اثر فرسودگی جرثقیل‌ها بر تخلیه و بارگیری کالاهای فلّهٔ خشک

حسین نویدنژاد*[1]، علی صفرزاد دهکاء[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷ *نویسنده مسئول تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰

© نشریهٔ صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۸، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریهٔ صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر فرسودگی جرثقیل‌ها بر عملکرد آنها در عملیات تخلیه‌وبارگیری کالاهای فلهٔ خشک است. به این منظور، عملکرد تجهیزات در عملیات تخلیه‌وبارگیری کالا با شاخصی تحت عنوان «قابلیت اطمینان» بررسی شد. ازاین‌رو، نخست قابلیت اطمینان موردانتظار تعریف شد و سپس، قابلیت اطمینان تجهیزات بر پایهٔ شاخص‌های کلیدی عملکرد مانند فعالیت‌های نگهداری و ساعت کارکرد تجهیزات محاسبه شد و با قابلیت اطمینان موردانتظار مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفت.

روند فرسودگی به‌صورت موردی بر روی یک نوع از تجهیزات بندر، تحت عنوان جرثقیل متحرک ساحلی لیبهر ۱۴۰ تنی بررسی شد، که پرکاربردترین تجهیز در تخلیه‌وبارگیری کالاهای فلّهٔ خشک است. درنتیجه، مشخص شد که روند خرابی‌های ناشی از فرسودگی تجهیزات در دوره‌های ثابت با افزایش ساعت کارکرد تجهیزات افزایش می‌یابد و این موضوع قابلیت اطمینان تجهیزات را تحت شعاع قرار می‌دهد. در پایان، پیشنهاد شد برای تجهیزاتی که قابلیت اطمینان موردانتظار را نداشته و بر روی عملیات تخلیه‌وبارگیری تأثیر داشته‌اند، اقدامات اصلاحی لازم انجام شود.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، فرسودگی، جرثقیل، استهلاک طبیعی، تعمیر و نگهداری.

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک در طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، Rahavard2009@Yahoo.Com

۲. دانشجو کارشناسی ارشد صنایع، Safarzad@Yahoo.Com

۱- مقدمه

بنادر برای تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها و ارائهٔ خدمات مطلوب به مشتریان و صاحبان کالا در راستای رسالت سازمانی خود، به تجهیزات راهبردی مناسب و متناسب با نوع بار نیاز دارند. از ارکان اساسی بندر می‌توان به «افزایش رضایت‌مندی مشتریان»، «حداقل رساندن مدت‌زمان انتظار کشتی‌ها»، «ارتقای ایمنی» و «حفظ دارایی‌های سازمان» اشاره نمود. کاهش توان عملیاتی تجهیزات که ناشی از عدم عملکرد صحیح تجهیزات است، از موارد پنهانی به‌شمار می‌رود که می تواند در افزایش مدت‌زمان انتظار کشتی و تأخیر در امر تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها مؤثر باشد.

یکی از مواردی که عملکرد صحیح تجهیزات را تحت تأثیر قرار می‌دهد، فرسودگی تجهیزات است، که مستقیماً بر قابلیت اطمینان و درنتیجه، بر همهٔ شاخص‌های نگهداری تأثیر می‌گذارد. به‌طور خلاصه، تخلیه‌وبارگیری مطلوب و موردانتظار بنادر محقق نمی‌شود؛ مگر اینکه قابلیت اطمینان تجهیزات حفظ شود. در این مقالهمی‌خواهیم به این نکته دست یابیم که فرسودگی تجهیزات بر عملیات تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها تأثیر گذاشته است یا خیر؟ اگر تأثیر گذاشته است، این تأثیر به چه میزان بوده است و چه راهکارهایی به‌منظور بهبود آن وجود دارد؟

۱-۱- بیان مسئله

میانگین بالای کارکرد تجهیزات در بندر امام خمینی(ره) موجب شده است که عملکرد صحیح تجهیزات تحت تأثیر قرار گیرد و مشکلاتی مانند افت توان، کاهش معیار میانگین تجهیز، کاهش قابلیت اطمینان و افزایش خرابی‌ها را به همراه داشته باشد. توان و معیار میانگین تجهیز از مواردی هستند که در فرایند نگهداری به‌صورت پیوسته مورد بررسی و بازدید قرار می‌گیرند. در این راستا، اقدامات اصلاحی مرتبط برای بازگرداندن توان و معیار میانگین تجهیز به حالت کارخانه‌ای انجام می‌گیرد. اما موضوعی که بررسی روند آن در اینجا مد نظر است، این است که روند خرابی‌های تجهیز که ناشی از فرسودگی و استهلاک طبیعی تجهیز است، چگونه است؟ آیا قابلیت اطمینان و عملکرد مطلوب و پیوستهٔ تجهیز را تحت تأثیر قرار می‌دهد یا خیر؟

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

سازمان بنادر به‌منظور بهبود معیار میانگین عملیات تخلیه‌وبارگیری کالاها، جلب رضایت مشتریان خود و ارائهٔ بهینه‌ترین خدمات به آنها به‌طور پیوسته وضعیت عملکرد تجهیزات بنادر بررسی و بر مبنای نتایج حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته، تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌های کلان خود را اتخاذ می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش، ورودی سیاست‌های تصمیم‌گیری در زمینهٔ تأمین و نگهداری تجهیزات بندری می‌باشد. با انجام این پژوهش: (۱) روند فرسودگی تجهیزات از ابتدای شروع به کار آنها مشخص می‌شود، (۲) تجهیزاتی که از بهترین قابلیت اطمینان موردانتظار برخوردارند، مشخص می‌شوند، (۳) بحرانی‌ترین تجهیزات از نظر پایین بودن قابلیت اطمینان مشخص می‌شوند و (۴) راه‌هایی برای افزایش قابلیت اطمینان و بهبود وضعیت تخلیهٔ کالاها به‌دست می‌آید.

