

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

هیئت تحریریه

دکتر عبدالرضا اوحدی، استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر جبار علی ذاکری، استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی رضوانی، دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سعید رمضانی، استادیار دانشگاه امام حسین (ع)

دکتر محمد ریاحی، استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدرضا فیلی زاده، دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

دکتر مهدی کرباسیان، دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دکتر آدلفو کرسپو مارکز، استاد دانشگاه سویل اسپانیا

دکتر علیرضا معینی، دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر علیرضا مسعودی، استادیار پژوهشکده مهندسی وزارت جهاد سازندگی

دکتر علی سیاح، استادیار دانشگاه قم



داوران این شماره:

دکتر علیرضا مسعودی، دکتر مهدی بهزاد، دکتر علیرضا معینی، دکتر علی سیاح، دکتر جبارعلی ذاکری، دکتر محمدعلی رضوانی، مهندس کاظم حکمت، دکتر محمدعلی صنیعی منفرد، دکتر عباس روحانی، دکتر فرشید رعایت صنعتی، دکتر عباس شریفی، دکتر سعید رمضانی، دکتر آرش شاهین، مهندس حسین سالم باغی، مهندس جاوید تقی زاده، دکتر محمدرضا فیلی زاده

تشکر و قدردانی: از کلیه محققین و اساتید محترم که با قبول زحمت، داوری مقالات این نشریه را به عهده داشته اند صمیمانه سپاس‌گزاری می گردد.

نشانی: تهران، شهرک قدس، میدان صنعت، خیابان هرمزان، خیابان پیروزان جنوبی، نبش کوچه پنجم، ساختمان اسری، طبقه همکف، انجمن نگهداری و تعمیرات ایران - کد پستی: ۱۴۶۶۴۳۶۹۱

دورنگار: ۸۸۵۷۵۴۱۵

تلفن: ۸۸۰۹۲۸۸۴، ۸۸۳۶۹۷۴۱

رایانامه: info@amej.ir

شاپا: 2322-228X



دوفصلنامه

مهندسی نگهداری و مدیریت منابع

شماره 8، اسفند ۱۴۰۲

صاحب امتیاز:

انجمن نگهداری و تعمیرات ایران



مدیر مسئول: دکتر علیرضا معینی

سردبیر: دکتر محمد ریاحی

مدیر داخلی: دکتر محمدرضا فیلی زاده

دبیر تخصصی: دکتر علی سیاح

مشاورین علمی:

دکتر مهدی احمدی نجف آبادی

دکتر سیامک اسماعیل زاده خادم

دکتر حسین حسینی تودشکی

دکتر محمدعلی رضوانی

دکتر محسن شاکری

دکتر فرهنگ هنرور

دکتر عقیل یوسفی کما

دکتر نوروز محمد نوری

دکتر میرسعید صفی زاده

فهرست مطالب

.....

صفحه	عنوان
۶	بررسی تعمیر و نگهداری خطوط راه آهن بالاستی با وجود تراورس های معلق علیرضا بنی اسدی، محسن عزیزاده نیار، جبارعلی ذاکری سردودی، سید علی مسیبی
۲۰	بررسی تاثیر پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات بر بهره وری سازمان آرمین کاکایی نژاد، مهدی عباسی، مهران سهامی، پائولا پلیدو سوارز، جکی زامورا
۳۰	اهمیت مدیریت دارایی های فیزیکی در شرکت آب منطقه ای با رویکرد نظریه بازی سینا مرادی، علیرضا بیدار، بابک نیک نیا
۴۲	زمان بندی اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در مراکز تولیدی یا خدماتی حسین شمس شمیرانی، امیر حسین شمس
۴۹	ارزیابی و پیاده سازی نقشه راه مدیریت دارایی فیزیکی به روش UPTIME (مطالعه موردی: صنایع پتروشیمی) رضا علیرضائی، سید میلاد موسوی، محمد مهدی کاظمی
۶۴	اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و ترایبولوژی احمد مهدیان پررانی، دانیال دیانی، مرتضی عباسی نژاد، محسن مقامی
۷۵	مدیریت دارایی زیرساخت های قدیمی شرکت توزیع برق - تحلیل موردی محمد اسماعیل هنرمند، سعید رمضانی، حمزه سلطانعلی
۹۱	ریشه یابی علل وقوع یک مورد حادثه ناشی از کار به روش RCA و اولویت بندی راه حل های پیشگیری از وقوع مجدد آن با استفاده از رویکرد OPA محمدصادق نظری، محمدرضا فیلی زاده
۱۲۲	انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیر و یا جایگزینی تجهیزات ابوالفضل باغشاهی، عارف خوارزمی
۱۳۲	کنترل موجودی و سفارش گذاری قطعات یدکی طی سه آنالیز همزمان ارزش مصرف (ABC) ، میزان بحرانیت (VED) و لیدتایم تامین قطعه (SDE) مطالعه موردی بر روی اقلام یدکی معاونت خدمات فنی شرکت ایران خودرو سید محمدرضا ابوالبقایی، سید مهدی دستجردی، محمد قاسمی
۱۴۳	ارائه الگویی به منظور توسعه برنامه نگهداری و تعمیرات شناورها در صنعت فراساحل (شرکت مهندسی سازه دریایی رال) رضا کتابچی
۱۵۵	مدیریت دارایی ناوگان ترانسفورماتوری مبتنی بر شاخص سلامت استخراج شده از متغیرهای کیفی روغن و گاز کروماتوگرافی رشید دهسنگی

بررسی تعمیر و نگهداری خطوط راه آهن بالاستی با وجود تراورس های معلق

علیرضا بنی اسدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، خطوط ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

محسن علیزاده نیار

دانشجوی دکتری، خطوط ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

جبار علی ذاکری سردرودی

استاد، خطوط ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

سید علی مسیبی

استادیار، خطوط ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

پدیده تراورس معلق، از جمله خرابی هایی خط راه آهن است که موجب به خطر افتادن قابلیت اطمینان و پایداری آن در راستای افقی می شود. این مقاله با مروری جامع بر مطالعات صورت گرفته، به معرفی پدیده تراورس معلق در خطوط ریلی بالاستی، دلایل وقوع آن و روش های پیشنهادی برای تعمیر و اصلاح این خرابی می پردازد. همچنین تاثیر آن بر رفتار خط به لحاظ ارتعاشات ثبت شده، مقاومت جانبی تامین شده و نشست های استاتیکی اتفاق افتاده در خط با در نظر گرفتن شرایط وجود و یا عدم وجود تراورس معلق، ترتیب و توالی آن و ... را مورد بحث و بررسی قرار می دهد. شناسایی پدیده تراورس معلق از طریق بازرسی چشمی، بررسی داده های ثبت شده ماشین اندازه گیری خط و تکنولوژی های نوین مانند تراورس های خود حسگر امکان پذیر است. با توجه به ماهیت تصادفی این پدیده توصیه می شود جهت رفع این خرابی علاوه بر استفاده دوره ای از ماشین آلات نگهداری و تعمیر تزریق بالاست، زیرکوب و پایدارساز دینامیکی اقدامات پیشگیرانه توصیه شده در مطالعات شامل استفاده از مواد ژئوسنتتیک و پلی اورتان برای تقویت بالاست، بکارگیری انواع تراورس های مخلف از لحاظ شکل و ابعاد و ... نیز در خط در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: تعمیر و نگهداری خطوط راه آهن، تراورس معلق، خطوط بالاستی، مقاومت جانبی

۱- مقدمه

حفظ عملکرد و تامین مشخصات فنی و مهندسی یک سازه مهمترین وظیفه ای است که هر سازمان مدیریت کننده یک دارایی و زیر ساخت در کشور بایستی مد نظر قرار دهد. سیستم حمل و نقل نیز با توجه به نقش توسعه دهنده و ایجاد ارتباط بین نقاط یک کشور نقش حیاتی و اثر گذاری در اقتصاد و برنامه های توسعه آن دارد. یک سیستم حمل و نقل مناسب علاوه بر فراهم آوردن امکان حمل و نقل ایمن، سریع و در حجم مناسب بایستی بتواند به لحاظ اقتصادی نیز با سایر سیستم های موجود قابل رقابت باشد. در عین حال داشتن قابلیت اعتماد، در دسترس بودن و توجه به شاخص های زیست محیطی و ... نیز با توجه به نیازهای روز جهان لازم و ضروری است. مطالعات نشان می دهد که حمل و نقل ریلی می تواند گزینه مناسب برای حمل کالا و مسافر با تامین الزامات پارامترهای ذکر شده باشد. بیشترین هزینه های زیرساخت شبکه ریلی شامل سرمایه گذاری اولیه و هزینه های نگهداری خط، سازه های مهندسی مانند پل، تونل ها، سیگنالیینگ، سیستم ارتباطی، شبکه برق رسانی و پایانه ها می شوند. هزینه های زیرساخت دارای یک جز ثابت و مستقل از سطح استفاده از زیرساخت ها و جز متغیر است که در دراز مدت به سطح ترافیک عبوری، وابسته است (World Bank, 2017). بنابراین متعادل کردن این هزینه ها بویژه هزینه های تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه ها در راستای ایجاد بهره وری در سیستم حمل

و نقل راه آهن با در نظر گرفتن مفاهیم مدیریت ارزش امری ضروری به نظر می رسد که در سال های اخیر با معرفی رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت نگهداری و ایمنی (RAMS) و هزینه های چرخه عمر (LCC) انجام می شود (Frangopol & Liu, 2019; Maulana & Gunawan, 2023; Nash & Chris, 2005).

ساخت مدل های پیش بینی رفتار خرابی خط و ارائه برنامه های نگهداری و تعمیر پیشگیرانه با چنین رویکردهایی نیازمند شناسایی خرابی های ایجاد شده در خط و دوره بازگشت آن ها هست (Falamarzi et al., 2019). در این راستا طبقه بندی خرابی خط آهن در دو سطح فیزیکی و هندسی و با در نظر گرفتن اجزای سازه ای آن شامل ریل، تراورس، سیستم اتصالات و لایه بالاست قابل انجام می شود. روش های شناسایی این خرابی ها نیز می تواند به صورت بازدید چشمی، استفاده از ماشین آلات سبک و سنگین خطی انجام شود (ذاکری سردودی، جبارعلی و رضازاده زواردهی، مهرداد، ۱۳۸۵) که با توجه به شرایط موجود و مسائل فنی و اقتصادی بهترین گزینه انتخاب خواهد شد. راهکارهای تعمیر و نگهداری خط از بعد ابزار به دو دسته غیرمکانیزه (دستی) و نگهداری مکانیزه عمدتاً با استفاده از ماشین آلات خطی (MDZ) و سرند بالاست تقسیم می شوند. نیاز به انجام چنین عملیات نگهداری و تعمیری در طول و حجم زیاد خط، در کمترین زمان مسدودی خط توجیه فنی استفاده از ماشین آلات MDZ را ممکن می سازد.

یکی از خرابی هایی که در مقطعی از خط بدلیل نشست بالاست و تغییر هندسه مسیر تحت اثر عبور مکرر ناوگان و تاثیر نیروهای دینامیکی با وقوع خردشدگی، تراکم و نشست دائمی بالاست موجب کاهش سطح تماس مناسب بین تراورس و بالاست می شود، پدیده تراورس معلق^۱ می باشد. در این خرابی تراورس از طریق سیستم پابند به ریل متصل است و امکان نشست به پیروی از لایه بالاست را ندارد و در تراز پیشین خود باقی می ماند. با وقوع این پدیده بین تراورس و بالاست یک فضای خالی ایجاد می شود و اتصال و اندرکنش بین اجزای خط که برای اطمینان از پایداری افقی آن و جلوگیری از کمانش خط نیز ضروری است کاهش می یابد. این پدیده ماهیت تصادفی دارد، از این رو می توان نواحی وقوع خرابی تراورس آویزان در خط را به عنوان یکی از نقاط بحرانی به لحاظ پایداری مسیر و مستعد کمانش دانست. برای شناسایی این پدیده از روش های بازدید چشمی، آنالیز خروجی تراز هندسی خط با ماشین آلات سبک و سنگین و تراورس های خود حسگر استفاده می شود. تعمیر و رفع خرابی این پدیده نیز با انجام اقدامات اصلاحی تزریق بالاست زیر تراورس معلق و عملیات زیرکوبی برای پر کردن فضای خالی ایجاد شده می باشد.

مطابق مطالعاتی که در مورد پایداری خط و عوامل وقوع و پیشگیری از پدیده کمانش تا کنون در ادبیات فنی مورد بررسی قرار گرفته، مقاومت جانبی تامین شده توسط اجزای خط یکی از مهمترین پارامترهایی است که بایستی مورد بررسی های بیشتر قرار گیرد. وقوع پدیده تراورس معلق و در نتیجه آن کاهش مقاومت جانبی خط می تواند با وقوع انواع خرابی های دیگر خط باعث بوجود آمدن شرایط جدید و دشواری به لحاظ حفظ شرایط ایمن و قابل بهره برداری خط گردد. بنابراین این مطالعه، از دیدگاه جامعی دلایل ایجاد و روش های شناسایی پدیده تراورس آویزان، تاثیرات آن بر مقاومت جانبی خط و معرفی روش های تعمیر و اصلاح آن را در قالب یک پژوهش اسنادی مورد بررسی قرار می دهد.

۲- خط آهن بالاستی و اجزا آن

خطوط ریلی از دیدگاه سازه ای به دو دسته بالاستی و بدون بالاست تقسیم می شود. خطوط بالاستی با توجه به تعمیر و نگهداری آسان و هزینه ساخت پایین رایج ترین نوع مسیر هستند که به طور گسترده در کشورهای مختلف در انواع راه آهن های سنگین و پرسرعت مورد استفاده قرار می گیرند (Xiao et al., 2023). خطوط بالاستی از اجزای ریل، تراورس، ادوات اتصال، بالاست، زیر بالاست و زیرسازی تشکیل می شود (Esvelde & Esvelde, 2001). سازه خط بالاستی بایستی قادر به انجام وظایف سازه ای و بهره برداری شامل انتقال بارهای اعمالی در حد تحمل لایه های پایین تر، مستهلک نمودن ارتعاشات رسیده از قطار، حفظ خاصیت ارتجاعی خط و تامین سطح هموار و ایمن برای عبور ترافیک ریلی باشد (Esvelde & Esvelde, 2001) و سید جواد میر محمد صادقی، ۱۳۹۴). با این وجود در بهره برداری از این خطوط بایستی برای چالش های متنوعی همچون تامین مقاومت جانبی و طولی خط، وقوع تغییر شکل های پلاستیک، از دست دادن خاصیت ارتجاعی، نیاز به تعمیر و نگهداری دوره ای و مداوم پاسخ مناسب ارائه شود. از این رو بایستی انتخاب

¹ unsupported sleepers

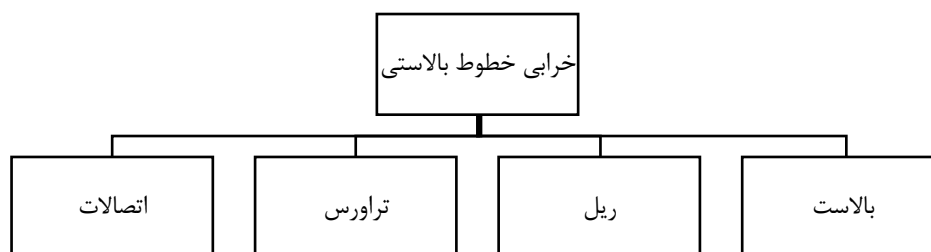
این سیستم ها برای یک مسیر ریلی با در نظر گرفتن کلیه این مزایا و معایب صورت گیرد. جدول (۱) نسبت هزینه های ساخت و دوره تعمیر و نگهداری دال خط بتنی با آسفالت و خطوط با بلوک و لایه ارتجاعی به خطوط بالاستی را نشان می دهد.

جدول ۱ - هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری خط آهن (ذاکری سردرودی، جبارعلی و رضازاده زواردهی، مهرداد، ۱۳۸۵)

*	خط با بالاست	دال خط بتنی با آسفالت	خطوط با بلوک و لایه ارتجاعی
هزینه ساخت	۱	۱/۷۳	۲/۵۵
هزینه تعمیر و نگهداری	۱	۰/۵	۰/۳

۲-۱ انواع خرابی خطوط بالاستی

مطابق شکل ۱ انواع خرابی های خطوط بالاستی را می توان براساس اجزای سازه ای ریل ، تراورس ، ادوات اتصال و بالاست تقسیم بندی کرد. مشاهدات خرابی های اتفاق افتاده در این اجزا نشان می دهد که:



شکل (۱) - خرابی خطوط بالاستی راه آهن

۱. خرابی های ریل به سه دسته شکستگی ، ترک خوردگی و صدمه دیدگی تقسیم میشوند .
۲. تراورس با توجه به جنس آن که می تواند فلزی ، چوبی یا بتنی باشد ، خرابی متفاوتی دارد از جمله
 - چوبی: عیوب طبیعی در تراورس ، خرابی ناشی از شرایط جوی ، خرابی از نوع بیولوژیکی ، تخریب نشیمنگاه ریل بر روی تراورس چوبی و ترک خوردگی و شکستگی در تراورس چوبی
 - فلزی: پوسیدگی و خوردگی ، ترک خوردگی ، تغییر شکل و گشادگردیدن سوراخهای مربوط به پابند تراورس ، فرورفتگی در محل نشیمنگاه ریل
 - بتنی: هوازگی ، خرابی ناشی از عوامل شیمیایی ، حل شدگی تراورس بتنی ، واکنش سنگدانه ها و مواد قلیایی داخل بتن تراورس ، ترک خوردگی و شکست زودرس تراورس بتنی ، ایجاد عرض خط خارج از استاندارد در تراورس بتنی
۳. از جمله خرابی های بالاست : ساییدگی و شکستگی ، خردشدگی ، نفوذ ذرات لایه های زیرسازی به داخل بالاست ، رشد گیاهان و علف های هرز ، صلب شدن بالاست و عدم وجود حالت ارتجاعی ، نفوذ آبهای زیرزمینی به داخل بالاست و دانه بندی نامناسب بالاست
۴. اتصالات: ترک خوردگی و یا بریدگی در وصله های اتصالی ، زنگ زدگی و خوردگی صفحات ، خرابی پیچ ها و مهره ها ، وجود خستگی در پیچ ها ، سایش در پابند ، زنگ زدگی یا خوردگی سطحی در پابندها ، شل شدن شولدر در تراورس های پاندرول ، زنگ زدگی فنر در سوراخ شولدر (تراورس پاندرول) ، له شدن ایزولاتورها در تراورس های پاندرول ، شکستگی شولدر در تراورس های پاندرول ، شل بودن پیچ های پابند در تراورس های وسلو ، شل بودن پیچهای پابند در تراورس های چوبی

۲-۲ راه‌های شناسایی عیوب خطوط بالاستی

معایب خط آهن به دو بخش فیزیکی و هندسی تقسیم می‌شوند و از روش‌های شناسایی این معایب می‌توان به بازدید چشمی، بازدید به واسطه استفاده از ماشین آلات سبک خطی و بازدید به واسطه استفاده از ماشین آلات سنگین خطی اشاره کرد. ابزار شناسایی سبک و دستی شامل شابلون خط، دستگاه اندازه‌گیری تراز خط، اندازه‌گیر تغییرمکان و جابه‌جایی ریل، اندازه‌گیر دستی پارامترهای هندسه خط و اندازه‌گیر تراز خط با استفاده از نقاط ثابت^۱ می‌شود. درمورد ماشین آلات سنگین نیز می‌توان به ماشین اندازه‌گیر خط اشاره کرد (ذاکری سردودی، جبارعلی و رضازاده زواردهی، مهرداد، ۱۳۸۵) علاوه بر این ابزارهای متداول شناسایی، استفاده از روش‌های ابتکاری جدید مانند؛ روش طبقه‌بندی و ارزیابی خودکار عیوب سطح خط راه آهن با استفاده از مدل سه بعدی مبتنی بر لیزر (Ye et al., 2020)، شناسایی ترک‌های خطوط ریلی با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر (Rizvi et al., 2017) و همینطور، بازرسی خودکار تراورس‌های راه آهن برای طبقه‌بندی تراورس‌ها و شناسایی نوع عیب بر اساس پردازش تصویر که نتایج امیدوارکننده‌ای اعم از دقت ۹۷ درصد برای شناسایی نوع تراورس‌ها و دقت ۹۳ درصد برای شناسایی عیوب قابل مشاهده در تراورس را شاهد هستیم و از آنجایی که سیستم خودکار خواهد بود و به مداخله دستی کمتری نیاز دارد، می‌توان از حداکثر کارایی سیستم اطمینان حاصل کرد. (Franca & Vassallo, 2021). برخی از عوامل مانند وضعیت پایندها، ریل و تراورس‌ها را می‌توان با بررسی ویژگی‌های قابل مشاهده از سطح راه آهن اندازه‌گیری کرد اما عواملی مانند وضعیت بالاست نیاز به اندازه‌گیری‌های زیر سطحی دارند پس برای طبقه‌بندی خودکار راه آهن باید اندازه‌گیری‌های سطحی و زیرسطحی را ترکیب کرد که برای به دست آوردن اندازه‌گیری سطح از یک سیستم دید نور لیزری و اندازه‌گیری‌های زیرسطحی از رادار نفوذی زمین (GPR) استفاده می‌شود (Kantor et al., 2001).

۲-۳ راه‌های تعمیر و نگهداری خطوط بالاستی

راهکارهای تعمیر و نگهداری بالاست از لحاظ تکنولوژی به کار رفته به دو دسته غیرمکانیزه (دستی) و مکانیزه با استفاده از ماشین آلات خطی MDZ تقسیم می‌شوند. روش دستی قدیمی‌ترین روش نگهداری و تعمیر بوده که از ابتدای ظهور حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار گرفته است در این روش گروه‌های کارگری زیر نظر یک مباشر با ابزار ساده‌ای نظیر بیل، کلنگ، جک، دیلم، آچارهای گوناگون و واگن فعالیت می‌کنند. با این حال به دلیل بهره‌وری و کیفیت پایین کار و قرار گرفتن نیروی کار در معرض نویز و ارتعاشات نامطلوب امروزه در حال منسوخ شدن و جایگزینی با روش‌های مکانیزه است (SULKIFLI & MOHAMAD ARIF BIN, 2023). در روش مکانیزه عملیات تعمیر و نگهداری عیوب هندسی خط توسط قطار MDZ شامل ماشین آلات خطی زیرکوب، پایدارساز و خط‌آرا انجام می‌گردد. ماشین زیرکوب در مواردی مانند ساخت خطوط جدید، نگهداری، بهسازی و بازسازی استفاده می‌شود و بر اساس تعداد کلنگ به چهار دسته ۸، ۱۶، ۳۲ و ۴۸ کلنگه تقسیم می‌شود. فرایند اصلاح خرابی‌ها با توجه به طول وقوع آن در خط با روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. بر این اساس اگر طول خرابی خط به اندازه طول ماشین باشد (۲۰ متر) اصلاح به راحتی صورت می‌گیرد و در خرابی‌های با طول بین ۲۰ تا ۲۰۰ متر فرایند اصلاح هندسه مسیر با دوربین زیرکوب و نهایتاً خرابی با طول بیش از ۲۰۰ متر به کمک لیزر خط اصلاح می‌شود. فرایند زیرکوبی با وجود اصلاح خرابی‌های مربوط به لایه بالاست به دلیل کاهش تراکم آن منجر به از دست رفتن درصد زیادی از مقاومت جانبی خط می‌شود و آن را مستعد وقوع کمانش می‌کند. بنابراین جهت رفع این نگرانی لازم است در ابتدای بهره‌برداری از خط با عبور حجم معینی از قطارها با در نظر گرفتن شرایط تقلیل سرعت دانه‌های بالاست به تراکم مورد نیاز برسند و یا با استفاده از ماشین خاصی به نام پایدارساز دینامیکی درصدی از تراکم و مقاومت جانبی از دست رفته تامین گردد. این ماشین با داشتن بار محوری قائم ۲۴ تن و فرکانس ارتعاشی ۰ تا ۴۵ هرتز، وظیفه تثبیت دینامیکی خط را دارد که با بلند کردن ریل توسط فک‌های تعبیه شده در ماشین و اعمال ارتعاش مورد نیاز به روسازی خط انجام می‌شود.

استفاده از ماشین تثبیت خط موجب هماهنگی و متحدالشکل شدن و استحکام بالاست، افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی عرض خط و کاهش کمانش خط می‌شود هر چند ممکن است دامنه این ارتعاش در برخی از مناطق مانند پل‌ها، ایستگاه‌ها و نزدیک شهرها به دلیل وقوع آسیب و خرابی احتمالی کاهش یابد معمولاً پس از عبور ماشین زیرکوب و پایدارساز برای تنظیم شکل نهایی خط در سطح و شانه‌های بالاست از ماشین خط‌آرا استفاده می‌شود تا هندسه و شکل خط بطور کامل پیاده سازی شود.

¹ Fix point

طبق مطالعات انجام شده مدل های پیشنهادی برای تخمین چرخه دقیق زیرکوبی برای هر قطعه مسیر ۲۰۰ متری می تواند برای تهیه برنامه های تعمیر و نگهداری به مدیران راه آهن کمک کند (An et al., 2018). با استفاده از داده های هندسه مسیر شبکه بریتانیا که در طول شش سال جمع آوری شده همراه با سوابق موجود از نگهداری انجام شده در این دوره نشان می دهد کیفیت مسیر به تاریخچه تعمیر و نگهداری بسیار وابسته است (Audley & Andrews, 2013). تأثیر نیروی تحریک بر عملیات تثبیت به این صورت است که با افزایش دامنه نیروی تحریک، جابجایی و شتاب جانبی تراورس به طور یکنواخت افزایش می یابد و با افزایش فرکانس تحریک، جابجایی جانبی تراورس به طور یکنواخت کاهش می یابد و شتاب جانبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد (J. Wang et al., 2023). در حین کار دستگاه تعمیر و نگهداری مسیر، دستگاه زیرکوب باعث فشردگی بالاست در زیر تراورس ها شده و فقط سختی زیر تراورس را افزایش می دهد. پس از عملکرد دستگاه تثبیت، بالاست به تدریج با کاهش سختی رو به رو می شود و تراکم غلظتی بارهای قطار نیز، فشردگی بالاست را در کف تراورس را به تدریج افزایش می دهد و در نهایت یکنواخت می کند. از آنجایی که سختی نگهدارنده تراورس عامل اصلی است که باعث نشست سطح ریل می شود عملیات زیرکوبی همراه با تثبیت باعث کاهش نشست خواهد شد (M. N. Zhang et al., 2014).

۳- پدیده تراورس معلق و تاثیرات آن بر خط آهن

یکی از عیوب اصلی گزارش شده در بررسی های صورت گرفته از خطوط راه آهن بالاستی، پدیده تراورس معلق است که بدلیل از بین رفتن تکیه گاه بالاستی در ناحیه کف تراورس ها موجب کاهش سختی مسیر و در نتیجه افزایش تغییر شکل و بروز خرابی می شود. یکی از خرابی های لایه بالاست ناشی از پدیده تراورس معلق، شکست و ساییدگی دانه های بالاست است در نتیجه این خرابی سطح ریل دچار ناهمواری می شود و با ناهمگن شدن صلبیت بالاست، بستر خط مستعد نشست ناهموار تحت تأثیر بارگذاری طولانی مدت بار قطار می شود. علاوه بر مواردی که بیان شد وقوع پدیده تراورس معلق می تواند پاسخ دینامیکی مسیر، خرابی تراورس، سیستم اتصالات و لایه بالاست را تشدید کند و به طور جدی بر عملکرد آن ها تأثیر می گذارد. از طرفی چون امکان انتقال نیروهای قائم، جانبی و طولی از تراورس به بالاست از طریق مکانیزم اندرکنش بین اجزا امکان پذیر نیست، پایداری مسیر نیز با چالش هایی مواجه می شود. تراورس معلق در کناره های تراورس در مقایسه با وسط تراورس، خطر بیشتری برای ایمنی بهره برداری قطارها ایجاد می کند. شکل (۲) نمایی از پدیده تراورس معلق و نواحی وقوع آن در کف تراورس را نشان می دهد.

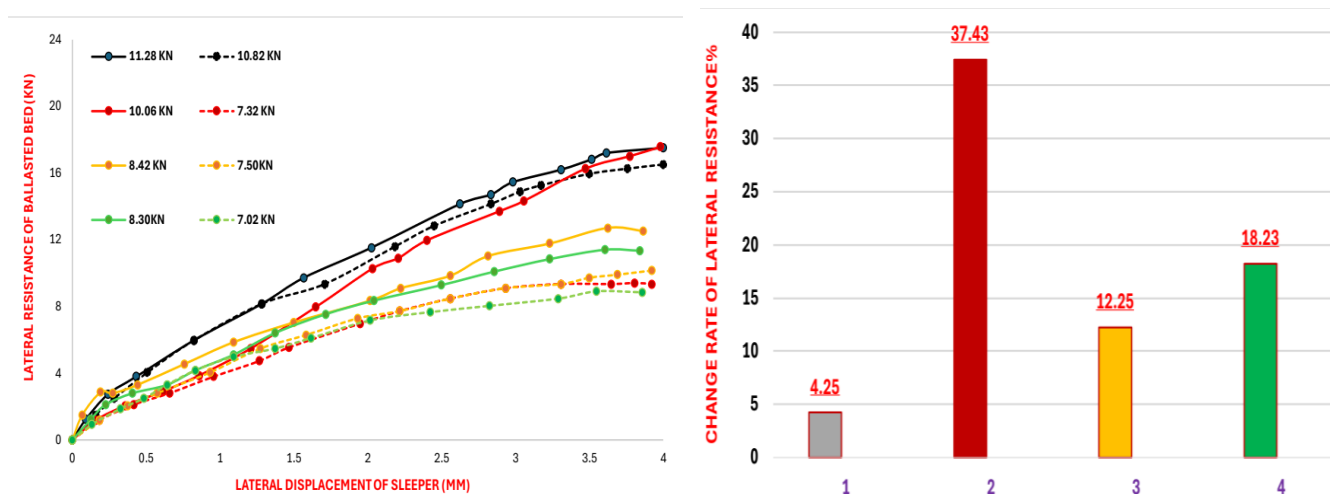


شکل (۲)- نمای جانبی خط بالاستی با وجود نشست در وسط و یک طرف خط (Liu et al., 2023)

۳-۱ تاثیر تراورس معلق بر خط آهن بالاستی

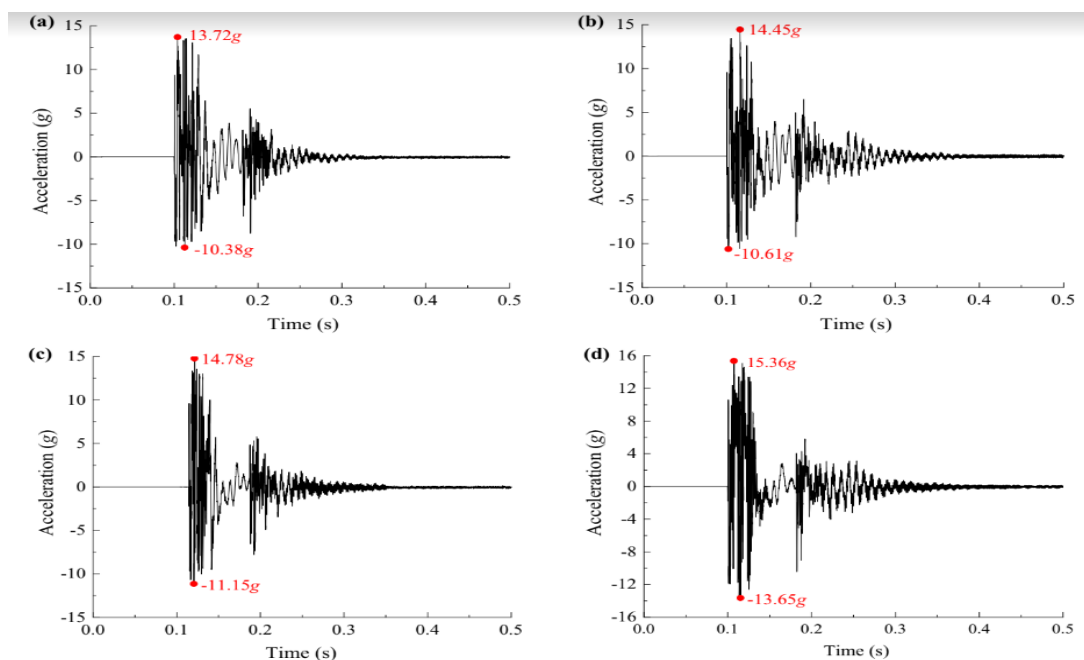
برای آشکار شدن تاثیر تراورس معلق بر خط مقاومت جانبی یک بستر بالاست در شرایط ضربه چرخ مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفت که در آن وضعیت خط با و بدون تراورس معلق بررسی شد. در این آزمایش شرایط خط سالم و بدون تراورس معلق و خط دارای خرابی تراورس معلق با ۱، ۲ و ۳ تراورس مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج مطابق انتظارات نشان داد که وجود ۱، ۲ و ۳ تراورس معلق مقاومت جانبی خط را به ترتیب ۳۲/۳۵، ۳۰/۶۸ و ۳۵/۱۲ درصد کاهش می دهد. هر چند با اعمال تحریک ناشی از ضربه چرخ، مقاومت جانبی خط بالاستی با تراورس های معلق که اندازه شکاف آن ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر بود به ترتیب ۳۷/۴۳، ۱۲/۲۵ و ۱۸/۲۳ درصد در

مقایسه با شرایط خط دارای تراورس معلق و بدون بارگذاری و ضربه چرخ افزایش می‌یابد. (Liu et al., 2023; Sadeghi et al., 2018). شکل (۳) نمودار مقاومت جانبی خط در شرایط وقوع پدیده تراورس معلق در وسط و کناره تراورس را نشان می‌دهد.



شکل (۳)- نمای جانبی خط بالاستی با وجود نشست در وسط و یک طرف خط (Liu et al., 2023)

مطابق شکل (۴)، دامنه شتاب ارتعاش در چهار حالت الف) بدون تراورس معلق ب) دارای یک تراورس معلق ج) دارای دو تراورس معلق د) دارای سه تراورس معلق براساس نمودارای شتاب - زمان ارائه شده تعیین شد و بر اساس آن معلق شدن تراورس باعث بزرگتر شدن دامنه شتاب ارتعاش می‌شود.

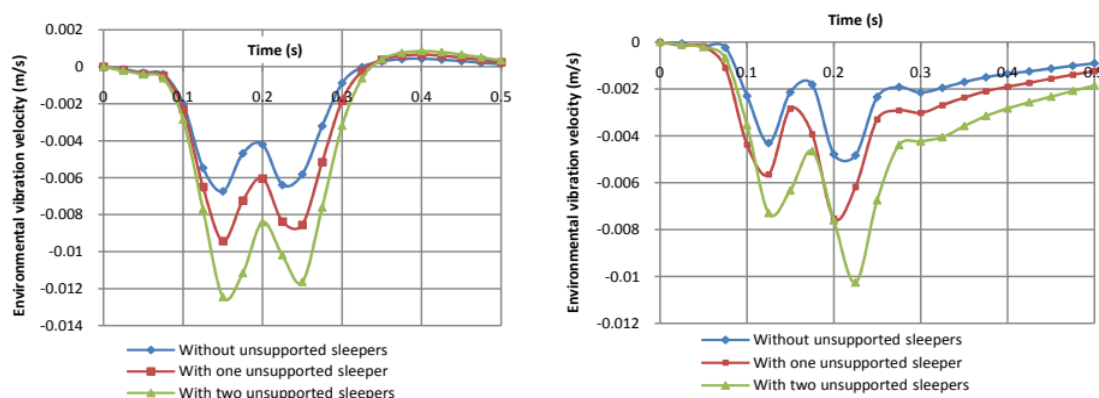


شکل (۴)- شتاب ارتعاش تراورس در حوزه زمان (Liu et al., 2023)

الف) بدون تراورس معلق ب) دارای یک تراورس معلق ج) دارای دو تراورس معلق د) دارای سه تراورس معلق

شکل (۵) نمودارهای سرعت-زمان ارتعاشات زمینی حاصل از مدل اجزای محدود توسعه داده شده برای ارزیابی اندرکنش دینامیکی قطار و خط را نشان می‌دهد که برای شرایط بدون تراورس معلق و با ۱ و ۲ تراورس معلق ترسیم شده است. مطابق این نتایج نیز وقوع پدیده

تراورس معلق موجب بزرگتر شدن و شدت یافتن دامنه پاسخها می شود. همچنین می توان مشاهده کرد که با افزایش سختی تکیه گاه دامنه ارتعاش کمتری ثبت شده است. (Esmaeili et al., 2017).

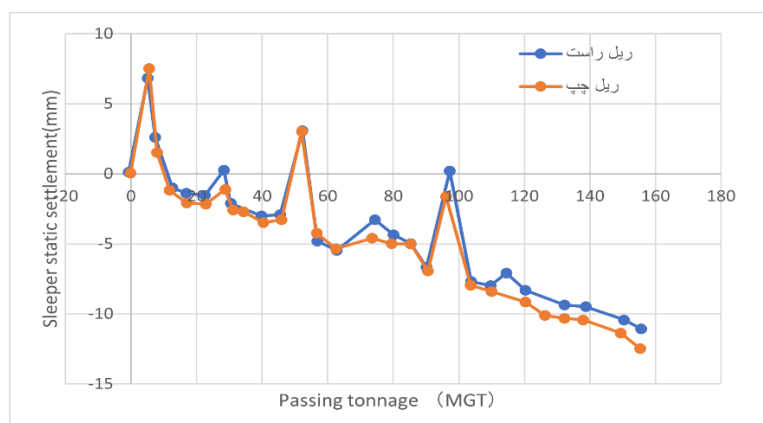


شکل (۵)- سرعت ارتعاش محیطی برای سختی های مختلف نسبت به زمان (Esmaeili et al., 2017)

الف. سرعت ارتعاش محیطی برای سختی تکیه گاه ۵۰ MN/m ب. سرعت ارتعاش محیطی برای سختی تکیه گاه ۲۰۰ MN/m

مطالعه تاثیر تعداد تراورس معلق ، سرعت وسیله نقلیه و اندازه شکاف بین تراورس و بالاست در یک مسیر مستقیم نشان می دهد که با افزایش سرعت، بار دینامیکی تراورس های معلق افزایش می یابد از طرفی بار دینامیکی با افزایش تعداد تراورس های معلق (قبل از رسیدن تعداد تراورس های معلق به شش عدد) برای سرعت ثابت و شکاف ۲ تا ۶ میلی متری، افزایش میابد همینطور اندازه شکاف بزرگتر باعث نوسان نشست بزرگتر می شود، در نتیجه باعث بار و ضربه بزرگتر می شود و در نهایت تراورس های معلق منجر به کاهش سختی مسیر می شود. (S. Zhang et al., 2008)

طبق آزمایش میدانی صورت گرفته در خط به وسیله ابزارهای اندازه گیری جابه جایی عمودی به بررسی تاثیر دراز مدت پدیده تراورس معلق و اندازه گیری نشست استاتیکی تراورس پرداخته شد و ملاحظه می شود که انحنا خمش ریل متصل به تراورس های معلق باعث می شود شکاف چندانی بین تراورس و بالاست بوجود نیاید اما تحت بارگزاری سنگین و مکرر ، رشد نشست و شکاف مشاهده شد .



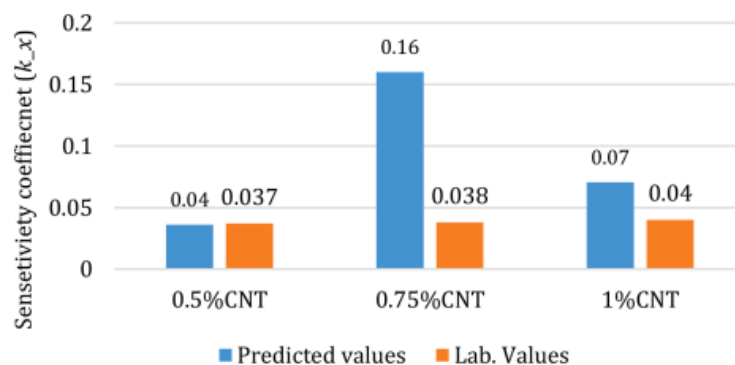
شکل (۶)- تغییر نشست استاتیکی تراورس با بارهای مکرر قطار (Ishida & Makoto, 2015)

همینطور نشست تراورس نشان داد که سرعت رشد نشست به تدریج کاهش یافته و با تغییراتی به مقداری معینی نزدیک می شود. و در نهایت شتاب ارتعاشی بالاست در مرحله اولیه تناژ عبوری کاهش یافت و برعکس پس از یک تناژ عبوری معین افزایش یافت. این مکانیزم میتواند بر حسب اندازه شکاف و بار عبوری محاسبه شود که در آن تماس تراورس با بالاست در تناژ بالا رخ می دهد . چنین مکانیزمی برای تراورس های معلق باید یکی از مکانیسم های اصلی رشد خرابی در سطح طولی باشد. بدین وسیله جلوگیری و تعمیر تراورس معلق از جنبه کاهش هزینه نگهداری و حفظ کیفیت خوب مسیر بسیار موثر است . در نمودار شکل ۶، محور افقی نشان دهنده تناژ عبوری بر

حسب MGT^۱ می‌باشد. ترتیب و توالی محل قرار گیری تراورس معلق در خط آهن نیز تحت دو شرط ۱) تراورس های معلق متوالی ۲) تراورس های معلق یک در میان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد در شرایط اول بیشترین نیرو را تراورس های مجاور تراورس های معلق تحمل می کنند و در شرایط دوم بیشترین نیرو را تراورس بین دو تراورس معلق و بعد تراورس های کناری تراورس های معلق تحمل می کند. در نتیجه تراورس احاطه شده توسط دو تراورس معلق در مقایسه با تراورس های دیگر، نیروهای ضربه بیشتری را تجربه می کند و بیشترین آسیب را نسبت به سایر تراورس ها متحمل می شود (Sadeghi et al., 2018).

