تخمین قطعات یدکی مورد نیاز در معادن به روش تحلیل قابلیت اطمینان، مطالعه موردی معدن مس سونگون

علی نوری قراحسنلو*[۱]، محمد عطایی[۲]، رضا خالوکاکایی[۳]، مهدی مخبردوران[۴]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استاد، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- مدیر شرکت بین‌المللی SGS شعبه تبریز، ایران

(دریافت: بهمن ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۷)

چکیده

مدیریت قطعات یدکی و تدارکات، وجهی از مدیریت پشتیبانی محصولات و مؤثر در هزینه چرخه عمر محصول است. دسترسی به قطعات یدکی به هنگام تقاضا، زمان افت سیستم/ماشین را کاهش داده و کارایی آن را افزایش و در نتیجه سود حاصله از کل پروژه را افزایش خواهد داد. در صورت ذخیره تعداد بهینه قطعات یدکی در انبار، هزینه‌های چرخه عمر محصول به عنوان تابع هدف، کمینه خواهد شد. تعداد بهینه قطعات‌یدکی را نیز می‌توان با وارد نمودن عوامل مختلف مانند تعداد وقوع خرابی، تعداد تجهیزات موجود، حساسیت قطعه، هزینه‌های خرید قطعه، فاصله بین تولیدکننده تا مصرف‌کننده و زمان‌های تأخیر بین تصمیم تا اجرا تعیین کرد. تخمین قطعات یدکی مورد نیاز بر اساس ویژگی‌های فنی و کارکردی سیستم و اجزاء یکی از مؤثرترین راه‌ها برای بهینه‌سازی توقفات ناخواسته است. از این‌رو در این مقاله رویکرد پیش‌بینی قطعات یدکی مورد نیاز بر اساس قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است. در این رویکرد نخست قابلیت اطمینان جزء، بر اساس داده‌های خرابی تعیین شده و سپس تعداد قطعات یدکی موردنیاز، میزان سفارش بهینه و زمان ارسال سفارش بر اساس مصرف سالیانه محاسبه خواهد شد. همچنین به‌منظور کاربرد اجرایی رویکرد پیشنهادی مطالعه موردی از معدن مس سونگون بررسی شده است.

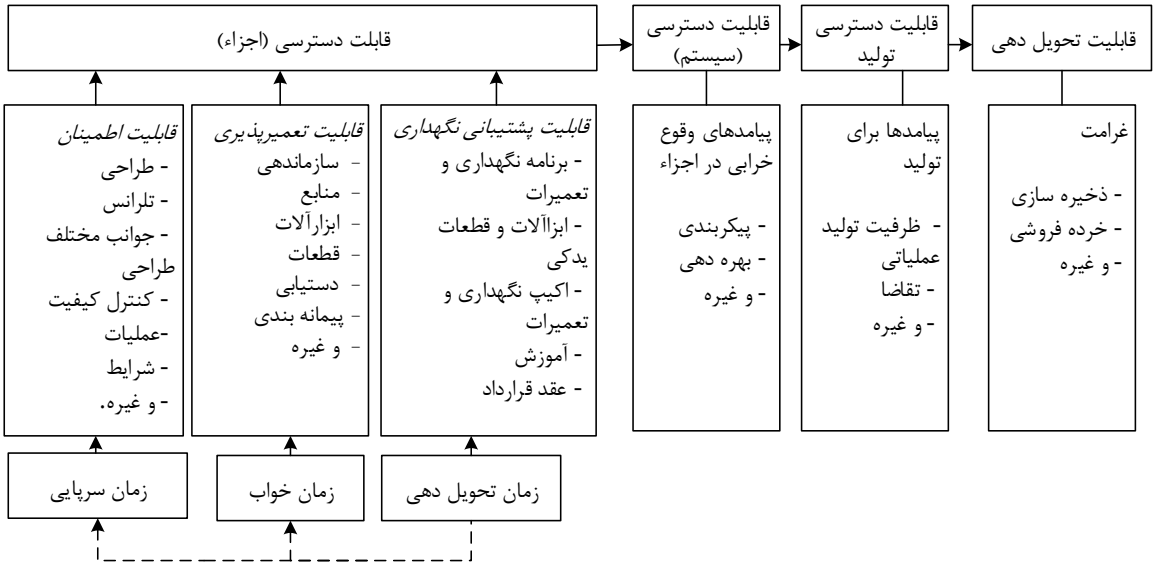
کلید واژه‌ها

معدنکاری، قابلیت اطمینان، قطعات یدکی، تایر، معدن مس سونگون

*عهده دار مکاتبات: *alinoorimine@gmail.com*

۱- مقدمه

یکی از پیامدهای وقوع خرابی در سامانه‌های تولیدی و در فرآیندهای صنعتی، افت تولید و درنتیجه عدم تحقق ظرفیت پیش‌بینی شده و تعویق تحویل کالا به مشتری و در دراز مدت کاهش سهم بازار است. پیامد دیگر خرابی دوباره‌کاری است که منجر به اتلاف مواد و منابع و هزینه‌های اضافی در تولید می‌شود. این امر همواره با افت ظرفیت نسبت به ظرفیت بهینه، موجب افزایش قیمت تمام‌شده محصول، کاهش کیفیت آن و از دست رفتن اعتبار خواهد شد؛ به عبارت دیگر، وقوع خرابی در سامانه‌ها، عدم تحقق دو مولفه اصلی کسب‌وکار در دنیای رقابتی امروز، یعنی کسب بیشینه سهم بازار و سود را موجب خواهد شد. بدیهی است توسعه فناوری و پیچیدگی سامانه‌های امروزی دشواری‌های دستیابی به کارکرد[۱] بهینه برای سامانه‌های صنعتی را دو چندان نموده است. کارکرد سامانه‌های صنعتی به طور پیچیده مرتبط با شاخص‌های عملکردی سیستم مانند قابلیت اطمینان[۲]، دسترسی[۳]، تعمیرپذیری[۴] و پشتیبانی تعمیرات[۵] (RAMS) است؛ بنابراین بهبود RAMS تجهیزات و ماشین‌آلات بسیار حائز اهمیت خواهد بود. شرکت‌ها، پیمانکاران و تولیدکنندگان باید شناخت کافی در مورد ویژگی‌های عملکردی سامانه‌ها داشته و در ابعاد گوناگون مراحل طراحی و پشتیبانی از محصول آن را به کار ببندند تا توان پاسخگویی به موقع برای تقاضای خدماتی را داشته و از نارضایتی مشتریان/ مصرف‌کنندگان پیشگیری نمایند. نخستین بار صنعت ملی نفت و گاز نروژ[۶] در سال ۱۹۹۸ ایده ارتباط بین شاخص‌های عملکردی با یکدیگر در سطح جزء (قطعه) و ارتباط این اجزاء با یکدیگر در چارچوب سیستم بررسی شده و تأثیرات آن بر قابلیت تحویل‌دهی سیستم[۷] تحت عنوان «تضمین تولید[۸]» به رشته تحریر درآمد که در سال‌های بعد به‌عنوان استاندارد[۹] مطرح شد[۱]. در شکل ۱ ایده اصلی روش‌شناسی تضمین تولید نشان داده شده است.



شکل ۱: ایده تضمین تولید (استاندارد ۱۹۹۸) [۱]

در این چارچوب قابلیت اطمینان به‌عنوان توانایی یک آیتم در اجرای فعالیت خواسته و تحت شرایط مشخص برای یک بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود. قابلیت اطمینان شاخصی برای توصیف رفتار زمان‌های سرپایی سیستم (زمان‌های بین خرابی‌ها) است[۲]. از سویی دیگر به منظور کاستن پیامدهای خرابی‌ها، وجود برنامه نت منسجم و مؤثر جهت کاهش زمان تعمیرات و هزینه‌های مرتبط ضروری است که این موضوع در چارچوب دو شاخص قابلیت تعمیرپذیری و پشتیبانی نمود پیدا می‌کند. قابلیت تعمیرپذیری به عنوان توانایی یک آیتم تحت شرایط مشخص کاربری، برای ابقا یا بازگردانی به حالتی که قادر به انجام کار مورد نیاز برای زمانی که تعمیرات تحت شرایط مشخص و با منابع موردنیاز انجام پذیرد، تعریف می‌شود.