۱-۳- ادبیات پژوهش

بررسی میزان فرسودگی تجهیزات از دو جنبهٔ «هزینه‌های نگهداری» و «تأثیر فرسودگی بر عملکرد تجهیزات» حائز اهمیت می‌باشد. چیزی که این پژوهش را از پژوهش‌های دیگر متمایز می‌کند این است که در این تحقیق، اثر فرسودگی خارج از هزینه‌های نگهداری، به‌طور اختصاصی بر روی «عملکرد تجهیزات» با شاخص‌های مرتبط با حوزهٔ نگهداری بررسی و تحلیل می‌شود. از آنجا که هزینه‌های نگهداری در مقایسه با عملکرد تجهیزات برای سازمان بنادر در اولویت دوم قرار گرفته، سازمان همهٔ فرایندهای نگهداری تجهیزات خود را برون‌سپاری کرده است. در واقع، هزینهٔ مستقیمی برای نگهداری تجهیزات بر عهدهٔ سازمان بنادر نیست. آنچه برای سازمان بنادر در مسیر دستیابی به اهداف مهم است، عملکرد تجهیزات و حفظ قابلیت اطمینان آنها می‌باشد.

بندر امام خمینی(ره) به‌عنوان بندر اصلی غلات، عموماً به‌منظور تخلیه‌وبارگیری انواع مواد فلّهٔ خشک دانه‌ای، از انواع تجهیزات آنلودرهای بادی و مکانیکی، زنجیر و کانوایر انتقال مواد به کندوهای سیلو و نیز انواع جرثقیل‌های متحرک ساحلیِ مجهز به گراب‌های با ظرفیت بالا استفاده می‌کند. اما بیشترین سهم تخلیهٔ غله بر عهدهٔ هشت دستگاه جرثقیل متحرک ساحلی لیبهر ۱۴۰ تنی است. این موضوع ما را برآن داشت که بررسی وضعیت عملکرد این نوع تجهیز را که سهم زیادی در تخلیه و بارگیری، به‌ویژه بار فلّه دارد، بررسی کنیم.

۱-۳-۱- تعاریف

قابلیت اطمینان: توانایی تجهیز برای اجرای کارکرد موردانتظار، تحت شرایط مدنظر و در محدودهٔ زمانی مشخص را قابلیت اطمینان می‌گویند (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۲).

کنترل قابلیت اطمینان: به معنای کنترل آماده‌به‌کار بودن، توقف‌ها یا خارج از سرویس بودن، نرم نامی و عملیاتی است.

خرابی: به مفهوم پایان توانایی تجهیز برای ارائهٔ عملکرد موردانتظار می‌باشد (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۲). خرابی‌ها یا تجهیز را از کار می‌اندازند و منجر به توقف تجهیز می‌شوند (خرابی اضطراری)، یا عملکرد تجهیز را مختل می‌کنند، اما تجهیز را متوقف نمی‌کنند. شایان ذکر است که همهٔ بازدیدها و سرویس‌های تجهیزات در زمان بیکاری تجهیز انجام می‌شوند و به توقف تجهیز یا ایجاد خلل در کارکرد تجهیز منجر نمی‌گردند.

نگهداری: ترکیب همهٔ اقدامات فنی، اجرایی و مدیریتی در طی چرخهٔ عمر تجهیز که هدفش نگهداری تجهیز یا بازیابی آن به وضعیتی است که بتواند عملکردی مطابق انتظار داشته باشد (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۲).

خرابی به واسطهٔ فرسودگی: نوعی خرابی که احتمال وقوع آن با افزایش مدت‌زمان کارکرد یا تعداد عملیات تجهیز و تنش‌ها افزایش می‌یابد (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۲). به عبارت دیگر، فرسودگی تجهیز براساس خرابی‌هایی که ناشی از کارکرد تجهیز هستند، بررسی خواهند شد. خرابی‌هایی که علت وقوع آنها استهلاک طبیعی است، در این دسته قرار می‌گیرند.

۱-٤- پیشینهٔ تحقیق

متغیر اصلی در بررسی عملکرد تجهیزات مدت کارکرد آنها است، که به واسطهٔ آن، میزان فرسودگی و شاخص‌های کلیدی عملکرد تجهیزات تغییر می‌کند و قابلیت اطمینان تحت شعاع قرار می‌گیرد. بر اساس پژوهش‌های صورت‌گرفته، برای حل چنین مسائلی روش‌های بسیاری مانند پیشنهاد یک الگوریتم، روش تحلیل رگرسیون خرابی، هزینهٔ چرخهٔ عمر و الگوریتم ژنتیکی وجود دارد.

مرادخانی (۱۳۹۳)، مطالعهٔ خود در زمینهٔ مدل‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات شبکهٔ توزیع را مبتنی بر سوابق و اتفاقات انجام داده است. در این مطالعه، به دلیل عدم‌دسترسی به نرخ خرابی‌ها، الگوریتمی برای شبیه‌سازی زمان خرابی‌ها پیشنهاد شد و براساس آن، قابلیت برنامه‌ریزی مبتنی بر مخاطره و قابلیت اطمینان نشان داده شد.

خضری‌زاده (۱۳۹۰)، در مطالعهٔ خود روشی برای بررسی، کنترل و بهبود وضعیت یک سامانهٔ تولید برق ارائه کرد، که در نیروگاه یزد اجرا شده است. در فرایند این پژوهش، در ابتدا خروجی‌های اضطراری، استخراج و دلایل وقوع آنها به سه دستهٔ نیروی انسانی، فرسودگی، عوامل محیطی طبقه‌بندی شد. سپس، میزان تأثیر سیاست‌های متفاوت مدیریتیِ این سه عامل بر کارایی و اثربخشی سامانه پیش‌بینی شد.

یوسفی و همکاران (۱۳۹۰)، در مطالعهٔ خود به بهینه‌سازی مدت‌زمان جایگزینی و تعویض تجهیزات با استفاده از هزینهٔ چرخهٔ عمر پرداخته‌اند. در این پژوهش مشخص شده است که بسیاری از هزینه‌ها، مربوط به دوران بهره‌برداری و بخش اعظم آن نیز به دلیل خرابی‌هایی است که در طول این دوره رخ می‌دهد. در نهایت، در این پژوهش عمر مفید تجهیز در طول چرخهٔ عمر آن مشخص شده است.

