

## مدلسازی قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیر و نگهداری سیستم برق ماشین حفاری تمام مقطع تونل

حاصل امینی خوشالان<sup>۱</sup>، سید رحمان ترابی<sup>۲</sup>، کیومرث سیف پناهی<sup>۳</sup>، مهدی راضی فرد<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کردستان، کردستان

۲- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

۳- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

۴- دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۶/۰۳/۱۳)

### چکیده

امروزه ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه شهری کاربرد گسترده‌ای دارند. این ماشین‌های پیچیده و گران‌قیمت قابلیت دسترسی و عملکرد نسبتاً پایینی دارند از این رو، بهبود عملکرد، برنامه زمانی، برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری و کنترل هزینه این ماشین‌ها در پروژه‌های تونل‌سازی امری ضروری است. هدف اصلی از تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی، تعمیر و نگهداری هر سیستم یا ماشین، ارزیابی عملکرد دقیق آن و بنابراین کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری است. در این تحقیق، تحلیل و مدلسازی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز انجام گرفته است. برای این منظور، داده‌های خرابی و تعمیر مربوط به حدود ۲۶ ماه عملکرد ماشین جمع‌آوری شد. نتایج آزمون‌های آماری انجام شده از قبیل روند و همبستگی سری نشان داد که داده‌ها فاقد روند و مستقل‌اند بنابراین روش آماری برای تحلیل و مدلسازی انتخاب شد. همچنین نتایج تحلیل داده‌ها مشخص کرد که داده‌های مربوط به زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیرات به ترتیب از توابع توزیع لاگ نرمال سه پارامتری و گامای سه پارامتری تبعیت می‌کند. تحلیل قابلیت اطمینان نشان داد که با احتمال ۸۰٪ درصد سیستم برق ماشین مورد مطالعه حدود ۱۵ ساعت بدون این که دچار خرابی شود کار می‌کند. علاوه بر این، با توجه به نمودار قابلیت تعمیر و نگهداری، ۶۰ درصد خرابی‌های اتفاق افتاده در مدت زمان کمتر از ۱ ساعت تعمیر شده و با احتمال ۸۰ درصد کلیه خرابی‌ها در مدت زمان حداکثر ۱/۸۸ ساعت تعمیر می‌شوند. همچنین قابلیت دسترسی سیستم برق این ماشین ۹۷/۸ درصد محاسبه شد.

### کلمات کلیدی

ماشین حفار تمام مقطع تونل، سیستم برق، قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی، قابلیت تعمیر و نگهداری.

## ۱- مقدمه

امروزه کاربرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین (EPB-TBMs) در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه شهری با استقبال زیادی روبرو شده است. این ماشین‌ها قابلیت حفاری در شرایط پیچیده زمین‌شناسی شامل تشکیلات نرم خاکی و سنگ‌های سخت را دارند [۲، ۱].

کاربرد موفقیت‌آمیز ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل نیازمند بررسی شرایط زمین و ویژگی‌های طراحی ماشین و سیستم پشتیبان آن است. میزان دسترسی و در نتیجه ضریب بهره‌وری<sup>۱</sup>، با تاثیرگذاشتن روی زمان حفاری، آهنگ پیشروی ماشین حفاری تمام مقطع تونل را مشخص می‌سازد. در یک پروژه تونل‌سازی مکانیزه، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری برای تخمین زمان و هزینه‌های مورد نیاز پروژه امری ضروری است. آهنگ پیشروی یک پارامتر کلیدی در ارزیابی عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل است و طبق تعریف عبارت است از نسبت فاصله حفاری شده و نگهداری شده تونل به کل زمان مورد نیاز که تاخیرهای ناشی از خرابی‌ها و تعمیر و نگهداری ماشین حفاری تونل را نیز شامل می‌شود. مطالعات نشان داده است که بیشترین توقف‌های ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل ناشی از تاخیرهای مرتبط به خود این ماشین‌ها است، بنابراین یک مطالعه و ارزیابی جامع بر روی تاخیرها و خرابی‌ها، عملکرد این ماشین‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد.

چین و همکاران عملکرد ماشین حفاری تونل در یک تونل انتقال آب در سنگ‌های بازالتی و آذرآواری دکان<sup>۲</sup> در هند را مطالعه کردند [۳]. توو و همکاران مطالعات موردی عملکرد TBM را در زمین‌های حاوی جبهه‌کارهایی متشکل از مخلوط سنگ و خاک ارائه کردند [۴]. مطالعات بیشتر در مورد عملکرد TBMها توسط محققان زیادی انجام گرفته است که در منابع مختلف قابل دسترسی است [۵-۷]. این پژوهش‌ها با در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی و مکانیکی سنگ یا خاک با رویکردهای تجربی یا تئوری‌های فیزیکی و مطالعات آزمایشگاهی بوده است.

از بارزترین کاستی‌های مطالعات گزارش شده، کمتر در نظر گرفتن تاخیرها و خرابی‌های مرتبط با ساختار این ماشین‌ها است که از پارامترهای کلیدی در ارزیابی قابلیت دسترسی و عملکرد واقعی آن‌ها است. لافتون با مطالعه خرابی‌ها و تاخیرهای ۱۰ تونل مکانیزه نشان داد که بیشتر از ۶۰ درصد

کل تاخیرها ناشی از تاخیرهای سیستم TBM است [۸]. فروغ و همکاران ضریب بهره‌وری TBM را با استفاده از سیستم طبقه‌بندی توده سنگ<sup>۳</sup> و یک پایگاه داده متشکل از ۶۸۲ روز عملیات تونل‌سازی تخمین زدند و رابطه بین ضریب بهره‌وری با تاخیرهای مرتبط با توده سنگ و شرایط زمین‌شناسی را بررسی کرده و نشان دادند که این تاخیرها حدود ۲۰ درصد زمان عملیات حفاری بوده در حالی که تاخیرهای مرتبط با ماشین حفاری، ۶۰ درصد زمان عملیات حفاری را شامل می‌شود [۹]. همچنین فروغ و ترابی [۱۰] از سیستم مهندسی سنگ<sup>۴</sup> (RES) برای محاسبه شاخص تاخیرات ناشی از توده سنگ و زمین‌شناسی بر اساس خصوصیات غالب سنگ و تاخیرهای مرتبط با توده سنگ استفاده کردند.

