقاله نقش بسزایی را در توسعه روش‌های حمل و نقل دارند و در اغلب کارخانه‌ها می‌توان آنها را مشاهده کرد. امروزه نقاله‌ها ابزار بسیار مهمی بشمار آمده و بخش جداناپذیر مراحل مختلف تولید، استخراج، فرآوری، مونتاژ و... هستند. با استفاده از نقاله، کالاها و محصولات بصورت مکانیکی، مطمئن، پیوسته و در زمان مشخص منتقل می‌شوند و به دلیل اینکه فرآیند تولید هر محصول از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است و مواد اولیه آن باید مسافتی را بین ایستگاه‌های مختلف طی نماید و از قسمت‌های مختلف یک واحد تولیدی عبور کند تا پس از پردازش و انجام عملیات بر روی آن به محصول نهایی تبدیل شود، کاربرد نوارهای نقاله اهمیت پیدا می‌کند [۸۲].

نوار نقاله‌ها در انواع مختلف و برای کاربردهای مختلف طراحی می‌شوند؛ برخی از انواع آنها عبارتند از [۸۲]:

- ❖ نوار نقاله تسمه‌ای<sup>۱</sup>
- ❖ نوار نقاله پیاله‌ای<sup>۲</sup>
- ❖ نوار نقاله صفحه‌دار<sup>۳</sup>
- ❖ نوار نقاله بازویی<sup>۴</sup>
- ❖ نوار نقاله زنجیری<sup>۵</sup>
- ❖ نوار نقاله غلطکی<sup>۶</sup>
- ❖ نوار نقاله پیچشی<sup>۷</sup>

---

۱. Belt conveyor  
۲. Bucket conveyor  
۳. Slat belt conveyor  
۴. Drag conveyor  
۵. Chain conveyor  
۶. Roller conveyor  
۷. Screw conveyor

## ۴-۷- اجزای اصلی نوار نقاله

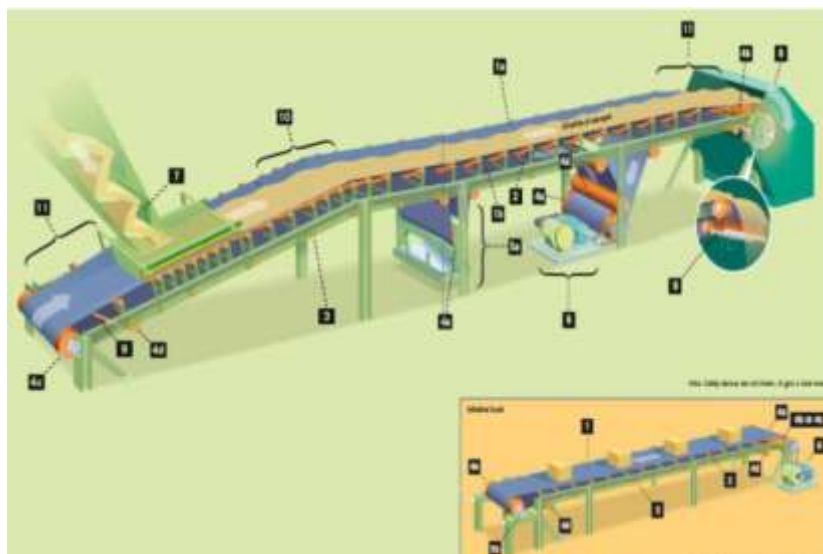
اجزای اصلی نوار نقاله شامل تسمه (شامل تسمه حمل بار و تسمه مسیر برگشت)، غلطک هرزگرد حمل بار (بالایی)، غلطک هرزگرد مسیر برگشت (پایینی)، غلطک یا توپی (شامل غلطک محرک، غلطک بالایی (انتهایی)، غلطک پایینی (ابتدایی)، غلطک snub و غلطک تنظیم کشش تسمه)، سیستم رگلاژ (شامل سیستم گرانشی، سیستم خود تنظیم یا تنظیم دستی)، سیستم باردهی، سیستم تخلیه، سیستم تمیز کردن تسمه و غلطک، منطقه انحنای تسمه و منطقه تغییر جهت تسمه هستند که در شکل ۴-۴ نمایان است [۸۲].

## ۴-۷-۱- تسمه نوار نقاله

دستگاه تسمه نقاله از اجزا و قطعات مختلفی تشکیل شده است. اما مهمترین بخش آن تسمه است. جنس تسمه‌ها با توجه به شرایط کاری متفاوت انتخاب می‌شود. این تسمه می‌تواند حتی از فلزات برای برخی کارهای خاص تولید شوند اما اغلب تسمه‌ها از جنس های لاستیکی تولید می‌شوند. تسمه‌های آج دار، استیل کرد، پی وی سی، پی وی جی و تسمه نقاله V شکل انواع گوناگونی از تسمه‌ها هستند [۸۳]. شکل ۴-۵ بخش‌های مختلف یک تسمه نقاله لاستیکی را نشان می‌دهد.

---

<sup>۱</sup>. Flexible roller conveyor



شکل ۴-۴- اجزای اصلی نوار نقاله [۸۲]



شکل ۴-۵- بخش‌های مختلف تسمه نقاله لاستیکی [۸۳]

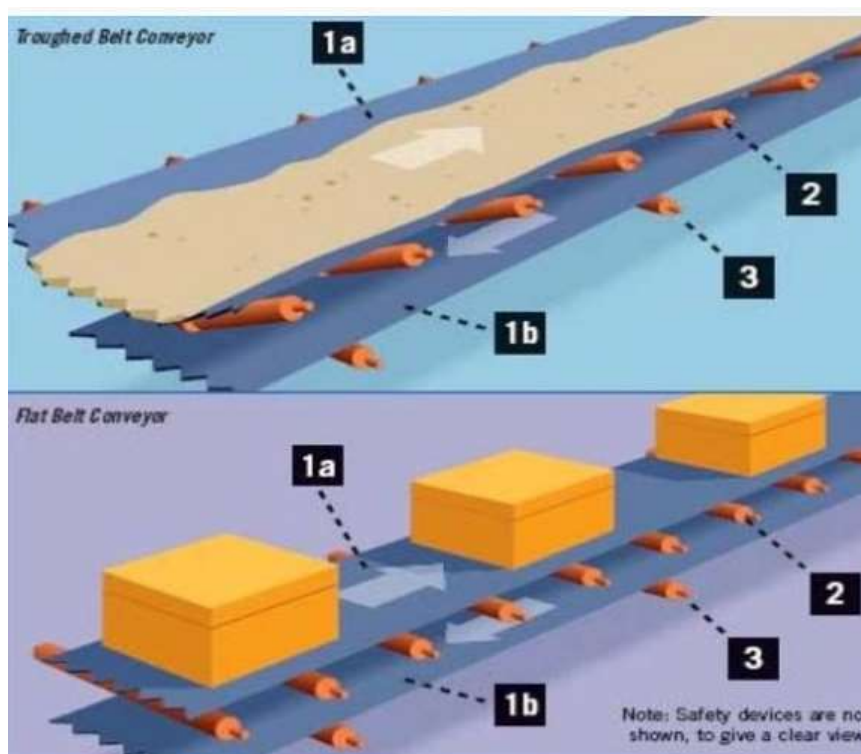
#### ۴-۷-۲- غلطک هرزگرد حمل بار

غلطک‌های هرزگرد حمل بار تکیه‌گاه تسمه هستند و به تسمه در جابه‌جا کردن بار کمک زیادی می‌کنند و توان لازم برای به حرکت در آمدن تسمه را کاهش می‌دهند. غلطک‌های حمل بار ممکن است کاهنده فشار، خود تنظیم از نظر راستا و یا از نظر تغییر وضعیت باشند و یا ممکن است قادر به تغییر شیب تسمه باشند

[۸۲]

#### ۴-۷-۳- غلطک هرزگرد مسیر برگشت

غلطک‌های هرزگرد مسیر برگشت تسمه تکیه‌گاه تسمه در مسیر برگشت هستند و توان لازم برای جابجایی تسمه را کاهش می‌دهند. برخی از غلطک‌های برگشت نیز ممکن است خود تنظیم از نظر راستا باشند و یا ممکن است قادر به تغییر شیب تسمه باشند [۸۲]. شکل ۴-۶ غلطک‌های هرزگرد نوار نقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶- غلطک‌های هرزگرد نوار نقاله [۸۲]

#### ۴-۷-۴- غلطک‌ها (تویی، درام)

غلطک‌ها تسمه را به حرکت در می‌آورند و یا مجددا جهت چرخش آنرا تغییر می‌دهند. انواع غلطک‌ها عبارتند از (شکل ۴-۷) [۸۲]:

غلطک محرک: تسمه را با نیرویی که از یک موتور می‌گیرد به حرکت در می‌آورد.

غلطک بالایی: تسمه را به مسیر برگشت هدایت می‌کند (همچنین ممکن است به عنوان یک غلطک محرک عمل کند).

غلطک پایینی: تسمه را به مسیر حمل بار هدایت می‌کند.

غلطک snub: راستای ورود و یا خروج تسمه را با مسیر برگشت پایینی آن تنظیم می‌کند و یا قوس مورد نیاز تماس تسمه با درام محرک را می‌سازد.

غلطک تنظیم کشش: کشش مناسب تسمه را توسط یک سیستم رگلاژ شیاری با بالا و پایین شدن در آن تنظیم می‌کند.



شکل ۴-۷-۴- طبلک نوار نقاله [۸۴]

#### ۴-۷-۵- سیستم‌های رگلاژ

سیستم‌های رگلاژ، کشش تسمه را در حد مناسب نگه می‌دارند. انواع این سیستم‌ها عبارتند از [۸۲]:

سیستم گرانشی: یک وزنه هادی برای تامین کشش مورد نیاز غلطک تنظیم کشش را می‌کشد.

سیستم خود تنظیم یا تنظیم دستی: توسط پیچ‌های تنظیم و یا سیستم‌های کنترل اتوماتیک کشش مورد نیاز تامین می‌شود.

#### ۴-۷-۶- قطعات متحرک سیستم انتقال نیرو

قطعات متحرک سیستم انتقال نیرو توان مورد نیاز را تولید و برای به حرکت درآوردن یا وارد کردن فشار به تسمه به غلطک محرک انتقال می‌دهند و انواع مختلفی دارند که عبارتند از: سیستم موتور با گیربکس ،

زنجیر و چرخ زنجیر، تسمه و پولی، کوپلینگ مستقیم. موتور و واحد کاهش سرعت ممکن است توسط سیستم چرخ زنجیر و تسمه به یکدیگر متصل شده باشند یا ممکن است بین موتور و شفت درام محرک از کوپلینگ استفاده شود [۸۲]. شکل ۴-۸ سیستم انتقال نیرو یک نوار نقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- سیستم انتقال نیرو نوار نقاله [۸۵]

#### ۴-۷-۷- سیستم‌های باردهی

سیستم باردهی (شکل ۴-۱۰) مکانیزم تغذیه بار بر روی تسمه را کنترل و هدایت می‌کند. سیستم‌های بسیاری برای این کار وجود دارد از جمله: قیف‌ها، ناودان‌ها (شوت‌ها)، باردهنده‌های اتوماتیک، هل دهنده‌های بار، و غیره. قیف‌ها معمولاً شامل بخش‌های زیر هستند [۸۲]:

قیف: هدایت، حمل و گاهی اوقات کنترل تغذیه بارهای فله را برعهده دارد.

دامنه ریزش بار: بار را در مرکز تسمه قرار می‌دهند یا بار را تغییرمسیر می‌دهند.

دیواره جانبی: برای جلوگیری از ریزش مواد فله سبک از روی نوار می‌شود.

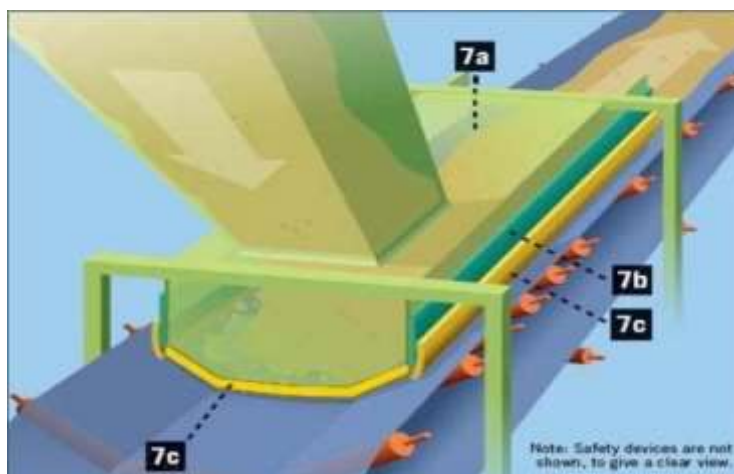
سیستم‌های ضربه گیر و تحمل فشار: صفحاتی که برای اطمینان از بیش از حد شکم نکردن تسمه در اثر وزن زیاد بار و جلوگیری از مسدود شدن و گیر کردن تسمه در زیر قیف تغذیه سیستم نوار نقاله قرار می‌گیرند.

دو نوع از سیستم‌های ضربه گیر بشقابی و هرزگرد، در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۹-۴- سیستم ضربه گیر: سمت راست بشقابی و سمت چپ هرزگرد [۸۲]

در سیستم‌های ضربه گیر بشقابی صفحات فلزی جایگزین هرزگردهای ضربه گیر در زیر مجرای تغذیه می شوند تا ضمن جذب ضربه مواد، درزگیری مناسبی برای جلوگیری از پخش شدن ذرات گرد و غبار مواد فله بارگیری شده در نوار ایجاد شود.



شکل ۱۰-۴- سیستم باردهی نوار نقاله [۸۲]

#### ۸-۷-۴- سیستم‌های تخلیه

سیستم‌های تخلیه، بار را برای خروج از سیستم نقاله هدایت می کنند. دستگاه‌های مختلفی ممکن است مورد استفاده قرار گیرند، از جمله ناودانها، اسلایدها، سیستم‌های خودکار، بیرون اندازها، بسته بندی کننده‌ها و غیره [۸۲].

#### ۴-۷-۹- سیستم‌های تمیز کردن تسمه و توپی

سیستم‌های تمیز کردن تسمه و توپی، مواد انباشته شده را از روی تسمه و توپی‌ها تمیز می‌کنند و غالباً لیسسه‌ها و برس‌ها بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. لیسسه‌ای که به درستی کار کند فواید زیر را در بر دارد [۸۲]:

❖ صرفه جویی در ساعات بسیاری که لازم است صرف تمیزکاری شود که در نتیجه آن بهره‌وری افزایش می‌یابد.

❖ کاهش احتمال آسیب دیدن تسمه در اثر چسبیدن و تجمع مواد در زیر آن.

❖ قرار نگرفتن کارگر در معرض خطرات.

#### ۴-۷-۱۰- منطقه انحنا (خمش)

منطقه انحنا منطقه‌ای از نوار نقاله است که در آن قسمت تسمه تحت تاثیر وزن خود در راستای عمودی خم می‌شود و اصطلاحاً شکم می‌کند [۸۲].

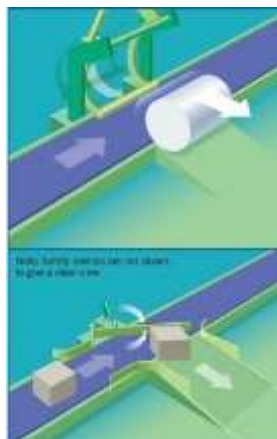
#### ۴-۷-۱۱- منطقه تغییر جهت حرکت تسمه (گذار)

منطقه تغییر جهت تسمه منطقه‌ای از نقاله است که در آن نیمرخ تسمه تغییر می‌کند و از حالت مقعر به حالت مسطح و بالعکس در می‌آید [۸۲].

#### ۴-۷-۱۲- مکانیزم تغییر جهت

مکانیسم‌های تغییر جهت (شکل ۴-۱۱)، جهت بار را تغییر می‌دهند. وسایل مختلفی ممکن است برای انجام این کار مورد استفاده قرار گیرند از جمله ضربه گیرها، هل دهنده‌ها، بیرون اندازها، و غیره [۸۲].





شکل ۴-۱۱- مکانیزم تغییر جهت نوا نقاله [۸۲]

#### ۴-۸- نوار نقاله خط دو مترو تبریز

به منظور حمل و نقل مصالح حفاری شده در تونل خط دو مترو تبریز از سه سیستم نوار نقاله که به صورت سری (پشت سر هم) قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. طول هر نوار نقاله ۷۷۶۱ متر و طول مجموع نوار نقاله‌ها ۲۳۲۸۳ متر است که این بدان معناست که مصالح حفاری شده توسط ماشین TBM، توسط نوارها از سینه کار حدود ۲۳ کیلومتر حمل می‌شوند. مشخصات فنی این نوارها در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات فنی نوار نقاله‌های تونل خط دو مترو تبریز [۷۹]

CB 1000 mm * 7761 m	مدل
1000 mm	عرض نوار
7761 m	طول نوار
6.94 m	ارتفاع حمل
900 T/h	ظرفیت حمل
3 m/s	سرعت نوار
3*110 kw	قدرت محرکه
2*110 kw	قدرت محرکه بوستر ۲۲۰
110 kw	قدرت محرکه بوستر ۲۳۰
2*110 kw	قدرت محرکه بوستر ۲۴۰
BS 1000*87	مدل ذخیره‌ساز
87 m	طول ذخیره‌ساز
500 m	ظرفیت ذخیره‌ساز
22 kw	قدرت محرکه وینچ
3600 kg	حداکثر نیروی کششی وینچ

## ۴-۹- تحلیل پارتو

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

## ۴-۱۰- تهیه پایگاه داده‌های خرابی و تعمیر نوار نقاله‌های تونل خط دو مترو

### تبریز

اولین و مهم‌ترین بخش انجام این پایان‌نامه تهیه یک پایگاه داده جامع، شامل کلیه اطلاعات خرابی‌ها، تعمیرات و تحویل‌های نوار نقاله‌های خط دو است. برای این منظور گزارش‌های عملیاتی نوار نقاله‌های تونل مترو خط دو تبریز اعم از گزارش‌های روزانه عملیات حفاری، گزارش‌های گروه تعمیر و نگهداری و گزارش اپراتور ماشین حفار از تاریخ ۹۴/۲/۱۷ تا ۹۵/۴/۲۴ جمع‌آوری شد و مورد مطالعه قرار گرفت. سپس این داده‌ها به ترتیب وقوع زمانی برای هر نوار نقاله به صورت جداگانه طبقه‌بندی شدند و TBF و TTR و TTD برای هر نوار نقاله محاسبه شد. لازم به ذکر است به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات انبارداری و تحویل برای محاسبه TTD، به کمک نظر کارشناسان و اساتید مجرب به صورت فرضی ۱۰ درصد از زمان‌های تعمیر (TTR) برای داده‌های تحویل (TTD) در نظر گرفته شد.

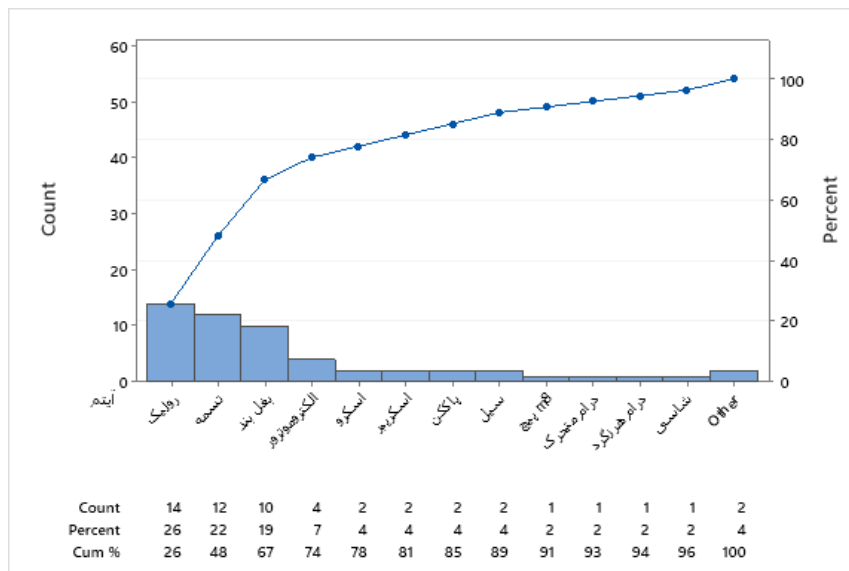
## ۴-۱۰-۱- نوار نقاله ۱

نوار نقاله ۱ خط دو مترو تبریز در محدوده مورد مطالعه تعداد ۵۴ خرابی و تعمیر را ثبت کرده است. شکل ۴-۱۲ تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۱ را نشان می‌دهد. مطابق این شکل آیتم رولیک نوار نقاله ۱ با تعداد ۱۴ خرابی (۲۶ درصد)، بیشترین میزان خرابی را دارا است. داده‌های مربوط به نوع خرابی و زمان‌های TBF و

TTR نوار نقاله ۱ در پیوست ۱ آورده شده است.