۲-۳ راه های شناسایی و تعمیر خطوط بالاستی دارای تراورس معلق

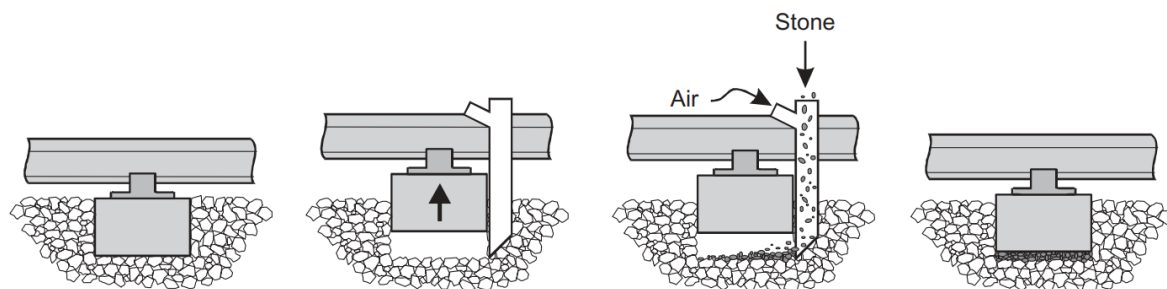
از راه های شناسایی این پدیده می توان به بازدید چشمی و آنالیز خروجی ماشین اندازه گیری خط نام برد اما امروزه با پیشرفت روز افزون علم تشخیص عیب تراورس معلق با استفاده از تراورس بتنی خود حسگر CNT هوشمند امکان پذیر شده است. در این نوع تراورس نانو لوله های کربنی (CNT) می توانند ویژگی های خود حسگر ذاتی را برای تشخیص عیوب تراورس معلق فراهم کنند. مطابق نمودار مقایسه ای شکل (۷)، تراورس های راه آهن در مقیاس واقعی با سه درصد مختلف CNT با مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد مورد مطالعه قرار گرفت و ترکیب بهینه CNT به عنوان الکتروود داخلی ۰/۵ درصد به دست آمد (Siahkouhi et al., 2023).



شکل (۷) - مقایسه بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر آزمایشگاهی (Siahkouhi et al., 2023)

راهکار تعمیر تراورس معلق استفاده از تزریق بالاست و ماشین آلات زیرکوب و پایدارساز می باشد. ماشین تزریق بالاست اولین بار در کشور انگلستان طراحی و ساخته شد، مزیت اصلی آن رفع خرابی تراز طولی و عرضی بدون کاهش مقاومت جانبی خط و بهم ریختگی و قفل شدگی بین دانه های بالاست است. مطابق فرایندی که در شکل ۸ نشان داده است، در این روش مصالح با دانه بندی مشابه بالاست داخل لایه بالاست تزریق می شود. معمولاً فاصله زمانی بین عملیات های تزریق بالاست بیشتر از فاصله زمانی عملیات زیرکوبی است و همچنین پس از زیرکوبی خط دچار افتادگی موضعی شده و نابرابری نشست در طول خط را خواهیم داشت که راهکار رفع آن بالاست ریزی متناسب با افتادگی در طول خط است اما با وجود مزایای بالقوه، این فناوری کاربرد محدودی دارد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته تزریق بالاست را می توان با موفقیت برای تراز کردن نشست های خط اعمال کرد و نتایج نشان می دهد عمل تزریق بالاست باعث تراز شدن تراورس ها شده و همچنین ترکیب تزریق بالاست و ژئوگرید روی زیربالاست باعث شد بالاست خرد شده حتی پس از بار سالانه عبور ۲۵ میلیون تن به لایه های زیرین بالاست نفوذ نکند درحالی که در شرایط بدون ژئوگرید بالاست خرد شده درست پس از عبور ۶ میلیون تن ترافیک سالانه به لایه های زیرین نفوذ کرد (Abrashitov & Semak, 2020).

¹ Million Gross Tons



شکل (۸) - نگهداری از خط با تزریق بالاست (P. I. Fair & W. F. Anderson, 2003)

تجزیه و تحلیل دقیق داده های خط دارای بهترین کیفیت برای نگهداری با تزریق بالاست طی سال های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ نشان داد اگر قرار باشد مقدار مناسبی از بالاست در خط تزریق شود موقعیت یابی جای مناسب بسیار مهم است همچنین عامل مهمی در بهینه سازی عملکرد بالاست تزریقی ، مقدار بالاست مورد استفاده است و این تا حدی وابسته به مسیر طراحی شده با توجه به طبقه بندی خطوط دارد در پایان مکان هایی که در آن محدودیت هایی در بالا بردن خط وجود دارد به طور کلی بهبود مسیر را می تواند محدود کند.

(P. I. Fair & W. F. Anderson, 2003)

با گسترش شبکه راه آهن و افزایش سرعت و بار محوری، کیفیت و کارایی بالاتری برای عملیات زیرکوبی و تثبیت لازم است. طبق مطالعات صورت گرفته

- نشست مسیر پس از عملیات زیرکوبی بزرگتر از قبل از عملیات زیرکوبی است
- افزایش تعداد عملیات زیرکوبی ، مقاومت بسترهای بالاست را کاهش میدهد
- فرکانس تحریک بالا (۳۶ هرتز ~ ۴۰ هرتز) برای تثبیت بالاست مضر است
- اثر عملیات زیرکوبی با توجه به نوع دستگاه و تداخل مرز و اندازه مدل ها می تواند بسیار متفاوت باشد
- عملیات زیرکوبی مقاومت جانبی روی بالاست را تا ۵۰/۵۰ درصد و کار مقاومت جانبی را تا ۵۰/۴۰ درصد کاهش دهد
- افزایش مقدار مقاومت هیدرولیکی می تواند راندمان کاری عملیات تثبیت کننده را بهبود بخشد

۴- مقاومت جانبی خط بالاستی و تاثیر تراورس معلق در آن

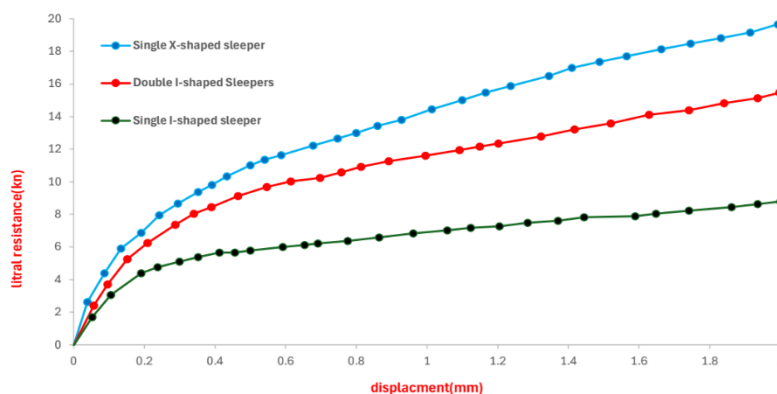
خرابی های خطوط بالاستی هرچند آسان تعمیر می شوند اما هزینه های زیادی را تحمیل می کنند لذا نیاز به مقاومت کافی در هر جهت لایه بالاست ضروری می باشد زیرا باعث حمایت از تراورس ، تحمل نیروهای طولی ، تحمل نیروهای عرضی ، تحمل نیروهای عمودی ، جلوگیری از جابه جایی بیش از حد تراورس و جلوگیری از کمانش می شود ، بویژه در چند دهه گذشته که خطوط CWR جایگزین مسیرهای درزدار شده است با افزایش دما و ازدیاد طول ریل شاهد نیروی محوری بیشتر و انحراف ریل میشود و متعاقباً، اگر نیروی جانبی ناشی از افزایش دما بر مقاومت بالاست جانبی آن غلبه کند کمانش ریل ممکن است رخ دهد . در این مورد مشخص برای حفظ ثبات خط، مهمترین عامل مقاومت جانبی بالاست است که ۶۰٪ و حتی تا ۷۰٪ به آن کمک می کند

(Chen et al., 2024; H. Wang et al., 2023).

عوامل از جمله تحکیم ، نوع تراورس و دوره تعمیر و نگهداری بر مقاومت جانبی خط تاثیرگذار هستند . راهکارهایی برای افزایش مقاومت جانبی صورت گرفته از جمله استفاده از مواد ژئوسنتتیک برای تقویت لایه بالاست ، استفاده از پلی اورتان برای تقویت بالاست ، بهینه سازی ساختار تراورس برای افزایش مقاومت آن ، انواع تراورس های مخلف از لحاظ شکل و ابعاد ، استفاده از دو صفحه سخت کننده زیر تراورس های فولادی و ... بطور مثال استفاده از پلی اورتان علاوه بر پایداری بیشتر بالاست باعث افزایش مقاومت جانبی از ۱۰٪ به ۱۸۴٪ شد یا استفاده از تراورس X شکل به دلیل تعامل بهتری که با لایه بالاست دارد منجر به بهبود عملکرد مقاومت جانبی تا ۲۷٪ در مقایسه با تراورس I شکل دوتایی می شود (Chen et al., 2024; Jing et al., 2019).

جدول ۲- تاثیر استفاده از پلی اورتان در مقاومت جانبی بالاست (Jing et al., 2019)

Reinforcement method		Lateral resistance (KN)	Ratio
Without polyurethane		7.05	---
Shoulder reinforcement	200 mm	14.09	100%
	300 mm	16.07	128%
Crib reinforcement	200 mm	13.09	86%
	300 mm	14.09	100%
Synthetical reinforcement	200 mm	17.08	142%
	300 mm	20.02	184%



شکل (۹)- نمودار مربوط به مقایسه تراورس X شکل با I شکل (Chen et al., 2024)

تفکیک عملکرد مربوط به هر تراورس در مقاومت بالاست امکان پذیر نیست بدلیل این که تراورس‌ها در اندرکنش با یکدیگر مقابل تغییر شکل عمل می کنند. تغییر شکل جانبی مسیر در مناطقی که مقاومت جانبی نسبتاً قوی تر است به حداقل می رسد، در حالی که در مناطقی که مقاومت جانبی ضعیف تر است، این تغییرشکل بیشتر است. بنابراین در فرآیند بهره برداری و نگهداری مسیر راه آهن، نظارت و نگهداری نواحی با مقاومت جانبی ضعیف‌تر اهمیت بالاتری دارد و از آنجایی که پدیده تراورس معلق جزو نقاط بحرانی مسیر می‌باشد بررسی تاثیر آن بر مقاومت جانبی حائز اهمیت می‌باشد (H. Wang et al., 2023).

۴-۱ تاثیر تراورس معلق در مقاومت جانبی خط آهن بالاستی

مطالعات نشان از تاثیر مستقیم این پدیده در مقاومت جانبی خطوط بالاستی میدهد ما شاهد کم شدن مقاومت جانبی مسیر باوجود تراورس معلق هستیم . با این حال، تراورس نزدیک تراورس های معلق در معرض وزن اضافی تراورس های معلق و بار ریل قرار دارند در نتیجه، بیش از حد مورد بارگزاری قرار می گیرند و مقاومت جانبی این تراورس‌ها افزایش پیدا خواهد کرد . نتایج حاصل از STPT¹ ها برای دو نوع تراورس PC3 و بالدار نشان داد که مقاومت جانبی برای تراورس های اطراف تراورس معلق که بیش از حد بارگزاری شده ، بیشتر از مقاومت تراورس ها معمولی است. آزمایش های انجام شده بر روی پانلهایی که دارای تراورس معلق و معمولی بود نشان داد که تراورس معلق مقاومت جانبی را کاهش داده است ، با کاهش تعداد تراورس های معلق در پانل برای تراورس PC3 و بالدار مقاومت جانبی افزایش یافت. با توجه به تجزیه و تحلیل که در نظر گرفته شد، نه تنها کاهش مقاومت جانبی ناشی از تراورس های معلق بلکه افزایش مقاومت جانبی به دلیل بارگزاری بیش از حد در تراورس ها کناری را شاهد هستیم. (Xu et al., 2023)

با انجام آزمایش های صحرایی، تأثیر دستگاه زیرکوب و تثبیت کننده بر روی سه تراورس بر وضعیت بستر بالاست بررسی شده است . نتایج نشان می‌دهد که عملیات زیرکوبی در راه‌آهن‌های تازه‌ساز باعث کاهش مقاومت جانبی به میزان ۵۶/۵ درصد و کاهش کار مقاومت جانبی به میزان ۶۴/۹ درصد می‌شود. با عملیات تثبیت، مقاومت جانبی و کار مقاومت جانبی به ترتیب ۱۶۸/۶ درصد و ۲۰۹/۸ درصد افزایش می یابد. همچنین مقاومت جانبی بستر بالاست در حالت یک بار عملیات زیرکوبی به میزان ۷۴/۶ درصد و کار مقاومت جانبی

¹ single tie push test

نیز به میزان ۶۹/۳ درصد کاهش می یابد. در مقابل، مقاومت جانبی بستر بالاست در حالت دو بار عملیات زیرکوبی تا ۱۷/۴ درصد و کار مقاومت جانبی تا ۱۶/۹ درصد کاهش می یابد. که نشان می دهد حالت دو بار زیرکوبی برای حفظ مقاومت جانبی بالاست مساعدتر است. با افزایش مقدار بلند کردن خط توسط ماشین زیرکوب، دامنه کاهش مقاومت جانبی بستر بالاست به تدریج بزرگتر می شود، در حالی که دامنه کاهش کار مقاومت جانبی روند افزایش-کاهش-افزایش را نشان می دهد. بنابراین پیشنهاد می شود در حین عملیات زیرکوبی، پارامترهای زیرکوبی با توجه به میزان بالا بردن خط تنظیم شود. میزان بلند شدگی خط بین ۲۰ تا ۳۰ میلی متر توصیه می شود. (Xiao et al., 2023).

۵- بحث

همانطور که بیان شد خطوط راه آهن بالاستی از طریق مکانیزم اندرکنش بین اجزای خود می توانند یک مسیر مناسب و ایمن برای عبور قطارها باری و مسافری فراهم کنند. لذا اطمینان از سالم بودن این اجزای خط و عملکرد مناسب آنها از وظایفی است که هر سازمان مدیریت کننده راه آهن بایستی برای آن برنامه ریزی کند و در راستای کاهش هزینه های ناشی از آن اقداماتی انجام دهد. بر این اساس بیان شد که هزینه های تعمیر و نگهداری از جمله مواردی است که می توان با انجام بهینه سازی هایی در فرایندها و روش های انجام آن میزان این هزینه را کاهش داد. یکی از خرابی های مهمی که در اثر تراکم لایه بالاست تحت اثر بار قطارهای عبوری و نشست نامتقارن آن ممکن است موجب کاهشی ایمنی و مقاومت جانبی خط گردد، پدیده تراورس معلق است. وقوع این خرابی می تواند با تشدید دامنه ارتعاشات رسیده به خط موجب بروز خرابی های بزرگتری در سایر اجزای خط مانند ریل، تراورس، سیستم اتصالات و صفحه های اتصال بین دو ریل گردد و مانع عملکرد صحیح آنها گردد. مطابق آزمایشات صورت گرفته مقاومت جانبی خط در شرایط وجود تراورس معلق می تواند تا ۳۵٪ نسبت به شرایط سلامت خط تضعیف گردد. بنابراین محل وقوع پدیده تراورس معلق بدلیل از بین رفتن اصطکاک بین کف تراورس و لایه بالاست مستعد بروز کماتش خط است و می تواند خطرات خروج از خط قطار را به نحو چشمگیری مورد تاثیر قرار دهد. هر چند بررسی و تصمیم گیری دقیقتر درباره این موضوع به دلیل تاثیرات مثبت بار قائم بر مقاومت جانبی خط مستلزم در نظر گرفتن دو حالت با و بدون عبور بار چرخ قطار از خط است. بررسی تاثیر دراز مدت رفتار خط در محل پدیده تراورس معلق و اندازه گیری نشست استاتیکی تراورس نشان می دهد که در مراحل اولیه قابلیت انحنای ریل مانع از ایجاد شکاف بین تراورس و بالاست می شود هرچند این روند با افزایش تناژ عبوری موجب رشد نشست و ایجاد فاصله بین تراورس و بالاست می شود. بدلیل مشخصات اجزای خط مشارکت کننده در این پدیده، اندازه فاصله مورد بحث تا حد مشخصی امکان رشد دارد و با بزرگ تر شدن آن دامنه ارتعاشات ایجاد شده نیز افزایش می یابد.

بنابراین با توجه به ماهیت تشدید کننده این پدیده در وقوع خرابی های خط به نظر می رسد بهترین استراژی قابل اتخاذ برای کاهش خسارات به کار گیری مجموعه اقدامات پیشگیرانه برای شناسایی و رفع این عیب پیش از گسترش آن به سایر اجزای خط باشد. روش های تشخیص و شناسایی این پدیده از روش های ساده مانند بازدید چشمی توسط افراد متخصص تا استفاده از تکنولوژی های مکانیزه مانند استفاده از داده های ماشین اندازه گیر خط و تراورس های خود حسگر گستردگی دارد. وجود افتادگی موضعی در داده های ماشین اندازه گیر خط می تواند به عنوان نقاط بالقوه وقوع چنین خرابی هایی در نظر گرفته شود. به کمک لوله های کربنی تعبیه شده در تراورس های خود حسگر نیز می توان به اطلاعاتی پیوسته دست پیدا کرد، هر چند استفاده از این تراورس ها به دلیل ملاحظات مالی و قیمت بالای تنها در مقاطعی از خط با اهمیت بیشتر عملیاتی است.

روش اصلی و موثر بر طرف کردن این خرابی انجام عملیات های تزریق بالاست، زیرکوبی و پایدارسازی دینامیکی است که در دوره های زمانی مشخص بایستی در مقاطع خط انجام گیرد. علاوه بر این روش های نیازمند مداخله تعمیری می توان از راهکارهای پیشگیرانه ای مورد توصیه در منابع نیز جهت کاهش احتمال وقوع این خرابی استفاده کرد. از جمله می توان با اتخاذ روش هایی همچون تراکم بالاست پس از عملیات زیرکوبی، استفاده از مواد ژئوسنتتیک برای تقویت لایه بالاست، استفاده از پلی اورتان برای تقویت بالاست، بهینه سازی سازه تراورس از لحاظ شکل و ابعاد، استفاده از صفحات تقویتی و ... پارامترهایی از خط مانند مقاومت جانبی را که با وقوع پدیده تراورس معلق تضعیف می شوند به نحو موثر و قابل اطمینانی تقویت کرد.

۶- نتیجه گیری

۶-۱ تراورس معلق در راه آهن یک پدیده فیزیکی است که زمانی رخ می‌دهد که واگن‌های قطار به سرعت بالا حرکت می‌کنند و در اثر وزن خود فشار زیادی به ریل‌ها و سیستم راه آهن وارد می‌کنند و باعث تراکم بالاست کف تراورس می‌شود. این پدیده بصورت یک شکاف و جداشدگی بین تراورس و لایه بالاست قابل مشاهده است. این پدیده می‌تواند خطرناک باشد و باعث ایجاد حوادث و آسیب‌های جدی به سیستم راه آهن شود. بنابراین برقراری یک نظارت دقیق بر وضعیت فنی و مهندسی خط از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه نگاه کلی به معرفی و دلایل وقوع پدیده تراورس آویزان، تاثیرات آن بر رفتار خط و در نهایت اقدامات تعمیر و نگهداری مربوط به آن دارد. مطابق اطلاعات جمع‌بندی شده در این پژوهش برای پدیده تراورس معلق موارد زیر قابل نتیجه گیری و استنباط است:

۱. پدیده تراورس معلق در اثر تناژ عبوری از خط و به دلیل نشست تدریجی و نامتقارن لایه بالاست نسبت به تراورس اتفاق می‌افتد. در این پدیده با ایجاد فاصله و شکاف بین تراورس و بالاست عملکرد خط تحت تاثیر قرار می‌گیرد و به دلیل کم شدن اصطکاک و اندرکنش بین اجزای خط احتمال وقوع کمانش خط و خروج از خط‌قطار افزایش می‌یابد.
۲. به طور خلاصه پدیده تراورس معلق موجب کاهش مقاومت جانبی خط، افزایش دامنه ارتعاشات، نشست نامتقارن خطوط ریلی می‌شود و می‌تواند منجر به تشدید و گسترش خرابی‌ها به سایر اجزای خط مانند ریل و سیستم اتصالات گردد.
۳. مطابق مطالعات تاکنون سه روش بازرسی چشمی، استفاده از داده‌های ثبت شده ماشین اندازه‌گیر خط و تراورس‌های خود حسگر جهت تشخیص و شناسایی این خرابی توصیه شده است.
۴. جهت رفع و اصلاح این خرابی می‌توان علاوه بر روش‌های دستی از قطار MDZ نیز جهت انجام عملیات تزریق بالاست، زیرکوبی و تثبیت دینامیکی استفاده کرد. علاوه بر این اتخاذ اقدامات پیشگیرانه مانند افزودن مواد اصلاح کننده لایه بالاست، بکارگیری انواع تراورس‌ها و ... نیز می‌تواند جهت کاهش احتمال وقوع این پدیده تصادفی مناسب باشد.

۷-مراجع

- Abrashitov, A. A., & Semak, A. V. (2020). Experimental Investigation of Railway Maintenance with Stoneblowing Techniques (pp. 19–26). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_3
- An, R., Sun, Q., Wang, F., Bai, W., Zhu, X., & Liu, R. (2018). Improved Railway Track Geometry Degradation Modeling for Tamping Cycle Prediction. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(7). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000149>
- Audley, M., & Andrews, J. (2013). The effects of tamping on railway track geometry degradation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(4), 376–391. <https://doi.org/10.1177/0954409713480439>
- Chen, C., Tang, Z., Zhang, L., & Rui, R. (2024). Comparison of lateral resistance between I-shaped and X-shaped sleepers using finite element and discrete element coupling method. *Computers and Geotechnics*, 165, 105889. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105889>
- Esmaeili, M., Mosayebi, S.-A., & Zakeri, J.-A. (2017). Ground-Borne Vibrations Caused by Unsupported Railway Sleepers in Ballasted Tracks. *Procedia Engineering*, 199, 2645–2650. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.513>
- Esveld, C., & Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (2nd ed., Vol. 385). MRT-productions Zaltbommel.
- Falamarzi, A., Moridpour, S., & Nazem, M. (2019). A Review on Existing Sensors and Devices for Inspecting Railway Infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*, 31(1), 1–10. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01)
- Franca, A. S., & Vassallo, R. F. (2021). A Method of Classifying Railway Sleepers and Surface Defects in Real Environment. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11301–11309. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3026173>
- Frangopol, D. M., & Liu, M. (2019). Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost. *Structures and Infrastructure Systems*, 96–108.
- Ishida, & Makoto. (2015). The progress mechanism of track geometrical irregularity focusing on hanging sleepers. *International Journal of Railway Research*, 2(1), 12–23.
- Jing, G., Qie, L., Markine, V., & Jia, W. (2019). Polyurethane reinforced ballasted track: Review, innovation and challenge. *Construction and Building Materials*, 208, 734–748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.031>
- Kantor, G., Herman, H., Singh, S., Tabacchi, J., & Kaufman, W. (2001). *International Conference on Field and Service Robotics*.
- Liu, J., Du, S., Liu, G., Wang, P., Chen, R., Wei, X., & Liu, H. (2023). Influence of unsupported sleepers on the dynamic stability of ballasted bed based on wheelset impact tests. *Railway Engineering Science*, 31(1), 52–60. <https://doi.org/10.1007/s40534-022-00292-z>
- Maulana, A. T., & Gunawan, L. (2023). Railway Infrastructure Asset Management Optimization: Comparative Analysis of RAMS, LCC, and their Integration Approaches on Track Asset. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)* Vol. 7.
- Nash, & Chris. (2005). Rail infrastructure charges in Europe. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 39, 259–278.
- P. I. Fair, & W. F. Anderson. (2003). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 156)*.

- Rizvi, A. R., Khan, P. R., & Ahmad, S. (2017). Crack detection in railway track using image processing. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3(4), 489–496.
- Sadeghi, J., Zakeri, J.-A., & Tolou Kian, A. R. (2018). Effect of unsupported sleepers on rail track dynamic behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 171(5), 286–298. <https://doi.org/10.1680/jtran.16.00161>
- Siahkouhi, M., Wang, J., Han, X., Aela, P., Ni, Y.-Q., & Jing, G. (2023). Railway ballast track hanging sleeper defect detection using a smart CNT self-sensing concrete railway sleeper. *Construction and Building Materials*, 399, 132487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132487>
- SULKIFLI, & MOHAMAD ARIF BIN. (2023). The Improvement Of Safety Analysis Form (HIRARC) For Manual Tamping Works In Keretapi Tanah Melayu Berhad (KTMB). *Progress in Engineering Application and Technology*, 4, 1117–1128.
- Wang, H., Xing, C., & Deng, X. (2023). Effect of Random Lateral Ballast Resistance on Force-Deformation Characteristics of CWR with a Small-Radius Curve. *Materials*, 16(7), 2876. <https://doi.org/10.3390/ma16072876>
- Wang, J., Wang, L., Huang, H., Chen, T., Jiang, W., Zhao, Z., Qin, J., & Jia, T. (2023). Stabilization effect of dynamic stabilizer with different operation parameters. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(2), 168781322311571. <https://doi.org/10.1177/16878132231157166>
- World Bank. (2017). *Railway reform: Toolkit for improving rail sector performance* (2nd ed.).
- Xiao, H., Zhang, Z., Zhu, Y., Gan, T., & Wang, H. (2023). Experimental analysis of ballast bed state in newly constructed railways after tamping and stabilizing operation. *Construction and Building Materials*, 362, 129772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129772>
- Xu, C., Ito, K., Hayano, K., & Momoya, Y. (2023). Combined effect of supported and unsupported sleepers on lateral ballast resistance in ballasted railway track. *Transportation Geotechnics*, 38, 100913. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100913>
- Ye, J., Stewart, E., Zhang, D., Chen, Q., & Roberts, C. (2020). Method for automatic railway track surface defect classification and evaluation using a laser-based 3D model. *IET Image Processing*, 14(12), 2701–2710. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.1616>
- Zhang, M. N., Wu, Y. Bin, Ma, X. C., & Wang, P. (2014). Influence of Large Track Maintenance Machine on Sleeper Supporting Stiffness. *Advanced Materials Research*, 919–921, 1115–1119. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1115>
- Zhang, S., Xiao, X., Wen, Z., & Jin, X. (2008). Effect of unsupported sleepers on wheel/rail normal load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(8), 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.08.006>

ذاکری سردودی، جبارعلی & رضازاده زواردهی، مهرداد. (1385). *روش های نگهداری خطوط ریلی*. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

سید جواد میر محمد صادقی. (1394). *کتاب اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن*. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

بررسی تاثیر پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات بر بهره وری سازمان

آرمین کاکایی نژاد^{۱*}

کارخانه کابلسازی ایران، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

مهدی عباسی^۲

دانشگاه آزاد شیراز، دکترا مهندسی صنایع

مهران سهامی^۳

دانشگاه Stanford آمریکا، دکترا مهندسی کامپیوتر

پائولا پلیدو سوارز^۴

کارخانه General motors، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

جکی زامورا^۵

کارخانه Intel، کارشناسی ارشد مهندسی برق

چکیده

هدف این مقاله بررسی تاثیر پیاده سازی شاخص اثربخشی تجهیزات (OEE) بر بهره وری می باشد که در چارچوب یک کارخانه تولیدی (کارخانه کابلسازی ایران) است. روش پژوهش بر اساس هدف کاربردی است. در این تحقیق با استفاده از مطالعات کتابخانه ای و روش طوفان فکری چهار راهکار جهت پیاده سازی شاخص اثربخشی تجهیزات (OEE) طراحی و پیاده سازی گردید که شامل مهندسی مجدد سیستم نگهداری و تعمیرات فراگیر (TPM)، اجرای SMED، آموزش و پیاده سازی تولید ناب و شش سیگما و مدیریت مبتنی بر فرآیند میباشد و تاثیر آن بر عوامل موثر بر بهره وری که شامل ۱- سرعت تولید ۲- کاهش میزان ضایعات ۳- کاهش خرابی های دستگاه ها ۴- مصرف مواد اولیه ۵- دوباره کاری ها ۶- میزان تولید مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. و درنهایت فرض اصلی پژوهش یعنی " پیاده سازی شاخص اثربخشی تجهیزات بر بهره وری موثر است" مورد تایید قرار می گیرد.

کلید واژه ها: شاخص اثربخشی تجهیزات (OEE)، بهره وری، تولید

۱-مقدمه

^۱Armin.kakaeinezhad@gmail.com 09173208857

^۲abbasi.iau@gmail.com

^۳sahami@cs.stanford.edu

^۴Paula.pulido@mail.escuelaing.edu.co

^۵jackiezamora@comcast.net

ملت هایی که ثروت خود را افزایش می دهند و روز به روز ثروتمندتر می شوند ، ملتهایی هستند که می توانند به سرعت و در هر زمان که اراده کنند ، بهره وری خود را افزایش دهند (طالقانی و همکاران ، ۱۳۹۰). شرکت ها جهت دستیابی به بالاترین سطوح رقابت، نیازمند بهبود بهره وری کلی هستند و برای حفظ جایگاه رقابتی خود باید همواره در جهت افزایش کیفیت ، سرعت و توسعه مداوم حرکت نمایند (۲۰۱۳ ، Narses). بهره وری در سازمان به عنوان عامل تعیین کننده حقوق و دستمزد، قیمت و دیگر عوامل تولید بشمار می آید، و نسبت های بهره وری برای مدیریت به عنوان یک وسیله کنترل در فرآیند تولید استفاده می شود (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۹). و یکی از مهمترین علل شکست حرکت های بهبود و بهره وری ، بی توجهی نسبت به شناخت عوامل موثر بر بهره وری است (محمدیان ، ۱۴۰۰). تجهیزات مهمترین عنصر یک سیستم تولید محسوب می شوند و وضعیت آنها بهره وری، کیفیت و هزینه را تحت تاثیر قرار می دهد (مظفری و همکار، ۱۳۹۷). بنابراین بهبود کارآیی تجهیزات، یک اقدام موثر در جهت بهبود بهره وری سازمان، کاهش هزینه های ساخت، بهبود کیفیت محصولات و در نهایت ارتقا و توسعه پایدار سازما است (Zhu، ۲۰۱۱). جهت اندازه گیری سطح رقابت یک سازمان، چندین شاخص کلیدی وجود دارد که مشهورترین آنها شاخص اثر بخشی تجهیزات است (۲۰۱۳ ، Narses). شاخص اثر بخشی تجهیزات یک شاخص بین المللی جهت ارزیابی وضعیت بهره برداری از تجهیزات و تعمیرات و نگهداری است که می تواند تاثیر مدیریت تجهیزات بر کارآیی تجهیزات تولیدی را به طور جامع انعکاس دهد (Zhu، ۲۰۱۱).

۲- مبانی نظری

۲-۱- شاخص اثربخشی تجهیزات OEE

شاخص اثربخشی تجهیزات OEE ابزاری است که نخستین بار توسط ناکاجیما (۱۹۸۸) مطرح شد و از آن جهت اندازه گیری کارایی کلی تجهیزات و ماشین آلات استفاده می شود (۲۰۱۳ ، Narses). از خصوصیات این شاخص در نظر گرفتن شش ضایعه عمده است که موجب کاهش بهره برداری تجهیزات می شوند. این ضایعات عبارتند از:

1- ضایعات آغاز تولید

2- ضایعات آماده سازی و تنظیمات

3- ضایعات ناشی از زمان های حرکت بدون تولید و توقف های کوتاه مدت

4- ضایعات کاهش سرعت

5- ضایعات کیفیت و دوباره کاریها

6- ضایعات ناشی از خرابیهای اضطراری

ضریب اثربخشی کلی تجهیزات یک ابزار اندازه گیری جامع از تجهیزات تولیدی کارخانه می باشد که متدولوژی کاهش مشکلات ماشین آلات تولیدی و اجرای بهبود مداوم تولید را به کار گرفته و در ابتدا از اقدامات اصلاحی به بهترین وجه در جهت محدود کردن تجهیزاتی که تأثیر منفی بر تولید داشته باشند استفاده می کند و در انتها اقدامات اصلاحی به دیگر قسمت های کارخانه بسط داده می شود. ضریب اثربخشی کلی تجهیزات به طرز فزاینده ای محبوبیت پیدا کرده و به صورت یک ابزار ضروری جهت بهبود بهره وری مورد استفاده قرار می گیرد (نیلی پور و همکاران، ۱۳۸۹).

۲-۲- بهره وری

کلمه بهره وری بر گردان انگلیسی واژه " productivity " به معنای قدرت و قابلیت تولید است در دایره المعارف بریتانیا، بهره وری در اقتصاد به صورت نسبی از آنچه تولید می شود به آنچه که برای تولید مورد نیاز است ،تعریف می شود. در دیکشنری آکسفورد، بهره وری به معنای کارآیی است ، که در صنعت بوسیله مقایسه میزان تولید به زمان صرف شده یا منابع مصرف شده برای تولید آن اندازه گیری می شود (نصیری، ۱۳۹۹). انسان از دیرباز، در اندیشه استفاده مفید و کارا و ثمربخش از تواناییها، امکانات و منابع در دسترس خود بوده است. در عصر کنونی این امر بیش از هر زمان دیگری مورد توجه جدی قرار گرفته است . محدودیت منابع در دسترس، افزایش جمعیت و رشد نیازها و خواسته های بشر باعث شده که دست اندرکاران عرصه اقتصاد، سیاست و مدیریت جامعه و سازمان ها، افزایش بهره وری

را در اولویت برنامه های خود قرار دهند (طاهری، ۱۳۹۳). بنابراین اثربخشی تجهیزات همواره یک گام مهم در بهبود فرآیند تولید و بهره وری سازمان می باشد.

۳- روش شناسی

این پژوهش از نظر ماهیت از نوع پژوهش های کمی، با توجه به هدف از نوع پژوهش های کاربردی می باشد. در این تحقیق اطلاعات نظری از روش کتابخانه ای و طوفانفکری با خبرگان سازمان و سازمانهای پیشرو نظیر جنرال موتورز و اینتل و سایر اطلاعات، از روش میدانی جمع آوری شده است. و به لحاظ نحوه گردآوری داده ها، اطلاعات از گزارشات روزانه تمامی افراد کارخانه و به صورت میدانی از تمامی واحد های مورد بررسی و تمامی افراد آنان جمع آوری گردید. هدف این مقاله کمک به درک تاثیر پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات بر بهره وری سازمان است. سوال اصلی تحقیق: پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات بر زمان بهره وری سازمان موثر است؟

۴- مدلسازی، بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها

جهت پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات چهار اقدام زیر انجام گردید که شامل ۱- مهندسی مجدد سیستم نگهداری و تعمیرات فراگیر (TPM) ۲- اجرای SMED ۳- آموزش و پیاده سازی تولید ناب و شش سیگما ۴- مدیریت مبتنی بر فرآیند میباشد که به شرح زیر می باشند:

۴-۱- مهندسی مجدد سیستم نگهداری و تعمیرات فراگیر (TPM): اجرای صحیح اصول هشتگانه سیستم نگهداری و تعمیرات فراگیر تاثیر زیادی بر روی بهبود شاخص OEE دارد که این هشتگانه شامل موارد زیر می گردد

۱- بهبود مداوم ۲- نت خودگردان ۳- نت برنامه ریزی شده ۴- آموزش و پرورش ۵- مدیریت توسعه ۶- نت کیفیت ۷- TPM در واحدهای پشتیبانی و ستادی ۸- مدیریت ایمنی و محیط زیست که در این راستا اقدامات زیر انجام گرفت.

۴-۱-۱- بهبود مداوم: کاهش اتلافها با استفاده از آنالیزهای Why-Why و FMEA - ایجاد تیم های کایزن - پیاده سازی روش PROACT - تعیین شاخص های کلیدی عملکرد برای کارکنان - تعیین سیستم های انگیزشی مناسب

۴-۱-۲- نت خودگردان: افزایش مالکیت اپراتور - انجام نظافت، روغن کاری، تنظیمات، بازرسی و ... تجهیزات توسط اپراتور ۴-۱-۳- نت برنامه ریزی شده: برنامه ریزی جهت TBM و PM - حداقل رساندن متوسط زمان بین دو خرابی (MTBF) و متوسط زمان برای تعمیر (MTTR)

۴-۱-۴- آموزش و پرورش: استفاده از کارکنان چند مهارته - ایجاد جلسات توجهی با کارکنان با اهداف و استراتژی های سازمان - ارزیابی دوره ای و آموزش و بروز رسانی مهارت ها - گسترش مهارت های فنی و روابط بین فردی

۴-۱-۵- مدیریت توسعه: خرید و به کارگیری تجهیزات جدید - دادن پاداش به ایده های برتر - بازدید از کارخانه های پیشرو در استان ۴-۱-۶- نت کیفیت: دستیابی به میزان خطای صفر - آموزش و پیاده سازی روش RCA - تنظیم شرایط 3M

۴-۱-۷- TPM در واحدهای پشتیبانی و ستادی: بهبود سینرژی میان مشاغل مختلف - تمرکز بر روی موضوعات مرتبط با هزینه - پیاده سازی 5S

۴-۱-۸- مدیریت ایمنی و محیط زیست: برگزاری دوره های آموزشی - قراردادن پوسترهای آموزشی در گروه کارکنان در فضای مجازی - اطمینان از محیط کاری امن - فراهم نمودن محیط کاری مناسب - حذف حوادث و جراحات به کمک روش های RCA و PROACT - ارائه روش های عملیاتی استاندارد

۴-۲- اجرای SMED: SMED مخفف واژه ای به معنای تعویض قالب در زمان تک رقمی است از این تکنیک جهت بهبود شاخص OEE به منظور کاهش زمان changeover استفاده می شود

مراحل اجرای این روش عبارتند از:

مرحله اول: جمع آوری اطلاعات

کرونومتر: از این روش جهت اندازه گیری مدت زمانی که هر فعالیت به طول می انجامد، استفاده می شود.

نمونه گیری : تمامی وقایعی که در زمان changeover اتفاق می افتند را ثبت می کنیم.

مصاحبه با کارگران : مصاحبه با کارگران و جمع آوری نظرات آنان جهت بهبود عملیات

فیلمبرداری : فیلم برداری از عملیات تعویض قالب

مرحله دوم : شناسایی عملیات تنظیمات داخلی و خارجی

دو نوع تنظیم وجود دارد

۱- تنظیمات داخلی: عملیات تنظیم در زمان توقف دستگاه انجام می شود.

۲- تنظیمات خارجی : عملیات تنظیم در زمان روشن بودن دستگاه انجام می شود.

با تشخیص درست این عملیات، بدین معنا که چه فعالیت هایی را باید به صورت داخلی و چه فعالیت هایی را باید به صورت خارجی انجام داد ، می توان زمان تنظیمات را در حدود سی درصد کاهش داد.

مرحله سوم : تبدیل عملیات داخلی به خارجی

در این مرحله موارد زیر را باید در نظر گرفت:

آنالیز دقیق عملیات . چون ممکن است برخی فعالیت ها به اشتباه داخلی در نظر گرفته شده باشند.

تعریف روش هایی جهت تبدیل عملیات داخلی به خارجی (به عنوان مثال توسط بررسی مجدد این عملیات).

مرحله چهارم: ساده سازی مراحل عملیات تنظیم

در این مرحله، باید تمامی فعالیت ها و مراحل عملیات تنظیم را با دقت بیشتری بررسی نمود و تا جای امکان آن را ساده سازی نمود.

۴-۳- آموزش و پیاده سازی تولید ناب و شش سیگما:

هدف رویکرد تولید ناب، برآورده کردن سریع تقاضا، همراه با بهترین کیفیت و بدون اتلاف است. به عبارت دیگر، در تولید ناب مشتری دقیقاً همان چیزی را که می خواهد، در بهترین کیفیت، در میزان دقیق، در زمان مورد نیاز، در مکان دلخواه و در کمترین قیمت دریافت می کند.

شش سیگما یک رویکرد بهبود مستمر کیفیت است که با کاهش تغییرات ذاتی فرآیند انجام می شود. کانون توجه این متدولوژی درک کامل از فرآیند طراحی و ساخت در راستای رضایت مشتری است. است که شش سیگما به دنبال تولید محصول عاری از هر گونه نقص و خطاست.

هدف بنیادی روش شش سیگما، اجرای راهبرد مبتنی بر اندازه گیری عملکرد است و از طریق اجرای پروژه های بهبود دهنده ، سعی در کاهش نوسانات فرآیند و بهبود آن دارد. این کار به کمک روش فرعی DMAIC در شش سیگما انجام می شود. فرآیند DMAIC یک سامانه بهبود دهنده برای بهبود فرآیند هایی است که در حال حاضر خارج از مشخصات عملکردی خواسته شده از سوی مشتری یا مدیریت ارشد سازمان می باشند.

ادغام دو رویکرد تولید ناب و شش سیگما ضروری است زیرا:

۱- تولید ناب به تنهایی نمی تواند فرآیند را تحت کنترل آماری در بیاورد.

۲- شش سیگما به تنهایی نمی تواند موجب بهبود سرعت فرآیند و کاهش هزینه ها شود.

روش ادغام دو رویکرد تولید ناب و شش سیگما در سال ۲۰۱۵ در یک شرکت ایتالیایی تولیدکننده قالب های تزریق پلاستیک که مجهز به چندین دستگاه پرس بود، به کار گرفته شد و موجب بهبود شاخص OEE از میزان 40% به 61% گردید.

جهت انجام این روش باید الگوی DMAIC را اجرا نمود و در مراحل مختلف آن از ابزارهای مختلف تولید ناب مانند 5S, SMED , Poka-Yoke استفاده نمود.