نبود یک تحقیق جامع در مطالعات پیشین بر روی تاخیرهای مرتبط با ماشین‌های حفاری، نشان می‌دهد که یک مطالعه جامع بر روی خرابی‌ها و تاخیرهای سیستم TBM به منظور ارزیابی دقیق قابلیت دسترسی و عملکرد این ماشین‌ها ضروری است. علاوه بر این، خرابی‌ها و تاخیرهای ماشین حفار ممکن است هزینه‌های اضافی زیادی را به پروژه اعمال کند. تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر و نگهداری (با عنوان تحلیل RAM<sup>۵</sup>) یک روش کاربردی بر اساس مطالعه رفتار خرابی‌ها و تعمیر و نگهداری ماشین‌ها و سیستم‌ها است. بررسی‌های گوناگون در زمینه‌های نظامی و عمرانی نشان می‌دهد که با برنامه‌ریزی‌های صحیح تعمیر و نگهداری می‌توان زمان‌های مورد نیاز برای عملیات تعمیر و نگهداری در پروژه‌ها را به میزان ۴۰ تا ۷۰ درصد کاهش داد [۱۱]. اولین مطالعه در این زمینه شامل رهنمودهایی در مورد تحلیل RAM ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین (EPB-TBMs) در منبع [۱۲] یاد شده است. این رهنمودها بر اساس مطالعات پیشین در مورد تحلیل RAM بر روی ماشین‌آلات معدنی ارائه شده است که بر مبنای روش‌ها و تکنیک‌های عملی تحلیل قابلیت اطمینان ارائه شده توسط کومار و گرانهولم استوار است [۱۳].

تجزیه و تحلیل موثر RAM، مدیریت را قادر به بهبود بخشیدن به عملکرد ماشین‌آلات پیچیده و گران قیمت حفاری تمام مقطع تونل می‌کند. مطالعات قابلیت اطمینان در تمامی مراحل طراحی، تولید و بهره‌برداری ماشین‌آلات و تجهیزات قابل انجام است. چنانچه فاکتورهای موثر در کارکرد ماشین‌آلات در مراحل طراحی به خوبی شناسایی شوند، اطلاعات و دانش طراحان به بالاترین سطح ممکن برای طراحی یک ماشین یا

طبق رابطه ۱ بیان می شود:

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

که در آن:

$R(t)$  قابلیت اطمینان در زمان  $t$   
 $f(t)$  تابع چگالی احتمال خرابی

## ۲-۲- قابلیت دسترسی

قابلیت دسترسی یک سیستم، چگونگی تحقق اهداف پروژه در طول برنامه زمان بندی شده برای اجرای پروژه را نشان می دهد. تحلیل قابلیت دسترسی مشخص می کند که یک سیستم با چه احتمالی می تواند طبق برنامه در حالت عملیاتی و در یک زمان مشخص به هدف مورد نظر برسد [۱۷]. تعیین قابلیت آنی یا نقطه ای یک سیستم در هر لحظه (رابطه  $A(t)$ ) دشوار است، بنابراین در مطالعات، قابلیت دسترسی از مفهوم قابلیت دسترسی حالت پایدار<sup>۱۰</sup> یا ذاتی<sup>۱۱</sup> استفاده می شود که بر اساس عملکرد سیستم در یک زمان نسبتاً طولانی استوار است و در حالت کلی قابلیت دسترسی یک زیرسیستم یا سیستم از رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$A_s = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

$$= \frac{Uptime}{Uptime + Downtime}$$

که در آن:

<sup>۱۲</sup> MTBF میانگین زمان بین خرابی ها

<sup>۱۳</sup> MTTR میانگین زمان تعمیر و نگهداری

میانگین زمان تعمیر و نگهداری شامل زمان دسترسی به قطعه معیوب<sup>۱۴</sup>، تشخیص خرابی<sup>۱۵</sup>، زمان تعویض یا تعمیر، زمان تنظیم و تایید تعمیر<sup>۱۶</sup> است و فرض بر این است که تجهیزات مورد نیاز، قطعات یدکی، پرسنل و نظایر آن صددرصد فراهم باشند [۱۷].

## ۲-۳- قابلیت تعمیر و نگهداری

قابلیت تعمیر و نگهداری، احتمال تعمیر شدن و بازگرداندن یک قطعه یا بخش یا سیستم معیوب به شرایط عملیاتی در یک بازه زمانی مشخص تعریف می شود، در صورتی که عملیات

