

## تحلیل قابلیت دسترسی ماشین آلات معدنی در معدن مس سونگون

علی نوری قراحسنلو<sup>۱</sup>، رضا خالوکاکایی<sup>۲</sup>، محمد عطایی<sup>۲\*</sup>، سعید فطورچی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- عضو هیئت علمی گروه معدن دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه شاهرود

(دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۰۱، پذیرش ۱۳۹۵/۰۱/۲۴)

### چکیده

قابلیت دسترسی به سبب پیچیدگی سیستم‌های نوین امروزی، هزینه‌های عملیاتی و تضمین عملکرد صحیح محصول (خدمات)، به عنوان یک چالش در قرن ۲۱ به شمار می‌رود. در گذشته این شاخص تنها دغدغه صنایع حساس و پیچیده مانند صنایع نظامی، هسته‌ای و هوا فضا بود، در حالی که امروزه این مساله به یک نگرانی عمومی و فراگیر در اکثر صنایع به ویژه صنعت معدنکاری با تجهیزات گول‌آسا تبدیل شده است. قابلیت دسترسی به لحاظ ریاضی زمان سرپایی و زمان افت را در برمی‌گیرد که این دو پارامتر در قالب دو شاخص قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مطرح‌اند. در این مقاله پس از معرفی مفهوم قابلیت دسترسی، انواع قابلیت دسترسی، پارامترهای تشکیل دهنده آن و ایده اهمیت قابلیت دسترسی مورد بحث قرار گرفته است. در آخرین بخش از مقاله نیز سیستم معدنی شامل زیرسیستم‌های لودر WA470-3، بلدوزر کوماتسو D155A و دامپتراک کوماتسو HD785-5 از معدن مس سونگون در یک بازه ۱۵ ماهه تحلیل شده است. با استفاده از تحلیل‌های آماری تابع یا مدل مناسبی بر داده‌های خرابی (زمان بین خرابی‌ها) و تعمیرات (زمان تا انجام تعمیر) زیرسیستم‌ها برازش شده، سپس مقدار قابلیت دسترسی زیرسیستم و سیستم محاسبه و در آخرین مرحله نیز از ایده اهمیت قابلیت دسترسی برای اولویت‌بندی زیرسیستم‌ها در ساختار سیستم کلی استفاده شده است. مقدار شاخص اهمیت قابلیت دسترسی نشان داد که زیرسیستم لودر به شدت نیازمند ارتقا و بهبود وضعیت عملکردی است و بهبود قابلیت تعمیرپذیری نسبت به قابلیت اطمینان اولویت بیشتری دارد.

### کلمات کلیدی

قابلیت اطمینان، قابلیت تعمیرپذیری، قابلیت دسترسی، اهمیت قابلیت دسترسی، معدن.

## ۱- مقدمه

برای تحلیل برخی سیستم‌های متشکل از ماشین‌های نو (با عمر کارکرد صفر) مانند سیستم هیدرولیک که امکان دستیابی به داده‌های تاریخی برای آن‌ها وجود نداشت، از روش FMEA<sup>۵</sup> استفاده کردند [۳]. در سال ۲۰۰۴ سامانتا و همکاران از روندی مشابه فرآیند هال و دانشمند (۲۰۰۳) [۳]، برای تحلیل قابلیت دسترسی سیستم LHD استفاده کردند. با این تفاوت که در مرحله سوم این تحقیق از مدل مارکوف استفاده شد [۵]. طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ برآبادی و کومار طی مجموعه تحقیقاتی بر روی قابلیت دسترسی دپارتمان سنگ شکنی کارخانه بوکسیت جاجرم، به نتایج بسیار خوبی دست یافتند [۸-۶]. در سال ۲۰۰۹ نیز واگناژ و ویو روندی مشابه روند هال و دانشمند (۲۰۰۳) را برای داده‌های به دست آمده از ناوگانی با ۱۳ ماشین LHD در مدت زمان ۱۷ ماه تکرار کردند [۹]. در سال‌های اخیر نیز عباس برآبادی و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت دسترسی ناوگان استخراجی معدن بوکسیت جاجرم را مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

در این مقاله پس از تشریح مختصر قابلیت دسترسی و انواع آن بر اساس پارامترهای مختلف زمانی، نحوه محاسبه دو پارامتر اصلی قابلیت دسترسی یعنی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. در آخرین بخش نیز یک سیستم معدنی شامل سه زیرسیستم دامپتراک، لودر و بلدوزر از ناوگان استخراجی معدن مس سونگون مورد تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- قابلیت دسترسی

قابلیت دسترسی را می‌توان در این پرسش خلاصه کرد: "برای اطمینان از این که یک سیستم به هنگام نیاز برای بازه زمانی مشخص در وضعیت در حال کار قرار داشته باشد، چه ملاحظاتی باید در نظر گرفته شود؟" [۱۱]. تعریف علمی قابلیت دسترسی عبارت است از توانایی یک قلم برای قرار گرفتن در حالتی که با فرض تامین منابع خارجی مورد نیاز قادر باشد فعالیت مورد نظر را تحت شرایط معین، در لحظه یا بازه زمانی مشخص انجام دهد. توجه شود که سایر منابع به جز منابع خارجی مورد نیاز برای اجرای نگهداری و تعمیرات (نت) یک قلم، تأثیری بر قابلیت دسترسی قلم نخواهد داشت [۱۲]. فرمول اساسی قابلیت دسترسی را می‌توان به شکل رابطه (۱) بیان کرد [۱۱]:

با ظهور و گسترش تقاضا برای اتوماسیون در بخش‌های مختلف صنایع و تولید از جمله خطوط تولید فرآیندی از قبیل صنایع تولید مواد شیمیایی، کاغذسازی و صنایع مواد معدنی، حجم سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در صنعت به شدت افزایش یافته است. بازگشت این سرمایه‌گذاری‌های کلان و ادامه حیات در فضای رقابتی کسب و کار جهان امروز مستلزم طراحی سیستم‌های سرپا و کارآمد است. عملیاتی کردن این هدف بدون حفظ کیفیت ماشین‌آلات و آماده به کار نگه‌داشتن آن‌ها و بهره‌وری شایسته از تجهیزات غیرممکن است. دستیابی به این مهم نیز در گرو شناخت رفتار تجهیزات و اتخاذ تصمیمات صحیح بر اساس این رفتارها است. شاخص قابلیت دسترسی<sup>۱</sup> متشکل از دو عنصر اصلی یعنی قابلیت اطمینان<sup>۲</sup> و قابلیت تعمیرپذیری<sup>۳</sup>، از جمله ابزار کارآمدی است که به مهندسی برای تصمیم‌گیری دقیق بر اساس رفتار ماشین‌آلات کمک می‌کند. درباره قابلیت دسترسی در حوزه‌های مرتبط با صنعت معدنکاری پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