قابلیت پشتیبانی نیز به عنوان توانایی تأمین منابع، خدمات و مدیریت ضروری جهت انجام تعمیرات تحت شرایط مشخص و زمان نقل و انتقالات منابع موردنیاز تعریف

می‌شود[۳]. در این تعریف وجه مهمی از "منابع" برای اجرای نت 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 شود. همان‌طور که در تعریف قابلیت پشتیبانی اشاره شد، نت و مدیریت قطعات‌یدکی دو بُعد 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 قطعات‌یدکی 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 ارتقاء دهد. در این مقاله نیز با توجه به اهمیت شاخص قابلیت پشتیبانی در عملکرد کلی سیستم تلاش شد چارچوبی منسجم جهت بررسی و ارتقاء آن به ویژه جنبه قطعات یدکی پیشنهاد شود.

۲- پیشینه پژوهش

قابلیت پشتیبانی سعی در بیان مفهوم پشتیبانی و تأمین منابع مورد نیاز برای نت (ابزارآلات، کارکنان، قطعات یدکی و ...) را داشته تا از بروز تاخیرات تدارکاتی و اتلاف زمان جلوگیری کند. با این وجود چندان مورد توجه نبوده و مشکلات اجرایی گسترده‌ای را کارهای معدنی که در حال حاضر کلا با ماشین‌آلات انجام می‌پذیرد، به دنبال خواهد داشت. در جدول ۱ برخی از فعالیت‌های انجام گرفته در رابطه موضوع قابلیت پشتیبانی و به خصوص قطعات یدکی اشاره شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌گرفته در رابطه با قابلیت پشتیبانی

پژوهشگر	موضوع
بوزاکات	روش‌های ویژه نت برای وضعیت توده‌ای و تجزیه سیستم[۴]
چاو و همکاران	ارائه مدل قابلیت اطمینان بر اساس نرخ خرابی و نرخ تعمیرات[۵]
فوکوتا و کوداما	توزیع زمانی از وقوع خرابی برای سیستم دارای دو واحد تعمیرپذیر ناهمسان با نرخ خرابی ثابت[۶]
هاریس	تمرکز بر فروشگاه‌های سازمان یافته نت و قطعات یدکی موجود در انبار[۷]
گوئل و گوپتا	تحلیل دو واحد گرمایی سیستم آماده‌به‌کار با در نظر گرفتن سه حالت خرابی مورد[۸]
دیلون	ارائه کاربردی از روش قابلیت اطمینان را برای تعدادی از مشکلات صنعتی و حمل نقل[۷]
اسمیت و شافر	استفاده از مدل مارکو برای قابلیت دسترسی قطعات یدکی در تعیین موجودی اولیه قطعات به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های کمبود و انبارداری[۹]
بیلینتون	با ارزیابی قابلیت اطمینان در سامانه‌های بزرگ برق که دارای تسهیلات تعمیرات[۱۰]
کومار و کفسجو	بررسی نت لودرهای معدنی با استفاده از فرایند قانون توانی[۱۱]
نیتیوئن	ارائه نت پیشگیرانه برای سیستم بر اساس هزینه چرخه عمر و تابع توزیع گاما[۱۲]
آیجاز و همکاران	مروری بر پیشرفت‌های اخیر در مورد نت ژنراتورها دارای تسهیلات تعمیر[۱۳]
لیم و همکاران	ارائه روش‌های گوناگونی را برای تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های تعمیرپذیر[۱۴]
مارسِ گورا و همکاران	کاربردهای الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بهینه‌سازی تسهیلات نت[۱۵]
سرکار و سرکار	ارائه روش ریاضی برای دست‌یابی به قابلیت دسترسی[۱۶]
روستنبورگ و همکاران	استفاده از فن چند سطحی کنترل قلم بازیافت پذیر در مدیریت انبارداری[۱۷]
پرس و نوئس	ارزیابی انواع استراتژی نت با استفاده از نرخ تعمیرات[۱۸]
قاسمی و همکاران	مدل کردن سامانه‌های پیچیده[۱۹]
دیلون	ارائه نه روش و رویکرد مختلف در رابطه با تحلیل حالات خرابی و تأثیر آنها، تحلیل درخت دلایل[۲۰]

ادامه جدول ۱: خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌گرفته در رابطه با قابلیت پشتیبانی

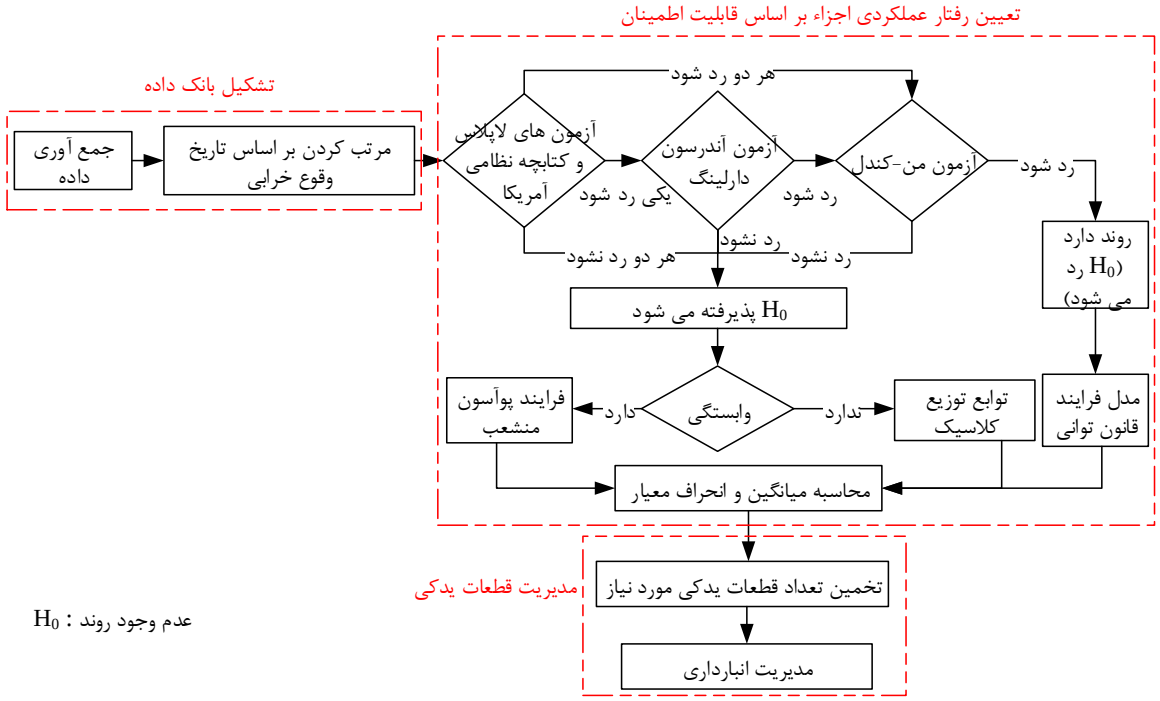
پژوهشگر	موضوع
کومار	بررسی برخی عوامل مؤثر در استراتژی تحویل خدمات و رویکردهای پیشنهادی برای تشکیل این استراتژی در راستای دستیابی به رضایتمندی مشتریان و تکمیل عملیات[۲۱]
اوکون و همکاران	ارائه مدل بررسی قابلیت دسترسی در سیستم آماده‌به‌کار سرد[۲۲]
سامانتا و همکاران	بررسی نت پیشگیرانه در لودرهای معدنی با استفاده از RAM و فرایند مارکو [۲۳]
دنیز و همکاران	بررسی مسئله انبار قطعات یدکی در زمینه ماشین‌های گران‌بهای الکترونیک مانند کامپیوترهای پردازنده‌های مرکزی [۲۴]
برآبادی و کومار	بررسی نت در دپارتمان سنگ‌شکنی [۲۵]
قدرتی و کومار	تخمین قطعات یدکی با استفاده از قطعات یدکی [۲۶]،[۲۷]
مارکست و کومار	رویکردهای توسعه استراتژی پشتیبانی محصولات عملیاتی نسبت به سنتی [۲۸]
قدرتی	مقایسه توابع نمایی و ویبول در تخمین قطعات یدکی [۲۹]
چن و همکاران	پیشنهاد مدل چند سطحی قطعات‌یدکی شامل تدارکات، مراکز توزیع و کاربران تجهیزات و در نظرگیری هر دو سیاست پیشگیرانه مبتنی بر عمر و طبقات اولویت تقاضا برای کاربران تجهیزات [۳۰]
قدرتی و همکاران	تخمین قطعات یدکی و تحلیل ریسک با تحلیل درخت خرابی و تحلیل درخت رویداد [۳۱]
لیگین و تونالی	پیشنهاد رویکرد بهینه‌سازی شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی گرهی نت پیشگیرانه و سیاست‌های تأمین قطعات‌یدکی سیستم عملیاتی بخش‌های خودکار [۳۲]
برآبادی و کومار	بررسی نت پیشگیرانه در دپارتمان سنگ‌شکنی [۳۳]
لیرونگ	تقسیم‌بندی انواع مدل‌های نت [۳۴]
لیسنیانسکی	برای ارزیابی قابلیت اطمینان برای سیستم با وضعیت چندگانه [۳۵]
دیئالو و همکاران	مدیریت انبارداری قطعات یدکی [۳۶]
حسینی و همکاران	بررسی نت سیستم الکتریکی شرر [۳۷]
ثارین و همکاران	ارزیابی قطعات یدکی اکسکاواتور چرخشی در مدیریت سیستم یکپارچه [۳۸]
قدرتی و همکاران	استفاده از مدل نرخ مخاطرات متناسب در تخمین قطعات‌یدکی و بررسی قابلیت دسترسی به آنها [۳۹]
حسینی و همکاران	بررسی نت پیشگیرانه با استفاده از فرایند قانون توانی [۴۰]
قدرتی و همکاران	بررسی سیستم پشتیبانی با استفاده از قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری و تأثیرات عوامل خارجی [۴۱]
حسینی و همکاران	بررسی نت در سیستم مکانیزه جبهه‌کار بلند [۴۲]
کوماربالا و خاویر	مدیریت انبارداری قطعات‌یدکی بخش اتومبیل با استفاده از داده‌کاوی، سیستم شبکه عصبی [۴۳]

همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش عمده‌ای از کارهای انجام گرفته مربوط به وجه نت از قابلیت پشتیبانی بوده و حتی در این موارد نیز کارهای انجام گرفته در حیطه مهندسی معدن بسیار محدود است. در مورد جنبه دوم قابلیت پشتیبانی یعنی قطعات یدکی و مباحث مرتبط نیز کارهای انجام گرفته عمدتاً خارج از معدن بوده و در بیشتر موارد پیچیدگی رویکرد پیشنهادی توانایی کاربری آن در شرایط واقعی را به‌شدت محدود می‌نماید. هدف اصلی این مقاله وجه دوم قابلیت پشتیبانی بوده، لذا رویکردی کاربرپسند برای تخمین قطعات یدکی موردنیاز بر اساس با قابلیت اطمینان پیشنهاد شد. در این پژوهش برای نخستین بار چارچوبی منسجم برای تخمین قطعات یدکی پیشنهاد شده است. همچنین در مبحث آماری برای انجام آزمون روند داده‌ها رویکردی جدید، کامل‌تر و صحیح‌تر ازآنچه تاکنون انجام می‌گرفته پیشنهاد شده است. در بخش نخست مقاله چهارچوب تئوری پیشنهادی ارائه شده و در بخش دوم مطالعه موردی از معدن مس سونگون با مدل پیشنهادی تحلیل شد.

۳- تئوری و روش‌شناسی پژوهش

در شکل ۲ تئوری پژوهش در سه بخش کلی مشاهده می‌شود.

I. تشکیل بانک داده
II. تعیین رفتار عملکردی اجزاء بر اساس قابلیت اطمینان
III. مدیریت قطعات یدکی



شکل ۲: تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان

۳-۱- تشکیل بانک داده

در فعالیت‌های صنعتی با توجه به گستردگی تجهیزات و نحوه ثبت وقوع حوادث طی بازه عملکرد تجهیزات، مشخص کردن داده‌های خرابی مستلزم شناخت خرابی و انواع آن است. طبق تعریف لدبروک[11]، شکست عبارت از ناتوانی سیستم در انجام کار مورد انتظاری که استعداد انجام آن را دارد، ولی به دلایل نامعین در حال حاضر از انجام آن عاجز است؛ به عبارت‌دیگر، شکست رویدادی است که پس از وقوع خرابی در سیستم و پیش از بازگشت آن به انجام کار مورد انتظار از سیستم رخ می‌دهد. دلایل زیادی برای از کارافتادگی سیستم وجود دارد. زمان‌های کارکرد ماشین، وضعیت تعمیرات، تعویض قطعات، فرسودگی ماشین، خطاهای طراحی، مهارت متصدیان و خرابی‌های تصادفی عواملی هستند که پیش‌بینی وقوع خرابی در سیستم را غیرممکن می‌سازند. از این‌رو خرابی در سیستم به عنوان پیشامدی تصادفی در نظر گرفته می‌شود[۴۴].

منابع زیادی برای جمع‌آوری داده مربوط به مدلسازی قابلیت اطمینان قطعات، تجهیزات و ماشین‌آلات وجود دارد. به عنوان مثال، اطلاعات مربوط به تاریخچه ماشین می‌تواند از منابع مختلفی به دست آمده باشد. در برخی موارد، اطلاعات ممکن است از طریق سیستم، مثلاً سیستم گسیل ناوگان[12] که زمان‌های وقوع خرابی، دلیل وقوع خرابی و زمان برگشت ماشین به چرخه را ردیابی می‌کند، حاصل شده باشد. معمولاً نقص این داده‌ها فقدان اطلاعات هزینه‌ای است که برای رفع آن می‌توان از سامانه‌های دیگر مانند اطلاعات انبارداری یا حسابداری کمک گرفت که البته کار مشکلی است. در موارد دیگر اطلاعات باید به صورت دستی و با مراجعه به گزارش عملیاتی و مکانیک‌ها و غیره به دست آید. اخذ اطلاعات به این روش نیز، نیازمند تلاش زیاد و تفسیر پیچیده‌تر اطلاعات موجود در گزارش کارها است. به عنوان مثال، در برگه حفار الماسه منظور از داده‌ای مثل عدم وجود آب، می‌تواند خرابی پمپ یا ملزومات آن بوده، یا صرفاً قطعی آب باشد[۴۵]. فن‌های جمع‌آوری داده را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی نمود: کمی (جمع‌آوری داده به شکل عدد) و کیفی (جمع‌آوری داده به شکل کلمه‌ها و عکس‌ها) که داده‌های نوع اول کاربرد بیشتری در زمینه قابلیت دارد. منابع به کار رفته در جمع‌آوری این داده‌ها را نیز می‌توان اسناد، مدارک آرشیوشده، ملاقات و مصاحبه‌ها، مشاهده‌های مستقیم، مشاهده‌های مشترک و آثار مصنوعی بیان داشت[۴۶]. در مبحث قابلیت اطمینان داده‌های موردنیاز برای انجام تحلیل کامل در مورد عملکرد تجهیزات و اجزاء عبارت‌اند از: نوع خرابی، زمان وقوع خرابی، زمان انجام تعمیرات، طول زمان انجام تعمیرات، داده‌های مربوط به

فاکتورهای ریسک[۱۳] و هزینهٔ انجام تعمیرات[۴۵]. پس از جمع‌آوری داده‌ها در مرحله بعد خرابی‌ها به ترتیب زمان وقوع خرابی[۱۴] مرتب می‌شوند. سپس با توجه به تعمیرپذیر یا تعمیرناپذیر بودن سیستم/جزء، زمان بین خرابی‌ها[۱۵] (TBF) یا زمان تا وقوع خرابی‌ها[۱۶](TTF) محاسبه می‌شود[۳۳]. همچنین داده‌های مرتب‌شده باید بر حسب نوع خرابی یعنی کامل و یا معلق (داده سانسور شده و داده بریده‌شده) بودن نیز مشخص می‌شوند.

۳-۲- تعیین رفتار عملکردی اجزاء بر اساس قابلیت اطمینان

پس از جمع‌آوری داده‌ها باید اساس فرض‌های مستقل بودن و داشتن توزیع یکسان[۱۷] داده‌های خرابی، مورد بررسی قرار گیرد. در آمار و احتمالات دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی، مستقل با توزیع یکسان نامیده می‌شوند، اگر همه آنها دارای توزیع یکسان بوده و دوبه‌دو مستقل باشند. مستقل بودن با توزیع یکسان به این مفهوم است که یک عنصر در یک دنباله مستقل از متغیرهای تصادفی است که قبل از آن ظاهر شده‌اند[۴۷]. برای ارزیابی این فرض از دو آزمون معمول یعنی آزمون روند و آزمون خودهمبستگی[۱۸] استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۲، در صورت:

- وجود روند، مدل‌های نامانا مانند پوآسون ناهمگن (فرآیند قانون توانی[۱۹])
- عدم وجود روند و وجود خودهمبستگی، فرایند پوآسون منشعب
- عدم وجود روند و عدم وجود خودهمبستگی، توابع توزیع کلاسیک مانند توزیع نرمال، لاگ نرمال، ویبول، ...