ونت (۲۰۱۷)، در زمینهٔ چرخهٔ عمر جرثقیل‌های ساحلی، به‌صورت موردی در چین بررسی‌هایی انجام داده است. در این پژوهش، چرخهٔ عمر جرثقیل ساحلی تا مرحلهٔ اسقاط محاسبه و نشان داده شده است که اثرات مخرب زیست‌محیطی و هزینهٔ چرخهٔ عمر مربوط به زمان بهره‌برداری نسبتاً بالا می‌باشد.

شین (۲۰۱۵)، در مطالعهٔ خود در پی تعیین راهبرد مناسب برای بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات آماده‌به‌کار با استفاده از مدل وابسته به سن، دریافت که براساس اطلاعات مربوط به فرسودگی تجهیز مانند فعالیت‌های نگهداری، تعداد عملیات و ساعت کارکرد تجهیزات می‌توان دو مدل بازدید برخط و بازدید تداخلی (هم‌پوشان) را برای تجهیزات ارائه داد.

کنسیو (۲۰۱۱)، در مطالعهٔ خود در زمینهٔ بهینه‌سازی بازهٔ زمانی بازدید تجهیزات فرسوده براساس الگوریتم ژنتیک، بازهٔ زمانی بازدیدهای دوره‌ای تجهیزات آماده‌به‌کار را با پارامترهای نامشخص پیری معین می‌کند.

با توجه به پیشینهٔ پژوهش، بر آن شدیم میزان فرسودگی تجهیزات را بر اساس شاخص‌های نگهداری بررسی و محاسبه کنیم. ازاین‌رو، از روش تحلیل رگرسیون خرابی برحسب کارکرد استفاده شد و مشخص گردید که ساعت کارکرد تجهیزات با نرخ خرابی نسبت مستقیم و با معیار میانگین عملیاتی تجهیزات رابطهٔ معکوس دارد؛ به گونه‌ای که با بالا رفتن ساعت کارکرد آنها، معیار میانگین عملیاتی کاهش می‌یابد.

۲- روش تحقیق

برای بررسی اثر فرسودگی تجهیزات، در ابتدا باید روند فرسودگی تجهیزات مشخص شود. ازاین‌رو، باید خرابی تجهیزات استخراج و علت وقوع آنها شناسایی گردد. به این منظور، هفت علت خرابی تعریف شدند و همهٔ خرابی‌های تجهیزات براساس این هفت علت دسته‌بندی گردیدند. سپس، خرابی‌هایی که ناشی از استهلاک طبیعی تجهیزات بوده‌اند، استخراج شدند.

برای بررسی فرسودگی، از دو مدل استفاده می‌شود. مدل اول، مدت‌زمان صرف‌شده برای تعمیراتِ ناشی از استهلاک طبیعی است که منجر به خارج شدن تجهیز از سرویس شده است. در مدل دوم، تعداد خرابی‌های ناشی از استهلاک طبیعی بررسی می‌شود. در این دو مدل، وضعیت تجهیز در دوره‌های برابر کارکردی بررسی و با هم مقایسه می‌شوند. پس از تعیین وضعیت فرسودگی، شاخص قابلیت اطمینان به‌صورت مجزا برای هر تجهیز محاسبه می‌شود. این شاخص‌ها با سطح موردانتظار بندر امام از عملکرد تجهیزات مقایسه می‌شوند. برای بهبود تجهیزاتی که قابلیت اطمینان آنها پایین‌تر از حد انتظار است، راهکارهای اجرایی ارائه می‌شود.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

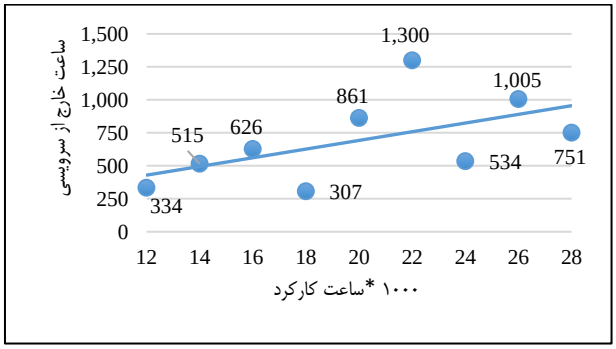
ادارهٔ نگهداری و تعمیر تجهیزات خشکی به‌عنوان متولی نگهداری تجهیزات راهبردی بندری، به واسطهٔ داشتن نرم‌افزار نگهداری و تعمیرات، سوابق دقیق تجهیزات را که شامل همهٔ دستورکارها، ساعت‌های کارکرد و مدت‌زمان خارج از سرویس بودن تجهیزات است از سال ۱۳۹۰ به‌طور کامل در اختیار دارد. همهٔ این اطلاعات به‌صورت روزانه وارد نرم‌افزار می‌شوند. سوابق ثبت‌شده در این نرم‌افزار در شش سال اخیر، مبنای محاسبات و بررسی وضعیت تجهیزات قرار گرفته‌اند.

جرثقیل‌های متحرک ساحلی لیبهر تقریباً از سال ۱۳۸۵ شروع به کار کرده‌اند، اما به دلیل عدم وجود سوابق دقیق از وضعیت تعمیرات و دستورکارهای انجام شده تا سال ۱۳۸۹، محاسبهٔ همهٔ شاخص‌ها از ابتدای سال ۱۳۹۰ انجام شده است. هر تجهیز تا این تاریخ درحدود ده‌هزار ساعت کار کرده است. از طرف دیگر، روند خرابی دو تجهیز LHM500-302 و LHM500-324 به‌ترتیب به دلیل «بروز سانحهٔ آتش‌سوزی موتور» و «قدیمی بودن طراحی و عدم همخوانی با تجهیزات دیگر» مورد تحلیل قرار نمی‌گیرد، اما برای تعیین وضعیت عملکرد و قابلیت اطمینان آنها همهٔ تجهیزات (هشت دستگاه) بررسی خواهند شد.