سیستم ایده آل خواهد رسید. از این رو مطالعه گسترده تحلیل قابلیت اطمینان ماشین ها و تجهیزات مهم است [۱۴]. ماشین های حفاری تمام مقطع تونل از نوع تعادل فشار زمین (EPB-TBMs) را می توان به عنوان یک سیستم متشکل از ۵ زیرسیستم به شکل سری در نظر گرفت. این زیرسیستم ها شامل زیرسیستم مکانیک، برق، هوای فشرده، هیدرولیک و آب است. زیرسیستم های هیدرولیک و برق دو منبع اصلی تامین نیرو و توان مورد نیاز ماشین ها است که نقش کلیدی در تولید نیروی مورد نیاز ماشین و همچنین انتقال آن به سایر بخش های عملیاتی ماشین را برعهده دارد. در این تحقیق با توجه به اهمیت بالای زیرسیستم برق و قابل دسترس بودن داده های میدانی مربوطه، تحلیل RAM زیرسیستم برق ماشین حفر انجام گرفته است. با توجه به پیچیده بودن این زیرسیستم و قطعات زیاد تشکیل دهنده آن، در این تحقیق به جای زیرسیستم، «سیستم» برق به کار رفته است. در مطالعه حاضر، پایگاه داده های میدانی مربوط به حدود ۲۶ ماه عملکرد TBM از پروژه خط یک مترو تبریز شامل زمان بین خرابی ها<sup>۱۸</sup> (TBF) و زمان تعمیرات<sup>۱۹</sup> (TTR) جمع آوری شد. نتایج، یک پایه و اساس و رویکرد کاربردی برای تجزیه و تحلیل RAM از ماشین آلات حفاری تونل در پروژه های تونل زنی مکانیزه را فراهم می کند.

## ۲- تعاریف RAM

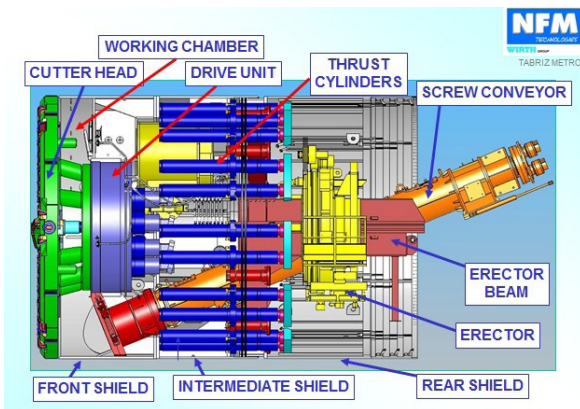
تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری (RAM) اغلب توسط محققان و پرسنل تعمیر و نگهداری برای تسهیل تعمیر و نگهداری موثر استفاده می شود. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل RAM حفظ تجهیزات و سیستم ها در شرایط مطمئن و کارا همانند شرایط عملیاتی طراحی شده است، به طوری که تولید و اهداف کیفی مورد نظر در زمان مناسب و با حداقل هزینه بدست آید.

## ۲-۱- قابلیت اطمینان

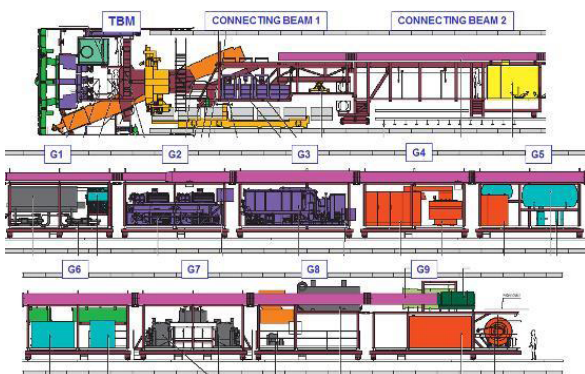
قابلیت اطمینان یک بخش یا سیستم، با احتمال این که آن سیستم وظیفه مورد انتظارش را تحت شرایط عملیاتی مشخص و در بازه زمانی مورد نظر انجام دهد، تعریف می شود [۱۵]. بنابراین قابلیت اطمینان، گسترش کیفیت در حوزه زمان است و ممکن است به عنوان احتمال نداشتن خرابی یا شکست در طول یک بازه زمانی معین تفسیر شود [۱۶]. قابلیت اطمینان

کنترل، نوار نقاله بخش و نظایر آن) و بخش پشتیبان متشکل از ۹ تریلی (G1 تا G9) با طول کل ۹۲٫۱ متر بدون احتساب طول سپر) است که به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

در بخش پشتیبان در واقع سیستم‌های پشتیبانی از عملیات حفاری و پیش‌روی قرار داده شده است. نوار نقاله برای انتقال و تخلیه مصالح و سایر تجهیزات از جمله سیستم‌های هیدرولیک، مخازن آب و هوای مورد نیاز، برق و روشنایی، کنترلی، ایمنی، تهویه، مخازن تهیه دوغاب و بنتونیت، ژنراتور اضطراری و نظایر آن به تفکیک در تریلرها قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها از طریق کابل، شلنگ و لوله به همراه اتصالات با عملگرهای ماشین حفار در ارتباط هستند [۱۸].



شکل ۱: نمای شماتیک از قطعات اصلی ماشین حفار مترو تبریز [۱۸]



شکل ۲: تصویر شماتیک بخش‌های تشکیل دهنده TBM خط یک مترو تبریز [۱۸]

تعمیر و نگهداری مطابق شرایط معین و از پیش تعریف شده انجام گیرد [۱۶]. قابلیت تعمیر و نگهداری با رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$M(t) = \int_0^t f_r(t) dt \quad (3)$$

که در آن:

$M(t)$  تابع قابلیت تعمیر و نگهداری در زمان  $t$

$f_r$  تابع چگالی احتمال تعمیر

مطابق تعاریف فوق، قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری بر اساس توابع توزیع زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیرات استوار است. با محاسبه TBF و TTRهای یک سیستم در یک بازه زمانی معین، توابع توزیع مناسب بدست می‌آید که تحلیل RAM بر مبنای این توابع توزیع شکل می‌گیرد.

