

راهکارهای هوشمندسازی به منظور بهبود در مدیریت نگهداری ماشین آلات با رویکرد کاهش خرابی (مطالعه موردی صنایع معدنی)

خداداد واحدی^۱، محمد حسن کامیاب^۲

۱- استاد مهندسی مکانیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲- مدرس دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده

تعمیر و نگهداری به عنوان یکی از ارکان حیاتی در صنایع مختلف، نقش تعیین کننده‌ای در ارتقاء راندمان تولید و بهبود شاخص‌های اقتصادی ایفا می‌کند؛ چراکه ماشین آلات به عنوان بخش عمده‌ای از سرمایه فیزیکی، شالوده اصلی فرآیند تولید را تشکیل می‌دهند و کیفیت عملکرد آن‌ها مستقیماً بر کیفیت محصول نهایی اثرگذار است. نظام نگهداری و تعمیرات، رویکردی مؤثر و کارآمد جهت حفظ قابلیت عملکردی تجهیزات و تحقق ظرفیت اسمی تولید به شمار می‌آید. در صنایع معدنی، با توجه به سیاست‌های توسعه محور و نیاز به افزایش ظرفیت تولید، ماشین آلات سهم قابل توجهی در هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی دارند. از این رو، انتخاب صحیح تجهیزات، تأمین و تملک به موقع، و طراحی سیستماتیک فرآیند تعمیرات و نگهداری، از اولویت‌های اصلی مدیریت تولید محسوب می‌شود. پیاده‌سازی نظام نگهداری مناسب و پیشگیرانه، از یک سو موجب کاهش هزینه‌های ناشی از توقفات تولید و از سوی دیگر سبب افزایش طول عمر مفید تجهیزات و بهره‌برداری حداکثری از سرمایه‌گذاری‌های موجود می‌گردد. بررسی تجارب بین‌المللی و مطالعات اخیر نشان می‌دهد که انجام بازرسی‌های دوره‌ای، پایش برخط وضعیت تجهیزات، و بهره‌گیری از روش‌های هوشمند نگهداری، نقش مهمی در مدیریت مؤثر زنجیره تأمین قطعات یدکی ایفا می‌کند. توسعه روزافزون فناوری‌های دیجیتال و نرم‌افزارهای مدیریت نگهداری، شرایطی را فراهم ساخته است که در برخی معادن پیشرو جهان - نظیر معدن آیتیک سوئد - بیش از ۶۹ درصد از تعمیرات شاول‌ها و کامیون‌های معدنی در قالب نگهداری پیشگیرانه و کمتر از ۳۰ درصد در قالب تعمیرات اصلاحی انجام می‌شود؛ که این امر نشان‌دهنده کارآمدی چنین رویکردهایی در افزایش بهره‌وری و کاهش فرسودگی ماشین آلات است.

کلید واژه‌ها: نگهداری و تعمیرات (نت)، فرسودگی ماشین آلات، صنایع معدنی، هوشمند سازی، افزایش بهره‌وری.

Intelligent Solutions for Improving Machinery Maintenance Management with an Approach to Reducing Failures (A Case Study in the Mining Industry)

Khoddad Vahidi¹, Mohammad Hassan Kamyab²

1- Professor of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

2- Lecturer, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

Maintenance, as one of the vital pillars of various industries, plays a decisive role in enhancing production efficiency and improving economic indicators. Machinery, as a major component of physical capital, forms the backbone of the production process, and its performance quality directly affects the quality of the final product. The maintenance management system serves as an effective and efficient approach to preserving the operational capability of equipment and achieving the nominal production capacity. In the mining industry, considering development oriented policies and the need to increase production capacity, machinery accounts for a significant share of both capital and operational costs. Therefore, the proper selection of equipment, timely procurement and acquisition, and systematic design of maintenance processes are among the main priorities of production management. Implementing an appropriate and preventive maintenance system not only reduces the costs associated with production downtime but also increases the useful life of equipment and maximizes the return on existing investments. International experiences and recent studies indicate that performing periodic inspections, online condition monitoring of equipment, and the use of intelligent maintenance methods play a significant role in the effective management of spare parts supply chains. The rapid development of digital technologies and maintenance management software has enabled conditions where, in some of the world's leading mines such as the Aitik Mine in Sweden more than 69% of shovel and haul truck maintenance is performed as preventive maintenance, with less than 30% being corrective repairs. This demonstrates the effectiveness of such approaches in improving productivity and reducing machinery wear.

Keywords: Maintenance Management, Equipment Degradation, Mining Industry, Smart Technologies, Productivity Enhancement.



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

اعداد و ارقام مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی ماشین‌آلات مورد استفاده در معادن با دیگر فعالیت‌های صنعتی کمتر قابل مقایسه بوده و اهمیت مدیریت ماشین‌آلات بیش از پیش روشن شده است. نبود منابع بکر و پرمایه گذشته و همچنین نیاز بیشتر صنایع به مواد اولیه‌ای استخراجی از معادن، لزوم کاهش هزینه‌ها و به دنبال آن بیشینه کردن سود را پررنگ می‌نماید. در این راستا، امروزه معادن موضوع افزایش شاخص‌های مؤثر در راندمان به منظور افزایش سودآوری را به صورت جدی مدنظر قرار داده‌اند و رسیدن به این اهداف با افزایش مکانیزاسیون و به کارگیری دستگاه‌های پیشرفته قابل دسترس خواهد بود. بدین ترتیب، ماشین‌آلات معدنی روزبه‌روز پیچیده‌تر شده و هزینه‌های آنها به شدت رو به افزایش است.

به منظور دستیابی به اهداف تولید بالا، هزینه کمتر و راندمان بیشتر، شرکت‌های معدنی به طور فزاینده‌ای مفاهیم مدیریت ماشین‌آلات و مهندسی تعمیر و نگهداری را مورد توجه قرار داده‌اند. با مروری بر گزارش‌ها و تجربیات ارائه شده در زمینه‌ی تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات معدنی، اهمیت بنیادین این موضوع بیش از پیش آشکار می‌شود. با جمع‌آوری و مرور آمار مربوط به صنایع معدنی کشورهای مختلف، واقعیت‌های جالبی را به شرح زیر می‌توان خلاصه نمود:

- به طور کلی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات (در تمامی صنایع) از ۲۰ الی ۳۵ درصد کل هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود؛ اما در ماشین‌آلات معدنی هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌تواند به ۴۰ الی ۵۰ درصد هزینه‌های تولید نیز برسد (Dhillon, 2008).

- در معادن زغالسنگ استرالیا که بزرگترین کشور صادرکننده زغالسنگ جهان به حساب می‌آید، ۱۰ درصد زمان تولید، توسط تعمیرات برنامه‌ریزی نشده از دست می‌رود.

- در معادن روباز شیلی و اندونزی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ۶۰ درصد هزینه‌های عملیات را شامل می‌شود (Hall et al. 2000).

- به طور کلی با مطالعه صحیح سیستم‌های مهندسی می‌توان زمان تعمیرات و توقف‌های ناخواسته تولید را بسته به نوع هر صنعت از ۴۰ الی ۷۰ درصد کاهش داد.

- هزینه تعمیرات و نگهداری ۴۰ الی ۵۰ درصد هزینه

عملیات معدن را شامل می‌شود.

- بر اساس یک تحلیل انجام شده در خصوص داده‌های هزینه‌ای ماشین‌آلات معدنی که به طور سالیانه توسط InfoMine منتشر می‌شود، به طور متوسط، سهم هزینه "تعمیرات اساسی و نگهداری و تعمیرات" از کل هزینه عملیاتی لودر، کجیل، شاول هیدرولیک و شاول کابلی بترتیب ۳۲٪، ۵۰٪، ۵۹٪ و ۶۴٪ برآورد شده است (Lashgari and Sayadi 2013).

لذا با توجه به این ارقام، مطالعه تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات معدنی و بررسی راهکارهای ممکن برای بهینه‌سازی آن می‌تواند مدیران صنایع معدنی را در بهبود شرایط اقتصادی و کاهش قیمت تمام شده محصولات یاری نماید. در ادامه این فصل، به تعاریف و مفاهیم پایه در نگهداری و تعمیرات پرداخته شده است.