۳-۱- بررسی روند فرسودگی

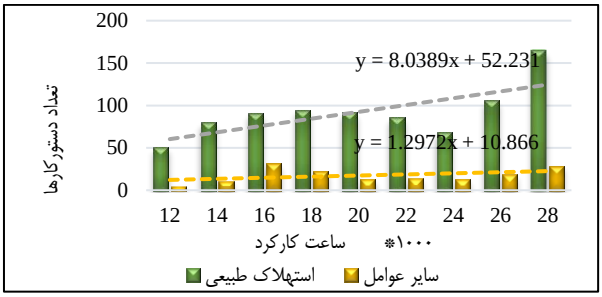
برای بررسی روند فرسودگی، همهٔ فعالیت‌های نگهداری و تعمیر مربوط به شش دستگاه که درحدود ده‌هزار تا بیست‌وهشت‌هزار ساعت کارکرد داشتند، گردآوری شد و علت وقوع آنها براساس هفت علت پیش‌بینی‌شده با عناوین «خطای کاروَر، خطای تعمیرکار، عدم کیفیت قطعات یدکی، عدم کیفیت روانکاری، استهلاک طبیعی، سانحه، عوامل محیطی» دسته‌بندی گردید.

خرابی‌هایی که علت وقوع آنها استهلاک طبیعی تعیین شده بود، با عنوان «خرابی ناشی از فرسودگی» تعریف شدند. پیش‌تر گفته شد که روند فرسودگی و خرابی‌ها با دو مدل بررسی می‌شود. در این دو مدل، میانگین تعداد دستورکارها و مدت‌زمان خارج از سرویس بودن ناشی از استهلاک طبیعی شش تجهیز مورد بررسی قرار گرفت. در مدل اول، میانگین مدت‌زمان خارج از سرویس بودن شش تجهیز که ناشی از استهلاک طبیعی بوده است، برحسب ساعت کارکرد از ده‌هزار تا بیست‌وهشت‌هزار ساعت در دوره‌های مساوی ۲۰۰۰ ساعته مشخص شد. نمودار (۱) مدت خارج از سرویس بودن تجهیز را برحسب ساعت کارکرد و رشد یا ثابت ماندن فرسودگی تجهیزات را نشان می‌دهد.



نمودار (۱): میانگین خارج از سرویسی ناشی از استهلاک طبیعی

در نمودار (۱) مشاهده می‌شود که با بالا رفتن مدت کارکرد تجهیزات، میانگین مدت خارج از سرویس بودن تجهیزات افزایش چشم‌گیری داشته است. افزایش خارج از سرویس بودن تجهیزات، موجب عدم انتفاع تجهیزات از چرخهٔ بهره‌برداری و درنتیجه، کاهش معیار میانگین عملیات تخلیه‌وبارگیری و طولانی شدن مدت زمان تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها می‌شود. در مدل دوم، تعداد دستورکارهای استهلاک طبیعی برحسب مدت کارکرد تجهیزات مطابق با نمودار (۲) بررسی شد.



نمودار (۲): میانگین تعداد خرابی‌های ناشی از استهلاک طبیعی

نمودار (۲) نشان می‌دهد که با بالا رفتن ساعت کارکرد تجهیزات، میانگین تعداد خرابی‌های ناشی از استهلاک طبیعی رو به افزایش است. این نکته فرسودگی این شش تجهیز را نشان می‌دهد. این مشکل سبب تأمین منابع بیشتر و بالا رفتن حجم کار نگهداری و تعمیر تجهیزات می‌شود.

در دسته‌بندی فعالیت‌ها و بررسی روند آنها در دوره‌های کارکردی ثابت، تعداد دستورکارهای ناشی از استهلاک طبیعی تجهیزات نسبت به تعداد دستورکارهای ناشی از علت‌های دیگرِ خرابی به شرح نمودار (۲) است. از این نمودار مشخص می‌شود که استهلاک طبیعی نسبت به مجموع عوامل دیگر به شدت درحال افزایش است و عوامل دیگر تأثیرگذار بر خارج از سرویس بودن و خرابی تقریباً روند ثابتی دارند. ازاین‌رو، تحت کنترل قرار دادنِ سایر عوامل، تأثیر چشمگیری بر کاهش خرابی‌ها ندارد و تقریباً در هر دوره ثابت هستند. عامل مهمی که به افزایش خراب یا خارج از سرویس بودن تجهیزات منجر می‌گردد، وجود فرسودگی در تجهیزات و روبه‌رشد بودن روند آنها است.

۳-۲- روابط حاکم بر مسئله

قابلیت اطمینان شاخص‌های زیادی دارد، که در اینجا دو شاخص کاربردی آن، با عنوان «میانگین مدت‌زمان کار تا خرابی» و «قابلیت دسترسی به بهره‌برداری» تجهیز تعریف می‌گردد.

MTTF[۳]: شاخص میانگین مدت‌زمان کار تا خرابی، متوسط مدت‌زمان کارکرد تجهیزات بدون توقف در حین عملیات و بهره‌برداری را محاسبه می‌کند؛ که مطابق با استاندارد ISO14224:2016 به این شرح است:

$$MTTF = \frac{\tau}{n} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، τ مدت‌زمان کارکرد تجهیز و n تعداد خرابی اضطراری است. این شاخص باید سالانه محاسبه و نتیجه با سال‌های قبل مقایسه شود. روند آن نشان‌دهندهٔ وضعیت رشد یا کاهش خرابی تجهیز در حین کارکرد در یک بازهٔ زمانی ثابت است. همچنین، می‌توان از این شاخص برای مقایسهٔ تجهیزات مشابه نیز استفاده کرد.

A_0: شاخص قابلیت دسترسی به بهره‌برداری، میزان دسترسی واحد بهره‌بردار به تجهیز را نشان می‌دهد؛ که درواقع همان میزان آماده‌به‌کار بودن تجهیز است. رابطهٔ قابلیت دسترسی به بهره‌برداری مطابق با استاندارد ISO14224:2016 به شرح زیر است:

$$A_0 = \frac{MUT}{MUT+MDT} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، MUT[۴] میانگین آماده‌به‌کار بودن تجهیز و MDT[۵] میانگین خارج از سرویس بودن (توقف‌های) تجهیز است. این رابطه از ابتدای کارکرد تجهیز به‌صورت سالانه و تجمیعی محاسبه می‌شود. از این شاخص می‌توان دو تحلیل انجام داد. می‌توان هم تجهیز و هم تیپ را با هم مقایسه کرد، و هم

---

۳. Mean Time To Failure
۴. Mean Up Time
5. Mean Down Time

می‌توان روند سالانهٔ این شاخص را برای هر تجهیز از ابتدای کارکرد آن بررسی کرد. در واقع، هرچه تجهیز فرسوده‌تر و خرابی‌هایی که منجر به توقف می‌شوند، بیشتر باشند و هرچه میزان توقف‌های تجهیز (ناشی از هر یک از علل وقوع خرابی) بیشتر باشد، میزان دسترسی به تجهیز برای انجام عملیات تخلیه‌وبارگیری کمتر می‌شود. ازاین‌رو، این شاخص به دلیل نمایش روند دسترس‌پذیری تجهیز حائز اهمیت است.