### ۳- مشخصات فنی TBM مورد مطالعه

ساخت تونل‌های عمیق خط یک مترو تبریز به وسیله دو ماشین EPB-TBM ساخته شده تحت فناوری NFM (یکی از شرکت‌های بزرگ سازنده ماشین‌های حفاری تونل) در رسوبات آبرفتی و لایه‌های مارن از سال ۱۳۸۸ آغاز شده است. تونل‌های دوقلو خط یک این پروژه دارای طول ۸۰۷۰ متر و قطر داخلی ۶٫۸۸ متر است. نمایی شماتیک از قطعات اصلی TBM در خط ۱ مترو تبریز در شکل ۱ نشان داده شده است. جبهه کار به وسیله دستگاه کله حفار چرخشی حفاری شده و سپس مواد کنده شده وارد اتاقک حفاری<sup>۱۷</sup> می‌شود. فشار تعادلی در این محفظه با نیروی ناشی از سیلندرهای پیشران و کنترل آهنگ خروج مواد حفاری شده با تنظیم سرعت چرخش نقاله حلزونی اعمال می‌شود. پوشش نهایی تونل که قطعات بتنی پیش ساخته<sup>۱۸</sup> (سگمنت) است با دستگاه نصاب<sup>۱۹</sup> سگمنت در دیواره تونل تعبیه می‌شود.

بخش‌های اصلی این دستگاه شامل بخش پیشانی یا TBM، دو بخش اتصال<sup>۲۰</sup> (شامل واحد تهیه و تنظیم فوم، جعبه کنترل نقاله حمل قطعات بتنی، تسمه نقاله، پمپ آبکشی، جعبه برق، دوربین‌های نمایش وضعیت و مونیتورینگ نقاله حلزونی و نصب قطعات بتنی، کابین کنترل و هدایت ماشین و عملیات حفاری، راهروهای دسترسی به سپرها و کابین کنترل، سیستم روشنایی و تهویه و انواع مختلف گریس مورد استفاده برای گریس کاری و آب‌بندی تولید فوم، مخازن تحت فشار بنتونیت، پمپ آبگیری، نوار نقاله، کابین تامین برق، مجرای تهویه، اتاق

## ۴- سیستم برق TBM مورد مطالعه

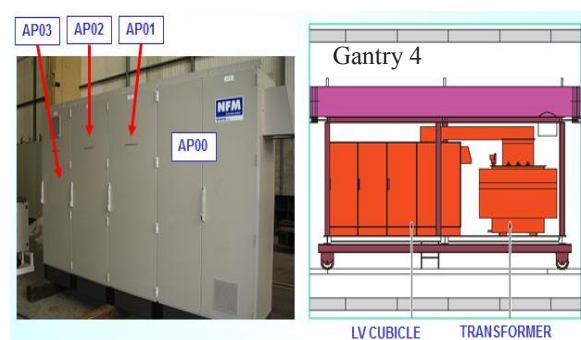
برق مورد نیاز دستگاه (11KV) از پست برق تامین می‌شود و به واسطه کابل‌های مسیر تونل به قرقه کابل در تریلر ۹ و سپس به ترانسفورماتورها، پست‌های توزیع کننده برق و سپس موارد مصرف از قبیل چندین موتور الکتریکی، پمپ، تامین برق ارکتور، نوار نقاله‌ها، سیستم روشنایی و نظایر آن وارد می‌شود. در مواقع قطع برق اصلی و شرایط اضطراری، از دیزل ژنراتور استفاده می‌شود.

انرژی برق مورد نیاز ماشین به وسیله ترانسفورماتور اصلی تعبیه شده در تریلی ۴ و همچنین ۶ ترانسفورماتور کمکی در تریلی‌های ۳ و ۴ از ولتاژ بالا به ولتاژ پایین تبدیل شده و در اختیار کابین‌های توزیع برق برای مصرف بخش‌های مختلف TBM قرار می‌گیرد. مشخصات ترانسفورماتور اصلی در جدول ۱ آمده است.

کابین‌ها و پست‌های توزیع کننده برق ماشین در بخش اتصال ماشین و همچنین تریلی‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ قرار گرفته‌اند. برای نمونه تریلی ۴ به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور اصلی

ولتاژ ورودی	۲۰ کیلووات
ولتاژ خروجی	۴۰۰ وات
فرکانس	۵۰ هرتز
توان	۲۰۰۰ کیلووات / آمپر



شکل ۳: تصویر شماتیک تریلی ۴ بخش پشتیبان ماشین مورد مطالعه [۱۸]

علاوه بر انرژی الکتریکی، انرژی هیدرولیکی نیز که مکمل انرژی الکتریکی برای به حرکت در آوردن اجزای مختلف ماشین است به وسیله زیرسیستم هیدرولیک تامین و در اختیار بخش‌های مختلف TBM قرار داده می‌شود [۱۸].

در حال حاضر کاربرد ماشین‌های حفاری تونل از نوع EPB و ساخت شرکت NFM در پروژه‌های حفاری تونل‌های مترو در ایران با استقبال فراوانی مواجه شده است (به عنوان مثال دو ماشین در خط یک مترو تبریز، یک ماشین در مترو مشهد، دو ماشین در مترو اهواز و دو ماشین در مترو شیراز) بنابراین، تحلیل RAM این نوع از ماشین‌های حفاری تونل برای دست اندرکاران صنعت تونل‌سازی ایران ضروری به نظر می‌رسد.

## ۵- مدلسازی RAM سیستم برق ماشین مورد مطالعه

نتایج صحیح و قابل اعتماد از تحلیل RAM هر دستگاه یا سیستم مستلزم تهیه یک پایگاه داده مناسب از زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیرات و نگهداری است.