۱-۱- پارامترهای رایج در تعمیر و نگهداری

در مطالعه تعمیر و نگهداری، مجموعه‌ای از مفاهیم، کمیّات و محاسبات ریاضی به عنوان ابزار ضروری و پرکاربرد مطرح می‌باشند. تمامی تعاریف مهندسی تعمیر و نگهداری بر مبنای "سیستم" ارائه می‌شوند. از آنجایی که این تحقیق در مورد ماشین‌آلات معدنی نگاشته شده است، لذا در تمامی متن از کلمه دستگاه به جای سیستم استفاده خواهد شد. تعاریف مفهومی از کمیتهای مورد استفاده در مهندسی تعمیر و نگهداری به شرح زیر می‌باشند:

- خرابی^۱: ناتوانی یک بخش یا یک قطعه از دستگاه در انجام وظایف تعریف شده، "خرابی" یا نقص نامیده می‌شود.
- نرخ خرابی^۲: نسبت تغییر در تعداد بخش‌هایی از دستگاه که به طور مطلوب کار نمی‌کنند به تعداد اجزایی که به حالت مطلوب کار می‌کنند را "نرخ خرابی" می‌نامند (Dhillon 2008). به بیان دیگر، تعداد خرابی در واحد زمان "نرخ خرابی" خوانده می‌شود (Finkelstein 2008).
- زمان بین خرابی‌ها (TBF): فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر (تعمیر پذیر) از دستگاه را "زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.
- میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)^۴: میانگین فاصله زمانی بین خرابی‌های یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه را "میانگین زمان بین خرابی‌ها" می‌نامند.
- زمان تا خرابی (TTF)^۵: عمر مفید یک بخش یا یک قطعه

- افزایش قابلیت اطمینان
- افزایش کارایی
- کاهش تعمیرات اتفاقی
- کاهش هزینه توقفات تولید و جلوگیری از خسارت بر اثر خرابی‌های دستگاه

در هر پروژه صنعتی بسته به اهداف پروژه و مشخصات مهندسی ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده، هر یک از اهداف مذکور می‌تواند پررنگ‌تر و یا کم‌اهمیت‌تر باشد. در حالت کلی، افزایش طول عمر دستگاه، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های توقفات تولید معمولاً سه هدف عمده تعمیر و نگهداری در تمامی صنایع به شمار می‌آیند. در این میان، کاهش هزینه به‌عنوان یک هدف بالادستی، دو هدف دیگر را نیز پوشش می‌دهد. لذا در بهترین حالت، برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان ماشین، کمینه‌نمودن هزینه‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد؛ اما در برخی دستگاه‌ها و فرآیندهای مهندسی گاهی به دلیل وجود محدودیت‌های بسیار جدی در منابع در دسترس، مهندسين مجبور به پذیرش هزینه بالای یک استراتژی به جای یک استراتژی کم هزینه‌تر می‌شوند. لذا، تعیین هدف تعمیر و نگهداری، تعیین‌کننده بسیاری از خط و مشی‌های اجرایی در مدیریت تعمیر و نگهداری است.

۲- انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری

چنانچه در بخش قبل اشاره شد، پس از تعیین هدف تعمیر و نگهداری یک دستگاه، مرحله بعدی انتخاب استراتژی یا سیاست تعمیر و نگهداری مناسب با شرایط دستگاه، هدف مفروض و امکانات موجود است. در حالت کلی استراتژی‌های تعمیر و نگهداری به دو نوع عمده تقسیم می‌شوند: تعمیر و نگهداری اصلاحی و تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه. هر یک از این روش‌ها خود به زیرمجموعه‌هایی از استراتژی‌های مختلف تقسیم می‌شوند. شکل ۱ انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد. در ادامه هر یک از این استراتژی‌ها به‌طور جداگانه معرفی گردیده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

غیرقابل‌تعمیر (تعمیرناپذیر) از دستگاه را "زمان تا خرابی" می‌نامند. شایان ذکر است که در برخی منابع زمان وقوع هر خرابی از زمان صفر "زمان تا خرابی" نامیده شده‌است.

- میانگین زمان تا خرابی (MTTF)^۷: میانگین عمر یک بخش یا یک قطعه غیرقابل‌تعمیر از دستگاه "میانگین زمان تا خرابی" می‌نامند.
- زمان تعمیرات (TTR)^۸: زمان موردنیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب شده دستگاه را "زمان تعمیرات" می‌نامند.
- میانگین زمان تعمیرات (MTTR)^۹: میانگین زمانی صرف شده برای تعمیرات یک بخش از دستگاه را "میانگین زمان تعمیرات" می‌نامند.
- قابلیت اطمینان^{۱۰}: احتمال این که یک دستگاه بتواند وظیفه محوله خویش را در یک بازه زمانی مشخص به حالت مطلوب و از پیش طراحی شده انجام دهد، "قابلیت اطمینان" آن دستگاه نامیده می‌شود.
- مدل قابلیت اطمینان^{۱۱}: رابطه ریاضی که برای ارزیابی، تخمین و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان یک دستگاه به‌صورت تابعی از زمان ارائه می‌شود، "مدل قابلیت اطمینان" نامیده می‌شود (Blischke and. Murthy ۲۰۰۳)

۱-۲- تعمیر نگهداری

عملکرد یک دستگاه علاوه بر طراحی و شرایط محیط کار، به میزان سرویس و تعمیر و نگهداری انجام‌شده در طی عمر عملیاتی دستگاه بستگی کامل دارد. سرویس‌کاری مطلوب (مثل تعویض روغن به موقع)، تعمیر یا تعویض مناسب قطعات خراب شده و نگهداری دستگاه در محل مناسب در ساعات غیرکاری ازجمله عواملی هستند که باعث افزایش عمر مفید دستگاه می‌شوند (Blischke and Murthy 2003)

به هر عملیاتی (غیر از سرویس‌کاری عادی مثل تعویض روغن یا سوخت‌گیری) که به‌منظور حفظ یک دستگاه در شرایط عملیاتی موجود یا بازگرداندن دستگاه به شرایط قبل از خرابی انجام گیرد، تعمیر و نگهداری گفته می‌شود (Blischke and Murthy 2003).

اهداف اصلی تعمیر و نگهداری عبارت‌اند از

- افزایش دوره عمر مفید دستگاه

تصمیم‌گیری در مورد ادامه کار ماشه-ین و یا توقف آن جهت انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه، بر اساس نتایج حاصله از این تحلیل انجام می‌شود. از جمله پارامترهای مورد مطالعه در این روش می‌توان به ارتعاش، حرارت و آنالیز روغن اشاره نمود. در این روش هیچ فعالیت اضافی انجام نمی‌گیرد و بر همین اساس عبارت تعمیر و نگهداری اقتصادی نیز به این روش اطلاق می‌شود.

۲-۱) بازرسی و اندازه‌گیری پیوسته توسط ابزار:

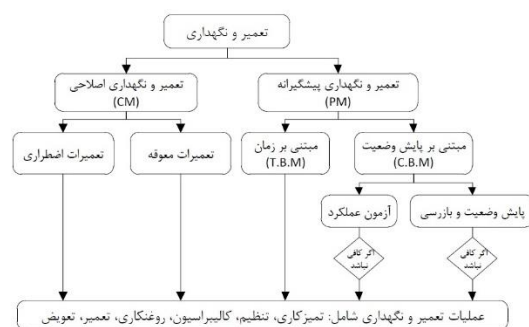
در این روش شرایط و پارامترهای عملکرد اجزای دستگاه به صورت پیوسته و اتوماتیک توسط ابزارهای مخصوص ارزیابی و اندازه‌گیری می‌شوند و داده‌های جمع‌آوری شده به صورت متمرکز طبقه‌بندی می‌گردند. در صورت بروز هرگونه حالت غیرعادی در شرایط دستگاه، عملیات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه در همان زمان بر روی بخش موردنظر انجام می‌گیرد. سنسورهای تعیین زمان دقیق تعویض فیلترها، سنسورهای حرارتی برای تعیین زمان دقیق روانسازهای یاتاقانها و سنسورهای حرارت و فشار از نمونه‌های سیستم‌های پایش پیوسته وضعیت دستگاهها هستند که امروزه به‌طور گسترده در تمامی صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۳) تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مبتنی بر زمان

تعمیر و نگهداری مبتنی بر زمان را شاید بتوان شناخته‌شده‌ترین و رایج‌ترین نوع تعمیر و نگهداری نامید. در این روش، دستگاه صرف نظر از شرایطی که در آن است در بازه‌های زمانی مشخص به‌عنوان مثال هر ۱۰۰ ساعت یکبار مورد بازرسی، سرویس یا تعمیرات پیش‌گیرانه قرار می‌گیرد. برای تعیین بهترین فاصله زمانی تعمیرات سه رهیافت عمده به شرح زیر وجود دارد:

الف) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان:

در این مورد با توجه به شرایط حاکم بر فرآیند تولید و نیز مشخصات طراحی دستگاه، یک سطح حداقل برای قابلیت اطمینان هر دستگاه یا زیرسیستم‌های آن تعیین می‌شود و لذا قابلیت اطمینان دستگاه نباید از این حد پائین‌تر بیاید (Rezvanizani et al. 2008). تعمیرات پیش‌گیرانه در بازه‌های زمانی معادل با این حد قابلیت اطمینان انجام می‌گیرند؛ بنابراین، در این مورد هدف از تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد.