بدین منظور باید مراحل زیر را انجام داد:

۱- تعیین موارد CTQ¹

۲- تعیین دلایل ریشه ای مرتبط با CTQ ها توسط دیاگرام علت - معلولی و آزمون مربع کای

۳- حذف دلایل ریشه ای با استفاده از ابزارهای Poka-Yoke - 5S - SMED

¹critical to quality characteristics

۴-۴- مدیریت مبتنی بر فرآیند :

ابتدا شناسایی فرآیندها شکل گرفت که شامل ۱- شناسایی فرآیندهای موجود ۲- شناسایی فرآیندهای ضروری اما ناموجود ۳- شناسایی فرآیندهای مرتبط با اهداف استراتژیک ۴- دسته بندی فرآیندها که شامل فرآیندهای تحقق محصول و خدمت - فرآیندهای پشتیبانی - فرآیندهای پایش و اندازه گیری - فرآیندهای مدیریتی.

سپس تهیه نقشه فرآیندهای سازمان ترسیم گردید. و بعد از آن مدل سازی و مستندسازی فرآیندها انجام گرفت که شامل ۱- تعیین اجزای فرآیند که شامل عطف فرآیند - ورودی و خروجی فرآیند - شاخص های فرآیند - دامنه و مسئول فرآیند - مکانیسم کنترل ۲- تهیه شناسنامه فرآیند ۳- تهیه گردش کار و فلوچارت فرآیند ۴- تهیه مستندات مورد نیاز که شامل روشها و دستور العمل های اجرایی - فرم ها و چک لیست ها - بانک های اطلاعاتی - آیین نامه ها می باشد

۴- در نهایت پیاده سازی فرآیندها آغاز می گردد که ابتدا برنامه ریزی فرآیند و سپس تعیین دوره ارزیابی و معیار های فعلی و هدف و مسئول اندازه گیری مشخص گردید سپس جهت اجرای فرآیند آموزش آغاز گردید و با رویکرد مربی گری ادامه یافت و سپس ارزیابی اثربخشی و کارایی فرآیند و عدم انطباق ها مشخص گردید و در نهایت با کمک روش PDCA با کمک نمودار های پارتو و استخوان ماهی تجزیه تحلیل شکل می گیرد و بهبود مستمر ادامه می یابد.

۵- نتیجه

بعد از گذشت سه ماه از پیاده سازی روش اثربخشی تجهیزات سپس تاثیر آن بر عوامل تاثیرگذار در بهره وری سازمان شامل ۱- سرعت تولید ۲- کاهش میزان ضایعات ۳- کاهش خرابی های دستگاه ها ۴- مصرف مواد اولیه ۵- دوباره کاری ها ۶- میزان تولید مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. که نتایج زیر به دست آمد و نشان دهنده این موضوع بود که روش اثربخشی تجهیزات بر بهره وری سازمان موثر است و فرض پژوهش تایید می گردد.

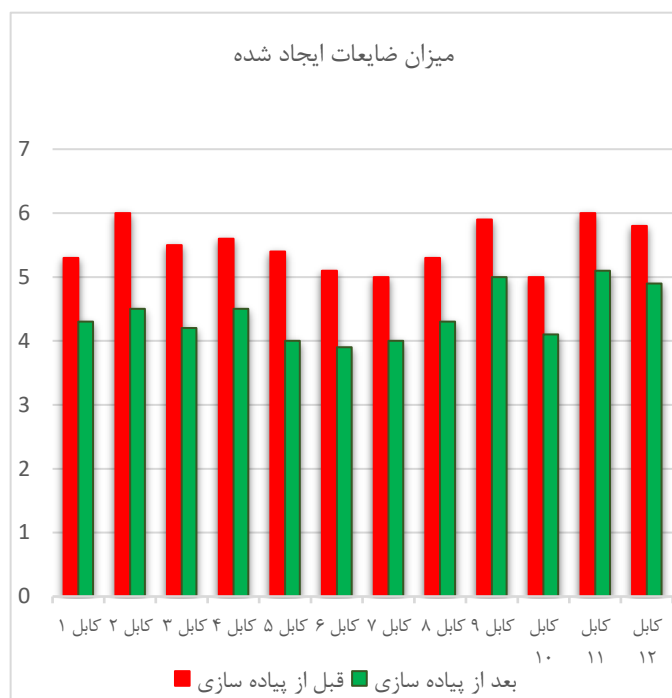
نمودار ۱. میزان کابل‌های تولید شده برحسب ضریبی از متراژ



جدول ۱. میزان کابل‌های تولید شده برحسب ضریبی از متراژ

سرعت تولید ۱۰۰۰ متر کابل			
نام کابل	قبل از پیاده سازی (واحد زمانی)	بعد از پیاده سازی (واحد زمانی)	تفاوت
کابل ۱	۴.۹	۵.۷	+۱۴٪
کابل ۲	۵	۵.۶	+۱۱٪
کابل ۳	۴.۵	۵.۳	+۱۵٪
کابل ۴	۴.۴	۵	+۱۲٪
کابل ۵	۴.۱	۴.۶	+۱۱٪
کابل ۶	۵	۵.۹	+۱۵٪
کابل ۷	۴.۸	۵.۶	+۱۴٪
کابل ۸	۴.۴	۵	+۱۲٪
کابل ۹	۴.۲	۵.۱	+۱۸٪
کابل ۱۰	۴.۷	۵.۵	+۱۵٪
کابل ۱۱	۴.۶	۵.۴	+۱۵٪
کابل ۱۲	۴.۵	۵.۴	+۱۷٪

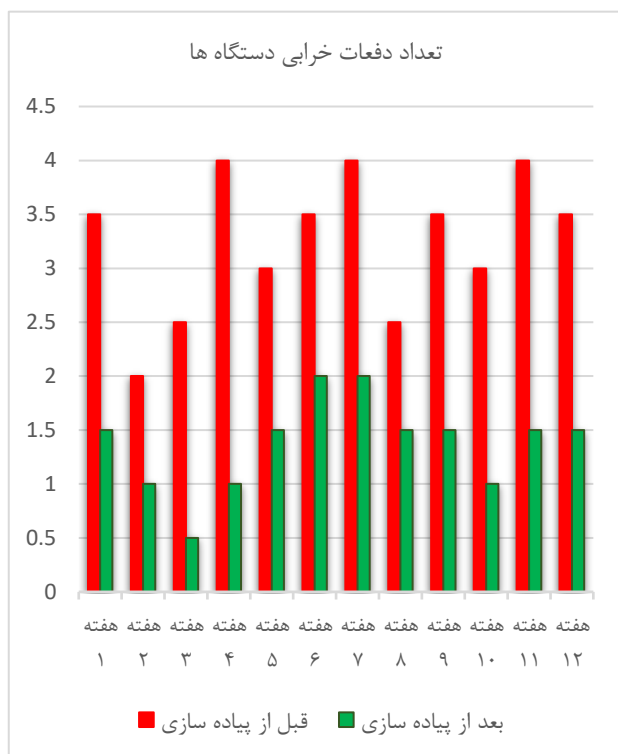
نمودار ۲. میزان ضایعات ایجاد شده برحسب ضریبی از کیلوگرم



جدول ۲. میزان ضایعات ایجاد شده برحسب ضریبی از کیلوگرم

میزان ضایعات ایجاد شده			
نام کابل	قبل از پیاده سازی (ضریبی از KG)	بعد از پیاده سازی (ضریبی از KG)	تفاوت
کابل ۱	۵.۳	۴.۳	+۱۹٪
کابل ۲	۶	۴.۵	+۲۵٪
کابل ۳	۵.۵	۴.۲	+۲۰٪
کابل ۴	۵.۶	۴.۵	+۲۰٪
کابل ۵	۵.۴	۴	+۲۶٪
کابل ۶	۵.۱	۳.۹	+۲۴٪
کابل ۷	۵	۴	+۲۰٪
کابل ۸	۵.۳	۴.۳	+۱۹٪
کابل ۹	۵.۹	۵	+۱۵٪
کابل ۱۰	۵	۴.۱	+۱۸٪
کابل ۱۱	۶	۵.۱	+۱۵٪
کابل ۱۲	۵.۸	۴.۹	+۱۶٪

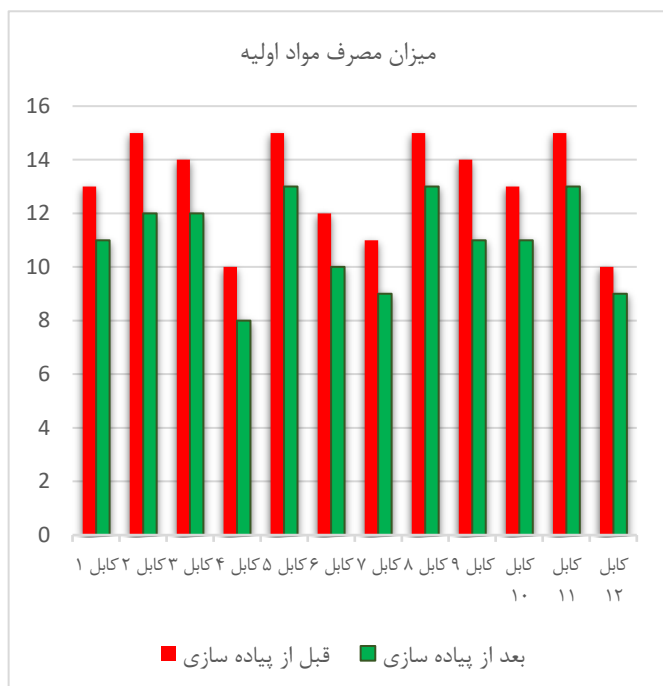
نمودار ۳. تعداد دفعات خرابی دستگاه های کل کارخانه بر حسب ضریبی از دفعات



جدول ۳. تعداد دفعات خرابی دستگاه های کل کارخانه بر حسب ضریبی از دفعات

تعداد دفعات خرابی دستگاه های کل کارخانه			
نام کابل	قبل از پیاده سازی (ضریبی از دفعات)	بعد از پیاده سازی (ضریبی از دفعات)	تفاوت
هفته ۱	۳.۵	۱.۵	+۵۷٪
هفته ۲	۲	۱	+۵۰٪
هفته ۳	۲.۵	۰.۵	+۸۰٪
هفته ۴	۴	۱	+۷۵٪
هفته ۵	۳	۱.۵	+۵۰٪
هفته ۶	۳.۵	۲	+۴۳٪
هفته ۷	۴	۲	+۴۰٪
هفته ۸	۲.۵	۱.۵	+۵۷٪
هفته ۹	۳.۵	۱.۵	+۵۷٪
هفته ۱۰	۳	۱	+۶۶٪
هفته ۱۱	۴	۱.۵	+۶۳٪
هفته ۱۲	۳.۵	۱.۵	+۵۷٪

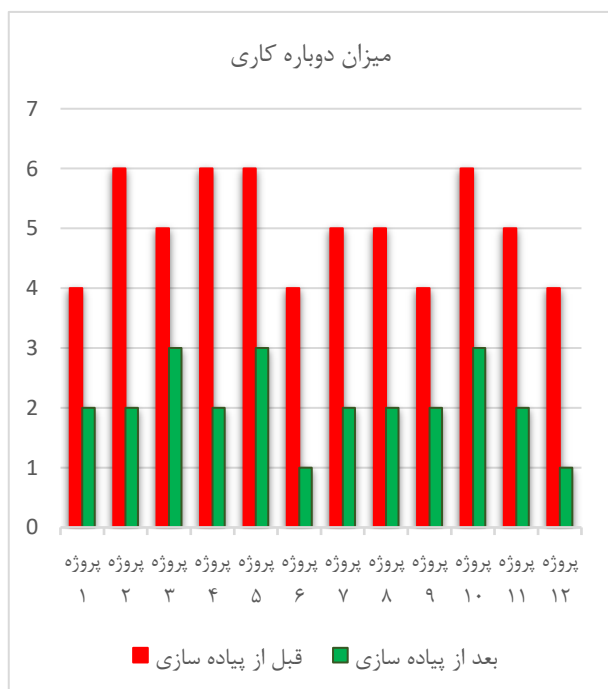
نمودار ۴. میزان مصرف مواد اولیه برحسب ضریبی از کیلوگرم



جدول ۴. میزان مصرف مواد اولیه برحسب ضریبی از کیلوگرم

تفاوت	بعد از پیاده سازی (ضریبی از کیلوگرم)	قبل از پیاده سازی (ضریبی از کیلوگرم)	زمان بعد از پیاده سازی
+۱۵٪	۱۱	۱۳	کابل ۱
+۲۰٪	۱۲	۱۵	کابل ۲
+۱۴٪	۱۲	۱۴	کابل ۳
+۲۰٪	۸	۱۰	کابل ۴
+۱۳٪	۱۳	۱۵	کابل ۵
+۱۷٪	۱۰	۱۲	کابل ۶
+۱۸٪	۹	۱۱	کابل ۷
+۱۳٪	۱۳	۱۵	کابل ۸
+۱۷٪	۱۱	۱۴	کابل ۹
+۲۲٪	۱۱	۱۳	کابل ۱۰
+۱۳٪	۱۳	۱۵	کابل ۱۱
+۱۰٪	۹	۱۰	کابل ۱۲

نمودار ۵. میزان دوباره کاری در پروژه های مشابه

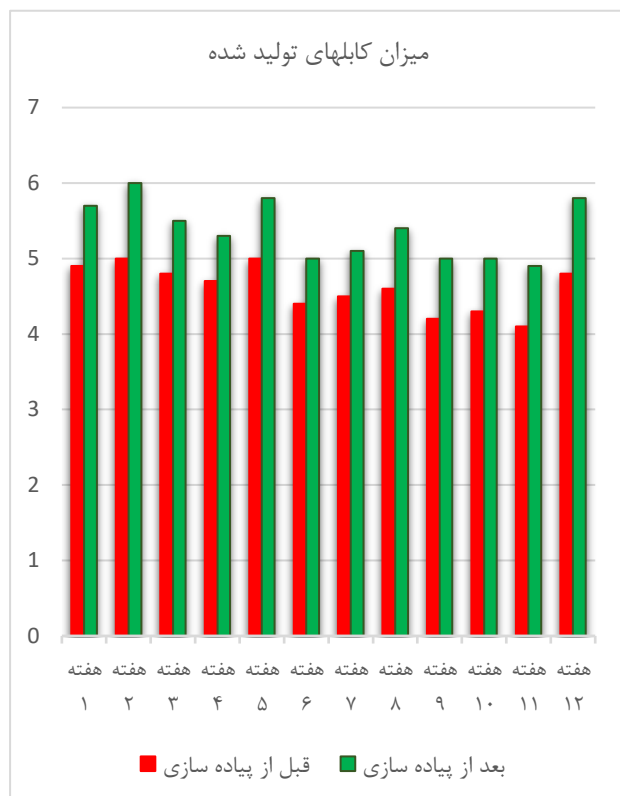


جدول ۵. میزان دوباره کاری در پروژه های مشابه

تفاوت	بعد از پیاده سازی (ضریبی از دفعات)	قبل از پیاده سازی (ضریبی از دفعات)	زمان بعد از پیاده سازی
+۵۰٪	۲	۴	پروژه ۱
+۶۷٪	۲	۶	پروژه ۲
+۴۰٪	۳	۵	پروژه ۳
+۶۷٪	۲	۶	پروژه ۴
+۵۰٪	۳	۶	پروژه ۵
+۷۵٪	۱	۴	پروژه ۶
+۶۰٪	۲	۵	پروژه ۷
+۶۰٪	۲	۵	پروژه ۸
+۵۰٪	۲	۴	پروژه ۹
+۵۰٪	۳	۶	پروژه ۱۰
+۶۰٪	۲	۵	پروژه ۱۱
+۷۵٪	۱	۴	پروژه ۱۲

نمودار ۶. میزان کابل‌های تولید شده برحسب ضریبی از متر

جدول ۶. میزان کابل‌های تولید شده برحسب ضریبی از متر



میزان کابل‌های تولید شده برحسب ضریبی از مترائ			
تفاوت	بعد از پیاده سازی (ضریبی از مترائ)	قبل از پیاده سازی (ضریبی از مترائ)	هفته بعد از پیاده سازی
+۰.۱۴	۵.۷	۴.۹	هفته ۱
+۰.۱۷	۶	۵	هفته ۲
+۰.۱۳	۵.۵	۴.۸	هفته ۳
+۰.۱۲	۵.۳	۴.۷	هفته ۴
+۰.۱۴	۵.۸	۵	هفته ۵
+۰.۱۲	۵	۴.۴	هفته ۶
+۰.۱۲	۵.۱	۴.۵	هفته ۷
+۰.۱۵	۵.۴	۴.۶	هفته ۸
+۰.۱۶	۵	۴.۲	هفته ۹
+۰.۱۴	۵	۴.۳	هفته ۱۰
+۰.۱۶	۴.۹	۴.۱	هفته ۱۱
+۰.۱۷	۵.۸	۴.۸	هفته ۱۲

این پژوهش مثال خوبی است برای سایر کارخانه های تولیدی ایران که

چگونه و چه عواملی می تواند باعث ایجاد بهبود در بهره وری سازمانشان می شود. لازم به ذکر است در این در این پژوهش فقط به چند عامل در زمینه اثربخشی تجهیزات که باعث بهبود در بهره وری سازمان می شوند ، پرداخته شده است و در پژوهش های دیگر می توان سایر عوامل که باعث بهبود بهره وری میگردد یا تاثیر اثربخشی تجهیزات بر سایر فاکتور های تاثیر گذار بر سازمان پرداخت و به چالشهایی که باعث کاهش در بهره وری در سازمانها می شوند نیز مورد بحث و تحقیق قرار گیرند.

فهرست منابع

طالقانی، غ.، تنمعی، م.، فرهنگی، ع.، زرین نگار، م. (۱۳۹۰). «بررسی عوامل موثر بر افزایش بهره وری»، مدیریت دولتی، ۷(۳)، ۱۱۵-۱۳۰.

سلیمانی، ج.، سیدجوادین، ر.، شاهحسینی، م. (۱۳۹۹). «طراحی مدل توسعه شایستگی رهبری مدیران صنعت فولاد با استفاده از نظریه برخاسته از داده ها»، فصلنامه مدیریت منابع انسانی در صنعت نفت، ۱۱(۴۳)، ۱۰۹-۱۳۸.

محمدیان، ب. (۱۴۰۰). «شناسایی عوامل موثر بر ارتقا بهره وری منابع انسانی»، نشریه صنعت لاستیک سازی ایران، ۲۶(۱۰۴)، ۵۱-۶۱.

مظفری، م.، بهداد، م. (۱۳۹۷). «راهکارهای بهبود شاخص اثر بخشی کلی تجهیزات در صنایع تولیدی»، اولین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در مدیریت کسب و کار و حسابداری.

نیلی پور طباطبایی، ا.، رستم زاده، ع.، رستم زاده، م. (۱۳۸۹). «بررسی تأثیر شش ضایعه عمده صنعت بر اثر بخشی کلی تجهیزات در کارخانه نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه»، مجله علمی - پژوهشی مدیریت تولید و عملیات، ۱(۱)، ۷۱-۸۶.

نصیری، ن. (۱۳۹۹). «نقش آموزش بر بهره وری نیروی انسانی»، فصلنامه رهیافتی در مدیریت بازرگانی، ۱(۲)، ۳۰-۴۴.

طاهری، ش. (۱۳۹۳). «بهره وری و تجزیه تحلیل آن در سازمان ها»، نشر هستان.

Narses, A. (2013). Case Study: Production and OEE improvement for an 800 tons stamping press.

Zhu, X. (2011). «Analysis and improvement of enterprise's equipment effectiveness based on OEE». In Electronics, Communications and Control (ICECC), International Conference on 4167-4171.

اهمیت مدیریت دارایی‌های فیزیکی در شرکت آب منطقه‌ای با رویکرد نظریه بازی

سینا مرادی^{۱*}

کارشناسی ارشد علوم اقتصادی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه ارومیه، کارشناس اقتصادی هلدینگ اتراب

علیرضا بیدار^۲

کارشناس ارشد سازه، رئیس گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی

بابک نیک‌نیا^۳

کارشناس ارشد سازه، معاون برنامه‌ریزی شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی

چکیده

امروزه یکی از چالش‌های جدی که شرکت‌های آب منطقه‌ای با آن روبه‌رو هستند، مسئله تضاد منافع بین شرکت‌های آب منطقه‌ای و ذینفعان (کارکنان، مشتریان، جامعه، سهامداران، شرکای تجاری و غیره) می‌باشد، زیرا آن‌ها از یک طرف با کمبود منابع آب مواجه هستند و از طرف دیگر باید رضایت ذینفعان را برطرف نمایند. ما در این تحقیق این تضاد منافع را با رویکرد نظریه بازی‌ها مورد بررسی قرار دادیم. در این بازی دو بازیکن به نام‌های شرکت آب منطقه‌ای و ذینفعان وجود دارند. هر دو بازیکن در این بازی دو استراتژی به نام‌های همکاری و عدم همکاری دارند. استراتژی همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن تمایل به پذیرفتن شرایط طرف مقابل را دارد و استراتژی عدم همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن علاقه‌ای به پذیرش شرایط طرف مقابل را ندارد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که هر دو بازیکن در حال عادی استراتژی عدم همکاری را انتخاب می‌کنند. چراکه اگر یکی از بازیکنان استراتژی همکاری را انتخاب کند برای بازیکن دیگر انتخاب استراتژی عدم همکاری می‌تواند بیشترین عایدی را بدست آورد. برای اینکه بازیکنان استراتژی همکاری را انتخاب کنند، باید ریسک‌پذیر باشند. ولی برای رسیدن به این تعادل باید مکانیزم‌هایی طراحی شود که هر دو بازیکن از آن منتفع شوند. یکی از این مکانیزم‌های مهم، مدیریت دارایی‌های فیزیکی است. چراکه هدف اصلی در مدیریت دارایی‌های فیزیکی، کاهش هزینه، مدیریت ریسک و توانمندسازی سازمان در رسیدن به اهداف خود با استفاده از بهره‌وری و ارزش‌آفرین از دارایی‌ها و همچنین افزایش رضایتمندی ذینفعان است.

کلمات کلیدی: مدیریت دارایی‌های فیزیکی، شرکت آب منطقه‌ای، ذینفعان، نظریه بازی‌ها، تعادل نش

۱- مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌هایی که امروزه با آن مواجه هستیم، مصرف بیش از ظرفیت منابع آب‌های زیرزمینی است. کمبود آب در ایران یکی از عوامل اصلی محدود کننده توسعه فعالیت‌های اقتصادی در دهه‌های آینده به شمار می‌رود (نادری مایوان، ۱۴۰۰). چالشی که امروزه شرکت‌های آب منطقه‌ای با آن رو به رو هستند این است که با وجود محدودیت منابع آب باید رضایت ذینفعان را بدست بیاورند چراکه هدف اصلی شرکت‌های آب منطقه‌ای خدمت و رضایت مشتریان و بهره‌برداران منابع آبی، پیمانکاران، نمایندگان جامعه و سایر ذینفعان شرکت است، علاوه بر این تامین منابع آب، یکی از نگرانی‌های اصلی دولت‌ها است که مدیران را به اتخاذ تصمیم‌های موثر و پایدار با توجه به عوامل اصلی بروز بحران، همچون تغییرات اقلیمی، جمعیت، قوانین و مقررات و شیوه زندگی وادار کرده است. بنابراین مدیریت این عدم قطعیت‌ها در آینده ضروری و جدی است (حاجی قدیری و گودرزی، ۱۴۰۱). عضو اصلی و حیات‌بخش هر سازمان، مدیریت آن است. در یک تعریف جامع، مدیریت عبارت است از فراگرد به‌کارگیری موثر و کارآمد منابع مادی و انسانی بر مبنای یک نظام ارزشی پذیرفته شده که از طریق برنامه‌ریزی، سازماندهی، بسیج منابع و امکانات، هدایت و کنترل عملیات برای دستیابی به اهداف معین صورت می‌گیرد.

^۱ sina_moradi1993@yahoo.com +98-935-534-9912

^۲ Alireza.bidar20@gmail.com. +98-914-141-8358

^۳ Bani1351@gmail.com. +98-914-441-2034

تقریباً تمامی سیستم‌های آب از دارایی‌ها ساخته شده‌اند. این دارایی‌ها که سیستم‌های آب را تشکیل می‌دهند ارزش خود را به مرور زمان و با بالا رفتن سن سیستم یا خراب شدن از دست می‌دهند. هرگونه تأثیر نامطلوب بر زیرساخت دارایی، نه تنها از منظر مالی، بلکه از نظر اجتماعی و زیست محیطی نیز می‌تواند تأثیر نامطلوب بر سازمان داشته باشد (استادی و طلوعی، ۱۴۰۱). از آنجاییکه بحث زیرساخت در شرکت‌های آب منطقه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است، بنابراین مدیریت این دارایی‌ها حائز اهمیت است. مدیریت دارایی زیرساخت عبارتست از به‌کارگیری تکنیک‌های مدیریت دارایی برای بهره‌برداری بهتر از زیرساخت‌ها یعنی رسیدن به سطح خدمت بالاتر هم‌زمان با کم کردن هزینه‌ها و افزایش طول عمر زیرساخت‌ها. مدیریت دارایی زیرساخت‌ها بیشتر بر زیرساخت‌های فیزیکی همچون راه، پل و شبکه آب متمرکز است. صاحبان صنایع بزرگ می‌توانند با مدیریت دارایی‌های فیزیکی، امتیاز رقابتی خود را افزایش دهند تا ضمن کاهش هزینه‌ها و با افزایش بازده منابع مالی و انسانی سهم بیشتری از بازار را در اختیار بگیرند. سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی روش جدید، تلفیقی و جامعی است که اهداف مذکور را محقق نموده و می‌تواند در عین بیشینه کردن سطح عملکرد یوتیلیتی‌ها موجب صرفه جویی اقتصادی شود. این روش بر اساس مدیریت همه دارایی‌های فیزیکی شرکت عمل می‌کند (نیکجو و همکاران، ۱۳۸۸).

امروزه بحث مدیریت دارایی‌های فیزیکی به عنوان یک مسئله مهم در سازمان‌های صنعتی مطرح می‌باشد. هدف از مدیریت دارایی ارائه بهترین خدمات با پایین‌ترین هزینه و ریسکی قابل قبول می‌باشد که این امر نیز تنها با طراحی یک سیستم برای مدیریت و نگهداشت دارایی‌ها میسر است. این چنین سیستمی شامل اجزایی از جمله داده‌های قابل اعتماد و مدلی برای تعریف نقش‌ها در فرآیند مدیریت دارایی می‌باشد (بحرینی راد، ۱۳۹۵). مدیریت دارایی‌های فیزیکی به عنوان یک عامل راهبردی در دورنمای تجاری سازمان‌ها، موجب ارتقای سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات گردیده است (نیکبخت و ادب آوازه، ۱۴۰۱). همانطور که عنوان شد با وجود منابع محدود و نیازهای جامعه، تضاد منافع بین شرکت آب منطقه‌ای و ذینفعان بوجود می‌آید. در اقتصاد اصطلاحی به نام بهینه پارتو^۱ وجود دارد، به این معنا که تخصیص منابع و تامین نیازهای جامعه باید به گونه‌ای باشد که با توجه به محدودیت‌های موجود همگان وضعیتی پیدا کنند که نتوان بهتر از آن وضعیت تصور کرد. تخصیص منابع معمولاً باید با توجه به بهینه پارتو صورت بگیرد و به مبرم‌ترین نیازها بپردازد. یعنی سیستم باید منابع را طوری توزیع کند که اعتبار در اختیار، بین مصارف متعدد تقسیم شده و نیازها برطرف شود. در هر حال تخصیص منابع با توجه به محدودیت‌ها قابل بررسی است و هیچ جامعه‌ای بدون محدودیت نیست. از مزایای مدیریت دارایی‌های فیزیکی برای سازمان‌های صنعتی می‌توان به مواردی همچون بهبود وضعیت ایمنی و محیط‌زیست، کاهش هزینه‌های نگهداشت، افزایش بهره‌وری نیروی کار، کاهش هزینه‌های تعمیرات اساسی و حفظ دانش کارکنان اشاره کرد. اهمیت و تأثیر مدیریت دارایی‌های فیزیکی در افزایش بهره‌وری و کارایی است (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۹).

در جهان رقابتی امروز، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها عنصری کلیدی برای عملکرد بهتر سازمان‌ها و واحدهای تولیدی محسوب می‌شود. به همین دلیل، شرکت‌ها سعی دارند تا با اتخاذ سیاست‌های مناسب در زمینه مدیریت بهینه دارایی‌های فیزیکی خود، بیشترین بازدهی را از فرایند تولید خود حاصل کنند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری خود را به حداقل برسانند. توجه به این مسئله در صنایعی که دارایی در تماس مستقیم با مشتریان (دارایی بخشی از محصول) است دو چندان می‌شود، مانند شبکه انتقال و توزیع برق، آب، گاز و غیره. در دنیای واقعی با توجه به اینکه کمبود منابع طبیعی از جمله آب یک مسئله جدی است، همین موضوع باعث ایجاد تضاد منافع بین شرکت آب منطقه‌ای و ذینفعان می‌شود. چراکه ذینفعان انتظار دارند با صرف کمترین هزینه بیشترین بهره‌برداری را داشته باشند. در مقابل برای شرکت آب منطقه‌ای حالت بهینه این است که با صرف کمترین اقدامات، بیشترین عایدی را از ذینفعان بدست بیاورد. شاید در نگاه اول این تضاد منافع طبیعی به نظر برسد ولی با کمی دقت متوجه می‌شویم که در نهایت این تضاد منافع به ضرر اجتماع منجر خواهد شد و همچنین از طرف دیگر متوجه می‌شویم که هر دو طرف برای رسیدن به خواسته‌های خود حق انتخاب دارند. حال سوال این است که چگونه می‌توان به مرحله بهینه دست یافت که هر دو طرف راضی باشند؟

۲- بررسی پیشینه

افزایش مصرف آب و کمبود منابع آب، سبب شده است که بسیاری از کشورها به بهره‌برداری هر چه بیشتر از رودخانه‌های بین‌المللی و منابع آبی مشترک روی آورند. از اینرو پیش‌بینی می‌گردد که بحران کمبود آب، یک عامل کلیدی در تنش‌ها و تضادهای آتی در دنیا

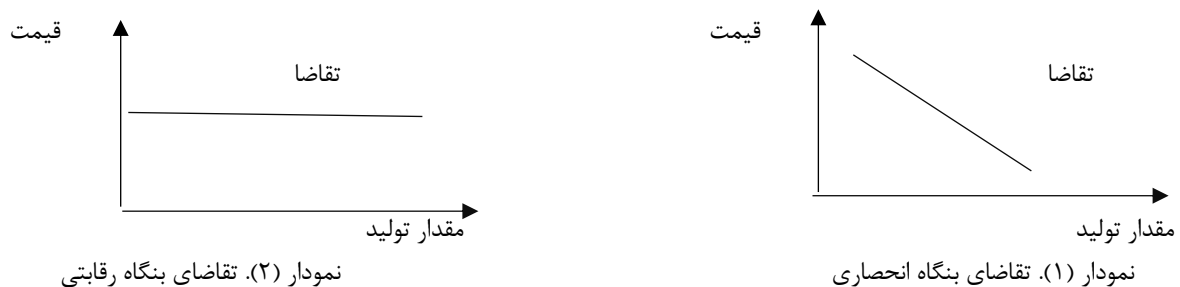
¹ Pareto

بوپژه منطقه غرب آسیا خواهد بود (میان آبادی، ۱۳۹۲). کشور ایران نیز در حال تجربه مشکلات جدی آب است، از این جهت شرکت‌های آب منطقه‌ای وظیفه مهمی را در اختیار دارند. از جمله فعالیت مهم آن‌ها شناخت، مطالعه، توسعه، حفاظت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب، تولید انرژی برق آبی، ایجاد، توسعه، بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات و سازه‌های آبی (به استثنای تأسیسات و سازه‌های مربوط به آب و فاضلاب) و برق آبی است. امروزه خدمات آبرسانی به صورت انحصار طبیعی^۱ است. انحصار طبیعی زمانی رخ می‌دهد که شرکتی بتواند تمام تقاضای بازار را با هزینه‌ای کمتر از ادغام شدن دو یا چند شرکت کوچک‌تر و تخصصی‌تر، تامین کند. صرفه‌های مقیاس و اثر شبکه‌ای دو نوع از موانع ورود به بازار به شمار می‌روند. شاخص‌های بازدهی نسبت به مقیاس و صرفه‌های ناشی از مقیاس دلیلی بر وجود انحصار طبیعی است (مرزبان و کریمی، ۱۳۹۱). از جمله مثال‌های بسیار مهم انحصار طبیعی می‌توان به آب لوله‌کشی‌شده اشاره کرد. راه‌اندازی سیستم لوله‌کشی در ابعادی گسترده، به سرمایه اولیه قابل توجهی احتیاج دارد. بنابراین، منطقی است که لوله‌کشی کردن آب آشامیدنی تنها در انحصار یک شرکت باشد انحصار طبیعی در اقتصاد به شرایطی گفته می‌شود که تولید یک بنگاه در یک صنعت، سودآورتر از تولید بیش از یک بنگاه در آن صنعت باشد. این مفهوم در صنایعی مانند توزیع برق، توزیع گاز، مخابرات و توزیع آب که در کشورهای مختلف تحت تنظیم مقررات قیمتی و غیرقیمتی قرار می‌گیرند، اهمیت بیشتری دارد (میرهاشمی دهنوی و همکاران، ۱۳۹۶). بنگاهی را بنگاه انحصاری می‌نامند که تنها همان بنگاه، فروشنده محصول باشد و آن محصول جانشین نزدیکی نداشته باشد. برخی از بنگاه‌ها، بخصوص در بخش خدمات شهری، به علت هزینه‌های سنگین ثابت و صرف شده اولیه و هزینه‌های نهایی نزولی، از نظر اقتصادی تنها در یک ساختار انحصاری کامل قادر به ادامه فعالیت هستند. شرکت‌های آب، برق، گاز و غیره از جمله این بنگاه‌ها محسوب می‌شوند. مشخصات بنگاه انحصاری این است که انحصارگر تولید کننده یکتای کالا است، با یک تقاضای نزولی مواجه است، قیمت‌گذار است، با تغییر مقدار تولید کالا، قیمت کالا را تغییر می‌دهد. هر بنگاهی (رقابتی یا انحصاری) مقدار تولید خود را طوری انتخاب می‌کند که سود بیشینه شود:

$$\pi = TR - TC \quad (1)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial Q} = \frac{\partial TR}{\partial Q} - \frac{\partial TC}{\partial Q} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، π سود کل، TR درآمد کل و TC هزینه کل هستند. درآمد کل (TR)، بنگاه رقابتی و انحصاری تفاوت دارد، چون با تابع تقاضای متفاوتی مواجه هستند. تقاضای بنگاه انحصاری و رقابتی در نمودارهای (۱) و (۲) بصورت زیر است:



تفاوت نمودار بنگاه انحصاری و رقابتی در این است که بنگاه انحصاری قیمت‌گذار است، بنابراین منحنی تقاضا از دید بنگاه همان منحنی تقاضای بازار است ولی بنگاه رقابتی قیمت پذیر است. بنابراین منحنی تقاضا از دید بنگاه یک خط افقی (قیمت ثابت) خواهد بود. شرکت‌های خدمات‌رسان عمومی اغلب تک قطبی هستند. شرکت‌های آب منطقه‌ای از جمله بنگاه‌های اجتماعی، اقتصادی نوین می‌باشند که بر اساس قانون تشکیل خود به عنوان واحدهایی با شخصیت مستقل حقوقی و در قالب قانون تجارت برای تحقق برخورداری آحاد جامعه از یکی از زیربنایی‌ترین خدمات عمومی یعنی تامین آب شکل گرفته‌اند. مسئله‌ای که باید به آن توجه کرد این است که سازمانی سرآمد است که بتواند رضایت کلیه ذینفعان خود را برآورده نماید. ذینفعان سازمان عبارتند از: کارکنان، مشتریان، جامعه، سهامداران، شرکای تجاری و کلیه افراد و سازمان‌هایی که از سود سازمان منتفع و از ضرر آن متضرر می‌گردند. درباره سازمان چه معیارهایی به کار می‌گیرند و چگونه سازمان در قبال این معیارها اقدام می‌کند احتمال اینکه سازمان بداند برای راضی نمودن ذینفعان

¹ Natural Monopoly

کلیدی خود چه کارهایی باید انجام بدهد بسیار اندک است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۶). با توجه به اینکه دارایی‌ها در صنایع و شرکت‌های بزرگ در تماس مستقیم با مشتریان هستند بنابراین بحث مدیریت این دارایی‌ها اهمیت پیدا می‌کند تا از این طریق بتوانند با افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و مدیریت ریسک هم منابع را مدیریت کنند و هم اینکه بتوانند رضایت ذینفعان را بدست آورند. یکی از این مکانیسم‌ها را می‌توان مدیریت دارایی‌های فیزیکی نام برد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۲-۱- تعریف مدیریت دارایی‌های فیزیکی

مدیریت دارایی موضوع جدیدی نیست و مردم و سازمان‌ها از دیرباز دارایی‌های خود را مدیریت می‌کرده‌اند. با این حال در رابطه با دارایی‌های فیزیکی، استفاده از اصطلاح "مدیریت دارایی" از دهه ۱۹۸۰ میلادی در بخش خصوصی و دولتی در بسیاری از کشورها رایج شد. در تعریف مدیریت دارایی‌های فیزیکی مجموعه متنوعی از تعاریف ارائه شده است. استاندارد ایزو ۵۵۰۰۰ مدیریت دارایی‌های فیزیکی را به صورت "مجموعه اقدامات همراستا و هماهنگ سازمان در ارزش آفرینی از دارایی‌ها" تعریف می‌کند. مدیریت دارایی‌های فیزیکی به صورتی دیگر و شرح بیشتر در استاندارد PAS 55¹ به صورت "شیوه‌ها و فعالیت‌هایی منظم و هماهنگ که سازمان از طریق آن دارایی‌ها و نیز هزینه‌ها و ریسک‌ها و عملکرد آن‌ها را در طی چرخه عمر دارایی‌ها، با هدف تحقق برنامه استراتژیک سازمانی، به‌طور بهینه و پایدار مدیریت می‌کند." تعریف شده است در هر دو این تعاریف از مدیریت دارایی‌های فیزیکی به اقداماتی همراستا برای بهینه‌سازی ارزش‌ها (سطح مطلوب ریسک، هزینه‌ها و عملکرد دارایی‌ها) بر اساس اهداف سازمانی (رضایت ذینفعان، برآورد انتظارات مالی، توجه به اصول توسعه پایدار) تاکید شده است. به صورت خلاصه، مدیریت دارایی‌های فیزیکی اهداف سازمان را به صورت تصمیمات، برنامه‌ها و فعالیت‌هایی در حوزه‌های مرتبط به دارایی‌های فیزیکی، با استفاده از روش‌های ریسک محور، تفسیر می‌کند (رضایی و همکاران، ۱۳۸۶). مدیریت دارایی‌های فیزیکی با بازنگری و ارتقای فرایندها، رویه‌ها و عملکرد دارایی‌ها، بهبود عملکرد مالی، مدیریت ریسک، بهبود خدمات و محصولات، بهبود رضایتمندی مشتریان، افزایش ایمنی تجهیزات و کمک به مدیران در تصمیم‌گیری‌های آگاهانه برای سرمایه‌گذاری بر روی دارایی‌ها، کمک شایانی به اثربخشی، کارایی و بهره‌وری کرده و همچنین دستیابی به اهداف عینی سازمان‌ها را بهبود می‌دهد (طیسی و همکاران، ۱۳۹۸). مدیریت دارایی‌های فیزیکی، حرکت بر مسیر بهینه با در نظر داشتن فاکتورهای هزینه، ریسک و بهره‌وری در چرخه عمر تجهیزات در سازمان بوده که تجهیزات می‌بایست در لایه‌های مختلف تعریف و مدیریت شوند، لذا ایجاد سیستم مدیریت دارایی‌ها، تصمیمی استراتژیک و مهم برای سازمان است (راشدی و قاسمی، ۱۳۹۶). مزایای مدیریت دارایی‌های فیزیکی برای سازمان عبارتند از: بهبود عملکرد مالی، تصمیم‌گیری آگاهانه برای سرمایه‌گذاری بر روی دارایی‌ها، مدیریت ریسک، بهبود خدمات، محصولات و خروجی‌های سازمان، اثبات مسئولیت اجتماعی، اثبات انطباق با الزامات، بهبود اعتبار، بهبود پایداری سازمان، بهبود اثربخشی و کارایی، کنترل بودجه بهتر و موثرتر، کاهش هزینه‌های دوره عمر دارایی‌ها، افزایش بازگشت سرمایه‌گذاری و رشد، ارتقای عملکرد زیست محیطی، ایمنی و سلامت، پشتیبانی موثر در فرآیند تصمیم‌گیری، مهندسی مجدد سازمان، مدیریت ریسک، افزایش رضایتمندی مشتریان و ارتقاء شهرت کسب و کار و افزایش تولید و بهره‌وری نیروی کار (طیسی و همکاران، ۱۳۹۸). شرکت‌های مجموعه آب منطقه‌ای همواره به عنوان مجموعه‌ای کارشناسی و موثر مطرح بوده و آگاهی به ذی‌نفعان در اولویت این شرکت باید قرار بگیرد. الزامات پیاده‌سازی در خصوص استاندارد نمودن مدیریت دارایی‌های فیزیکی در این شرکت‌ها ضروری است با استقرار و تدوین روشهای اجرایی، دستورالعمل‌ها و پایش فرایندها می‌توان شاهد رشد و توسعه این شرکت‌ها و همچنین بهبود خدمات به ذینفعان شد.