## ۵-۱- تهیه پایگاه داده

در این مطالعه، برای تحلیل RAM سیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز، یک پایگاه داده متشکل از کلیه TBF ها و TTRهای سیستم برق ماشین به مدت ۲۶ ماه عملیات حفاری تونل تهیه شد. این داده‌ها، در اصل داده‌های خامی بودند که توسط پرسنل تعمیر و نگهداری، اپراتور و سرپرست شیفت عملیات برای اهداف خاص آن‌ها در گزارش‌های مختلف ثبت شده بود، بنابراین داده‌های مربوط به تمامی خرابی‌های اتفاق افتاده و تعمیرات انجام گرفته مربوط به سیستم برق و مورد نیاز برای تحلیل RAM از این گزارش‌ها استخراج شد و با مرتب کردن این داده‌ها بر حسب ترتیب زمان وقوع آن‌ها مطابق جدول ۲ داده‌های مورد نیاز مرتب شد.

مطابق جدول ۲ تعداد ۳۸ داده مربوط به خرابی و تعمیر و نگهداری سیستم برق در بازه زمانی مورد مطالعه استخراج شد و زمان بین خرابی‌ها و همچنین زمان لازم برای تعمیر و نگهداری مربوطه محاسبه شد.

مطابق شکل ۳ در تریلی ۴ پست‌های کاهنده ولتاژ برق و همچنین توزیع آن تعبیه شده و وظیفه اصلی آن فراهم کردن نیروی پمپ‌های چرخاننده کله حفار است.

جدول ۲: TBFها و TTRهای سیستم برق ماشین مورد مطالعه

Failure/repair No.	TBF (h)	TTR (h)	Failure/repair No.	TBF (h)	TTR (h)
1	3.83	2.17	20	39.33	4
2	27.67	0.33	21	21.5	0.33
3	208	5.83	22	20.33	0.67
4	26.33	1.17	23	166.33	0.33
5	105.83	1.5	24	30.5	0.67
6	53.33	3.17	25	63.83	0.67
7	23.5	0.83	26	90	4.67
8	11.83	1.17	27	100.83	1.83
9	25.83	0.17	28	3.33	0.17
10	15.33	0.17	29	44.67	1
11	55.5	0.17	30	113	0.5
12	58.83	0.33	31	200.5	1.17
13	24.67	4.33	32	38.33	0.33
14	0.67	0.5	33	73.83	0.83
15	24.83	2.33	34	17.33	4.33
16	125.33	1	35	5.67	0.5
17	54.67	0.33	36	113.5	0.33
18	72	0.33	37	23.83	3
19	12.33	0.67	38	246.67	0.33

می‌شوند) روش آمار کلاسیک (فرآیند تجدید شونده<sup>۲۶</sup>) بر مبنای توابع توزیع پیوسته چگالی احتمال زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیر برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰].

یک روش تحلیلی مناسب برای بررسی روند در داده‌ها استفاده از آزمون هندبوک نظامی (MIL-HDBK-189) مطابق رابطه ۴ است:

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{T_n}{T_i} \quad (۴)$$

که در آن:

$n$  تعداد خرابی‌ها

$T_n$  زمان آخرین خرابی

$T_i$  زمان خرابی  $i$ ام

با فرض صفر داده‌ها از فرآیند پواسن ناهمگن تبعیت نمی‌کنند و مقدار  $U$  دارای توزیع کی - دو<sup>۲۷</sup> با درجه آزادی  $2(n-1)$  است. چنانچه مقدار  $U$  محاسبه شده از رابطه ۴ در بازه بین حد بالا ( $\chi_{0.975}^2$ ) و حد پایین ( $\chi_{0.025}^2$ ) به دست آمده از جدول این توزیع (جدول  $\chi^2$ ) در سطح اطمینان ۹۵ درصد باشد در این صورت فرض صفر پذیرفته می‌شود و داده‌ها دارای روند نیستند [۲۱]. نتایج این آزمون نشان داد که در داده‌های خرابی و همچنین داده‌های تعمیر روند وجود ندارد (جدول ۳).

برای بررسی آزمون سری،  $i$ امین داده  $TBF$  یا  $TTR$  بر حسب  $(i-1)$ امین داده  $TBF$  یا  $TTR$  در یک فضای دو بعدی رسم می‌شوند. چنانچه نقاط ترسیم شده دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد و به صورت پراکنده توزیع شده باشند در این صورت داده‌ها همبستگی سری ندارند به عبارت دیگر اگر داده‌های ترسیم شده در امتداد یک خط قرار بگیرند دارای همبستگی خواهند بود [۲۳]. شکل ۴ نتایج آزمون سری را برای داده‌های این مطالعه نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود هیچگونه همبستگی سری در این داده‌ها مشاهده نشد، بنابراین فرضیه مانا بودن داده‌ها تایید و فرآیند تجدید شونده به عنوان روش آماری مناسب برای تحلیل RAM انتخاب شد.

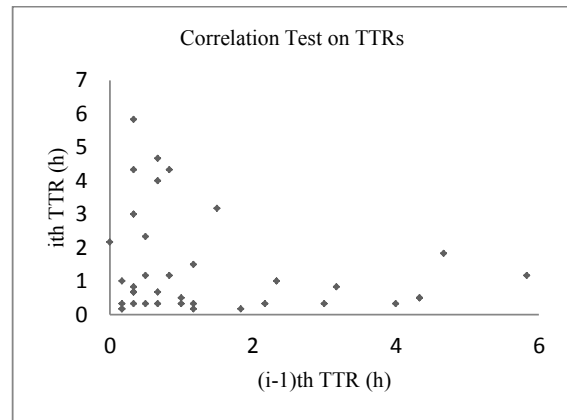
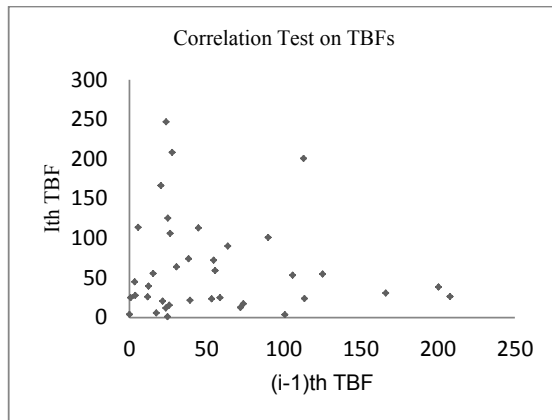
## ۵-۲- تحلیل داده‌ها

گام بعدی پس از محاسبه TBFها و TTRها تعیین فرآیند مناسب برای تحلیل RAM بر روی داده‌ها است. اساس روش تحلیل RAM یک ماشین یا سیستم تعمیرپذیر را اثر و فینگولد [۱۹] رایج کردند.