برای توصیف رفتار خرابی‌های سیستم/جزء و برازش تابع قابلیت اطمینان به کار خواهند رفت.

آزمون روند در واقع تعیین می‌کند که آیا نحوه پراکنش داده‌های خرابی به طور معنی‌داری (تنزیل یا بهبود) در طول بازه زمانی تغییر کرده است یا خیر. برای توصیف وجود یا عدم وجود روند روش‌های مختلفی وجود دارد که در این مقاله رویکردی مطابق شکل ۲ پیشنهاد شده است که در اولین گام دو آزمون تحلیلی روند لاپلاس (T1) و کتابچه نظامی[۲۰] (T2) انجام می‌گیرد که در خروجی سه حالت وجود دارد[۴۹، ۴۸]:

- حالت اول (رد فرض صفر (عدم وجود روند ;H_0) توسط یکی از دو آزمون T1 و T2): سراغ آزمون اندرسون-دارلینگ (T3) رفته و در صورت عدم رد آن داده‌ها روند نخواهند داشت. در صورت رد T3 سراغ آزمون بعدی یعنی آزمون من-کندل[۲۱] (T4) باید رفت. در صورت عدم رد H_0 توسط T4 داده‌ها روند نداشته و در غیر این صورت داده‌ها روند دارد.
- حالت دوم (رد فرض صفر توسط هر دو آزمون T1 و T2): سراغ آزمون T4 رفته و رد (روند دارد) یا پذیرش (روند ندارد) آن را بررسی می‌شود.
- حالت سوم (عدم رد فرض صفر توسط هر دو آزمون T1 و T2): در این حالت مستقیماً عدم وجود روند استنباط می‌شود.

در خروجی آزمون‌های T1، T2، T3 و T4 در صورت وجود روند در داده‌ها از PLP برای توصیف رفتار داده‌ها استفاده نموده و در صورت عدم وجود روند، آزمون فرض وابستگی (خودهمبستگی) انجام خواهد گرفت.

خودهمبستگی به صورت همبستگی بین اعضای سری‌های مشاهده‌هایی که در زمان (مانند دادهای سری زمان) یا مکان (مانند داده‌های مقطعی) ردیف شده‌اند، تعریف می‌شود. برای تعیین خودهمبستگی نمودار i امین TBF(TTR) در برابر (i-1) امین TBF(TTR) ترسیم می‌شود که در صورت نامستقل و همبسته بودن داده‌ها، نقاط در امتداد یک خط واقع خواهند شد. نکته مهمی که در رابطه با آزمون باید در نظر گرفته شود، ترسیم داده‌ها به ترتیب وقوع هست، چرا که مرتب‌سازی داده‌ها سبب همگرایی خواهد شد[۱۱، ۴۵]. لذا پس از تعیین مدل یا فرایند مناسب برای خرابی‌ها با استفاده از رابطه (۱) قابلیت اطمینان (R(t)) جزء یا سیستم مشخص خواهد شد.:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \le t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \qquad (۱)$$

در این رابطه F(t) تابع تجمعی خرابی و f(t) تابع چگالی خرابی هستند.

۳-۳- قطعات یدکی موردنیاز

تامین تعداد بهینه قطعات مورد نیاز در اجرای انواع گوناگون فعالیت‌های نت همچون: بازرسی، نت پیشگیرانه و تعمیرات امریست ضروری و انکارناپذیر به‌استثنای

فعالیت‌های پیشگیرانه، قطعات یدکی موردنیاز برای اجرای نت در بازه‌های زمانی تصادفی موردنیاز خواهد بود. از این‌رو هماهنگی سریع و ایمن تقاضا برای قطعات یدکی با هدف فراهم سازی به موقع آنها در زمان مورد نیاز، عاملی مهم در اجرای دقیق فرایند نت خواهد بود. عدم وجود قطعات و ابزارآلات مورد نیاز، از جمله دلایل مکرر وقوع تأخیر در اجرای کامل فعالیت‌های نت است. از سویی دیگر با توجه به کیفیت بالای مورد نیاز برای قطعات یدکی ماشین‌آلات و تجهیزات این مشکل به سادگی با افزایش میزان مصالح/ قطعات مورد نیاز در انبار قابل حل نخواهد بود. در واقع هدف پشتیبانی تدارکات قطعات یدکی، کمینه‌سازی هزینه‌های پشتیبانی محصولات شامل: هزینه‌های سفارش، نگهداری و انبارداری، حمل‌ونقل و زمان از کارافتادگی محصولات است[۳۹].

۳-۳-۱- تخمین قطعات یدکی

دو نوع مدل ریاضی معروف در تخمین قطعات یدکی موردنیاز برای سامانه‌های تعمیرناپذیر به کار گرفته می‌شوند که مبتنی بر تئوری تجدید[۲۲] و فرایند پوآسون همگن[۲۳] هستند. فرایند پوآسون به‌عنوان حالتی خواص از فرایند تجدید مطرح بوده و برای نرخ مخاطره ثابت (به این معنا که تمامی حالات خرابی و دیگر عوامل مؤثر در تقاضا باید از توزیع نمایی پیروی کند) بکار می‌رود. برای نرخ مخاطره متغیر نیز از تئوری تجدید برای پیش‌بینی قطعات یدکی موردنیاز استفاده می‌شود. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که عبارت فوق تنها در مورد اجزاء (قطعات یدکی) تعمیرناپذیر صحت دارد[۲۷، ۳۹].

تئوری تجدید در اصل برای تحلیل تعویض تجهیزات به‌مجرد خرابی، به‌منظور تعیین تابع تعداد تعویض‌ها و متوسط تعداد تعویض‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش ابزاری بسیار مناسب در پیش‌بینی تقاضا برای اقلام مصرفی هست. معمولاً در دنیای تحلیلی ارزیابی تابع خیلی سریع‌تر و بهینه‌سازی آن سهل‌تر است[۲۷، ۲۹، ۳۹]. لذا یک فرایند تجدیدپذیر (به طور معمول) توسط تابع توزیع برای زمان‌های بین تجدیدها $F(t)$ بیان می‌شود. در صورتی‌که $N(t)$ نشان دهنده تعداد تجدیدهای (خرابی) رخداده در زمان t بوده و فرض شود که مقادیر تصادفی زمان تا وقوع خرابی Xi، $i\geq1$ مستقل از هم و دارای توزیع عام $F(t)$ باشند، تابع توزیع احتمال تعداد وقوع خرابی‌ها به صورت رابطه (۲) ارائه خواهد شد[۲۷، ۲۹]:

$$P[N(t) = n] = F^{n}(t) - F^{n+1}(t) \qquad (۲)$$

که $F^{n}(t)$، n پیچش کونولوشن از تابع $F(t)$ بوده و به صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود[۲۷]:

$$F^{n}(t) = \int_{0}^{t} F^{n+1}(t-x)\,dF(x) \qquad (۳)$$

در این حالت $F^{n}(t)$ نشان دهنده احتمال وقوع n امین خرابی در زمان t هست. تعداد خرابی‌های مورد انتظار در طول زمان t که با $M(t)$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه (۴) ارائه می‌شود[۲۷، ۲۹]:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^{n}(t) \qquad (۴)$$

رابطه (۴) به عنوان تابع تجدیدپذیری شناخته شده و تعداد تجدیدها در طول $(0,t]$ را نشان داده و به صورت رابطه (۵) نیز نشان داده خواهد شد[۲۹]:

$$M(t) = F(t) + \int_{0}^{t} M(t-x)\,f(x)\,dx \qquad (۵)$$

تابع توزیع ویبول با توجه به شکل انعطاف‌پذیر آن در برازش بر انواع داده‌های خرابی به عنوان مدلی مناسب برای توصیف عمر مفید اجزاء مکانیکی (سامانه‌های مکانیکی) مطرح است که تابع توزیع تجمعی آن به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود[۲۷]:

$$F(t;\eta,\beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], \quad t>0 \qquad (۱)$$