شکل ۱- انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری (Akersten 2006; Ahmadi et al. 2010)

۲-۱- تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه

تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه عبارت است از یک روش سیستماتیک برنامه‌ریزی و زمانبندی شده جهت انجام فعالیت‌های نگهداری مورد نیاز باهدف جلوگیری از فرسایش غیرعادی اجزای ماشین و کاهش توقفات اضطراری. در این روش دستگاه در بازه‌های زمانی خاص و بر اساس زمانبندی مشخصی مورد بازرسی و عیب‌یابی و یا تعمیر قرار می‌گیرد. (Dhillon ۲۰۰۸) به عبارتی این استراتژی بیانکننده مجموعه‌ای از عملیاتهای برنامه‌ریزی شده بازرسی، سرویس و تعمیرات برای حفظ شرایط مطلوب کارکرد دستگاه و پیشگیری از خرابی جدی آن است. (Wang and Pham ۲۰۰۳) برنامه‌ریزی و تعیین زمان مناسب این تعمیرات به دو طریق عمده انجام می‌گیرد: الف) مبتنی بر پایش و وضعیت و ب) مبتنی بر زمان. هر یک از این روش‌ها موارد کاربرد خاصی دارند که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می‌شود:

۲-۲) تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مبتنی بر پایش وضعیت

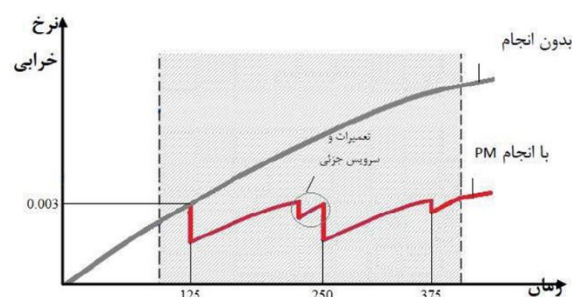
این نوع تعمیر و نگهداری به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌گردد که جهت تعیین شرایط فنی کارکرد دستگاه (اندازه‌گیری میزان فرسایش اجزاء) در حین بهره‌برداری انجام گردیده و بر اساس نتایج حاصله از آن، زمان و نوع فعالیت تعمیر پیش‌گیرانه مورد نیاز تعیین می‌گردد. فعالیت‌های تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه مبتنی بر پایش وضعیت عبارتند از:

۱) اندازه‌گیری شرایط دستگاه با استفاده از ابزار توسط انسان:

در این روش در فواصل زمانی مشخص و در حین کارکرد ماشین، با استفاده از ابزار ویژه شرایط اجزاء دستگاه توسط متخصص پایش وضعیت اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده با محدوده کارکرد مجاز اجزاء مقایسه می‌شود.

ب) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر نرخ خرابی:

در این مورد نیز همچون مورد بالا، با توجه به سطح طراحی و نیز استانداردهای عملیاتی و ایمنی موجود در هر دستگاه، یک حد بیشینه برای نرخ خرابی دستگاه تعیین می‌شود. عملیات تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه در بازه‌های زمانی که این دستگاه به نرخ مذکور می‌رسد بر روی دستگاه اجرا می‌شود تا از این طریق نرخ خرابی دستگاه بهبود یافته و در یک حد تقریباً ثابتی نگهداشته شود. هدف تعمیرات پیش‌گیرانه در این مورد، کاهش نرخ خرابی دستگاه خواهد بود. شکل ۲ تأثیر تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه را بر نرخ خرابی و عمر مفید دستگاه نشان می‌دهد.



شکل ۲- تأثیر تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه بر نرخ خرابی و عمر مفید دستگاه چنانچه در این شکل نشان داده شده است، اگر به‌عنوان مثال هدف حفظ نرخ خرابی دستگاه در حدود 0.003 خرابی بر ساعت باشد، این دستگاه باید هر ۱۲۵ ساعت یکبار مورد تعمیر پیش‌گیرانه قرار گیرد.

ج) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مبتنی بر حداقل هزینه:

در این روش بهترین زمان تعمیر و نگهداری طوری انتخاب می‌شود که هزینه کل تعمیرات اعم از اصلاحی یا پیش‌گیرانه به حداقل برسد. این روش که "بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری" نیز نامیده می‌شود قطعی‌ترین و مناسب‌ترین روش تعیین تعمیرات پیش‌گیرانه به حساب می‌آید (Campbell and Jardine 2001)؛ اما باید توجه نمود در برخی دستگاهها با توجه به شرایط عملیاتی موجود، شاید روش مبتنی بر قابلیت اطمینان یا نرخ خرابی تنها راهکار باشد گرچه ممکن است از نظر هزینه این روش‌ها بهینه نباشند. در مجموع هر یک از استراتژی‌های PM که برای یک دستگاه انتخاب شوند، یک سری فعالیت‌های پیش‌گیرانه استاندارد انجام می‌گیرند که به‌طور خلاصه عبارتند از:

- فعالیت‌هایی برای جلوگیری از فرسایش غیرعادی اجزاء ماشین شامل تمیزکاری، آچارکشی و روانسازی

(روغنکاری و گریسکاری)

- بازرسی فنی برای کشف خرابی‌های نهفته یا خرابی‌های محتمل در آینده
- فعالیت‌هایی برای کاهش توقفات اضطراری شامل تعمیر و تعویض‌های دوره‌ای مطابق با برنامه زمانی از پیش تعیین شده

شایان ذکر است که روش و تجهیزاتی که برای PM انتخاب می‌شوند و یا محدوده زمانی که سیستم PM می‌تواند گسترش و ارتقاء یابد، تماماً به نوع صنعت و ماشین‌آلات مربوطه بستگی دارد. برای مثال شاید در یک واحد صنعتی بازرسی‌های متکی بر حواس انسانی توسط تکنسین‌ها کافی و اقتصادی بوده ولی تجهیز واحد فنی به سیستم‌های پایش مثل ارتعاشسنجی مقرون به صرفه نباشد، برای چنین صنعتی وجود سیستم PM در همان حد اولیه مؤثر است ولی این سیستم به هیچ وجه برای یک واحد صنعتی خاص با ماشین‌آلات ویژه، مؤثر و کارآمد نخواهد بود.

۳-۳- تعمیر و نگهداری اصلاحی

این نوع تعمیر و نگهداری پس از وقوع خرابی برای بازگرداندن یک بخش یا کل دستگاه به حالت عملیاتی به کار برده می‌شود. طی این عملیات قطعات معیوب تعمیر گردیده یا با یک قطعه جدید (کارکرده) جایگزین می‌شود (Blischke and Murthy 2003). این روش کاملاً برخلاف روش‌های PM بدون برنامه‌ریزی بوده و پس از خرابی دستگاه انجام می‌شود. چنانچه در شکل ۳ نشان داده شده است، عملیات CM بسته به سطح بحرانی بودن خرابی و نیز بسته به شرایط عملیات می‌تواند به صورت اضطراری^{۲۱} یا معوقه^{۲۲} انجام شود. تعمیرات اضطراری زمانی انجام می‌شوند که خرابی، بسیار بحرانی بوده و باعث توقف ۱۰۰ درصد عملیات گردد. در این حالت تعمیر و رفع عیب در همان لحظه انجام شده است. عملیات پس از رفع عیب مجدداً آغاز می‌شود. رفع پنچری لاستیک خودرو مثالی برای این تعمیرات است. تعمیرات معوقه زمانی انجام می‌شوند که خرابی دستگاه به‌صورت محدود و بخشی بوده و روند عملیات را دچار توقف ننماید. لذا می‌توان تعمیرات این بخش را تا آخر شیفت کاری یا هر زمان مناسب دیگری به تعویق انداخت. ترک خوردن شیشه جلوی خودرو و تعویض آن، نمونه‌ای از این نوع تعمیرات است.