#### ۴-۱۰-۲- نوار نقاله ۲

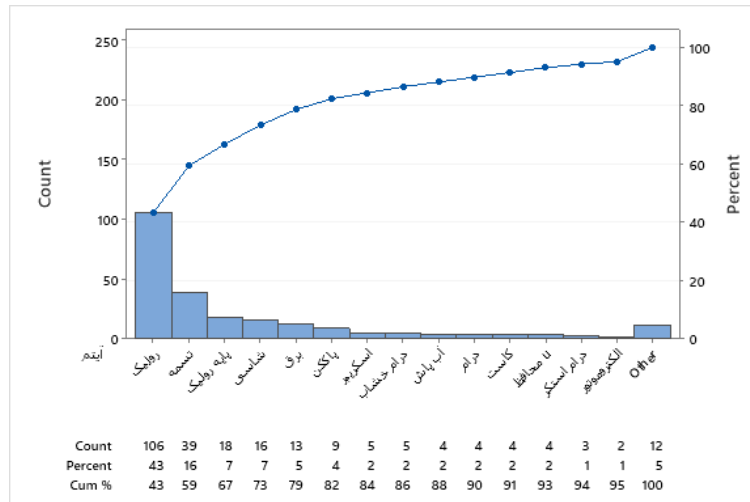
نوار نقاله ۲ تونل مترو تبریز با تعداد ۲۴۴ خرابی ثبت شده در محدوده مورد مطالعه بیشترین میزان خرابی را در بین سایر نوار نقاله‌ها دارا است. تحلیل پارتو انواع خرابی این نوار (شکل ۴-۱۳) نشان می‌دهد که همانند نوار نقاله ۱ برای این نوار هم آیتم رولیک با ۴۳ درصد بیشترین میزان خرابی را داراست. آیتم الکتروموتور در این نوار نقاله کمترین میزان خرابی را دارد. داده‌های مربوط به نوع خرابی و زمان‌های TBF و TTR نوار نقاله ۲ در پیوست ۲ آورده شده است.



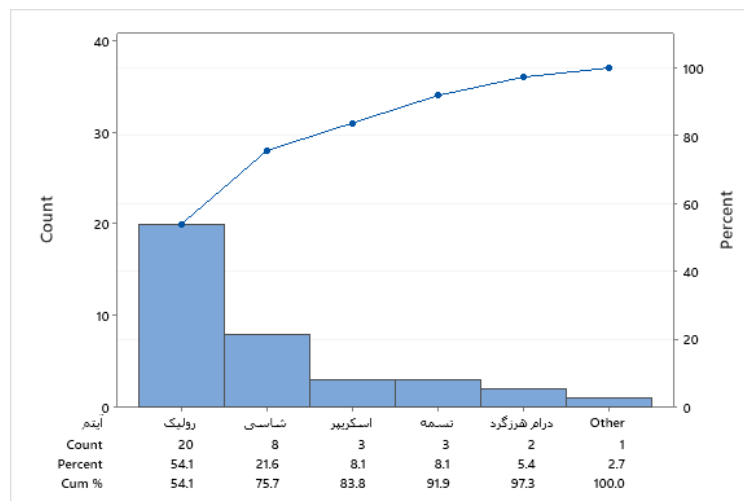
شکل ۴-۱۲- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۱

#### ۴-۱۰-۳- نوار نقاله ۳

نوار نقاله ۳ تونل مترو خط دو تبریز با تعداد ۳۷ خرابی ثبت شده در بازه زمانی مورد مطالعه کمترین تعداد خرابی را دارا است. تحلیل پارتو انواع خرابی این نوار (شکل ۴-۱۴) هم نشان می‌دهد که همانند دو نوار دیگر آیتم رولیک با ۵۴/۱ درصد بیشترین میزان خرابی را دارد. در این نوار بر خلاف دو نوار دیگر آیتم شاسی با ۲۱/۶ درصد رتبه دوم میزان خرابی را داراست. داده‌های مربوط به نوع خرابی و زمان‌های TBF و TTR نوار نقاله ۳ در پیوست ۳ آورده شده است.



شکل ۴-۱۳- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۲



شکل ۴-۱۴- تحلیل پارتو خرابی‌های نوار نقاله ۳

## ۴-۱۱- جمع‌بندی

م‌صالح حفر شده توسط ماشین TBM تونل مترو خط دو تبریز به وسیله سه نوار نقاله، مسافت حدود ۲۳ کیلومتر را طی می‌کنند. در بین این نوار نقاله‌ها، نوار نقاله ۲ با تعداد ۲۴۴ خرابی در بازه مورد مطالعه بیشترین و نوار نقاله ۳ با تعداد ۳۷ خرابی کم‌ترین تعداد خرابی را دارا هستند. تحلیل پارتو انواع خرابی نوار نقاله‌ها نشان می‌دهد برای هر سه نوار نقاله آیتم رولیک بیشترین میزان خرابی را دارا می‌باشد که باید بیشتر مورد توجه قرار بگیرد.

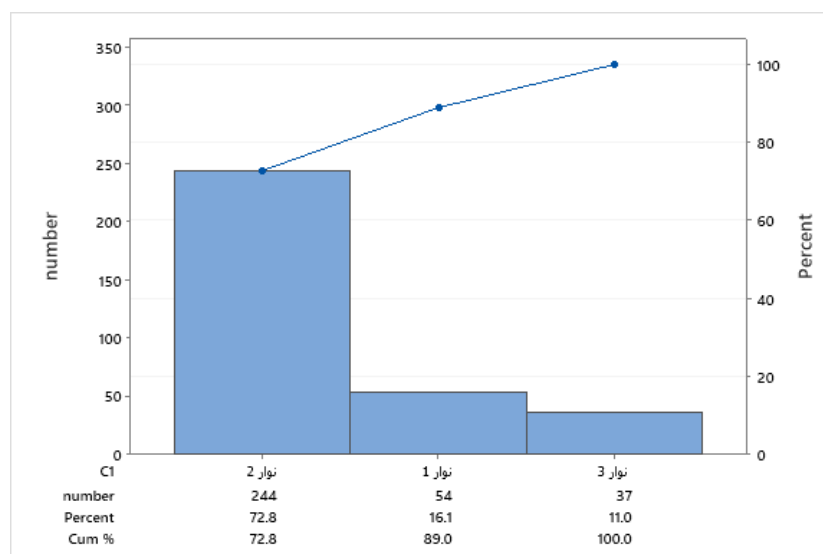
## ۵- فصل پنجم: تحلیلی داده‌ها

## ۵-۱- مقدمه

در فصل‌های گذشته کلیات و پیشینه تحقیق و همچنین مبانی نظری کار شامل کلیات تحلیل RMS شرح داده شد. بعد از مشخص شدن اطلاعات ماشین حفاری تونل مترو خط دو تبریز و همچنین اطلاعات نوار نقاله‌های این ماشین و تهیه پایگاه داده‌ای نوار نقاله‌ها و محاسبه TBF و TTR و TTD به تحلیل داده‌ها پرداخته می‌شود. از آنجایی که خرابی در هر کدام از نوار نقاله‌ها باعث توقف عملیات حفاری می‌گردد شبکه سری برای این نوار نقاله‌ها در نظر گرفته شد. در این فصل به تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی نوارها پرداخته شده است. در نهایت تاب‌آوری برای هر یک از نوار نقاله‌ها و تاب‌آوری کل سیستم محاسبه شده است.

## ۵-۲- تحلیل پارتو

تحلیل پارتو نوار نقاله‌ها (شکل ۵-۱) نشان می‌دهد که نوار نقاله ۲ ماشین حفار خط دو مترو تبریز دارای بیشترین آمار خرابی و تعمیر (۷۲/۸ درصد) بوده و لازم است نسبت به دو نوار نقاله دیگر از توجه بیشتری برخوردار باشد. همچنین مطابق شکل نوار نقاله سه تعداد خرابی کمتری نسبت به دو نوار نقاله دیگر دارد.

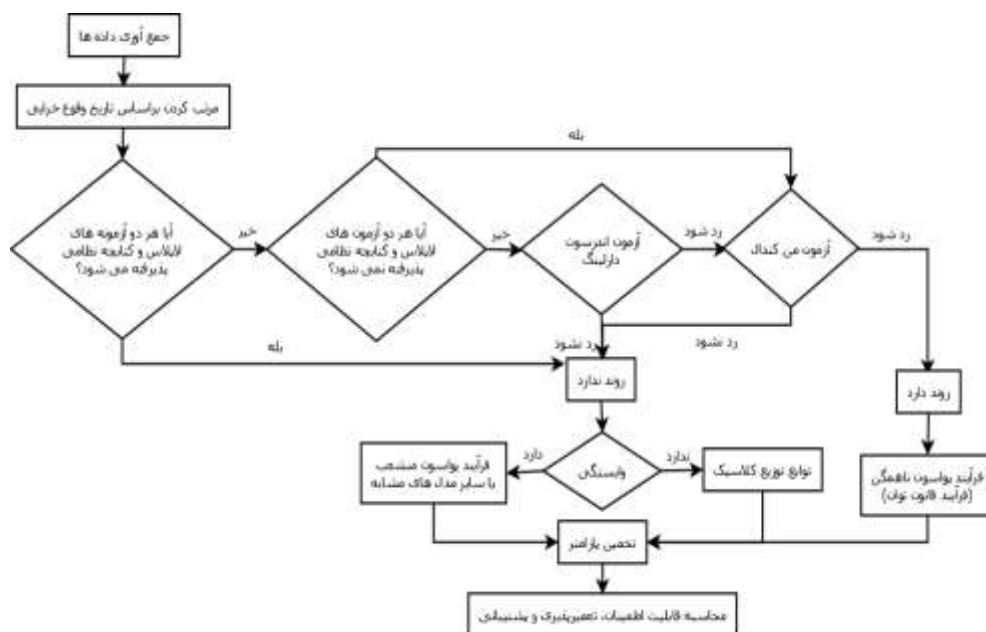


شکل ۵-۱- نمودار تحلیل پارتو برای نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز

## ۵-۳- تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی نوار نقاله

### TBM در خط دو مترو تبریز

در این پایان‌نامه با توجه به کاربرد گسترده روش تحلیل و مدل‌سازی آماری در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، از این روش برای تحلیل RMS نوار نقاله ماشین حفار خط دو مترو تبریز استفاده شده است. تمامی داده‌های خرابی و تعمیر هر کدام از نوار نقاله‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه که حدود ۱۵ ماه عملکرد ماشین است به طور دقیق طبقه بندی شده و بعد از محاسبه زمان بین خرابی‌ها (TBFs)، زمان تعمیرات (TTRs) و زمان تحویل‌ها (TTDs) مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل ۵-۲ برای هر کدام از نوار نقاله‌ها تحلیل صورت گرفته است. برای این منظور، آزمون‌های روند برای داده‌های خرابی، تعمیر و تحویل هر کدام از نوار نقاله‌ها صورت گرفته است و برای داده‌های دارای روند از مدل سازی تصادفی فرآیند پواسون ناهمگن و فرآیند قانون توان استفاده شده است. در صورت عدم وجود روند و همبستگی در داده‌ها، فرآیند تجدید شونده برای یافتن بهترین توابع توزیع چگالی احتمال خرابی، احتمال تعمیر و احتمال تحویل به کار گرفته شده است.



شکل ۵-۲- روندنمای استفاده شده در پایان‌نامه برای تحلیل RMS

در این پایان نامه برای تحلیل داده‌ها و یافتن بهترین تابع توزیع برازش از نرم‌افزار آماری Minitab 19 استفاده شده است. استفاده از نرم‌افزار تخصصی آمار برای کنترل کیفیت، کار بر روی اعداد و تجزیه و تحلیل داده‌های خام است. استفاده از این نرم‌افزار با محاسبه پارامترهای آماری، کاربر را در انتخاب بهترین تابع برازش شده بر داده‌های موجود یاری می‌نماید. در این نرم‌افزار توابع نمایی، ویبول (دو پارامتری و سه پارامتری)، لاگ نرمال (دو پارامتری و سه پارامتری)، لجستیک، لاگ لجستیک (دو پارامتری و سه پارامتری)، نرمال و کوچکترین ارزش اضافی<sup>۱</sup> به عنوان توابع شناخته شده در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده می‌شوند. در این پایان‌نامه نیز از این توابع به عنوان توابع اصلی برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است.

همچنین در این نرم‌افزار برای ارزیابی بهترین تابع توزیع برازش شده از آزمون اندرسون - دارلینگ (AD) استفاده شده است. این آزمون یکی از آزمون‌های اصلی و پر کاربرد در بحث تطابق برازش می‌باشد. در این نرم‌افزار تابعی بهترین برازش را بر داده‌ها خواهد داشت که مقدار اندرسون - دارلینگ آن کوچکتر باشد.

### ۵-۳-۱- تحلیل قابلیت اطمینان نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز

همانطور که در روندنمای شکل ۵-۱۲ اشاره شد بعد از تهیه پایگاه داده و طبقه‌بندی داده‌های خرابی هر نوار نقاله، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت اطمینان، انجام آزمون روند است. در این پایان‌نامه از آزمون‌های روند کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون - دارلینگ و من کندال استفاده شده است و نتایج آن برای داده‌های خرابی (TBFs) نوار نقاله ۱ ماشین مورد مطالعه در جدول ۵-۱ آورده شده است. فرض صفر در این آزمون‌ها عدم وجود روند است. بنابراین در صورت رد شدن فرض صفر، وجود روند در داده‌ها تأیید می‌گردد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مقدار p-value برای آزمون‌های کتابچه نظامی و لاپلاس کمتر از سطح معناداری (۰/۰۵) است لذا فرض صفر رد شده و باید آزمون من کندال برای بررسی وجود روند در داده‌ها انجام شود. مقدار p-value برای آزمون من کندال در حالت افزایشی ۰/۹۹۶ و در حالت کاهشی ۰/۰۰۳ است و چون مقدار p-value کاهش کمتر از سطح معناداری (۰/۰۵) است لذا این آزمون نیز وجود روند در داده‌ها

---

<sup>۱</sup>.smallest extreme value



را تأیید می‌کند. با توجه به وجود روند در داده‌ها، نیاز به انجام آزمون همبستگی سری نیست و از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان نوار نقاله ۱ استفاده می‌شود.

جدول ۱-۵- نتایج آزمون‌های روند برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱

آزمون	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من کندال افزایشی	من کندال کاهششی
مقدار	۶۶/۰۸	۳/۶۷	۷/۵۲	-۲/۶۵۶	-۲/۶۵۶
p-value	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۶	۰/۰۰۳

پارامترهای تابع توزیع PLP برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ در جدول ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۲-۵- پارامترهای توزیع PLP برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱

پارامتر	مقدار	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا
shape	۱/۶۳۴	۰/۲۲۰	۱/۲۵۴	۲/۱۲۸
scale	۱۰۱/۳۶۸	۳۴/۴۸۹	۵۲/۰۳۴	۱۹۷/۴۷۵

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال خرابی داده‌ها، مدل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی نوار نقاله ۱ ماشین حفار خط دو مترو تبریز به صورت روابط (۱-۵) و (۲-۵) محاسبه می‌گردد. جدول ۳-۵ مقدار قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای ۱۴۰ ساعت را نشان می‌دهند.

$$R_1(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] = \exp\left[-\left(\frac{t}{101.368}\right)^{1.634}\right] \quad (1-5)$$

$$\lambda_1(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{1.634}{101.368^{1.634}} (t)^{0.634} \quad (2-5)$$

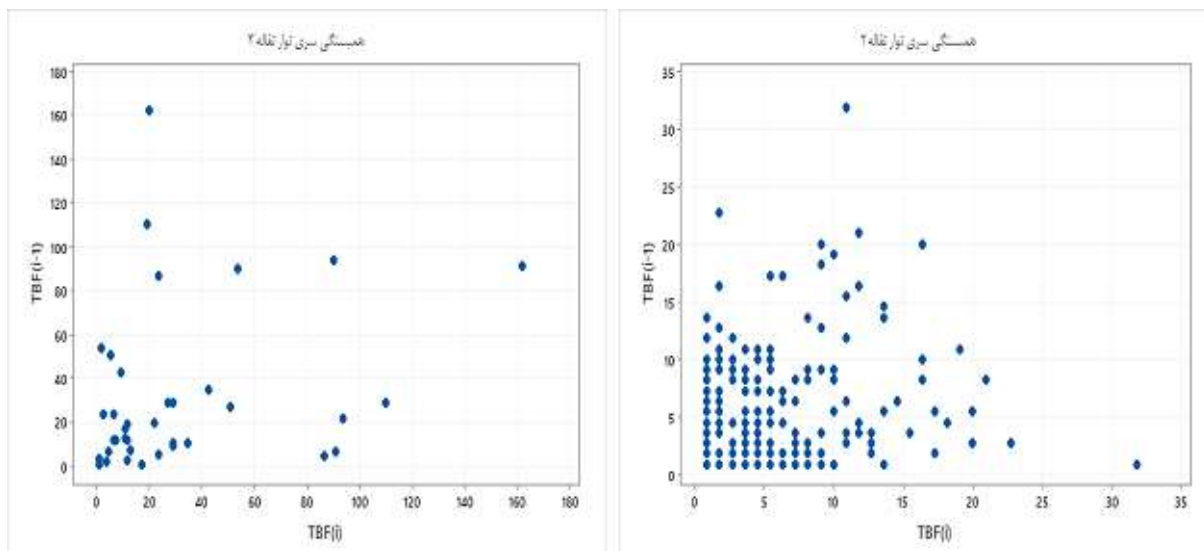
جدول ۳-۵- مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی نوار نقاله ۱

زمان	۱	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰
قابلیت اطمینان	۰/۹۹۹	۰/۹۳۱	۰/۸۰۳	۰/۶۵۴	۰/۵۰۷	۰/۳۷۶	۰/۲۶۷	۰/۱۸۳
نرخ خرابی	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۹۷

به همین ترتیب برای نوار نقاله‌های ۲ و ۳ نیز همانند آنچه برای نوار نقاله ۱ بیان شد، آزمون‌ها بر روی داده‌های خرابی نوار نقاله‌های ۲ و ۳ نیز انجام گرفت و بعد از تعیین تابع مناسب و تخمین پارامترها، مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای نوارها محاسبه شد. نتایج آزمون‌های روند برای نوار نقاله‌ها در جدول ۴-۵ آورده شده است. همچنین آزمون‌های همبستگی سری برای نوارهای ۲ و ۳ در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. تابع توزیع برازش شده بر داده‌های خرابی هر نوار و مقدار پارامترهای هر تابع نیز در جدول ۵-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵- نتایج آزمون‌های روند داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ و ۲ و ۳

روند	من کنذال کاهشی	من کنذال افزایشی	اندرسون دارلینگ	لاپلاس	کتابچه نظامی	آزمون روند	زیر سیستم
روند دارد	-۲/۶۵۶	-۲/۶۵۶	۷/۵۲	۳/۶۷	۶۶/۰۸	مقدار	نوار نقاله ۱
	۰/۰۰۳	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	p-value	
روند ندارد	*	*	*	۰/۵۱	۴۳۶/۲۶	مقدار	نوار نقاله ۲
	*	*	*	۰/۶۱۳	۰/۱۰۳	p-value	
روند ندارد	*	*	*	۰/۸۷	۸۸/۷۴	مقدار	نوار نقاله ۳
	*	*	*	۰/۳۸۴	۰/۱۷۶	p-value	



شکل ۳-۵- آزمون همبستگی سری برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۲ و ۳

جدول ۵-۵- تابع برازش شده و پارامترهای آن برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ و ۲ و ۳

نوار نقاله ۳	نوار نقاله ۲	نوار نقاله ۱	زیر سیستم
Log logistic-2P	Weibull-2P	PLP	تابع برازش شده
$\mu = 2/836$ $\sigma = 0/728$	$\alpha = 5/526$ $\beta = 1/147$	$\alpha = 101/368$ $\beta = 1/634$	پارامتر