پژوهش کومار و هانگ در سال ۱۹۹۳ در سیستم تولیدی معدن زیرزمینی را شاید بتوان به عنوان نخستین قدم در تحلیل قابلیت دسترسی در حوزه معدن معرفی کرد. در این تحقیق عملیات استخراجی در دو زیرسیستم: دسترسی به ماده معدنی خرد شده (شامل خرابی‌های رخ داده در سقف معدن، خرابی‌های ناشی از منابع انرژی، خرابی رخ داده در سیستم تهویه، خرابی‌های موثر در میزان تولید) و خرابی در فرآیند بارگیری که ناشی از اپراتور است، تحلیل شده است [۱]. واگناژ و همکاران برای تحلیل عملکرد ماشین‌های LHD از قابلیت دسترسی استفاده کرده‌اند [۲]. در دهه نخست هزاره سوم میلادی، محققان با تمرکز بیشتر بر تجهیزات معدنی مانند: شاول هیدرولیکی، اسکوپ (خاک‌انداز) معدنی<sup>۴</sup>، ماشین کند و برداشت، LHD، سنگ‌شکن، شاول کابلی، سیستم تولید در جبهه کار طولانی به بسط بیشتر موضوع قابلیت دسترسی در زمینه معدنکاری همت گماشتند. تحلیل قابلیت دسترسی شاول هیدرولیک توسط هال و دانشمند (۲۰۰۳) از جمله این پژوهش‌ها است [۳].

آنان در همین سال تحقیق مشابهی را بر روی تجهیزات بارگیری و باربری شامل چهار خاک‌کش و یازده کامیون محرک در معادن زیرزمینی انجام دادند [۴]. هال و دانشمند

حالی که  $\bar{M}$  تابعی از زمان‌های تعمیرات و خدمات‌رسانی است.  $A_a$  برای ارزیابی مناسب بودن برنامه‌ریزی‌های مختلف نت پیشگیرانه، به کار می‌رود [۱۳].

### ۳-۲- قابلیت دسترسی عملیاتی

قابلیت دسترسی عملیاتی<sup>۴</sup> ( $A_0$ ) به عنوان احتمال این که سیستم یا قلمی از تجهیزات در محیط عملیاتی و به محض نیاز به طور رضایت‌بخشی قادر به انجام فعالیت مورد نظر باشد، تعریف می‌شود (رابطه ۴) [۱۳، ۱۴].

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (۴)$$

که در آن:

MDT متوسط زمان توقف نت<sup>۱۵</sup>

MTBM متوسط زمان بین نت

عکس MTBM فراوانی انجام نت است که به نوبه خود عامل مهمی در شناسایی الزامات پشتیبانی تدارکات است. MDT در برگیرنده زمان نت فعال، زمان تاخیر تدارکات و زمان تاخیر مدیریتی است.  $A_0$  در طول فاز عملیاتی سیستم برای ارزیابی عملکرد وضعیت واقعی به کار می‌رود [۱۳]. در جدول ۱ انواع مختلف قابلیت دسترسی به صورت مختصر نشان داده است.

### ۳- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

قابلیت اطمینان (زمان‌های سرپا بودن) نخستین پارامتر از قابلیت دسترسی است که به عنوان "توانایی یک قلم در انجام فعالیت مورد نیاز، در یک بازه زمانی مشخص و شرایط محیطی مشخص" تعریف می‌شود [۱۵]. تابع قابلیت اطمینان ( $R(t)$ ) برای متغیر تصادفی  $t$  (زمان) بر حسب زمان بین خرابی‌ها (TBFs) را می‌توان به شکل رابطه ۵ تعریف کرد [۱۶]:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx = 1 - F(t) \quad (۵)$$

که در آن:

$f(x)$  تابع چگالی احتمال خرابی

$F(t)$  تابع توزیع تجمعی احتمال خرابی

متوسط زمان بین خرابی (MTBF) را نیز می‌توان از

رابطه ۶ بدست آورد:

$$A = \frac{\text{زمان کارکرد}}{\text{زمان کارکرد} + \text{زمان توقف}} = \frac{\text{زمان کارکرد}}{\text{زمان کل}} \quad (۱)$$

در این رابطه زمان کارکرد متناسب با قابلیت اطمینان و زمان توقف متناسب با قابلیت تعمیرپذیری است. قابلیت دسترسی بسته به لحاظ کردن یا لحاظ نکردن عناصر مختلف زمانی تعاریف مختلفی پیدا می‌کند [۱۳]. انواع قابلیت دسترسی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

### ۱-۲- قابلیت دسترسی ذاتی

قابلیت دسترسی ذاتی<sup>۶</sup> ( $A_i$ ) به عنوان احتمال این که یک سیستم یا تجهیزات تحت پوشش شرایط پشتیبانی آرمانی (مانند سهولت دسترسی به ابزارآلات، قطعات یدکی، پرسنل نت و نظایر آن) به کار گرفته شود و به صورت رضایت بخش در تمام بازه زمانی مورد نیاز عمل کند، تعریف می‌شود. این تعریف فعالیت برنامه‌ریزی شده یا پیشگیرانه نت و زمان‌های تاخیر تدارکات را شامل نمی‌شود و به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (۲)$$

که در آن:

MTBF متوسط زمان بین خرابی<sup>۸</sup>

MTTR متوسط زمان انجام تعمیرات<sup>۹</sup> (زمان توقف

فعال)<sup>۱۰</sup> [۱۳، ۱۴].