۳-۳- محاسبهٔ شاخص‌ها

میانگین مدت‌زمان کارکرد تا خرابی‌های موردانتظار: برای محاسبهٔ این شاخص و تعیین قابلیت اطمینان موردنظر، در بندر امام شرایط عملیات واقعی در نظر گرفته شد. به این صورت که برای تخلیهٔ یک کشتی هفتادهزار تنی، از دو جرثقیل متحرک ساحلی لیبهر ۱۴۰ تنی استفاده شد. برای تخلیهٔ این کشتی، هر دستگاه جرثقیل با ظرفیت اسمی تقریباً ۵۰۰ تن بر ساعت باید حداقل ۷۰ ساعت بدون خرابی اضطراری و توقف در حین عملیات کار کند، تا قابلیت اطمینان موردانتظار فراهم شود. محاسبات به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): زمان مورد انتظار برای تخلیه‌ی یک کشتی

شرایط عملیاتی جرثقیل	میزان	واحد
وزن گراب	۱۶	تن
بار گراب	۱۶	تن
مدت زمان یک سیکل	۱۱۳	ثانیه
تعداد سیکل در ساعت	۳۱	عدد
تناژ تخلیه در یک ساعت	۴۹۶	تن بر ساعت
ظرفیت کشتی	۷۰,۰۰۰	تن
تعداد جرثقیل	۲	دستگاه
سهم هر دستگاه جهت تخلیه	۳۵,۰۰۰	تن
مدت زمان مورد نیاز برای تخلیه (هر دستگاه)	۷۰	ساعت

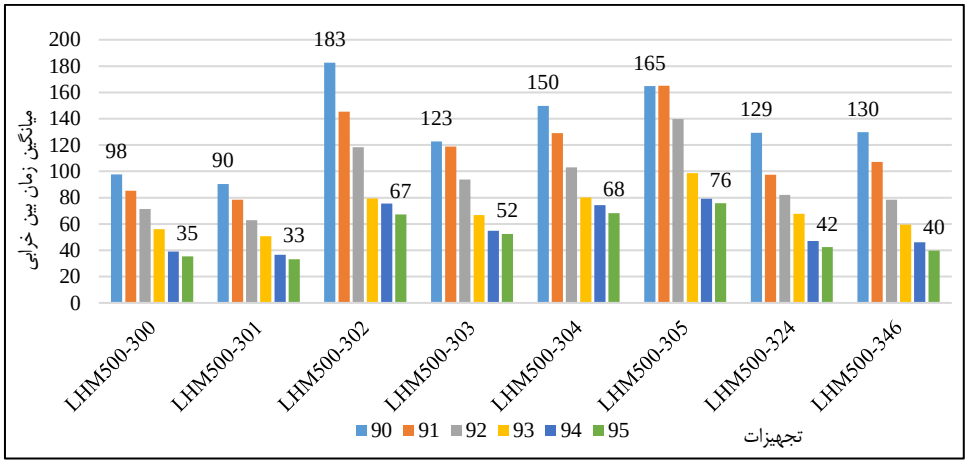
براساس این مدل، تخلیهٔ کشتی ۷۰ هزار تنی با دو دستگاه جرثقیل متحرک ساحلی لیبهرِ ۱۴۰ تنی و با ۲۰ ساعت کارکرد روزانه، درحدود سه روز و نیم به طول می‌انجامد. ازاین‌رو، هر جرثقیلی که با توان اسمی خود، (درحدود ۵۰۰ تن بر ساعت) بتواند ۷۰ ساعت بدون توقف کار کند، قابلیت اطمینان موردانتظار را به دست می‌آورد و این مدت‌زمان، بهینه‌ترین مدت‌زمان برای تخلیهٔ کشتی است. لازم به ذکر است که ظرفیت این جرثقیل ۱۴۰ تن است، اما حداکثر ظرفیتی که جرثقیل برای تخلیه‌وبارگیری فلهٔ بار استفاده می‌کند، ۵۰ تن است. این نکته نشان‌دهندهٔ این است که برخی از اجزای دستگاه با حداکثر توان خود کار نمی‌کنند. وضعیت عملکرد واقعی تجهیزات به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): میانگین زمان کارکرد جرثقیل‌ها تا خرابی به تفکیک هر دستگاه

نام تجهیز	MTBF تجهیزات در سال (بر حسب ساعت)					
	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵
LHM500-300	۹۸	۸۵	۷۱	۵۶	۳۹	۳۵
LHM500-301	۹۰	۷۸	۶۳	۵۱	۳۷	۳۳
LHM500-302	۱۸۳	۱۴۵	۱۱۸	۷۹	۷۶	۶۷
LHM500-303	۱۲۳	۱۱۹	۹۴	۶۷	۵۵	۵۲
LHM500-304	۱۵۰	۱۲۹	۱۰۳	۸۰	۷۴	۶۸
LHM500-305	۱۶۵	۱۶۵	۱۴۰	۹۹	۷۹	۷۶
LHM500-324	۱۲۹	۹۷	۸۲	۶۸	۴۷	۴۲
LHM500-346	۱۳۰	۱۰۷	۷۸	۶۰	۴۶	۴۰

در جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش مدت کارکرد کل دستگاه در هر سال، تعداد خرابی اضطراری آنها نیز افزایش یافته است. ، میانگین مدت‌زمان کار تا خرابی تجهیزات از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۱ بیش از ۷۰ ساعت بوده است و قابلیت اطمینان لازم را داشته‌اند. این بدان مفهوم است که تجهیزی که برای عملیات تخلیهٔ کشتی انتخاب شده است، در مدتی که تجهیز به کشتی تخصیص داشته است، عملیات تخلیه را بدون توقف و خرابی انجام داده است. اما در سال ۱۳۹۲ یک تجهیز، در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ پنج تجهیز، و در سال ۱۳۹۵ هفت تجهیز قابلیت اطمینان خود را از دست داده‌اند و میانگین مدت‌زمان بین دو خرابی آنها به زیر ۷۰ ساعت رسیده است. این موضوع ضمن اینکه نشان‌دهندهٔ افزایش فرسودگی و استهلاک تجهیز است، موجب کاهش معیار میانگین عملیاتی تخلیه و