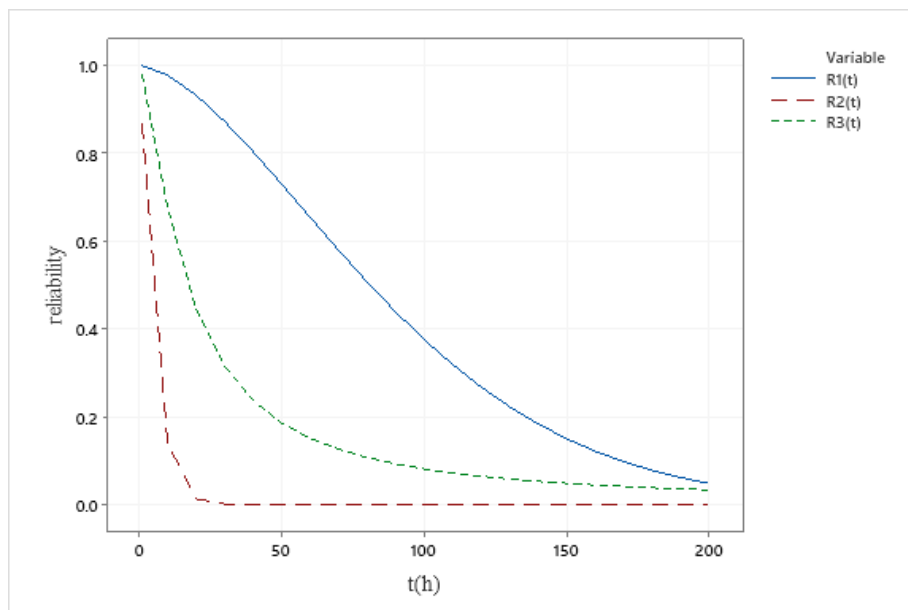
قابلیت اطمینان نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب با روابط (۵-۳) و (۵-۴) و (۵-۵) محاسبه شد.

$$R_1(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] = \exp[-(\frac{t}{101.368})^{1.634}] \quad (۵-۳)$$

$$R_2(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] = \exp[-(\frac{t}{5.526})^{1.147}] \quad (۵-۴)$$

$$R_3(t) = 1 - \frac{1}{1 + \exp[-(\ln t - \mu) / \sigma]} = 1 - \frac{1}{1 + \exp[-(\ln t - 2.836) / 0.728]} \quad (۵-۵)$$

نمودار قابلیت اطمینان نوارها ( شکل ۵-۴) نشان می‌دهد که نوار نقاله ۱ از بی‌بیشترین میزان قابلیت اطمینان در بین سایر نوارها برخوردار است. این نوار با قابلیت اطمینان حدود ۹۹ درصد در ساعت اولیه شروع به کار کرده و بعد از گذشت ۸۰ ساعت قابلیت اطمینان آن به ۵۰٪ می‌رسد و بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت قابلیت اطمینان به صفر نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر چنانچه هیچ‌گونه برنامه‌ای برای تعمیر و نگهداری اصلاحی یا پیشگیرانه در نوار نقاله ۱ وجود نداشته باشد این نوار نقاله به احتمال قریب به یقین بعد از ۲۰۰ ساعت عملیات، دچار خرابی شده و متوقف خواهد شد. منحنی نشان می‌دهد، نوار ۲ کم‌ترین میزان قابلیت اطمینان را داراست و شیب کاهش منحنی قابلیت اطمینان برای نوار ۲ بیش‌تر از نوار ۱ و نوار ۳ است به طوری که برای نوار ۲، قابلیت اطمینان ۵۰ درصد تنها بعد از گذشت حدود ۴ ساعت اتفاق می‌افتد. قابلیت اطمینان نوار نقاله ۳ نیز با شیب بیشتر نسبت به نوار ۱ در حال کاهش است به طوری که بعد از گذشت حدود ۲۵ ساعت قابلیت اطمینان آن به حدود ۵۰ درصد می‌رسد.



شکل ۴-۵- منحنی قابلیت اطمینان نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳

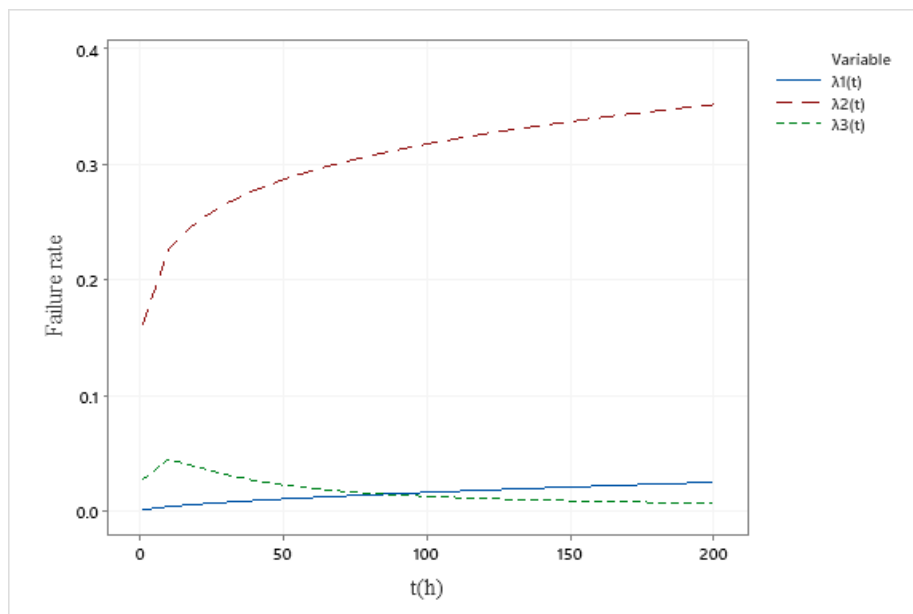
نرخ خرابی نوار نقاله‌ها نیز با روابط (۵-۶) و (۵-۷) و (۵-۸) محاسبه شد.

$$\lambda_1(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{1.634}{101.368^{1.634}} (t)^{0.634} \quad (۵-۶)$$

$$\lambda_2(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} = \frac{1.147}{5.526^{1.147}} (t)^{0.147} \quad (۵-۷)$$

$$\lambda_3(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{(t\sigma)\left[1 + \exp\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)\right]^2} \right] / R_3(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln t - 2.836}{0.728}\right)}{(t \cdot 0.728)\left[1 + \exp\left(\frac{\ln t - 2.836}{0.728}\right)\right]^2} \right] / R_3(t) \quad (۵-۸)$$

منحنی نرخ خرابی نوارها (شکل ۵-۵) نشان می‌دهد نوار نقاله ۲ با توجه به قابلیت اطمینان پایین‌تر نسبت به دو نوار دیگر، از نرخ خرابی بالاتری نسبت به دو نوار دیگر برخوردار است. این نوار دارای نرخ خرابی حدود ۰/۱۶ خرابی در ساعت در ابتدای شروع فعالیت خود است و با توجه به منحنی با گذشت زمان این مقدار در حال افزایش است. منحنی نرخ خرابی نوار نقاله ۱ نیز با گذشت زمان در حال افزایش است و سیستم در حال تنزل است. اما منحنی نرخ خرابی نوار نقاله ۳ تا حدود ۲۰ ساعت بعد از شروع کار در حال افزایش بوده ولی بعد از آن رو به کاهش می‌رود یعنی نوار تا حدود ۲۰ ساعت بعد از شروع کار در حال تنزل و بعد از آن رو به بهبود است.

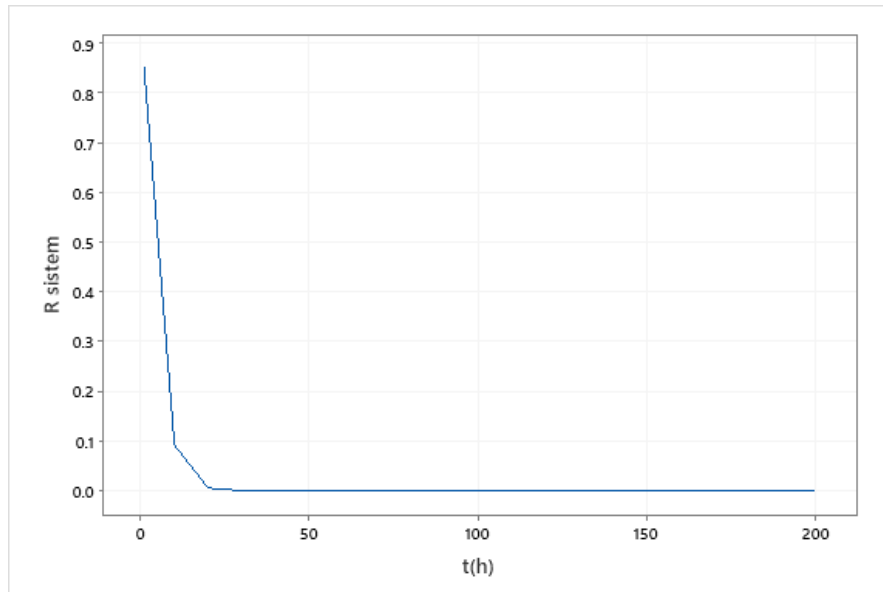


شکل ۵-۵- منحنی نرخ خرابی نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳

با توجه به قابلیت اطمینان نوار نقاله‌ها و سری قرار گرفتن آنها در ماشین حفاری تونل مترو خط دو تبریز، قابلیت اطمینان کل سیستم نوار نقاله از رابطه (۵-۹) به دست می‌آید.

$$R_{system}(t) = R_1(t).R_2(t).R_3(t) \quad (۵-۹)$$

منحنی قابلیت اطمینان کل سیستم (شکل ۵-۶) نوار نقاله نشان می‌دهد با توجه به سری قرار گرفتن نوار نقاله‌ها، خرابی و توقف در یکی از آنها باعث ایجاد خرابی و توقف در سایر نوار نقاله‌ها می‌شود و لذا با توجه به پایین بودن مقدار قابلیت اطمینان در نوار نقاله ۲، قابلیت اطمینان کل سیستم نیز در سطح پایینی قرار می‌گیرد به طوری که بعد از گذشت حدود ۴ ساعت قابلیت اطمینان کل سیستم به حدود ۵۰ درصد می‌رسد.



شکل ۵-۶- منحنی قابلیت اطمینان کل سیستم نوار نقاله‌ها

### ۵-۳-۲- تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز

فرآیند مدل‌سازی و تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نیز همانند بحث قابلیت اطمینان است با این تفاوت که در این بخش به جای داده‌های خرابی (TBFs) از داده‌های تعمیر (TTRs) استفاده می‌شود. بنابراین بعد از تهیه پایگاه داده و طبقه‌بندی داده‌های تعمیر هر نوار نقاله، اولین گام در تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ماشین حفاری تمام مقطع تونل، انجام آزمون روند است. در این بخش نیز از آزمون‌های روند کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون - دارلینگ و من کندال استفاده شده است و نتایج آن برای داده‌های تعمیر (TTRs) نوار نقاله ۱ ماشین مورد مطالعه در جدول ۵-۶ آورده شده است. فرض صفر در این آزمون‌ها عدم وجود روند است. بنابراین در صورت رد شدن فرض صفر، وجود روند در داده‌ها تأیید می‌گردد.

نتایج جدول نشان می‌دهد مقدار p-value برای آزمون کتابچه نظامی برابر با ۰/۰۰۴ و برای آزمون لاپلاس برابر با ۰/۰۱۱ است. بنابر این به دلیل کوچک‌تر بودن مقدار p-value از سطح معناداری (۰/۰۵) برای هر دو آزمون مذکور فرض صفر آزمون‌ها (عدم وجود روند) رد می‌شود و برای بررسی وجود روند در داده‌ها باید آزمون من کندال بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد مقدار p-value برای آزمون من کندال در حالت افزایشی ۰/۱۲۶ و در حالت کاهش‌ی ۰/۸۷۳ است که هر دو مقدار بیشتر از سطح معناداری بوده و این به معنای

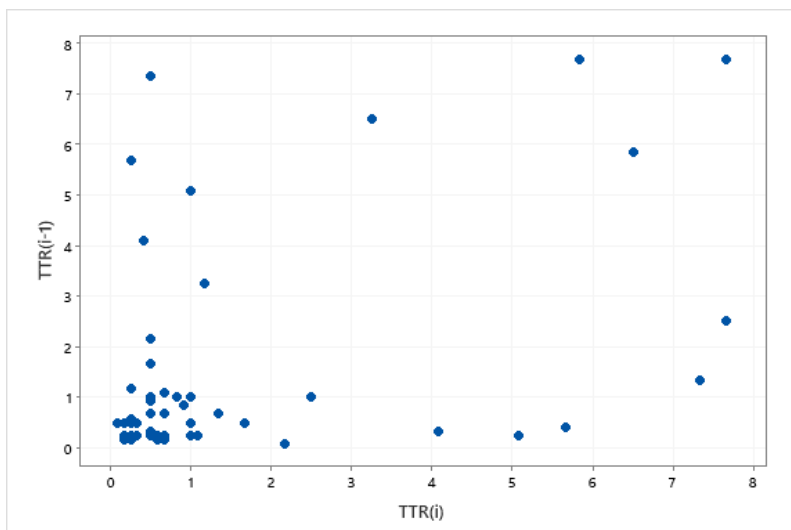
پذیرفته شدن فرض صفر (عدم وجود روند) است. بنابراین داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ فاقد روند هستند.

جدول ۵-۶- نتایج آزمون‌های روند برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱

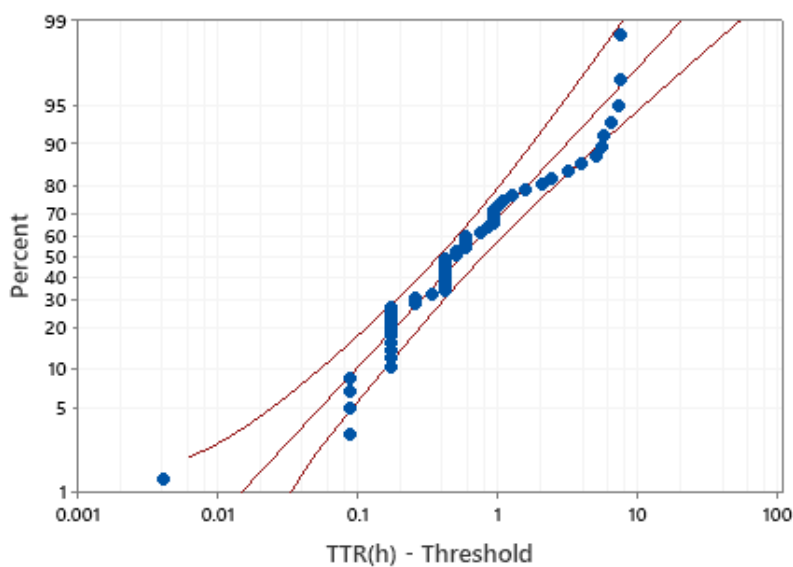
آزمون	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من مندال افزایشی	من کندال کاهشی
مقدار	۱۵۳/۰۷	-۲/۵۶	۵/۸۱	۱/۱۴۱	۱/۱۴۱
p-value	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۱۲۶	۰/۸۷۳

با مشخص شدن عدم وجود روند در داده‌ها، آزمون همبستگی سری بر روی داده‌ها انجام می‌شود. در این آزمون  $i$  امین داده TTR بر حسب  $i-1$  امین داده TTR در یک فضای دو بعدی مطابق شکل ۵-۷ رسم می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۷ مشخص است داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱، دارای نظم و ترتیب مشخصی نیستند و به صورت پراکنده توزیع شده‌اند. بنابراین داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ دارای همبستگی سری نیستند.

با توجه به عدم وجود روند و همبستگی سری در داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱، لذا برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله ۱ از روش فرآیند تجدید شونده استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد که تابع توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری دارای کمترین مقدار AD برابر با  $۱/۰۹$  در میان سایر توابع توزیع است و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها است. شکل ۵-۸ نشان دهنده برازش مناسب تابع توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری بر داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ است.



شکل ۵-۷- آزمون همبستگی سری برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱



شکل ۵-۸- برازش مناسب تابع لاگ لجستیک سه پارامتری بر داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱

پارامترهای تابع توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری در جدول ۵-۷ آورده شده است.

جدول ۵-۷- پارامترهای تابع لاگ لجستیک سه پارامتری برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱

پارامتر	مقدار	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا
Location	-۰/۶۰۷	۰/۱۸۷	-۰/۹۷۵	-۰/۲۴۰
Scale	۰/۷۸۹	۰/۰۹۹	۰/۶۱۷	۱/۰۱۰
Threshold	۰/۰۷۹	۰/۰۰۸	۰/۰۶۲	۰/۰۹۶



بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال تعمیر داده‌ها، مدل قابلیت تعمیرپذیری و نرخ تعمیر نوار نقاله ۱ ماشین حفار خط دو مترو تبریز به صورت روابط (۵-۱۰) و (۵-۱۱) محاسبه گردید. جدول ۵-۸ مقدار معادل با این روابط برای ۱۲۰ ساعت را نشان می‌دهد.

$$M_1(t) = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln(t - \lambda) - \mu) / \sigma]} = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln(t - 0.079) + 0.607) / 0.789]} \quad (10-5)$$

$$\mu_1(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln(t - \lambda) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma(t - \lambda) \left[1 + \exp\left(\frac{\ln(t - \lambda) - \mu}{\sigma}\right)\right]^2} \right] / M_1(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln(t - 0.079) + 0.607}{0.789}\right)}{\sigma(t - 0.079) \left[1 + \exp\left(\frac{\ln(t - 0.079) + 0.607}{0.789}\right)\right]^2} \right] / M_1(t) \quad (11-5)$$

جدول ۵-۸- مقدار تعمیرپذیری و نرخ تعمیر برای نوار نقاله ۱

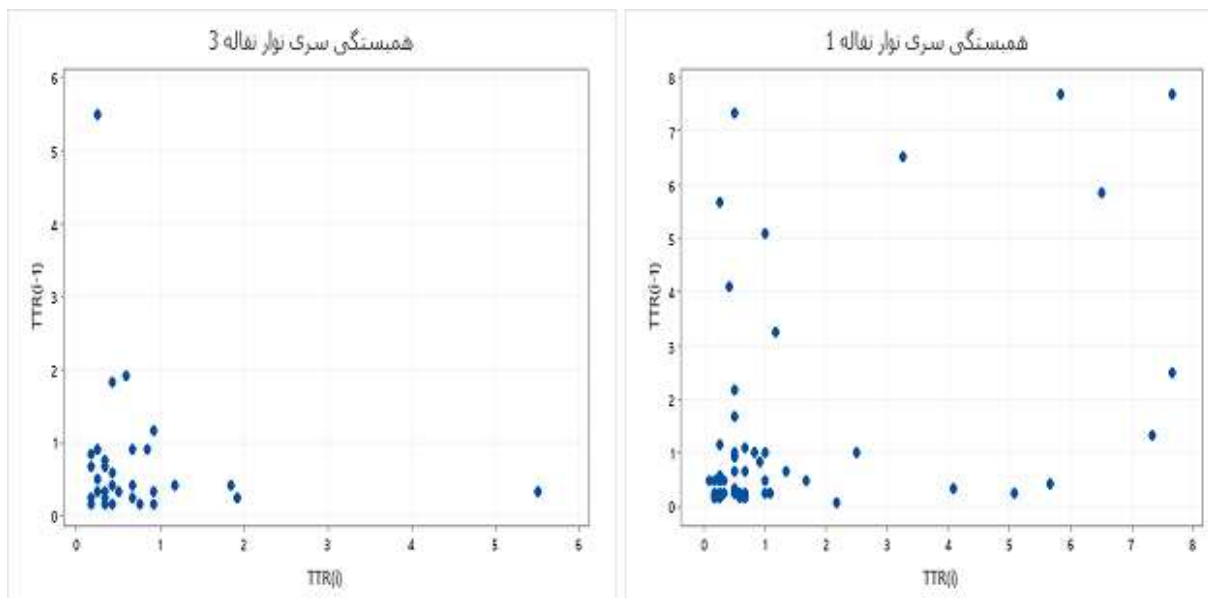
زمان	۱	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
تعمیرپذیری	۰/۶۶۰	۰/۹۸۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸
نرخ تعمیر	۰/۴۶۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۱	۵/۴۶E-۰۵	۲/۸۴E-۰۵	۱/۷۱E-۰۵	۱/۱۳E-۰۵

به همین ترتیب برای نوار نقاله‌های ۲ و ۳ نیز همانند آنچه برای نوار نقاله ۱ بیان شد، آزمون‌ها بر روی داده‌های تعمیر نوار نقاله‌های ۲ و ۳ نیز انجام گرفت و بعد از تعیین تابع مناسب و تخمین پارامترها، مقادیر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای نوارها محاسبه شد. نتایج آزمون‌های روند برای نوار نقاله‌ها در جدول ۵-۹ آورده شده است. همچنین آزمون‌های همبستگی سری برای نوارهای ۱ و ۳ در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. تابع توزیع برازش شده بر داده‌های خرابی هر نوار و مقدار پارامترهای هر تابع نیز در جدول ۵-۱۰ آورده شده است.