### ۲-۲- قابلیت دسترسی تحصیل شده

قابلیت دسترسی تحصیل شده<sup>۱۱</sup> ( $A_a$ ) مشابه قابلیت دسترسی ذاتی است با این تفاوت که در آن زمان انجام نت پیشگیرانه یا برنامه‌ریزی شده در محاسبات وارد می‌شود.  $A_a$  زمان تاخیرهای تدارکاتی و مدیریتی را در بر نمی‌گیرد و به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود [۱۳]:

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (۳)$$

که در آن:

MTBM متوسط زمان بین نت<sup>۱۲</sup>

$\bar{M}$  زمان متوسط نت فعال<sup>۱۳</sup>

MTBM تابعی از فعالیت‌های نت انجام گرفته است در

جدول ۱: سنجش‌های مختلف قابلیت دسترسی [۱۳]

کاربرد	زمان‌های وارد شده در محاسبات			فرمول محاسباتی	نوع
	تاخیر تدارکات و مدیریتی	نت پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شده	نت واکنشی		
تولید	✓	✓	✓	$A = \frac{\text{Up Time}}{\text{Total Time}}$	کلی
طراحی سیستم	—	—	✓	$A_i = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$	ذاتی
طراحی سیستم و برنامه‌ریزی نت	—	✓	✓	$A_a = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \bar{M}}$	تحصیل شده
عملیات	✓	✓	✓	$A_o = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{MDT}}$	عملیاتی

قابلیت اطمینان و TTR برای قابلیت تعمیرپذیری، تحلیل‌های آماری بر روی داده انجام می‌گیرد. ارزیابی داده‌ها از لحاظ توزیع یکسان (آزمون روند) و مستقل بودن (آزمون خودهمبستگی)<sup>۱۶</sup> (فرض iid)، و برازش مناسب‌ترین مدل یا توزیع آماری بر داده‌ها عناصر اصلی این تحلیل هستند [۸].

#### ۴- قابلیت دسترسی سیستم

دستگاه‌های مختلف ممکن است دارای شبکه‌های ساده تا فوق‌العاده پیچیده‌ای باشند اما در تحلیل‌های قابلیت دسترسی سیستم‌های معدنی عمدتاً از دو آرایش سری و موازی استفاده می‌شود در شبکه سری همه زیرسیستم‌ها باید درست کار کنند تا در نهایت سیستم بتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد. در شبکه سری قابلیت دسترسی کل سیستم از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^n (A_i) = \prod_{i=1}^n \left( \frac{\text{MTTF}_i}{\text{MTTF}_i + \text{MTTR}_i} \right) \quad (9)$$

در شبکه موازی تمامی زیرسیستم‌ها فعال اند و حداقل باید یک زیرسیستم درست کار کند تا دستگاه عملکرد موفقیت‌آمیزی داشته باشد. در شبکه موازی قابلیت دسترسی کل سیستم از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) = \prod_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\text{MTTR}_i}{\text{MTTF}_i + \text{MTTR}_i} \right) \quad (10)$$

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (R(t)) dt \quad (6)$$

شاخص بعدی قابلیت دسترسی، قابلیت تعمیرپذیری است که نشان دهنده توانایی بازگشت سیستم به وضعیت در حال کار است. به عنوان مثال قابلیت تعمیرپذیری ۹۰ درصدی یک قلم یا سیستم در طول یک ساعت، به معنی وجود احتمال ۹۰ درصدی برای تعمیر شدن آن قلم در طول یک ساعت است [۶]. تعریف علمی این شاخص عبارت است از توانایی یک قلم برای ادامه حیات یا بازگشت به حالت توانمندی برای انجام فعالیت مورد انتظار تحت شرایط معین، در صورت انجام نت تحت این شرایط با استفاده از روش و منابع مشخص [۱۷]، [۱۸]. در صورتی که  $t$  متغیر تصادفی و نشان دهنده زمان انجام تعمیرات (TTRs) با تابع چگالی احتمال تعمیرات  $m(t)$  باشد، تابع توزیع تجمعی تعمیرات  $M(t)$  را می‌توان به صورت رابطه ۷ تعریف کرد [۱۹]:

$$M(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t m(t') dt' \quad (7)$$

متوسط زمان تا انجام تعمیرات (MTTR) را نیز می‌توان از رابطه (۸) به دست آورد [۱۹]:

$$\text{MTTR} = \int_0^{\infty} t m(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (8)$$

در این مقاله پس از تشکیل بانک داده‌های TBF برای

## ۵- اهمیت قابلیت دسترسی

برای سیستم با شبکه موازی نیز اهمیت قابلیت دسترسی هر زیرسیستم از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$I_{A_i} = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = 1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - A_k) \quad (13)$$

## ۶- مطالعه موردی

لودرها، دامپتراک‌ها و بلدوزر از جمله پرکاربردترین ماشین‌آلات به کار رفته در مرحله بارگیری، باربری، تسطیح و دپو در معادن روباز هستند. در معدن مس سونگون نیز برای عملیات استخراجی از دستگاه‌های با برندها و مدل‌های مختلف استفاده می‌شود که در این تحقیق رفتار سیستم معدنی شامل زیرسیستم لودر کوماتسو WA470-3، زیرسیستم بلدوزر کوماتسو D155A و زیرسیستم دامپتراک کوماتسو HD785-5 برای تحلیل برگزیده شده است. دیاگرام بلوکی این سیستم در شکل ۱ مشاهده می‌شود. برای تحلیل آماری داده‌های مربوط به موضوع از دو نرم‌افزار Minitab 16 و Weibull++9 استفاده شده است.

## ۶-۱- جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های مورد نیاز تحلیل از دو منبع اصلی یعنی گزارش‌های روزانه معدن و داده‌های واحد تعمیرگاه برای بازه ۱۵ ماه گردآوری شد. پس از مرتب شدن داده‌ها، TBFs و TTRs از بانک داده استخراج شدند. نمونه‌ای از داده‌های خرابی لودر در دو قالب زمان بین خرابی‌ها (TBFs) و زمان تا وقوع خرابی‌ها (TTFs) و داده‌های تعمیرات در دو قالب زمان انجام تعمیرات (TTRs) و زمان تا انجام تعمیرات (TTTRs) در جدول ۲ نشان داده شده است.