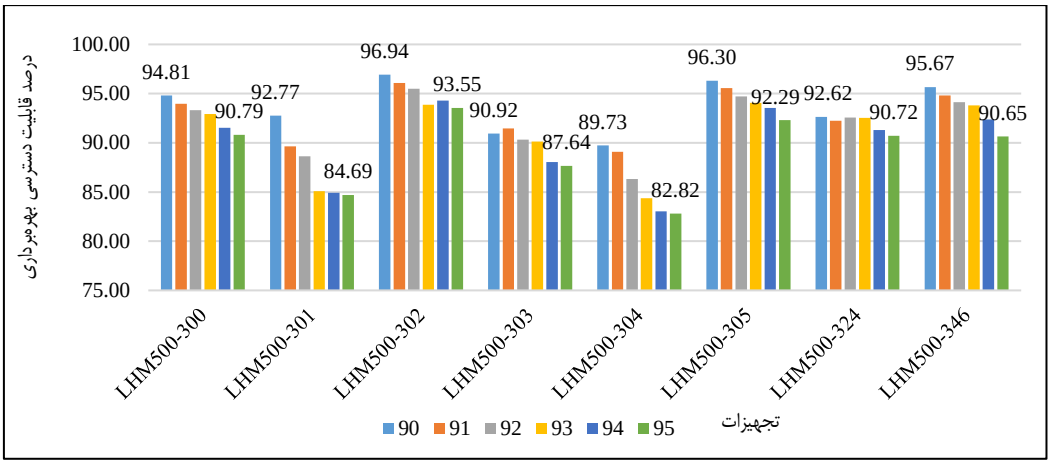
بارگیری، افزایش مدت‌زمان انتظار کشتی و تأخیر در تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها نیز می‌گردد. همچنین، از جدول (۲)، بحرانی‌ترین تجهیزات قابل شناسایی می‌باشند. تجهیزاتی که کمترین ساعت کارکرد بین دو خرابی را دارند، پایین‌ترین قابلیت اطمینان را دارند و باید اقدامات اصلاحی اساسی روی آنها انجام شود. طبق جدول (۲) دو جرثقیل متحرک ساحلی لیبهرِ LHM500-300 و LHM500-301 بدترین تجهیزات می‌باشند.



نمودار (۳): منحنی MTTF (میانگین زمان تا خرابی) به تفکیک تجهیزات

این منحنی نشان می‌دهد که در همهٔ تجهیزات، میانگین مدت‌زمان کارکرد تجهیز بین دو خرابی، سالانه رو به کاهش است. به‌عنوان مثال، جرثقیل متحرک ساحلی لیبهر LHM500-300 که در سال ۱۳۹۰، در هر ۹۸ ساعت کارکرد یک بار خراب می‌شد، در سال ۱۳۹۵ هر ۳۵ ساعت یک بار خراب می‌شود. این روند نزولی برای همهٔ تجهیزات رخ داده است. وضعیت کارکرد خرابی تجهیزات به حدی است که از میان تجهیزات، فقط جرثقیل متحرک ساحلی لیبهر LHM500-305 قابلیت اطمینان کافی برای کار بدون خرابی در مدت‌زمان موردانتظار (۷۰ ساعت) را دارد و این نشان از فرسودگی تجهیزات دیگر است. لازم به ذکر است که میزان ساعت کارکرد تجهیزات در هر سال و در مجموع سال‌ها با هم متفاوت است. بنابراین، برای تصمیم‌گیری صحیح در انتخاب بدترین و بهترین تجهیزات از نظر قابلیت اطمینان، آخرین وضعیت کارکرد تجهیزات در نظر گرفته شده است، که بخشی از اختلاف در شاخص میانگین مدت‌زمان کار تا خرابی در تجهیزات به این علت است.

قابلیت دسترسی به بهره‌برداری: یکی دیگر از شاخص‌های بررسی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی به بهره‌برداری است. این شاخص، روند در دسترس بودن تجهیزات برای بهره‌برداری طی سال‌های کارکرد را از ابتدا تاکنون نشان می‌دهد. نمودار (۴) از رابطهٔ (۲) حاصل شده است. این منحنی نشان می‌دهد که با افزایش مدت‌زمان کارکرد تجهیزات، قابلیت دسترسی به بهره‌برداری رو به کاهش است. این نکته نشان‌دهندهٔ افزایش فرسودگی در تجهیزات و درنتیجه افزایش مدت‌زمان تعمیرات و خارج از سرویس بودن‌ها است. کاهش قابلیت دسترسی به تجهیز برای عملیات تخلیه و بارگیری، موجب کاهش معیار میانگین تخلیهٔ کشتی‌ها و نارضایتی صاحبان کالا می‌شود.