جدول ۵-۹- نتایج آزمون‌های روند داده‌های تعمیر برای نوار نقاله‌های ۱ و ۳

زیر سیستم	آزمون روند	کتابچه نظامی	لاپلاس	اندرسون دارلینگ	من کنдал افزایشی	من کنдал کاهشی	روند
نوار نقاله ۱	مقدار	۱۵۳/۰۷	-۲/۵۶	۵/۸۱	۱/۱۴۱	۱/۱۴۱	روند ندارد
	p-value	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۱۲۶	۰/۸۷۳	
نوار نقاله ۲	مقدار	۵۷۱/۲۶	-۲/۵۳	۵/۰۲	۱/۹۵۴	۱/۹۵۴	روند دارد

	۰/۹۷۴	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	p-value	
روند ندارد	-۰/۱۷۱	-۰/۱۷۱	۲/۶۸	۱/۹۹	۴۵/۱۷	مقدار	نوار نقاله ۳
	۰/۴۳۱	۰/۵۶۸	۰/۰۴۰	۰/۰۴۷	۰/۰۱۱	p-value	



شکل ۵-۹- آزمون‌های همبستگی سری داده‌های تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۳

جدول ۵-۱۰- تابع برازش شده و پارامترهای آن برای داده‌های تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۲

نوار نقاله ۳	نوار نقاله ۲	نوار نقاله ۱	زیر سیستم
Log logistic-2P	PLP	Log logistic-3P	تابع برازش شده
$\mu = -۰/۹$ $\sigma = ۰/۴۳۹$	$\alpha = ۰/۲۴۹$ $\beta = ۰/۸۵۴$	$\mu = -۰/۶۰۷$ $\sigma = ۰/۷۸۹$ $\lambda = ۰/۰۷۹$	پارامتر

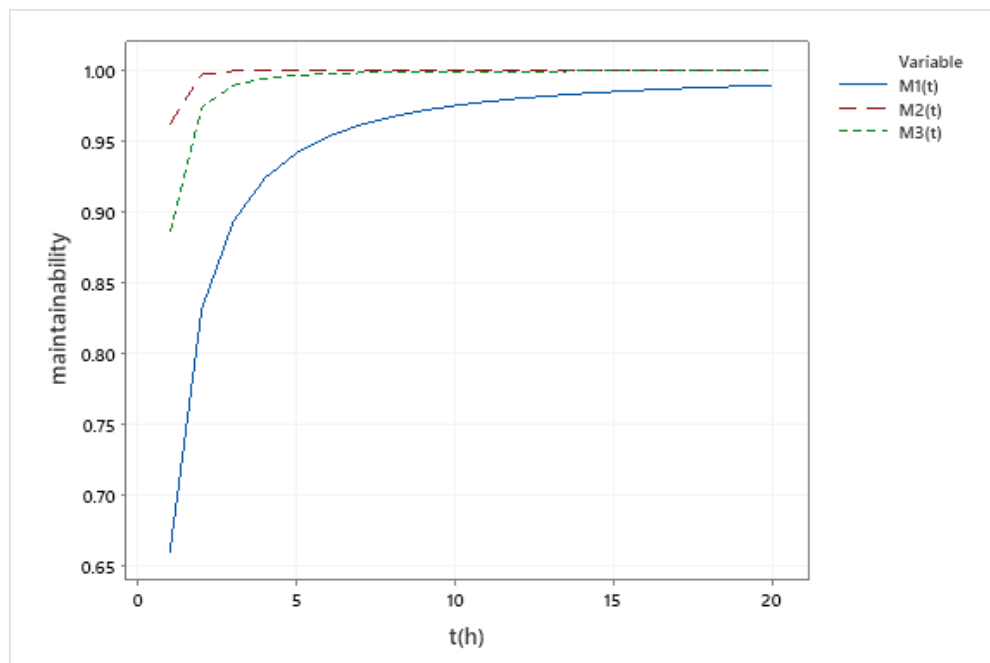
روابط (۵-۱۲) تا (۵-۱۴) به ترتیب تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳ را نشان می‌دهند.

$$M_1(t) = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln(t - \lambda) - \mu) / \sigma]} = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln(t - 0.079) + 0.607) / 0.789]} \quad (۵-۱۲)$$

$$M_2(t) = 1 - \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] = 1 - \exp[-(\frac{t}{0.249})^{0.854}] \quad (۵-۱۳)$$

$$M_3(t) = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln t - \mu) / \sigma]} = \frac{1}{1 + \exp[-(\ln t + 0.9) / 0.439]} \quad (۵-۱۴)$$

منحنی تعمیرپذیری نوار نقاله‌ها (شکل ۵-۱۰) نشان می‌دهد نوار نقاله ۱ کمترین میزان تعمیرپذیری را در بین سایر نوارها داراست. منحنی نشان می‌دهد برای نوار نقاله ۱، مدت زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در این نوار نقاله بشیر از ۲۰۰ ساعت بوده که زمان زیادی است هرچند که با احتمال حدود ۹۰ درصد، تعمیرات در مدت زمان حداکثر ۳ ساعت صورت می‌گیرد و نوار به فعالیت خود ادامه می‌دهد. مدت زمان بالای تعمیرات مربوط به حالتی است که تعداد زیادی از ابزارها مورد تعمیر و نگهداری قرار بگیرند. نوار نقاله ۲ بیشترین میزان تعمیرپذیری را داراست به طوری که حداکثر ۶ ساعت زمان لازم است تا تمام خرابی‌های نوار نقاله ۲ ماشین حفار خط دو مترو تبریز تعمیر گردند. با وجود تعداد زیاد خرابی در نوار نقاله ۲ نسبت به سایر نوار نقاله‌ها و با توجه به نمودار تعمیرپذیری آن مشخص می‌شود که تعمیرات این نوار نقاله ساده و جزئی بوده و در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شوند. منحنی قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله ۳ نشان می‌دهد که برای تعمیر تمام خرابی‌های نوار نقاله ۳ بیش از ۲۰۰ ساعت زمان لازم است اما در ۵۰ درصد حالات، تعمیرات این نوار نقاله در مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه صورت می‌گیرد و در بیش از ۹۰ درصد حالات حداکثر ۲ ساعت طول می‌کشد تا خرابی‌ها بر طرف گردند.



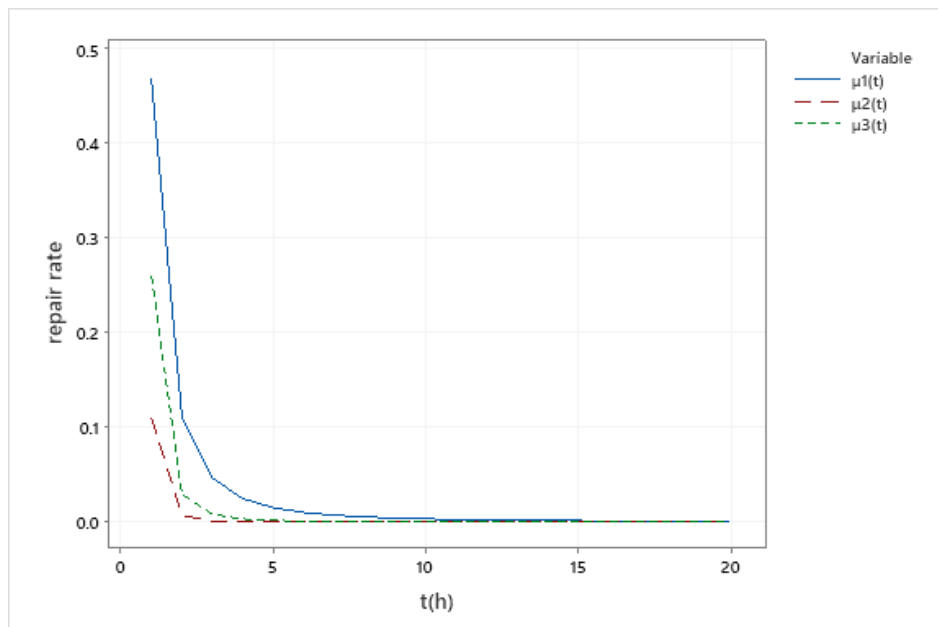
شکل ۵-۱۰- منحنی تعمیرپذیری نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳

مقدار نرخ تعمیر نوار نقاله‌ها با روابط (۱۵-۵) تا (۱۷-۵) محاسبه شد.

$$\mu_1(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma(t-\lambda)\left[1+\exp\left(\frac{\ln(t-\lambda)-\mu}{\sigma}\right)\right]^2} \right] / M_1(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln(t-0.079)+0.607}{0.789}\right)}{\sigma(t-0.079)\left[1+\exp\left(\frac{\ln(t-0.079)+0.607}{0.789}\right)\right]^2} \right] / M_1(t) \quad (15-5)$$

$$\mu_2(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] / M_2(t) = \frac{0.854}{0.249^{0.854}} (t)^{-0.146} \exp\left[-\left(\frac{t}{0.249}\right)^{0.854}\right] / M_2(t) \quad (16-5)$$

$$\mu_3(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{(t\sigma)\left[1+\exp\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)\right]^2} \right] / M_3(t) = \left[ \frac{\exp\left(\frac{\ln t + 0.9}{0.439}\right)}{(t0.439)\left[1+\exp\left(\frac{\ln t + 0.9}{0.439}\right)\right]^2} \right] / M_3(t) \quad (17-5)$$



شکل ۵-۱۱- منحنی نرخ تعمیر نوار نقاله‌های ۱ و ۲ و ۳

منحنی نرخ تعمیر نوار نقاله‌ها (شکل ۵-۱۱) نشان می‌دهد که نوار نقاله ۱ در ابتدا دارای نرخ تعمیر حدود ۰/۴۶ تعمیر در ساعت بوده و سپس با کاهش شدید بعد از گذشت ۵ ساعت به حدود ۰/۰۱ تعمیر در ساعت می‌رسد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌شود. منحنی نرخ تعمیر نوار نقاله ۲ نشان می‌دهد تعداد تعمیرات در ابتدا شروع حدود ۰/۱ تعمیر در ساعت بوده و با شیب تندی در حال کاهش است به طوری که تنها بعد از گذشت ۲ ساعت تقریباً به صفر نزدیک می‌شود. منحنی نرخ تعمیر نوار نقاله ۳ نشان می‌دهد که این نوار با نرخ تعمیر حدود ۰/۲۶ تعمیر در ساعت شروع به کار کرده و با گذشت زمان با شیب تندی در حال کاهش است به

طوری که تنها با گذشت ۲ ساعت به ۰/۰۲ تعمیر در ساعت رسیده و بعد از آن تقریباً ثابت می شود. لذا نوار نقاله ۱ بیشترین مقدار نرخ تعمیر و نوار نقاله ۲ کمترین مقدار نرخ تعمیر را دارا هستند.

### ۵-۳-۳- تحلیل قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز

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 می شود [۲۹]. قابلیت پشتیبانی به عواملی همچون در دسترس بودن قطعات یدکی، تهر پر سنل تعمیر و نگهداری، زمان ار سال قطعات، انبارداری و غیره بستگی دارد و از آنجا که هر سه نوار نقاله ماشین حفار خط دو مترو تبریز از یک نوع بوده و قطعات یدکی و پر سنل تعمیر و نگهداری یکسانی دارند، لذا تابع توزیع احتمال برای هر سه نوار نقاله یکسان است.

برای تحلیل قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌ها نیز همانند تحلیل قابلیت تعمیرپذیری عمل شده با این تفاوت که در این تحلیل به جای استفاده از داده‌های تعمیر (TTRs)، از داده‌های تحویل (TTDs) استفاده می شود. در این پایان‌نامه به دلیل در دسترس نبودن داده‌های تحویل نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز، بعد از طبقه‌بندی داده‌های تعمیر (TTRs) هر سه نوار نقاله و مرتب کردن آنها بر اساس تاریخ تعمیر، به صورت فرضی ۱۰ درصد از زمان‌های صرف شده برای تعمیر را به عنوان زمان تحویل در نظر گرفته شد. بنابراین زمان‌های تحویل برابر است با ۱۰ درصد زمان‌های تعمیر  $(TTD=10\%*TTR)$ .

بعد از طبقه بندی داده‌ها و محاسبه TTDs، آزمون‌های روند همانند آنچه در بحث قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری گفته شد بر روی داده‌های تحویل انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جدول ۵-۱۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار p-value برای آزمون کتابچه نظامی برابر با ۰/۰۰۲ و برای آزمون لاپلاس برابر با ۰/۰۰۰ است که به دلیل کوچکتر بودن هر دو مقدار از سطح معناداری، فرض صفر رد شده و باید برای بررسی وجود روند، آزمون من کندال انجام شود. نتایج نشان می‌دهد مقدار p-value برای این آزمون در حالت افزایشی برابر با ۰/۰۰۶ و در حالت کاهش‌ی برابر با ۰/۹۹۳ است که به دلیل کوچکتر بودن مقدار p-value در حالت افزایشی از سطح معناداری فرض صفر آزمون رد شده و وجود روند در داده‌ها تأیید می‌شود.

جدول ۵-۱۱- نتایج آزمون‌های روند داده‌های تحویل نوار نقاله‌ها

روند	من کندال کاهشی	من کندال افزایشی	اندرسون دارلینگ	لاپلاس	کتابچه نظامی	آزمون
روند دارد	۲/۵۰۴	۲/۵۰۴	۱۱/۶۰	-۴/۳۵	۷۸۴/۸۷	مقدار
	۰/۹۹۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	p-value

با مشخص شدن وجود روند در داده‌ها، نیاز به انجام آزمون همبستگی سری نیست و برای تحلیل داده‌ها و مدل سازی قابلیت پشتیبانی از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) استفاده شده است که پارامترهای آن در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲- پارامترهای تابع PLP برای داده‌های تحویل نوار نقاله‌ها

پارامتر	مقدار	خطای استاندارد	حد پایین	حد بالا
Shape	۰/۸۵۳	۰/۰۴۷	۰/۷۶۷	۰/۹۴۹
Scale	۱/۷۲۷	۰/۶۵۲	۰/۸۲۵	۳/۶۱۸

بدین ترتیب با معلوم شدن پارامترهای تابع توزیع چگالی احتمال تحویل داده‌ها، مدل قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز به صورت رابطه (۵-۱۸) محاسبه گردید. جدول ۵-۱۳ مقدار معادل با این رابطه برای ۵۰ ساعت و شکل ۵-۱۲ منحنی معادل با این رابطه برای ۲۰ ساعت را نشان می‌دهند.

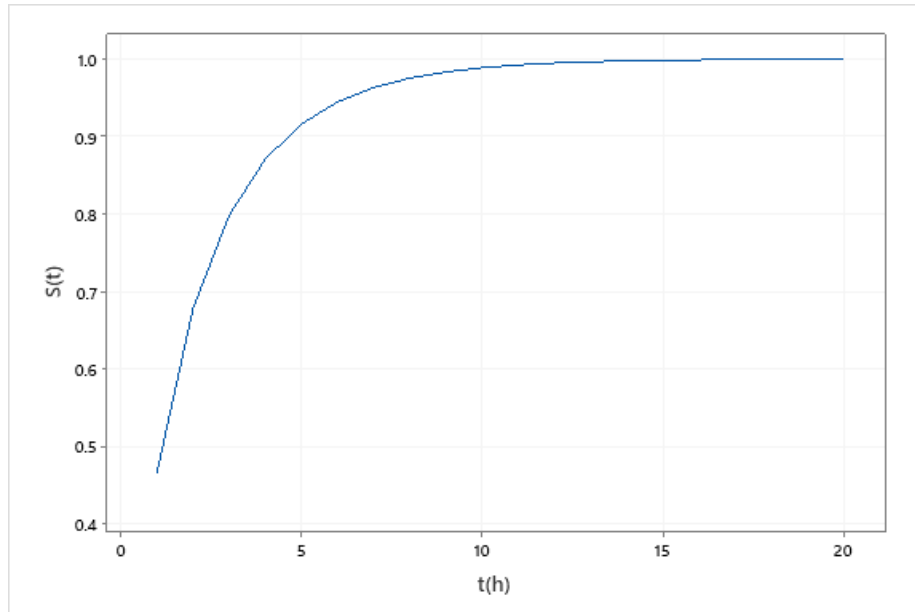
$$S_{1,2,3}(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{1.727}\right)^{0.853}\right] \quad (5-18)$$

جدول ۵-۱۳- مقدار پشتیبانی نوار نقاله‌ها

زمان	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
پشتیبانی	۰/۴۶۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱	۱

منحنی قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌ها (شکل ۵-۱۲) نشان می‌دهد که این نوارها از قابلیت پشتیبانی خوبی

برخوردارند. حدود ۴۰ ساعت زمان لازم است تا تمام منابع مورد نیاز برای تعمیر نوارها مهیا شود با این حال بیش از ۹۰ درصد منابع در کمتر از ۵ ساعت مهیا می‌شوند و به تعمیرات پرداخته می‌شود.



شکل ۵-۱۲- منحنی پشتیبانی نوار نقاله‌ها

## ۵-۴- تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله‌های ماشین حفار خط دو مترو تبریز

بعد از مشخص شدن توابع توزیع چگالی احتمال نوار نقاله‌ها و محاسبه قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری و قابلیت پشتیبانی، به تحلیل تاب‌آوری نوارها پرداخته شد. برای این منظور از رابطه بیان شده توسط راد و همکارانش استفاده می‌شود. رابطه بیان شده توسط راد و همکارانش به صورت رابطه (۵-۱۹) است. در این رابطه  $R(t)$  قابلیت اطمینان،  $\Lambda_j(t)$  حاصلضرب تاب‌آوری تشکیلات ( $\beta_1$ )، قابلیت تعمیرپذیری ( $\beta_2$ )، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ( $\beta_3$ ) و قابلیت پشتیبانی ( $\beta_4$ ) است. در رابطه ارائه شده توسط راد و همکارانش علاوه بر عدم قطعیت‌ها به عامل زمان نیز توجه شده است.

$$\Psi(t) = R(t) + \rho(t) = R(t) + \Lambda(t) \cdot (1 - R(t)) = R(t) + \left( \prod_{i=1}^4 \beta_i \cdot (1 - R(t)) \right) \quad (19-5)$$

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.

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 نگاه‌داشتن 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 [۳].

کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت (PHM): این فناوری توانایی تشخیص و پیش‌بینی اثرات حوادث مخرب را دارد. استفاده از فناوری PHM در مراحل اولیه طراحی، می‌تواند سیستم‌های غیر قابل اطمینان (یا آسیب‌پذیر) را به سیستم‌های قابل اطمینان (یا تاب‌آور) تبدیل کند و در عین حال هزینه چرخه عمر آنها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۲۴]. در این فناوری، نظارت بر شرایط<sup>۱</sup> و تشخیص شرایط سلامت بر اساس سیگنال‌های حسی و اندازه‌گیری‌های مرتبط آن است. ابزارهای رایج مورد استفاده برای CM شامل روش‌های آماری [۸۶، ۸۷] و هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی است [۸۸، ۸۹].

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.