در این رابطه β پارامتر مقیاس و η پارامتر شکل هست. با توجه به ملاحظات تعویض‌ها برای قطعات، متوسط زمان تا وقوع خرابی با $\overline{T}$ و انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها نیز با $\sigma(T)$ (لذا $\xi = \frac{\sigma(T)}{\overline{T}}$ نشان دهنده ضریب واریانس زمان تا وقوع خرابی‌ها خواهد بود) نشان داده می شود. در صورتی‌که زمان عملیات t سیستم یا ماشین که این قطعه نصب‌شده خیلی طولانی بوده و چندین تعویض در طول این دوره انجام گیرد، در این صورت متوسط تعداد خرابی‌ها $E[N(t)]=M(t)$ با مقدار تقریبی تابع تجدیدپذیری به صورت رابطه (۷) تثبیت خواهد شد[۲۷، ۲۹، ۳۹]:

$$N_t = M(t) = E[N(t)] = \frac{t}{\overline{T}} + \frac{\xi^2 - 1}{2} \qquad (۲)$$

متوسط تعداد خرابی‌ها در زمان t =

و به تناسب آن شدت خرابی یا تابع نرخ تجدیدپذیری به صورت رابطه (۸) ارائه خواهد شد[۲۷، ۲۹]:

$$m(t)=\frac{dM(t)}{dt}=\frac{dE[N(t)]}{dt}=\frac{1}{\overline{T}} \quad (۸)$$

انحراف معیار استاندارد تعداد خرابی‌ها در زمان t به صورت رابطه (۹) خواهد بود[۲۷، ۲۹]:

$$\sigma[N(t)]=\xi\sqrt{\frac{t}{\overline{T}}} \quad (۹)$$

درصورتی‌که زمان t در رابطه (۹) بیانگر یک افق برنامه‌ریزی بزرگ باشد، N(t) تقریباً دارای توزیع نرمال با متوسط $\overline{T}$ خواهد بود (بر اساس تئوری حد مرکزی). در این حالت متوسط تعداد قطعات یدکی موردنیاز N_t در طول این بازه با احتمال کمبود قطعات یدکی (1-p) به صورت رابطه (۱۰) ارائه خواهد شد[۲۷، ۳۹]:

$$N_t=\frac{t}{\overline{T}}+\frac{\xi^2-1}{2}+\xi\sqrt{\frac{t}{\overline{T}}}\Phi^{-1}(p) \quad (۱۰)$$

در این رابطه $\Phi^{-1}(p)$ تابع معکوس توزیع نرمال بوده و مقادیر آن در کتاب‌های آماری در دسترس هست[۲۷]. با داشتن β و η به عنوان پارامترهای شکل و مقیاس در PLP ضریب انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود[۲۷، ۳۸، ۳۹]:

$$\xi=\frac{\sigma(T)}{\overline{T}} \quad (۱۱)$$

$$\overline{T}=\eta\times\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) \quad (۱۲)$$

$$\sigma(T)=\eta^2\left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right)-\Gamma^2\left(\frac{1}{\beta}+1\right)\right] \quad (۱۳)$$

۳-۳-۲- مدیریت انبارداری

ایده اصلی هر سیستم مدیریت انبارداری دستیابی به سطح خدمات‌رسانی کافی با کمینه سرمایه‌گذاری برای انبارکردن و کمینه هزینه‌های مدیریتی هست، به عنوان مثال مستقیماً از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های سفارش‌دهی به واسطه سفارش بیشتر از نیاز حاصل می‌شود. این موضوع سبب مسدود گشتن سرمایه در بخش انبارداری خواهد شد. به منظور حل این مسئله از «مقدار سفارش اقتصادی [۲۴]» که توسط هاریس[۲۵] (۱۹۱۳) ارائه شده و توسط ویلسون[۲۶] (۱۹۳۴) مشهور شد، می‌توان استفاده نموده و میزان سهم ذخیره‌شده در انبار با کمینه مجموع هزینه‌های انبارداری را تعیین نمود. این میزان مسائل نگهداری و سفارش‌دهی قطعات یدکی را نیز در نظر گرفته و امکان مواجه با کمبود را حذف می‌کند. این مقدار بهینه با استفاده از رابطه (۱۴)، قابل‌محاسبه هست[۳]:

$$EOQ=\sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (۱۴)$$

به طوری‌که: D: میزان تقاضای سالیانه (معادل Nt در یک سال)، S: هزینه سفارش یا راه‌اندازی یک بسته ($/مقدار)، H: هزینه نگهداری یک واحد در انبار برای یک سال (اغلب در تناسب با ارزش قلم محاسبه می‌شود).

در مدیریت انبارداری دو سیستم مشهور وجود دارد که عبارت‌اند از:

- **سیستم بازبینی ادواری[۲۷] (P سیستم)**

سیستم P (سفارش در بازه‌های زمان ثابت یا سیستم سفارش ادواری) یک سیستم کنترل انبارداری هست که موجودی انبار به صورت ادواری بازبینی‌شده[۲۸] (ثابت هست) و سفارش‌ها جدید در انتهای هر بازدید داده می‌شود[۵۰].

- **سیستم بازبینی پیوسته[۲۹] (Q سیستم)**

سیستم Q که گاهاً سیستم سفارش نقطه‌ای[۳۰] یا سیستم کمی سفارش‌های ثابت نیز نامیده می‌شود، نوع دیگری از سیستم مدیریت انبارداری هست. در این سیستم موجودی انبار سنجش توانایی اقلام در برآورد تقاضای آینده خواهد بود. زمانی که موجودی انبار به کمینه سطح پیش‌بینی شده می رسد، به عنوان نقطه سفارش مجدد (Rp) شناخته شده، یک مقدار مشخص از اقلام (Q) سفارش داده خواهد شد. زمانی که تقاضا قطعی و مشخص است، نقطه سفارش معادل تقاضا در طول زمان تأخیر هست، اما هنگامی‌که تقاضا قطعی نیست یک مقدار به‌عنوان سهم ایمنی به متوسط میزان تقاضا در طول تأخیر افزوده می‌شود[۵۰].

همان‌طور که ذکر شد، در این سیستم باید «نقطه سفارش مجدد (Rp)» محاسبه شود. این نقطه از حاصل جمع متوسط تقاضا (d) در طول زمان تأخیر (تصمیم تا اجرا) (L) و موجودی ایمن حاصل خواهد شد. موجودی ایمن نیز بر اساس سطح معناداری سیکل خدمات‌رسانی و تعداد انحراف معیار استاندارد از متوسط $\sigma_{D(1yesr)}$ حاصل خواهد شد. در رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) فرم ریاضی نقطه سفارش مجدد مشاهده می‌شود[۳، ۴۱]:

$$\sigma_{D(1year)}=\sqrt{\frac{t}{\overline{T}}} \quad (۱۵)$$

$$Rp=d\times L+\sigma_D\times\sqrt{L}\Phi_{\left(\frac{p}{2}\right)} \quad (۱۶)$$

در این رابطه‌ها؛ t کارکرد سیستم در طول سال، $\overline{T}$ متوسط زمان تا وقوع خرابی، $\Phi_{\left(\frac{p}{2}\right)}$ مقدار توزیع نرمال استاندارد در سطح اطمینان p/2. نقطه Rp یعنی زمانی که موقعیت موجودی انبار به Rp مقدار رسید، باید به میزان EOQ سفارش داده شود.

در این مقاله از روش دوم برای مدیریت انبارداری استفاده خواهد شد.

۴- مطالعه موردی

کانسار سونگون در ۸۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان اهر و ۳۵ کیلومتری شمال ورزقان، با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض جغرافیایی قرار دارد. ناحیه فراگیر کانسار کوهستانی است و بلندای آن از ۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰ متر است. میزان بارش این منطقه زیاد بوده و زمستان‌های سرد و طولانی همراه با برف دارد که موارد موجب پوشیده شدن دامنه‌های شمالی از جنگل شده و انجام فعالیت‌های معدنی در زمستان با دشواری زیادی روبرو می‌کند. دسترسی کنونی به معدن از طریق ورزقان با جاده‌ای آسفالته به طول ۳۲ کیلومتر انجام می‌پذیرد. سابقه معدنکاری در معدن مس سونگون به دو قرن پیش (دوره قاجاریه) برمی‌گردد و استخراج در آن زمان به صورت زیرزمینی بود. پس از احراز وجود ذخیره مس پورفیری در این منطقه در سال ۱۳۵۶ و انجام مطالعات مقدماتی در سال ۱۳۷۴ توسط شرکت ایتوک عملاً پیش باطله‌برداری ابتدایی از سال ۱۳۷۳ توسط شرکت‌های باطله‌برداری ترانشه معدن و اولنگ آغاز شد. با تکمیل مطالعات توسط شرکت اولنگ و ریوتینتو عملیات باطله‌برداری توسط شرکت‌های مبین، آجین و اولنگ و همچنین ساخت کارخانه تغلیظ از سال ۸۰ شدت گرفت تا اینکه در نیمه دوم سال ۸۵ عملاً بهره‌برداری از این معدن با ارسال ماده معدنی به کارخانه آغاز گردید. روش استخراج در معدن سونگون روباز بوده و با مطالعه و بررسی‌های به عمل آمده توسط کارشناسان داخلی و خارجی بهینه‌سازی حد نهایی پیت معدن به همراه مسیرهای ارتباطی مشخص گردیده است. در شکل ۳ نمایی از معدن قابل مشاهده است.