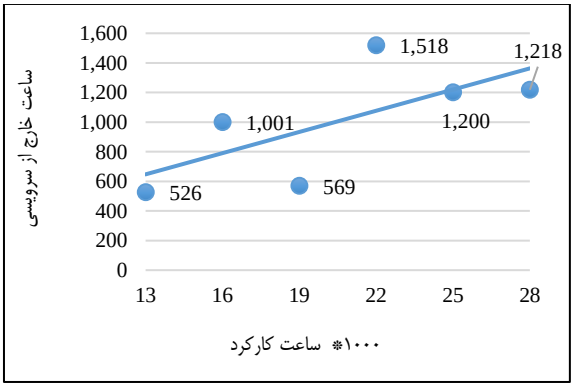


نمودار (٤): منحنی قابلیت دسترسی بهره‌برداری به تفکیک تجهیزات

در نمودار (۴) مشاهده می‌شود که شاخص دسترس‌پذیری برخی از تجهیزات در سال‌های مختلف به‌طور ناگهانی افت شدیدی داشته است. این افت ناگهانی به دلیل عدم وجود منابع داخلی، عدم تأمین قطعات یدکی، نداشتن دانش کافی در زمینهٔ طراحی و ساخت و تعمیر قطعات معیوب و نبود امکان تعمیر خرابی‌ها در مدت‌زمان کوتاه و درنتیجه، خارج شدن طولانی‌مدت تجهیزات از سرویس است. در پی ایجاد راهکارهایی برای رفع این معضل، پیشنهاد شد که قطعات فرسوده‌ای که منجر به خارج شدن طولانی‌مدت تجهیز از سرویس می‌گردند، شناسایی شوند و تعدادی از آنها تهیه و در انبارها ذخیره شوند. این امر موجب می‌شود به‌محض خرابی قطعه بر اثر فرسودگی، در کوتاه‌ترین زمان تعویض صورت گیرد. این کار باعث کنترل مدت‌زمان خارج از سرویس بودن‌ها و افزایش قابلیت دسترسی به تجهیزات است. ازاین‌رو، ایجاد انبار پای کار و پر کردن انبار از قطعاتی که در مرز فرسودگی هستند، باعث کوتاه‌شدن مدت‌زمان تأمین قطعات، و کندشدن روند کاهش قابلیت دسترسی به بهره‌برداری است. شایان ذکر است که بسیاری از خرابی‌ها با اجرای روش پایش وضعیت کنترل می‌شوند، اما برای برخی از قطعات امکان پایش وضعیت مؤثر وجود ندارد یا در طی راهبرد نگهداری و تعمیر انتخاب شده‌اند و تا مرحلهٔ خرابی می‌توانند کار کنند. ازاین‌رو، ایجاد انبار پای کار برای قطعاتی که با راهبرد "کار تا خرابی" انتخاب شده‌اند، یک روش کنترل مؤثر بر قابلیت دسترسی به بهره‌برداری است.

در شرح عملکرد تجهیزات، این‌گونه می‌توان گفت که جرثقیل‌های لیبهرِ LHM500-301 و LHM500-304 به‌ترتیب به علت «اشکال در جک استقرار» و «عدم عملکرد صحیح جعبه‌دندهٔ اصلی» منجر به افت شدید دسترس‌پذیری تجهیز شده‌اند. با ساخت و خرید جک استقرار و جعبه‌دندهٔ اصلی و پر کردن انبار پای کار، روند قابلیت دسترسی به بهره‌برداری کنترل شد و با شیب کم در حال کاهش است. از میان تجهیزات، بهترین تجهیزاتی که دارای قابلیت دسترسی موردانتظار هستند، جرثقیل‌های متحرک ساحلیِ LHM500-302 و LHM500-305 هستند که کمترین میزان خارج از سرویس بودن را داشته‌اند.

روایی و پایایی: در این مرحله، به‌منظور حصول اطمینان از عدم وابستگی روند استهلاک طبیعی به بازهٔ زمانی تعیین‌شده، مش‌بندی بازهٔ زمانی را تغییر دادیم و رفتار استهلاک طبیعی را دوباره بررسی کردیم. برای این منظور، از مدت خارج از سرویس بودن ناشی از استهلاک طبیعی استفاده شد. پیش‌تر کارکرد تجهیز در بازه‌های ۲۰۰۰ ساعته بررسی شد. در اینجا مش‌بندی را تغییر دادیم و در بازه‌های کارکردی ۳۰۰۰ ساعته بررسی کردیم، که نتیجه آن در نمودار (۵) نشان داده شده است.



نمودار(۵) :میانگین خارج از سرویسی ناشی از استهلاک طبیعی

در نمودار(۵)، روند خارج از سرویس بودن ناشی از استهلاک طبیعی مستقل از بازهٔ زمانی تعیین شده است و با افزایش کارکرد تجهیز، استهلاک طبیعی، فرسودگی و خارج از سرویس بودن‌های تجهیز رو به افزایش است. کاهش موضعی در برخی از دوره‌ها به دلیل انجام تعمیرات خوب در دوره‌های قبل از آنها است، اما مهم این است که روند رو به افزیش است.

به طور خلاصه، فرسودگی و قابلیت اطمینان در جرثقیل‌های متحرک ساحلی لیبهر که حدود ۳۰ هزار ساعت کارکرد دارند، با دو شاخص مورد ارزیابی قرار گرفت. هر دو شاخص نشان داد که بسیاری از جرثقیل‌ها دچار فرسودگی شده‌اند و قابلیت اطمینان موردانتظار بندر را ندارند و این امر موجب اختلال در عملیات تخلیه‌وبارگیری پیوستهٔ کالا و طولانی شدن مدت‌زمان تخلیه‌وبارگیری می‌گردد. شاخص اول یعنی میانگین مدت‌زمان تا خرابی، نشان داد که میانگین ساعت کارکرد بسیاری از جرثقیل‌ها تا خرابی بعدی آنها کمتر از ۷۰ ساعت است. مفهوم آن این است که جرثقیل‌ها در هنگام کار پیوسته برای تخلیهٔ یک کشتی ۷۰ هزار تنی قابلیت اطمینان کافی را ندارند و پس از کارکردی کمتر از ۷۰ ساعت خراب و از سرویس خارج می‌شوند. شاخص دوم یعنی قابلیت دسترسی به بهره‌برداری، نشان داد که آماده‌به‌کار بودن جرثقیل‌ها به‌صورت یکنواخت در حال کاهش است. این نکته به معنای افزایش مدت‌زمان خارج از سرویس بودن جرثقیل‌ها برای تعمیر خرابی‌هایی است که ناشی از استهلاک طبیعی هستند.