برای تحلیل داده‌ها در ابتدا دو آزمون روند<sup>۲۱</sup> و همبستگی سری<sup>۲۲</sup> انجام می‌گیرد که بر مبنای نتایج این آزمون‌ها چنانچه داده‌ها دارای روند باشند، روش فرآیند پواسن ناهمگن<sup>۲۳</sup> (مانند فرآیند قانون توان) برای تحلیل استفاده می‌شود و اگر داده‌ها از روند خاصی پیروی نکنند به عبارت دیگر داده‌ها به طور یکسان توزیع شده باشند، آزمون همبستگی، وابستگی داده‌ها یا مستقل بودن آن‌ها را مشخص می‌کند که در صورت وجود همبستگی، روش مورد استفاده فرآیند پواسن همگن (مانند فرآیند پواسن شاخه‌ای<sup>۲۴</sup>) خواهد بود و در صورتی که داده‌ها مستقل باشند (در این صورت که داده‌ها هم به طور یکسان توزیع شده و هم مستقل‌اند در اصطلاح مانا<sup>۲۵</sup> و مستقل خوانده

جدول ۳: نتایج آزمون روند در داده‌ها

Data	Number of failures	Degree of freedom	Calculated statistic U	Lower confidence level	Upper confidence level	Presence of trend
TBFs	38	74	87.63	55.2	95.1	$55.2 < 87.63 < 95.1$ No trend
TTRs	38	74	60.19	55.2	95.1	$55.2 < 60.19 < 95.1$ No trend



شکل ۴: نتایج آزمون همبستگی سری بر روی داده‌ها

جدول ۴: نتایج برازش برای یافتن تابع توزیع مناسب بر داده‌ها

TBFs	K-S test	TTRs	K-S test
Lognormal (3P)	0.08118	Gamma (3P)	0.13218
Exponential	0.08586	Weibull	0.13239
Weibull (3P)	0.08916	Lognormal (3P)	0.13569
Exponential (2P)	0.08974	Exponential	0.1401
Gamma	0.09043	Weibull (3P)	0.14969
Best fit	Parameters	Best fit	Parameters
Lognormal (3P)	$\sigma = 0.93$ $\mu = 3.79$ $\gamma = -4.69$	Gamma (3P)	$\alpha = 0.65$ $\beta = 1.58$ $\gamma = 0.17$

با استفاده از توابع قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری (رابطه‌های ۱ و ۲) و همچنین جدول ۴، مدل قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز به ترتیب مطابق روابط ۵ و ۶ به دست آمد و منحنی‌های مربوط به آن‌ها نیز در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

### ۵-۳- توابع RAM

نرم‌افزار آماری Easyfit برای تحلیل داده‌ها و برازش بهترین تابع توزیع مورد استفاده قرار گرفت. همچنین آزمون کلموگروف - اسمیرنوف<sup>۲۸</sup> (K-S) برای تطابق برازش و یافتن بهترین تابع توزیع انتخاب شده است.

نتایج تطابق برازش برای یافتن بهترین تابع توزیع احتمال بر روی TBF و TTR زیرسیستم برق برای پنج تابع توزیع با بیشترین تطابق در جدول ۴ نشان داده شده است.

برای بازکردن و تمیز کردن تجهیزات و نظایر آن است. نتایج نشان داد که ماشین حفار خط یک مترو تبریز با احتمال حدود ۸۰ درصد به مدت ۱۵ ساعت بدون وقوع خرابی درسیستم برق به فعالیت خود ادامه خواهد داد. مطابق منحنی قابلیت اطمینان، بعد از حدود ۳۹٫۸ ساعت ۵۰ درصد از قابلیت اطمینان ماشین کاسته می‌شود، بهتر است قبل از رسیدن به این مدت زمان عملیات حفاری پیوسته، ماشین مورد تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار گیرد. همچنین این منحنی نشان می‌دهد که بعد از گذشت تقریباً ۴۸۷ ساعت قابلیت اطمینان زیرسیستم برق ماشین حفار به صفر می‌رسد.

در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی، سطح اطمینان مناسب برای فعالیت تجهیزات حدود ۸۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. از این رو بازرسی و کنترل سیستم برق ماشین مورد مطالعه در فواصل زمانی قبل از حدود ۱۵٫۱ ساعت می‌تواند ماشین حفار را در سطح نسبتاً بالایی از قابلیت اطمینان و عملکرد مناسب حفظ کند.