#### ۵-۴-۱- تاب‌آوری نوار نقاله ۱ ماشین حفار خط دو مترو تبریز

با در اختیار داشتن مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای نوار نقاله ۱ و بر اساس رابطه (۵-۱۹)، تاب‌آوری نوار نقاله ۱ محاسبه می‌شود. مقادیر تاب‌آوری برای نوار نقاله ۱ در جدول ۵-۱۴ آورده شده است. در این جدول  $\Psi(t)_{80}$  یعنی تاب‌آوری برای حالتی که تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برابر

---

<sup>۱</sup>condition monitoring (CM)

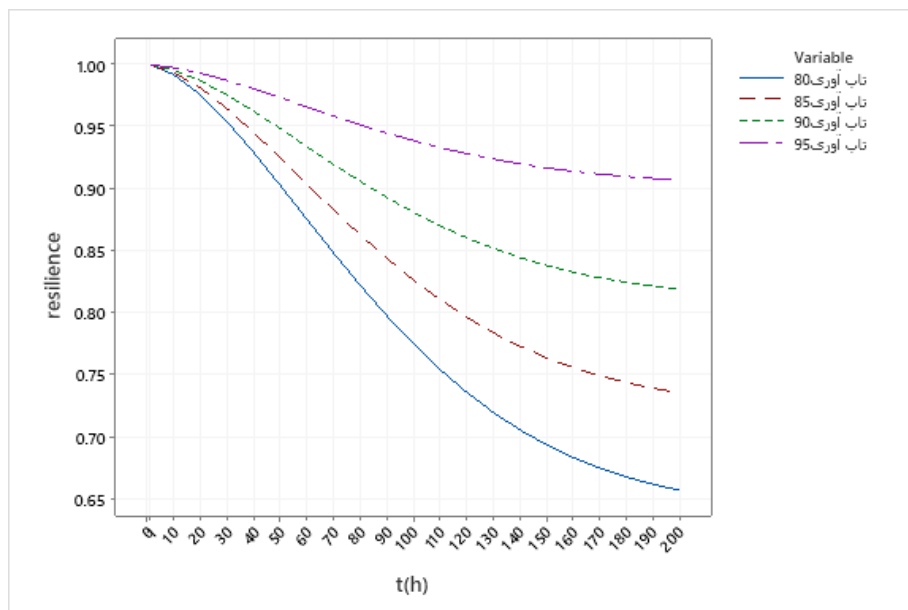


۸۰ درصد می باشد. همچنین شکل ۵-۱۳ منحنی های معادل با این جدول برای ۲۰۰ ساعت هستند.

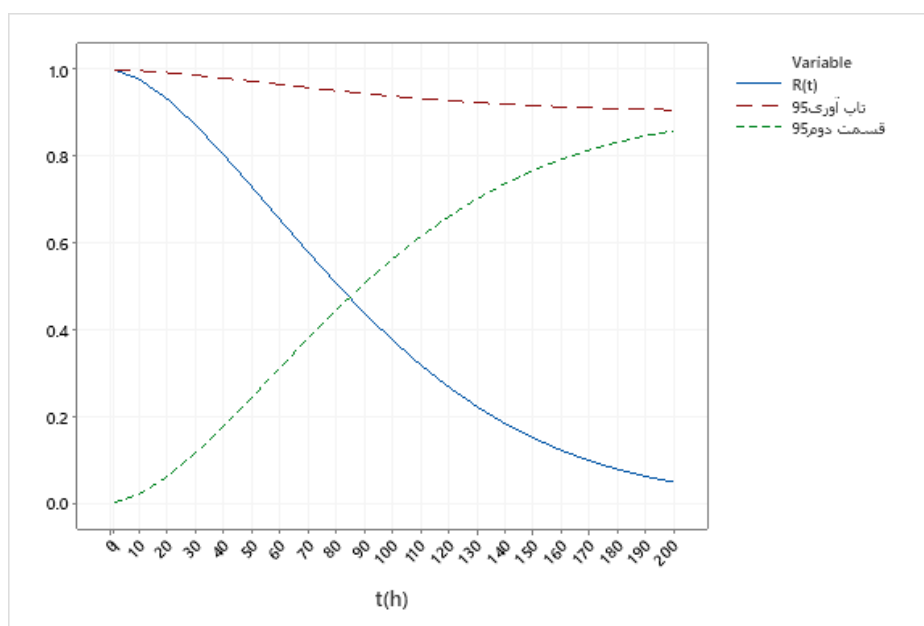
جدول ۵-۱۴- مقادیر تاب آوری نوار نقاله ۱

t	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
R(t)	۰/۹۹۹	۰/۹۷۷	۰/۹۳۱	۰/۸۷۲	۰/۸۰۳	۰/۷۲۹	۰/۶۵۴	۰/۵۷۹	۰/۵۰۷	۰/۴۳۸	۰/۳۷۶
M(t)	۰/۶۶۰	۰/۹۷۵	۰/۹۸۹	۰/۹۹۳	۰/۹۹۵	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸
S(t)	۰/۴۶۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
$\Psi(t)_{80}$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۱	۰/۹۷۵	۰/۹۵۳	۰/۹۲۸	۰/۹۰۲	۰/۸۷۴	۰/۸۴۷	۰/۸۲۱	۰/۷۹۷	۰/۷۷۴
$\Psi(t)_{85}$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۳	۰/۹۸۰	۰/۹۶۳	۰/۹۴۴	۰/۹۲۴	۰/۹۰۳	۰/۸۸۲	۰/۸۶۲	۰/۸۴۳	۰/۸۲۶
$\Psi(t)_{90}$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۵	۰/۹۸۶	۰/۹۷۵	۰/۹۶۱	۰/۹۴۷	۰/۹۳۳	۰/۹۱۹	۰/۹۰۵	۰/۸۹۲	۰/۸۸۰
$\Psi(t)_{95}$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۲	۰/۹۸۶	۰/۹۸۰	۰/۹۷۲	۰/۹۶۵	۰/۹۵۸	۰/۹۵۱	۰/۹۴۴	۰/۹۳۸

منحنی های شکل ۵-۱۳ نشان می دهند که نوار نقاله ۱ از تاب آوری خوبی برخوردار است به طوری که بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت بیش از ۶۰ درصد است یعنی بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت از عملکرد نوار نقاله، به احتمال ۶۰ درصد خرابی های نوار نقاله قابل بازیابی بوده و نوار نقاله می تواند به عملکرد نرمال خود باز گردد. همچنین نمودار نشان می دهد که مقدار تاب آوری برای هر چهار مقدار ۸۰ و ۸۵ و ۹۰ و ۹۵ درصد تاب آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگرمی 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 پیشگرمی و سلامت در میزان تاب آوری نوار پر رنگ تر شده و هر چه مقدار این دو پارامتر بیشتر باشد مقدار تاب آوری نیز بیشتر می شود.



شکل ۵-۱۳- منحنی تاب آوری نوار نقاله ۱



شکل ۵-۱۴- منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب آوری نوار نقاله ۱

شکل ۵-۱۴ میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرمول به کار رفته شده برای محاسبه تاب آوری را نشان می‌دهد. منظور از قسمت دوم ۹۵، حاصل ضرب قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب آوری تشکیلات ۹۵ درصد، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد و  $(1-R(t))$  است. نمودار نشان می‌دهد با اینکه مقدار قسمت دوم فرمول بسیار کم است ولی به دلیل مقدار قابلیت اطمینان بالای نوار نقاله ۱، مقدار تاب آوری نیز در سطح بالایی قرار می‌گیرد.

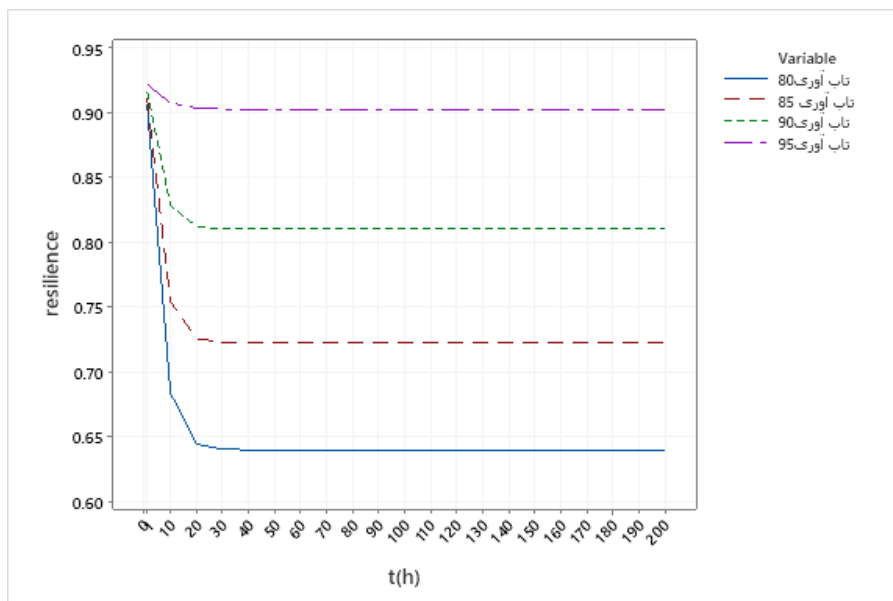
## ۵-۴-۲- تاب‌آوری نوار نقاله ۲ ماشین حفار خط دو مترو تبریز

با در اختیار داشتن مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای نوار نقاله ۲ و بر اساس رابطه (۵-۱۹)، تاب‌آوری نوار نقاله ۲ محاسبه می‌شود. مقادیر تاب‌آوری برای نوار نقاله ۲ در جدول ۵-۱۵ آورده شده است. در این جدول  $\Psi(t)80$  یعنی تاب‌آوری برای حالتی که تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برابر ۸۰ درصد می‌باشد. همچنین شکل ۵-۱۵ منحنی‌های معادل با این جدول برای ۲۰۰ ساعت هستند.

جدول ۵-۱۵- مقادیر تاب‌آوری نوار نقاله ۲

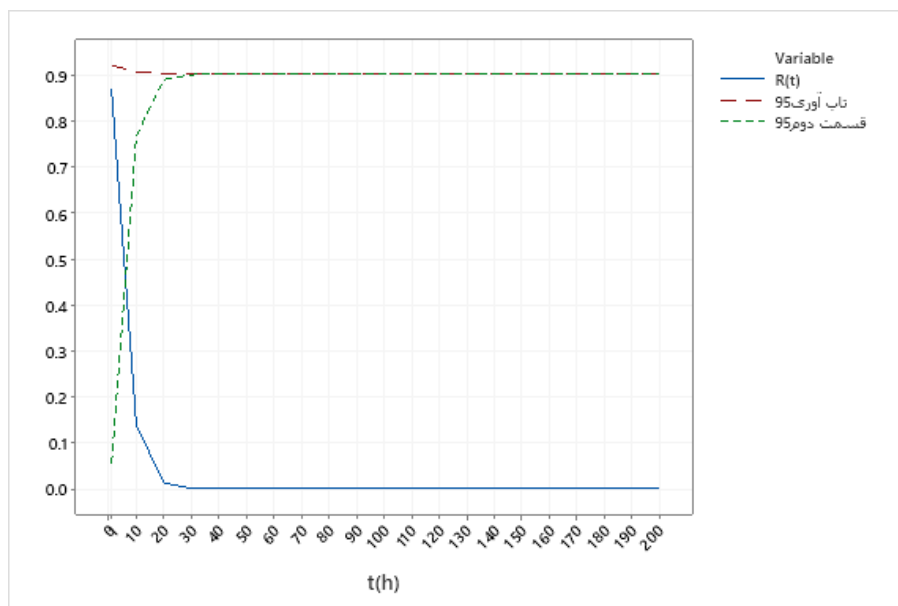
t	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
R(t)	۰/۸۶۸	۰/۱۳۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۶E-۵	۳E-۶	۲E-۷	۱E-۸	۴E-۱۰	۲E-۱۱
M(t)	۰/۹۶۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
S(t)	۰/۴۶۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱
$\Psi(t)80$	۰/۹۰۶	۰/۶۸۳	۰/۶۴۴	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰	۰/۶۴۰
$\Psi(t)85$	۰/۹۱۱	۰/۷۵۳	۰/۷۲۵	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۷۲۲
$\Psi(t)90$	۰/۹۱۶	۰/۸۲۸	۰/۸۱۲	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰
$\Psi(t)95$	۰/۹۲۱	۰/۹۰۷	۰/۹۰۳	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲

منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۲ (شکل ۵-۱۵) نشان می‌دهد این نوار نقاله با تاب‌آوری بیش از ۹۰ درصد در ساعات اولیه، کار خود را آغاز می‌کند و با گذشت زمان این تاب‌آوری با شیب کندی کاهش می‌یابد به طوری که بعد از گذشت حدود ۶۰ ساعت به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد و بعد از آن ثابت می‌ماند. این ثبات در مقدار تاب‌آوری به این دلیل ایجاد می‌شود که نوار نقاله ۲ به دلیل سادگی و جزئی بودن تعمیرات از قابلیت پشتیبانی و قابلیت تعمیرپذیری بالایی برخوردار بوده و بعد از گذشت حدود ۶ ساعت تمام خرابی‌های آن برطرف می‌گردند.



شکل ۵-۱۵- منحنی تاب آوری نوار نقاله ۲

شکل ۵-۱۶ میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرمول به کار رفته شده برای محاسبه تاب آوری را نشان می دهد. منظور از قسمت دوم ۹۵، حاصل ضرب قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب آوری تشکیلات ۹۵ درصد، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد و  $(1-R(t))$  است.



شکل ۵-۱۶- منحنی تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب آوری نوار نقاله ۲

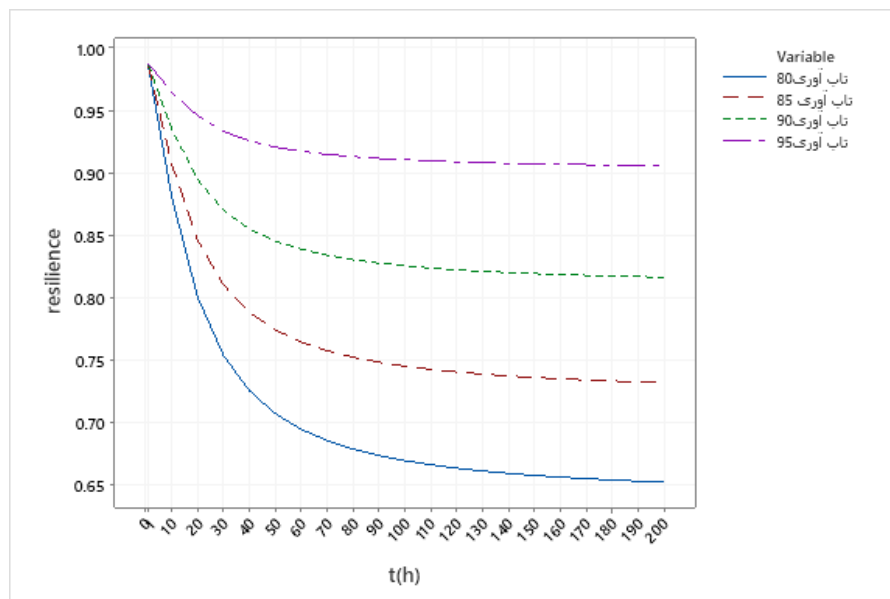
### ۵-۴-۳- تاب آوری نوار نقاله ۳ ماشین حفار خط دو مترو تبریز

با در اختیار داشتن مقادیر قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب آوری تشکیلات و

کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برای نوار نقاله ۳ و بر اساس رابطه (۵-۱۹)، تاب‌آوری نوار نقاله ۳ محاسبه می‌شود. مقادیر تاب‌آوری برای نوار نقاله ۳ در جدول ۵-۱۶ آورده شده است. در این جدول  $\Psi(t)80$  یعنی تاب‌آوری برای حالتی که تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت برابر ۸۰ درصد می‌باشد. همچنین شکل ۵-۱۷ منحنی‌های معادل با این جدول برای ۲۰۰ ساعت هستند.

جدول ۵-۱۶- مقادیر تاب‌آوری نوار نقاله ۳

t	۱	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
R(t)	۰/۹۸۰	۰/۶۷۵	۰/۴۴۵	۰/۳۱۵	۰/۲۳۶	۰/۱۸۵	۰/۱۵۰	۰/۱۲۵	۰/۱۰۶	۰/۰۹۲	۰/۰۸۰
M(t)	۰/۸۸۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
S(t)	۰/۴۶۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
$\Psi(t)80$	۰/۹۸۵	۰/۸۸۰	۰/۸۰۰	۰/۷۵۳	۰/۷۲۵	۰/۷۰۶	۰/۶۹۴	۰/۶۸۵	۰/۶۷۸	۰/۶۷۳	۰/۶۶۹
$\Psi(t)85$	۰/۹۸۶	۰/۹۰۷	۰/۸۴۵	۰/۸۰۹	۰/۷۸۸	۰/۷۷۴	۰/۷۶۴	۰/۷۵۷	۰/۷۵۲	۰/۷۴۸	۰/۷۴۴
$\Psi(t)90$	۰/۹۸۶	۰/۹۳۵	۰/۸۹۴	۰/۸۶۹	۰/۸۵۴	۰/۸۴۵	۰/۸۳۸	۰/۸۳۳	۰/۸۳۰	۰/۸۲۷	۰/۸۲۵
$\Psi(t)95$	۰/۹۸۷	۰/۹۶۴	۰/۹۴۵	۰/۹۳۳	۰/۹۲۵	۰/۹۲۰	۰/۹۱۷	۰/۹۱۴	۰/۹۱۲	۰/۹۱۱	۰/۹۱۰

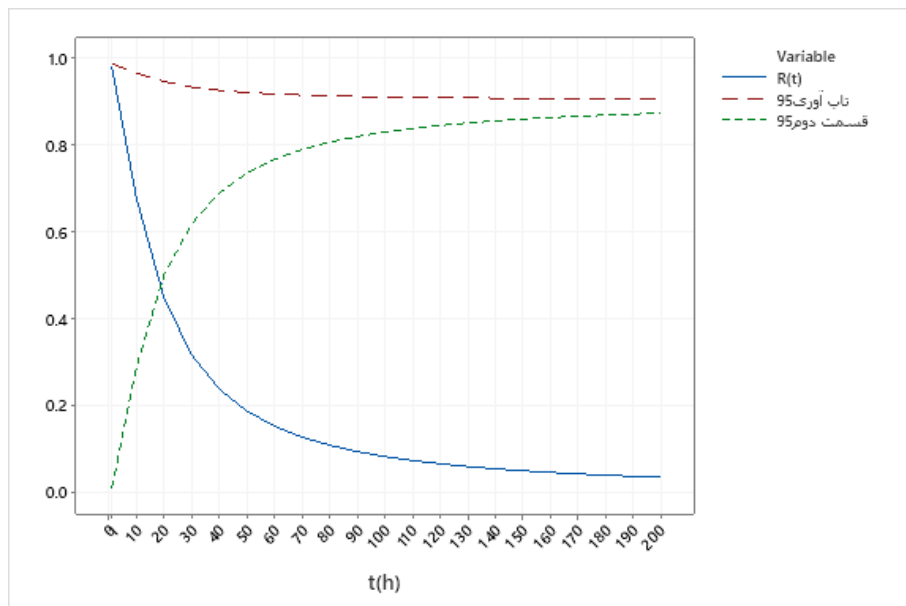


شکل ۵-۱۷- منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۳

منحنی تاب‌آوری نوار نقاله ۳ (شکل ۵-۱۷) نشان می‌دهد که تاب‌آوری این نوار نیز همانند دو نوار دیگر بالا می‌باشد. مقدار تاب‌آوری برای این نوار در ساعات اولیه کار حدود ۹۸ درصد بوده که با گذشت زمان با شیب کندی در حال کاهش است به طوری که بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت این مقدار بیش از ۶۵ درصد است. همچنین نمودار نشان می‌دهد، نقش تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت با

گذشت زمان بیشتر شده و تفاوت بیشتری در مقدار تاب‌آوری ایجاد می‌کند به طوری که در ساعت اولیه کار مقدار تاب‌آوری ۸۰ و ۹۵ به ترتیب برابر ۰/۹۸۵ و ۰/۹۸۷ بوده و بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت از شروع کار این مقادیر برابر با ۰/۶۵۱ و ۰/۹۰۵ است.

شکل ۵-۱۸ میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرمول به کار رفته شده برای محاسبه تاب‌آوری را نشان می‌دهد. منظور از قسمت دوم ۹۵، حاصل ضرب قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی، تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد، کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت ۹۵ درصد و  $(1-R(t))$  است. تاب‌آوری حاصل جمع  $R(t)$  و قسمت دوم ۹۵ است.