۲-۲- پیشینه تحقیق

نایب و باغی‌شنی (۱۳۹۹) در مقاله‌ای با عنوان "تعیین استراتژی استقرار سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی"، به نحوه و چگونگی تعیین استراتژی استقرار سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی در شرکت‌های توزیع برق پرداختند. بر اساس استاندارد ISO ۵۵۰۰۰، نیازمندی‌های یک سیستم مدیریت دارایی‌ها بصورتی گروه‌بندی شده‌اند که سازگار با اصول و مبانی مدیریت دارایی‌ها باشد. بدین منظور فصل‌های ۴ الی ۱۰ استاندارد که به ترتیب با عنوان زمینه‌سازی در سازمان، رهبری، برنامه‌ریزی، پشتیبانی، عملکرد، ارزیابی عملکرد و بهبود نامگذاری شده‌اند، می‌توانند ما را در استقرار سیستم مدیریت دارایی‌ها در شرکت، کمک نمایند. در این مقاله سعی شده است تجربیات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی به نحو موثر و مطلوبی جمع‌بندی شده و گامهای عملی استقرار سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی در این شرکت به تصویر کشیده شود.

¹ Publicly Available Specification

آقای و صفری‌ازان اخاری (۱۳۹۹)، در مقاله‌ای با عنوان "رتبه‌بندی مؤلفه‌های مدیریت دارایی فیزیکی بر اساس شاخص‌های عملکرد و نگهداری و تعمیرات در شرکت نفت مناطق مرکزی ایران منطقه بندرعباس"، با هدف رتبه‌بندی مؤلفه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی بر مبنای شاخص‌های سیستم نگهداری و تعمیرات به پژوهش پرداختند. جامعه آماری تحقیق حاضر شامل کلیه کارکنان در شرکت نفت مناطق مرکزی ایران منطقه بندرعباس بود که تعداد ۱۵ نفر از آنها به عنوان گروه خبرگان و نمونه آماری، جهت انجام مصاحبه و توزیع پرسشنامه انتخاب گردید. جهت جمع آوری اطلاعات از پرسشنامه‌ای که بر اساس ادبیات تحقیق گردآوری شده، طراحی شده بود، استفاده گردید و در نهایت با استفاده از روش دلفی و تکنیک AHP داده‌های به دست آمده تحلیل شدند. میزان روایی پرسشنامه با استفاده از تحلیل صوری مورد تأیید قرار گرفت و میزان آلفای کرونباخ برای متغیرهای مورد بررسی محاسبه گردید که میزان قابل قبولی از سطح پایایی می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از بین مؤلفه‌های مرتبط با سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی به ترتیب در رتبه اول مدیریت دارایی‌های فیزیکی، در رتبه دوم مدیریت کار در واحد نگهداری و تعمیرات، در رتبه سوم سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی، در رتبه چهارم تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات، در رتبه پنجم روش‌های بهینه‌سازی فرآیندهای نگهداری و تعمیرات، در رتبه ششم رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات، در رتبه هفتم روش‌های مبتنی بر کارگروهی و در رتبه هشتم و آخر نیروی کار واحد نگهداری و تعمیرات قرار دارند.

جعفری و محمودی (۱۳۹۹)، در مقاله‌ای با عنوان "مقایسه مدل‌های مدیریت دارایی فیزیکی و تعیین نقشه راه مدیریت دارایی‌های فیزیکی با استفاده از روش DEMATEL مطالعه موردی میدان نفتی سروک آذر"، به این موضوع پرداختند که مدیریت دارایی‌های فیزیکی، سازمان را قادر می‌سازد تا نیاز به دارایی‌ها و سیستم‌های دارایی در سطوح مختلف و همچنین عملکرد آنها را بیازماید. بعلاوه، مدیریت دارایی کاربرد رویکردهای تحلیلی برای مدیریت یک دارایی در طول مراحل مختلف چرخه عمر آن (که می‌تواند از مرحله احساس نیاز به دارایی شروع و تا مرحله اسقاط آن ادامه یابد و شامل مدیریت هرگونه مسئولیت محتمل بعد از اسقاط باشد) را فراهم می‌کند. مهمترین عوامل در امر پیاده‌سازی عبارتند از: حمایت مدیریت ارشد سازمان، ایجاد ساختار سازمانی مدیر دارایی‌های فیزیکی، ترویج فرهنگ مدیریت دارایی‌های فیزیکی به منظور مشارکت حداکثری کارکنان و اجرای فراگیر سیستم مکانیزه مدیریت نگهداری و تعمیرات. همچنین در اولین گام نیز می‌بایست جهت ارزیابی سازمان و آموزش کارکنان در تمام سطوح از مشاوره مجرب در زمینه صنایع با تخصص ویژه در نگهداری و تعمیرات استفاده نمود و سپس علاوه بر داشتن چارچوب و مدل در تدوین نظام‌نامه، با بهره‌گیری از استاندارد ایزو ۵۵۰۰۱ در تدوین نقشه راه و استفاده از مدل ارتباط فرایندهای استراتژیک سازمان با وضعیت نگهداری تجهیزات مهم سازمان، نسبت به پیاده‌سازی مدیریت دارایی‌های فیزیکی اقدام نمود. هدف از این مقاله مقایسه مدل‌های رایج مدیریت دارایی فیزیکی سازمان و ارائه روش کلی جهت تعیین نقشه راه مدیریت دارایی‌های فیزیکی سازمان با استفاده از روش DEMATEL می‌باشد.

زهرایی (۱۳۹۹)، در مقاله‌ای با عنوان "مدیریت ریسک در مدیریت دارایی فیزیکی راه در ایران"، به این موضوع پرداخت که از مسائل پیش‌رو در حمل‌ونقل جاده‌ای که سهم عمده‌ای از جابجایی را برعهده دارد، مدیریت ریسک‌ها به منظور پاسخ‌گویی به تقاضا است. این امر سبب می‌شود تا نرخ استهلاک دارایی‌های فیزیکی کنترل شده و ریسک ارائه خدمت ایمن، ارزان، سازگار با محیط زیست و پایدار نیز در پایین‌ترین سطح قرار گیرد. در این خصوص دو دیدگاه وجود دارد. دیدگاه سنتی که تمامی فازهای طول عمر دارایی فیزیکی راه (ایجاد، بهره‌برداری و اسقاط) را به صورت جداگانه مدیریت می‌کند. دیدگاه دوم، نگاه یکپارچه به مدیریت ریسک‌ها در تمامی طول عمر دارایی‌های فیزیکی راه است. در این مقاله با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای به همراه نقطه نظرات کارشناسان، انواع ریسک‌ها در قالب مدیریت دارایی فیزیکی راه، شناسایی، رتبه‌بندی و راهکارهای مدیریت آن ارائه شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که تاکنون ۵۵ ریسک در ۶ گروه برای طول عمر دارایی فیزیکی راه، شناسایی شده است. در ارزیابی ریسک‌ها، بیشترین ریسک مربوط به ریسک گروه مشارکت ذینفعان و کمترین، به گروه رویدادهای خارج از حیطه سازمان مربوط است. در کنار آن، کمترین رتبه ریسک مربوط به سرقت و بیشترین رتبه عدم توجه کافی به تعمیر و نگهداری است. داشتن سیستم یکپارچه توسعه و بهره‌برداری، برنامه مالی پایدار، داشتن سطح سرویس و آموزش نیروی انسانی از جمله راه کارهای مدیریت ریسک نیز عنوان شده است.

عبدیان و وسیلی (۱۴۰۰)، در مقاله‌ای با عنوان "تحلیل عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرکت فولاد مبارکه با رویکرد مدیریت دارایی‌های فیزیکی و با استفاده از ماتریس خانه کیفیت"، به موضوع مدیریت دارایی‌های فیزیکی پرداختند. این پژوهش حاضر از نظر هدف توسعه‌ای- کاربردی و از حیث ماهیت داده‌ها کمی- کیفی است. هدف از این پژوهش تحلیل عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرکت فولاد مبارکه اصفهان، با رویکرد مدیریت دارایی‌های فیزیکی و با

استفاده از ماتریس خانه کیفیت است. در پژوهش حاضر برای جمع‌آوری داده‌ها از دو پرسشنامه و یک فرم مربوط به ماتریس خانه کیفیت جهت نظرسنجی‌های لازم استفاده شده است. جامعه آماری مربوط به پرسشنامه اول را اعضای کمیته تعالی دانش نت شرکت فولاد مبارکه و جامعه آماری مربوط به پرسشنامه دوم را خبرگان حوزه نت در شرکت فولاد مبارکه تشکیل می‌دهند. در این پژوهش جهت بررسی روایی پرسشنامه‌ها از روایی محتوایی و جهت تایید پایایی پرسشنامه‌ها از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد از میان ۱۵ عامل شناسایی شده مؤثر بر پیاده‌سازی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان، عوامل «مشارکت پرسنل»، «حمایت دائم مدیر ارشد» و «وجود یک CMMS متناسب با سازمان» به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم پراهمیت‌ترین عوامل قرار دارند.

اوکو و همکاران^۱ تحقیقاتی در خصوص ارتقاء سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات به سیستم مدیریت دارایی فیزیکی به دلیل کاستی‌ها در مدیریت نگهداری که باعث شده است، چندین سازمان تولید خود را از دست داده و آسیب رساندن به انسان‌ها، محیط زیست و دارایی‌های فیزیکی انجام گیرد. نتیجه این تحقیق بیان می‌کند که در صنایع فرایندی، درصد قابل توجهی از حوادث عمده به دلیل ضعف سیستم نگهداری و تعمیرات در ارتباط با دارایی‌های بحرانی شناخته شده است. در همین رابطه برای بهبود مدیریت نگهداری و تعمیرات دارایی برای کمک به بهینه‌سازی ارزش کل دارایی در کل دوره‌ی عمر سرمایه مورد نیاز است. برای این منظور، سازمان استاندارد بین‌المللی، ایزو ۵۵۰۰۰ را همراه با سیستم مدیریت آن برای توانایی در افزایش ارزش مدیریت نگهداری در سال ۲۰۱۴ به دنیا معرفی نموده است.

هوندا و همکاران^۲ (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای بر روی روش مطالعه مدیریت دارایی در راه آهن مطالعه کرده‌اند و یک ابزار برای مطالعه تجربی مدیریت دارایی‌ها را ساخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش مدیریت دارایی‌ها برای یافتن سیاست نگهداری و تعمیرات اثربخش از لحاظ هزینه بسیار سودمند است.

کامپوس و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای به این موضوع پرداختند که برای مدیریت دارایی‌ها یک چارچوب تحلیل داده‌ها را معرفی کردند. یافته‌های تحقیق آنها نشان داد که ایمنی و قابلیت اطمینان تجهیزات اثر بسیار مهمی در شرکت‌های امروزه تولیدی دارند. علاوه بر آن، عقاید مشتریان و عملکرد خدمات و محصولات به عنوان بهبود مزیت رقابتی بسیار حیاتی هستند. در نهایت عملکرد موفق مدیریت دارایی‌ها نقش مهمی در صنایع تولیدی که برای موفقیت بیشتر به پشتیبانی تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات نیاز دارند اجرا می‌کنند. مالتیک و همکاران^۴ (۲۰۱۸)، در مقاله‌ای با عنوان "توسعه یک مدل دارایی فیزیکی پیوند دهنده عملکرد مدیریت تا پایداری: یک تحقیق تجربی"، به بررسی رابطه بین مدیریت دارایی فیزیکی (PAM) پرداختند. شیوه‌ها و عملکرد پایداری چارچوبی از ساختارهای مرتبط با یکدیگر بر اساس توسعه داده شده است. بر روی ادبیات موجود و در نتیجه از طریق مطالعه تجربی مورد آزمایش قرار گرفته است. داده‌های نظرسنجی از سازمان‌های فعال در شش کشور اروپایی (یعنی یونان، لهستان، اسلواکی، اسلونی، سوئد و ترکیه) جمع‌آوری شده است و با استفاده از مدل‌سازی مسیر حداقل مربعات جزئی (PLS-PM) تجزیه و تحلیل شدند. نتایج برای فرضیه‌های پیشنهادی پشتیبانی می‌کند و نشان می‌دهد که شیوه‌های PAM به طور مثبت بر روی آن تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که یک چارچوب PAM را می‌توان با مفهوم‌سازی چهار زیرساخت، یعنی مدیریت ریسک دارایی فیزیکی، ارزیابی عملکرد دارایی فیزیکی، مدیریت چرخه عمر دارایی فیزیکی و سیاست و استراتژی دارایی فیزیکی انجام داد. در نهایت این مطالعه برخی مفاهیم نظری و مدیریتی و همچنین جهت‌گیری برای تحقیقات آتی را آشکار می‌کند. یافته‌های این مطالعه بر حوزه‌های PAM تأکید می‌کند که مدیران باید روی آن‌ها تمرکز کنند چراکه مدیریت دارایی فیزیکی باعث بهینه‌سازی هزینه‌ها، عملکرد و مواجهه با ریسک مربوط به دارایی‌های فیزیکی و در نتیجه افزایش عملکرد پایداری سازمان می‌شود.

کارآموز و موحد (۲۰۲۱)، در مقاله‌ای با عنوان "تاب‌آوری زیرساخت‌های آبی مبتنی بر مدیریت دارایی در برابر سیل"، به این موضوع پرداختند که زیرساخت‌های آب، مانند تصفیه خانه‌های فاضلاب، نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های شهری دارند. عملکرد آنها به طور مستقیم با میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها در مواجهه و کاهش اثرات مخاطرات سیل مرتبط است. سازمان‌های دولتی مانند که تصمیم‌گیرندگان اصلی در تخصیص منابع به زیرساخت‌های مختلف آب برای بهبود انعطاف‌پذیری هستند، باید ببینند این زیرساخت‌ها چگونه دارایی‌های خود را مدیریت می‌کنند تا تخصیص منابع محدود را اولویت‌بندی کنند. بنابراین، هر گونه تأمین مالی باید در چارچوب عملکرد فیزیکی،

¹ Okoh et al.

² Honda et al.

³ Campos et al.

⁴ Damjan Maleti et al.

مالی و مدیریت دارایی باشد. یکی از روش‌های متعدد برای کمی‌سازی تاب‌آوری، در چارچوب چهار معیار معروف به استحکام، سرعت، چاره‌اندیشی و افزونگی است. هدف این مطالعه بررسی مدیریت دارایی به عنوان یکی از ویژگی‌های اصلی استحکام و تدبیر در تاب‌آوری زیرساخت‌های آبی در برابر سیل است. چارچوب پیشنهادی پتانسیل آزمایش بر روی ۱۴ تصفیه خانه فاضلاب در شهر ساحلی نیویورک را دارد. نتایج اولیه نشان می‌دهد که با گنجاندن برنامه‌های مدیریت دارایی در چارچوب تاب‌آوری، در مقایسه با مطالعات قبلی، برنامه تخصیص منابع برای هر یک از تصفیه خانه فاضلاب‌ها می‌تواند به طور موثرتری انجام شود.

۳-بروش شناسی تحقیق و مدل ارائه شده

در این پژوهش از روش‌های زیر برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است: (روش ترکیبی)

- بررسی و مطالعه کتابخانه‌ای: با مراجعه به کتب و مقالات فارسی و لاتین، بخشی از اطلاعات لازم جمع‌آوری گردیده است.
 - استفاده از مقالات داخلی و خارجی و پایان‌نامه‌هایی که مرتبط با موضوع تحقیق نگاشته شده است و مقالات معتبر پژوهشی.
 - استفاده از اینترنت به عنوان اطلاعات روز علمی.
- مدلسازی این تحقیق را نظریه بازی‌ها^۱ تشکیل می‌دهد. نظریه بازی زیرمجموعه‌ای از علم ریاضیات است که می‌تواند با استفاده از تحلیل کردن یک سری از سناریوها و طراحی‌ها، رفتارها و نتایج تصمیم‌گیری افراد را پیش‌بینی کند. نظریه بازی‌ها علم مطالعه‌ی تضاد منافع‌ها و همکاری‌های بین بازیکنان عاقل است. در یک تعریف کلی نظریه بازی، علم استراتژی یا به عبارتی تصمیم‌گیری درست در واکنش به رقبا در یک فضای استراتژیک است. در این بخش به معرفی عناصر بازی برای بهتر مشخص شدن فضای بازی می‌پردازیم:
- بازیکنان: طرف‌های بازی هستند که هر کدام حداقل دو استراتژی را در اختیار دارند که در اینجا دو بازیکن به نام‌های شرکت آب منطقه‌ای و ذینفعان حضور دارند.
 - استراتژی: رویکردی است که برای تعیین اقدامات و واکنش‌ها بر اساس شرایط خود و حرکات حریف از آن استفاده می‌شود که در اینجا استراتژی بصورت همکاری و عدم همکاری تعریف می‌شود.
 - کنش‌ها: زنجیره‌ای از اقدامات است که بازیکن در شرایط مختلف بازی انجام می‌دهد.
 - پیامد: سود مورد انتظار یا مطلوب که بازیکن انتظار دارد در یک بازی حاصل کند.
 - اطلاعات: در هر لحظه از بازی هر بازیکن چه اطلاعاتی را می‌تواند از حرکت‌های طرف مقابلش بداند.
 - نتیجه بازی: وقتی بازی به انتها می‌رسد چه نتایجی به بار می‌آید.
- در واقع در این تحقیق ما به دنبال تحلیل رفتار متقابل بازیکنان شرکت آب منطقه‌ای و ذینفعان هستیم. در این راستا تحلیل ایستا و پویای بازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته فرض می‌شود اطلاعات کامل است. بازی ایستا با اطلاعات کامل به بازی اطلاق می‌شود که در آن بازیکنان به طور همزمان انتخاب خود را انجام داده و پیامد بازی برای هر ترکیب انتخابی آن‌ها برای همه بازیکنان به صورت اطلاعات عمومی باشد. هر یک از تصمیم‌گیران در محیط استراتژیک بازیکن نامیده می‌شوند. تعادل این بازی تعادل نش^۲ می‌باشد. بازی‌های ایستا در فرم استراتژیک نمایش داده می‌شوند. فرم استراتژیک، مجموعه استراتژی‌ها و پیامدهای استراتژی انتخابی هر بازیکن با توجه به استراتژی‌های انتخابی دیگر بازیکنان را نشان می‌دهد، در واقع تعیین می‌کند که برای یک بازیکن، بازی کردن با کدام استراتژی‌ها ممکن است. برای دستیابی به فرم استراتژیک بازی ابتدا باید بازیکنان و استراتژی‌های هر بازیکن را تعریف و مشخص کرد (جدول (۱)). بازی‌های پویا بازی‌هایی هستند که در آن بازیکنان به صورت متوالی تصمیم می‌گیرند. یعنی هر بازیکن بعد از انتخاب بازیکن قبلی باید انتخاب خود را انجام دهد. بازی با اطلاعات کامل بازاری است که پیامد بازیکنان برای هر ترکیب استراتژی آنها به صورت اطلاعات عمومی بوده و همه بازیکنان از آن اطلاع دارند (عبدلی، ۱۳۸۷). شرکت‌ها به عنوان نهاد قدرتمند اقتصادی ذی‌نفعان متعددی دارند. بهترین حالت برای شرکت زمانی است که منافع این ذی‌نفعان متعادل بوده و رفاه جمعی حاصل گردد، اما موارد مختلفی مانند منفعت‌طلبی و خطرپذیری ذی‌نفعان مانع این تعادل شده و ایجاد تعارض منافع می‌کند. این تعارض بین ذی‌نفعان یک دسته و یا میان ذی‌نفعان دسته‌های متفاوت به وجود آمده و مشکلات فراوانی همچون، بی‌اعتمادی به نهاد شرکت را به دنبال دارد. تعارض منافع اثرات

¹ Game Theory

² Nash Equilibrium

منفی فراوانی بر شرکت و نظام کلی اقتصادی دارد، از طرفی موجب بی‌اعتمادی و عدم اطمینان به نهاد شرکت می‌شود، از چالش‌های اساسی شرکت‌های آب منطقه‌ای می‌توان به تلاش برای افزایش سطح خدمات ارائه شده به مشتریان در عین کاهش هزینه‌ها اشاره کرد.

فرم بازی بصورت اطلاعات زیر است:

مجموعه بازیکنان: $N = \{\text{دینفعان، شرکت آب منطقه‌ای}\}$

دینفعان سازمان عبارتند از: کارکنان، مشتریان، جامعه، سهامداران، شرکای تجاری و کلیه افراد و سازمان‌هایی که از سود سازمان منتفع و از ضرر آن متضرر می‌گردند (بازیکن اول شرکت آب منطقه‌ای و بازیکن دوم دینفعان هستند).
مجموعه استراتژی بازیکنان:

$\{C, N\}$ ای (انحصار طبیعی) استراتژی شرکت آب منطقه

$\{C, N\}$ = استراتژی دینفعان (مشتریان)

که در آن C استراتژی همکاری^۱ و N استراتژی عدم همکاری^۲ هستند.

$$S = S_A \times S_B = \{(C, C), (C, N), (N, C), (N, N)\}$$

پیامد بازیکنان:

$$\begin{array}{ll} \text{بازیکن اول: شرکت آب منطقه‌ای} & , \quad \text{بازیکن دوم: ذی نفعان} \\ U_1 = (C, C) = 3 & , \quad U_2 = (C, C) = 3 \\ U_1 = (C, D) = 1 & , \quad U_2 = (C, D) = 4 \\ U_1 = (N, C) = 4 & , \quad U_2 = (N, C) = 1 \\ U_1 = (N, N) = 2 & , \quad U_2 = (N, N) = 2 \end{array}$$

در داخل پُرانتزها از سمت چپ، استراتژی اول مربوط به بازیکن اول و استراتژی دوم، مربوط به بازیکن دوم است. استراتژی همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن تمایل به همکاری و پذیرفتن شرایط طرف مقابل را دارد و استراتژی عدم همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن علاقه‌ای به پذیرش شرایط طرف مقابل را ندارد. دلیل اینکه استراتژی عدم همکاری شرکت آب منطقه‌ای و همکاری دینفعان برای شرکت آب منطقه‌ای پیامد زیادی دارد، این است که در این حالت شرکت آب منطقه‌ای با صرف کمترین هزینه بیشتر نفع را از دینفعان می‌برد. در حالت عکس این استراتژی نیز، دینفعان با صرف کمترین هزینه بیشترین عایدی را بدست می‌آورند، همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالت محدود بودن منابع، هر دو بازیکن دارای تضاد منافع هستند.

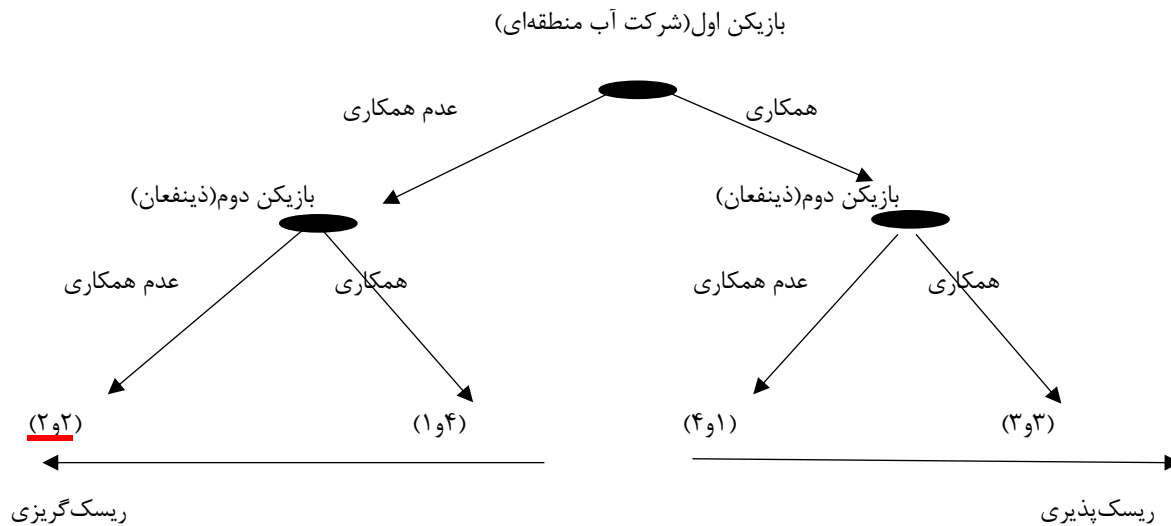
جدول (۱). مدلسازی با رویکرد بازی‌های ایستا با اطلاعات کامل

ذی نفعان			
عدم همکاری	همکاری		
۴ و ۱	۳ و ۳	همکاری	شرکت آب منطقه‌ای
۲ و ۲	۱ و ۴	عدم همکاری	

¹ Cooperation

² Non-cooperation

عدد سمت راست پیامد بازیکن اول (شرکت آب منطقه‌ای) و عدد سمت چپ پیامد بازیکن دوم (دینفعان) است. همانطور که ملاحظه می‌شود تعادل نش این بازی در جایی است که هر دو بازیکن، استراتژی عدم همکاری را انتخاب می‌کنند. زیرا این استراتژی برای هر دو بازیکن بدون ریسک است. همچنین، مدلسازی با رویکرد بازی‌های پویا با اطلاعات کامل برای مساله مورد نظر بصورت شکل زیر است:



راه حل بازی‌های پویا با اطلاعات کامل، تعادل نش برگشت به عقب^۱ است. از استنتاج معکوس برای پیدا کردن تعادل نش زیربازی کامل استفاده می‌کنند که در بازی‌های پویا کاربرد دارد. روند استنتاج معکوس به صورت تجزیه و تحلیل یک بازی از آخرین مرحله به ابتدای آن است و در هر مرحله استراتژی که مغلوب است، حذف می‌شود و استراتژی برنده در گام بعدی بازی تحلیل می‌شود. در واقع در هر مرحله فرض می‌شود، هر بازیکن با انتخاب عقلانی استراتژی که سود بیشتری دارد را انتخاب می‌کند همانطور که مدل نشان می‌دهد، بدلیل عدم اعتماد طرفین به یکدیگر و عدم قبول ریسک توسط شرکت آب منطقه‌ای و ذی نفعان، استراتژی عدم همکاری توسط بازیکنان انتخاب می‌شود. زیرا انتخاب استراتژی همکاری توسط بازیکنان ریسک زیادی به همراه دارد ولی انتخاب استراتژی عدم همکاری کمترین ریسک را برای بازیکنان به همراه دارد. زیرا با صرف کمترین هزینه می‌توانند عایدی خود را افزایش دهند. این تضاد منافع اگر بر طرف نشود می‌تواند به اقتصاد کشور آسیب برساند. ولی در صورتیکه آن‌ها ریسک‌پذیر باشند و استراتژی همکاری را انتخاب کنند این ترکیب منجر به بازدهی بیشتر برای بازیکنان می‌شود. زیرا ریسک با بازدهی رابطه مستقیم دارد. شرکت آب منطقه‌ای و ذی نفعان منافع مشترکی دارند ولی در صورت عدم ساختارهای مناسب، این مسائل می‌تواند به تعارض منافع ختم بشود. برای حل این تعارض راهکارهای مختلفی وجود دارد که مهمترین مسئله در این زمینه ریسک‌پذیر کردن بازیکنان (شرکت آب منطقه‌ای و دینفعان) است. یکی از مهمترین این راه حل‌ها، بحث مدیریت دارایی‌های فیزیکی است. زیرا مدیریت دارایی‌های فیزیکی مکانیسمی را فراهم می‌آورد که از طریق آن می‌توان با افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها، ریسک‌ها را کاهش دهد. از کارکردهای مهم مدیریت دارایی‌های فیزیکی می‌توان به بهبود عملکرد مالی، آگاهی از تصمیمات سرمایه‌گذاری دارایی، بهبود کاری و اثربخشی، مدیریت ریسک، بهبود سرویس و محصولات، اثبات مسئولیت اجتماعی، اثبات انطباق، افزایش اعتبار، پایداری سازمان، افزایش رضایتمندی دینفعان (مشتریان، صاحبان سهام، کارمندان و غیره) از عملکرد کلی سازمان، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداشت دارایی‌ها، افزایش دسترسی‌پذیری دارایی و کاهش قرار گرفتن در معرض ریسک، صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌های کل طول عمر دارایی اشاره کرد. بنابراین مدیریت دارایی‌های فیزیکی علاوه بر منافع شرکت آب منطقه‌ای، می‌تواند منافع گروه‌های دینفع را تضمین بنماید و می‌تواند هر دو بازیکن را برای همکاری ریسک‌پذیر کند.

¹ Backward Induction

۴- خلاصه و نتیجه

امروزه کمبود آب در کشور به یکی از مسائل بسیار مهم تبدیل شده است. کمبود آب می‌تواند آسیب‌های جدی به بخش اقتصاد و سایر بخش‌ها وارد کند و همین موضوع باعث شده است که شرکت‌های آب منطقه‌ای با چالش جدی مواجه شوند. زیرا آن‌ها از یک طرف با کمبود منابع آب مواجه هستند و از طرف دیگر باید رضایت ذینفعان (کارکنان، مشتریان، جامعه، سهامداران، شرکای تجاری و کلیه افراد و سازمان‌هایی که از سود سازمان منتفع و از ضرر آن متضرر می‌گردند) را برطرف نمایند. چراکه ارزش‌ها در سازمان‌های مختلف بر اساس اهداف و راهبردهای آن سازمان و انتظارات ذینفعان اصلی مشخص می‌شود و این مسئله باعث بوجود آمدن تضاد منافع می‌شود. ما در این تحقیق این تضاد منافع را با رویکرد نظریه بازی‌های ایستا و پویا با اطلاعات کامل مورد بررسی قرار دادیم.

در قسمت مقدمه به تعریف موضوع، طرح مسئله و بیان اهداف تحقیق و در قسمت بررسی پیشینه به موضوع و چارچوب نظری و در قسمت روش‌شناسی تحقیق به الگوی بررسی، تعریف مفاهیم و فنون گردآوری و تحلیل داده‌ها در قسمت ارائه یافته‌ها به تجزیه و تحلیل تفسیر آن‌ها پرداختیم و مدل تحقیق را با رویکرد نظریه بازی‌ها مورد بررسی قرار دادیم. در این بازی دو بازیکن به نام‌های شرکت آب منطقه‌ای و ذی‌نفعان وجود دارند. هر دو بازیکن در این بازی دو استراتژی به نام‌های همکاری و عدم همکاری دارند. استراتژی همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن تمایل به پذیرفتن شرایط طرف مقابل را دارد و استراتژی عدم همکاری به اینصورت تعریف می‌شود که بازیکن علاقه‌ای به پذیرش شرایط طرف مقابل را ندارد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که هر دو بازیکن در حالت عادی، استراتژی عدم همکاری را انتخاب می‌کنند. چراکه اگر یکی از بازیکنان استراتژی همکاری را انتخاب کند برای بازیکن دیگر انتخاب استراتژی عدم همکاری می‌تواند بیشترین عایدی را بدست آورد. با توجه به اینکه بازی متقارن است، عایدی اضافی یک بازیکن به معنای عایدی کمتر بازیکن دیگر است، ولی حالت بهینه این است که هر دو بازیکن استراتژی همکاری را انتخاب کنند. برای اینکه بازیکنان استراتژی همکاری را انتخاب کنند، باید ریسک‌پذیر باشند. ولی برای انتخاب این استراتژی و رسیدن به این تعادل باید مکانیزم‌هایی طراحی شود که هر دو بازیکن از آن منتفع شوند. برای اینکه بازیکنان ریسک‌پذیر باشند و با یکدیگر همکاری داشته باشند. باید سیستم اقتصادی در حالت بهینه قرار بگیرد و هر دو بازیکن از آن منتفع شوند.

یکی از این مکانیزم‌های مهم، مدیریت دارایی‌های فیزیکی است. مدیریت دارایی‌های فیزیکی با یکپارچه و مرتب نمودن فرایندها به‌عنوان بهترین روش دستیابی به نتایج مورد نظر، سازمان را از قابلیت تمرکز تلاش بر روی فرایندهای کلیدی برخوردار می‌سازد و در ذینفعان اعتمادسازی، کارآمدی و اثربخشی سازمان را ایجاد نموده و توسعه می‌بخشد. چراکه هدف اصلی در مدیریت دارایی‌های فیزیکی، کاهش هزینه، مدیریت ریسک و توانمندسازی سازمان در رسیدن به اهداف خود با استفاده از بهره‌وری و ارزش آفرین از دارایی‌ها و همچنین افزایش رضایتمندی ذینفعان است. تاکنون شرکت پالایش نفت آبادان، شرکت پالایش گاز شهید هاشمی نژاد، شرکت توزیع نیروی برق مشهد، شرکت فولاد مبارکه اصفهان و شرکت پالایش نفت اصفهان از نظامنامه مدیریت دارایی‌های فیزیکی استفاده کرده‌اند. با توجه به ضرورت مشتری‌مداری و اهمیت میزان رضایت ذینفعان، این هدف و رسالت مهم انسانی و اجتماعی را در نقشه استراتژیک خود مد نظر قرار داده‌اند.

منابع

- نادری میوان، ر. (۱۴۰۰). بحران آب در ایران و راهکارهایی برای مدیریت آب، چهارمین همایش ملی راهکارهای پیش روی بحران آب در ایران و خاورمیانه، تهران.
- حاجی قدیری، ش. گودرزی، غ. (۱۴۰۱). سناریوهای آینده بحران آب در افق ۲۰۵۰.
- استادی، ب. طلوعی، م. (۱۴۰۱). بررسی و دسته‌بندی تمرکزها و مدل‌های استفاده شده در مدیریت دارایی‌های فیزیکی: مرور تحقیقات گذشته، سومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری در مدیریت کسب و کار و اقتصاد، تهران.
- نیکجو، ع. نیکجو، م. (۱۳۸۸). فواید سیستم‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی در یوتیلیتی‌ها، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، تهران.
- بحرینی راد، ع. (۱۳۹۵). مدیریت دارایی در بخش زیرساخت‌های عمرانی با رویکرد نگهداشت پیشگیرانه پل‌ها، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی مدیریت ساخت و پروژه، تهران.
- نیکبخت، م. ادب آوازه، ن. (۱۴۰۱). طراحی الگوی معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات صنعت نفت و گاز با رویکرد مدیریت دارایی فیزیکی به کمک سوارا فازی، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، مشهد.
- یعقوبی، ا. نایب، ن. و باغی‌شنی، و. گرامیان، م. (۱۳۹۹). تحلیل زمان آچاربدهی گروه‌های اجرایی تعمیرات قبل و بعد از استقرار سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی، هشتمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد.
- میان‌آبادی، ح. (۱۳۹۲). مروری بر قوانین بین‌المللی آب، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.
- مرزبان، ح. کریمی، ل. (۱۳۹۱). بررسی ساختار هزینه فرایند عرضه آب (مطالعه موردی شرکت آب و فاضلاب شیراز).
- میرهاشمی دهنوی، س. صدراپی جواهری، ا. مرزبان، ح. میردهقان، س. (۱۳۹۶). آزمون وجود انحصار طبیعی در صنعت توزیع برق ایران: یک تجزیه و تحلیل پانلی با ضرایب تصادفی.
- رضایی، ع. کرد، م. ایوبی، ر. (۱۳۸۶). عنوان تجربه: استقرار مدیریت ذی‌نفعان در تدوین استراتژی شرکت آب و فاضلاب استان گلستان، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت، تهران.
- طیلسی، م. مهتاب روشن، ع. عظیمی، ن. (۱۳۹۸). مفاهیم استراتژیک مرتبط با سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی و بررسی تاثیر مولفه‌های این سیستم بر بهره‌وری، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت استراتژیک، تهران.
- راشدی، ف. قاسمی، م. (۱۳۹۶). ایجاد بسترسازی در راستای استقرار مدیریت دارایی‌های فیزیکی بر مبنای مدل آپ‌تایم نظامنامه راهبردی وزارت نفت، سومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت، حسابداری و اقتصاد دانش بنیان با تاکید بر اقتصاد مقاومتی، تهران.
- نایب، ن. باغی‌شنی، و. (۱۳۹۹). تعیین استراتژی استقرار سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، هشتمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد.
- عوض آقائی، ه. صفری‌ازان اخاری، ب. (۱۳۹۹). رتبه‌بندی مؤلفه‌های مدیریت دارایی فیزیکی بر اساس شاخص‌های عملکرد و نگهداری و تعمیرات در شرکت نفت مناطق مرکزی ایران منطقه بندرعباس با استفاده از مدل AHP، دومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری در مدیریت کسب و کار و اقتصاد، تهران.
- جعفری، م. محمودی، م. (۱۳۹۹). مقایسه مدل‌های مدیریت دارایی فیزیکی و تعیین نقشه راه مدیریت دارایی‌های فیزیکی با استفاده از روش DEMATEL مطالعه موردی میدان نفتی سروک آذر، کنفرانس بین‌المللی مدل‌ها و تکنیک‌های کمی در مدیریت، قزوین.
- گنجی زهرایی، ه. (۱۳۹۹). مدیریت ریسک در مدیریت دارایی فیزیکی راه در ایران.
- عبدیان، ح. وسیلی، م. (۱۳۹۹). تحلیل عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرکت فولاد مبارکه با رویکرد مدیریت دارایی‌های فیزیکی و با استفاده از ماتریس خانه کیفیت، سومین کنفرانس بین‌المللی و ملی مطالعات مدیریت، حسابداری و حقوق، تهران.
- عبدلی، ق. (۱۳۸۷). نظریه بازی‌ها و کاربردهای آن، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران، چاپ دوم.

Tavanir.org.

ISO 55000, Asset management (2014) - Overview, principles and terminology, INTERNATIONAL STANDARD.

PAS 55 (2008), ASSET MANAGEMENT, Part 1: Specification for the optimized management of physical assets, British Standard.

irantpm.ir

www.theiam.org

Okoh, P., Schjøberg, P., Wilson A., (2016). A new maintenance management model based on ISO 55000, Infrastructure Asset Management Journal, Volume 3 Issue 1, March 2016, pp. 21-28, Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS).

Honda, M., Kishi, T., and Yamamoto, H., (2017). Study of Asset Management Method for Galvanized Steel Railway Electrification Infrastructure in JR-EAST, Procedia CIRP 59, 47-52.

Campos, J., Sharmab, P., Gabiria, U.G., Jantunen, E., and Baglee, D., (2017). A big data analytical architecture for the Asset Management, Procedia CIRP 64, 369 – 374.

Maletic, D., Maletic, M., Al-Najjar, B., & Gomiscek, B. (2018). Development of a model linking physical asset management to sustainability performance: An empirical research. Sustainability, 10(12), 4759.

Karamouz, M., & Movahhed, M. (2021, June). Asset management based flood resiliency of water infrastructure. In World Environmental and Water Resources Congress 2021 (pp. 1081-1091).

زمان‌بندی اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در مراکز تولیدی یا خدماتی

حسین شمس شمیرانی^۱

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

امیر حسین شمس^۲

دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گرایش لجستیک و زنجیره تأمین، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، برای تعیین زمان‌بندی بهینه اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه طراحی می‌شود. مشخص نمودن زمان آغاز هر فعالیت پیشگیرانه، متغیرهای تصمیم اصلی مسئله هستند. زمان‌بندی باید به گونه‌ای تنظیم شود که میزان کارهای موجود در هر یک از هفته‌های سال تا حد ممکن با یکدیگر برابر شوند. تابع هدف مدل به صورت کمینه‌سازی میزان واریانس ساعات کاری هر هفته، لحاظ می‌شود. برخی از محدودیت‌های مدل به صورت غیرخطی، شرطی و مشتق‌ناپذیر است که منجر به ایجاد یک مدل NP-Hard می‌شود که حل آنها حتی با یک نقطه شروع مناسب تنها برای مسائل با ابعاد کوچک امکان‌پذیر است که برای حل این موضوع از یک روش جستجوی تصادفی استفاده خواهد شد که می‌تواند مسائل ابعاد بزرگ را حل نماید. پس از اجرای مدل، نتایج آن به صورت برنامه زمان‌بندی جهت ارائه به واحد نگهداری و تعمیرات و همچنین مدیریت سازمان برای برنامه‌ریزی در مورد برآورد و آماده‌سازی تجهیزات و نیروی انسانی ارائه می‌شود. کلمات کلیدی: زمان‌بندی، اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، برنامه‌ریزی ریاضی، برنامه‌ریزی غیرخطی.

۱-مقدمه

تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات و دستگاه‌ها با توجه به استهلاک و فرسایش مداوم آنها بخش عمده‌ای از هزینه‌های تولید در یک مجموعه صنعتی را از آن خود می‌کند. این هزینه‌ها بسته به نوع صنعت ۱۵ تا ۷۰ درصد هزینه‌کرد یک سازمان تولیدی را شامل می‌شود. عدم توجه به این مسئله، باعث افزایش هزینه‌های تعمیر دستگاه‌ها، از کارافتادگی ناگهانی بیش از حد، عدم توانایی در ارائه خدمات، زیان‌های عظیم مالی و ایجاد هزینه فرصت بسیار از بابت ازدست‌دادن بازار و کاهش محبوبیت برند می‌شود تا آنجا که حتی ممکن است توجیه‌پذیری اقتصادی یک صنعت و یا یک واحد تولیدی را تحت تأثیر قرار بدهد. اهمیت این موضوع در کشور ما به دلیل فرسودگی و سن بالای تجهیزات صنعتی دوچندان است. همچنین یکی از نکات بسیار مهم در رابطه با فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی صحیح آن است؛ زیرا انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات نیازمند به‌کارگیری صحیح از تجهیزات تخصصی و نیروی انسانی ماهر است که همه آنها ضامن برقراری تولید مستمر است پس بنابراین باید برنامه‌ریزی در رابطه با زمان‌بندی اقدامات نت پیشگیرانه باید به نحوی صورت پذیرد تا بتوان از نیروی انسانی ماهر و تجهیزات واحد نت به صورت متوازی در طول زمان بهره برد. به‌طور کلی نگهداری و تعمیرات را می‌توان در دودسته کلی تقسیم‌بندی کرد دسته اول نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شکست که بعد از خرابی تجهیز به کار گرفته می‌شود و دسته دوم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است که به منظور پیشگیری و یا کاهش احتمال خرابی بر روی تجهیز انجام می‌شود.