۴- انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری

در مطالب پیشین، انواع استراتژی‌های تعمیر و نگهداری معرفی و

به عنوان بهترین استراتژی انتخاب می شود. (Hauge ۲۰۰۲) در غیر این صورت PM به عنوان بهترین گزینه برای تعمیر و نگهداری خواهد بود و بقیه فرآیند انتخاب طبق شکل ۳ ادامه می یابد. در حالتی که TBM به عنوان انتخاب اصلی مطرح باشد، برای تعیین بهترین زمان انجام تعمیر و نگهداری پیش گیرانه، بسته به شرایط دستگاه و درجه اهمیت عملیات از یکی از رهیافت های مرتبط استفاده می شود.

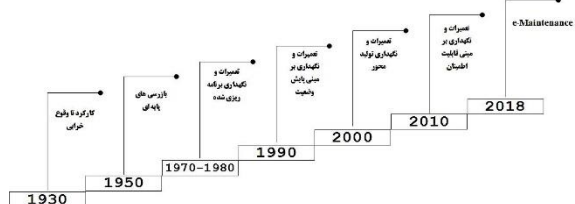
۵- بررسی پیشینه پژوهشی موضوع در سطح ایران و جهان تعمیر و نگهداری تجهیزات و ماشین آلات به شکل جدی و آکادمیک به قبل از سالهای ۲۰۰۰ بازمی گردد. در سالهای پیش از قرن ۲۱ با گسترش تحقیقات بر موضوع قابلیت اطمینان به انتخاب زمان مناسب برای دوره های تعمیر نگهداری رسیده اند. به همین سبب در سالهای پس از ۲۰۰۰ تحقیقات بر موضوع قابلیت اطمینان بسیار مورد توجه واقع می شود و اساس انتخاب دوره های مناسب تعمیر و نگهداری قرار می گیرد. در این سالها به عوامل محیطی تأثیرگذار محیطی بر قابلیت اطمینان توجه ویژه می شود و به مدیریت برای زمان مناسب تأمین قطعات یدکی کمک می کند. مسیر کلی این تحولات در شکل ۴ جمع بندی شده است.

مسیر تحقیقات در زمینه تعمیر و نگهداری



شکل ۴- مسیر تحقیقات در زمینه تعمیر و نگهداری

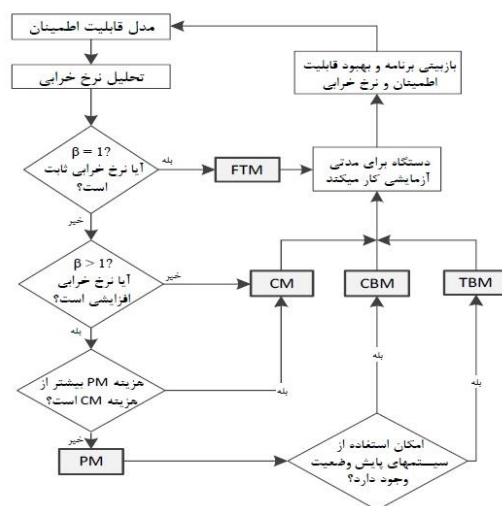
استراتژی های حوزه ی مدیریت ناوگان از دیرباز تاکنون همانند دیگر علوم، دستخوش تغییرات زیادی بوده است. شکل ۵ روند پیشرفت دیدگاه ها و نظام تعمیراتی در سده ی اخیر را نمایش می دهد.



شکل ۵- پیشرفت علم تعمیرات و نگهداری در گذر زمان (Wireman 2004)

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است تا قبل از دهه ی ۳۰

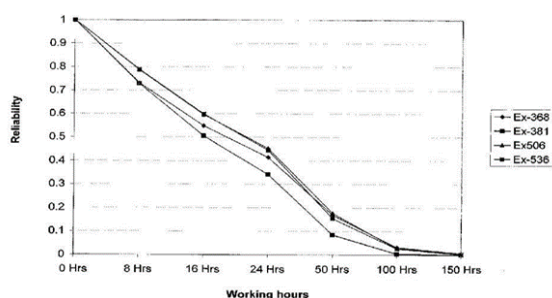
مورد بحث قرار گرفتند. در ادامه، نحوه انتخاب استراتژی مناسب و فرآیند مورد استفاده در آن مورد بحث قرار می گیرد. با توجه به تئوری های موجود در تعمیر و نگهداری، الگوریتم انتخاب استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری برای یک دستگاه به صورت شکل ۳ قابل ارائه است. چنانچه در این شکل مشاهده می شود، اساس انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری بر تحلیل قابلیت اطمینان و نرخ خرابی دستگاه استوار است. اگر نرخ خرابی دستگاه ثابت باشد، از آنجایی که گذشت زمان تأثیری بر کمیت خرابی ندارد، لذا تنها روش تعمیر و نگهداری مناسب در این سیستمها "تعمیر در زمان ثابت" می باشد. در این روش عملیات بازدید سراسری (بازکردن، پیاده کردن و بستن مجدد دستگاه یا بخش های آن) یا تعویض قطعه بدون توجه به شرایط قطعه در زمانهای ثابت و مشخصی انجام می شود. نمونه ای از این نوع تعمیر و نگهداری تعویض فیلتر روغن در خودروهاست.



شکل ۳- الگوریتم انتخاب استراتژی مناسب تعمیر و نگهداری (Barabady and Kumar 2007)

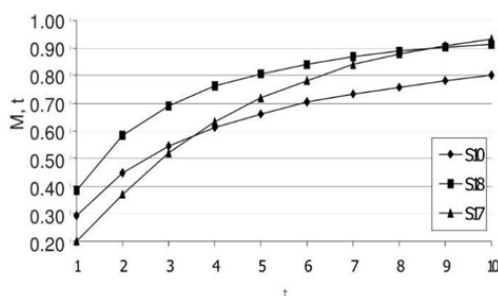
اگر نرخ خرابی کاهشی باشد، از آنجایی که دستگاه رو به بهبود پیش می رود، تغییر در شرایط عملکرد آن، موجب به هم ریختن رفتار رو به بهبود دستگاه می شود؛ بنابراین، در این حالت بهترین انتخاب، تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM) خواهد بود. این بدین معناست که به دستگاه اجازه داده می شود تا به کار خویش ادامه دهد و هر وقت خرابی اتفاق افتاد، آن بخش تعمیر شده و مجدداً دستگاه شروع به کار می کند. در صورتی که نرخ خرابی افزایشی باشد، از آنجایی که دستگاه روبه زوال پیش می رود، لذا باید در مقطعی از پیشرفت این فرآیند مخرب جلوگیری شود. برای این منظور اگر هزینه CM کمتر از کل هزینه PM باشد، CM

اطمینان چهار شاول در طول کارکرد آنها را بررسی کردند که در شکل ۷ ارائه شده است.



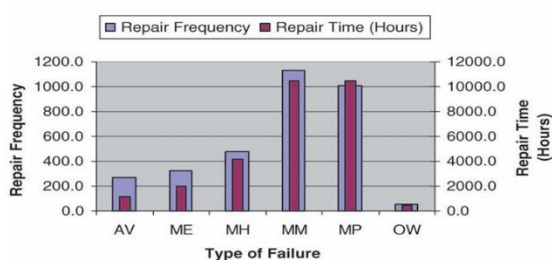
شکل ۷- منحنی‌های قابلیت اطمینان شاولهای معدنی (Roy et al. 2001a)

نتایج تحقیقات الوی و همکاران نشان می‌دهد که برنامه تعمیر و نگهداری نیازمند به یک بازبینی است و قطعات یدکی می‌بایست به حد کفایت تأمین شود (Elevli et al. ۲۰۰۸). بررسی آنها بر سیستم‌های بارگیری یک معدن نشان می‌دهد که روند تعمیر پذیری شاولها یکسان نیستند و باید رویکردهای متفاوتی را نسبت به آنها در نظر گرفت. در ۸ می‌توان روند تعمیر پذیری سه شاول را در گذر زمان دید.



شکل ۸- منحنی‌های قابلیت تعمیر پذیری سه شاول در معدن (Elevli, 2008)

نیک و ژیانجی ۱۳ لودر LHD را مورد بررسی قرار دادند و با بررسی شرایط به ارزیابی کاراکترهای مؤثر بر تعمیر و نگهداری ماشین‌ها پرداختند تا به کمک آنها بتوانند عوامل آماری که سبب خرابی و توقفات می‌شوند را مشخص کنند. تحقیق آنها به دو روش ارزیابی آماری خرابی‌ها و تحلیل قابلیت اطمینان صورت می‌گیرد (Vayenas et al. ۲۰۰۹)؛ که در شکل ۹ می‌توان فراوانی و ساعات تعمیر برای انواع خرابی‌ها را مشاهده نمود.