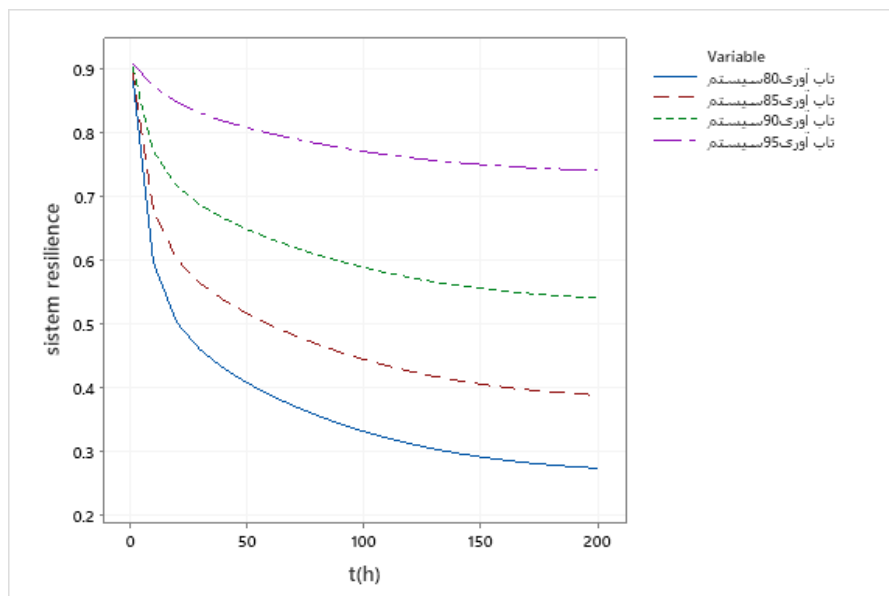


شکل ۵-۱۸- تأثیر پارامترهای فرمول بر تاب‌آوری نوار نقاله ۳

تاب‌آوری کل سیستم با توجه به سری قرار گرفتن نوار نقاله از رابطه (۵-۲۰) محاسبه می‌شود.

$$\Psi_{system}(t) = \Psi_1(t) \cdot \Psi_2(t) \cdot \Psi_3(t) \quad (۵-۲۰)$$

منحنی تاب‌آوری کل سیستم (شکل ۵-۱۹) نشان می‌دهد تاب‌آوری سیستم زمانی که کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت و تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد است در بالاترین سطح خود قرار می‌گیرد. مقدار تاب‌آوری ۹۵ بعد از ۲۰۰ ساعت بیش‌تر از حدود ۷۰ درصد است در حالی مقدار تاب‌آوری ۸۰ بعد از ۲۰۰ ساعت کم‌تر از ۳۰ درصد خواهد بود.



شکل ۵-۱۹- منحنی تاب آوری کل سیستم نوار نقاله‌ها

## ۵-۵- بحث و نتیجه‌گیری

قابلیت اطمینان نوار نقاله ۱ در سطح بالاتری نسبت به دو نوار دیگر قرار دارد که علت آن استفاده از اسکرو (نقاله پیچشی) و کیف برای خوراک‌دهی به آن است زیرا استفاده از اسکرو و کیف باعث وارد شدن ضربات کم‌تر به نوار نقاله شده و در نتیجه خرابی‌ها کم‌تر اتفاق می‌افتند. اما در مورد نوار نقاله دو به دلیل عدم استفاده از این تجهیزات، شوت نوار نقاله ۱ به ۲ زیاد شده و بار با ضربه‌های بیشتر به نوار نقاله ۲ انتقال می‌یابد که باعث خرابی بیشتر نوار ۲ به خصوص خرابی رولیک‌های آن شده است و به این دلیل قابلیت اطمینان نوار دو از بقیه کم‌تر بوده و به سرعت کاهش می‌یابد. از آنجا که ماشین TBM پیوسته باید در حال کار باشد و از توقف بیش از اندازه آن جلوگیری شود لذا امکان استفاده از تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه وجود ندارد و به همین دلیل قابلیت اطمینان هر سه نوار به سرعت کاهش پیدا می‌کند. اما در مورد تعمیرپذیری نوارها، از آنجا که اکثر خرابی‌های نوار نقاله ۲ مربوط به رولیک آن است لذا تعمیرات آن ساده و جزئی بوده و زمان کمی را می‌طلبد که این موضوع باعث تعمیرپذیری بالای نوار نقاله ۲ نسبت به سایر نوار نقاله‌ها شده است. در بحث تاب آوری نوار نقاله‌ها نیز تاب آوری نوار نقاله ۱ به دلیل برخورداری از قابلیت اطمینان بالاتر نسبت به سایر نوار نقاله‌ها، در سطح بالاتری قرار دارد که نشان از تأثیر بالای قابلیت اطمینان

در بحث تاب‌آوری دارد. تاب‌آوری کل سیستم نوار نقاله نیز به دلیل سری بودن نوارها، در سطح پایین‌تری نسبت به تاب‌آوری هر یک از نوارها قرار دارد زیرا در حالت سری از کار افتادگی حتی یک زیر سیستم باعث اختلال و توقف کل سیستم خواهد شد.

## ۵-۶- جمع‌بندی

در این فصل به تحلیل داده‌ها و محاسبه قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و پشتیبانی و همچنین تاب‌آوری نوار نقاله‌ها پرداخته شد. تحلیل قابلیت اطمینان نوار نقاله‌ها نشان داد که نوار نقاله ۱ بیشترین و نوار نقاله ۲ کم‌ترین میزان قابلیت اطمینان را دارا هستند. همچنین تحلیل تعمیرپذیری نوار نقاله‌ها نشان داد که نوار نقاله ۱ کم‌ترین و نوار نقاله ۲ بیشترین میزان تعمیرپذیری را دارد. قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌ها به دلیل شباهت نوار نقاله‌ها از نظر نوع، قطعات یدکی، انبارداری و ... یکسان است. همچنین تحلیل تاب‌آوری سیستم‌نوار نقاله‌ها نشان داد که سیستم نوار نقاله ماشین حفار تونل مترو خط دو تبریز، 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.



## ع- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- مقدمه

با توجه به افزایش روز افزون جمعیت در شهرهای بزرگ و نیاز بیش از پیش به سامانه‌های حمل و نقل مختلف، از جمله سامانه‌های ریلی مانند مترو، این سامانه‌ها در کشور ما در حال افزایش می‌باشند. شهر تبریز نیز به عنوان یکی از شهرهای بزرگ و صنعتی کشور از این قاعده مستثنی نیست. از آنجا که حفر تونل‌های مترو با دستگاه TBM از مزایایی مانند، حفاری با کیفیت و سرعت بالا، ایمنی بسیار زیاد برای پرسنل و کم‌ترین تأثیرات زیست محیطی، استفاده از این دستگاه برای حفر تونل به سرعت در حال افزایش است. از آنجا که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی این دستگاه بسیار زیاد است، همواره باید مطالعات دقیقی بر روی اطلاعات خرابی و تعمیر این دستگاه‌ها انجام شود. در این پایان‌نامه با بررسی این اطلاعات و محاسبه پارامترهایی همچون قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، پش‌تیبانی، تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت، در نهایت تاب‌آوری نوار نقاله‌های دستگاه TBM تونل مترو خط دو تبریز محاسبه شد. در این فصل نتایج حاصل از این پایان‌نامه ارائه شده است.

## ۶-۲- نتایج

به طور کلی نتایج حاصل از این پایان‌نامه به شرح زیر هستند:

❖ در این پایان‌نامه از فرمول (۵-۱۹) برای محاسبه تاب‌آوری نوار نقاله ماشین حفار تونل مترو خط دو تبریز استفاده شد. همچنین برای انجام تحلیل‌ها در این پایان‌نامه از نرم‌افزار minitab19 استفاده شده است. همچنین در این پایان‌نامه برای محاسبه RMS از روش تحلیل آماری استفاده شده است. اساس این روش انجام آزمون روند و همبستگی سری است. در این پایان‌نامه آزمون روند توسط چهار آزمون کتابچه نظامی، لاپلاس، اندرسون - دارلینگ و من - کندال صورت پذیرفت. مقدار تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت نیز برای مقادیر ۸۰ تا ۹۵ درصد تحلیل حساسیت شد.

❖ تحلیل پارتو نوار نقاله‌ها مشخص کرد که نوار نقاله ۲ از بیشترین میزان خرابی در بین سایر نوار نقاله‌ها برخوردار است. همچنین در بین انواع خرابی‌های هر نوار، آیتم رولیک برای هر سه نوار نقاله دارای بیشترین میزان خرابی بوده است.

❖ نتایج آزمون‌های روند برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۱ نشان داد که در داده‌ها روند وجود دارد. لذا داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) تبعیت می‌کنند. نتایج آزمون روند برای داده‌های خرابی نوار نقاله ۲ نشان داد که در داده‌ها روند وجود ندارد. نتیجه آزمون خودهمبستگی نیز نشان داد همبستگی سری بین داده‌ها وجود ندارد. نتایج تحلیل داده‌های خرابی نشان داد که تابع توزیع ویبول دو پارامتری دارای کمترین مقدار AD برابر با  $3/921$  در میان سایر توابع توزیع می‌باشد و بنابراین بهترین تابع برازش بر این داده‌ها می‌باشد. نتایج آزمون‌های روند و خود همبستگی سری بر روی داده‌های خرابی برای نوار نقاله ۳ نیز نشان داد که داده‌ها روند و همبستگی سری ندارند و لذا تابع توزیع لاگ لجستیک دو پارامتری با کمترین مقدار AD برابر با  $0/505$  بهترین برازش را بر داده‌ها دارد.

❖ تحلیل قابلیت اطمینان نوار ۱ نشان داد که این نوار از بیشترین میزان قابلیت اطمینان در بین سایر نوارها برخوردار است به طوری که قابلیت اطمینان ۵۰ درصد برای این نوار بعد از گذشت ۸۰ ساعت به وجود می‌آید. همچنین مطالعه رفتار خرابی این نوار نیز نشان دهنده تنزل دستگاه با گذشت زمان است. تحلیل قابلیت اطمینان نوار نقاله ۲ نشان داد این نوار دارای کمترین میزان قابلیت اطمینان در بین سایر نوارها است به طوری که قابلیت اطمینان ۵۰ درصد برای این نوار تنها بعد از گذشت حدود ۴ ساعت رخ می‌دهد. مطالعه رفتار خرابی نیز نشان دهنده تنزل نوار با گذشت زمان است. تحلیل قابلیت اطمینان نوار نقاله ۳ نشان داد که قابلیت اطمینان این نوار بعد از گذشت ۲۵ ساعت به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. مطالعه نرخ خرابی نیز نشان داد که نرخ خرابی نوار نقاله ۳ تا حدود ۲۰ ساعت بعد از شروع کار در حال افزایش بوده ولی بعد از آن رو به کاهش می‌رود یعنی نوار تا حدود ۲۰ ساعت بعد از شروع کار در حال تنزل و بعد از آن رو به بهبود است.

❖ نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری برای داده‌های تعمیر نوار نقاله ۱ نشان داد که در این داده‌ها روند و همبستگی سری وجود ندارد. تحلیل‌ها نشان داد تابع توزیع لاگ لجستیک سه پارامتری دارای کم‌ترین مقدار AD برابر با ۱/۰۹ در بین سایر توابع می‌باشد و لذا بهترین برازش را بر داده‌ها دارد. نتایج آزمون‌های روند بر روی داده‌های تعمیر نوار نقاله ۲ نشان داد که در این داده‌ها روند وجود دارد و لذا داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) تبعیت می‌کنند. نتایج آزمون‌های روند و همبستگی سری بر روی داده‌های تعمیر نوار نقاله ۳ نیز نشان داد که در این داده‌ها روند و همبستگی سری وجود ندارد لذا تابع توزیع لاگ لجستیک دو پارامتری با AD برابر با ۱/۰۹۸ بهترین برازش را بر این داده‌ها دارد.

❖ تحلیل تعمیرپذیری نوار نقاله ۱ نشان داد نوار نقاله ۱ کمترین میزان تعمیرپذیری را در بین سایر نوارها بوده به طوری که مدت زمان لازم برای تعمیر کلیه خرابی‌های اتفاق افتاده در این نوار نقاله بیشتر از ۲۰۰ ساعت بوده که زمان زیادی است هرچند که با احتمال حدود ۹۰ درصد، تعمیرات در مدت زمان حداکثر ۳ ساعت صورت می‌گیرد و نوار به فعالیت خود ادامه می‌دهد. تحلیل نرخ تعمیر نوار ۱ هم نشان دهنده کاهش تعداد تعمیر در ساعت برای نوار ۱ با گذشت زمان است. تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نوار ۲ نشان داد نوار نقاله ۲ بیشترین میزان تعمیرپذیری را در بین سایر نوارها داراست به طوری که حداکثر ۶ ساعت زمان لازم است تا تمام خرابی‌های نوار نقاله ۲ ماشین حفار خط دو مترو تبریز تعمیر گردند. با وجود تعداد زیاد خرابی در نوار نقاله ۲ نسبت به سایر نوار نقاله‌ها و با توجه به نمودار تعمیرپذیری آن مشخص می‌شود که تعمیرات این نوار نقاله ساده و جزئی بوده و در زمان نسبتاً کوتاهی انجام می‌شوند. تحلیل نرخ تعمیر این نوار نشان داد که نرخ تعمیر با گذشت زمان کاهشی بوده و بعد از گذشت حدود ۲ ساعت تقریباً به صفر می‌رسد. تحلیل قابلیت تعمیرپذیری نوار نقاله ۳ نشان داد که برای تعمیر تمام خرابی‌های نوار نقاله ۳ بیش از ۲۰۰ ساعت زمان لازم است اما در ۵۰ درصد حالات، تعمیرات این نوار نقاله در مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه صورت می‌گیرد و در بیش از ۹۰ درصد حالات حداکثر ۲ ساعت طول می‌کشد تا خرابی‌ها بر طرف گردند. تحلیل نرخ

تعمیر این نوار نیز نشان از کاهش نرخ تعمیر با گذشت زمان برای این نوار دارد.

❖ قابلیت پشتیبانی هر سه نوار نقاله به دلیل برخورداری از انبارداری و قطعات یدکی یکسان، یکسان بوده و از یک نوع تابع توزیع پیروی می‌کنند. نتایج آزمون‌های روند بر روی داده‌های تحویل نوار نقاله‌ها نشان داد که در این داده‌ها روند وجود دارد و لذا داده‌ها از فرآیند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توان) تبعیت می‌کنند.

❖ تحلیل قابلیت پشتیبانی نوار نقاله‌ها نشان می‌دهد که این نوارها از قابلیت پشتیبانی خوبی برخوردارند. حدود ۴۰ ساعت زمان لازم است تا تمام قطعات، تجهیزات و پرسنل مورد نیاز برای تعمیر نوارها مهیا شود با این حال بیش از ۹۰ درصد تجهیزات، قطعات و پرسنل در کمتر از ۵ ساعت مهیا می‌شوند و به تعمیرات پرداخته می‌شود.

❖ تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله ۱ نشان داد که این نوار از تاب‌آوری خوبی برخوردار است به طوری که بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت بیش از ۶۰ درصد است یعنی بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت از عملکرد نوار نقاله، به احتمال ۶۰ درصد خرابی‌های نوار نقاله قابل بازیابی بوده و نوار نقاله می‌تواند به عملکرد نرمال خود باز گردد. همچنین تحلیل‌ها نشان داد که اهمیت تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت با گذشت زمان بیشتر شده و نقش آن در تعیین مقدار تاب‌آوری پر رنگ‌تر شده است. تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله ۲ ما شین حفار خط دو مترو تبریز نشان داد که تاب‌آوری این نوار بعد از گذشت حدود ۶۰ ساعت ثابت می‌شود. دلیل این امر سادگی و جزئی بودن تعمیرات نوار نقاله ۲ می‌باشد به طوری که با توجه به نمودار قابلیت تعمیرپذیری این نوار بعد از گذشت حدود ۶ ساعت تمام خرابی‌های آن برطرف می‌گردند. تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله ۳ نیز نشان از تاب‌آوری بالای این نوار در طول زمان دارد به طوری که مقدار تاب‌آوری برای این نوار در ساعات اولیه کار حدود ۹۸ درصد است که با گذشت زمان با شیب کندی در حال کاهش است به طوری که بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت این مقدار بیش از ۶۵ درصد است.

❖ تحلیل تاب‌آوری کل سیستم نوار نقاله‌ها نشان داد تاب‌آوری سیستم زمانی که کارایی فناوری

مدیریت پیشگیری و سلامت و تاب‌آوری تشکیلات ۹۵ درصد می‌باشد در بالاترین سطح خود قرار می‌گیرد. مقدار تاب‌آوری ۹۵ بعد از ۲۰۰ ساعت بیش‌تر از حدود ۷۰ درصد می‌باشد در حالی مقدار تاب‌آوری ۸۰ بعد از ۲۰۰ ساعت کم‌تر از ۳۰ درصد خواهد بود. لذا نقش این دو پارامتر در تعیین مقدار تاب‌آوری در اینجا نیز به خوبی مشهود می‌باشد.

❖ تحلیل تاب‌آوری نوار نقاله‌ها نقاط ضعف و قوت آنها را مشخص کرد. با اضافه کردن کیف برای خوراک‌دهی نوار نقاله ۲ خرابی‌های آن کم‌تر شده و در نتیجه قابلیت اطمینان و به طبع آن تاب‌آوری آن افزایش می‌یابد. همچنین با انجام تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و استفاده از پرسنل تعمیر و نگهداری مجرب قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری نوارها بیشتر شده که این امر باعث افزایش تاب‌آوری می‌شود.

## ۳-۶- پیشنهادات

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

❖ در این پایان‌نامه مقدار تاب‌آوری تشکیلات و کارایی فناوری مدیریت پیشگیری و سلامت با توجه به نظر کارشناسان و اساتید مجرب برای مقادیر ۸۰ تا ۹۵ درصد تحلیل حساسیت شد. پیشنهاد می‌شود که این مقادیر به صورت دقیق محاسبه شود و در محاسبات مدنظر قرار گیرند.

❖ در این پایان‌نامه به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات انبارداری و تحویل برای محاسبه TTD، طبق نظر کارشناسان و اساتید مجرب از ۱۰ درصد داده‌های تعمیر استفاده شد. پیشنهاد می‌شود این مقدار برای درصدهای دیگری نیز محاسبه شده و در محاسبات وارد شود.

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

❖ در این پایان نامه برای انجام تحلیل ها از نرم افزار minitab19 استفاده شد. پیشنهاد می شود برای انجام تحلیل ها از نرم افزارهای دیگری همچون EasyFit و R استفاده شود و نتایج آن با این پایان نامه مقایسه شود.

❖ در این پایان نامه از رابطه (۵-۱۹) برای محاسبه تاب آوری سیستم 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.