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به منظور زمان‌بندی مجموعه اقدامات نت پیشگیرانه ارائه می‌شود که در آن قصد داریم زمان شروع هر فعالیت نت پیشگیرانه را در پایان هر سال برای سال آتی به صورتی مشخص کنیم تا حجم کاری تخصیص‌یافته به ۵۲ هفته سال به گونه‌ای باشد تا حداکثر توازن ممکن حاصل شود و تفاضل بین بیشترین و کمترین ساعات کاری تخصیص‌یافته به هر هفته در کمترین مقدار ممکن باشد این اقدام باعث صرفه‌جویی در استخدام و اخراج نیروی انسانی و کاهش زمان بیکاری و یا عدم در دسترس‌ناپذیری واحد نگهداری و تعمیرات می‌شود پس از اجرای این مدل به سؤالات اساسی در حوزه نگهداری و تعمیرات مانند زمان شروع هر فعالیت، میانگین زمان کاری واحد نت در طول سال، کمترین و بیشترین ساعات کاری تخصیص‌یافته و... جهت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی پاسخ داده می‌شود.

در این پژوهش بعد از بیان مقدمه به‌مرور ادبیات، مدل‌سازی و شیوه حل، نتایج و یافته‌های عددی و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

¹ a.shams@iut.ac.ir

² amirhosseyn_shams@ihu.ac.ir

۲- مرور ادبیات

در این بخش از پژوهش به صورت مختصر به بررسی پیشینه و مرور ادبیات مربوط به موضوع زمان بندی اقدامات نگهداری و تعمیرات خواهیم پرداخت: باجستانی و همکاران یک مدل برنامه ریزی تصادفی که در آن از رویکرد نت از پیش تعیین شده به منظور پیشینه کردن سطح دسترسی پذیری تجهیزات تولیدی با در نظر گرفتن برآورده سازی تقاضا توسعه دادند (Aramon Bajestani et al., 2014)، و پولوتسکی و همکاران نیز یک مدل ریاضی با استفاده از تکنیک برنامه ریزی تصادفی که دارای افق برنامه ریزی نامتناهی و از رویکرد نت مبتنی بر تصمیم گیری همزمان در انجام فعالیت های نگهداری و تعمیرات و بازرسی با تابع هدف کمینه سازی هزینه های اجرای اقدامات نت و بازرسی توسعه داده اند (Polotski et al., 2019)، همچنین کنگ با استفاده از تکنیک مدل سازی فرآیند تصمیمی نیمه مارکوفی که مانند پژوهش پولوسکی دارای رویکرد مبتنی بر تصمیم گیری همزمان در مورد اجرای فعالیت های نت و بازرسی، به دنبال کمینه سازی مجموع هزینه های مربوط به فعالیت های نگهداری و تعمیرات و بازرسی است (Kang & Subramaniam, 2018)، عابد و همکاران تصمیم گیری در مورد زمان بندی اقدامات نگهداری و تعمیرات در یک افق برنامه ریزی را متناهی در نظر گرفته و با استفاده از تکنیک برنامه ریزی عدد صحیح به دنبال پیشینه کردن سطح دسترسی پذیری تجهیزات تولیدی به منظور پاسخگویی به تقاضای وارد شده به سیستم است (et al., 2019)، همچنین سعیدی مهرآباد و همکاران تصمیم گیری در رابطه با افق برنامه ریزی اقدامات نگهداری و تعمیرات را در یک افق زمانی محدود را مورد نظر قرار داده اند و با در نظر گرفتن تقاضای وارد شده به سیستم به دنبال پیشینه کردن سطح دسترسی پذیری تجهیزات و ماشین آلات هستند (Saedi Mehrabad et al., 2017).

ژو و همکاران افق تصمیم گیری در مورد اجرای اقدامات نت پیشگیرانه را به صورت نامتناهی فرض نموده و با استفاده از تکنیک مدل سازی PHM به دنبال کمینه سازی هزینه های ناشی از اقدامات نگهداری و تعمیرات و کاهش هزینه های سرشکن شده بر قیمت نهایی محصول و پاسخگویی تقاضا است (Xu et al., 2017)، نوری و صادقی نیز با استفاده از تکنیک PHM تصمیم گیری در مورد افق اقدامات نگهداری و تعمیرات را نامتناهی در نظر گرفته اند و در مدل خود هر دو رویکرد بازرسی دوره ای و غیر دوره ای را مدنظر قرار داده و تابع هدف مدل آنها به صورت کمینه سازی هزینه است (نوری et al., 2020) و ساین و همکاران و نیز ساجدی نژاد و لطفی نیز در پژوهش های خود به ترتیب در مورد شیوهی زمان بندی اقدامات نت پیشگیرانه برای توربین های تولید انرژی و سیستم های چند جزئی پرداخته اند (Singh et al., 2023)، (نژاد et al., 2019).

همان طور که از مرور ادبیات و پیشینه تحقیق بیان شده می توان نتیجه گرفت، در اکثریت پژوهش های صورت پذیرفته افق برنامه ریزی به صورت نامتناهی در نظر گرفته شده است که مفروضات دنیای واقعی باتوجه به تغییرات معنادار نرخ استهلاك فاصله زیادی دارد و همچنین در هیچ یک از این پژوهش ها در مورد توازن انجام اقدامات نگهداری و تعمیرات بحث نشده است.

۳- مدل سازی و شیوه حل

در این بخش از پژوهش به تشریح مسئله و مدل سازی آن خواهیم پرداخت، شرح مسئله به این صورت است که در یک واحد تولیدی، اطلاعات کلیه تجهیزاتی که نیازمند اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه هستند، شامل نام، کد، محل استقرار، تعداد نفر ساعت لازم برای انجام اقدامات نت پیشگیرانه، نوع فعالیت و دوره های زمانی لازم جهت تکرار اجرای اقدامات نت پیشگیرانه در یک بانک اطلاعاتی آورده شده و هدف آن است که اولین هفته آغاز انجام هر فعالیت نت پیشگیرانه برای هر تجهیز به گونه ای تنظیم شود تا حجم کل کارها در طول ۵۲ هفته سال به صورت متوازن تقسیم شود و تاحدامکان واریانس ساعت کاری میان هفته هایی که بیشترین و کمترین ساعت تخصیص یافته را دارند، به حداقل برسد این اقدام سبب می شود تا هزینه های لازم برای برآورد و تأمین نیروی انسانی، تجهیزات و توقف های خط تولید به حداقل برسد و همچنین کارهای تخصیص یافته در یک هفته به گونه ای نباشد که از حداکثر توان واحد نگهداری و تعمیرات بیشتر و یا در هفته هایی حجم زیادی از توان واحد نگهداری و تعمیرات بیکار بماند به عبارت دیگر متغیر تصمیم اصلی مسئله به صورت مشخص نمودن اولین هفته آغاز فعالیت های نت پیشگیرانه برای هر تجهیز است.

کد دستگاه	نام دستگاه	محل استقرار	کد فعالیت	تفرساعت لازم	دوره زمانی (هفته)	شماره اولین هفته
8	51221	جرثقیل سقفی	کارگاه نورد	j1	4	3
9			j2	2	4	
10			j3	8	7	
11	51001	نورد	کارگاه نورد	j4	2	4
12			j5	4	6	
13	51222	جرثقیل سقفی	کارگاه نورد	j6	2	2
14			j7	8	7	
15	51002	نورد	کارگاه نورد	j8	2	7
16			j9	4	3	
17	51223	جرثقیل سقفی	کارگاه نورد	j10	2	10
18			j11	8	8	
19	51003	نورد	کارگاه نورد	j12	2	4
20						

شکل ۱: بانک اطلاعاتی تسهیلات

در ادامه مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی خواهد شد.

مجموعه‌ها:

w	: هفته‌های سال
j	: فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه
n	: تعداد اعضای مجموعه W

پارامترها:

V(j)	: مدت‌زمان لازم برای انجام هر یک از فعالیت‌های نت پیشگیرانه بر حسب نفرساعت
P(j)	: دوره زمانی لازم برای تکرار فعالیت‌های نت پیشگیرانه
num(w)	: شماره هریک از اعضای مجموعه W

متغیرهای تصمیم:

S(j)	: شماره هفته آغاز فعالیت j (فعالیت j در کدام هفته آغاز شود؟)
X(j,w)	: اگر فعالیت j در هفته w آغاز شود ۱ و در غیر این صورت ۰
SW(w)	: مجموع ساعات کاری تخصیص‌یافته به هفته w بر حسب نفرساعت
ASW	: میانگین ساعات کاری تخصیص‌یافته به هفته‌ها بر حسب نفرساعت
VSW	: واریانس ساعات کاری تخصیص‌یافته به هفته‌ها بر حسب نفرساعت

از میان متغیرهای تصمیم مسئله، S(j) از نوع متغیرهای عدد صحیح، X(j,w) از نوع متغیرهای باینری، SW(w)، ASW و VSW از نوع متغیرهای مثبت و پیوسته هستند.

برای محاسبه متغیر تابع هدف در ابتدا لازم است تا واریانس جامعه را برای ساعات کاری هفته‌ها حساب کنیم، بنابراین مطابق رابطه زیر داریم:

$$VSW = \frac{\sum_w (SW(w) - ASW)^2}{n} \quad (1)$$

هم‌اکنون به مدل‌سازی مسئله خواهیم پرداخت:

$$\text{minimize Objective Function} = VSW \quad (2)$$

$$\text{if } \text{mod} \left\{ \frac{\text{num}(w) - S(j)}{P(j)} = 0 \right\} \quad \text{then} \quad X(j, w) = 1$$

$$\quad \quad \quad \text{else} \quad X(j, w) = 0 \quad \forall j, w \quad (3)$$

$$SW(w) = \sum_j V(j) * X(j, w) \quad \forall w \quad (4)$$

$$ASW = \frac{\sum_w SW(w)}{n} \quad (5)$$

$$1 \leq S(j) \leq P(j) \quad (6)$$

رابطه (۲) که شامل تابع هدف غیرخطی مدل است، به‌صورت کمینه‌سازی واریانس ساعات کاری تخصیص‌یافته برای انجام اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است و محدودیت (۳) بیان می‌کند در صورتی که باقیمانده تقسیم حاصل تفاضل شماره هفته منهای هفته آغازین شروع فعالیت j بر دوره زمانی لازم برای تکرار هر

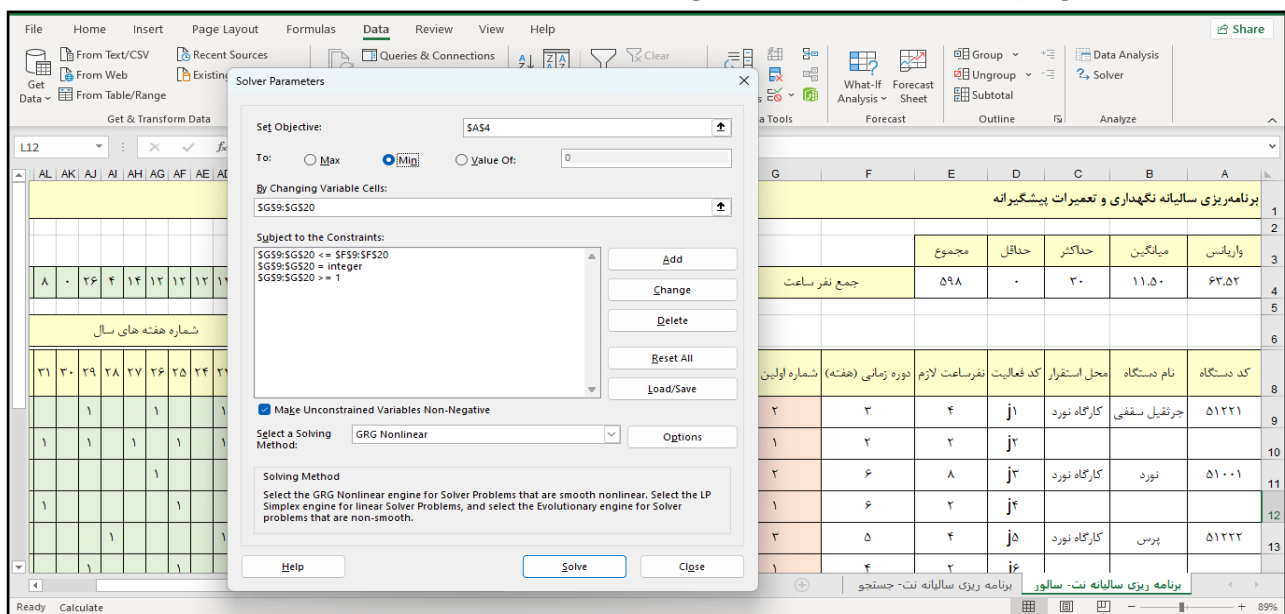
فعالیت صفر باشد فعالیت j در هفته w انجام خواهد شد و در غیر این صورت صفر و فعالیت انجام نمی‌شود، و همان‌طور که مشخص است این محدودیت به‌صورت غیرخطی، شرطی و مشتق‌ناپذیر است و محدودیت (۴) نیز حاصل جمع ساعات کاری تخصیص‌یافته به هر هفته است و محدودیت (۵) نیز میانگین ساعت کاری در طول هفته‌های سال را بیان می‌کند و محدودیت (۶) بیان می‌کند محدوده مجاز برای آغاز هر فعالیت از اولین هفته تا پایان دوره زمانی لازم برای تکرار هر فعالیت نت پیشگیرانه است.

علاوه بر تابع هدف مدل که به‌صورت غیرخطی است، برخی از محدودیت‌های مدل نیز به‌صورت غیرخطی، شرطی و مشتق‌ناپذیر است که این امر موجب می‌شود تا مسئله به‌صورت NP-Hard تبدیل شود و حل آن بسیار دشوار و زمان‌بر باشد و تنها بتوان آن را در ابعاد کوچک حل نمود، همچنین یکی از راهکارهای مهم برای حل مدل‌های ریاضی غیرخطی یافتن یک نقطه آغازین مناسب برای شروع حل مدل است؛ بنابراین طبق رابطه زیر خواهیم داشت:

$$S(j) \sim \text{RANDBETWEEN}(1, P_j)$$

(۷)

رابطه (۷) بیان می‌کند که یک نقطه شروع مناسب برای آغاز حل مدل، به‌صورت یافتن یک جواب اولیه عدد صحیح برای متغیر $S(j)$ که دارای توزیع یکنواخت بین اولین هفته تا دوره زمانی لازم برای تکرار فعالیت‌های نت پیشگیرانه می‌باشد.



شکل ۲: شیوهی استفاده از Solver اکسل برای حل مدل ریاضی

۴- تشریح روش جستجوی تصادفی

همان‌طور که پیش از این گفته شد، حل این مدل با استفاده روش‌های حل دقیق تحقیق در عملیات، تنها در ابعاد کوچک امکان‌پذیر و بسیار زمان‌بر است، اما در این پژوهش یک روش Meta-Heuristic برای حل این مدل توسعه یافته است که در آن برای آغاز هر فعالیت به صورت تصادفی یک هفته مطابق محدودیت (۷) در نظر گرفته می‌شود و پس از اجرای مدل به اندازه‌ی کافی از بین مجموعه جواب‌های بدست آمده، جوابی که دارای کمترین میزان واریانس باشد، را انتخاب خواهیم نمود.

تجربیات محاسباتی نشان می‌دهد استفاده از روش جستجوی تصادفی علاوه بر یافتن مجموعه‌ی جواب در زمان بسیار کوتاه حتی برای مسائل ابعاد بزرگ، در بعضی از موارد پاسخ‌های تولید شده از آن دارای کیفیت بهتری نسبت جواب‌های تولید شده در مقایسه با روش‌های حل دقیق است.

شکل ۲: شیوهی استفاده از اکسل برای حل مدل ریاضی با استفاده از شیوهی جستجوی تصادفی

شکل ۳: نمونه‌ای از جواب تولید شده با استفاده از روش جستجوی تصادفی

۵- نتایج و یافته‌های عددی

پس از اجرای مدل ریاضی به دو روش دقیق و جستجوی تصادفی توسط نرم‌افزار Excel نتایج عددی حاصل از آن به صورت گزارش‌های مدیریتی ارائه خواهد شد:

جدول ۱: اطلاعات آماری حل مدل ریاضی

زمان حل	واریانس ساعت تخصیص یافته به یک هفته	میانگین ساعت تخصیص یافته به هفته‌ها	بیشترین ساعت تخصیص یافته به یک هفته	کمترین ساعت تخصیص یافته به یک هفته	
۰.۱۰۲ ثانیه	۳۳.۸	۹.۶۲	۲۲	۲	مدل MINLP با استفاده از روش‌های حل دقیق
۰.۰۱۶ ثانیه	۱۹.۳۵	۹.۵۳	۱۸	۴	مدل MINLP با استفاده از روش جستجوی تصادفی
مشخصات کامپیوتر مورد استفاده					
Windows 11, Ram 16, Core i7 High Performance					

پس از ارائه گزارش مدیریتی در مورد متغیرهای تصمیم مربوط به زمان و حجم کاری تخصیص یافته به واحد نگهداری و تعمیرات، گزارش کار مربوط به زمان آغاز هر فعالیت نگهداری و تعمیرات برای برآورد نیروی انسانی و تجهیزات ارائه خواهد شد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا در مورد اهمیت و ضرورت، زمان‌بندی مناسب اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و نقش آن در استمرار فعالیت‌های تولیدی و هزینه‌کرد سازمان‌ها بحث شد، و سپس یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی که دارای تابع هدف غیرخطی و همچنین دارای محدودیت‌های غیرخطی، شرطی و مشتق‌ناپذیر که به صورت NP- Hard است، برای مشخص نمودن اولین هفته آغاز هر فعالیت نت پیشگیرانه به منظور کاهش واریانس میان بیشترین و کمترین ساعت کاری تخصیص یافته به طول هفته‌های کاری توسعه داده شد، ولی با توجه به اینکه مدل به صورت NP- Hard است و حل آنها حتی با یافتن یک نقطه شروع مناسب تنها برای ابعاد کوچک امکان‌پذیر است، برای حل این مشکل یک روش فرابتکاری به صورت جستجوی تصادفی نیز ارائه شد و نتایج محاسباتی نشان داد که استفاده از روش توسعه داده شد قادر خواهد جواب‌های مناسبی را برای مسائلی با ابعاد بزرگ در زمانی قابل قبول تولید کند.

فهرست منابع

- Aramon Bajestani, M., Banjevic, D., & Beck, J. C. (2014). Integrated maintenance planning and production scheduling with Markovian deteriorating machine conditions. *International Journal of Production Research*, 52(24), 7377-7400.
- V. (2018). Integrated control policy of production and preventive maintenance ,Kang, K., & Subramaniam for a deteriorating manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 266-277.
- maintenance in a failure- Polotski, V., Kenne, J.-P., & Gharbi, A. (2019). Optimal production and corrective prone manufacturing system under variable demand. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31, 894-925.
- Saeedi Mehrabad, M., Jabarzadeh, A., & Alimian, M. (2017). An integrated production and preventive maintenance planning model with imperfect maintenance in multi-state system. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(4), 28-42.
- Singh, E., Afshari, S. S., & Liang, X. (2023). Wind Turbine Optimal Preventive Maintenance Scheduling Using Fibonacci Search and Genetic Algorithm. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*, 2(3), 157-169.
- Xu, M., Alam, M. N.-E., & Kamarthi, S. (2017). A modified dynamic programming model in condition-Conference based maintenance optimization. *International Manufacturing Science and Engineering*.
- عابد، امامی، کشتلی، ن. و رمضان. (۲۰۱۹). زمان‌بندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در محیط ماشین‌های موازی نامرتب. *مدل سازی در مهندسی*, ۱۷(۵۸), ۲۳۳-۲۴۷.
- نژاد، س.، آرمان، و لطفی. (۲۰۱۹). مدلی برای بهینه سازی زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای سیستم‌های چند جزئی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *مطالعات مدیریت صنعتی*, ۱۷(۵۵), ۱۳۷-۱۶۰.
- نوری، صادقیه، احمد، و لطفی. (۲۰۲۰). برنامه ریزی هم زمان بازرسی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر تقاضا در شرایط زوال مارکفی ماشین جهت کاربرد در توربین های بادی. *مدل سازی در مهندسی*, ۱۸(۶۱), ۶۳-۸۴.

ارزیابی و پیاده‌سازی نقشه راه مدیریت دارایی فیزیکی به روش UPTIME (مطالعه

موردی: صنایع پتروشیمی)

رضا علیرضائی*^۱

سید میلاد موسوی

محمد مهدی کاظمی

چکیده

مدیریت دارایی‌های فیزیکی، حرکت بر مسیر بهینه با در نظر داشتن فاکتورهای هزینه، ریسک و بهره‌وری در چرخه عمر تجهیزات در سازمان بوده که تجهیزات می‌بایست در لایه‌های مختلف تعریف و مدیریت شوند، لذا ایجاد سیستم مدیریت دارایی‌ها، تصمیمی استراتژیک و مهم برای تمام سازمان‌ها و شرکت‌های تجهیز محور می‌باشد. مدیریت دارایی‌های فیزیکی در یک شرکت فرآیندی است که طی آن ارزش دارایی‌های فیزیکی سازمان به حداکثر ممکن رسیده و خطرات مربوط به مالکیت و بهره‌برداری از این دارایی‌ها به حداقل ممکن رسانده شود. و در عین حال هزینه تجهیزات از دست رفته یا کمتر استفاده شده را کاهش دهند و فضای بهتری برای مدیریت بهتر چرخه عمر دارایی‌ها، واکنش نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی گردش کار امور مربوط به دارایی‌های فیزیکی را فراهم کنند. کسب و کارها می‌توانند با درک نحوه مدیریت مؤثر دارایی‌های فیزیکی، به عملکرد بهتر و افزایش کارایی دست یابند. در این مقاله معیارهای مربوط به ارزیابی دارایی فیزیکی در یک نمونه موردی در صنعت پتروشیمی با دیدگر مقایسه می‌شود که دید خوبی در ارتباط با نظریات پرسنل صنعت پتروشیمی نسبت به جنبه‌های مدیریت دارایی فیزیکی ارائه می‌کند.

کلمات کلیدی: مدیریت دارایی، روش UPTIME، صنعت پتروشیمی، نگهداری و تعمیرات

۱-مقدمه

مدیریت دارایی فیزیکی «مدیریت بهینه چرخه عمر دارایی‌های فیزیکی برای دستیابی به اهداف تجاری اعلام شده است». این مفهوم ملاحظات ظرفیت، طراحی، سرمایه‌گذاری، عملیات، نگهداری تجهیزات تولید و دفع را در نظر می‌گیرد. یکی از وظایف اصلی مدیریت دارایی این است که تضمین کند که نیازمندی‌های تجاری در حال تغییر و دارایی‌های فیزیکی با در نظر گرفتن تمام جنبه‌های چرخه عمر تجهیزات، به روشی بهینه با هم مطابقت داشته باشند [۱]. در محیط کسب و کار کنونی، مدیریت دارایی‌های فیزیکی به یک چالش کلیدی برای سازمان‌های تجاری تبدیل شده و به عنوان یک عملکرد مدیریتی بیش از هر زمان دیگری اهمیت پیدا کرده است. با این حال، وضعیت اجرای بهترین شیوه‌های مدیریت دارایی فیزیکی در صنعت به اندازه کافی ثبت یا مستند نشده است [۲].

مدیریت دارایی فیزیکی عملکردها را از لایه‌های مختلف ISA-95 از جمله عملکردهای عملیاتی، تاکتیکی و استراتژیک یکپارچه می‌کند و بنابراین نیاز به یک رویکرد یکپارچه در تصمیم‌گیری دارد. ایجاد و توسعه دارایی، عملیات دارایی، نگهداری دارایی‌ها، تعمیر و ارتقای دارایی‌ها، و همچنین بازیافت و دفع را یکپارچه می‌کند. بخش مهمی از توسعه دارایی، تعیین نیازهای ظرفیت و ایجاد ظرفیت است که شامل برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری و اجرای سرمایه‌گذاری می‌شود [۳-۴]. عملیات دارایی عبارت است از رسیدگی به دارایی‌ها برای عملکرد مورد نظرشان، عمدتاً تولید، و به ویژه بخشی از عملیات تولید که بر دارایی‌ها و قابلیت تولید غالب آنها تأثیر می‌گذارد. بعد سوم، نگهداری، مخفف عملکرد تعمیر و نگهداری است. مدیریت دارایی به شدت از توسعه پایدار با تلاش برای استفاده کارآمد از منابع کمیاب با در نظر گرفتن محدودیت‌های بازار، فناوری، قانونی و هنجاری، پویایی بازار و همچنین پایداری حمایت می‌کند. ارتقاء فراتر از جایگزینی است، به شکل تعمیر، نوسازی یا بازسازی. یکی از جنبه‌های مهم مدیریت دارایی فیزیکی ایجاد تعادل مناسب بین عملکرد، هزینه و ریسک در تعقیب اهداف شرکت است. از مدیریت سرمایه‌گذاری‌ها، ظرفیت و تولید به روشی کارآمدتر، با کیفیت بهتر، ایمن تر و رقابتی تر پشتیبانی

¹ REZA.ALIREZAEI1399@YAHOO.COM

می‌کند. نیاز به مدیریت دارایی کارآمدتر برای مقابله با منابع مختلف زیان در طول چرخه عمر تجهیزات تولید و دارایی‌های فیزیکی وجود دارد، بنابراین مدیریت دارایی کارآمدتر را می‌طلبد [۴].

مدیریت دارایی در ISO 55000، به شرح زیر تعریف شده است: "فعالیت‌های هماهنگ و سیستماتیک سازمان برای تحقق بخشیدن به ارزش دارایی‌ها". مفهوم ارزش در راستای اهداف و استراتژی سازمان‌ها است [۵]. به عنوان مثال، در حوزه‌های مالی، بالاترین ارزش می‌تواند سود کوتاه مدت باشد و در زمینه‌های زیست محیطی، می‌تواند به معنای پایداری اکولوژیکی بلند مدت باشد. با استفاده از آنچه در ISO بیان شده است، می‌توان یک تعریف عمیق‌تر و قابل درک‌تر ایجاد کرد. با توجه به اهداف کسب و کار یا سازمان، مدیریت دارایی به منظور دستیابی موثر و کارآمد به اهداف مورد نظر، مجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط با موارد زیر است:

- شناسایی دارایی‌های مورد نیاز
- شناسایی نیازمندی‌های تامین مالی
- کسب دارایی
- ارائه پشتیبانی لجستیک و نگهداری دارایی‌ها
- از رده خارج کردن برخی از دارایی و تعمیرات اساسی

از این تعریف، استنباط می‌کنیم که مدیریت دارایی شامل مجموعه وسیع‌تری از فعالیت‌ها نسبت به تعمیر و نگهداری است که اساساً به نگهداری دارایی‌ها در شرایط عملیاتی مربوط می‌شود. مدیریت دارایی در مورد استفاده از راهنمایی‌های مالی و فنی و رویکردهای مدیریتی دقیق برای تصمیم‌گیری در مورد دارایی‌های مورد نیاز برای دستیابی به اهداف سازمان، کسب و حفظ منطقی دارایی‌ها در طول چرخه عمر آن تا زمان از کار افتادن با متعادل کردن هزینه، ریسک و عملکرد است. به عبارت دیگر دستیابی به ارزش افزوده بیشتر در عین ارائه خدمات در بالاترین سطح با مدیریت دارایی‌های فیزیکی امکان پذیر است.

چرخه عمر طبق PAS 55 «فاصله زمانی است که با شناسایی نیاز به یک دارایی شروع می‌شود و با از کار انداختن دارایی یا هر بدهی مرتبط خاتمه می‌یابد». البته، مراحل اصلی چرخه عمر دارایی‌ها می‌تواند شامل کسب/ایجاد، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیر، و بازسازی/بازنشستگی باشد. درک هر مرحله از چرخه عمر دارایی و تأثیر هر یک بر خروجی نهایی بسیار مهم است [۶-۷].

اکتساب دارایی اولین مرحله از فرآیند چرخه عمر دارایی است. تجهیزات یکی از اقلامی است که بیشترین سرمایه شرکت به آن اختصاص می‌یابد و تأثیر بسزایی بر سرمایه در گردش و افزایش سود دارد. به همین دلیل، انجام تحلیل‌های مناسب و اتخاذ سیاست‌های صحیح قبل از تحصیل دارایی بسیار مهم است. راه‌های مختلفی برای به دست آوردن دارایی وجود دارد، از جمله خرید، اجاره، اجاره و ساخت. نگهداری و تعمیر مجموعه‌ای از فعالیت‌های مختلف برای نگهداری و بقای قطعات، تجهیزات و ماشین‌آلات، حفاظت از سرمایه و دارایی‌های مورد استفاده در صنعت تا زمان نیاز و جلوگیری از حوادثی که منجر به خرابی دستگاه و وقفه در تولید می‌شود. در فرآیند یا روش بهره‌برداری برای تجهیزات و کارخانه‌های مرتبط، انتخاب سیاست نگهداری بهینه می‌تواند با کاهش افت ناگهانی تجهیزات و همچنین کاهش سایر محدودیت‌ها از جمله هزینه و نیروی انسانی، تولید و کارایی واحدهای صنعتی را افزایش دهد. امروزه با پیشرفت سریع تکنولوژی و گسترش اتوماسیون صنعتی و همچنین افزایش تعداد ماشین‌آلات، حجم سرمایه‌گذاری در ماشین‌آلات و دارایی‌های فیزیکی سازمان‌ها افزایش یافته است. تعمیر و نگهداری به عنوان یک سیستم نقش کلیدی در کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت، به حداقل رساندن خرابی تجهیزات، افزایش بهره‌وری و ارائه تجهیزات قابل اعتماد ایفا می‌کند. مهم‌ترین استراتژی‌های تعمیر و نگهداری ذکر شده در مقالات مرتبط عبارتند از: تعمیر و نگهداری اضطراری، تعمیر و نگهداری خرابی، نگهداری پیشگیرانه، تعمیر و نگهداری اصلاحی، تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط، تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌کننده، تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، نگهداری کل تولیدی و نگهداری مبتنی بر ریسک [۸].

تمام دارایی‌ها به مرور زمان تمام می‌شوند و خرابی‌ها نیاز به تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد. نگهداری مناسب می‌تواند منجر به طول عمر بیشتر دارایی فیزیکی شود. با این حال، در پایان عمر مفید دارایی‌ها، سازمان‌ها باید آنها را با دارایی‌های جدید جایگزین کنند. جایگزینی دارایی‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری زیادی است، بنابراین بیشتر سازمان‌ها سعی می‌کنند طول عمر دارایی‌ها را از طریق نگهداری افزایش دهند. با این حال، در برخی شرایط، حتی زمانی که دارایی در وضعیت مطلوبی قرار دارد، سازمان‌ها تصمیم به جایگزینی آن می‌گیرند. طبق تحقیقات قبلی، بسیاری از دارایی‌های موجود در صنعت بیش از عمر طراحی اولیه خود مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و در بسیاری از موارد عدم جایگزینی آنها منجر به مصرف بیشتر انرژی، هزینه نگهداری بالاتر و افزایش خطر حوادث شده است. از سوی

دیگر، سازمان‌ها به دلیل جایگزینی غیر ضروری دارایی‌های فیزیکی، بازخورد منفی را تجربه می‌کنند. بنابراین، تصمیم‌گیری بین این دو گزینه متضاد یک چالش بزرگ برای صاحبان دارایی است. تصمیم‌گیری در مورد تعمیر یا جایگزینی دارایی‌های فیزیکی نیاز به انتخاب منطقی دارد و گزینه‌ای را که برای یک موقعیت خاص بهترین است را تعیین می‌کند [۹]. اجرای استراتژی مدیریت دارایی‌های فیزیکی در کسب‌وکار می‌تواند مزایای قابل توجهی را به وجود آورد، که از جمله این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزایش در دسترس بودن و قابلیت اطمینان دارایی
- کاهش زمان خرابی و هزینه‌های تعمیر
- بهبود ایمنی و انطباق
- افزایش بهره‌وری و مقرون به صرفه بودن
- افزایش عمر و بهبود پایداری دارایی
- مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری بهتر

ایجاد بسیاری از اصول یکپارچه‌سازی، چرخه حیات و بهینه‌سازی مدیریت دارایی‌های فیزیکی در صنعت پتروشیمی طی دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ ناشی از مجموعه‌ای از رویدادهای تهدیدکننده بقای این صنعت بود. قیمت نفت کمتر از قیمت تولید شد و ذخایر جدیدی در مناطق ارزان‌تر جهان مانند قزاقستان و چین جنوبی کشف شد. علاوه بر این، استخراج آسان نفت رو به پایان بود و Piper Alpha در راس چالش‌های مالی و فنی تهدیدات ناشی از ترکیب چندین اشتباه جزئی انسانی بود و منجر به مرگ افراد زیادی شد. یک بررسی کلی توسط دولت بریتانیا در زمان لرد کالن انجام شد. به این ترتیب، مشخصات عمومی در دسترس PAS 55 برای اولین بار در آوریل ۲۰۰۴ منتشر شد. PAS 55 یک رویکرد مبتنی بر دارایی برای مدیریت دارایی‌های فیزیکی با قرار دادن مدیریت ریسک به عنوان بستر اصلی و جمع‌آوری تمام سطوح مدیریت دارایی در قالب یک سیستم طبقه‌بندی یکپارچه در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی توسط افرادی که در این زمینه فعال هستند، صورت گرفته است که منجر به ایجاد رویکردی رسمی برای سیستم‌های مدیریت دارایی و انتشار استاندارد بین‌المللی ISO 55002 در سال ۲۰۱۴ شده است [۱۰-۱۱].

فعالیت‌های بالادستی و پایین دستی صنعت پتروشیمی عموماً بسیار هزینه بر است. لذا یکی از روش‌های مهم افزایش بازدهی اقتصادی، صرفه‌جویی منطقی در هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری است. افزایش حجم تاسیسات و تجهیزات به دلیل رشد روزافزون هزینه‌های طراحی، خرید، نگهداری تعمیرات و بازنشستگی تجهیزات در حال حاضر به عنوان یکی از دغدغه‌های اصلی در صنایع پتروشیمی تبدیل شده است. سیستم‌های مدیریت دارایی فیزیکی استراتژی‌ها و اهداف سازمان را به تصمیمات برنامه‌ها و فعالیت‌های مربوط به دارایی‌ها ترجمه نموده و به دلیل پوشش کامل چرخه عمر دارایی‌ها، نسبت به سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات نتایج بهتری را در سه حوزه کارایی، ریسک و هزینه فراهم می‌کند. در حال حاضر بخش اعظمی از سرمایه‌های صنایع پتروشیمی، تجهیزات آن می‌باشد که عمر این تجهیزات رو به افزایش است، لذا لازم است با توجه به موارد فوق و با در نظر گرفتن این نکته که شرکت‌های زیر مجموعه فاقد نظام یکپارچه مدیریت دارایی فیزیکی می‌باشند، ضروری است مدیریت دارایی‌های فیزیکی با محوریت تجهیزات و تمرکز بر هزینه‌های کل چرخه عمر دارایی‌های فیزیکی از طراحی مفهومی تا اسقاط در نظر گرفته شود. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و از رده خارج کردن و جایگزینی تجهیزات بسیار زیاد است و لذا سازمان باید به جای اینکه صرفاً هزینه‌های اولیه تجهیز را در تصمیم‌گیری‌های خود در نظر بگیرد، به هزینه‌هایی هم که در آینده در ارتباط با آن تجهیز روی خواهد داد، توجه نماید. بنابراین اهمیت بالایی مدیریت دارایی‌های فیزیکی در صنعت پتروشیمی نمود ویژه‌ای دارد که در این مقاله با استفاده از روش UPTIME به آن پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی مساله

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته و بر اساس مطالعات انجام شده چارچوب نظری اولیه به صورت استفاده از مدل هر می Uptime می‌باشد. علت انتخاب این مدل جامعیت و شمول قابل قبول آن است. چارچوب ارائه شده توسط جان کمپل در این تحقیق که به بررسی عوامل تاثیرگذار و ارائه مدل هر می Uptime در مدیریت نگهداری و تعمیرات با رویکرد مدیریت دارایی‌های فیزیکی است. این مدل یک چارچوب کاملی به جهت تعیین عوامل کلیدی سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات می‌باشد که شامل سه بخش سطح رهبری، سطح

ضروریات و انتخاب تعالی می‌باشد. این رویه در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲]. بر اساس شکل مشاهده می‌شود که سطح رهبری دارای دو شاخص تاثیرگذار استراتژی و مدیریت منابع انسانی می‌باشد. علاوه بر این، سطح دوم از هرم تعالی نگهداری و تعمیرات و مدیریت دارایی‌های فیزیکی به اجرای پنج الزام اصلی مدیریت نگهداری و تعمیرات که تحت عنوان ضروریات در مدیریت نت از آن نام برده شده، اختصاص دارد. سطح تعالی نیز دارای شاخص بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی فرآیندها، کارگروهی و دارایی فیزیکی می‌باشد.



شکل ۱- هرم تعالی نگهداری و تعمیرات و مدیریت دارایی‌های فیزیکی

۲-۱- استراتژی

حفظ سرمایه‌های کارخانه و هزینه‌های سنگین تجهیزات سرمایه‌ای به خصوص ارزیابی بالای خرید تجهیزات و دستگاه‌ها از یک سو و افزایش اتوماسیون و لزوم استفاده مناسب و اقتصادی از تجهیزات از سوی دیگر بیانگر این نکته است که اهداف سیاست و استراتژی‌های نت باید اصولی‌تر و دقیق‌تر مورد توجه قرار گیرد. مطالب فوق نقش حیاتی نت در صنعت امروز می‌باشد. مهمترین گام در رسیدن به یک نت اثربخش برای سازمان انتخاب رویکرد هماهنگ نت با فعالیت‌های سازمان می‌باشد. معمولا استراتژی و سیاست‌های نت به عنوان مجموعه خط مشی‌ها و مفاهیم نگهداری و تعمیرات تفسیر شده است اما از دیدگاه کلان‌تر این خط مشی‌ها و مفاهیم مربوط به نت یکی از چند مولفه اصلی استراتژی نت را شکل می‌دهند. سایر مولفه‌های ساختاری در تعریف استراتژی نت عبارتند از ظرفیت و توانایی واحد نت تجهیزات و تسهیلات نت تکنولوژی نت و یکپارچه‌سازی افقی با سایر دپارتمان‌های کارخانه و غیره است. هر کارخانه‌ای از تعداد زیادی تجهیزات و ماشین آلات گوناگون تشکیل شده که دارای سطح اطمینان، میزان ایمنی و اثرات خرابی متفاوت می‌باشد، واضح است که نت مناسب برای هر یک از تجهیزات و ماشین آلات نیازمند استراتژی مناسب برای هر یک از آنها می‌باشد اما انتخاب یک رویکرد نت مناسب برای هر ماشین و تجهیز به تنهایی مقدور نیست [۱۳].

۲-۲- مدیریت منابع انسانی

یکی از موارد مهم در مدیریت منابع انسانی را می‌توان به آموزش و توسعه که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اشاره نمود. نیروی انسانی هر سازمان ارزشمندترین سرمایه آن است و لذا با توجه به پیشرفت و توسعه تکنولوژی و نیز لزوم انتقال معلومات و تجربیات افراد متخصص به افراد دیگر، بایستی یک بخش جدا ناشدنی از توسعه توانایی‌های پرسنل باشد.

۲-۳- بهینه‌سازی فرآیندها

با توجه به کم توجهی به موضوع نگهداری و تعمیرات در گذشته منجر به کارایی پایین نگهداری و تعمیرات بوده است. حدود یک سوم هزینه‌های نت به دلیل فعالیت‌های غیر ضروری و نامناسب و زائد می‌باشد. امروزه نقش نت از یک زبان ضروری به عاملی سودآور برای سازمان در جهت افزایش قابلیت رقابت در سطح جهانی کمک می‌کند. در نتیجه تحقیقات گسترده‌ای در جهت ارائه مدل‌های برای

کاهش فعالیت‌های نت زاید و انجام به موقع نت انجام گرفته است. عملاً کلیه اجزای سیستم عملیاتی در انجام وظایف محوله فرسوده و گاهی دچار نقص می‌شوند. اینکه چگونه این فرسودگی روی می‌دهد و چگونه خرابی‌ها در بیکاری کارگران تجهیزات و شاید کل فرآیند اثر می‌گذارد، بستگی به طراحی فرآیند و شرایط عملیاتی دارد. نگهداری ضعیف می‌تواند منتج به خروجی ناقص، شرایط کاری ناامن و افزایش هزینه‌های تولید به ازای تعمیرات و زمان خرابی بیش از حد گردد [۱۳].

۴-۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

پرسش اصلی پژوهش این است که مهمترین جنبه‌های موثر بر کیفیت مدیریت دارایی‌های فیزیکی در صنعت پتروشیمی چه مواردی است؟ پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع توسعه‌ای کاربردی است. همچنین پژوهش حاضر از نظر روش، ترکیبی یا آمیخته (کمی و کیفی) می‌باشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر به منظور گردآوری داده‌های مورد نیاز از هر دو روش کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شد. ابزار گردآوری اطلاعات در این پژوهش عبارتند از ۱- بررسی اسناد و مدارک، ۲- پرسشنامه.

جامعه آماری و نمونه پژوهش جامعه آماری در این پژوهش عبارتست از کلیه کارکنان یکی از صنایع پتروشیمی می‌باشد. سپس فرمول کوکران برای محاسبه حجم نمونه استفاده شد که بر همین اساس، و بر اساس تخمین انحراف در سوالات، حجم نمونه به تعداد ۳۳ نفر از پرسنل بخش‌های مختلف این پتروشیمی شامل واحدهای مدیریت، تعمیرات، انبار و خدمات، برنامه‌ریزی سیستم‌ها و فناوری اطلاعات، واحد اداری و مالی، خدمات فنی، ایمنی و تعمیرات پیمانکاری در این پژوهش همکاری کردند. در بخش کیفی، نمونه‌گیری به صورت هدفمند انتخاب شده است. از طریق توزیع متوالی پرسشنامه محقق ساخته و جمع‌آوری و بازنگری و اصلاح آن انجام گرفته است.