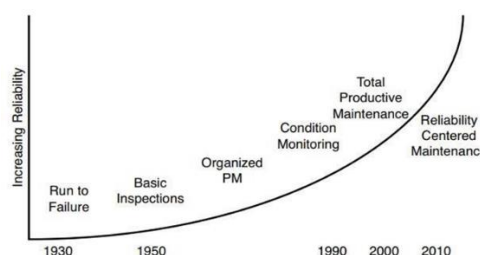


شکل ۹- فراوانی خرابی‌ها و زمان‌های تعمیر مورد نیاز آنها

میلادی، در صنایع غیرنظامی، تعمیرات و نگهداری صرفاً زمانی انجام می‌شده است که دستگاه به مرحله‌ی خرابی رسیده باشد. در این دوران، از جمله تبعات منفی تعمیرات و نگهداری ضعیف و در اختیار نداشتن استراتژی‌های درست مدیریتی تعمیرات، می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- کاهش قابلیت دسترسی
- تولید از دست‌رفته
- هزینه‌ی کاهش عمر تجهیزات
- اضافه‌کاری و دوباره‌کاری
- بیکاری کارکنان تولید
- از دست دادن مشتریان

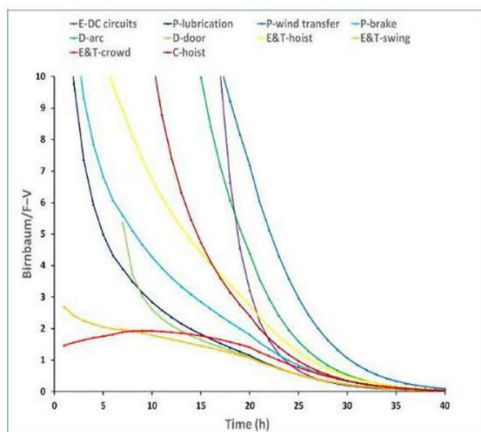
همچنین در سالهای اخیر با ورود فناوری‌های نوین به عرصه تعمیر و نگهداری ماشین‌الات معدنی، تحول مثبتی در این عرصه به وجود آمده که سیر این تحول از منظر تغییرات قابلیت اطمینان در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- سیر تحولات تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان در طی هشتاد سال (Tomlinson 2011)

در ادامه، منتخبی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی تعمیر و نگهداری، قابلیت اطمینان و تحلیل خرابی در سالهای پس از ۲۰۰۰ به شکل خلاصه ارزیابی شده و ارائه می‌گردد. از روشهای به دست آوردن قابلیت اطمینان، تحلیل و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها است که به کمک آن می‌توان روندهای خرابی و زمانهای تعمیر و توابع قابلیت اطمینان و به دنبال آن قابلیت اطمینان دستگاه در زمانهای مختلف را به دست آورد. نتایج به‌دست‌آمده سبب تولید زمانهای خرابی و پیش‌بینی زمانهای تعمیر و نگهداری شده است. در سال ۲۰۰۱ تحلیل‌های روی و همکاران نشان می‌دهد که ۲۵٪ از خرابی‌ها جزئی بوده و امکان تعمیر در زمانهای بیکاری ماشین وجود دارد و ۷۵٪ از خرابی‌ها نیاز تعمیرات جدی دارد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی بهبود در سلامت ماشین، هزینه‌ها و تأثیر عملیاتی ماشین را نشان می‌دهد (Roy et al. ۲۰۰۱a). آنها در تحقیق خود قابلیت

زیرسیستم‌ها در اولویت تعمیر و نگهداری خواهند بود (Basiri et al. 2020) در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در طول زمان کدام یک از زیر سیستم‌ها نقش مؤثرتری در کاهش قابلیت اطمینان سیستم دارند و نیازمند نت پیش‌گیرانه خواهند بود.



شکل ۱۱- مقایسه اولویت زیرسیستم‌ها برای تعمیرات پیش‌گیرانه ناوگان شاول (Basiri et al. 2020).

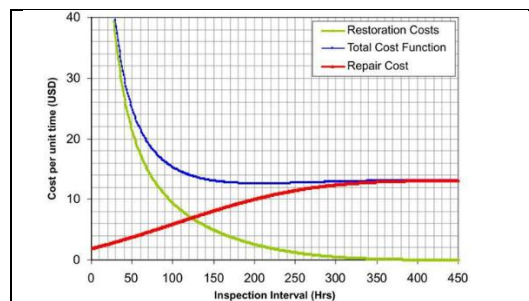
علاوه بر تحقیقاتی که به‌طور تفصیلی مورد ارزیابی قرار گرفتند، در جدول ۱، خلاصه‌ای از پیشینه دیگر تحقیقات انجام‌شده در زمینه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات معدنی جمع‌بندی و ارائه شده است.

جدول ۱- در زمینه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات معدنی

ردیف	سال	عنوان پژوهش	نویسنده	منبع
1	2001	تحلیل نت و قابلیت اطمینان ناوگان شاول	Roy et al.	سیستم‌سازی با شبیه‌سازی
2	2008	تحلیل قابلیت اطمینان و نت سنگ‌شکن	Barabady and Kumar	تحلیل قابلیت اطمینان و پیش‌بینی نت
3	2008	تحلیل نت سیستم مکانیکی شاول کابلی الکتریکی	Elevli et al.	تحلیل داده‌های نت
4	2009	تحلیل قابلیت اطمینان و نت در معدن زیرزمینی	Vayenas et al.	بررسی خرابی‌ها و توقفات
5	2011	تحلیل نت بر اساس واریانت‌های زمانی و محیطی	Barabadi et al.	تأثیر عوامل محیطی
6	2013	تأثیر عوامل محیطی بر نت تراک‌ها	Gustafson et al.	ارزیابی لحظه‌ای خرابی با درخت خطا
7	2013	نت بر اساس قابلیت اطمینان شیرهای اسپری	Hoseinie et al.	تحلیل خرابی و هزینه تعمیر
8	2014	برنامه‌ریزی نت برای مته حفاری	Rahimdel et al.	ارائه زمان مناسب تعویض
9	2014	تحلیل نت تجهیزات معدن زیرزمینی با الگوریتم ژنتیک	Peng and Vayenas	پیش‌بینی خرابی و زمان‌بندی نت
10	2015	مدل عمر مفید	Al-Chalabi et	ارائه مدل تعویض

AV بیانگر توقف برای خرابی‌های کوچک، ME خرابی‌های بزرگ، MH خرابی‌های هیدرولیکی، MM خرابی‌های مکانیکی، MP خرابی‌های برنامه‌ریزی‌شده و OW سایر خرابی‌ها است.

همانگونه که ذکر شد تا سالهای قبل از ۲۰۱۲ اغلب تحقیقات برای یافتن زمان مناسب تعمیر و نگهداری اساس قابلیت اطمینان بوده است و باهدف افزایش قابلیت دسترسی به کمک مدل‌هایی مثل PHM، PRM و مدل‌های رگرسیون دیده می‌شوند؛ اما در سال ۲۰۱۲ حسینی و همکاران به بررسی فاصله بازرسی و تعمیر پیش‌گیرانه مناسب برای اسپری‌های شیربر پرداختند. آنها تأثیر هزینه را در بازرسی و تعمیر و هزینه‌های وارد شده به تولید را در مدلسازی خود آوردند و عملاً سعی بر ارائه یک مدل هزینه برای فاصله بهینه تعمیر و نگهداری کردند. نتایج مدل آنها بیان می‌کند که در مورد مطالعاتی مدنظر امکان جابجایی و تأخیر تعمیر و نگهداری تا حدود ۴۰ ساعت نیز وجود دارد و عملاً به سبب بالا بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری در برخی از موارد می‌تواند تعمیر و نگهداری را با توجه به هزینه‌ها با تأخیر انداخت (Hoseinie et al. ۲۰۱۳) در شکل ۱۰ می‌توان نمودار زمانهای بازرسی و هزینه‌های آن را مشاهده نمود.