شکل ۳: معدن مس سونگون

در این مقاله فرضیات زیر برای ارزیابی مطالعه موردی با روش‌شناسی پیشنهادی در نظر گرفته‌شده است:

- سامانه‌ای متشکل از داده‌های لاستیک (اجزاء) ۱۱ دامپتراک ۱۰۰ تنی مدل کوماتسو ۷۸۵-۵ و مستقل از هم مدنظر هست.
- تنها اجزاء تعمیرناپذیر موردمطالعه قرارگرفته است.
- هر جزء تنها یکی از دو حالت خرابی یا در حال کارکرد خواهد داشت.
- ویژگی‌های موردنیاز در مورد خرابی‌ها کاملاً مشخص هستند.
- انجام تعمیرات جزء را به حالت نو[۳۱] بازخواهد گرداند.
- تنها محیط معدنی از مجتمع مس سونگون بررسی خواهد شد.

۴-۱- جمع‌آوری داده‌های لاستیک دامپتراک‌ها

برای بررسی قابلیت پشتیبانی و به خصوص تخمین تعداد قطعات یدکی، تحلیل‌ها باید به سطح اجزاء گسترش یابد. از آنجایی‌که در این مقاله هدف تخمین قطعات یدکی تعمیرناپذیر است، لذا داده‌های خرابی تایر دامپتراک مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مورد نیاز در بازه تقریباً ۱۱ ساله با شروع از نیمه دوم سال ۱۳۸۳ تا نیمه دوم سال ۱۳۹۴ جمع‌آوری شد. این بانک داده‌ها از دو منبع اصلی شامل دفتر فنی معدن (محل آرشیو گزارش‌های روزانه) و دفتر فنی تعمیرگاه (محل آرشیو گزارش‌ها تعمیرات، تاخیرات و انبارداری) تغذیه شد. با توجه به تعمیرناپذیری اجزاء مورد بررسی در این مطالعه موردی، داده‌های موردنیاز از جنس زمان و در قالب زمان تا وقوع خرابی خواهد بود. برای استخراج زمان تا وقوع خرابی تایرها پس از مرتب‌سازی آنها بر اساس تاریخ وقوع با توجه به شماره سریال تایرها زمان

تجمعی کارکرد آنها محاسبه شد. همچنین با توجه به ثبت دقیق داده‌های خرابی تایرها تمامی زمان تا وقوع خرابی به عنوان خرابی کامل در نظر گرفته شدند. در جدول ۲ نمونه‌ای از زمان تا وقوع خرابی تایر دامپتراک‌ها مشاهده می‌شوند. در این جدول ستون «وضعیت داده‌ها» نشان دهنده نوع داده از لحاظ «خرابی کامل» یا «خرابی سانسور شده» هست که از مقادیر "یک" و "صفر" استفاده شده است. ستون زمان تجمعی تا وقوع خرابی نیز نشان دهنده زمان تجمعی زمان تا وقوع خرابی هستند. داده‌های زمان تا وقوع خرابی و زمان تجمعی تا وقوع خرابی هر دو بر حسب ساعت هستند.

جدول ۲: بخشی از داده‌های خرابی لاستیک دامپتراک معدن مس سونگون

شماره خرابی	زمان تا وقوع خرابی	زمان تجمعی تا وقوع خرابی	وضعیت خرابی
۱	۸۳۱۷	۸۳۱۷	۱
۲	۸۱۸۳	۱۶۵۰۰	۱
۳	۵۸۱۷	۲۲۳۱۷	۱
۴	۸۲۲۰	۳۰۵۳۷	۱
۵	۸۳۲۱	۳۸۸۵۸	۱
۶	۱۱۴۱۶	۵۰۲۷۴	۱
۷	۸۹۷۹	۵۹۲۵۳	۱
۸	۸۴۴۶	۶۷۶۹۹	۱

۴-۲- قابلیت اطمینان داده‌های لاستیک دامپتراک‌ها

پس از تشکیل بانک داده مطابق شکل ۲ تحلیل‌های آماری با انجام آزمون‌های روند شروع می‌شود. در این مقاله از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۱۷,۲,۱,۰ استفاده شده است. نتایج آزمون‌های T1، T2، T3 و T4 به صورت جدول ۳ است.

جدول ۳: نتایج آزمون روند برای داده‌های لاستیک‌های دامپتراک‌ها

آزمون روند	کتابچه نظامی (T1)	لاپلاس (T2)	اندرسون-دارلینگ (T3)	من-کندل (T4)
آماره آزمون	۶۶۳/۶۳	۲/۱۱	۲/۵۷	۲۸/۵۹۹
P-Value	۰/۰۶۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۵	۰

مطابق خروجی این جدول نتایج آزمون‌های T1 و T2 در سطح اطمینان ۹۵ درصد حاکی از رد فرض صفر مبتنی بر عدم وجود روند هستند. لذا آزمون T4 برای بررسی وجود یا عدم وجود روند باید انجام شود که نتیجه این آزمون نیز با مقدار آماره ۲۸/۵۹۹ و p- مقدار صفر نشان دهنده وجود روند در داده‌های خرابی لاستیک‌ها بوده و مدل مدل فرایند قانون توانی را برای تعیین رفتار خرابی‌ها پیشنهاد می‌دهد که شکل ریاضی و رفتار آن دقیقاً مشابه مدل ویبول دو پارامتری است [11, 40]. جدول ۴ مقادیر پارامترهای شکل و مقیاس این مدل به همراه مقادیر بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۴: پارامترهای تخمینی برای لاستیک‌های دامپتراک‌ها

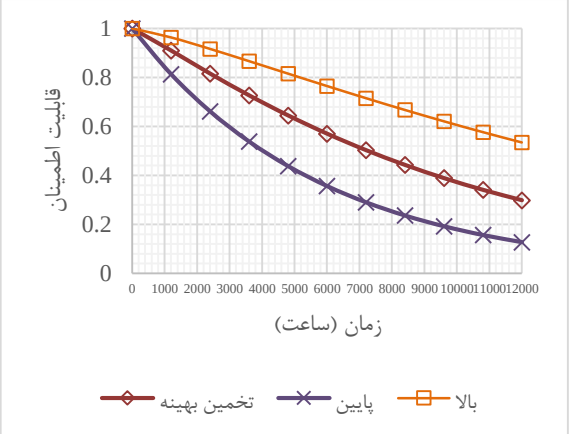
پارامترها	تخمین بهینه	خطای استاندارد	مقادیر بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد	
			پایین	بالا
پارامتر شکل (β)	۱/۱۱	۰/۰۶	۱/۰۰	۱/۲۳
پارامتر مقیاس (η)	۱۰۱۱۴/۳۰	۲۸۵۵/۸۹	۵۸۱۵/۵۴	۱۷۵۹۰/۷۰

تابع قابلیت اطمینان لاستیک به ازای پارامترهای تخمینی به صورت رابطه (۱۷) خواهد بود:

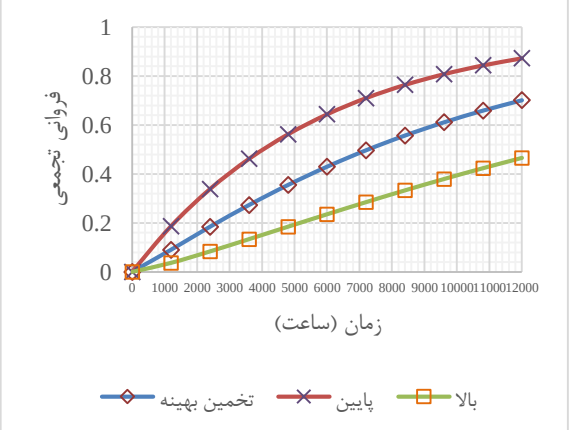
$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{10114.30}\right)^{1.11}\right) \qquad (۱۷)$$