مطابق جدول ۲، زمان تعمیرات سیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز از ۰٫۱۷ تا ۵٫۸۳ ساعت با میانگین زمان تعمیر<sup>۳۰</sup> (MTTR) ۱٫۳۷ ساعت تغییر می‌کند. منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری نشان داد که نزدیک ۶۰ درصد خرابی‌های اتفاق افتاده در سیستم برق ماشین در مدت زمان کمتر از ۱ ساعت تعمیر می‌شوند همچنین با احتمال ۸۰٪ درصد این سیستم در مدت زمان حداکثر ۱٫۸۸ ساعت تعمیر خواهد شد. این میزان زمان یک ابزار مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت تعمیر و نگهداری است. زمان تعمیر و نگهداری با برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت قطعات یدکی کاهش و قابلیت دسترسی ماشین افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، قابلیت دسترسی سیستم برق ماشین مورد مطالعه، با استفاده از داده‌های میانگین زمان بین خرابی‌ها<sup>۳۱</sup> (MTBF) و MTTR که از پایگاه به ترتیب ۶۱٫۶۷ و ۱٫۳۷ ساعت محاسبه شدند مطابق رابطه ۷ به شکل زیر تعیین شد:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{61.67}{61.67 + 1.37} = 0.978 \quad (7)$$

بالا بودن قابلیت دسترسی سیستم برق ماشین حفار به دلیل پایین بودن میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر خرابی‌های این زیرسیستم است. واضح است با محاسبه قابلیت

(۵)

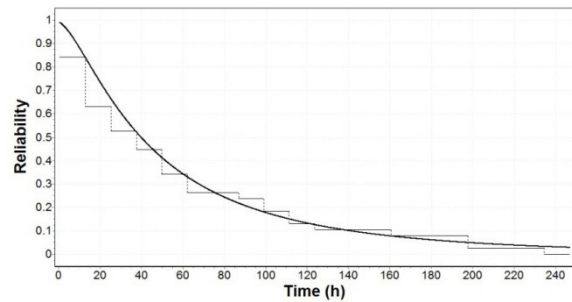
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \frac{1}{t-\gamma} \exp\left[-\frac{(\ln(t-\gamma)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$$

$$= 1 - 0.429 \int_0^t \frac{1}{t+4.69} \exp\left[-\frac{(\ln(t+4.69)-3.79)^2}{1.73}\right] dt$$

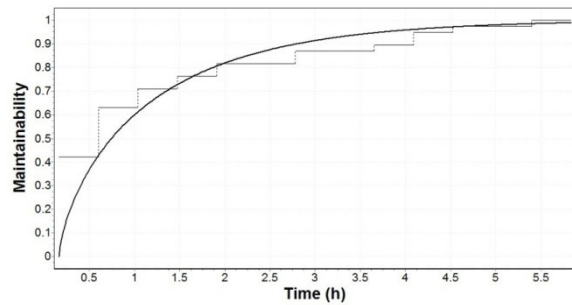
(۶)

$$M(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-\gamma)^{\alpha-1} \exp\left[-\frac{t-\gamma}{\beta}\right] dt$$

$$= 0.536 \int_0^t (t-0.17)^{-0.35} \exp\left[-\frac{t-0.17}{1.58}\right] dt$$



شکل ۵: منحنی قابلیت اطمینان سیستم برق ماشین حفار



شکل ۶: منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری سیستم برق ماشین حفار

تحلیل قابلیت اطمینان یکی از بهترین روش‌ها برای برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری است و عملیات تعمیر و نگهداری یک بخش عملیاتی بعد از وقوع خرابی در آن ممکن است مدت زمان زیادی طول بکشد. بنابراین، تعیین فواصل زمانی مناسب برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه<sup>۲۹</sup> قطعات قبل از وقوع خرابی اهمیت دارد. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه شامل کنترل کردن و بازرسی‌های برنامه‌ریزی شده از شرایط فیزیکی، تشخیص خرابی و خطرات، توقفات برنامه‌ریزی شده



صحیح عملکرد ماشین حفار، پیشنهاد می‌شود که خرابی‌ها و تاخیرهای ناشی از شرایط زمین‌شناسی، ویژگی‌های توده سنگ یا خاک، اپراتور و پرسنل تعمیر و نگهداری با مهارت کم و نظایر آن نیز مورد توجه قرار گیرند.

## ۷- سپاس‌گزاری

نویسندگان از آقایان مهندس ملکی و مهندس شیخ‌زاده و مدیریت پروژه مترو تبریز بابت کمک‌های ارزنده‌شان در تهیه داده‌ها صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

## ۸- مراجع

- [1] Koyam, Y. (2003). "Present status and technology of shield tunneling method in Japan". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2): 145-159.
- [2] Tang, M., Deng, K., Wang, L., and Chen, X. (2012). "Research on natural frequency characteristics of thrust system for EPB machines". *Automation in Construction*, 22: 491-497.
- [3] Jain, P., Naithani, A. K., and Singh, T. N. (2014). "Performance characteristics of tunnel boring machine in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps - A case study". *Journal of Rock mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1): 36-47.
- [4] Tóth, Á., Gong, Q., and Zhao, J. (2013). "Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface mixed ground". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28:140-150.
- [5] Yagiz, S. (2007). "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (3): 326-339.
- [6] Yagiz, S., and Karahan, H. (2011). "Prediction of hard rock TBM penetration rate using particle swarm optimization". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 48, 427-433.
- [7] Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., and Rostami, J. (2010). "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) System". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 333-345.
- [8] Laughton, C. (1998). "Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in variable rock Masses". PhD Thesis, University of Texas.
- [9] Frough, O., and Torabi, S. R. (2013). "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes". *Engineering Geology*, 157: 112-123.