مفروضات این پژوهش عبارتند از: (۱) همهٔ اطلاعاتی که تاکنون گرداوری شده‌اند و در اختیار هستند، صحیح و قابل‌استناد می‌باشند، (۲) از همهٔ توقف‌های طولانی‌مدتی (بیش از سه ماه متوالی) که به دلیل عدم تأمین قطعات اصلی از طرف کارخانهٔ سازنده در زمان تحریم‌ها به وجود آمده بود، صرف‌نظر شد، (۳) عدم دسترسی به سوابق خرابی و آمارهای دقیق در پنج سال ابتدایی کارکرد تجهیزات (از سال ۸۵ تا ۸۹) موجب شد که روند خرابی تجهیزات ۱۰ تا ۲۸ هزار ساعت کارکرد مورد بررسی قرار گیرد، (۴) عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و قابل‌استناد در زمینهٔ هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، چراکه همهٔ هزینه‌های نگهداری در اختیار تأمین‌کنندگان است و (۵) به علت تغییر تأمین‌کنندهٔ نگهداری و تعمیر تجهیزات، و تغییرات ایجادشده در مدیریت سامانهٔ نگهداری و تعمیرات تأمین‌کنندهٔ جدید، اطلاعات تجهیزات در سال ۹۶ مد نظر قرار نگرفت.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، وضعیت عملیاتی تجهیزات با سطح موردانتظار از تجهیزات مقایسه، و مشخص شد که از هشت تجهیز انتخاب‌شده، تنها یک دستگاه LHM500-305 در محدودهٔ موردانتظار قرار دارد و قابلیت اطمینان بقیهٔ تجهیزات به دلیل فرسودگی، خارج از محدودهٔ موردانتظار است. این خرابی‌ها منجر به توقف‌های نابهنگام در هنگام عملیات تخلیه‌وبارگیری و درنتیجه موجب کاهش معیار میانگین عملیاتی و طولانی شدن مدت‌زمان تخلیه‌وبارگیری می‌شوند. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌گردد: (۱) تجهیزی که قابلیت اطمینان آن پایین است یا به عبارت دیگر، تجهیزی که فاصلهٔ بین دو خرابی آن کم است، اورهال تعویض زمان‌بندی شود. پیشنهاد می‌شود که دو دستگاهِ LHM500-324 و LHM500-301 به‌ترتیب به علت «قدیمی بودن سامانه با هدف به‌روزرسانی» و «پایین بودن هر دو شاخص میانگین مدت‌زمان تا خرابی و شاخص قابلیت دسترسی به بهره‌برداری» اورهال شوند، (۲) تا زمان انجام اورهال، تعمیر و نگهداری بقیهٔ تجهیزات به‌صورت هم‌زمان انجام شوند. به عبارت دیگر، دستورکارهای اصلاحی هم‌زمان بر روی یک تجهیز انجام شوند، تا مدت‌زمان خارج از سرویس بودن تجهیزات کم شود و شاخص قابلیت دسترسی به بهره‌برداری و قابلیت اطمینان آنها افزایش یابد، (۳) روش PMO[۶] روی همهٔ دستورکارهای سرویس زمان‌بندی شود و بازدیدها مورد بازنگری قرار گیرند. این موضوع موجب هم‌زمانی سرویس‌ها و بازدیدها می‌گردد، (۴) با توجه به فرسودگی برخی از قطعات نصب‌شده روی تجهیزات، قطعاتی که دسترسی و تأمین آنها زمان‌بر است، باید تهیه و در انبار نگهداری شوند. تأمین قطعات یدکی موردنیاز و حفظ حداقل موجودی انبار می‌تواند موجب کوتاه شدن مدت‌زمان انتظار برای دسترسی به قطعات، کاهش خارج از سرویس بودن تجهیزات و در نتیجه افزایش قابلیت دسترسی بهره‌بردار به تجهیزات شود و (۵) برگزاری آزمون‌های کاروَری و تعیین سطح دانش کاروَران در بهره‌برداری صحیح از تجهیزات و برگزاری دوره‌های آموزشی برای کاروَرانی که به بازنگری در نحوهٔ بهره‌برداری از تجهیز نیاز دارند. همچنین، پیشنهاد می‌شود عوامل دیگری که بر کاهش معیار میانگین عملیاتی تجهیزات تأثیرگذار هستند، شناسایی شوند و میزان تأثیر هر یک بر عملیات تخلیه‌وبارگیری تعیین و برای عواملی که بیشترین سهم را در کاهش معیار میانگین تخلیه‌وبارگیری کالاها دارند، راهکارهای اجرایی ارائه گردد.

۶. PMO: Plant Maintenance Optimization

مراجع

۱. اکبری، احسان. (۱۳۹۲). ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع و فوق‌توزیع با حضور تولیدات پراکنده. هشتمین کنفرانس مهندسی برق و توسعهٔ پایدار با محوریت دستاوردهای نوین در مهندسی برق ایران.

۲. خضری‌زاده، محمدرضا. (۱۳۹۰). ارائهٔ رویکردی جهت مطالعه و تعیین نرخ خروجی‌های اضطراری و فرسودگی تجهیزات نیروگاه. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه یزد.

۳. رمضانی، سعید؛ زواشکیانی، علی؛ روحی‌پور، اسماعیل. (۱۳۹۲). واژگان و اصطلاحات علمی نگهداری و تعمیرات، تهران. انتشارات مرکز مطالعات پژوهشی لجستیکی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، چاپ اول، ص ۴۲.

۴. مرادخانی، امین. (۱۳۹۳). مدل‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات شبکهٔ توزیع مبتنی بر سوابق و اتفاقات. رسالهٔ دکتری برق، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس.

۵. یوسفی، مصطفی؛ رمضانی، سعید؛ طاهری، محسن؛ شریفی، عباس. (۱۳۹۰). بهینه‌سازی زمان جایگزینی و تعویض تجهیزات با استفاده از هزینهٔ چرخهٔ عمر. مرکز مطالعات و پژوهش‌های لجستیکی دانشگاه امام حسین(ع)، شمارهٔ ۳۴، ص ۱-۱۶.

6. Wen, B., Jin, Q., Huang, H., Tandon, P., Zhu, Y. (2017). Life cycle assessment of Quayside Crane: A case study in China. Journal of Cleaner Production, 148, PP. 1-11.
7. Shin, S.M., Jeon, I.S., Kang, H.G. (2015). Surveillance test and monitoring strategy for the availability improvement of standby equipment using age-dependent model. Reliability Engineering and System Safety, 135, PP. 100-106.
8. Kancve, D., Gjorgive, B., Cepin, M. (2011). Optimization of test interval for ageing equipment: A multi-objective genetic algorithm approach. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24, PP. 397-404.
9. Bs En ISO14224:2006, Petroleum, petrochemical and natural gas industries collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. International Organization of Standardization, 1-283.