اهمیت قابلیت دسترسی (AI) سنج‌های از چگونگی تاثیرگذاری هر کدام از زیرسیستم‌ها بر قابلیت دسترسی کلی سیستم است. به عنوان مثال در یک سیستم سری، نوع سیستم جزء، قلم یا زیرسیستمی که کوتاه‌ترین عمر را دارد، بیشترین تاثیر را بر قابلیت دسترسی سیستم می‌گذارد. یعنی جزیی که قابلیت دسترسی آن از همه اجزا کمتر است، در یک دوره زمانی مشخص بیشترین تاثیر را بر قابلیت دسترسی کلی سیستم خواهد داشت. در مورد سیستم‌های ساده مانند سیستم‌های سری تعیین زیرسیستم ضعیف کاری نسبتاً ساده است، در حالی که این موضوع در مورد سیستم‌های پیچیده چندان راحت نیست و استفاده از شاخص AI برای تعیین زیرسیستم‌های بحرانی ضروری است. مقدار AI تابع قابلیت دسترسی جزء یا زیرسیستم و موقعیت آن در سیستم است. به لحاظ ریاضی AI برابر مشتق جزیی قابلیت دسترسی سیستم نسبت به جزء مورد نظر است. اهمیت قابلیت دسترسی برای جزء  $i$  ام از سیستمی که  $n$  زیرسیستم دارد به صورت رابطه (۱۱) قابل بیان است [۲۱]:

$$I_{A_i} = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (11)$$

که در آن:

$A_s$  قابلیت دسترسی سیستم

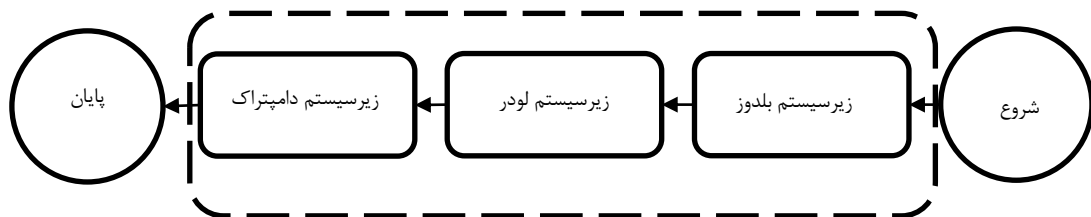
$A_i$  قابلیت دسترسی جزء مورد نظر

در شبکه سری اهمیت قابلیت دسترسی هر زیرسیستم از

رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

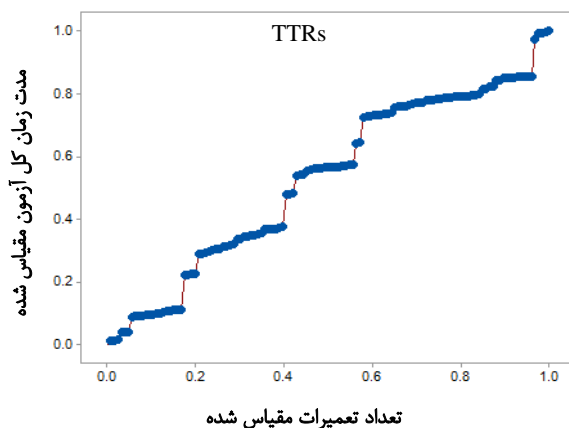
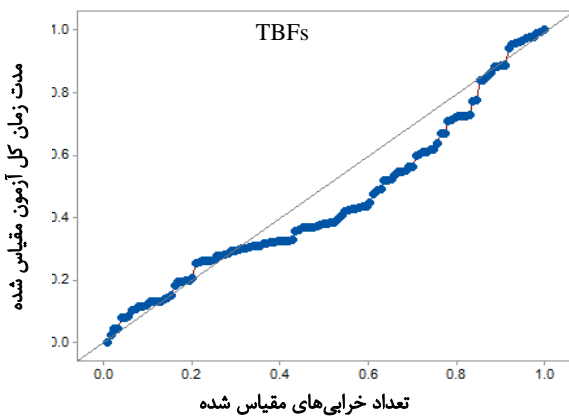
$$I_{A_i} = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n A_k \quad (12)$$

سیستم معدنی



شکل ۱: نمودار بلوکی سیستم معدنی

نتیجه روش تحلیلی آزمون روند برای لودر در سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.05$  در این جدول ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر  $P$ -value در این زیرسیستم برای هر دو آماره آزمون تحلیلی روند و در هر دو سری داده‌های خرابی (TBFs) و تعمیرات (TTRs) بزرگ‌تر از  $\alpha$  است، در نتیجه در این زیرسیستم فرضیه صفر نداشتن روند پذیرفته می‌شود، در مورد آماره laplace نیز با توجه به اختلاف ناچیز  $p$ -value آن با  $\alpha$  و نتایج حاصل سایر آزمون‌ها (ترسیمی و تحلیلی روند) فرض صفر پذیرفته می‌شود. نتایج آزمون ترسیمی روند نیز در شکل ۲ نشان دهنده صحت نتایج حاصل از آزمون تحلیلی است چرا که در هر دو نمودار تقعر یا تحدب چندانی نسبت به قطر نمودار (خط صاف) مشاهده نمی‌شود.



شکل ۲: آزمون ترسیمی روند لودر WA470-3

جدول ۲: نمونه داده‌های خرابی و تعمیرات برای لودر WA470-3

ردیف	TBFs	TTFs	TTRs	TTRs
۱	۵,۵	۵,۵	۲۸,۵	۲۸,۵
۲	۱۰۰	۱۰۵,۵	۱	۲۹,۵
۳	۷۷	۱۸۲,۵	۳/۵	۳۳
۴	۳,۷۵	۱۸۶,۲۵	۵۲,۲۵	۸۲,۲۵
۵	۱۵۳,۸۳	۳۸۰,۰۸	۳	۸۸,۲۵
۶	۲,۵	۳۴۲,۵۸	۱,۲۵	۸۹,۵
۷	۷,۵	۳۵۰,۰۸	۱۱۱,۲۵	۲۰۰,۷۵
۸	۹۶,۲۵	۴۴۶,۳۳	۶,۷۵	۲۰۷,۵
۹	۸/۵	۴۵۴,۸۳	۱	۲۰۸,۵
۱۰	۳۹,۷۵	۴۹۴,۵۸	۰,۵	۲۰۹
:	:	:	:	:

#### ۶-۲- قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی

قبل از هر نوع برآزشی باید فرض توزیع یکسان و مستقل داده‌ها بررسی شود. در آمار و احتمالات، دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی که توزیع یکسان دارند و دو به دو مستقل از هم‌اند، متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکسان (iid) نامیده می‌شوند. مستقل بودن با توزیع یکسان به معنی برابر بودن احتمال وقوع همه اعضای فضای نمونه نیست بلکه به این مفهوم است که وقوع هر کدام از اعضای یک دنباله مستقل از متغیرهای تصادفی است که قبل از آن ظاهر شده‌اند [۲۲]. برای تحلیل فرض iid از دو آزمون روند و خودهمبستگی استفاده می‌شود. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع یکسان بوده ولی مستقل از هم نباشند، از مدل‌های نامانا مانند پواسون ناهمگن (فرآیند قانون توانی<sup>۱۸</sup>) استفاده می‌شود [۸]. در این پژوهش، برای انجام آزمون روند از روش‌های تحلیلی (شامل آزمون‌های MLI-Hdbk-189 و Laplace) و ترسیمی (شامل TBFهای تجمعی به تعداد وقوع تجمعی خرابی‌ها) و برای آزمون خودهمبستگی از روش‌های تحلیلی (شامل آزمون‌های ACF, TSTA, LBQ) و ترسیمی (تابع خودهمبستگی نما<sup>۱۹</sup>) استفاده شده است [۲۳]. نتایج تحلیل‌های آماری برای داده‌های خرابی و تعمیرات لودر برای دستیابی به توابع قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، در جدول ۳ نشان داده شده است.