در شکل ۴ تابع قابلیت اطمینان لاستیک‌های دامپتراک به ازای مقادیر حد بالا، پایینی و تخمین بهینه برای کارکرد ۱۲۰۰۰ ساعته ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان لاستیک دامپتراک بعد از تقریباً

۷۲۰۰ ساعت کارکرد به ۵۰ درصد مقدار اولیه افت خواهد کرد. همچنین بعد ۱۲۰۰۰ ساعت کارکرد احتمال وقوع خرابی در لاستیک به ۷۰ درصد افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۴: قابلیت اطمینان (الف) و فراوانی تجمعی (ب) لاستیک دامپتراک‌ها

۴-۳- لاستیک‌های موردنیاز برای دامپتراک‌ها

کنترل موجودی انبار قطعات یدکی نقش عمده‌ای در مدیریت عملیاتی مدرن داشته و برقراری توازن بین این دو الزامیست: در یک سمت موجودی زیاد قطعات یدکی رکود سرمایه بزرگی به همراه داشته و از سمت دیگر موجودی کم انبار ممکن است. خدمات رسانی (پشتیبانی) ضعیف برای مشتری یا فعالیت‌های ضروری با هزینه هنگفت را به بار آورد. لذا پس از تصمیم‌گیری در مورد نوع و کیفیت قطعات یدکی که باید در انبار نگهداری شود، سؤال بعدی، میزان قطعات یدکی نگهداری شونده در انبار است. همچنین تجدید قطعات بر مبنای نرخ مصرف مورد انتظار قطعات یدکی و ریسک اقتصادی مرتبط با تهی بودن انبار در چرخه تجدید انبار، انجام خواهد پذیرفت. در این مقاله از روش تخمین قطعات یدکی مبتنی بر قابلیت اطمینان استفاده شده که تابع آن مشخص شد. حال برای تعیین تعداد قطعات یدکی موردنیاز (N_t) در طول یک سال با زمان کارکرد متوسط ۷۶۶۸ ساعت با توجه به رابطه (۱۰) با احتمال کمبود ۵ درصد برای سه حالت تخمینی از پارامترها در جدول ۴ به صورت جدول ۵ خواهد بود.

جدول ۱: تخمین لاستیک موردنیاز برای حالت‌های مختلف

پارامترها	حد پایین	بهینه	حد بالا
میانگین ($\overline{T}$)	۵۸۱۸/۹۵	۹۷۴۱/۹۵	۱۶۴۶۱/۶۵
انحراف معیار($\sigma(t)$)	۵۸۲۷	۸۸۲۰/۱۰	۱۳۵۰۸/۲۵
ضریب انحراف معیار زمان تا وقوع خرابی‌ها (ξ)	۱	۰/۹۱	۰/۸۲
تعداد قطعات یدکی موردنیاز (N_t)	۳/۲	۲	۱/۲

همان‌طور که انتظار می‌رفت با بهتر بودن وضعیت قابلیت اطمینان لاستیک مطابق شکل ۴ برای حد بالای پارامترهای بهینه، تعداد لاستیک‌های موردنیاز کمتر (۱/۲ لاستیک) نسبت به سایر حالت‌ها خواهد بود. برای بیان ساده‌تر با مفهوم فیزیکی قابل‌فهم‌تر برای اعداد محاسبه شده در ردیف آخر جدول می‌توان به این صورت بیان کرد که اگر معیار بررسی پارامترهای تخمینی حد بالا در نظر گرفته شود، به ازای خرید ۶ عدد لاستیک در این حالت باید به ترتیب ۱۰ و ۱۶ لاستیک برای تحلیل با پارامترهای حالت بهینه و پایین خریداری شود.

برای مدیریت انبارداری نیز مطابق رابطه‌های (۱۴) و (۱۶)، دو مقدار EOQ و Rp باید محاسبه شود که اولی برای مقدار سفارش اقتصادی و دومی زمان ارسال لیست سفارش جهت خرید به کار می‌رود. برای محاسبه این دو مقدار میزان تقاضای سالیانه مطابق جدول ۵ هزینه سفارش ۱۴۵ دلار، هزینه نگهداری سالیانه هر واحد ۹۵۰ دلار، کارکرد سالیانه ۷۶۶۸ ساعت، متوسط زمان وقوع خرابی به ترتیب سطر میانگین جدول ۵ با مقدار توزیع نرمال در اطمینان ۵ درصد و بازمان تأخیر متوسط ۵ روز هستند. در جدول ۶ مقادیر EOQ و Rp به ازای سه تخمین از پارامترها محاسبه شده است.

جدول ۲: تخمین مقدار سفارش بهینه و زمان سفارش

پارامترها	حد پایین	بهینه	حد بالا
مقدار سفارش اقتصادی (EOQ)	۱	۰/۸	۰/۶
مقدار ارسال سفارش مجدد (Rp)	۰/۸	۰/۶	۰/۵

مقدار Rp برای حالت حد پایین نشان می‌دهد که زمانی که موجودی انبار از لاستیک تقریباً به یک عدد رسید باید یک لاستیک دیگر سفارش داده شود.

۵- نتیجه‌گیری

یک برنامه مؤثر مدیریت قطعات‌یدکی باید دارای چندین ویژگی بارز چون: ۱. تضمین وجود حداقل یک فقره از تمامی قطعات بحرانی موردنیاز برای اجرای تعمیرات در مورد سامانه‌ای که وقوع خرابی در آن به علت مسائل ایمنی و میزان تولید کارخانه قابل‌قبول نیست. ۲. برای اطمینان از تجدید به هنگام برای قطعات‌یدکی موردنیاز کافی است، از وقع خرابی‌های تا جای ممکن پیشگیری به عمل آید، در غیر این صورت بیش از یک خرابی در طول چرخه تجدید مجدد تدارکات انبار و.جود خواهد داشت. ۳. حفظ میزان دارایی انبار در سطح ضروری برای بهینه‌سازی هزینه‌های مربوطه، داشته باشد. دستیابی به هر یک از این اهداف، اجرای روند منسجم با بینش چندگانه الزام می‌دارد. از این‌رو در این مقاله تلاش شد تا الگوریتمی مرکب از وضعیت عملکردی سیستم در قالب قابلیت اطمینان و روش‌های مدیریت برای پیش‌بینی قطعات یدکی موردنیاز پیشنهاد شود. روش تخمین قطعات یدکی موردنیاز مبتنی بر قابلیت اطمینان از جمله رویکردهای کاربرپسند و اجرایی در فعالیت‌های اقتصادی است که برای تخمین تعداد لاستیک‌های موردنیاز برای دامپتراک‌های صد تنی معدن مس سونگون مورد استفاده قرار گرفت. تعداد لاستیک‌های موردنیاز محاسبه شده برای یک دامپتراک به ازای سه تخمین از پارامترهای قابلیت اطمینان آن نشان داد که هر چه میزان قابلیت اطمینان جزء بالاتر وضعیت کارکرد آن بهتر، تعداد خرابی کمتر و لذا تعداد لاستیک موردنیاز برای دامپتراک کمتر خواهد بود. این موضوع را می‌توان در مورد مقادیر ۳/۲، ۲ و ۱/۲ عدد لاستیک موردنیاز برای دامپتراک در طول یک سال برای حد پائین، بهینه و بالای تخمین زده مشاهده نمود. همچنین نتایج تحلیل برای زمان سفارش لاستیک یدکی نشان داده که در حالت تخمین بهینه از پارامترهای قابلیت اطمینان، زمانی که تعداد لاستیک یدکی در انبار برای یک دامپتراک تقریباً به یک عدد رسید باید ۲ عدد لاستیک برای آن سفارش داده شود.

مراجع

[1] Standard, N. (1998). Regularity management & reliability technology. Norwegian Technology Standards Institution, Oslo, Norway, Z-016.

[2] Barabadi, A. (2011). Production Performance Analysis: Reliability, Maintainability and Operational Conditions. University of Stavanger, Stavanger NORWAY.

[3] Ghodrati, B., Kumar, U., & Kumar, D. (2003). Product support logistics based on product design characteristics and operating environment (p. 21). Presented at the 38th Annual International Logistics Conference and Exhibition: SOLE 2003, Huntsville, United States: Society of Logistics Engineers.

[4] Buzacott, J. A. (1970). Markov approach to finding failure times of repairable systems. Reliability, IEEE Transactions on, 19(4), 128–134.

[5] Chow, D. K. (1973). Reliability of some redundant systems with repair. Reliability, IEEE Transactions on, 22(4), 223–228.