۵-۲- جامعه آماری

ارزیابی وضعیت معیارها در مدل انتخاب شده در شرکت پتروشیمی مورد بررسی قرار گرفت. جامعه آماری مورد بررسی شامل ۳۶ نفر از پرسنل شرکت شامل واحدهای مدیریت، تعمیرات، انبار و خدمات، برنامه‌ریزی سیستم‌ها و فناوری اطلاعات، اداری و مالی، بهره‌برداری، فنی، ایمنی و تعمیرات پیمانکاری می‌باشد که به سوالات ارایه شده پاسخ داده و همراهی در بازه صفر تا چهار بر اساس پاسخ‌های ارایه شده منظور گردید. جامعه آماری منتخب در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- آمار افراد شرکت کننده

ردیف	واحد	تکمیل کنندگان پرسشنامه	تعداد
۱	مدیریت	مدیر عامل، مدیر بهره‌برداری، مدیر مجتمع، رئیس واحد	۴
۲	تعمیرات	رئیس، سرپرست و کارشناس ارشد	۱۲
۳	انبار و خدمات	سرپرست و کارشناس	۳
۴	برنامه‌ریزی سیستم‌ها و فناوری اطلاعات	سرپرست	۱
۵	واحد اداری و مالی	سرپرست و کارشناس	۲
۶	واحد بهره‌برداری	سرپرست شیفت	۴
۷	خدمات فنی	رئیس، سرپرست و کارشناس ارشد	۳
۸	واحد ایمنی	سرپرست و کارشناس ارشد	۲
۹	واحد تعمیرات پیمانکاری	کارشناس	۵

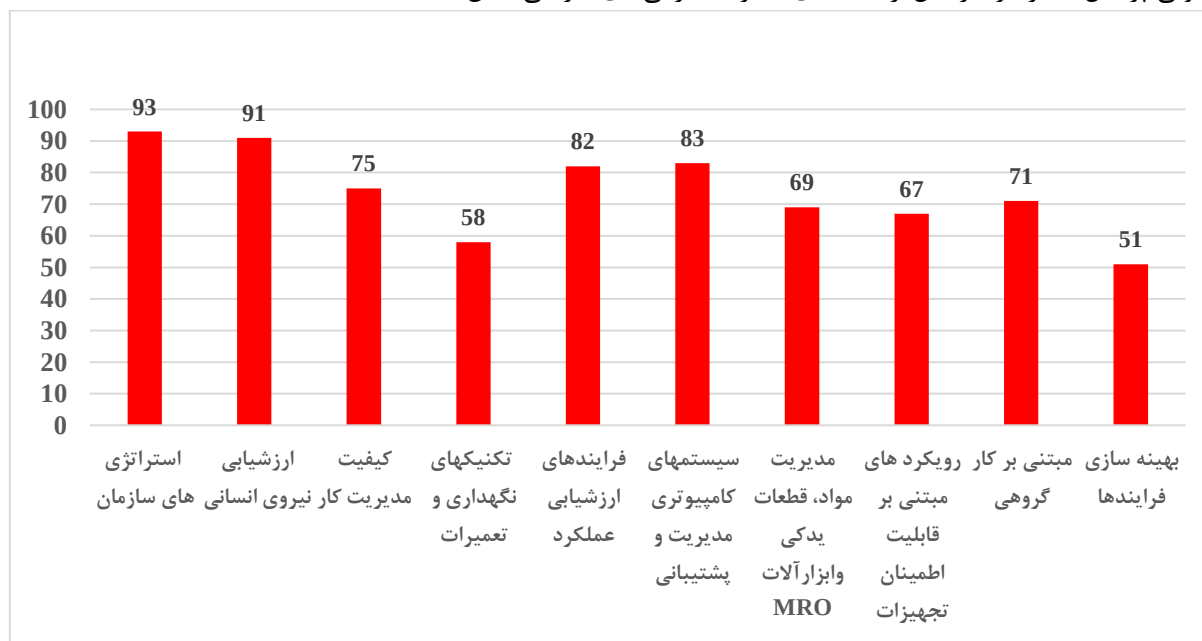
با در نظر گرفتن ضرایب فرمول کوکران به صورت $p=q=0.5$ و $z=1.96$ ، و در نظر گرفتن خطای ۵ درصد، حجم نمونه معادل ۳۳ به دست می‌آید. همچنین ضریب قابلیت اطمینان معادل ۹۵ درصد می‌باشد که در نتیجه روایی و پایایی پرسشنامه نیز مورد تایید است.

۶-۲-نمرات پرسشنامه و محاسبه آن

پرسشنامه ارزیابی مدیریت دارایی‌های فیزیکی دارای ده جنبه می‌باشد. هر یک از این ده جنبه با ده سوال ارزیابی می‌شود. برای تکمیل این پرسشنامه در ابتدا باید کسانی که قرار است پرسشنامه‌ها را تکمیل کنند، توجیه و با مفاهیم کلی و هدف این پرسشنامه آشنا شدند. پرسشنامه‌ها بی‌نام تکمیل می‌گردند که صحت تکمیل آن را افزایش می‌دهد. هر گروه از کارکنان سازمان باید جداگانه به سوالات پاسخ دهند این کار باعث می‌شود در نهایت امتیاز ارزیابی را بر اساس نظر مدیران، سرپرست‌ها و کارشناسان به صورت جداگانه در دسترس باشند. معمولاً نظر هر یک از این گروه‌ها با سایر گروه‌ها اختلاف جزئی دارد. برای هر سوال پنج رده در نظر گرفته می‌شود. که از «نمیدانم» تا «تقریباً همیشه» متغیر است. امتیازات هر یک از پاسخ‌ها هم به ترتیب از «نمیدانم» با صفر شروع می‌شود و به «تقریباً همیشه» با ۴ ختم می‌شود. بعد از جمع‌آوری پاسخنامه‌ها باید هر دسته از گروه‌ها به صورت مجزا با یکدیگر بررسی شوند. برای مثال اگر ۱۰۰ نفر کارشناس پرسشنامه را تکمیل کرده‌اند در گام اول پرسشنامه این ۱۰۰ نفر با یکدیگر جمع بسته می‌شود. میانگین نمره از صفر تا ۴ برای هر سوال باید محاسبه شود. در گام بعدی باید میانگین نمره در هر جنبه را نیز محاسبه کرد. برای این کار نمره‌های ده سوال مرتبط با یکی از جنبه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی با هم جمع و بر تعداد آنهایی تقسیم می‌شود.

۷-۲-نتایج حاصل

جنبه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی شامل استراتژی‌های سازمان، ارزشیابی نیروی انسانی، کیفیت مدیریت کار، تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات، فرآیند ارزشیابی عملکرد، سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی، مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO، رویکرد های مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات، مبتنی بر کار گروهی و بهینه سازی فرایندها می‌باشد. در شکل ۲، درصد پاسخگویی پرسنل به در هر سرفصل از جنبه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی نشان داده شده است.



شکل ۲- درصد پاسخ دهندگان به هر کدام از جنبه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی

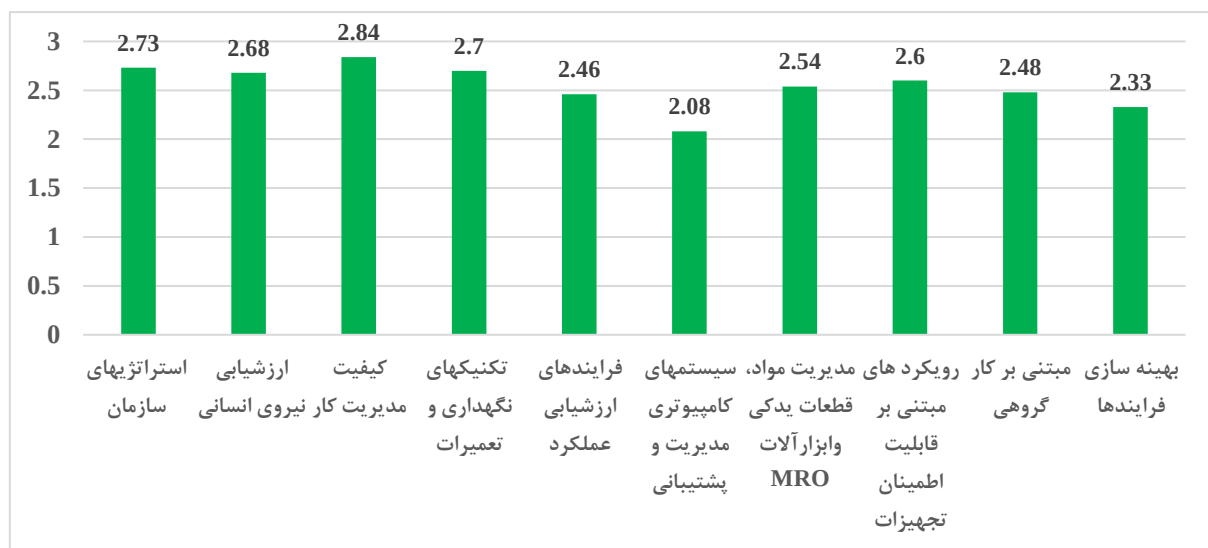
همان‌طور که نمودار بالا نشان می‌دهد، سرفصل‌های استراتژی سازمانی و نیروی انسانی با توجه به عمومی بودن این سرفصل‌ها، توسط پرسنل بیشتری پاسخ داده شده است. پس از آن سرفصل‌های فرآیند ارزشیابی، عملکرد سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی و روش‌های مبتنی بر کار گروهی که به حوزه‌های بیشتر کاری ارتباط داشته و سرفصل‌های رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات، مدیریت مواد، قطعات یدکی و ابزار آلات MRO، تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات و روش‌های بهینه‌سازی فرآیند نگهداری و تعمیرات به واحدهای فنی و بازرگانی مرتبط بوده است، پاسخ داده شده است.

نمرات ثبت شده بر اساس روش گفته برای جنبه‌های ده‌گانه مدیریت دارایی فیزیکی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- آمار افراد شرکت کننده

ردیف	واحد	امتیاز
۱	استراتژی‌های سازمان	۶/۸۲۵
۲	ارزشیابی نیروی انسانی	۶/۷
۳	کیفیت مدیریت کار	۷/۱
۴	تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات	۶/۷۵
۵	فرآیند ارزشیابی عملکرد	۶/۱۵
۶	سیستمهای کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی	۵/۲
۷	مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO	۶/۳۵
۸	رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات	۶/۵
۹	مبتنی بر کار گروهی	۶/۲
۱۰	بهینه‌سازی فرایندها	۵/۸۲۵

همچنین نمرات کسب شده به صورت مصور نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



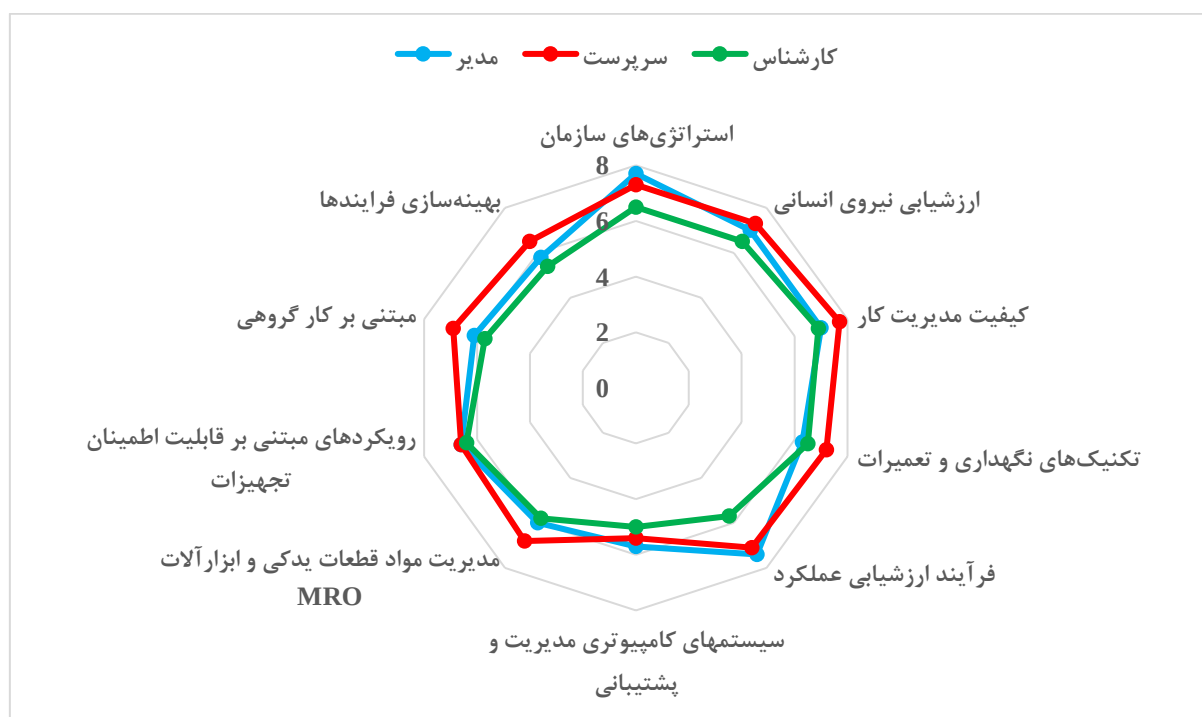
شکل ۳- نمرات کسب شده در هر کدام از جنبه‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی

بر اساس شکل ۳ می‌توان گفت که:

- کیفیت مدیریت کار مطابق انتظارات بیشترین نمره را کسب نموده است.
 - نمرات استراتژی‌های سازمان، ارزشیابی نیروی انسانی، تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات و رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات تجهیزات تقریباً مشابه یکدیگر بوده و همگی بالای ۲/۶۰ می‌باشد.
 - نمرات فرآیند ارزشیابی عملکرد، سیستمهای کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی، مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO، مبتنی بر کار گروهی و بهینه‌سازی فرایندها همگی کمتر از ۲/۵ می‌باشد و در واقع کمترین نمره‌ها را کسب نموده‌اند که عمدتاً مرتبط با حوزه تعمیرات و نگهداری می‌باشد.
- در جدول ۳ نمرات مربوط به پاسخ‌دهی سرپرستان، کارشناسان و مدیران آورده شده است. همچنین جهت درک بهتر این نمرات با استفاده از یک نمودار عنکبوتی در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به نمرات کسب شده مدیران، سرپرستان، کارشناسان، ارزیاب و سایر پرسنل

سمت	مدیر	سرپرست	کارشناس
استراتژی‌های سازمان	۷/۷	۷/۳	۶/۵
ارزشیابی نیروی انسانی	۷/۰	۷/۳	۶/۵
کیفیت مدیریت کار	۷/۰	۷/۷	۶/۹
تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات	۶/۳	۷/۲	۶/۵
فرآیند ارزشیابی عملکرد	۷/۴	۷/۱	۵/۷
سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی	۵/۷	۵/۴	۵/۰
مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO	۶/۰	۶/۸	۵/۸
رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات	۶/۶	۶/۶	۶/۴
مبتنی بر کار گروهی	۶/۱	۶/۹	۵/۷
بهینه‌سازی فرایندها	۵/۸	۶/۵	۵/۴



شکل ۴- نمودار عنکبوتی مربوط به نمرات کسب شده مدیران، سرپرستان، کارشناسان، ارزیاب و سایر پرسنل

بر اساس این شکل می‌توان گفت که در ارزشیابی نیروی انسانی، استراتژی‌های سازمان، رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان، سیستم‌های کامپیوتری و مدیریت پشتیبانی و ارزشیابی عملکرد تقریباً نظرات سرپرستان و مدیران مشابه یکدیگر می‌باشد. در جنبه‌های رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان و سیستم‌های کامپیوتری و مدیریت پشتیبانی نظرات سرپرستان و کارشناسان مشابه یکدیگر می‌باشد. در جنبه‌های کیفیت مدیریت کار، نگهداری و تعمیرات، بهینه‌سازی فرآیندها، کار گروهی، رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان مدیریت قطعات یدکی و ابزارآلات تقریباً نظرات کارشناسان و مدیران مشابه یکدیگر می‌باشد. نقشه راه مدیریت دارایی‌های فیزیکی در صنعت پتروشیمی به صورت جدول ۴ می‌باشد.

نتایج مربوط به هر یک از جنبه‌های مدیریت به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

استراتژی‌های سازمان

- ✓ هم‌راستایی و پشتیبانی اهداف، پروژه‌ها و فعالیت‌های تعریف شده با اهداف کلی سازمان
- ✓ عدم اطلاع رسانی و آگاهی از مأموریت، چشم انداز و اهداف سازمان در سطوح پایین‌تر
- ✓ عدم تدوین اسناد بالادستی مدیریت دارایی‌های فیزیکی
- ✓ آگاهی نسبی سازمان در خصوص مدیریت دارایی‌های فیزیکی (در نتیجه تدوین و ابلاغ برنامه‌ها و فعالیت‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت موثر واقع خواهد شد)

ارزشیابی نیروی انسانی

- ✓ روحیه کار تیمی، همکاری و مشارکت مطلوب
- ✓ ارتباط کاری مناسب میان گروه‌های کاری
- ✓ نارضایتی افراد از واگذاری کارهای خارج از شرح وظایف مکتوب
- ✓ در نظر نگرفتن شرح وظایف در نیازسنجی آموزشی
- ✓ عدم مشاهده سیستم موثر در خصوص مدیریت دانش و نظام پیشنهادات
- ✓ عدم اطلاع رسانی مبنای پرداخت پاداش و کارانه برای سطوح پایین‌تر سازمان

کیفیت مدیریت کار

- ✓ وجود یک فرآیند قابل قبول در خصوص صدور برنامه هفتگی تعمیرات
- ✓ پیش بینی منابع برای انجام برخی کارهای تعمیراتی
- ✓ کامل نبودن اطلاعات اخذ شده در فرم‌های تعمیرات
- ✓ عدم وجود یا ابلاغ دستورالعمل مدون و مشخص در خصوص اولویت بندی دستورکارها
- ✓ عدم تدوین برنامه کارهای استاندارد تعمیراتی (Job Plan)

تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات

- ✓ استفاده از تجهیزات خودکار جهت داده برداری از تجهیزات در واحد عملیات (وجود فرصت‌های بهبود در تحلیل روی داده‌های جمع‌آوری شده جهت حرکت به سمت نگهداشت پیش‌کنشی)
- ✓ پایش وضعیت مناسب (توجه و سرمایه‌گذاری در خصوص خرید تجهیزات پایش وضعیت)
- ✓ اجرای منظم برنامه‌های PM
- ✓ عدم بازبینی برنامه‌های PM با استفاده از روش‌های ساختاریافته
- ✓ عدم مشاهده برنامه‌های مواجهه با پیامدهای کارکرد تا خرابی

فرآیند ارزشیابی عملکرد

- ✓ وجود شاخص‌هایی مربوط به برخی فرآیندهای موجود در سازمان
- ✓ عدم دسترسی آسان به داده‌های مورد نیاز
- ✓ عدم انجام تحلیل و پایش شاخص‌ها
- ✓ طولانی بودن بازه‌های اندازه‌گیری

سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی

- ✓ عدم استفاده از نرم افزار نگهداری و تعمیرات توسط کارکنان (مدیریت دستورکارها به صورت کاغذی و دستی)
- ✓ عدم یکپارچه سازی نرم افزارهای موجود در سازمان
- ✓ نبود سوابق کامل و دقیق اقدامات تعمیراتی
- ✓ عدم استفاده از نرم افزارهای هوشمند جهت تحلیل داده‌های نگهداشت و قابلیت اطمینان

مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO

- ✓ پیاده‌سازی سیستم کدگذاری تجهیزات و بهبود چیدمان قطعات
- ✓ عدم توانایی نرم افزار انبار در پوشش فرآیندهای مربوطه
- ✓ عدم تدوین شاخص های انبار
- ✓ عدم انجام محاسبات دقیق درخصوص سطوح بهینه موجودی، بیشینه و کمینه، مقدار سفارش اقتصادی، زمان انتظار و ...

رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات

- ✓ بررسی ۱۱۰ مورد خرابی تجهیزات در جلسات تحلیل خرابی
- ✓ عدم تدوین سند ارزیابی کمی و دقیق جهت تعیین درجه اهمیت تجهیزات
- ✓ تعیین روش نگهداشت صرفا بر اساس پیشنهاد سازندگان یا تجربه کارکنان و عدم استفاده از روش های ساختاریافته
- ✓ عدم استقرار سیستم بازرسی مبتنی بر ریسک

مبتنی بر کار گروهی

- ✓ همکاری و تعامل قابل قبول میان گروه‌های کاری
- ✓ برگزاری جلسات منظم در رده مدیران
- ✓ وجود فرصت‌هایی جهت بهبود در نگهداشت اپراتوری
- ✓ عدم مشاهده روش ساختاریافته مدیریت تغییرات (MOC)

بهینه‌سازی فرایندها

- ✓ عدم انطباق گردش کارها در مجموعه با نمودارهای ترسیم شده
- ✓ وجود گلوگاه‌هایی در برخی فرآیندهای موجود
- ✓ عدم مشاهده دستورالعمل های مدون بهره برداری و یا عدم آگاهی کارکنان مربوطه از آن

جدول ۴- نقشه راه مدیریت دارایی های فیزیکی بر اساس آپتایم در نمونه موردی یکی از صنایع پتروشیمی

جنبه‌های ارزیابی دارایی فیزیکی	رهبری	برنامه ریزی	پشتیبانی	عملکرد	ارزیابی عملکرد	بهبود
مبتنی بر کار گروهی		۱- نت بهره ور فراگیر ۲-نظام شش سیگما	برقراری جلسات طوفان فکری			
بهینه‌سازی فرایندها		روش‌های بهینه‌سازی نت پیش گیرانه	باز اعتباری فرایند بررسی خطر در راستای نظام‌مند			
تعالی رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات		۱- راهکارهای تحلیل و ریشه یابی خرابی ها در راستای نظام‌مند ۲- نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان در راستای نظام‌مند	شناسایی و ارزیابی مشکلات در راستای نظام مدیریت دارایی های فیزیکی			

	۱- تدوین شاخص کلیدی عملکرد KPI ۲- مدیریت و ارزیابی و نظارت پیمانکاران	بودجه ریزی بر مینا عملکرد		برقراری نظام ممیزی شاخص ها	به کارگیری کارت امتیاز متوازن	ارزشیابی عملکرد	ضروریات
		استقرار نظام مدیریت اطلاعات	۱- ایجاد بانک‌های داده ۲- برقراری نظام آرشیو بندی ۳- تدارک سخت افزار مناسب		استقرار CMMS استقرار ERP	سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی	
	آراستگی محیط کار در S5 راستای نظام‌مند		ایجاد محیط کار ایمن، مرتب، تمیز، منظم و استاندارد در راستای نظام‌مند	انجام RCM برای تجهیزات کلیدی	انجام نت اپراتوری با مشارکت واحدهای بهره‌برداری، تعمیرات و بازرسی	تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات	
		تدوین نقشه راه اجرایی فعالیت‌ها	تعیین محدوده فعالیت‌های کاری	۱- مدیریت و زمان‌بندی فعالیت‌ها ۲- مدیریت برنامه‌ریزی فعالیت‌ها ۳- مدیریت گردش کار نت	مدیریت توقفات	کیفیت مدیریت کار	
		آراستگی در انبار در راستای نظام‌مند	۱- ارزیابی تامین کنندگان در راستای تامین پایداری قطعات در راستای نظام‌مند ۲- زنجیر تامین ایمن در راستای نظام‌مند	مدیریت موجودی برای جلوگیری از تاخیرات، هزینه‌های اضافی نگهداری در راستای نظام‌مند	مدیریت قطعات یدکی و تعمیر پذیری در راستای نظام‌مند	مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO	
	تدوین شاخص کلیدی نیرو انسانی KPI		چند مهارتی کردن افراد در راستای ارتقای بهره‌وری کارکنان و منابع انسانی	۱- برگزاری دوره مدیریت دارایی فیزیکی ۲- آموزش ارتقای مهارت ها افراد و	ایجاد سیستم‌های انگیزشی در راستای ارتقای بهره‌وری کارکنان و منابع انسانی	ارزشیابی نیروی انسانی	راهبردی

				منابع انسانی سازمانی در راستای استقرار نظام‌مند		
		ایجاد تعهد ماموریت در راستای استقرار نظام‌مند	تدوین استراتژی‌های کلان در راستای استقرار نظام‌مند		تهیه چشم اندازه و خط مشی مورد نیاز در راستای استقرار نظام‌مند	استراتژی‌های سازمان

همچنین پروژه‌های پیشنهادی در این راستا در نمونه موردی یکی از صنایع پتروشیمی به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۵- لیست پروژه‌های پیشنهادی در صنعت پتروشیمی

سال سوم	سال دوم	سال اول	پروژه‌های پیشنهادی
		✓	اولویت‌بندی تجهیزات
		✓	اجرای مستمر بهینه سازی مقادیر حداقل و حداکثر موجودی قطعات یدکی و زنجیره تأمین کالا
		✓	اولویت‌بندی فرایندها و تدوین برنامه ی اصلاح فرایندهای مدیریت دارایی‌های فیزیکی
✓	✓		بهینه سازی برنامه‌های نگهداشت PMO
		✓	توسعه استانداردسازی برنامه کارهای تعمیرات (JOB PLAN)
		✓	بازنگری شاخص‌های ارزیابی عملکرد موجود در سازمان و تدوین شاخص‌های مدیریت دارایی‌های فیزیکی
	✓		به‌کارگیری نرم‌افزارهای هوشمند برای تحلیل اطلاعات بهره‌برداری و نگهداری و تعمیرات
	✓		ایجاد و توسعه فرایندهای استاندارد عملیات (SOPS) برای تمامی فرایندهای حساس
		✓	توسعه نظام پیشنهادات
✓	✓		اجرای مستمر پروژه مطالعات هزینه چرخه عمر LCC
✓	✓		تعیین شاخص سلامت تجهیزات
✓	✓		ایجاد ساختار سازمانی مدیریت دارایی‌های فیزیکی
✓	✓		توسعه مدیریت دانش

۳- نتیجه و جمع بندی

با جمع بندی نتایج حاصل از ارزیابی وضعیت صنعت پتروشیمی مشخص گردید که این صنعت در جنبه‌های نمرات فرآیند ارزشیابی عملکرد، سیستم‌های کامپیوتری مدیریت و پشتیبانی، مدیریت مواد قطعات یدکی و ابزارآلات MRO، مبتنی بر کار گروهی و بهینه سازی فرایندها از مبحث مدیریت دارایی‌ای فیزیکی دارای ضعف اندکی می‌باشد که نیاز به پیاده‌سازی فرآیند بهبود دارد. همچنین با توجه به اینکه این جنبه‌ها بیشتر مرتبط با حوزه تعمیرات و نگهداری می‌باشد، اهمیت ویژه‌ی تعمیرات و نگهداری را در پلنت صنعت پتروشیمی نشان می‌دهد. برای پیاده‌سازی فرایندهای بهبود در سازمان ابتدا با در نظر داشتن استراتژی‌ها، محدودیتها و منابع سازمان پروژه‌های بهبود اولویت‌بندی می‌شوند و پس از اولویت‌بندی و تعیین مسیر راه پروژه‌های بهبود در سازمان، پیاده‌سازی می‌شوند. بدین ترتیب امکان مدیریت دارایی‌های فیزیکی در سازمان براساس استاندارد PAS 55/ISO 55000 و با کمک مدل تعالی در سازمان فراهم می‌آید. لازمه پیاده‌سازی پروژه‌های بهبود بهره بردن از افراد آموزش دیده و باصلاحیت تأیید شده است. پروژه‌های بهبود را می‌توان با پروژه‌های نمونه در سازمان آغاز کرد و سپس توسعه داد. چشم‌اندازی مشترک در سازمان فراهم می‌شود که کارکنان و مدیران را به آینده سازمان علاقه‌مند می‌سازد و افراد آموزش‌های لازم را دریافت می‌کنند. مدیریت منابع انسانی مبتنی بر هدفی خاص، مثل پیاده‌سازی مدیریت دارایی فیزیکی به هدفمندی تلاش‌ها در این زمینه منجر می‌شود و مشکلات ناشی از مقاومت در برابر تغییر را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. ضمن آنکه به طور ویژه‌ای برای مدیریت تغییر، فرایندی ویژه معرفی می‌شود. در مدل اجرایی مدیریت دارایی‌های فیزیکی ابزارها یکی پس از دیگری به صورت یکپارچه در چرخه بهبود مستمر قرار می‌گیرند.

منابع

- [1] Preprotić, B., Rakić, H., & Mitrović, D. (2022). PHYSICAL ASSET MANAGEMENT IN EVERYDAY LIFE. *Polytechnic and design*, 10(3), 160-166.
- [2] Obicci, P. A. (2022). The Moderating Effects of Institutional Framing on Authentic Leadership-Physical Asset Management Practices Relationships in Local Governments in Uganda. *International Journal of Social Sciences and Economic Review*, 4(3), 09-24.
- [3] Maletič, D., Marques de Almeida, N., Gomišček, B., & Maletič, M. (2022). Understanding motives for and barriers to implementing asset management system: an empirical study for engineered physical assets. *Production Planning & Control*, 1-16.
- [4] Polenghi, A., Roda, I., Macchi, M., Pozzetti, A., & Panetto, H. (2022). Knowledge reuse for ontology modelling in Maintenance and Industrial Asset Management. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100298.
- [5] da Silva, R. F., & de Souza, G. F. M. (2022). Modeling a maintenance management framework for asset management based on ISO 55000 series guidelines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(4), 915-937.
- [6] Akpan, J., & Olanrewaju, O. A. (2022, March). Asset management models brief review and framework development for energy sustainability & sustainable development. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Istanbul, Turkey (pp. 7-10).
- [7] Sousa, V., & Meireles, I. (2023). Quality and asset management: conceptual compatibility towards sustainable infrastructures management. *Total Quality Management & Business Excellence*, 34(5-6), 743-767.
- [8] Polenghi, A., Roda, I., Macchi, M., Pozzetti, A., & Panetto, H. (2022). Knowledge reuse for ontology modelling in Maintenance and Industrial Asset Management. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100298.
- [9] Ugarelli, R., & Sægrov, S. (2022). Infrastructure asset management: historic and future perspective for tools, risk assessment, and digitalization for competence building. *Water*, 14(8), 1236.
- [10] Menéndez, M. C. M., Cerezo, I. L. M., Cerezo, J. I. B., & Mite, L. A. B. (2022). Asset management system according to ISO 55000 standard in the production process. *Journal of business and entrepreneurial studie*, 6(4).
- [11] González-Prida, V., Parra, C., Crespo, A., Pérès, F., & Martín, C. (2022). Practical Implementation of an Asset Management System According to ISO 55001: A Future Direction in the Cloud and IoT Paradigm. In *Cloud IoT* (pp. 25-33). Chapman and Hall/CRC.
- [12] Målbakken, K., Sundell, E., Martinsson, A., & Vullum-Bruer, K. (2023, April). Thermal Insight-Digital Twin Technology for Enhancing Asset Uptime and System Reliability. In *Offshore Technology Conference* (p. D011S006R004). OTC.
- [13] Chiu, Y., Yan, T., Chiu, S., Wang, H., & Chiu, T. (2023). Impact of dual uptime-reducing strategies, postponement, multi-delivery, and rework on a multiproduct fabrication-shipping problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 14(2), 323-340.

- [14] da Silva, A. F., de Oliveira Sales, J. H., & Pereira, J. P. D. C. N. (2023). Uptime optimization in a vertical dryer and its economic impact. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(2), 15571-

اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت

ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی

احمد مهدیان پورانی^{۱*}

دانیال دیانی^۲

مرتضی عباسی نژاد^۳

محسن مقامی^۴

شرکت ملی صنایع مس ایران، مجتمع مس سرچشمه، امور ذوب، واحد برنامه ریزی و پایش وضعیت

چکیده

در این مقاله، ابتدا مهمترین و مرسوم ترین روش های نگهداری و تعمیرات تجهیزات و ماشین آلات مرور می شوند. سپس، رتبه بندی حساسیت تجهیزات، به عنوان پایه ای ترین مفهوم و اولین گام در طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه مبتنی بر پایش وضعیت، به همراه معیارهای اصلی رتبه بندی معرفی می گردد. نوآوری مقاله حاضر، فرمول بندی ریاضی رتبه بندی حساسیت تجهیزات به منظور ایجاد شفافیت و نظام مند نمودن این فرآیند می باشد. در ادامه، با تعیین دوره زمانی بازرسی از تجهیزات بر مبنای رتبه بندی انجام شده، اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی ارائه می شود. در نهایت، نکته کلیدی در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت بیان شده و نتایج حاصل از اجرای برنامه در امور ذوب مجتمع مس سرچشمه گزارش می شوند.

لغات کلیدی: نگهداری و تعمیرات، نت پیشگویانه، پایش وضعیت، ارتعاشات، ترموگرافی، تریبولوژی.

۱-مقدمه

نگهداری و تعمیرات (نت) مجموعه ای از فعالیت ها و عملکردها است با مأموریت عملیاتی نگه داشتن دستگاه ها، ماشین آلات و تجهیزات. در واقع، نگهداری و تعمیرات یک تجهیز یعنی طرح ریزی و انجام فعالیت هایی بر روی آن که عملکرد مستمر تجهیز برای تولید محصول یا خدمات با کیفیت را مهیا سازد. نگهداری و تعمیرات به بررسی مشخصه های عملکردی، سرویس کاری، تعمیر یا تعویض دستگاه ها، ماشین آلات و تجهیزات می پردازد. علم نت، مهارت و روش های نگهداری (Maintenance)، ترمیم (Repair) و اورهال (Overhaul) ماشین آلات و تجهیزات را مطالعه می کند. به همین دلیل، بعضی از منابع این علم را MRO نامیده اند که مخفف سه کلمه انگلیسی ذکر شده می باشد. هدف از نگهداری و تعمیرات، حصول اطمینان از سلامت و تضمین عملکرد مداوم و کارآمد تجهیزات، ماشین آلات و سایر دارایی ها در زمان به کارگیری و استمرار فرآیند تولید می باشد. از مهمترین مزایای نگهداری و تعمیرات می توان به افزایش طول عمر دارایی ها، افزایش راندمان تجهیزات، جلوگیری از توقفات برنامه ریزی نشده و کاهش هزینه ها اشاره کرد. برای نگهداری و تعمیرات تجهیزات می توان از راهکارهایی مانند، برنامه ریزی تعمیرات مناسب، استفاده از تجهیزات با کیفیت، پاکسازی، اندازه گیری منظم و آنالیز اطلاعات و داده ها و آموزش کارکنان، استفاده کرد [۱-۲].

در این مقاله، اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی ارائه می شود. در این راستا، ابتدا مهمترین و مرسوم ترین روش های نگهداری و تعمیرات مرور می شوند. سپس، رتبه بندی حساسیت

¹ Email Address: ahmad.mahdian.p@gmail.com, Phone Number: 09132931534, ORCID: 0000-0002-8343-6584

² Email Address: dayan_i_d@nicico.com, Phone Number: 09133902501

³ Email Address: abbasinejad@nicico.com

⁴ Email Address: maghami_mo@nicico.com

تجهیزات، به عنوان پایه ای ترین مفهوم و اولین گام در طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگويانه مبتنی بر پایش وضعیت، به همراه معیارهای اصلی رتبه بندی معرفی می گردد. نوآوری مقاله حاضر، فرمول بندی ریاضی رتبه بندی حساسیت تجهیزات به منظور ایجاد شفافیت و نظام مند نمودن این فرآیند می باشد. در ادامه، با تعیین دوره زمانی بازرسی از تجهیزات بر مبنای رتبه بندی انجام شده، اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگويانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی ارائه می شود. در نهایت، نکته کلیدی در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت بیان شده و نتایج حاصل از اجرای برنامه در امور ذوب مجتمع مس سرچشمه گزارش می شوند.

۲- انواع روش های نگهداری و تعمیرات

در این قسمت، مهمترین و مرسوم ترین روش های نگهداری و تعمیرات به اختصار مرور می شوند [۲-۳].

۲-۱- نگهداری و تعمیرات اصلاحی (Corrective Maintenance)

در این روش، تجهیزات پس از وقوع خرابی تعمیر می شوند. این روش گاهی پرهزینه ترین روش نگهداری است چرا که خرابی یک قطعه یا جزء ممکن است باعث ایجاد خرابی در سایر اجزای سیستم و قطعات شود، و همچنین هزینه تعمیرات مکرر این قطعات و خرابی های پی در پی و غیرمنتظره می تواند باعث کاهش تولید و زیان های بزرگ گردد.

۲-۲- نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شکست (Breakdown Maintenance)

در این روش، تعمیر و نگهداری زمانی ضرورت می یابد که قطعات خراب شوند یا دستگاه دچار توقف عملکرد به شکل ناگهانی شود. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شکست، هزینه نگهداری را در اولویت قرار می دهد و در اموری کاربرد دارد که تاخیر در اجرای تعمیرات به موقع با ریسک بالایی همراه نباشد. تعمیرات مبتنی بر شکست ضرورت اجرایی ندارد اما برای اصلاح دستگاه حائز اهمیت است. تاخیر در اجرای تعمیرات مبتنی بر شکست چندان مهم نیست.

۲-۳- نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (Preventive Maintenance; PM)

این روش، یک روال برای بازرسی دوره ای با هدف شناسایی مشکلات کوچک و رفع آنها قبل از تبدیل شدن به یک مشکل بزرگ است. هدف اصلی این روش، جلوگیری از وقوع خرابی و تعمیر و اصلاح تجهیزات است به گونه ای که از زمان سرویس انجام شده تا زمان فرا رسیدن دوره سرویس بعدی هیچ گونه خرابی قابل پیشگیری ناشی از خستگی قطعات یا سایش معمولی رخ ندهد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شامل فرآیندهایی اساسی یا جزئی در دوره های مشخص نظیر روانکاری، تعویض کردن قطعات، سرویس، بازدید، بررسی، بالانس کردن و آچارکشی می شود. فاکتور مهم در این روش زمان بندی و تعیین فواصل زمانی بین سرویس ها است.

۲-۴- نگهداری و تعمیرات پیشگويانه (Predictive Maintenance; PdM)

پیشرفت های اخیر در زمینه سنسورها و سیستم های کامپیوتری باعث ظهور این روش مبتنی بر پایش وضعیت تجهیزات شده است. در این روش، از داده های جمع آوری شده توسط سنسورها برای ارزیابی مداوم سلامت سیستم و پیش بینی خرابی ها قبل از وقوع آنها استفاده می شود. دریافت داده از عملکرد دستگاه، امکان پیش بینی خرابی احتمالی قطعات را فراهم می آورد. از آنجایی که در این روش به مرور زمان اطلاعات به روزتری از وقوع یک خرابی احتمالی گردآوری می شود، نگهداری تجهیزات بسیار بهینه تر و به صرفه تر انجام می گردد. در این روش، عمده فعالیت ها بر روی پایش وضعیت متمرکز است. تکنیک های تحلیل ارتعاشات، ترموگرافی، تریبولوژی یا آنالیز روغن، صداسنجی، تحلیل جریان ماشین های الکتریکی و ضخامت سنجی مجموعه ای از متداول ترین فعالیت های پایش وضعیت در حوزه نت پیشگويانه است.

۲-۵- نگهداری و تعمیرات بهره‌ور جامع (Total Productive Maintenance; TPM)

این روش دید وسیع و کلی در زمینه نگهداری و تعمیرات داشته و برای عملکرد بهینه دستگاه و ماشین آلات مورد توجه قرار می‌گیرد. در این روش، مدیریت لازم در مورد توانایی‌های دستگاه و صرفه جویی در پرداخت هزینه‌ها انجام می‌شود. تیم نگهداری و تعمیرات تنها افراد تصمیم‌گیرنده نبوده و سایر کارکنان و کارمندان نیز در پروسه نگهداری و تعمیرات مشارکت می‌کنند. این روش دید همه جانبه داشته و از تخصص تمام کارمندان بهره‌مند می‌شود. بهره‌وری از مهارت و تخصص تمام کارمندان باعث کارکرد مطلوب و بهینه دستگاه و ماشین‌آلات می‌شود.

۲-۶- نگهداری و تعمیرات ناب (Lean Maintenance)

نگهداری و تعمیرات ناب بر روی ابتکار و نوآوری تمرکز زیادی دارد. این نوع تعمیرات، شرکت‌ها و صنایع را به سوی بازدهی بالا و افزایش تولید سوق می‌دهد. نگهداری و تعمیرات ناب بر روی پروسه‌های تولید متمرکز است. اگر وضعیت تجهیزات در بالاترین کیفیت و بهترین عملکرد باشد، تولید افزایش یافته و بازدهی بالا خواهد رفت. در تعمیرات ناب، بازدهی شرکت‌ها و صنایع به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود که راندمان فعلی نسبت به گذشته کمتر نباشد.

۲-۷- تعمیر و نگهداری تجویزی (Prescriptive Maintenance)

این روش، به عنوان یکی از جدیدترین روش‌های نگهداری و تعمیرات، جامع بوده و بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورها، یادگیری ماشین و اینترنت می‌باشد. در این روش می‌توان با مطالعه رفتارهای مختلف تجهیز، بررسی الگوی داده‌ها و مقایسه حالت‌های سلامت و خرابی تجهیز تحلیل ترکیبی از عملکرد تجهیز را به دست آورد و متعاقباً وضعیت سلامت تجهیز را با دقت بسیار خوبی تخمین زد. به طور کلی، در تعمیر و نگهداری تجویزی از هوش مصنوعی استفاده می‌شود.

۲-۸- نگهداری و تعمیرات اضطراری (Emergency Maintenance; EM)

این روش، که بدون هیچ گونه برنامه‌ریزی انجام می‌شود، بعد از رخداد حادثه یا توقف ناگهانی عملکرد دستگاه ضرورت می‌یابد. در این روش، اقدامات لازم بایستی به سرعت بر روی دستگاه انجام شوند. زمان اعمال تعمیرات اضطراری بسیار محدود بوده و باید در کمترین زمان ممکن انجام شود. لازم به ذکر است که در نگهداری و تعمیرات اضطراری اولویت اول به زمان ریکاوری و بازیابی اطلاعات اختصاص داده می‌شود.