شکل ۱۰- تغییرات هزینه‌های تعمیر و نگهداری نسبت به فواصل زمانی مختلف برای بازرسی (Hoseinie et al. 2013)

به‌طور کلی می‌توان این دست از مقاله‌ها را شروعی برای تأثیر هزینه‌ها در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دانست. حسینی و همکاران پس از آن در سال ۲۰۱۵ این مدل هزینه را برای تعمیر نگهداری پیش‌گیرانه نیز به کار بردند و نتایج امکان به تأخیر انداختن نت پیش‌گیرانه تا ۶ ساعت را نشان می‌دهد (Hoseinie et al. ۲۰۱۵) در شکل ۱۰ نیز می‌توان نمودار هزینه بر اساس فواصل مختلف زمانی را مشاهده نمود. در سال ۲۰۲۰ بصیری و همکاران به بررسی و تحلیل خرابی و هزینه‌های آن در دستگاه شاول پرداختند و پس از تحلیل خود برای تأمین سطح مناسبی از قابلیت اطمینان به شناسایی زیرسیستم‌ها بااهمیت در شاول پرداختند و بیان کردند که کدامیک از

می‌توان چنین جمع‌بندی نمود که مطالعات اولیه بیشتر بر استراتژی‌های تعمیر و نگهداری اصلاحی و پیش‌گیرانه باهدف افزایش زمان‌های دسترسی متمرکز بوده‌اند؛ اما در گذر زمان روش‌های جدید با اهداف جدیدی به فرهنگ تعمیر و نگهداری اضافه شده‌اند که به شکل کلی، اهداف برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را به سمت سه ذیل سوق داده‌اند:

- افزایش قابلیت اطمینان
- افزایش قابلیت دسترسی
- کاهش هزینه‌ها

همانگونه که مطرح شد در گذشته تعمیر و نگهداری بر اساس قابلیت اطمینان صورت می‌گرفته است که در گذر زمان مبانی مدل‌سازی هزینه‌ای نیز به آن وارد شده است و از آنجایی که هدف از معدن کاری کسب سود است، عملاً می‌توان مدل‌سازی هزینه‌ای و تأثیر دادن هزینه‌ها در فرهنگ تعمیر و نگهداری را نگاهی جامع‌تر به فرهنگ تعمیرات دانست. همچنین استراتژی‌های توسعه یافته‌ای نیز شامل موارد ذیل به فرهنگ تعمیرات و نگهداری ماشین‌آلات معدنی افزوده شده‌اند که البته همچنان عمومی و فراگیر نیستند:

- تعمیر و نگهداری واکنشی
- تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه
- تعمیر و نگهداری پیش‌کنشی
- تعمیر و نگهداری الکترونیکی (براساس پایش برخط و وضعیت لحظه‌ای و واکنش آنی)

۶- سه‌هم هزینه‌های تعمیر و نگهداری در هزینه‌های عملیاتی ماشین‌آلات معدنی

شناخت هزینه در صنعت معدن به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه عملیاتی و عدم قطعیت‌های عملیاتی همواره به‌عنوان چالشی مهم در طول اجرای پروژه مطرح بوده است. هزینه ماشین‌آلات نیز به‌عنوان اصلی‌ترین بخش هزینه همواره مورد توجه و مطالعه بوده است. تحلیل ساختار هزینه عملیاتی معدن و ماشین‌آلات معدنی کمک بزرگی به مدیران پروژه در طراحی پروژه، مدیریت عملیاتی و انتخاب ماشین‌آلات و تجهیزات می‌کند. هزینه عملیاتی ماشین‌آلات متأثر از نوع ماشین‌آلات، مشخصه‌های فنی و شرایط عملیاتی آنها است. تعیین دامنه تغییرات هزینه‌های عملیاتی ماشین‌آلات و تأثیر این تغییرات بر ساختار کلی هزینه‌ها نقش بسزایی در خصوص انتخاب و بهینه‌سازی ناوگان دارد. هدف

اقتصادی	al.	اقتصادی برای ماشین‌های حفاری		
چارچوب بهبود دسترسی تجهیزات	Sneve	تحلیل RAM و داده‌کاوی در معدن	2015	11
تحلیل خرابی و هزینه	Hoseinie et al.	نت پیش‌گیرانه بهینه برای شیرر پاش آب	2015	12
ارائه مدل سری زمانی قابلیت اطمینان	Peng & Vayenas	تحلیل نت بالابر معدن با الگوریتم ژنتیک	2015	13
ارائه برنامه نت در زمان واقعی	Fan and Fan	تحلیل نت و پیش‌بینی خرابی با مدل‌های سری زمانی	2015	14
ارائه زمان مناسب تعویض قطعات	Demirel and Gölbaşı	تعویض پیش‌گیرانه دراکلین بر اساس قابلیت اطمینان	2016	15
تحلیل هزینه فرصت و مصرف انرژی	Peralta et al.	تأثیر قابلیت اطمینان بر مصرف انرژی در معدنکاری سبز	2016	16
ارائه روش برای پیش‌بینی قابلیت دسترسی	Silva et al.	پیش‌بینی قابلیت دسترسی تجهیزات معدنی	2016	17
تحلیل خرابی و تعمیر دستگاه	Rahimdel et al.	آنالیز RAM ماشین حفاری	2016	18
مدل‌سازی معیارهای فنی نت	Gerike et al.	توسعه سیستم نت پیش‌گیرانه برای نوار نقاله	2017	19
ارائه الگوریتم زمان‌بندی بازرسی	Gölbaşı and Demirel	بهینه‌سازی هزینه با الگوریتم نرم‌افزاری	2017	20
بررسی عمر ماشین و کاهش هزینه‌ها	Iskandar and Husniah	بهینه‌سازی نت پیش‌گیرانه در قراردادهای	2017	21
بهبود قابلیت دسترسی	Palmer et al.	برنامه‌ریزی نت هفتگی با الگوریتم ژنتیک و MIL	2017	22
تحلیل هزینه و زمان نت	Nouri Qarahasanlou et al.	توسعه مدل PRM برای تحلیل نت وابسته به شرایط محیطی	2017	23
پیش‌بینی خرابی و بهبود عملکرد	Castilla et al.	نت پیش‌گیرانه ماشین‌آلات معدنی با آنالیز ارتعاشی	2018	24
هشدار خرابی با سیگنال اجزا	Kahraman	تحلیل نت ماشین‌آلات معدنی با تحلیل عددی	2018	25
پایش وضعیت و پیش‌بینی خرابی	Kalra et al.	مدیریت سیستم نت مبتنی بر وضعیت	2018	26
تحلیل الگوهای توالی نت فعال	Reziz et al.	پیش‌بینی فعالیت‌های نت با دیتا ماینینگ	2018	27
ارائه زمان‌بندی نت با توجه به تولید	Alta et al.	نت مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی	2020	28
تحلیل داده‌های تاریخی و رفتاری	Basiri et al.	ارزیابی ریسک و قابلیت اطمینان شاول کابلی	2020	29

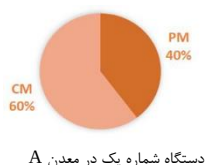
با توجه به نتایج مرور تحقیقات جهانی و موارد مطرح شده فوق،

نسبت هزینه آنها توجه ویژه شود. تعمیرات و نگهداری پیش گیرانه به عنوان یکی از مهم ترین استراتژی های حفظ توان تولید ماشین آلات و کاهش نرخ خرابی، همواره مدنظر متخصصان تعمیر و نگهداری در تمامی صنایع بوده است. در معدنکاری نیز نسبت تعمیر و نگهداری پیش گیرانه به تعمیرات اصلاحی به عنوان یک شاخص مدیریتی و فرهنگی مناسب برای ارزیابی سطح و کلاس مدیریت ناوگانهای معدنی به شمار می آید. هر چه این نسبت بالاتر باشد، نشان دهنده توسعه یافتگی و پیشرفته بودن نظام مدیریت ناوگان در هر شرکت معدنی است. در بررسی صنایع معدنی ایالات متحده آمریکا، ۴۷ درصد از کل تمرکز تعمیرات و نگهداری از استراتژی پیش گیرانه و ۳۵ درصد از نظام تعمیرات و نگهداری پیش بینانه پیروی می کنند و فقط ۱۸ درصد از تعمیرات، سهم

تعمیرات اصلاحی شده است. (Wireman ۲۰۰۴)

بررسی برخی از گزارش های منتشر شده در سوئد به عنوان یکی از قطب های اصلی توسعه علم تعمیرات و نگهداری ماشین آلات معدنی در جهان، نشان می دهد که در معدن آیتیک سوئد که از پربازده ترین و پیشرفته ترین معادن روباز دنیا محسوب است، به طور جدی روی تعمیرات و نگهداری پیش گیرانه تمرکز شده است. بر اساس بررسی حسن بن نائم و همکاران در معدن آیتیک، ۶۹ درصد از کل تعمیرات ناوگان شاولها را تعمیرات و نگهداری پیش گیرانه شامل شده و فقط ۳۱ درصد تعمیرات اصلاحی گزارش شده است. (Bin Naeem 2012).