دسترسی همه زیرسیستم‌های TBM، یک رویکرد جدید از قابلیت دسترسی این ماشین ارایه خواهد شد. بنابراین محاسبه قابلیت در دسترس بودن واقعی TBM، با در نظر گرفتن خرابی‌ها و تاخیرهای ناشی از ماشین، می‌تواند یک برنامه‌ریزی مناسب و کنترل هزینه‌ها را در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در پی داشته باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی و تعمیر و نگهداری باید بخش جدایی‌ناپذیری از مدیریت تونل‌سازی مکانیزه برای افزایش بهره‌وری و میزان در دسترس بودن و در نتیجه به حداقل رساندن توقفات و تاخیرهای برنامه‌ریزی نشده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری باشد. برای این منظور، ارزیابی کمی مقادیر RAM بر اساس داده‌های میدانی زمان بین خرابی‌ها و تعمیرات انجام گرفته ضروری است. داده‌های جمع‌آوری شده از حدود ۲ سال عملیات حفاری تونل نشان داد که داده‌های TBF و TTR سیستم برق ماشین حفار خط یک مترو تبریز هیچ گونه روند و همبستگی سری ندارد و بنابراین روش آماری کلاسیک یا فرآیند تجدید شونده برای تحلیل در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل نشان داد که داده‌های خرابی و تعمیر مورد مطالعه به ترتیب از توابع توزیع لاگ نرمال سه پارامتری و گامای سه پارامتری تبعیت می‌کنند.

بر اساس این نتایج، سیستم برق ماشین قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری بالایی دارد. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۸۰ درصد به عنوان یک سطح کاربردی مناسب برای حفظ مطلوب عملیات حفاری، پیشنهاد شد که سیستم برق حدود هر ۱۵/۶۱ ساعت مورد بازرسی و کنترل قرار بگیرد.

همچنین به دلیل پایین بودن MTTR، سیستم برق قابلیت دسترسی بالایی برابر با ۹۷/۸ درصد دارد. تحلیل قابلیت اطمینان نشان داد که حدود ۸۰ درصد شانس وجود دارد که سیستم برق ماشین بدون خرابی نزدیک به ۱۵ ساعت به فعالیت خود ادامه دهد. مطابق منحنی قابلیت تعمیر و نگهداری اکثر خرابی‌ها در مدت زمان کمتر از ۱ ساعت تعمیر خواهند شد و با احتمال ۸۰ درصد این زمان کمتر از ۱/۸۸ ساعت است.

با توجه به نتایج بدست آمده، تحلیل RAM ماشین حفار تونل برای برنامه‌ریزی زمانی، کنترل هزینه‌ها، فواصل زمانی مناسب تعمیر و نگهداری و بهبود عملکرد TBM ضروری است. واضح است که بخش‌ها و قطعات با مقادیر پایین RAM باید شناسایی شده و مورد توجه بیشتر قرار گیرند. برای ارزیابی

<sup>۱</sup> Earth pressure balance tunnel boring machine (EPB-TBMs)

<sup>۲</sup> Back up

<sup>۳</sup> Utilization factor

<sup>۴</sup> Deccan

<sup>۵</sup> Rock Mass Rating System

<sup>۶</sup> Rock Engineering System

<sup>۷</sup> Reliability, Availability, Maintainability

<sup>۸</sup> Times between failures (TBFs)

<sup>۹</sup> Time to repairs (TTRs)

<sup>۱۰</sup> Steady state availability

<sup>۱۱</sup> Inherent availability

<sup>۱۲</sup> Mean Time Between Failure

<sup>۱۳</sup> Mean Time To Repair

<sup>۱۴</sup> Access time

<sup>۱۵</sup> Diagnosis time

<sup>۱۶</sup> Verification and alignment

<sup>۱۷</sup> Chamber

<sup>۱۸</sup> Segment

<sup>۱۹</sup> Erector

<sup>۲۰</sup> Connecting beam

<sup>۲۱</sup> Trend test

<sup>۲۲</sup> Serial correlation test

<sup>۲۳</sup> Non-Homogenous Poisson Process (NHPP)

<sup>۲۴</sup> Branching Poisson Process

<sup>۲۵</sup> Independent and Identically Distributed (iid)

<sup>۲۶</sup> Renewal process

<sup>۲۷</sup> Chi-squared

<sup>۲۸</sup> Kolmogorov - Smirnov

<sup>۲۹</sup> Preventive maintenance

<sup>۳۰</sup> Mean time to repair

<sup>۳۱</sup> Mean time between failures

[10] Frough, O., Torabi, S. R., and Tajik, M. (2012). "Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance tunnel (lots 1 and 2)". Journal of Mining and Environment, 3(2): 89-98.

[11] Dhillon, B. S. (2008). "Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety". Springer-Verlag London Limited, pp. 209.

[12] Amini Khoshalan, H., Torabi, S. R., Hoseinie, S. H., and Ghodrati, B. (2014). "An introduction to RAM analysis of EPB tunnel boring machine". Scientific Journal of Pure and Applied Sciences, 3(3): 120-127.

[13] Kumar, U., and Granholm, S. (1988). "Reliability Technique: A Powerful Tool for Mine Operator". Mineral Resource Engineering, 1: 13-28.

[14] Biały, W. (2013). "The effect of experimental research on the durability and reliability of mining equipment". ZeszytyNaukowe, 34(106): 27-34.

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

[16] Smith, D. J. (2005). "Reliability, Maintainability and Risk". Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 346.

[17] Barabady, J. (2007). "Production Assurance: Concept, Implementation and Improvement". Doctoral thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, pp. 139.

[18] NFM Technologies. (2007). "Operating and maintenance manual for EPB TBM for Tabriz". Tabriz Urban Railway Organization, pp. 288.

[19] Ascher, H., and Feingold, H. (1984). "Repairable system reliability". Marcel Dekker, New York, pp. 223.

[20] Hall, R., and Daneshmend, L. K. (2003). "Reliability Modelling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methodologies". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 17(3): 139-155.

[21] Barabady, J., and Kumar, U. (2008). "Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran". Reliability Engineering and System Safety, 93, 647-653.

[22] Kumar, U. (1990). "Reliability analysis of load-haul-dump machines". Doctor's Thesis, Lulea University of Technology.