۳- رتبه بندی حساسیت تجهیزات

رتبه بندی حساسیت تجهیزات که به انگلیسی Asset Criticality Ranking بوده و به اختصار ACR نامیده می‌شود، پایه‌ای‌ترین مفهوم و اولین اقدام در طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگويانه مبتنی بر پایش وضعیت می‌باشد. رتبه بندی حساسیت تجهیزات از این جهت مهم است که تعیین کننده دوره بازرسی تجهیزات می‌باشد. در اولین گام بایستی تجهیزات و ماشین‌آلات را مطابق جدول (۱) دسته بندی نمود.

جدول (۱) - رتبه بندی حساسیت تجهیزات

رتبه - Rank	حساسیت - Criticality
A	فوق العاده حساس - Highly Critical
B	حساس - Critical
C	کمتر حساس - Less Critical

ماشین آلات و تجهیزات دسته بندی شده در جدول (۱) مطابق زیر تعریف می شوند.

۳A-۱-رتبه

ماشین آلات و تجهیزات فوق العاده حساسی هستند که نقش اساسی در تولید داشته و از دسترس خارج شدن آنها باعث توقف تولید می شود. همچنین، ماشین آلات و تجهیزاتی که هزینه تعمیراتی بسیار زیادی دارند یا زمان تعمیر آنها زیاد طول می کشد، گزینه های بسیار خوبی برای قرار گرفتن در این دسته می باشند.

۳B-۲-رتبه

ماشین آلات و تجهیزات حساسی هستند که به شدت ظرفیت تولید را محدود می کنند. به عنوان یک قانون کلی، ماشین آلات و تجهیزاتی که از دسترس خارج شدن شان باعث افت بیش از ۳۰ درصدی در تولید شود. همچنین، ماشین آلات و تجهیزاتی که سابقه تعمیراتی مزمینی دارند، می توانند در این دسته قرار گیرند.

۳C-۳-رتبه

ماشین آلات و تجهیزات کمتر حساسی هستند که جزء تجهیزات اصلی بوده و هزینه تعمیرات را بالا می برند، اما از دسترس خارج شدن شان اثر چشمگیری روی تولید ندارد.

۳-۴- معیارهای اصلی رتبه بندی حساسیت تجهیزات

از دیدگاه پایش وضعیت، معیارهای اصلی برای رتبه بندی حساسیت تجهیزات به شرح زیر می باشند.

معیار اول (Stand-By) - آیا تجهیز مورد نظر جهت رتبه بندی Stand-By دارد یا خیر؟

معیار دوم (دائم کار) - آیا تجهیز مورد نظر جهت رتبه بندی دائم کار است یا خیر؟

معیار سوم (دور بالا) - آیا تجهیز مورد نظر جهت رتبه بندی دور بالا (حدود ۳۰۰۰ دور بر دقیقه) است یا خیر؟

مطابق معیار اول، ماشین آلات و تجهیزاتی که نقش اساسی در تولید داشته و Stand-By ندارند، بایستی در رتبه A قرار گیرند. بطور مشابه، مطابق معیار دوم، ماشین آلات و تجهیزاتی که دائم کار بوده و صرفاً در زمان اورهال برای تعمیرات در دسترس می باشند، بایستی در رتبه A قرار گیرند. از آنجایی که از دیدگاه پایش وضعیتی، نرخ خرابی در ماشین آلات و تجهیزات دور بالا (حدود ۳۰۰۰ دور بر دقیقه) به شدت بیشتر می باشد، گزینه های مناسبی برای قرار گرفتن در رتبه A می باشند. لازم به ذکر است معیارهایی همچون نقش تجهیز در تولید، نرخ خرابی تجهیز، هزینه تعمیرات و زمان مورد نیاز برای تعمیر نیز می توانند در رتبه بندی حساسیت تجهیزات در نظر گرفته شوند.

۳-۵- فرمول بندی ریاضی رتبه بندی حساسیت تجهیزات

از آنجایی که بهتر است فرآیند رتبه بندی حساسیت تجهیزات شفاف و سیستماتیک یا نظام مند باشد؛ در این قسمت، یک فرمول بندی ریاضی برای رتبه بندی حساسیت تجهیزات از دیدگاه پایش وضعیت و بر مبنای معیارهای ارائه شده در قسمت قبل پیشنهاد می شود. می دانیم که حساسیت یک ویژگی تجهیز است که میزان ریسک مرتبط با تجهیز را توصیف می کند. مطابق استانداردهای ایزو ۵۵۰۰۱ (سال ۲۰۱۴) و ایزو ۳۱۰۰۰ (سال ۲۰۱۸)، ریسک به عنوان "اثر عدم قطعیت روی تجهیز" تعریف می شود [۴-۵]. اگر میزان ریسک مرتبط با تجهیز غیر قابل قبول باشد، تجهیز حساس در نظر گرفته می شود. به منظور ارزش گذاری حساسیت تجهیزات، بایستی کلیه ریسک های مرتبط با توقف یا کاهش تولید بر مبنای معیارهای پایش وضعیت، ریسک های مرتبط با کیفیت محصول، ملاحظات ایمنی، زیست محیطی و تعمیراتی کمی سازی شوند. در این راستا، شاخص حساسیت (Criticality Index) به صورت زیر پیشنهاد می شود،

$$CI = p[W_P M_P + W_W M_W + W_R M_R + W_S M_S + W_M M_M] \quad (۱)$$

که در آن CI شاخص حساسیت بوده و سایر پارامترها در جدول (۲) توصیف می شوند.

جدول (۲) - توصیف پارامترهای معادله (۱)

پارامتر	مفهوم	پارامتر	مفهوم
M_P	شاخص کاهش یا توقف تولید	W_P	ضریب وزنی ریسک های کاهش یا توقف تولید
M_W	شاخص بهره برداری و استفاده از تجهیز	W_W	ضریب وزنی میزان بهره برداری و استفاده از تجهیز
M_R	شاخص نرخ پیشرفت و رشد خرابی	W_R	ضریب وزنی نرخ پیشرفت و رشد خرابی
M_S	شاخص ایمنی و زیست محیطی	W_S	ضریب وزنی ملاحظات ایمنی و زیست محیطی
M_M	شاخص تعمیرات	W_M	ضریب وزنی ملاحظات تعمیراتی
p	ضریب شکست		

شاخص کاهش یا توقف تولید بر مبنای معیار اول (Stand-By) به صورت زیر کمی سازی می شود،

$$M_P = \frac{\text{تعداد تجهیز روشن}}{\text{تعداد کل تجهیزات مشابه}} \quad (۲)$$

شاخص بهره برداری و استفاده از تجهیز بر مبنای معیار دوم (دائم کار) به صورت زیر محاسبه می گردد،

$$M_W = \frac{\text{ساعت کارکرد تجهیز در روز}}{24} \quad (۳)$$

شاخص نرخ پیشرفت و رشد خرابی بر مبنای معیار سوم (دور بالا) به صورت زیر تعریف می شود،

$$M_R = \frac{\text{دور نامی تجهیز}}{3000} \quad (4)$$

شاخص ایمنی و زیست محیطی مطابق جدول (۳)، شاخص تعمیرات بر مبنای پارامترهایی مثل زمان لازم برای تعمیر تجهیز، هزینه های تعمیراتی تجهیز، زمان لازم برای تهیه قطعات یدکی تجهیز و ... مطابق جدول (۴)، ضرایب وزنی استفاده شده در معادله (۱) مطابق جدول (۵) و ضریب شکست بر مبنای زمان بین خرابی ها و از دسترس خارج شدن تجهیز مطابق جدول (۶) پیشنهاد می گردند.

جدول (۳) - مقدار پیشنهادی برای شاخص ایمنی و زیست محیطی (M_S)

وضعیت ایمنی و آلاینده‌گی	مقدار پیشنهادی
بدون ریسک/آلاینده‌گی	صفر
ریسک/آلاینده‌گی کم	۰/۱
ریسک/آلاینده‌گی متوسط	۰/۲
ریسک/آلاینده‌گی زیاد	۰/۵
ریسک/آلاینده‌گی جدی	۱

جدول (۴) - مقدار پیشنهادی برای شاخص تعمیرات (M_M)

وضعیت تعمیراتی (مثل زمان تعمیر)	مقدار پیشنهادی
تعمیرات ناچیز	صفر
تعمیرات کم (زمان تعمیر کمتر از ۲ ساعت)	۰/۱
تعمیرات متوسط (زمان تعمیر بین ۲ تا ۱۰ ساعت)	۰/۲
تعمیرات زیاد (زمان تعمیر بین ۱۰ تا ۲۴ ساعت)	۰/۵
تعمیرات جدی (زمان تعمیر بیشتر از ۲۴ ساعت)	۱

جدول (۵) - مقادیر پیشنهادی برای ضرایب وزنی معادله (۱)

ضریب وزنی	مقدار پیشنهادی
W_P	۳۰
W_W	۲۰
W_R	۲۰
W_S	۳۰
W_M	۲۵

جدول (۶) - مقدار پیشنهادی برای ضریب شکست (p) بر مبنای زمان بین خرابی های تجهیز

زمان بین خرابی های تجهیز	مقدار پیشنهادی
بیشتر از ۵ سال	۱
بین ۲ تا ۵ سال	۲
بین ۱ تا ۲ سال	۴
کمتر از ۱ سال	۸

اکنون می توان با استفاده از عدد به دست آمده برای شاخص حساسیت (CI) رتبه تجهیز را تعیین نمود. جدول (۷) یک نمونه نحوه رتبه بندی حساسیت تجهیزات بر مبنای عدد به دست آمده برای شاخص حساسیت (CI) را نشان می دهد.

جدول (۷) - رتبه بندی حساسیت تجهیزات بر مبنای شاخص حساسیت (CI)

شاخص حساسیت (CI)	حساسیت - Criticality	رتبه - Rank
بیشتر از ۶۰۰	فوق العاده حساس - Highly Critical	A
بین ۳۰۰ تا ۶۰۰	حساس - Critical	B
کمتر از ۳۰۰	کمتر حساس - Less Critical	C

همانطور که گفته شد، رتبه تجهیز بر مبنای حساسیت، تعیین کننده دوره زمانی بازرسی (Inspection Period) آن می باشد. بنابراین، پس از انجام گام رتبه بندی حساسیت تجهیزات، بایستی دوره زمانی بازرسی تجهیزات مشخص گردد. جدول (۸) دوره زمانی بازرسی تجهیزات برای پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی را نشان می دهد. این جدول اساس طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی می باشد [۶-۷].

جدول (۸) - دوره زمانی بازرسی تجهیزات برای پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی

رتبه - Rank	ارتعاشی - ترموگرافی	تریبولوژی
A	۲ هفته	۳ ماه
B	۱ ماه	۶ ماه
C	۳ ماه	۱ سال

جدول (۸) بیان می کند که تجهیزات قرار گرفته در دسته A بایستی به صورت دو هفتگی پایش وضعیت ارتعاشی - ترموگرافی و در صورت امکان (به طور مثال برای گیربکس ها) به صورت سه ماهه پایش وضعیت تریبولوژی شوند. بطور مشابه، برای تجهیزات قرار گرفته در دسته B پایش وضعیت ارتعاشی - ترموگرافی ماهیانه و پایش وضعیت تریبولوژی شش ماهه انجام می شوند. این روند برای تجهیزات قرار گرفته در دسته C به صورت پایش وضعیت ارتعاشی - ترموگرافی سه ماهه و پایش وضعیت تریبولوژی یک ساله می باشد.

به منظور ایجاد انعطاف پذیری و دستیابی به یک برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویا، جدول (۸) به صورت جدول (۹) اصلاح می شود. در برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویا، اگر نتایج حاصل از پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی یک تجهیز در محدوده های مجاز نبوده یا رضایت بخش نباشند، تجهیز مورد نظر به یک رتبه بالاتر منتقل می شود. پس از انجام اقدامات اصلاحی لازم، در صورتی که عملکرد و شرایط تجهیز به حالت نرمال برگردد، تجهیز مجدداً در رتبه اصلی خود قرار می گیرد. به طور مثال، اگر نتایج حاصل از پایش وضعیت یک تجهیز رتبه C در محدوده مجاز نبوده یا رضایت بخش نباشند، تجهیز به رتبه B منتقل می شود. به طور مشابه، خارج شدن یک تجهیز رتبه A از شرایط نرمال باعث انتقال آن به رتبه A^+ می شود. به همین ترتیب، طراح برنامه نگهداری و تعمیرات می تواند بر اساس میزان حساسیت یا اهمیت تجهیز و نتایج حاصل از پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی، دوره زمانی بازرسی تجهیز را به نحو مقتضی تعیین نماید.

جدول (۹) - دوره زمانی بازرسی تجهیزات برای برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویا

رتبه - Rank	ارتعاشی - ترموگرافی	تریبولوژی
A^+	۱ هفته	۱-۲ ماه
A	۲ هفته	۳ ماه
B	۱ ماه	۶ ماه
C	۳ ماه	۱ سال

۵- نکته کلیدی در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت

درست است که عواملی همچون حمایت مدیران، اختصاص نیروهای کارآمد به واحدهای پایش وضعیت، دسترسی به تجهیزات اندازه گیری مناسب و دقیق، آموزش کارشناسان پایش وضعیت و غیره در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت مهم و اثرگذار می باشند. با این حال، تجربه واحدهای پایش وضعیت پیشرفته در صنایع و کارخانجات کشورهای توسعه یافته دنیا نشان می

دهد که، در کنار داشتن یک برنامه پایش وضعیت جامع و مدون، نکته کلیدی برای موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگويانه "پایبندی به برنامه پایش وضعیت و اجرای منظم و دقیق آن" می باشد. صرفاً با اجرای منظم و مستمر برنامه پایش وضعیت است که می توان خرابی ها را در مراحل اولیه تشخیص، روند پیشرفت خرابی را دنبال، برای رفع عيوب برنامه ریزی و از وقوع توقف های ناگهانی جلوگیری کرد.

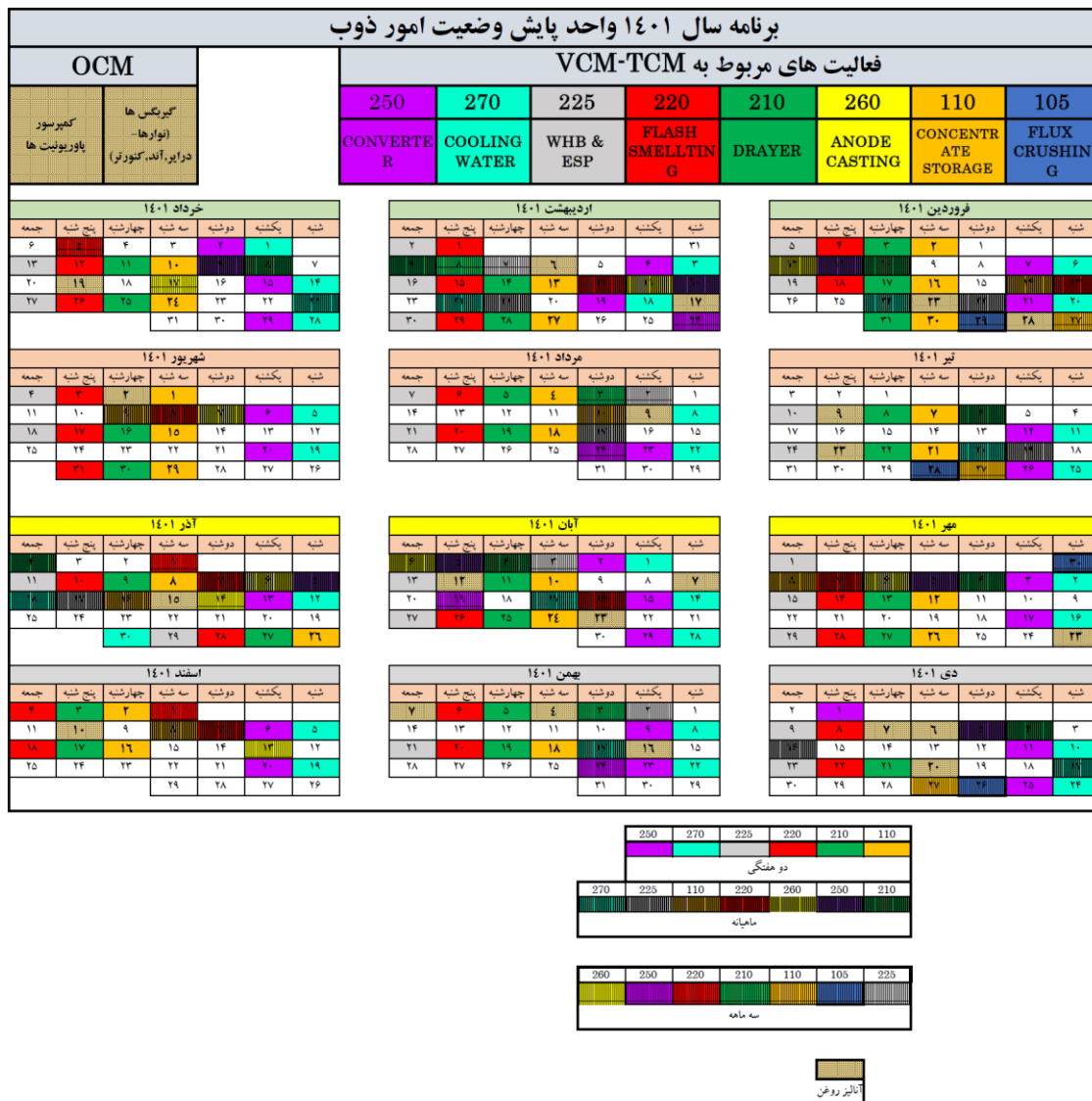
۶- برنامه پایش وضعیت امور ذوب مجتمع مس سرچشمه

در این قسمت، نتایج حاصل از اجرای روند فوق در امور ذوب مجتمع مس سرچشمه ارائه می شوند. بر مبنای معیارهای اصلی رتبه بندی حساسیت تجهیزات، تعداد تجهیزات قرار گرفته در هر رتبه برای پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و ترايبولوژی در جدول (۱۰) گزارش شده است.

جدول (۱۰) - تعداد تجهیزات هر رتبه برای پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و ترايبولوژی

رتبه - Rank	ارتعاشی - ترموگرافی	ترايبولوژی
A	۳۲	-
B	۸۰	۱۸
C	۱۲۱	۴۳

مطابق اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات ارائه شده در قسمت قبل، برنامه پایش وضعیت امور ذوب مجتمع مس سرچشمه در سال ۱۴۰۱ در شکل (۱) نشان داده شده است. با اجرای این برنامه، بیش از ۸۸۰۰ داده ارتعاشی، بیش از ۱۵۰۰ داده ترموگرافی و حدود ۱۰۰ داده ترايبولوژی از تجهیزات امور ذوب مجتمع مس سرچشمه در سال ۱۴۰۱ ثبت شد. در نتیجه پایش مستمر تجهیزات امور ذوب مجتمع مس سرچشمه در سال ۱۴۰۱ مطابق این برنامه و بر اساس داده های ارتعاشی و ترموگرافی، ۶ عدد بیرینگ معيوب شناسایی و با دنبال کردن روند پیشرفت خرابی، در مراحل آخر خرابی تعویض شدند. همچنین، با استفاده از داده های ترايبولوژی، ۱۴ مورد روغن آلوده و نامناسب شناسایی و تعویض شدند. لازم به ذکر است که در سال ۱۴۰۱، هیچگونه توقف ناگهانی و برنامه ریزی نشده ناشی از خرابی در تجهیزات و ماشین آلات الکتریکی و مکانیکی در امور ذوب مجتمع مس سرچشمه رخ نداده است.



شکل (۱) - برنامه پایش وضعیت امور ذوب مجتمع مس سرچشمه

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی ارائه شد. مهمترین و مرسوم ترین روش های نگهداری و تعمیرات مرور شده و رتبه بندی حساسیت تجهیزات، به عنوان پایه ای ترین مفهوم و اولین گام در طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه مبتنی بر پایش وضعیت، به همراه معیارهای اصلی رتبه بندی معرفی شد. به عنوان نوآوری مقاله حاضر، یک فرمول بندی ریاضی برای رتبه بندی حساسیت تجهیزات به منظور ایجاد شفافیت و نظام مند نمودن فرآیند رتبه بندی پیشنهاد شد. در ادامه، دوره زمانی بازرسی از تجهیزات بر مبنای رتبه بندی انجام شده تعیین شده و اصول طراحی برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پویای مبتنی بر پایش وضعیت ارتعاشی، ترموگرافی و تریبولوژی ارائه گردید. در نهایت، یک نکته کلیدی در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت بیان و نتایج حاصل از اجرای برنامه در امور ذوب مجتمع مس سرچشمه گزارش شدند. تاکید شد که، علاوه بر نیاز به داشتن یک برنامه پایش وضعیت جامع و مدون، "پایبندی به برنامه پایش وضعیت و اجرای منظم و دقیق آن" نکته کلیدی در موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه مبتنی بر پایش وضعیت می باشد.

منابع

- 1) Moubray, J.M. (2001). Reliability–Centered Maintenance. Industrial Press Inc.
- 2) Mobley, R.K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Elsevier Science.
- 3) Mobley, R.K. (2004). Maintenance Fundamentals. Elsevier Inc.
- 4) ISO 31000 (2018). Risk management–Guidelines. ISO, Geneva.
- 5) ISO 55000 (2014). Asset Management: Overview, Principles and Terminology. ISO, Geneva.
- 6) Davies, A. (1998). Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology. Springer Science & Business Media Dordrecht.
- 7) Beebe, R.S. (2004). Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring. Elsevier Science & Technology Books.

مدیریت دارایی زیرساخت‌های قدیمی شرکت توزیع برق-تحلیل موردی

محمداسماعیل هنرمند^{۱*}

شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان، دکترای برق-قدرت

محمداسماعیل هنرمند^۲

دانشگاه امام حسین، دانشکده فنی و مهندسی، استادیار گروه صنایع

حمزه سلطانی^۳

دانشگاه امام حسین، دانشکده فنی و مهندسی، استادیار گروه صنایع

چکیده

امروزه به دلیل فرسودگی و پیری حجم انبوهی از دارایی‌های شبکه‌های توزیع برق، مدیریت زیرساخت‌های قدیمی یکی از اصلی‌ترین چالش‌های مدیران ارشد این شرکت‌هاست. از این‌رو، استفاده از روش‌های مدیریت دارایی برای کنترل این چالش و نیز ارائه راهکارهای عملی می‌تواند رویکرد مناسبی برای کاهش هزینه‌ها و بهره‌وری سیستم باشد. در این راستا، با تحلیل رویکردهای مختلف اجرایی مدیریت تجهیزات قدیمی می‌توان تحلیل مناسبی از عملکرد صحیح اقدامات داشت. در این مقاله، به کمک داده‌های واقعی شرکت توزیع برق استان گیلان، عملکرد چندساله تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای با قدمت بالا، با توجه به مفهوم موج کمائی برای زیرساخت‌های قدیمی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بر این اساس، با مدلسازی نرخ خطر و تحلیل روند خرابی، مقادیر انتظاری خرابی‌های ترانسفورماتورها بررسی خواهند شد. همچنین عملکرد واحد تعمیرات دستگاه‌های معیوبی که بعد از به‌کارگیری مجدد آنها در شبکه، آسیب دیده‌اند واکاوی می‌شود و سرانجام، پیش‌بینی خرابی‌ها بعد از انجام رویکرد اصلاحی و پیشنهادی روند اجرای فرایند تعمیر و نگهداری برای زیرساخت‌های قدیمی ارائه خواهد شد. در انتها نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان خواهند گردید.

واژگان کلیدی: مدیریت دارایی، شبکه‌های توزیع برق، زیرساخت قدیمی، نرخ خطر

۱- مقدمه

علیرغم عمر طولانی تجهیزات اصلی صنعت برق نظیر خطوط و ترانسفورماتورها، اما یکی از دغدغه‌های اصلی این صنعت را می‌توان مدیریت دارایی زیرساخت‌های قدیمی دانست. دلایل زیادی نظیر ظرفیت دارایی برای تامین تقاضا، حرکت به سمت فناوری جدید و ریسک غیرقابل پیش‌بینی خرابی دارایی‌ها باعث می‌گردند که شرکت‌های برق نسبت به تعویض یا برکناری دارایی‌های موجود و قدیمی اقدام نمایند. از طرفی، نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر همراه با پیری تجهیزات موجود، لزوم تغییر ساختار مبتنی بر نیازهای حرکت به سمت شبکه هوشمند را اجتناب‌ناپذیر خواهد کرد.

باید توجه داشت که دارایی‌ها دارای عمر کاری محدودی هستند در نتیجه انتظار می‌رود عملکرد دارایی‌ها در خلال آن با یک استاندارد عملکردی تعریف شده مطابقت داشته باشند. کارکرد دارایی‌ها معمولاً در طول زمان به دلیل استفاده، قرارگیری در معرض محیط و فرایندهای شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده دارایی کاهش می‌یابد. تنزل در کارکرد دارایی‌ها باعث بروز مسائل متعددی در صنعت برق خواهد گردید. برای مثال، فرسودگی تجهیزات و فناوری منسوخ می‌تواند افزایش ریسک‌های قابلیت اطمینان سیستم را به همراه داشته باشد. ضعف قابلیت زیرساخت قدیمی برای مقابله با تنش‌های موجود، احتمال بروز خرابی را افزایش خواهد داد و به تبع آن، بروز خاموشی

¹- m_e_honar@yahoo.com, 09111329611-ORCID Code: 0000-0001-7300-035X

²- m_e_honar@yahoo.com, 09111329611-ORCID Code: 0000-0001-7300-035X

³- h.soltanali@ihu.ac.ir

می‌تواند عواقب شدیدی برای صنایع، مشاغل و افراد ایجاد نماید. همچنین آسیب‌پذیری چنین زیرساختی، کاهش تاب‌آوری سیستم را نیز تشدید خواهد کرد.

علاوه بر این، کاهش کارایی و بهره‌وری زیرساخت قدیمی نیز از جمله مواردی است که می‌تواند چالش جدی برای این صنعت باشد. اگر بتوان از طریق اقدامات تعمیر و نگهداری، عملکرد رو به زوال تجهیزات قدیمی را مدیریت کرد اما تضعیف تدریجی استحکام یا مواد دارایی‌ها غالباً قابل اصلاح نخواهد بود. این امر بکارگیری چنین تجهیزاتی را در مقادیر نامی یا حتی بالاتر از آن را در شرایط اضطراری با مشکل مواجه خواهد کرد. ضمناً در چنین شرایطی، برنامه‌ریزی بکارگیری بهینه از زیرساخت قدیمی عملاً بسیار دشوار است زیرا باعث کاهش بیشتر طول عمر تجهیزات می‌گردد.

قدیمی بودن زیرساخت ممکن است مانع توسعه و محدود کردن قابلیت‌های سیستم نیز گردد. برای ایجاد یک شبکه هوشمند، توانمندی پایین شبکه‌های قدیمی از موانع جدی حرکت به سمت مدرن‌سازی ساختار شبکه خواهد بود. عدم سازگاری تجهیزات قدیمی با وسایل پیشرفته، نبود انعطاف‌پذیری در بکارگیری از آنها و منسوخ بودن بسیاری از تجهیزات را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از مشکلات چنین ساختار قدیمی برشمرد.

اثرات ایمنی اعم از موضوعات ایمنی افراد و کارکنان شرکت نیز می‌تواند چالش مهمی در استمرار بکارگیری زیرساخت قدیمی باشد. عدم تامین قطعات یدکی توسط سازنده، افزایش فرسودگی‌های احتمالی و کارکرد نامناسب می‌تواند بروز خطرات ایمنی ناشی از تداوم استفاده از تجهیزات قدیمی را افزایش دهد. بالارفتن چنین ریسک‌هایی قطعاً منجر به ایجاد حوادث ناگوار ایمنی در سطح شرکت یا افراد خواهد گردید.

شاید مهم‌ترین چالش، تصمیم‌گیری درباره اثرات مالی چنین زیرساختی است. بازسازی، تعمیرات، به‌روزرسانی و تعویض تجهیزات قدیمی برای هر شرکت برق، نیازمند صرف هزینه‌هایی است که باید باتوجه به عواقب‌های آن تصمیم‌گیری شود. اینکه بر روی کدام تجهیز باید در زمان مناسب، کدامیک از اقدامات فوق انجام گیرند می‌تواند یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین تصمیمات مدیریتی و مهندسی شرکت برق باشد. لذا رویکرد شرکت‌ها در برخورد با شیوه بکارگیری اقدامات درست برای تجهیزات قدیمی می‌تواند نقش موثری در مدیریت بودجه و سرمایه‌گذاری داشته باشد. از این منظر می‌توان دو رویکرد را متصور شد. اولاً با سرمایه‌گذاری بر روی سیستم‌های پایشی، نظارت دقیق و مداومی بر کارکرد تجهیزات فراهم کرد تا از این طریق در صورت لزوم، اقدامات به موقع اصلاحی اجرا شوند. ثانیاً با برنامه‌ریزی و تعریف برنامه‌های تعمیراتی، تضمین کارکرد تجهیزات را فراهم کرد تا از این طریق، ریسک عدم کارکرد نامناسب چنین تجهیزاتی را کاهش داد. در این راستا، بررسی اقدامات تعمیراتی گذشته و پیش‌بینی تعداد تجهیزات نیازمند به برکناری باتوجه به رویکرد فعلی، در تصمیم‌گیری آتی می‌تواند مفید باشد. این مقاله به این موضوع می‌پردازد.

علیرغم وجود چالش‌های متعدد درخصوص زیرساخت‌های قدیمی شرکت‌های توزیع برق، ولی معمولاً این شرکت‌ها برای تجهیزاتی نظیر ترانسفورماتورها، کلیدها و خطوط، برنامه‌های اصلاحی جهت بازیابی و افزایش طول عمر دارند. از این‌رو، در این شرکت‌ها با استقرار برنامه‌های بلندمدت و مقرون به‌صرفه برای کاهش ریسک دارایی‌های قدیمی از طریق دو رویکرد کلی اقدام می‌کنند. البته استراتژی‌های تهیه قطعات یدکی و کارکردن تا خرابی تجهیز نیز در این راستا وجود دارند که به آنها پرداخته نمی‌شود.

اولین رویکرد، با پیش‌بینی هزینه‌های تعمیر و نگهداری ناشی از خرابی دارایی‌ها طی یک فرایند پنج مرحله‌ای، تغییرات هزینه‌ای تجهیزات ناشی از پیری یا فرسودگی را بررسی و تحلیل می‌کنند. در این فرایند اقداماتی نظیر بررسی انواع خرابی‌ها، شناسایی سنی خرابی، سوابق هزینه‌ای، تغییر در تعداد خرابی‌ها و پیش‌بینی اقدامات و هزینه‌های مربوطه انجام می‌پذیرد. پیش‌بینی هزینه‌های سرمایه‌ای تعویض ناشی از خرابی دارایی، دومین رویکرد مورد استفاده در شرکت‌های توزیع است. رویکردی که در حال حاضر توسط شرکت‌ها برای پیش‌بینی هزینه‌های سرمایه‌ای مرتبط با تعویض زیرساخت‌های قدیمی استفاده می‌شود، استفاده از منحنی‌های احتمالی خرابی برای گروه‌های دارایی مختلف است که با اطلاعات جمعیتی دارایی پیش‌بینی شده درگیر هستند. این رویکرد مبتنی بر استفاده از نمایش‌های احتمالی

عمر دارایی برای کلاس‌های اصلی دارایی‌ها و به‌کارگیری آن‌ها در اطلاعات جمعیتی مرتبط برای هر گروه دارایی است. این رویکرد برای پیش‌بینی به تحلیل کمی استراتژی‌های مدیریت دارایی اجازه می‌دهد تا سطوح مخارج سرمایه‌پیش‌بینی‌شده را در بلندمدت هموار کند. طی ۲۰ سال اخیر در شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان، برنامه سرویس، و تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای قدیمی بالای ۳۰ سال در برنامه کاری شرکت قرار دارد. بر اساس این برنامه، چنین ترانسفورماتورهایی مورد بازبینی و بررسی قرار می‌گیرند و در صورت نیاز، برای تعمیرات اساسی به کارگاه منتقل می‌شوند. هدف‌گذاری چنین رویکردی، فقط ترانسفورماتورهای با عمر بالای ۳۰ بوده و سایر ترانسفورماتورها با عمر کاری کمتر غالباً در این برنامه لحاظ نمی‌شوند مگر اینکه دچار آسیب گردند. در این حالت، تقریباً می‌توان گفت که ترانسفورماتورها تا عمر کاری ۳۰ سال، به حال خود رها شده‌اند و اگر به بالای این سن برسند برنامه‌ریزی برای بررسی آنها انجام می‌پذیرد. در این مقاله، ابتدا رویکرد کلی مربوط به مواجهه با زیرساخت قدیمی در صنعت برق مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس روند تحلیل داده‌ها و الگوی بررسی اقدامات انجام‌شده درباره برنامه تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای طی ده سال اخیر در این شرکت واکاوی می‌گردد و یافته‌ها و تحلیل نتایج حاصل از بررسی ارائه می‌شوند. در انتها، نتیجه‌گیری بحث‌ها بیان می‌شود.

۲- بررسی پیشینه

از آنجایی‌که دارایی‌های فیزیکی سیستم‌های برق دارای عمر انتظاری محدودی هستند لذا شرکت‌های برق باتوجه به عمرکاری این دارایی‌ها، نسبت به اجرای اقدامات مختلف برای افزایش عمر برنامه‌ریزی می‌کنند. به دلیل افزایش حجم و ریسک زیرساخت‌های قدیمی و وجود عدم قطعیت‌های تحلیلی و نیز حرکت به سمت شبکه هوشمند در شرکت‌های برق توسعه یافته، رویکردها و برنامه‌های متفاوتی در مواجهه با این موضوع در مقالات مختلف اشاره شده است.

دسته‌ای از مقالات، انتخاب استراتژی‌های مختلف تعمیر و نگهداری زیرساخت قدیمی را با استفاده از پایش تجهیز یا مدل‌سازی احتمالی و در مواردی، با بهینه‌سازی هزینه‌ها بررسی کرده‌اند. مدل‌سازی احتمال خرابی تجهیزات در پایان عمر به کمک توزیع‌های احتمالی در (لی^۱، ۲۰۰۶) بحث می‌شود. از این طریق، رابطه مابین پیری و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری تجهیزات قدیمی در (اندرنی و آندرس^۲، ۲۰۰۶) بررسی می‌شود. بدین منظور، رویکرد بهینه‌سازی هزینه در انتخاب بهترین روش تعمیر و نگهداری، مورد توجه قرار گرفته است. پایش کارکرد زیرساخت‌های قدیمی به کمک روش‌های نوین در (دومینلی^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) ارائه شده است. در این رویکرد، افزایش عمر تجهیزات با بررسی روند کارکرد تجهیز و اقدام به موقع رفع هرگونه عیب، انجام می‌گردد. در (براون و ویلیس^۴، ۲۰۰۶)، بهینه‌سازی سطح سرمایه‌گذاری روی زیرساخت قدیمی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این تحلیل، افزایش عمر دارایی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم در کنار بهینه‌سازی هزینه‌های اجرای اقدامات مختلف برای بازدهی بالا انجام شده است. استفاده از قابلیت اطمینان به عنوان محرک هزینه‌ای سرمایه‌گذاری روی زیرساخت‌های قدیمی در (لی و گائو^۵، ۲۰۰۶) بررسی می‌شود. چنین رویکردی از شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان برای توجیه هزینه‌کرد بر روی تجهیزات با عمر بالا استفاده کرده است. استفاده از روش پایش تجهیزات و دسته‌بندی روش‌های تعمیر و نگهداری مبتنی بر پیشگیری از گسترش عیب در (چاکراورتی^۶، ۲۰۰۶) ارائه می‌شود. بر این اساس، استراتژی‌های مختلف باتوجه به نوع تجهیز برای افزایش عمرکاری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

¹-Li

²-Endrenyi & Anders

³-Dominelli

⁴-Brown & Willis

⁵-Li & Guo

⁶-Chakravorti

اخیراً نیز مدیریت پیری تجهیزات از طریق روش‌های مختلف بهینه‌سازی ارائه شده است. برای کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، رویکرد توازن هزینه‌های تعویض دارایی قدیمی با هزینه‌های تحمیلی ناشی از پیری در (شقاقی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳) ارائه شده است. در (لیته داسیلوا^۲ و همکاران، ۲۰۲۲) از اثرات پیری تجهیز روی قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده تا مدل جدیدی برای نرخ خرابی تهیه گردد. با این رویکرد نسبت به بهینه‌سازی اقدامات تعمیر و نگهداری برای مدیریت پیری تجهیز بکارگیری شده است. استفاده از یک روش بهینه‌سازی تصادفی برنامه‌های تعمیراتی در شبکه‌های توزیع فعال در (شانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۰) معرفی گردیده است. در این روش با هدف کاهش کل هزینه تعمیر و نگهداری، و نیز با محدودیت شاخص‌های قابلیت اطمینان نسبت به مدیریت دارایی‌های قدیمی اقدام می‌گردد.

مدیریت ریسک مربوط به تجهیزات قدیمی نیز از جمله مواردی است که در مقالات مختلف به آن اشاره می‌شود. محاسبه شاخص‌های ریسک با لحاظ پیری تجهیزات و برنامه‌های تعمیر و نگهداری در (جی^۴ و همکاران، ۲۰۱۲) ارائه می‌گردد. از این طریق، مشخصه ریسک پیری ناوگان دارایی مبتنی بر استراتژی تعمیر و نگهداری تعیین شده قابل شناسایی خواهد بود. بکارگیری وسایل پایشی و تشخیصی برای مدیریت ریسک زیرساخت قدیمی در (موهر^۵، ۲۰۰۵) مورد مطالعه قرار گرفته است. از این‌رو، با ارزیابی انواع ریسک‌ها و ارائه استراتژی‌های مختلف تعمیر و نگهداری برای مدیریت دارایی قدیمی اقدام خواهد شد. در (لوا^۶ و همکاران، ۲۰۱۸) با استفاده از سناریوهای احتمالی، رویکردهایی برای ارزیابی ریسک‌های اقدامات تعمیر و نگهداری روی تجهیزات قدیمی در کنار ریسک پولی اجرای این اقدامات ارائه می‌شود.

علاوه بر این، عدم قطعیت‌های تحلیل مدیریت زیرساخت‌های قدیمی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. منابع عدم قطعیت‌ها در مسئله پیری دارایی در مقاله (فاینشتاین و موریس^۷، ۲۰۰۷) ارائه شده است. بر این اساس، مدیریت بهینه زیرساخت قدیمی تحت این عدم قطعیت‌ها از طریق سناریوهای مختلف، تحلیل شده‌اند. در (حسامی^۸ و همکاران، ۲۰۲۱) با شناسایی سطوح مختلف عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی مدیریت استراتژیک دارایی‌ها، از طریق سناریوهای مختلف نسبت به بررسی و ارزیابی اقدامات مناسب مدیریت دارایی قدیمی اقدام می‌گردد.

با توسعه شبکه‌های هوشمند، تاثیر این رویکرد بر مدیریت زیرساخت‌های قدیمی نیز بررسی شده است. در (هانای و همکاران، ۲۰۱۳) به کمک فناوری‌های پایش در شبکه هوشمند، همه هزینه‌های مبتنی بر رویدادهای مختلف احصا می‌شوند تا استراتژی‌های بهینه تعمیر و نگهداری زیرساخت‌های قدیمی ارائه شوند. استفاده از داده‌های واقعی برگرفته از شبکه هوشمند برای تحلیل هزینه-فایده اقدامات مدیریت دارایی تجهیزات قدیمی در (جانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل گزینه‌های مختلف تعویض دارایی به همراه چالش‌ها و عدم قطعیت‌های ناشی از وجود منابع تجدیدپذیر نیز بیان شده‌اند. بکارگیری یک مدل محاسباتی هوشمند برای مدیریت فرسودگی و خرابی تجهیزات قدیمی در شبکه هوشمند در (اونشاکپور^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲) معرفی می‌شود. این مدل با محاسبه قابلیت اطمینان و با ترکیب رویکردهای تعمیراتی، ارتقا سیستم و مدیریت منابع نسبت به تضمین قابلیت اطمینان اقدام می‌کند.