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

# فہرست منابع



- [۱] ح. امینی، "مدل سازی قابلیت اطمینان، دسترس و تعمیر و نگهداری ماشین های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین،" دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۵.
- [۲] م. عطایی، ر. نوروزی، ع. متحدی، "مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۳] S. Hosseini, K. Barker, and J. E. Ramirez-Marquez, "A review of definitions and measures of system resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 145, pp. 47-61, 2016.
- [۴] F. Aminifar and M. Farhoumandi, "Concepts and Fundamentals of Resilience Assessment in Electric Power Grids," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Research vol. 15, no. 3, pp. 83-91, 2018.
- [۵] ع. متحدی، ف. سرشکی، م. عطایی، ع. برآبادی، ع. نوری، "تحلیل تاب آوری سیستم استخراج معدن (مطالعه موردی: معدن مس سونگون)،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۶] Y. Y. Haimes, "On the definition of resilience in systems," *Risk Analysis: An International Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 498-501, 2009.
- [۷] K. Barker *et al.*, "Defining resilience analytics for interdependent cyber-physical-social networks," *Sustainable and Resilient Infrastructure*, vol. 2, no. 2, pp. 59-67, 2017.
- [۸] م. رضایی، "بررسی و انتخاب ماشین حفار تونل (TBM) مناسب بر حسب پارامترهای ژئوتکنیکی و زمین شناسی مهندسی (مطالعه موردی تونل زمستانه فریدونشهر اصفهان)،" دولتی - وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری - دانشگاه یزد - دانشکده علوم پایه، ۱۳۹۵.
- [۹] ک. شهریار، "مبانی حفاری مکانیکی و کاربرد آن در حفار تونل،" نهمین همایش ملی تونل، ۱۳۹۰. Available: <https://civilica.com/doc/127920>
- [۱۰] A. Pregoner, "Systems resilience: a new analytical framework for nuclear nonproliferation," *Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories*, 2011.
- [۱۱] م. قنبری، "مدلسازی عوامل مهندسی تاب آوری با استفاده از نقشه شناختی فازی و تاپسیس فازی،" پردیس علوم انسانی واجتماعی، دانشگاه یزد، ۱۳۹۵.
- [۱۲] C. S. Holling, "Resilience and stability of ecological systems," *Annual review of ecology and systematics*, vol. 4, no. 1, pp. 1-23, 1973.
- [۱۳] B. Allenby and J. Fink, "Social and ecological resilience: Toward inherently secure and resilient societies," *Science*, vol. 24, no. 3, pp. 347-364, 2000.
- [۱۴] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau, "Seismic resilience of a hospital system," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 6, no. 1-2, pp. 127-144, 2010.
- [۱۵] E. D. Vugrin, D. E. Warren, M. A. Ehlen, and R. C. Camphouse, "A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems," in *Sustainable and resilient critical infrastructure systems*: Springer, 2010, pp. 77-116.
- [۱۶] E. Hollnagel, "Prologue: the scope of resilience engineering," *Resilience engineering in practice: A guidebook*, pp. xxix-xxxix, 2011.
- [۱۷] S. L. Cutter *et al.*, "Disaster Resilience: A National Imperative," *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 55, no. 2, pp. 25-29, 2013/03/01 2013.
- [۱۸] N. Yodo and P. Wang, "Engineering resilience quantification and system design implications: A literature survey," *Journal of Mechanical Design*, vol. 138, no. 11, 2016.
- [۱۹] D. Kamissoko *et al.*, "Continuous and multidimensional assessment of resilience based on functionality analysis for interconnected systems," *Structure and Infrastructure*

- Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 427-442, 2019.
- [۲۰] D. Henry and J. E. Ramirez-Marquez, "Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 99, pp. 114-122, 2012.
- [۲۱] M. Bruneau *et al.*, "A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities," *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 733-752, 2003.
- [۲۲] A. Rose, "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environmental Hazards*, vol. 7, no. 4, pp. 383-398, 2007.
- [۲۳] J. C. Whitson and J. E. Ramirez-Marquez, "Resiliency as a component importance measure in network reliability," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, no. 10, pp. 1685-1693, 2009.
- [۲۴] B. D. Youn, C. Hu, and P. Wang, "Resilience-driven system design of complex engineered systems," *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, no. 10, 2011.
- [۲۵] B. Rød, A. Barabadi, and O. T. Gudmestad, "Characteristics of Arctic Infrastructure Resilience: Application of Expert Judgement," in *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2016: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [۲۶] B. M. Ayyub, "Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making," *Risk analysis*, vol. 34, no. 2, pp. 340-355, 2014.
- [۲۷] B. Cai, M. Xie, Y. Liu, Y. Liu, and Q. Feng, "Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 172, pp. 216-224, 2018.
- [۲۸] Y. Jackson, P. Tabbagh, P. Gibson, and E. Seglie, "The new Department of Defense (DoD) guide for achieving and assessing RAM," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings.*, 2005, pp. 1-7: IEEE.
- [۲۹] B. Ghodrati, U. Kumar, and D. Kumar, "Product support logistics based on product design characteristics and operating environment," in *Annual International Logistics Conference and Exhibition: 12/08/2003-14/08/2003*, 2003: Society of Logistics Engineers.
- [۳۰] J. Barabady, T. Markeset, and U. Kumar, "Review and discussion of production assurance program," *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2010.
- [۳۱] A. Birolini, *Reliability engineering: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [۳۲] B. S. Dhillon, *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC press, 2006.
- [۳۳] R. F. Stapelberg, *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [۳۴] H. Pham, *Springer handbook of engineering statistics*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [۳۵] D. Kececioglu, *Reliability engineering handbook*. DEStech Publications, Inc, 2002.
- [۳۶] C. E. Ebeling, *An introduction to reliability and maintainability engineering*. McGraw-Hill, 2010.
- [۳۷] M. Rausand, A. Barros, and A. Hoyland, *System reliability theory: models, statistical*

- methods, and applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [۳۸] A. W. Marshall and I. Olkin, *Life distributions*. Springer, 2007.
- [۳۹] D. J. Smith, *Reliability, maintainability and risk*. Elsevier, 2005.
- [۴۰] B. S. Dhillon, *Design reliability: fundamentals and applications*. CRC press, 1999.
- [۴۱] A. Gharahasanloo, R. Khalokakaie, M. Ataei, and M. Mokhberdorran, "Mining Spare Parts Provision by Reliability Analysis, Case Study: Sungun Copper Mine," *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, vol. 8, pp. 25-38, 06/01 2018.
- [۴۲] J. Barabady and U. Kumar, "A method for managing the availability improvement efforts," in *Engineering Asset Management*: Springer, pp. 445-451, 2006.
- [۴۳] س. ه. حسینی, "مدل سازی و شبیه سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه مطالعه موردی معدن زغال سنگ طبس," دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۰.
- [۴۴] W. Q. Meeker and L. A. Escobar, *Statistical methods for reliability data*. John Wiley & Sons, 1998.
- [۴۵] S. Jalali and S. Forouhandeh, "Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction," *Safety science*, vol. 49, no. 5, pp. 664-669, 2011.
- [۴۶] J.-j. Jiang, L. Zhang, Y.-q. Wang, Y.-y. Peng, K. Zhang, and W. He, "Markov reliability model research of monitoring process in digital main control room of nuclear power plant," *Safety science*, vol. 49, no. 6, pp. 843-851, 2011.
- [۴۷] A. Lisnianski, D. Elmakias, D. Laredo, and H. B. Haim, "A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit," *Reliability engineering & system safety*, vol. 98, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [۴۸] P. Do Van, A. Barros, and C. Bérenguer, "From differential to difference importance measures for Markov reliability models," *European Journal of Operational Research*, vol. 204, no. 3, pp. 513-521, 2010.
- [۴۹] A. N. Gharahasanlou, M. Ataei, R. Khalokakaie, A. Barabadi, and V. Einian, "Risk based maintenance strategy: a quantitative approach based on time-to-failure model," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 8, no. 3, pp. 602-611, 2017.
- [۵۰] U. Kumar, "Reliability analysis of load-haul-dump machines," Luleå tekniska universitet, 1990.
- [۵۱] C. Chen, "CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature," *Journal of the American Society for information Science and Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 359-377, 2006.
- [۵۲] K. H. Orwin and D. A. Wardle, "New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 36, no. 11, pp. 1907-1912, 2004.
- [۵۳] J. Ash and D. Newth, "Optimizing complex networks for resilience against cascading failure," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 380, pp. 673-683, 2006.
- [۵۴] S. L. Cutter *et al.*, "A place-based model for understanding community resilience to natural disasters," *Global environmental change*, vol. 18, no. 4, pp. 598-606, 2008.
- [۵۵] J. H. Kahan, A. C. Allen, and J. K. George, "An operational framework for resilience," *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, vol. 6, no. 1, 2009.

- [Δϕ] J. Wang, F. Gao, and W. Ip, "Measurement of resilience and its application to enterprise information systems," *Enterprise Information Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 215-223, 2010.
- [Δϗ] C. W. Zobel, "Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience," *Decision Support Systems*, vol. 50, no. 2, pp. 394-403, 2011.
- [Δλ] J. P. Sterbenz, E. K. Cetinkaya, M. A. Hameed, A. Jabbar, and J. P. Rohrer, "Modelling and analysis of network resilience," in *2011 Third International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2011)*, 2011, pp. 1-10: IEEE.
- [Δϑ] P. V. R. De Carvalho, "The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 11, pp. 1482-1498, 2011.
- [ϕ⋅] A. Cox, F. Prager, and A. Rose, "Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics," *Transport policy*, vol. 18, no. 2, pp. 307-317, 2011.
- [ϕϧ] S. K. Kafle, "Measuring disaster-resilient communities: a case study of coastal communities in Indonesia," *Journal of business continuity & emergency planning*, vol. 5, no. 4, pp. 316-326, 2012.
- [ϕϘ] M. Ouyang, L. Dueñas-Osorio, and X. Min, "A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems," *Structural safety*, vol. 36, pp. 23-31, 2012.
- [ϕϙ] T. Taşan-Kok, D. Stead, and P. Lu, "Conceptual overview of resilience: history and context," in *Resilience thinking in urban planning*: Springer, pp. 39-51, 2013.
- [ϕϠ] J. Li and Z. Xi, "Engineering recoverability: A new indicator of design for engineering resilience," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2014, vol. 46315, p. V02AT03A044: American Society of Mechanical Engineers.
- [ϕΔ] D. D. Woods, "Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 141, pp. 5-9, 2015.
- [ϕϞ] H.-w. Huang and D.-m. Zhang, "Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 51, pp. 301-312, 2016.
- [ϕϗ] N. Urruty, D. Tailliez-Lefebvre, and C. Huyghe, "Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review," *Agronomy for sustainable development*, vol. 36, no. 1, p. 15, 2016.
- [ϕλ] I. Macuzić, D. Tadić, A. Aleksić, and M. Stefanović, "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*, vol. 40, pp. 122-130, 2016.
- [ϕϑ] Z. Wang, M. S. Nistor, and S. W. Pickl, "Analysis of the definitions of resilience," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 10649-10657, 2017.
- [ϗ⋅] T. Bostick, E. B. Connelly, J. H. Lambert, and I. Linkov, "Resilience science, policy and investment for civil infrastructure," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 175, pp. 19-23, 2018.
- [ϗϧ] H. Baroud and K. Barker, "A Bayesian kernel approach to modeling resilience-based network component importance," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 170, pp. 10-19, 2018.

- [۷۳] F. H. Jufri, V. Widiputra, and J. Jung, "State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1049-1065, 2019.
- [۷۳] ع. متحدی، ف. سرشکی، م. عطایی، ع. برآبادی، ع. نوری، "شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی تاب آوری سیستم تهویه معدن،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۷۴] م. محتشم، ح. میرزائی، "ارزیابی انعطاف پذیری مدل تخصیص کامیون در معادن روباز با توجه به خرابی کامیون ها،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۷۵] ن. صابر معاش، ن. اسماعیل زاده، ر. رحمانی، "تأثیر تاب آوری سازمانی بر عملکرد سازمانی در مجتمع سنگ آهن سنگان،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۷۶] م. لطفی، ب. تخم چی، "افزایش تاب آوری دستگاه های سیلابزنی و اسیدزنی مغزه آزمایشگاه سنگ و سیال با رویکرد کاهش هزینه،" همایش ملی مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
- [۷۷] S. H. Hoseinie, S. Heydari, B. Ghodrati, and U. Kumar, "Resilience measurement of longwall machinery," *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, vol. 35, no. 3, 2020.
- [۷۸] Available: <http://tabrizmetro.ir/?PageID=7> (بی تا). سازمان قطار شهری تبریز و حومه، (بی تا).
- [۷۹] S. Ahmadi, S. Moosazadeh, M. Hajihassani, H. Moomivand, and M. Rajaei, "Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling," *Measurement*, vol. 145, pp. 756-764, 2019.
- [۸۰] شهریار. (۱۳۹۶). استمرار عملیات پرشتاب خط دو مترو تبریز با پایان حفاری ایستگاه دوم. Available: <http://www.shahryarnews.ir>
- [۸۱] انجمن تونل ایران، نشریه انجمن تونل ایران، no. 24, pp. 24-32, 1394.
- [۸۲] Available: <https://proeng.ir> مهندس حرفه‌ای. (۲۰۱۷). اجزای اصلی نوار نقاله.
- [۸۳] Available: <https://parsasanat.com> پارسا صنعت. (بی تا). انواع دستگاه نوار نقاله.
- [۸۴] Available: <https://ajzasanat.com/fa/products/pulley/drive-pulley> اجزا صنعت. (بی تا). درام نوار نقاله.
- [۸۵] Available: <http://www.paytakhtsanat.com> پایتخت صنعت. (بی تا). موتور نوار نقاله.
- [۸۶] A. Christer and W. Waller, "Delay time models of industrial inspection maintenance problems," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 35, no. 5, pp. 401-406, 1984.
- [۸۷] Y. Zhan, V. Makis, and A. K. Jardine, "Adaptive state detection of gearboxes under varying load conditions based on parametric modelling," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 1, pp. 188-221, 2006.
- [۸۸] R. B. Chinnam and P. Baruah, "A neuro-fuzzy approach for estimating mean residual life in condition-based maintenance systems," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 20, no. 1-3, pp. 166-179, 2004.
- [۸۹] C.-C. Lin and H.-Y. Tseng, "A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 1-2, pp. 174-179, 2005.

سوستا  
۴۴

پیوست ۱- پایگاه داده‌ای نوار نقاله ۱

شماره	نوع خرابی	TBF(h)	TTR(h)
1	مشکل نوار نقاله ۱ و دوربین اسکرو	19.987	0.250
2	تعویض یک‌درد رولیک ۱ متری در استکر	6.360	0.500
3	رگلاژ درام هرزگرد نوار یک	41.791	1.000
4	تعویض اسکریپ‌های نوار یک	81.765	1.000
5	رگلاژ نوار یک	89.942	0.500
6	درآوردن درام محرک نوار یک جهت آپارات	130.824	2.167
7	عدم چرخش نوار H.K	54.510	0.083
8	تعویض ۳ عدد رولیک زنجیره ای در زیر اسکرو	9.994	0.500
9	عوض کردن قیف زیر هد درایو	8.177	1.667
10	تعویض بغل بند های نوار نقاله یک	63.595	0.500
11	تعویض سیل های نوار نقاله ۱	2.726	0.917
12	رگلاژ نوار ۱	9.085	0.833
13	رگلاژ نوار ۱ و نوار روی دستگاه	19.079	1.000
14	اصلاح بغل بند نوار نقاله	35.432	0.250
15	تعویض دو عدد رولیک ۳۱cm زنجیره ای	10.902	0.250
16	تعویض دو عدد از رولیک‌های زنجیری زیر اسکرو	14.536	0.583
17	تعویض رولیک معیوب نوار نقاله	107.203	0.250
18	تعمیر بغل بندهای نوار ۱	58.144	0.250
19	نصب دو ست کامل رولیک زنجیری در زیر شروپ اسکرو	6.360	0.500
20	تعویض ۳ ردیف از رولیک های زنجیره ای	11.811	0.250
21	بریدن مقداری از بغل بند نوار ۱	0.909	0.167
22	تعویض رولیک معیوب ۱۱۵ در استکر	11.811	0.167
23	اصلاح بغل بندهای نوار ۱	1.817	0.500
24	تعویض رولیکها ۴۶ سانتی	1.817	0.333
25	جوشکاری درب اسکرو و جداره های شوط اسکرو	0.909	0.500
26	اصلاح بغل بندهای زیر دریچه اسکرو	0.909	0.667
27	تعویض رولیک ۴۶ و ۱۱۵ سانتی نوار نقاله	3.634	0.250
28	عدم استارت نوار نقاله	1.817	1.167
29	برشکاری رولیکهای زنجیری زیر نوار ۱	3.634	3.250
30	عدم استارت نوار نقاله	3.634	6.500
31	اصلاح بغل بندهای زیر دریچه اسکرو	0.909	5.833
32	عدم استارت نوار نقاله	26.347	7.667
33	آپارات نوار نقاله(تعویض نوار نو با کهنه)	0.909	7.667
34	باز کردن الکتروموتور نوار یک برای تعمیر	0.909	2.500
35	تعویض سیل آببندی نوار نقاله ۱	12.719	1.000
36	تعمیر و جا اندازی شاسی نوار ۱	2.726	5.083
37	شستشو و تعویض ۲ عدد رولیک	43.608	0.250
38	آببندی و نصب بغل بند	51.785	0.583

0.167	2.726	تعویض دو عدد رولیک رفت	39
0.500	43.608	تعویض بغل بندهای سمت سگمنت نوار یک	40
0.667	1.817	تعویض و تعمیر بغل بندهای زیر دریچه اسکرو	41
0.667	1.817	تعویض و اصلاح شوت زیر دریچه اسکرو	42
0.167	9.085	رگلاژ پاککن نوار یک	43
0.250	18.170	رگلاژ پاککن نوار یک	44
5.667	30.889	ترمیم و آچارکشی پیچ های m8	45
0.417	7.268	ترمیم نوار نقاله بع علت خوردگی	46
4.083	9.085	ترمیم نوار نقاله	47
0.333	3.634	آپارات نوار نقاله	48
0.250	5.451	پارگی بخشی از نوار و آپارات آن	49
0.500	0.909	آپارات نوار نقاله	50
7.333	0.909	جا انداختن رولیک در شاسی	51
1.333	68.138	ساییدگی و خط افتادن نوار نقاله ۱ و اصلاح و ریگلاژ آن	52
0.667	5.451	تعویض ۵ عدد اسکریپر قرمز رنگ	53
1.083	1.817	مشکل رگلاژ نوار نقاله ۱	54

#### پیوست ۲- پایگاه داده‌ای نوار نقاله ۲

شماره	نوع خرابی	TBF(h)	TTR(h)
1	تعویض دو عدد رولیک رفت	1.817	0.250
2	تنظیم نوار نقاله	3.634	0.500
3	تعویض دو عدد رولیک رفت و یکرد رولیک ۱متری	10.902	1.083
4	تعویض یکرد رولیک رفت	3.634	0.167
5	درست کردن گردگیر یاتاقان	7.268	0.833
6	تعویض یکرد رولیک	8.177	0.250
7	تعویض سه عدد رولیک در استکر	1.817	0.167
8	قطع برق	9.994	0.083
9	تعویض یکرد رولیک ۱۱۵ در کاست	9.085	0.333
10	عدم استارت نوار نقاله	19.987	0.083
11	تعویض ۴ عدد رولیک رفت	5.451	0.333
12	توقف نوار به دلیل قطع ارتباط برق	17.262	0.583
13	تعویض رولیک رفت	5.451	0.167
14	تعویض دو عدد رولیک رفت و دو عدد رولیک برگشت	10.902	0.500
15	رگلاژ نوار برگشت از رینگ ۳۰۰ تا ۳۲۰	6.360	0.667
16	تعویض رولیک های رفت رینگ ۱۹۳	4.543	0.500
17	تعویض رولیک های رفت رینگ ۴۲۱	5.451	0.417
18	درست کردن یاتاقان درام وزنه استکر که گریس نمیخورد	9.994	1.000
19	تعویض دو عدد رولیک رفت	0.909	0.250



0.833	11.811	رگلاژ درام یک نوار دو	20
0.333	4.543	کنده شدن قسمتی از آپارات نوار	21
0.167	1.817	قطع برق نوار نقاله	22
0.333	16.353	بریدن قسمت پاره شده نوار	23
0.250	9.994	رگلاژ نوار داخل کاست	24
0.250	8.177	تعویض رولیک معیوب و صدا دار	25
1.000	1.817	رگلاژ درامهای کشنده	26
0.333	6.360	رگلاژ اسکرپیپر برگشت انتهای استکر	27
0.167	4.543	رفع عیب رولیک در رینگ ۲۳۸	28
0.250	10.902	تعویض پاککن استکر	29
0.167	2.726	رگلاژ پاککن هددرایو	30
3.000	11.811	رگلاژ کامل کاست	31
0.750	16.353	تعمیر رولیک نوار نقاله	32
3.167	19.987	مشکل برق نوار نقاله	33
0.167	2.726	رگلاژ پاککن هددرایو	34
0.250	9.085	قطع برق نوار نقاله	35
0.167	3.634	تعویض یکرد رولیک برگشت و رولیک ۱۱۵	36
0.333	9.085	تعویض دو عدد رولیک ۱۱۵ در کاست	37
0.750	0.909	رگلاژ درامهای خشاب	38
0.250	6.360	تعویض ۳ عدد رولیک رفت	39
0.250	17.262	مشکل برق نوار نقاله	40
0.333	1.817	تعویض یکرد رولیک برگشت	41
0.667	6.360	رگلاژ درامهای کالسکه متحرک	42
0.167	0.909	رفع روغن ریزی گیربکس kw۹۰	43
0.167	8.177	تعویض دو عدد رولیک	44
0.333	13.628	تعویض یکرد رولیک ۱۱۵*۱۳ در کاست	45
0.167	14.536	تعویض ۲ عدد رولیک برگشت معیوب	46
1.000	6.360	تعویض ۹ عدد اسکرپیپر پارویی در هددرایو	47
0.250	6.360	رگلاژ تسمه در کاست	48
0.167	1.817	توقف به دلیل قطع برق	49
0.500	16.353	تعویض رولیک نوار نقاله	50
0.250	8.177	مشکل برقی نوار نقاله	51
0.417	8.177	تعویض ۴ عدد رولیک برگشت و یک عدد رولیک رفت	52
0.167	0.909	تعویض ۴ عدد رولیک	53
0.167	0.909	تعمیر یک عدد شاسی	54
0.250	6.360	رگلاژ پاککن هددرایو	55
0.833	1.817	تعویض اسکرپیپرهای فولادی و نصب در هددرایو	56
0.500	1.817	تعمیر ۶ رولیک cm۳۱	57
0.167	9.085	تعویض رولیک نوار نقاله	58
0.167	9.085	ریگلاژ کردن نوار نقاله ۲	59