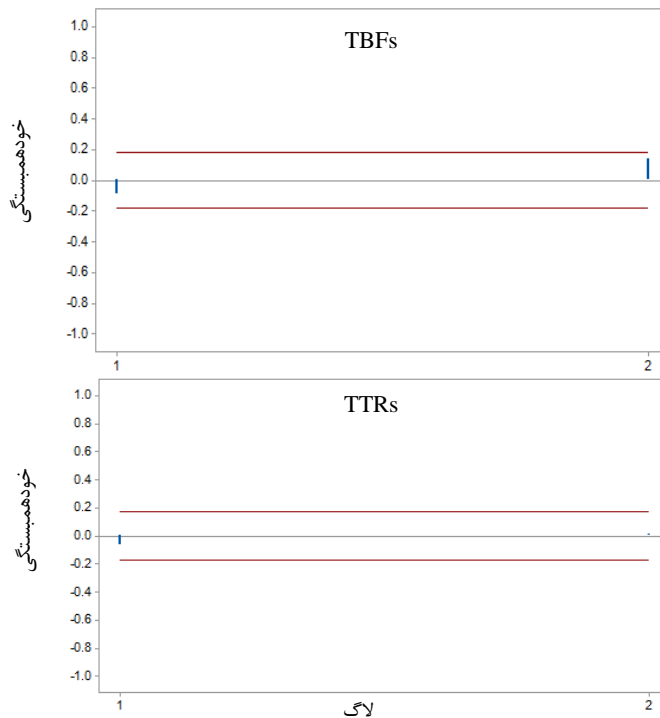
جدول ۳: فرآیندی آماری برای برازش تابع با مدل مناسب برای لودر WA470-3

TBFs									
مدل یا توزیع		فرض iid	آزمون خودهمبستگی			آزمون روند			
			LBQ	TSTA	ACF	Laplace's	MIL-Hdbk-189		
Lognormal-2P		فرض iid	-۰٫۰۹۲	-۱٫۰۲۶	۱٫۰۷۹	آماره آزمون (لاگ ۱)	-۱٫۹۹	۲۶۰٫۰۲	آماره آزمون
			۳٫۵۷۸	۱٫۵۴۲	۰٫۱۴۰	آماره آزمون (لاگ ۱)	۰٫۰۴۷	۰٫۵۱۵	P-Value
پارامترها			بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون تحلیلی	بدون روند	نتایج آزمون تحلیلی	
2 <sup>nd</sup> .	1 <sup>st</sup> .		بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون ترسیمی	بدون روند	نتایج آزمون ترسیمی	
۱٫۳۸۳	۲٫۷۰۱	پذیرفته شد	بدون خودهمبستگی			خودهمبستگی	بدون روند	روند	
TTRs									
مدل یا توزیع		فرض iid	آزمون خودهمبستگی			آزمون روند			
			LBQ	TSTA	ACF	Laplace's	MIL-Hdbk-189		
Normal-2P		فرض iid	۰٫۴۹۷	-۰٫۶۹۶	-۰٫۰۶۲	آماره آزمون (لاگ ۱)	۱٫۰۱	۲۳۱٫۴۳	آماره آزمون
			۰٫۵۱۲	۰٫۱۴۳	۰٫۰۱۳	آماره آزمون (لاگ ۱)	۰٫۳۱۳	۰٫۴۱۱	P-Value
پارامترها			بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون تحلیلی	بدون روند	نتایج آزمون تحلیلی	
2 <sup>nd</sup> .	1 <sup>st</sup> .		بدون خودهمبستگی			نتایج آزمون ترسیمی	بدون روند	نتایج آزمون ترسیمی	
۶۴۹٫۷۴۴	۱۲۲۶٫۲۳۶	پذیرفته شد	بدون خودهمبستگی			خودهمبستگی	بدون روند	روند	

دارد. بنابراین، این آماره نیز پذیرش فرضیه صفر عدم وجود خودهمبستگی را تایید می‌کند. آماره سوم مورد استفاده LBQ<sup>۲۱</sup> است که این آماره نیز با توجه به مقایسه مقادیر آماره با مقدار بحرانی آماره یعنی ۳/۸۴۱ پذیرش فرضیه صفر و عدم وجود خودهمبستگی در لودر را تایید می‌کند.

بنابراین با توجه به نتایج آزمون‌های روند و خودهمبستگی فرض iid در مورد TBFs و TTRs لودر پذیرفته شده است. در مرحله بعد توابع توزیع مناسب برای خرابی و تعمیرات با استفاده از نرم‌افزار Weibull++<sup>۹</sup> و بر اساس آماره کلموگروف-اسمیرنوف تعیین شده است [۲۳]. مطابق جدول ۳ تابع توزیع لاگ نرمال دو پارامتری با لگاریتم میانگین ( $\mu$ ) ۲٫۷۰۱ و لگاریتم انحراف معیار ( $\sigma$ ) ۱٫۳۸۳ برای TBFs و تابع توزیع نرمال دو پارامتری با میانگین ( $\mu$ ) ۱۲۲۶٫۲۳۶ و انحراف معیار ( $\sigma$ ) ۶۴۹٫۷۴۴ برای TTRs برازش