ثانبرگ و همکاران در دو معدن زیرزمینی در کشور سوئد، تمام دستورات تعمیرات را در خصوص ماشین آلات حفاری ثبت و مطالعه کردند. در این مطالعه میدانی، مقایسه ای بین استراتژی های تعمیرات دو معدن نیز انجام شده است. داده های معدن A در طول ۱/۵ سال و داده های معدن B به طول ۶ سال مطالعه شده است. مطالعات تعمیرگاهی معدن A نشان داد که فرهنگ پایبندی به استراتژی تعمیرات و نگهداری پیش گیرانه، بیش از معدن B است. شکل ۱۲ نتایج این مطالعه را نشان می دهد. (Thunberg ۲۰۱۶)



دستگاه شماره یک در معدن A



دستگاه شماره دو در معدن A

از این بخش از گزارش، بررسی چگونگی تغییرات سهم اجزای هزینه عملیاتی نسبت به تغییرات مشخصه های فنی و محرک های هزینه برخی از ماشین آلات معادن روباز به کمک مطالعات تطبیقی است. به عبارتی شنا سایی عوامل و مشخصه های فنی مؤثر بر هزینه عملیاتی ماشین آلات معدنی، تعیین میزان تأثیر عوامل و مشخصه های فنی بر هزینه عملیاتی، شنا سایی ساختار هزینه عملیاتی ماشین آلات معدنی نسبت به تغییر مشخصه های فنی ماشین آلات و بالاخره سهم هزینه تعمیر و نگهداری از هزینه عملیاتی ماشین مدنظر است.

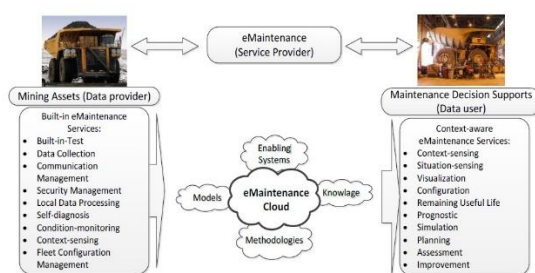
بدین منظور از داده های گردآوری شده توسط موسسه اینفوماین که به صورت سالانه منتشر می شود استفاده شده است. داده های هزینه سرمایه ای بر حسب دلار و هزینه عملیاتی بر حسب دلار در ساعت است. پس از جمع آوری و دسته بندی داده ها، قیمت های پایه مورد استفاده در تخمین ها (قیمت واحد سوخت، برق، روانکارها، ستمزد، کار شنا سان تعمیر و نگهداری و ...) بررسی و متعاقباً مشخصه های فنی و محرک های هزینه ماشین آلات منتخب شناسایی و در ادامه سهم نسبی اجزای هزینه عملیاتی تعیین می شود. در نهایت، مجموعه ای از توابع هزینه برای تخمین هزینه سرمایه ای و اجزای هزینه عملیاتی به ویژه هزینه تعمیر و نگهداری ماشین آلات ارائه خواهد شد. ساختار کلی داده ها بر اساس هزینه عملیاتی و هزینه سرمایه ای است. هزینه عملیاتی در قالب اقلام زیر تقسیم شده است:

- هزینه تعمیر و نگهداری (قطعات و دستمزد کارکنان تعمیرکار)
- هزینه تعمیر اساسی (قطعات و دستمزد کارکنان تعمیرکار)
- هزینه انرژی
- هزینه روانکارها
- هزینه لاستیک
- هزینه قطعات مصرفی

اطلاعات هزینه ای مبتنی بر فرض قیمت های پایه زیر هستند:

- دستمزد کارکنان تعمیرات: ۳۸ دلار بر ساعت
 - قیمت سوخت دیزل: ۰/۸۴ دلار بر لیتر
 - قیمت روان کننده: ۳/۳۲ دلار بر لیتر
 - قیمت الکتریسیته: ۰/۰۷۶ دلار بر کیلووات ساعت
- در بحث هزینه های تعمیر و نگهداری، باید به نوع این تعمیرات و

داده ها، با سرعت زیاد، حجم زیاد و تنوع زیاد در معادن تولید و بدون استفاده ذخیره می. شوند چالشهای اصلی دادههای بزرگ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق اعلام شرکت ریوتینتو به عنوان یکی از بزرگترین شرکتهای معدنی دنیا ناوگان کامیونهای آن شرکت روزانه پنج ترابایت داده تعمیر و نگهداری تولید میکنند (Hoseinie et al. ۲۰۱۷) که همین موضوع تبدیل به یک چالش برای این شرکت گردیده است.



شکل ۱۳- ساختار کلی یک پلتفرم تعمیرات هوشمند (Hoseinie et al., ۲۰۱۵)

در کنار مزایای بیشمار این سطح از فناوری تعمیرات متأسفانه معادن پیشرفته جهان در استفاده از این فناوری دچار مشکل جدیدی شده‌اند که برای برون رفت از آن محققان زیادی در سراسر جهان مشغول مطالعه تحقیق و طراحی هستند این مشکل عبارت از تولید حجم بسیار زیادی از داده هاست که از طریق این سامانه جمع آوری و ذخیره می‌شوند. این داده ها به معنای واقعی "داده بزرگ" یا "Big Data" هستند و طبق تعریف این نوع داده ها، با سرعت زیاد، حجم زیاد و تنوع زیاد در معادن تولید و بدون استفاده ذخیره می. شوند چالشهای اصلی دادههای بزرگ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. طبق اعلام شرکت ریوتینتو به عنوان یکی از بزرگترین شرکتهای معدنی دنیا ناوگان کامیونهای آن شرکت روزانه پنج ترابایت داده تعمیر و نگهداری تولید میکنند (Hoseinie et al. ۲۰۱۷) که همین موضوع تبدیل به یک چالش برای این شرکت گردیده است.



شکل ۱۴ - چالش های مربوط به تولید داده های بزرگ در سیستمهای تعمیر و

نگهداری هوشمند Hoseinie et al., 2015



شکل ۱۲- مقایسه‌ی هزینه‌های تعمیر و نگهداری دستگاههای حفاری در دو معدن A و B در کشور سوئد (Thunberg ۲۰۱۶)

۷-تعمیر و نگهداری هوشمند

در دهه اخیر با توسعه ماشین آلات معدنی و پیچیده تر شدن ساختارهای، مکانیکی برقی و هیدرولیکی آنها و نیاز به تولید مدام باعث گردیده که نیاز به سیستم های تعمیر و نگهداری پیشرفته بیش از پیش احساس شود برای همین منظور اطلاع از سلامت دستگاه و قابلیت تولید آن یکی از دغدغه های اصلی مدیریت ناوگانهای معدنی است. تعمیر و نگهداری هوشمند یا eMaintenance یکی از پلتفرمهای حیاتی برای معدنکاری حال و آینده به شمار میرود در تعمیرات هوشمند تجهیزات به حسگرهای مختلفی مجهز شده و به صورت لحظه به لحظه شرایط عملکرد خود و میزان پارامترهای حیاتی مثل دمای آب و دمای روغن هیدرولیک را اندازه گیری کرده و از طریق سامانه های انتقال داده ی بیسیم، به مرکز داده ارسال میکند در مرکز داده کلیه دادههای جمع آوری شده پالایش و تحلیل شده و به اطلاعات با ارزشی تبدیل می.شوند این اطلاعات در ترکیب با برنامه ها و الگوریتمهای بهینه سازی منجر به تصمیم گیری منطقی در مورد زمان توقف دستگاه و انجام تعمیرات پیشگیرانه می نماید. تعمیرات هوشمند آخرین نسل از ابزارهای مدیریت ناوگان در تمامی صنایع از جمله معدنکاری به شمار میرود و تا رسیدن به مراحل رشد کامل راه بسیاری در پیش است با این حال ورود این فناوری به عرصه مدیریت ناوگان های معدنی میزان قابلیت دسترسی و بهره وری عملیات را به طور چشمگیری افزایش میدهد. ساختار کلی یک پلتفرم تعمیرات هوشمند در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.