[6] Kodama, M., & Fukuta, J. (1975). Renewal theoretical approach to the mission reliability of a redundant repairable system with two dissimilar units.

[7] Kumar, S. (2010, March). Performance Analysis and Optimization of Some Operating Systems of a Fertilizer Plant (Phd Thesis). Department of mechanical engineering National institute of technology Kurukshetra, India.

[8] Goel, L., & Gupta, R. (1984). Analysis of a two-unit standby system with three modes and imperfect switching device. Microelectronics Reliability, 24(3), 425–429.

[9] Smith, C. H., & Schaefer, M. K. (1985). Optimal inventories for repairable redundant systems with aging components. Journal of Operations Management, 5(3), 339–349.

[10] Billinton, R., & Allan, R. N. (1988). Reliability assessment of large electric power systems. Kluwer Academic Print on Demand.

[11] Kumar, U., & Klefsjö, B. (1992). Reliability analysis of hydraulic systems of LHD machines using the power law process model. Reliability Engineering

[24] Caglar, D., Li, C.-L., & Simchi-Levi, D. (2004). Two-echelon spare parts inventory system subject to a service constraint. IIE Transactions, 36(7), 655–666.

[25] Barabady, J., & Kumar, U. (2005). Maintenance Schedule by Using Reliability Analysis: A Case Study at Jajram Bauxite Mine of Iran (Vol. 2, pp. 831–838). Presented at the 20th World Mining Congress, Tehran, Iran: World Mining Congress.

[26] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study. International Journal of Logistics Research and Applications, 8(2), 95–105. Doi: 10.1080/ 13675560512331338189

[27] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: a case study in Kiruna Mine, Sweden. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 11(2), 169–184.

[28] Markeset, T., & Kumar, U. (2005). Product support strategy: conventional versus functional products. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 11(1), 53–67.

[29] Ghodrati, B. (2006). Weibull and Exponential Renewal Models in Spare Parts Estimation: A Comparison. International Journal of Performability Engineering, 2(2), 135.

[30] Chen, M.-C., Hsu, C.-M., & Chen, S.-W. (2006). Optimizing joint maintenance and stock provisioning policy for a multi-echelon spare part logistics network. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 23(4), 289–302.

[31] Ghodrati, B., Akersten, P.-A., & Kumar, U. (2007). Spare parts estimation and risk assessment conducted at Choghart Iron Ore Mine: A case study. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 13(4), 353–363.

[32] Ilgin, M. A., & Tunali, S. (2007). Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(5–6), 594–604.

[33] Barabady, J., & 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. doi:10.1016/j.ress.2007.10.006

[34] Cui, L. (2008). Maintenance Models and Optimization. In K. B. Misra (Ed.), Handbook of Performability Engineering (pp. 789–805). Springer London.

[35] Lisnianski, A., & Ding, Y. (2009). Redundancy analysis for repairable multi-state & System Safety, 35(3), 217–224. Doi:10.1016/0951-8320(92)90080-5

[12] Ntuen, C. A. (1991). An economic preventive maintenance scheduling model with truncated gamma function. Reliability Engineering & System Safety, 31(1), 31–38.

[13] AHMAD, A., & Kothari, D. (1998). A review of recent advances in generator maintenance scheduling. Electric machines and power systems, 26(4), 373–387.

[14] Lim, T.-J., & Lie, C. H. (2000). Analysis of system reliability with dependent repair modes. Reliability, IEEE Transactions on, 49(2), 153–162.

[15] Marseguerra, M., & Zio, E. (2000). Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. Reliability Engineering & System Safety, 68(1), 69–83.

[16] Sarkar, J., & Sarkar, S. (2001). Availability of a periodically inspected system supported by a spare unit, under perfect repair or perfect upgrade. Statistics & probability letters, 53(2), 207–217.

[17] Rustenburg, W., van Houtum, G.-J., & Zijm, W. (2001). Spare parts management at complex technology-based organizations: An agenda for research. International Journal of Production Economics, 71(1), 177–193.

[18] Pérès, F., & Noyes, D. (2003). Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair. Quality and Reliability Engineering International, 19(2), 129–148. doi:10.1002/qre.515

[19] Gasmi, S., Love, C. E., & Kahle, W. (2003). A general repair, proportional-hazards, framework to model complex repairable systems. Reliability, IEEE Transactions on, 52(1), 26–32.

[20] Dhillon, B. (2003). Methods for performing human reliability and error analysis in health care. International Journal of Health Care Quality Assurance, 16(6), 306–317.

[21] Kumar, U. (2003). Service delivery strategy for mining systems. Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries. South African Institute of Mining and Metallurgy, 43–48.

[22] Pérez-Ocón, R., & Montoro-Cazorla, D. (2004). A multiple system governed by a quasi-birth-and-death process. Reliability Engineering & System Safety, 84(2), 187–196.

[23] Samanta, B., Sarkar, B., & Mukherjee, S. (2004). Reliability modelling and performance analyses of an LHD system in mining. South African Institute Mining and Metallurgy, 104, 1–8.

[42] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines. Journal of quality in maintenance engineering, 18(1), 98–119.

[43] Bala, P. K., & Xavier, M. (2012). Purchase Dependency Based Demand Forecasting In Improved Spare Parts Inventory Management. International Journal of Research in Management, Economics and Commerce, 2(11), 18–28.

[44] Lanting, L. (2009, May). Modelling Breakdown Durations in Simulation Models of Engine Assembly Lines (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy). University of Southampton, Southampton, United Kingdom.

[45] Hall, R. A., & 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. doi:10.1076/ijsm.17.3.139.14773

[46] Yin, R. K. (2008). Case study research: Design and methods (Vol. 5). SAGE Publications, Incorporated.

[47] Clauset, A. (2011, August 23). Models and Simulation for Complex Systems.

[48] Garmabaki, A. H. S., Ahmadi, A., Mahmood, Y. A., & Barabadi, A. (2016). Reliability Modelling of Multiple Repairable Units. Quality and Reliability Engineering International, 32(7), 2329–2343. doi:10.1002/qre.1938

[49] Garmabaki, A., Ahmadi, A., Block, J., Pham, H., & Kumar, U. (2016). A reliability decision framework for multiple repairable units. Reliability Engineering & System Safety, 150, 78–88.

[50] Ghodrati, B. (2005). Reliability and operating environment based spare parts planning (Doctoral Thesis). Luleå University of Technology, Sweden.

system by using combined stochastic processes methods and universal generating function technique. Reliability Engineering & System Safety, 94(11), 1788–1795.

[36] Diallo, C., Ait-Kadi, D., & Chelbi, A. (2009). Integrated Spare Parts Management. In M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, & D. Ait-Kadi (Eds.), Handbook of Maintenance Management and Engineering (pp. 191–222). Springer London.

[37] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., & Kumar, U. (2011). Reliability and maintainability analysis of electrical system of drum shearers. Journal of Coal Science and Engineering (China), 17(2), 192–197. Doi: 10.1007/s12404-011-0216-z

[38] Nan, M. S., Nicolescu, C., Jula, D., Bolovan, C., Voicu, G. V., & Petre, G. (2011). Practical aspects regarding spare parts reliability evaluation within an integrated management system. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 5(2), 238–246.

[39] Ghodrati, B., Banjevic, D., & Jardine, A. (2010). Developing effective spare parts estimations results in improved system availability (pp. 1–6). Presented at the Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE.

[40] Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1–15. doi:10.1080/17480930.2011.622477

[41] Ghodrati, B., Benjevic, D., & Jardine, A. (2012). Product support improvement by considering system operating environment: A case study on spare parts procurement. International Journal of Quality & Reliability Management, 29(4), 436–450. Doi: 10.1108/02656711211224875

17 - Independent and identically distributed(iid)
18 - Serial correlation test
19 - Power low Process (PLP)
20 - Military Handbook Test
21 - Mann-Kendall test
22 - Renewal theory
23 - Homogeneous Poisson process
24 - Economic order quantity (EOQ)
25 - Harris
26 - Wilson
27 - Periodic review system
28 - Time between orders
29 - Continuous review system
30 - Reorder point system
31 - As good as

1 - Performance
2 - Reliability
3 - Availability
4 - Maintainability
5 - Maintenance supportability
6 - Norwegian oil and gas industry
7 - Deliverability
8 - Production assurance
9 - ISO/CD 20815
x - Mainframe computer
11 - J. Ladbrook
12 - Dispatching
13 - Covariates
14 - Chronological
15 - Time between failure (TBF)
16 - Time to failure(TTF)