برای تصمیم‌گیری درباره رد یا پذیرش فرضیه صفر عدم وجود خودهمبستگی با استفاده از AFC در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از نمودارهای خودهمبستگی نما<sup>۲۰</sup> در شکل ۳ استفاده شده است. در این نمودار مقادیر AFC با ستون‌ها و مرز بحرانی اطمینان ۹۵ درصد برای ارزیابی فرضیه صفر با خط‌چین نمایش داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود ستون AFC مربوط به گام ۱ داده‌های خرابی و تعمیرات زیرسیستم به ترتیب دارای مقدار ۱/۰۷۹ و ۰/۰۶۲- و در محدوده خط‌چین‌ها قرار دارد و در نتیجه فرض صفر عدم وجود خودهمبستگی برای آن پذیرفته می‌شود. آماره دوم نشان داده شده در جدول T-test (TSTA) است. مقدار این آماره برای داده‌های خرابی و تعمیرات به ترتیب ۱/۰۲۶- و ۰/۶۹۶- است. همان‌طور که دیده می‌شود در هر دو مورد مقدار آماره در محدوده دو مرز بحرانی ۱/۹۶- و ۱/۹۶ قرار



شکل ۳: نمودار خودهمبستگی نما برای دو لاک یک و دو در لودر WA470-3

جدول ۴: برازش توابع یا مدل آماری برای زیرسیستم‌های معدنی

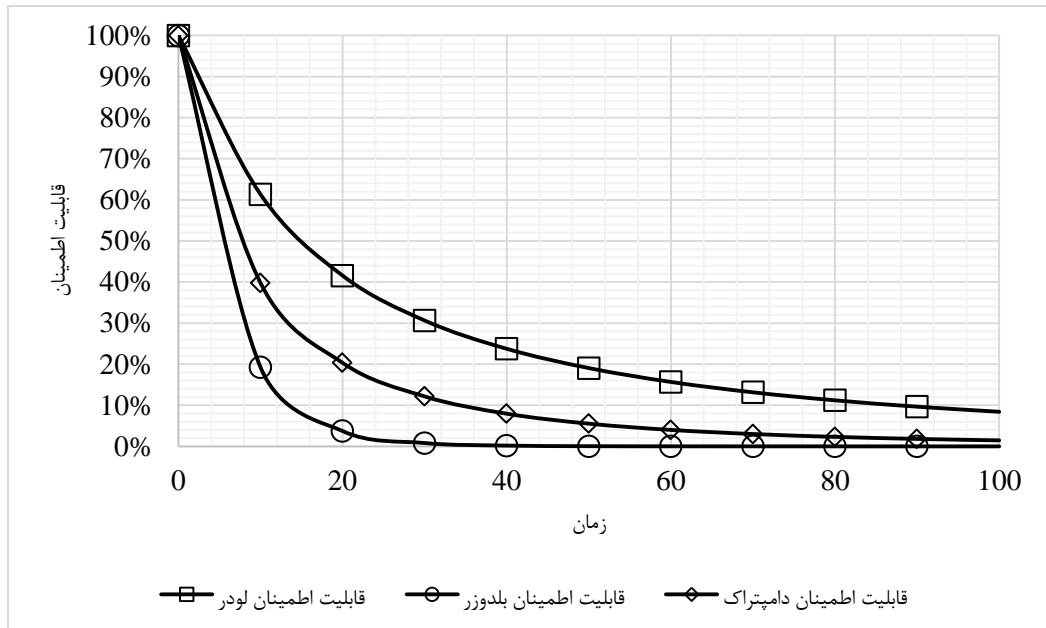
پارامترها	تابع یا مدل	فرض iid	نوع داده‌ها	زیرسیستم
Log-mean: ۲,۷۰۱ , Log-std: ۱,۳۸۳	Lognormal-2P	قبول	TBFs	لودر
Mean: ۱۲۲۶,۲۳۶ , Std: ۶۴۹,۷۴۴	Normal-2P	قبول	TTRs	
Beta: ۰,۸۷۸ , Eta: ۴۳,۱۵۸ , Gamma: ۱,۶۴۷	Weibull-3P	قبول	TBFs	بلدوزر
Mu: ۱,۴۴۲ , Sigma: ۰,۶۶۱	Loglogistic-2P	قبول	TTRs	
Beta: ۱,۳۵۷ , Eta: ۱۱۴,۷۱۱	PLP	رد	TBFs	دامپتراک
Beta: ۰,۵۰۷ , Eta: ۰,۰۹۸	PLP	رد	TTRs	

افت می‌کند و تقریباً پس از ۱۰۰ ساعت کارکرد عملاً صفر می‌شود. در این سیستم به لحاظ قابلیت اطمینان، زیرسیستم لودر در کل بازه کارکرد ۱۰۰ ساعت بالاترین مقدار و زیرسیستم دامپتراک بدترین وضعیت را دارد. در مورد قابلیت تعمیرپذیری نیز مطابق شکل برای دو زیرسیستم دامپتراک و بلدوزر وضعیت یکسان و احتمال تعمیر این دو زیرسیستم در ۲۰ ساعت تقریباً ۱۰۰ درصد است. در حالی که زیرسیستم لودر از منظر قابلیت تعمیرپذیری بحرانی‌ترین حالت را دارد و احتمال تعمیر آن حتی پس از ۱۰۰ ساعت نیز از ۱۰ درصد بیش‌تر نشده است.