در کنار مزایای بیشمار این سطح از فناوری تعمیرات متأسفانه معادن پیشرفته جهان در استفاده از این فناوری دچار مشکل جدیدی شده‌اند که برای برون رفت از آن محققان زیادی در سراسر جهان مشغول مطالعه تحقیق و طراحی هستند این مشکل عبارت از تولید حجم بسیار زیادی از داده هاست که از طریق این سامانه جمع آوری و ذخیره می‌شوند. این داده ها به معنای واقعی "داده بزرگ" یا "Big Data" هستند و طبق تعریف این نوع

- with an LHD vehicle." *Journal of Mining*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/528414>.
5. Peralta, S., A. P. Sasmito and M. Kumral (2016). "Reliability effect on energy consumption and greenhouse gas emissions of mining hauling fleet towards sustainable mining." *Journal of Sustainable Mining* 15(3): 85-94.
 6. Qarahasanlou, A. N., R. Khalokakaie, M. Ataei, B. J. J. o. F. A. Ghodrati and Prevention (2017). "Maintainability measure based on operating environment, a case study: Sungun copper mine." *Journal of Mining & Environment* 8(1): 56-67.
 7. Rahimdel, M. J., M. Ataei, R. Khalokakaie and S. H. J. A. o. M. S. Hoseinie (2014). "Maintenance plan for a fleet of rotary drill rigs." 59(2).
 8. Rezig, S., Z. Achour and N. Rezig (2018). "Using data mining methods for predicting sequential maintenance activities." *Applied Sciences* 8(11): 2184.
 9. Rezvanizani, SM, M.Valibeigloo, M.Asghari, J.Barabady, and U.Kumar. (2008). "Reliability centered maintenance for rolling stock: A case study in coaches' wheel sets of passenger trains of Iranian railway." In 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 516-20. IEEE.
 10. Roy, S. K., M. M. Bhattacharyya and V. N. A. Naikan (2001). "Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels." *Mining Technology* 110(3): 163-171.
 11. Silva Franco Jefferds dos, S., G. Viana Herbert Ricardo and A. Queiroz André Nasser (2016). "Availability forecast of mining equipment." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 22(4): 418-432.
 12. Smith, R., What is Lean maintenance? Elements that need to be in place for success. *Maintenance Technology*, 2004. 17(10): p. 15-21.
 13. Sneve, T. (2015). RAM analysis of mining equipment and framework for data collection, UiT The Arctic University of Norway.
 14. Thunberg, H. (2016). Reliability-based Maintenance Plan for Underground Drilling Rigs, Luleå University of Technology.
 15. Thunberg, Henrik. (2016). 'Reliability-based Maintenance Plan for Underground Drilling Rigs', Luleå University of Technology.
 16. Tomlinson, Edward C. 2011. 'The context of trust repair efforts: Exploring the role of relationship dependence and outcome severity', *Journal of Trust Research*, 1: 139-57.
 17. Vayenas, N., X. J. I. J. o. M. Wu, Reclamation and Environment (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.
 18. Wang, H, and H.Pham. (2003). 'Optimal imperfect maintenance models.' in, *Handbook of reliability engineering* (Springer).

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نگهداری و تعمیرات به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت دارایی‌های فیزیکی، نقشی حیاتی در تضمین پایداری عملکرد تجهیزات و تحقق اهداف تولید ایفا می‌کند. در صنایع معدنی که ماشین‌آلات سهم عمده‌ای در هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی دارند، طراحی و پیاده‌سازی یک نظام نگهداری کارآمد، ضرورتی انکارناپذیر است. با توجه به ماهیت سخت‌افزاری، محیط‌های عملیاتی خشن، و حساسیت زمانی فرآیندهای معدنی، اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و مبتنی بر داده در نگهداری، می‌تواند به کاهش قابل توجه توقفات ناخواسته و افزایش بهره‌وری منجر شود. بررسی تجارب جهانی و مطالعات موردی از جمله معدن آیتیک در سوئد نشان می‌دهد که تلفیق بازرسی‌های دوره‌ای، سیستم‌های پایش وضعیت برخط، و ابزارهای دیجیتال هوشمند، زمینه‌ساز کاهش چشمگیر هزینه‌های ناشی از خرابی ناگهانی و فرسایش زود هنگام ماشین‌آلات شده است. استفاده از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، یادگیری ماشین، و نرم‌افزارهای مدیریت نگهداری (CMMS) نیز امکان پیش‌بینی رفتار تجهیزات، مدیریت دقیق زنجیره تأمین قطعات یدکی، و بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات را فراهم آورده است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت به سوی هوشمندسازی فرآیندهای نگهداری در صنایع معدنی نه تنها یک انتخاب فناورانه، بلکه ضرورتی اقتصادی و راهبردی برای افزایش رقابت‌پذیری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای تاب‌آوری تولید است. بهره‌گیری از این رویکردها می‌تواند زمینه‌ساز گذار از تعمیرات واکنشی به سمت تعمیرات پیش‌بینانه و پایداری عملکرد تجهیزات در افق‌های بلندمدت باشد.

۹- منابع و مراجع

1. Barabadi, A, J.Barabady, and T.Markeset. (2011). 'Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates', *Reliability Engineering & System Safety*, 96: 210-17.
2. Xu, C. J. O. A. L. J. (2015). "Maintainability Analysis Software of Mine's Hoist System Based on Genetic Algorithms for Data Collection Periods of Three and Six Months." *Open Access Library Journal* 2(11): 1.
3. Palmer, A. W., R. Vujanic, A. J. Hill and S. J. Scheding (2017). "Weekly maintenance scheduling using exact and genetic methods." *Mining Technology* 126(4): 200-208.
4. Peng, S. and N. J. J. o. M. Vayenas (2014). "Maintainability analysis of underground mining equipment using genetic algorithms: Case studies

- automated mining machinery, 26th International Symposium On Mine Planning & Equipment Selection, 29 - 31 Aug. , Luleå University of Technology, Lulea, Sweden
34. Hoseinie, S. H., Ghodrati, B., Galar, D., 2015, Smart Maintenance Solutions for Automated Mining Machinery, 3rd International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE2015, 9-10 December, Rome, Italy.
 19. Wireman, T. (2004). Benchmarking best practices in maintenance management, Industrial Press Inc.
 20. Wireman, T. (2004). Benchmarking best practices in maintenance management (Industrial Press Inc.)
 21. Hoseinie, S. H., Ghodrati, B., Galar, D., 2015, Smart Maintenance Solutions for Automated Mining Machinery, 3rd International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE2015, 9-10 December, Rome, Italy.
 22. Hoseinie, S., A. Ahmadi, B. Ghodrati, U. J. I. J. o. R. Kumar, Quality and S. Engineering (2013). "Reliability-centered maintenance for spray jets of coal shearer machine." 20(03): 1340006.
 23. Iskandar, B. P. and H. Husniah (2017). "Optimal preventive maintenance for a two dimensional lease contract." Computers & Industrial Engineering 113: 693-703.
 24. Kahraman, A. (2018). Maintainability analysis of mining trucks with data analytics. Master of Science, University of Louisville Louisville.
 25. Kalra, V. M., T. Thakur and B. S. Pabla (2018). Condition based maintenance management system for improvement in key performance indicators of mining haul trucks-a case study. IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD).
 26. Kececioğlu, D. (2002). Reliability engineering handbook (DEStech Publications, Inc)
 27. Khoshouei, M., Bagherpour, R., Hoseinie, S. H., Ghodrati, B., 2018, A Roadmap for Lean Maintenance of Mining Machinery, International Conference Mine of the Future, Aachen University, May, Aachen, Germany.
 28. Lashgari, Ali, A.R.Sayadi. (2013). 'Statistical approach to determination of overhaul and maintenance cost of loading equipment in surface mining', International Journal of Mining Science Technology.23:46-441
 29. Nikulin, C., A. Ulloa, C. Carmona and W. Creixell (2016). "A computer-aided application for modeling and monitoring operational and maintenance information in mining trucks." Archives of Mining Sciences 61(3): 695--708.
 30. Hamstig, R. and M. Yngman (2016). Analys av underhållsprocessen för truckdäck i Aitikgruvan: Nulägesbeskrivning och RAMS-analys, Luleå University of Technology.
 31. Hauge, Bonnie S. (2002). "Optimizing intervals for inspection and failure-finding tasks." In Annual Reliability and Maintainability Symposium .Proceedings (Cat. No. 02CH37318), 14-19. IEEE.
 32. Hoseinie, S. H., B. Ghodrati, D. Galar and E. Juuso (2015). "Optimal Preventive Maintenance Planning for Water Spray System of Drum Shearer." IFAC-PapersOnLine 48(17): 166-170.
 33. Hoseinie, S. H., Ghodrati, B., Bagherpour, R., 2017, Failure mode and effect analysis (fmea) in