0.167	12.719	تعویض ۳ عدد رولیک رفت	60
0.167	1.817	تعویض رولیک رفت در رینگ ۸۶۹	61
0.250	5.451	تعویض یک عدد رولیک رفت و ۲ عدد رولیک برگشت	62
0.417	2.726	تعویض ۷ رولیک برگشت معیوب	63
0.500	4.543	تعویض ۴ رولیک رفت و ۴ رولیک برگشت	64
0.167	9.994	تعویض دو عدد رولیک برگشت	65
0.167	5.451	تعویض یک عدد رولیک برگشت	66
0.250	5.451	قطع نوار نقاله به دلیل قطع برق	67
0.250	0.909	تعویض دو عدد رولیک در کاست	68
2.000	3.634	رگلاژ کاست	69
0.417	3.634	تعویض رولیک زنجیره ای	70
0.333	1.817	رگلاژ نوار از رینگ ۸۵۰ تا ۸۷۰	71
0.500	3.634	تعویض ۹ عدد رولیک شاسی رفت و ۲ عدد رولیک برگشت	72
0.333	0.909	رگلاژ تسمه نوار از رینگ ۸۲۰ تا ۸۵۰	73
0.833	2.726	تعویض پایه رولیک برگشت	74
0.417	0.909	تعویض ۷ رولیک معیوب شاسی رفت	75
0.333	3.634	رگلاژ نوار در رینگ ۷۸۰ تا ۹۰۰	76
0.167	3.634	تعویض رولیک معیوب شاسی برگشت	77
0.250	3.634	رفع عیب شاسی رفت و برگشت	78
0.250	0.909	تعویض ۲ عدد رولیک متری برگشت	79
0.250	0.909	برش و تنظیم ارتفاع بغل بندهای ابتدای استاکر	80
0.167	3.634	تعویض دو عدد رولیک ۱۱۵ در کاست	81
0.167	0.909	تعویض ۲ عدد رولیک رفت و ۲ عدد رولیک برگشت	82
0.333	0.909	تعمیر پایه رولیک	83
0.250	0.909	تعویض ۲ عدد رولیک رفت و ۳ عدد رولیک برگشت	84
0.167	0.909	تعویض رولیک رفت	85
0.167	2.726	نصب رو عدد رولیک ۱۱۵ cm به کاست	86
0.333	2.726	تعویض ۲ عدد رولیک برگشت و یک عدد رولیک رفت	87
0.417	0.909	تعویض ۳ رولیک شاسی رفت و ۱ رولیک شاسی برگشت	88
0.333	3.634	تعویض یک رولیک ۱۱۵ cm	89
0.500	0.909	تعویض ۸ رولیک معیوب رفت و ۱ رولیک برگشت	90
0.167	4.543	تعویض رولیک معیوب ۱۱۵ cm و رولیک برگشت	91
2.500	1.817	تعویض ۸ عدد بلبرینگ غلطکهای شاسی	92
0.167	0.909	رگلاژ نوار در کاست	93
0.500	1.817	رگلاژ رولیکهای راهنمای برگشت	94
0.250	3.634	بریدن قسمت بریده شده نوار از قسمت آپارات	95
0.167	5.451	تعویض یک عدد رولیک برگشت در رینگ ۹۶۰	96
0.333	5.451	رگلاژ پایه رولیک راهنما در رینگ ۴۳۵ و ۳۹۸	97
0.250	5.451	تنظیم و رگلاژ رولیک راهنماهای برگشت در قوس	98
0.250	0.909	بریدن قسمت بریده شده نوار	99

0.500	2.726	تعویض رولیک راهنمای برگشت در رینگ ۳۲۰	100
0.333	9.994	تعویض یکرد رولیک ۱۱۵ cm در کاست	101
0.833	9.085	رگلاژ نوار به علت ریزش مصالح در انتهای دستگاه	102
0.250	1.817	جدا و آماده سازی حفاظهای روی پایه رولیک ۵۰ درجه	103
0.750	4.543	نصب رولیک راهنما و شاسی برگشت	104
0.500	0.909	رگلاژ نوار و جلوگیری از ریزش مصالح	105
0.167	9.085	تعویض رولیک معیوب رفت	106
0.333	0.909	نصب دو عدد بغل بند در اول نوار	107
5.750	0.909	تنظیم نوار و درست کردن سیل های نوار	108
0.250	1.817	تعویض دو عدد رولیک راهنمای برگشت	109
1.667	1.817	پاره شدن قسمتی از نوار و ترمیم آن	110
0.833	0.909	رگلاژ شاسی برگشت از رینگ ۳۱۲ الی ۳۷۰	111
0.417	0.909	در آوردن رولیک رفت افتاده در درام هرزگرد	112
0.333	0.909	در آوردن ۶۶ متر بریده شده از نوار	113
4.333	0.909	آپارات نوار نقاله	114
0.167	6.360	تعویض یک عدد رولیک	115
0.167	7.268	نصب و تعویض رولیک راهنما	116
0.333	6.360	تعویض و رفع عیب دو عدد رولیک برگشت	117
0.333	0.909	تعویض دو عدد پاک کن در هددرایو	118
0.083	3.634	اصلاح نمودن رگلاژ شاسی برگشت	119
0.500	4.543	رگلاژ شاسی برگشت در پشت دستگاه	120
0.333	4.543	بریدن سیم بکسل در آمده از تسمه	121
0.250	7.268	بریدن دو تکه از نوار که بریده شده بود	122
0.583	2.726	تنظیم رولیک راهنما در ۶ رینگ	123
0.333	4.543	بریدن قسمتهای بریده شده تسمه در داخل دستگاه	124
0.917	4.543	تعویض پایه رولیک راهنما در دو رینگ	125
0.333	8.177	تعویض ۳ عدد از پایه رولیک های برگشت	126
1.667	13.628	آپارات نوار نقاله	127
0.167	13.628	تعویض یک عدد رولیک دو سر رزوه ۱۱۵	128
0.417	0.909	تعویض پاککن های هددرایو	129
1.000	0.909	تعویض پایه رولیکهای رفت	130
0.417	0.909	رگلاژ شاسی کاست	131
0.167	0.909	باز کردن پایه رولیک راهنما در رینگ ۳۱۵	132
1.083	0.909	بریدن ۶۰ متر سیم بکسل بریده شده از تسمه	133
0.167	0.909	نصب و جوشکاری دو عدد رولیک راهنما	134
0.167	0.909	بریدن ۲۰ سانتی متر سیم بکسل در آمده از تسمه	135
0.250	4.543	رفع عیب درام ۲۰ در ابتدای نوار ۲	136
0.250	2.726	تعمیر شاسی برگشت در ۲ رینگ	137
1.167	0.909	تعویض شاسی رولیک راهنما در ۳ رینگ	138
0.167	0.909	باز کردن پایه رولیک از رینگ ۳۹۳ و بستن در رینگ ۳۹۰	139

1.833	0.909	تعویض شاسی برگشت در ۶ رینگ	140
0.250	0.909	رگلاژ پایه رولیک راهنما در رینگ ۱۰۴۵	141
1.167	3.634	بریدن قسمت های بریده شده نوار	142
0.083	0.909	تعویض یک عدد رولیک برگشت	143
1.750	5.451	تعمیر درام هرزگرد	144
1.667	1.817	تعمیر شاسی برگشت	145
0.167	7.268	تعویض دو عدد رولیک رفت	146
3.000	1.817	رگلاژ کاست	147
0.417	1.817	تعویض ۳ عدد رولیک رفت	148
0.333	4.543	جدا نمودن اسکرپیر معیوب در شاسی مورب	149
1.750	3.634	تعمیر درام هرزگرد	150
0.250	0.909	رفع عیب شاسی	151
0.250	1.817	تعویض رولیک برگشت	152
0.833	12.719	بستن ۲۰ عدد رولیک راهنما	153
0.500	3.634	تعمیر و نصب آبپاش استکر	154
1.000	3.634	رفع عیب پایه رولیک رفت	155
0.333	3.634	تعویض دو عدد رولیک رفت معیوب و یک رولیک برگشت	156
0.333	7.268	جدا نمودن اسکرپیر معیوب در کالسکه مورب	157
0.250	3.634	بررسی محافظهای U شکل	158
0.667	3.634	نصب رولیک راهنما	159
0.167	3.634	رفع عیب شاسی برگشت در رینگهای ۱۰۸۵ و ۱۰۹۰	160
2.917	2.726	پاره شدن نوار از بیرون	161
8.167	0.909	آپارات نوار نقاله	162
0.083	0.909	امرجنسی نوار نقاله	163
0.667	5.451	بریدن نوار به طول ۱۶ متر در داخل کاست	164
0.167	0.909	بریدن نوار به طول ۸ متر در داخل کاست	165
0.333	8.177	تعمیر و نصب پاک کن الماسه دار زیر هد درایو	166
0.833	0.909	رگلاژ درامهای کالسکه متحرک	167
0.083	5.451	تعویض رولیک متری شاسی مورب	168
1.667	4.543	تعویض محافظ U شکل معیوب در قوس دوم	169
0.167	4.543	رگلاژ پاک کن الماسه دار در زیر هددرایو	170
0.417	4.543	تعمیر و نصب آبپاش استکر	171
0.833	3.634	تعویض پایه رولیک برگشت معیوب در رینگ ۱۲	172
0.500	1.817	آچار کشی رولیک راهنما در محافظ U شکل در رینگ ۴۰۰	173
0.250	3.634	تعویض شاسی برگشت	174
1.000	2.726	تعویض پایه رولیک برگشت در سه رینگ	175
0.167	1.817	رفع گیر رولیک شاسی برگشت در رینگ ۳۹۶	176
0.250	0.909	بریدن نوار و در آوردن پیچ و مهره آن	177
2.500	3.634	تعویض محافظ U شکل در قوس اول	178
1.167	3.634	تعویض پایه رولیک برگشت به همراه رولیک آن در رینگ ۱۲۲۲	179

0.417	0.909	تعویض سه عدد رولیک رفت معیوب	180
0.333	11.811	تعویض رولیک ۱۱۵ از طرف کالسنکه ثابت	181
0.500	3.634	تعمیر و نصب آبپاش استکر	182
1.000	3.634	تعویض پایه رولیک شکسته شده در رینگ ۱۶۴	183
0.333	2.726	تعویض دو عدد رولیک راهنمای معیوب ۲۰ در رینگ ۴۰۵	184
0.250	2.726	جا انداختن محافظ U شکل	185
2.167	1.817	آپارات نوار نقاله	186
3.333	0.909	رگلاژ کامل کاست بعد از آپارات	187
0.667	5.451	ریگلاژ نمودن شاسیه‌های برگشت در ۴ رینگ	188
0.417	5.451	اصلاح و تعمیر پایه رولیک بالا در رینگ ۱۰۰۰	189
1.000	7.268	تست و تعمیر ۷۵ عدد رولیک رفت و ۹ عدد رولیک برگشت	190
0.167	3.634	تعویض رولیک متری شاسی مورب	191
0.167	3.634	تعویض رولیک رفت	192
0.833	0.909	تعویض رولیک متری شاسی مورب	193
0.833	0.909	تعویض پایه رولیک معیوب در قوس دوم	194
0.167	5.451	تعویض رولیک متری شاسی مورب	195
0.417	9.085	تعویض دو عدد رولیک CM115 شاسی های مورب	196
0.500	3.634	قطع برق و عدم استارت نوار نقاله	197
0.167	1.817	نصب دو عدد رولیک راهنما در قوس دوم	198
0.167	3.634	قطع شدن برق و عدم استارت نوار	199
0.500	10.902	قطع شدن برق نوار نقاله ۲ از پست بالا	200
0.167	31.798	تعویض رولیک معیوب رفت در رینگ ۱۱۷۵	201
0.250	0.909	تعویض دو عدد رولیک معیوب	202
0.667	0.909	تعمیر پایه رولیک رفت	203
5.000	1.817	تعویض درام استکر	204
4.833	0.909	ایراد درام استکر	205
0.333	1.817	تعمیر آب پاش استکر	206
0.250	1.817	تعویض ۲ عدد رولیک ۱۱۵ سانتی برگش	207
0.167	10.902	تعویض دو عدد رولیک معیوب استکر	208
0.500	15.445	تعویض ۳ عدد رولیک	209
0.250	3.634	نصب رولیک راهنما	210
0.167	8.177	نصب ۱۲ عدد رولیک راهنمای بزرگ در قوس اول	211
0.333	2.726	تعویض رولیک راهنما در خشاب و استکر	212
0.250	0.909	تعویض رولیک های معیوب قوس اول	213
0.167	7.268	نصب رولیک راهنما	214
2.000	8.177	آپارات نوار نقاله	215
0.333	8.177	تعویض دو عدد پاک کن در استکر	216
0.333	0.909	مشکل تسمه نوار نقاله	217
0.333	13.628	تعویض دو عدد رولیک راهنما در دو طرف نوار(خرابی بلبرینگ)	218
0.250	5.451	پاره شدن نوار	219

0.333	7.268	بریدن سه مرحله از تسمه به علت سایش به شاسی ها	220
0.500	0.909	تعویض رولیک دو سر رزوه در استکر	221
0.750	9.994	رگلاژ درام ها در کالسکه متحرک	222
0.667	9.085	تعویض رولیک راهنمای U شکل انتهای دستگاه	223
0.167	1.817	قطع برق نوار نقاله	224
0.167	12.719	نصب رولیک راهنما در قوس دوم	225
1.333	2.726	مشکل تسمه نوار نقاله	226
1.000	8.177	کشیدن شاسی مورب و بریدن 6cm سیم بکسل نوار بریده شده	227
0.333	0.909	آچار کشی کامل شاسی بوستر در رینگ ۱۳۰۰	228
0.417	8.177	تعویض یک عدد رولیک شاسی U شکل	229
0.500	9.085	تعویض دو عدد رولیک برگشت	230
0.250	18.170	مشکل استارت نوار نقاله	231
0.250	4.543	امرجنسی نوار نقاله	232
0.167	9.994	بریدن قسمتهای بریده شده نوار	233
0.083	19.079	بریدن سیم در آمده از نوار	234
0.250	10.902	نصب رولیک راهنما در رینگ ۱۲۸۰	235
0.250	11.811	مشکل نوار نقاله در کالسکه بیرون تونل	236
0.500	20.896	رگلاژ شاسی های مورب در خشاب	237
0.583	8.177	نصب ۶ عدد رولیک راهنمای کوچک	238
0.833	1.817	رگلاژ درام ۶۰ در کالسکه خشاب به علت فرمان دادن به تسمه	239
0.083	22.713	تعویض رولیک راهنما	240
1.667	2.726	تعویض ۱۲ عدد بلبرینگ درام	241
0.667	2.726	تعویض ۱۰ عدد رولیک راهنما	242
1.083	0.909	تعویض رولیک نوار نقاله	243
0.333	0.909	امرجنسی بوستر نوار نقاله	244

### پیوست ۳- پایگاه داده‌ای نوار نقاله ۳

شماره	نوع خرابی	TBF(h)	TTR(h)
1	تعمیر الکتروگیربکس	0.909	5.500
2	تعویض شاسی برگشت	0.909	0.333
3	تعویض ۲ عدد رولیک برگشت	3.634	0.333
4	تعویض رولیک رفت	1.817	0.250
5	تعویض اسکریپر	53.602	0.333
6	تعویض رولیک برگشت	89.942	0.167
7	تعویض ۲ عدد رولیک برگشت	93.576	0.250
8	تعویض ۲ عدد رولیک رفت و ۲ عدد رولیک برگشت	21.804	0.500
9	تعویض ۳ عدد رولیک رفت	19.987	0.333
10	تعویض شاسی برگشت	161.713	0.750

0.167	90.850	تعویض یک عدد رولیک رفت و برگشت	11
0.167	6.360	تعویض دو عدد رولیک رفت	12
0.667	23.621	بریدن نوار بریده شده	13
0.917	86.308	تعویض شاسی رفت و برگشت	14
0.167	4.543	تعویض رولیک رفت	15
0.833	6.360	تعویض شاسی برگشت	16
0.917	11.811	تعویض اسکریپر	17
1.167	11.811	بریدن نوار بریده شده	18
0.417	2.726	تعویض رولیک برگشت	19
1.833	23.621	بریدن نوار بریده شده	20
0.417	5.451	تعویض دو عدد رولیک رفت	21
0.583	50.876	تعمیر شاسی رفت و برگشت	22
1.917	27.255	باز کردن و تعمیر دارم هرزگرد	23
0.250	29.072	تعویض رولیک رفت	24
0.917	10.902	تعمیر دارم هرزگرد	25
0.333	12.719	تعویض یک عدد رولیک برگشت	26
0.333	7.268	تعویض یک عدد رولیک برگشت	27
0.167	11.811	تعویض شاسی برگشت	28
0.167	19.079	تعویض یک عدد رولیک برگشت	29
0.250	109.929	تعویض رولیک رفت	30
0.333	29.072	تعویض شاسی برگشت	31
0.667	29.072	تعویض دو عدد رولیک رفت و رولیک برگشت	32
0.417	9.085	تعویض اسکریپر	33
0.417	42.700	تعویض رولیک برگشت	34
0.167	34.523	تعویض دو عدد رولیک رفت	35
0.667	10.902	تعمیر شاسی رفت و برگشت	36
0.250	17.262	تعویض رولیک	37

## **Abstract**

The use of intercity train system or subway due to high speed and security, has been increasing in recent years. One of the main steps in using this transportation system is digging the tunnels required for this system. To dig these tunnels, tunnel boring machines (TBM) are usually used because these machines strongly influence the two main parameters in a tunneling project, namely reducing execution time and reducing costs and, By creating a safe environment for personnel, they have the least possible impact on surface structures and the environment. But with all the advances that have been made in these machines, these machines always face dangers that are inevitable. Therefore, an approach should be considered to deal with these hazards so that drilling operations are carried out in the best way and in the shortest time. One of the newest approaches proposed to deal with these hazards in the field of engineering is the resilience approach, which generally refers to the ability of the system to return to normal after an accident. In this dissertation, the resilience of TBM conveyor system of Tabriz metro line 2 has been studied. This system consists of three conveyors that are arranged in series and the length of each conveyor is 7761 meters. Based on the relationship used in this dissertation, the main step in resilience analysis is the analysis of reliability, maintainability and supportability, for this purpose, all information and data on downtime due to breakdowns and repairs related to about 15 months of conveyor operation were collected. Statistical analyzes were performed on the data and the values of reliability, maintainability and supportability were calculated. The resilience values of the organization and the efficiency of prevention and health management technology were also analyzed for 80 to 95% sensitivity values due to the unavailability of information, according to the opinion of experienced professors and experts. The analysis showed that the resilience of all three conveyors in the period of 200 hours after starting work is more than 60%, which is a sign of high resilience of the conveyors. The resilience of the whole conveyor system also showed that the resilience for the situation where the amount of resilience of the organization and the efficiency of prevention and health management technology is 95% is more than 70% and for the case that the value of these two parameters is considered 80%, it is more than 25%. The analyzes also showed that the role of organizational resilience and the efficiency of prevention and health management technology increase over time and make a greater difference in the amount of resilience.

**Key words:** TBM, resilience, reliability, maintainability, supportability, Tabriz Metro Line Two





Shahrood university of technology

**Resilience Analysis of Tunnel Boring Machine Conveyor (TBM);  
Case Study: Tabriz Metro Tunnel Line Two**

Writer

Ali hosseinzadeh Ahangar

Supervisor

Mohammad ataei

Farhang sereshki

Advisor

Ali nouri gharahasanlo

2021