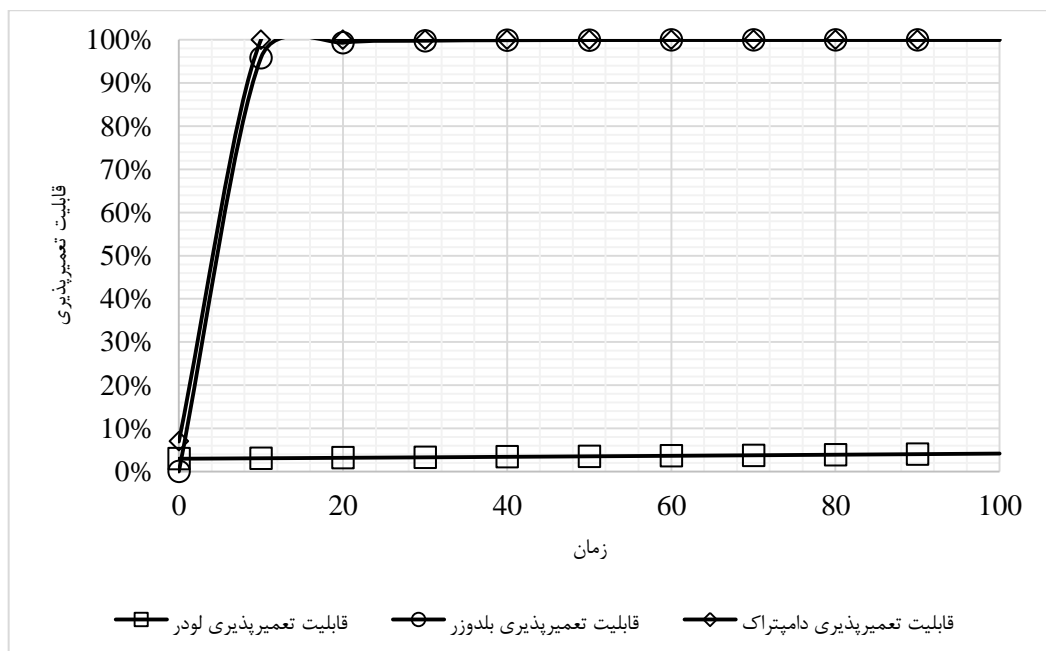
شده است. جدول ۴ نتایج تحلیل‌های آماری برای زیرسیستم‌ها را نشان می‌دهد. طبق این جدول تنها برای زیرسیستم دامپتراک فرض iid رد شده است بنابراین رفتار خرابی‌ها (TBFs) و تعمیرات (TTRs) آن با مدل PLP توصیف شده است.

در شکل ۴ و شکل ۵ قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی بر اساس روابط (۶) و (۷) برای بازه کارکرد ۱۰۰ ساعت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر پس از ۲۰ ساعت کارکرد به مقدار تقریبی ۴۰ درصد





شکل ۴: قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های معدنی



شکل ۵: قابلیت تعمیرپذیری زیرسیستم‌های معدنی

### ۳-۶- قابلیت دسترسی زیرسیستم‌های معدنی

برای دستیابی به قابلیت دسترسی در زیرسیستم لودر مطابق روابط (۱) و (۲) باید  $MTBF$  و  $MTTR$  تعیین شود. مقدار متوسط توابع قابلیت اطمینان ( $MTBF$ ) با توزیع لاگ نرمال را می‌توان از رابطه (۱۴) بدست آورد:

$$MTBF = \mu = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \Rightarrow MTBF = 38/74 \text{ Hr} \quad (14)$$

مقدار متوسط توابع قابلیت تعمیرپذیری ( $MTTR$ ) با توزیع نرمال را نیز می‌توان از رابطه (۱۵) بدست آورد:

$$MTTR = \mu \Rightarrow MTTR = 1226/236 \text{ Hr} \quad (15)$$

سیستم مطابق جدول ۶ زیرسیستم لودر با پایین ترین قابلیت دسترسی بیشترین اهمیت را دارد و زیرسیستم های بلدوزر و دامپتراک در اولویت های بعدی قرار دارند. بنابراین در صورت اقدام برای بهبود قابلیت دسترسی سیستم معدنی باید بیشترین تمرکز بر زیرسیستم لودر باشد.

جدول ۶: اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم های معدنی

زیرسیستم	اهمیت قابلیت دسترسی (%)
لودر	۸۲٫۵
بلدوزر	۳٫۱
دامپتراک	۲٫۵

#### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش شده است تا نخست روند کلی برای بررسی قابلیت دسترسی زیرسیستم بر اساس دو شاخص اصلی آن یعنی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بیان شود. سپس قابلیت دسترسی کل سیستم بر اساس روابط ساختار شبکه بیان شده و در نهایت از ایده اهمیت قابلیت دسترسی برای اولویت بندی زیرسیستم ها استفاده شد. نتایج حاصل برای مطالعه موردی نشان داد که قابلیت اطمینان زیرسیستم لودر رو به تنزل است و عملاً پس از سپری کردن ۱۰۰ ساعت کاری به صفر می رسد که این به معنای افزایش فراوانی خرابی و کاهش زمان سرپایی دستگاه است. از سوی دیگر همزمان با افزایش فراوانی خرابی ها، فراوانی تعمیرات نیز افزایش می یابد. با این وجود قابلیت اطمینان این زیرسیستم در مقایسه با دو زیرسیستم بلدوزر و دامپتراک بالاتر بود.

تحلیل قابلیت تعمیرپذیری برای زیرسیستم لودر در مقایسه با دو زیرسیستم بلدوزر و دامپتراک نیز نشان می دهد که با وجود بهبود مختصر در این شاخص برای لودر، زمان تلف شده برای تعمیرات آن به شدت بالا بوده و همین امر سبب افت شدید قابلیت دسترسی لودر شده است. همین امر در تحلیل اهمیت قابلیت دسترسی سیستم نیز بروز یافته و زیرسیستم لودر بالاترین اولویت را در راستای بهبود قابلیت دسترسی به خود اختصاص داده است بنابراین پیشنهاد می شود فعالیت های اجرایی برای ارتقای قابلیت دسترسی سیستم بر اساس شاخص اهمیت قابلیت دسترسی اولویت بندی شده و تمرکز اصلی بر پارامتر قابلیت تعمیرپذیری لودر باشد. از جمله فعالیت هایی که می توان برای افزایش تعمیرپذیری انجام داد می توان به مواردی مانند بهبود

در نهایت قابلیت دسترسی زیرسیستم لودر به صورت رابطه ۱۶ است:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \Rightarrow A = 0.031 = 3.1\% \quad (16)$$

پس در واقع زیرسیستم فوق تنها قادر به پوشش بخش ناچیزی از زمان کارکرد دستگاه و به شدت نیازمند بهبود وضعیت است. به طور کلی قابلیت دسترسی زیرسیستم های معدنی به صورت جدول ۵ است.

جدول ۵: قابلیت دسترسی زیرسیستم های معدنی

زیرسیستم	MTBF	MTTR	قابلیت دسترسی (%)
لودر	۳۸٫۷۴	۱۲۲۶٫۲۳۶	۳٫۱
بلدوزر	۴۷٫۷۲۲	۱۰٫۰۳۸	۸۲٫۶
دامپتراک	۱۰۵٫۰۹۳	۰٫۱۹۱	۹۹٫۸

#### ۶-۴- قابلیت دسترسی سیستم معدنی

با توجه به شکل ۱ پیکربندی زیرسیستم های معدنی به صورت سری است و بنابراین از رابطه ۱۷ برای محاسبه قابلیت دسترسی کل سیستم استفاده می شود:

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^3 (3.1 \times 82.6 \times 99.8) = 2.5\% \quad (17)$$

#### ۶-۵- اهمیت قابلیت دسترسی زیرسیستم های معدنی

پس از تحلیل رفتار زیرسیستم ها بر اساس قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری و تعیین قابلیت دسترسی هر یک از زیرسیستم ها و نهایتاً قابلیت دسترسی سیستم معدنی، می توان از ایده اهمیت قابلیت دسترسی برای تعیین حساسیت سیستم کلی نسبت به هر کدام از زیرسیستم ها بهره برد. طبق نظر Beeson و Andrews [۲۵]، ایده اهمیت قابلیت دسترسی عنصری کلیدی در فرآیند تحلیل کمی قابلیت دسترسی است. با استفاده از این شاخص امکان شناسایی ضعیف ترین نقاط سیستم و تعیین تغییرات لازم برای بهبود قابلیت دسترسی آن نقاط فراهم می شود. در صورت نیاز به بهبود قابلیت دسترسی سیستم، باید زیرسیستم ها بر اساس شاخص اهمیت اولویت بندی شده و بیشترین فعالیت ها بر روی زیرسیستمی که بزرگترین تاثیر را بر قابلیت دسترسی سیستم دارد، متمرکز شود. در این

- condition". Reliability Engineering & System Safety, 96(12): 1637–1646.
- [11] Stapelberg, R. F. (2008). "Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design". Springer Science & Business Media.
- [12] International Electrotechnical Commission (1941). "International electrotechnical vocabulary". International Electrotechnical Commission. See also URL <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-05>
- [13] Kumar, U., and Akersten, P. A. (2008). "Availability and Maintainability". Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment.
- [14] Raheja DG., Allocco M., (2006). "Assurance Technologies Principles and Practices: A Product, Process, and System Safety Perspective". John Wiley & Sons
- [15] International Electrotechnical Commission (1990). "IEC 60050-191 International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 191: Dependability and Quality of Service". International Electrotechnical Commission. See also URL <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=191-02-06>.
- [16] Diallo, C., Ait-Kadi, D., and Chelbi, A. (2012). "An Integrated Approach for Spare Parts Provisioning". Frontiers in Science and Engineering, an International Journal Edited by Hassan II Academy of Science and Technology 2.
- [17] Ahmadi, A. (2010). "Aircraft Scheduled Maintenance Programme Development Decision Support Methodologies and Tools". Phd Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [18] Ahmadi A, Karim R, Barabady J., (2010). "Prerequisites for a business-oriented fleet availability assurance program in aviation". The 1st international workshop and congress oneMaintenance Luleå tekniska universitet, pp 168–175.
- [19] Barabadi, A., Barabady, J., and Markeset, T. (2011). "Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates". Reliability Engineering & System Safety, 96(1): 210–217.
- [20] Barabady, J., and Kumar, U. (2007). "Availability allocation through importance measures". International journal of quality & reliability management, 24(6): 643–657.
- [21] Nouri Gharahasanlou, A., Ataei, M., Khalokakaie, R., and Barabadi, A. (2016). "Normalised availability importance measures for complex systems". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1–14.
- وضعیت انبارداری، پیش‌بینی دقیق قطعات یدکی مورد نیاز، افزایش دانش فنی اکیپ تعمیرات، افزایش پرسنل تعمیرگاه، دسترسی آسان‌تر به محل تعمیرگاه و بهبود لوازم و ابزارآلات مورد استفاده برای تعمیرات اشاره کرد.
- ### ۸- مراجع
- [1] Kumar U., and Huang, Y. (1993). "Reliability analysis of a mine production system-a case study". In Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings, Annual, 167–172.
- [2] Vagenas, N., Runciman, N., and Clément, S. R. (1997). "A methodology for maintenance analysis of mining equipment". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11(1): 33–40.
- [3] Hall, R. A., 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.
- [4] Hall, R. A., and Daneshmend, L. K. (2003). "Reliability and maintainability models for mobile underground haulage equipment". Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) bulletin, 96(1072): 159–165.
- [5] Samanta, B., Sarkar, B., and Mukherjee, S. (2004). "Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining". South African Institute Mining and Metallurgy, 104: 1–8.
- [6] Barabady, K., and Uday, J. (2005). "maintenance schedule by using reliability analysis: a case study at jajarm bauxite mine of iran". presented at the 20th World Mining Congress, Tehran, Iran, 2: 831–838.
- [7] Barabady, J. (2005). "Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran". presented at the Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings, Annual, 109–115.
- [8] 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 & System Safety, 93(4): 647–653.
- [9] Vayenas, N., and Wu, X. (2009). "Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 23(3): 227–238.
- [10] Barabadi, A., Barabady, J., and Markeset, T. (2011). "A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment

- [24] Reliability Software, Training, Consulting and Related Reliability Engineering Analysis Services, (2015). ReliaSoft Corporation. URL <http://www.reliasoft.com>
- [25] Beeson, S., and Andrews, J. D. (2003). "Importance measures for noncoherent-system analysis". IEEE Transactions on Reliability, 52(3): 301 – 310.
- [22] Siegfried, R. (2014). "Modeling and Simulation of Complex Systems". Springer Fachmedien Wiesbaden. doi: 10.1007/978-3-658-07529-3
- [23] Kumar, U., and Klefsjö, B. (1992). "Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model". Reliability Engineering & System Safety, 35(3): 217–224.

- 
- <sup>1</sup> Availability
  - <sup>2</sup> Reliability
  - <sup>3</sup> Maintainability
  - <sup>4</sup> Scoop
  - <sup>5</sup> Failure mode and effects analysis
  - <sup>6</sup> Maintenance
  - <sup>7</sup> Inherent availability
  - <sup>8</sup> Mean time between failure
  - <sup>9</sup> Mean time to repair
  - <sup>10</sup> Active downtime
  - <sup>11</sup> Achieved availability
  - <sup>12</sup> Mean time between maintenance
  - <sup>13</sup> Mean active maintenance time
  - <sup>14</sup> Operational availability
  - <sup>15</sup> Mean maintenance downtime
  - <sup>16</sup> Independent (trend test) and identically distributed (serial correlation test) (iid)
  - <sup>17</sup> Availability importance measure
  - <sup>18</sup> Power law process
  - <sup>19</sup> Autocorrelation function
  - <sup>20</sup> Autocorrelogram
  - <sup>21</sup> Ljung-Box Q statistic