¹-Shaghghi

²-Leite da Silva

³-Shang

⁴-Ge

⁵-Muhr

⁶-Leva

⁷-Feinstein & Morris

⁸-Hessami

⁹-Jung

¹⁰-Onoshakpor

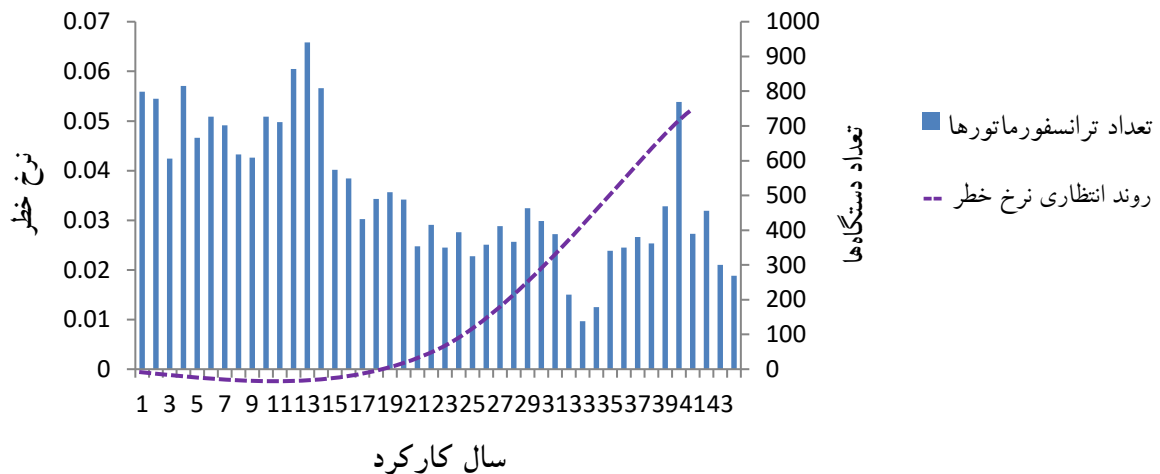
به طور کلی همانطور که از مقالات فوق مشاهده می گردد، رویکرد مدیریت زیرساخت های قدیمی مبتنی بر ارائه راه کارهایی است که باید در یک شرکت برق نوعی با داده های واقعی اجرا گردد تا عملکرد عملی آن قابل رویت باشد. علیرغم ارائه مثال های نوعی در مقالات، ولی در عمل و برای کل زیرساخت های قدیمی یک شرکت بررسی جامعی مبتنی بر موفقیت آمیز بودن یا نبودن روش پیشنهادی، مطلبی ارائه نشده است. علاوه بر این، برنامه ریزی جمعیت محور زیرساخت قدیمی مبنی بر تعویض یا سایر اقدامات نگهداری در این مقالات مشاهده نمی گردد. در این مقاله تلاش می گردد تا عملکرد تعمیر و نگهداری که در شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان طی چندین سال برای افزایش طول عمر ترانسفورماتورهای بالای ۳۰ سال انجام شده مورد واکاوی قرار گیرد.

به دلیل قدمت دارایی ها تقریباً در همه شرکت های توزیع برق، نمودار تعداد دارایی ها به عمر کاری آنها در حال نزدیک شدن به مشخصه کلی از یک شکل تحت عنوان «موج کمانی»^۱ هستند (بروشور فنی^۲ سیگره ۱۷۶، ۲۰۰۰). مسئله موج کمانی، پیش بینی می کند که با گذشت زمان، الف- تعداد خرابی ها یا دارایی هایی که توسط کارشناسان، پایان عمر آنها تصور می شود، افزایش یابد و این موضوع، مشکلاتی را برای شرکت های برق و نیز برای سازندگان تجهیزات ایجاد می کند، و ب- رگولاتورها، نگران افزایش قابل توجه هزینه های سرمایه ای باشند و شرکت های برق را ملزم به توسعه برنامه های مدیریت دارایی برای کاهش اثرات نرخ خرابی نمایند. از این رو، با همپوشانی بین توزیع جمعیتی و صعود در تابع نرخ خطر سالانه، انتظار می رود که افزایش قابل توجهی در نرخ خرابی بوجود آید.

این مفهوم که در شکل (۱) نمایش داده می شود به دنبال برنامه ریزی تعویض دارایی هایی است که در حالت فنی به پایان عمر رسیده یا حین کار، معیوب می شوند. در این شکل، تعداد ترانسفورماتورهای موجود برحسب کارکرد و نرخ خطر انتظاری (فرضی) مربوط به شرکت توزیع برق استان گیلان ارائه شده است. در این مقاله برای تهیه نرخ خطر، از تقریب داده های خرابی قبلی استفاده می گردد که البته می تواند به دلایل مختلفی، باعث انحراف در تحلیل ها شود. همچنین خرابی ترانسفورماتورهای تعمیر شده ای که مجدداً وارد مدار شده اند نیز برای بررسی بیشتر این رویکرد مورد تحلیل قرار می گیرند. ضمناً داده های خرابی، در بازه های مختلف منحنی وانی شکل، تفکیک شده اند تا رویکرد اجرایی در این شرکت با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

بر این اساس، موضوعات زیر در این مقاله مورد مطالعه و بررسی قرار خواهند گرفت:

- مطالعه و واکاوی رویکرد فعلی اقدامات تعمیر و نگهداری زیرساخت های قدیمی (ترانسفورماتورها) در این شرکت،
- بررسی رویکرد موجود تعمیرات تجهیزات قدیمی و استفاده مجدد آنها در شبکه،
- اصلاح رویکرد فعلی اقدامات تعمیر و نگهداری و پیش بینی خرابی ها بعد از بهبود فرایند.



شکل (۱). تعداد ترانسفورماتورهای موجود برحسب سال کارکرد و روند انتظاری نرخ خطر در شرکت توزیع برق استان گیلان

۳- روش‌شناسی تحقیق

در صنعت برق، باتوجه به گسترش قابل توجه سیستم طی ۴۰ یا ۵۰ سال گذشته، تعداد زیادی از دارایی‌ها به پایان عمر معمولی مفروض، نزدیک‌شده یا فراتر رفته‌اند و لذا غیر قابل اعتماد می‌شدند و باید جایگزین شوند. لذا عبارت «موج کمانی» را برای توصیف مشکل قریب‌الوقوع عنوان کرده‌اند. تاکتیک‌های مدیریت دارایی شامل افزایش بودجه‌های تعمیر و نگهداری، استقرار فناوری‌های تشخیص و پایش برای افزایش عمر کاری و در عین حال، تلاش برای کمینه‌کردن ریسک‌های ناشی از خرابی‌های فاجعه‌بار حین کار، برنامه‌های بازسازی دارایی برای افزایش عمر کاری عادی، اعمال کاهش بارگذاری برای کندنمودن فرایندهای پیری و افزایش عمر کاری، تعویض‌های محتاطانه و سرانجام، ادامه وضعیت موجود به‌عنوان حالت پایه‌ای برای مقایسه گزینه‌ها هستند. برای همه این گزینه‌ها، سرمایه‌گذاری بالقوه دارایی، تخمین‌هایی برای مبالغ سرمایه‌گذاری اختیاری و مزایای احتمالی باید به مدیریت ارشد و البته، رگولاتورها و مداخله‌گران ارائه شود. این امر مستلزم تخمین‌هایی برای تعداد خرابی‌های احتمالی در دوره برنامه‌ریزی برای هر یک از برنامه‌های سرمایه‌گذاری پیشنهادی است. ولی متأسفانه روش‌هایی برای تخمین تعداد خرابی‌های دارایی (و تعویض‌های پیشگیرانه محتاطانه^۱) در دوره برنامه‌ریزی آینده‌نگر ۱۰ یا ۱۵ ساله به‌خوبی مستندسازی نشده‌اند.

به‌طورکلی مدیران دارایی معمولاً دو نوع مطالعه را انجام می‌دهند: مطالعه کمی و مطالعه کیفی. اجرای مطالعه کیفی نسبتاً آسان بوده چرا که فقط به یک ویژگی مثلاً سن انتظاری هر دارایی که باید از لحاظ آماری با میانگین طول عمر مطابقت دارد نیاز می‌باشد. ولی مطالعه کمی پیچیده‌تر بوده زیرا از آنجایی که همه دارایی‌ها در یک سن از بین نمی‌روند لذا نیاز به یک مدل آماری خواهد بود (خونیتا^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

بر این اساس می‌توان از مدل‌های متفاوتی برای این مطالعه استفاده کرد. اولین رویکرد، بکارگیری مدل مبتنی بر محدودیت مرزی^۳ است. در این مدل، نیاز به محدودیت سنی یک نوع دارایی می‌باشد. لذا هدف این است که برای هر خانواده دارایی، یک حد یا فاصله‌ای از

^۱-Proactive

^۲-Khuntia

^۳-Model Based on Boundary Limit

محدودیت‌ها تعریف شوند. طبق این تعریف، حداقل ارزش یا عمر تضمینی^۱ بدین معناست که اگر سن دارایی کمتر از این حد باشد نباید جایگزینی دارایی انجام شود. همچنین حداکثر مقدار یا محدودیت عمر فنی^۲ بیانگر حداکثر سن پیش‌بینی شده دارایی است که بالاتر از آن باید تعویض لازم صورت گیرد (بروشور فنی^۳ سیگره ۴۲۲، ۲۰۱۰).

مدل مبتنی بر محدودیت آماری^۴، رویکرد دیگری که می‌توان برای مدلسازی استفاده کرد. در این حالت فرض می‌گردد که توزیع طول عمر از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند و هدف ارزیابی تابع خطر، برای به دست آوردن نرخ خرابی با توجه به سن است. تابع نرخ خطر با تقسیم تابع چگالی بر تابع تجمعی برای هر سال عمر مفید به دست می‌آید. سپس این تابع خطر با جمعیت سن دارایی‌ها تلاقی می‌شود تا تعداد دارایی انتظاری که معیوب می‌شوند بدست آیند (سی^۵ و همکاران، ۲۰۱۱).

رویکرد مناسب دیگر تحت عنوان مدل مبتنی بر منحنی قابلیت اطمینان^۶ است. این روش به منحنی خرابی یا تابع خطر برای کل محدوده سنی نیاز دارد. اگرچه، این مدل فرض می‌کند که خرابی‌های قبلی جایگزین نمی‌شوند، به نظر می‌رسد این مدل بسیار جالب است زیرا مستقیماً نرخ خرابی را برای هر سن ارائه می‌دهد (بارتلی^۷، ۲۰۰۲).

در این مقاله از مدل مبتنی بر محدودیت آماری برای مدلسازی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تابع خطر ترانسفورماتورها، در دسترس نمی‌باشد لذا باید مقدار میانگین و انحراف استاندارد پایان عمر دارایی‌ها محاسبه گردند.

۱-۳ اصول کلی مدلسازی

برای محاسبه «پایان عمر» از مدل‌های آماری در حوزه جمعیتی استفاده می‌شود. در مجموعه جمعیتی، اصطلاح «بقا»^۸ بیشتر به جای «پایان زندگی» استفاده می‌شود. تحلیل بقا تلاش می‌کند به سؤالاتی پاسخ دهد: کسری از جمعیتی که پس از یک زمان معین سالم می‌مانند؟ از بین جمعیتی که سالم می‌مانند، به چه میزان از بین می‌روند یا خراب می‌شوند؟

توابع و پارامترهای اصلی مورد استفاده در مطالعات بقا را می‌توان توزیع طول عمر (یا تابع توزیع تجمعی)، تابع توزیع چگالی و تابع خطر را برشمرد. به‌طور کلی، رابطه تابع نرخ خطر $\lambda(t)$ ، با تابع توزیع چگالی $f(t)$ و تابع توزیع تجمعی $F(t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (1)$$

همچنین فرمول کلی تابع چگالی توزیع نرمال با مقدار میانگین μ و انحراف استاندارد σ برابر است با:

$$f(t) = \frac{e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

^۱-Life Guaranteed

^۲-Technical Life Limit

^۳-TB 422

^۴-Model Based on Statistical Limit

^۵-Si

^۶-Model Based on Reliability Curve

^۷-Bartley

^۸-Survival

ضمناً فرمول تابع توزیع تجمعی توزیع نرمال با یک فرمول ساده وجود نداشته و باید به صورت عددی محاسبه گردد.

برای محاسبه میانگین و انحراف استاندارد، به کمک داده‌های خرابی ده ساله شرکت توزیع برق گیلان، جدول اکسلی از سال کارکرد و تعداد خرابی در هر سال تهیه می‌گردد. سپس میانگین وزنی و انحراف استاندارد وزنی به کمک توابع اکسل محاسبه می‌گردند. روابط مربوط به میانگین وزنی و انحراف استاندارد وزنی به ترتیب برابر با:

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

$$SD_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2}{(M-1) \sum_{i=1}^n w_i}} \quad (4)$$

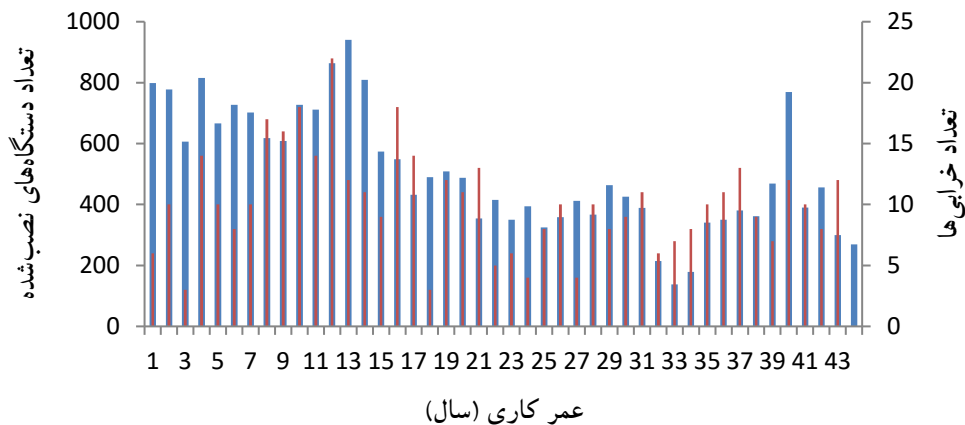
که در آن، w_i به عنوان تعداد خرابی، x_i سال کارکرد، M تعداد خرابی‌های صفر و n اندازه نمونه هستند. بر این اساس، میانگین وزنی برابر با ۲۲/۰۹ سال و انحراف استاندارد وزنی برابر با ۱۲/۵۶ سال بدست می‌آید.

همچنین برای مدلسازی، با استفاده از داده‌های خرابی موجود، در محیط اکسل و بکارگیری توابع آن، مقادیر توابع چگالی و تجمعی و به کمک آنها، تابع نرخ خطر محاسبه می‌گردند. تا از این طریق، خرابی انتظاری باتوجه به جمعیت دارایی و سال کارکرد آنها محاسبه شوند و روند اقدامات تعمیر و نگهداری مورد بررسی قرار گیرد.

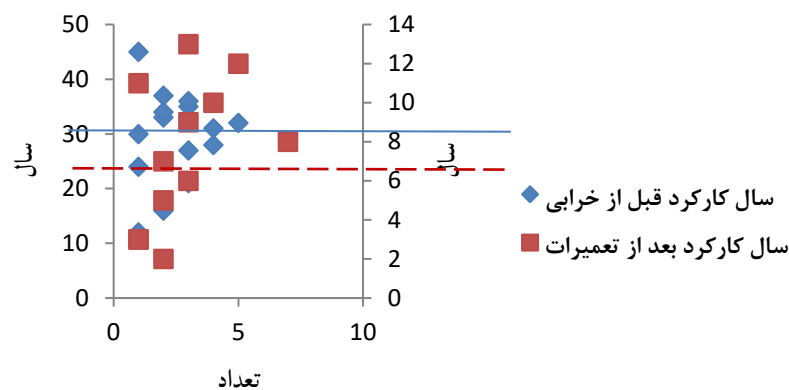
۳-۲ تحلیل داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های خرابی ترانسفورماتورها در شرکت توزیع برق استان گیلان طی ده سال اخیر استفاده شده است. داده‌های سال کارکرد و ظرفیت ترانسفورماتورها برای هر سال، تهیه می‌گردند و سپس کل داده‌ها مبتنی بر سال کارکرد و تعداد خرابی دسته‌بندی می‌شوند. شکل (۲) فراوانی تعداد خرابی‌ها و تعداد ترانسفورماتورها نصب‌شده بر اساس سال کارکرد نمایش می‌دهد.

همچنین تعدادی از ترانسفورماتورهایی که بعد از بروز عیب در کارگاه، تعمیر شده و مجدداً وارد مدار شدند، هر ساله معیوب می‌شوند. این تعداد نیز به طور جداگانه براساس سال کارکرد تا آسیب اول، عمر کاری بعد از تعمیر و بروز عیب مجدد و نیز ظرفیت آنها گردآوری گردید تا از این طریق، عملکرد روند تعمیرات کارگاه مورد بررسی قرار گیرد. در هر صورت ممکن است که به دلیل مسائلی نظیر انبارداری یا طولانی شده روند تعمیرات در کارگاه، سن تقویمی دستگاه با سن کاری آن تطابق نداشته باشد که به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی، این امر نادیده گرفته می‌شود. شکل (۳) فراوانی داده‌های مربوط به خرابی ترانسفورماتورهای تعمیری و مدت کارکرد آنها بعد از تعمیرات را نشان می‌دهد.



شکل (۲). تعداد دستگاه ترانسفورماتور نصب شده (آبی) و تعداد خرابی‌ها (قرمز) برحسب عمر کاری



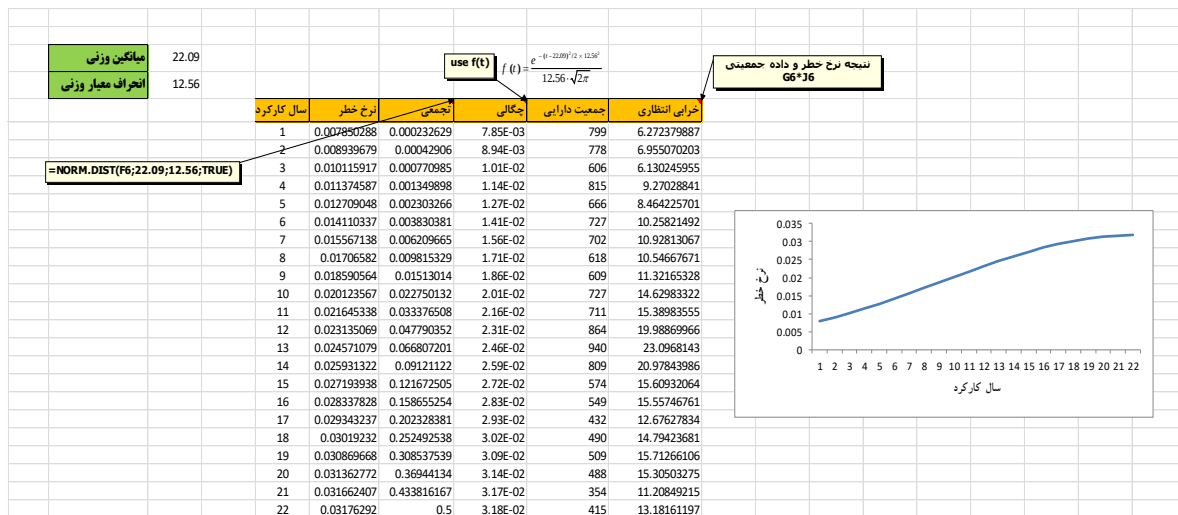
شکل (۳). مدت کارکرد قبل از خرابی و بعد از تعمیر ترانسفورماتورها (خط چین قرمز و خط آبی به ترتیب متوسط سال کارکرد قبل خرابی و بعد تعمیر هستند)

۴- یافته‌ها

مطالب این قسمت در سه زیربخش با عناوین تحلیل رویکرد فعلی تعمیر و نگهداری، بررسی رویکرد تعمیرات در کارگاه و پیش‌بینی روند خرابی‌ها بعد از اصلاح رویکرد باتوجه به داده‌های موجود ارائه می‌شوند.

۴-۱ تحلیل رویکرد فعلی تعمیر و نگهداری

در این تحلیل، ابتدا به کمک داده‌های خرابی و سال کارکرد ترانسفورماتورها، جدول اکسلی تهیه گردید تا از طریق توابع آن، مقادیر تابع چگالی، تابع تجمعی و سپس نرخ خطر محاسبه شوند. همچنین نرخ خرابی انتظاری هر سال باتوجه به تعداد ترانسفورماتور موجود و در انتها، تعداد خرابی انتظاری بدست آمد. شکل (۴) بخشی از نتایج حاصله را نمایش می‌دهد.

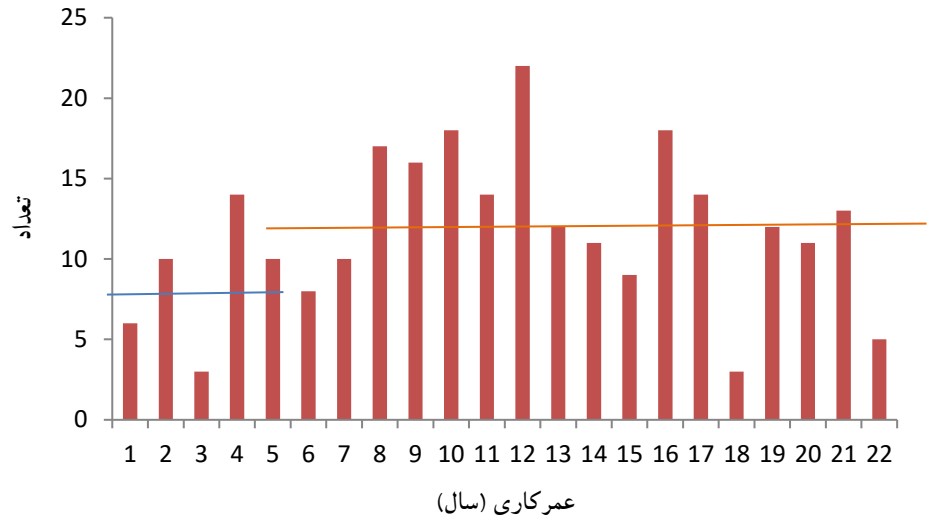


شکل (۴). اولین ۲۲ سال کارکرد یک صفحه اکسل برای محاسبه برآورد تعداد خرابی‌های انتظاری

از شکل (۴) مشاهده می‌گردد (منحنی) که نرخ خطر تا عمر کاری حدود ۲۲ سال افزایشی بوده و بعد از آن رو به کاهش است. این امر نشان می‌دهد که عمر کاری ترانسفورماتورهای شرکت، زیر ۲۲ سال بوده و ترانسفورماتورهای با عمر بالا، خرابی کمتری دارند. این موضوع تاکید دارد که ترانسفورماتورهای با عمر کاری بالای ۳۰ دارای نرخ خطر کاهشی می‌باشند. باید توجه داشت که حدود ۶۳ درصد از ترانسفورماتورها دارای عمر کاری ۱ تا ۲۲ سال دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد تعمیر و نگهداری در این شرکت به گونه‌ای است که عملاً ترانسفورماتورهای با عمر کاری زیر ۳۰ سال، در این فرایند جایی ندارند. همچنین متوسط وزنی تعداد خرابی انتظاری برابر با ۱۰ خرابی در سال می‌باشد که از تعداد خرابی‌های سالانه واقعی به مراتب بالاتر است.

شکل (۵) تعداد خرابی باتوجه به عمر کاری را نشان می‌دهد. برای تحلیل بهتر، تا عمر کاری ۵ سال به عنوان بخش اولیه منحنی وانی شکل با متوسط عمر ۸ سال و از ۵ سال تا ۲۲ سال با متوسط عمر ۱۲ سال به عنوان بخش دوم منحنی وانی شکل فرض می‌شود. بر این اساس، ۴۳ خرابی یعنی حدود ۹ درصد، مربوط به ترانسفورماتورهای زیر ۵ سال بوده لذا باید عواملی نظیر نصب صحیح، رویکرد طراحی و ساخت ترانسفورماتورها و نیز مواد بکاررفته در طراحی آنها بررسی شوند. ۲۱۳ خرابی یعنی حدود ۴۳ درصد آنها نیز در محدوده عمر کاری ۵ تا ۲۲ سال رخ داده است. طبق این شکل برای مثال، خرابی مربوط به بیشترین حجم خرابی ۵ تا ۲۲ سال مشاهده می‌گردد که برای عمر کاری ۱۲ سال با ۲۲ خرابی است. با بررسی انجام گرفته، اکثر خرابی‌ها مربوط به ترانسفورماتورهای ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ کیلوولت آمپر با ۱۷ خرابی می‌باشند. این موضوع به دلیل عدم توجه به حداکثر جریان بهره‌برداری، تعمیرات منظم و پایش دوره‌ای این ترانسفورماتورها به دلیل سن پایین آنهاست. با این حال، ترانسفورماتورهای با ظرفیت بالا (ظرفیت ۴۰۰ کیلوولت آمپر به بالا)، دچار آسیب کمتری شده‌اند و این امر بیانگر توجه بهره‌بردار، به پایش و نظارت این رده از دستگاه‌ها است. کلاً در شرکت توزیع برق استان گیلان از حدود ۲۵ سال قبل، رویکرد سرویس و تعمیرات برای دستگاه‌های بالای ۳۰ است درحالی‌که این تحلیل نشان می‌دهد که ۵۲ درصد خرابی‌ها مربوط به سن زیر ۲۲ سال هستند. این مسئله نشان می‌دهد که تقریباً رویکرد پایش، بازرسی و سرویس دستگاه‌های زیر ۳۰ سال در شرکت مغفول مانده به‌طوری‌که خرابی این محدوده حتی از دستگاه‌های بالای ۳۰ نیز بیشتر می‌باشد.

بنابراین باید در رویکرد مربوط به سرویس و نگهداری شرکت تغییرات بنیادی صورت گیرد. این امر باید در بخش بهره‌برداری که وظایف پایش و بازرسی ترانسفورماتورها را بر عهده دارد مورد بازنگری جدی انجام پذیرد. ضمناً باتوجه به این شکل، نظر به اینکه طی سال‌های آتی، تعداد ترانسفورماتورهایی که به عمر کاری ۲۲ سال نزدیک می‌شوند بیشتر خواهد شد لذا تغییر رویکرد در بخش بهره‌برداری و اصلاح روند بازرسی و نگهداری باید با دقت و سرعت بیشتری مهیا شود به‌طوری‌که در صورت ادامه روند قبلی، خرابی انتظاری ترانسفورماتورها افزایش چشم‌گیری خواهند داشت.

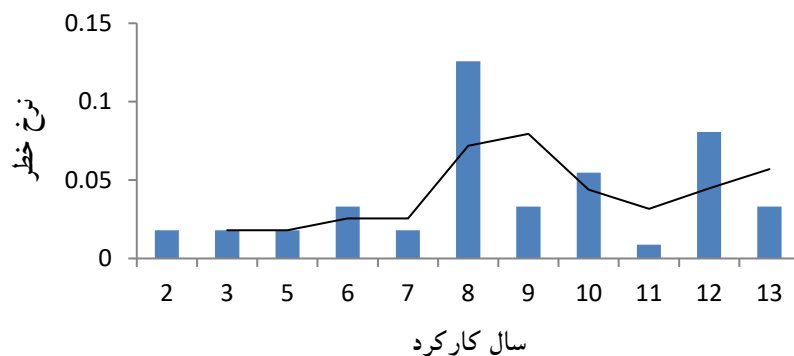


شکل (۵). تعداد خرابی برحسب عمر کاری

۲-۴ تحلیل رویکرد تعمیرات

رویکرد سرویس و نگهداری ترانسفورماتورهای شرکت توزیع برق استان گیلان مبتنی بر دستگاه‌های با عمر کاری بالای ۳۰ است. بنابراین عملاً دستگاه‌های با عمر کاری کمتر از ۳۰ سال فقط در صورت بروز عیب، مورد تعمیر قرار می‌گیرند. طبق شکل (۳) علیرغم وجود برنامه سرویس و نگهداری مشاهده می‌گردد که ۱۴ دستگاه با عمر کاری زیر ۳۰ سال دچار آسیب شده‌اند. با استفاده از داده‌های مربوط به خرابی ترانسفورماتورهای تعمیرشده و مدت کارکرد مجدداً آنها، نرخ خطر مطابق شکل (۶) تهیه گردید. متوسط عمر کاری این ترانسفورماتورها برابر با ۸ سال است.

در این حالت، شکل (۶)، نرخ خطر برحسب کارکرد این ترانسفورماتورها را نشان می‌دهد. منحنی روند نرخ خطر مشخص می‌نماید که دستگاه‌های با ۸ سال کارکرد، بالاترین مقدار نرخ خطر را دارد که به عبارتی، بعد از این مدت زمانی، دستگاه‌های تعمیری در معرض آسیب خواهند بود. می‌توان نتیجه گرفت که روند تعمیرات ترانسفورماتورها در این شرکت کلاً به‌طور متوسط حدود ۸ سال عمر کاری این دستگاه‌ها را افزایش خواهد داد. البته حدود ۶ دستگاه بعد از تعمیرات، با عمر کاری مجدد کمتر از ۳ سال معیوب شده‌اند که علت این امر باید به دقت بررسی شود. این دستگاه‌ها به جز دو مورد، مابقی دارای عمر کاری زیر ۳۰ سال بودند لذا نشان می‌دهد علیرغم تعمیر در کارگاه، بهبود آنچنانی در روند بهره‌برداری سالم آنها فراهم نشده است.



شکل (۶). نرخ خطر برحسب عمر کاری ترانسفورماتورهای معیوبی که مجدداً بعد از تعمیر، در شبکه آسیب دیده‌اند

۳-۴ پیش‌بینی روند خرابی‌ها بعد از اصلاح رویکرد

همانطور که عنوان گردید مسئله موج کمائی، پیش‌بینی می‌کرد که با گذشت زمان، تعداد خرابی‌ها یا دارایی‌هایی که توسط کارشناسان، پایان عمر آنها تصور می‌شود، افزایش می‌یابد و این موضوع، مشکلاتی را برای شرکت‌های برق و نیز برای سازندگان تجهیزات ایجاد می‌کند. اما در این شرکت مشاهده شد که رویکرد اتخاذ شده تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورها باعث گردیده که نرخ خرابی دستگاه‌های با طول عمر زیر ۳۰، روند افزایشی را داشته باشند و این امر ممکن است در آینده مشکلاتی را برای شرکت بوجود آورد. بنابراین، تغییر نگرش بازرسی، پایش و کنترل دستگاه‌های زیر ۳۰ سال عمر کاری باید در برنامه اجرایی بهره‌برداری قرار گیرد. برنامه‌ریزی مبتنی بر عمر کاری دستگاه‌ها نیز می‌تواند با عوامل مختلفی نظیر مقدار بارگذاری، حساسیت بار، عمر ترانسفورماتور، ظرفیت، شرایط پیک مصرف دستگاه و نظایر آن اولویت‌بندی گردد. محدودسازی بارگیری از تجهیزات قدیمی، استفاده از ظرفیت مازاد، بازسازی اصولی تجهیزات و ارتقا سیستم‌ها از جمله اقدامات موثر مدیریت زیرساخت‌های قدیمی هستند. سرمایه‌گذاری بر روی وسایل پایش (حتی از راه دور) تجهیزات با اهمیت نظیر ترانسفورماتور می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای بهبود برنامه‌ریزی و کنترل فرایند تعمیر و نگهداری باشد. فرض می‌گردد با اصلاح این رویکرد و توجه به اقدامات موثر پیشنهادی، متوسط وزنی خرابی‌ها به حدود ۳۲ سال و انحراف استاندارد ۵ سال برسد.

32	میانگین					
5	انحراف معیار					
0.575184	عدد تصادفی مابین ۰ و ۱	تعداد خرابی	سن‌های خرابی انتخابی	جمعیت سال ۲	جمعیت سال ۱	سالهای کاری
0.189588				30	799	1
30		2	21	799	778	2
35		3	24	778	606	3
		1	26	606	815	4
		1	28	815	666	5
		6	29	666	727	6
		2	30	727	702	7
		1	31	702	618	8
		4	32	618	609	9
		4	33	609	727	10
		3	34	727	711	11
		3	35	711	864	12
				864	940	13
				940	809	14
				809	574	15
				574	549	16
				549	432	17
				432	490	18
				490	509	19
				509	488	20
				488	354	21
				354	415	22
				415	350	23
				350	394	24
				394	325	25
				325	358	26
				358	412	27
				412	367	28
				367	463	29
				463	426	30
				426	389	31
				389	215	32
				215	138	33
				138	179	34
				179	341	35
				341	350	36

=NORMSINV(A3)

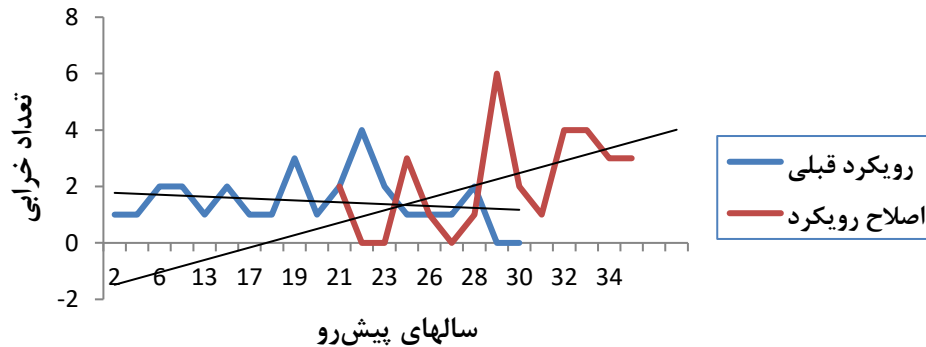
تعداد خرابی‌های

انتظاری سال جاری

حداکثر عمر کاری سال

جاری

شکل (۷). صفحه اکسل ماکروی جمعیتی با نتایج نوعی



شکل (۸). مقایسه روند خرابی‌های رویکرد قبلی و بعد از اصلاح رویکرد

بدین منظور برای بررسی رویکرد اصلاحی، پیش‌بینی روند خرابی‌های سالانه باید انجام گیرد. این امر با استفاده از روش پیشنهادی در (آنسل^۱ و همکاران، ۲۰۲۲، ص. ۳۴۱) انجام می‌گیرد. لذا با فرض ثابت بودن توزیع جمعیت دستگاه‌ها و اصلاح رویکرد برنامه سرویس و نگهداری، با تعریف سال انتظاری کارکرد این دستگاه‌ها نسبت به برآورد خرابی‌ها برای سال‌های بعد اقدام می‌گردد. بدین منظور از ماکروی که در مرجع فوق صفحه ۳۵۴ آورده شده استفاده می‌شود و طبق شکل (۷) در محیط اکسل اجرا می‌گردد.

هدف، تخمین خرابی‌ها در سال‌های پیش‌رو است. لذا برای دو حالت، قبل و بعد از اصلاح رویکرد، محاسبات با این روش انجام می‌گیرد. نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که اصلاح رویکرد سرویس و تعمیرات باعث شده که روند خرابی‌ها به بالای عمر کاری ۲۲ سال برسد. ضمناً در این شکل، رویکرد کلی مشابه با موج کمانی شکل (۱) خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح رویکرد کلی تعمیر و نگهداری شرکت، باعث افزایش طول عمر کاری دستگاه‌های با عمر کاری ۲۲ سال به بالا می‌گردد.

۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

به دلیل تجهیزات فراوان و پیری تاسیسات، همواره شرکت‌های توزیع برق با مشکلات عدیده ناشی از مدیریت زیرساخت‌های قدیمی مواجه هستند. این امر در کنار بهبود شاخص‌های کلیدی، یکی از دغدغه‌های اصلی این شرکت‌ها بوده و آنها را ناگزیر به استفاده از رویکردهای مبتنی بر مدیریت دارایی واداشته است. بدین منظور، باتوجه به نوع سرمایه‌گذاری، حجم تجهیزات قدیمی، امکانات نیروی انسانی و پیمانکاری، رویکردهای مختلفی برای انجام عملی چنین فعالیت‌هایی در شرکت‌های توزیع برق مختلف اتخاذ می‌شود.

از این‌رو، تحلیل عملکرد مورد استفاده قبلی در شرکت می‌تواند به جهت‌گیری صحیح و راهبری مناسب در آینده منتهی گردد. لذا در این مطالعه، رویکرد چندین ساله شرکت توزیع برق گیلان برای مدیریت ترانسفورماتورهای قدیمی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از داده‌های خرابی ده سال اخیر و مفهوم موج کمانی برای روند پیری مجموعه تجهیزات، اقدامات تعمیر و نگهداری تحلیل و بررسی می‌شوند. این امر با محاسبه نرخ خرابی انتظاری تجهیزات و تحلیل منحنی روند خرابی‌ها انجام می‌گیرد.

¹-Ansell

همچنین رویکرد اقدامات مربوط به تعمیرات ترانسفورماتورهای معیوب و بکارگیری مجدد آنها در شبکه و سپس طول عمر آنها بعد از آسیب، بررسی می‌شود. در این تحلیل، فعالیت کارگاه تعمیرات باتوجه به عمرکاری دوباره تجهیز تعمیرشده واکاوی شده است. سرانجام با ارائه پیشنهادات عملی در راستای بهبود رویکرد فعلی، پیش‌بینی خرابی‌ها در این حالت، ارائه می‌گردد تا دورنمای جهت‌گیری شرکت برای بهبود فعالیت‌ها و اقدامات معرفی شوند.

منابع

- Li, W., et al. (2006). Power system equipment aging, IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 52-58.
- Endrenyi, J. and Anders, G.J. (2006). Aging, maintenance, and reliability, IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 59-67.
- Dominelli, N., Rao, A. and Kundur, P. (2006). Life extension and condition assessment: techniques for an aging utility infrastructure, IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 24-35.
- Brown, R.E. and Willis, H.L. (2006). The economics of aging infrastructure, IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 36-43.
- Li, Z. and Guo, J. (2006). Wisdom about age, IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 44-51.
- Chakravorti, S. (2006). Key issues pertaining to aging, maintenance and reliability of electricity infrastructure, IEEE International Power and Energy Conference, 28-29 Nov. Malaysia, 1-6.
- Shaghaghi, A., et al. (2023). Optimizing aging assets replacement in power systems. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 14(6), 1-11.
- Leite da Silva, A.M., et al. (2022). Reliability evaluation of generating systems considering aging processes, Electric Power Systems Research, 202, 107589, 1-10.
- Shang, Y., et al. (2020). Stochastic maintenance schedules of active distribution networks based on Monte-Carlo tree search, IEEE Trans. Power Systems, 25(5), 3940-3952.
- Ge, H. et al. (2012). Multiperspective risk analysis for aging asset fleet management, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 22-26 July, USA, 1-6.
- Muhr, M. (2005). Asset and risk management of electrical power equipment, Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, 05-09 June, Japan, 861-864.
- Leva, M.C. et al., (2018). Cost benefit evaluation of maintenance options for aging equipment using monetized risk values: a practical application, Procedia Manufacturing, 19, 119-126.
- Feinstein, C.D. and Morris, P.A. (2007). Optimal management of aging assets in electric utility systems, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24-28 June, USA, 1-2.
- Hessami, A.R., et al. (2021). Levels of uncertainty in infrastructure asset management, Journal of the Transportation Research Board, 2675(7), 1-8.
- Hanai, M., et al. (2013). Integration of asset management and smart grid with intelligent grid management system, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 20(6), 2195-2202.
- Jung, C.M., et al. (2019). Asset management and maintenance a smart grid perspective, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(5), 3391-3398.

Onoshakpor, R., et al. (2022). Smart grid reliability computation – a solution to ageing infrastructure in power grid networks, IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development, 05-07 April, Nigeria, 1-5.

CIGRE (2000). Aging of the system impact on planning, Working Group 37.27: Technical Brochure 176 (TB 176).

Khuntia, S.R. et al. (2015). Classification, domains and risk assessment in asset management: a literature study, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 01-04 September, UK, 1-6.

CIGRE (2010). Transmission Asset Risk Management, Working Group C1.16: Technical Brochure 422 (TB 422).

Si, X.S. et al. (2011). Remaining useful life estimation-a review on the statistical data driven approaches, European Journal of Operational Research, 213(1), 1-14.

Bartley, W.H. (2002). Life cycle management of utility transformer assets, presented at: Breakthrough Asset Management for the Restructured Power Industry, Available at: <https://www.imia.com/wp-content/uploads/2023/08/EP14-2003-LifeCycleManagement-Utility-Transformers-3.pdf>.

Ancell, G. et al. (2022). Power system assets: investment, management, methods and practices, CIGRE Green Books, Springer.

ریشه یابی علل وقوع یک مورد حادثه ناشی از کار به روش RCA و اولویت بندی راه حل های پیشگیری از وقوع مجدد آن با استفاده از رویکرد OPA

محمدصادق نظری^۱

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع گرایش کیفیت و بهره وری - کارشناس HSE سازمان حمل و نقل ریلی
شهرداری شیراز

محمد رضا فیلی زاده^۲

دکترای مهندسی صنایع - استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

چکیده

تحقیق حاضر در مورد بررسی و تجزیه و تحلیل یک مورد حادثه ناشی از کار بر اثر برق گرفتگی که منجر به فوت یک نفر شده است، می باشد (مطالعه موردی در سازمان حمل و نقل ریلی شهرداری شیراز) و هدف از انجام آن شناسایی علل ریشه ای دخیل در بروز حادثه و ارائه راه حل های کارآمد و اولویت بندی آنها جهت اجرا به منظور پیشگیری از وقوع مجدد حوادث مشابه در آینده می باشد. این بررسی از طریق روش تحلیل علل ریشه ای (RCA)^۳ انجام گرفته است. مدل تحلیل به نام آپولو^۴ (گانو^۵) می باشد. مراحل انجام کار بر اساس این مدل صورت گرفته و نتایج بدست آمده است. در این روش بعد از تشکیل تیم تحلیل، تعریف مسئله براساس قواعد مدل انجام شده و در فاز بعدی، تحلیل علل با ترسیم شبکه علت و معلولی صورت گرفته و علل ریشه ای تعیین شده اند. از جمله علل مهم ریشه ای شناسایی شده، عدم نصب حفاظ شیشه ای روی شینه ها، عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق و ضعف سیستمی بوده است. در مرحله بعد برای هر یک از علل ریشه ای شناسایی شده اقدامات اصلاحی و یا همان راه حل های کارآمد ارائه شده است که از جمله: تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق و نصب حفاظ شیشه ای بر روی شینه تابلوهای برقی بوده است. در مرحله بعد با استفاده از رویکرد اولویت بندی ترتیبی (OPA)^۶، راه حل ها جهت اجرا اولویت بندی شده اند. نتایج بدست آمده نشان داده که اولویت اول نصب حفاظ شیشه ای بر روی شینه تابلوهای برقی و سپس تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق می باشد که می تواند در پیشگیری از بروز حوادث مشابه در آینده بسیار موثر باشند.

کلمات کلیدی: RCA، شبکه علت و معلولی، OPA، حادثه

۱- مقدمه

بر اساس نظریه متخصصان ایمنی، هر حادثه یک یا چندین علت قابل تشخیص دارد (حلوانی ۱۳۹۱). استفاده از تکنیک های خلاقانه در حل مسائل ایمنی و حوادث، به افراد در شناخت مسئله، علل موثر در ایجاد آن و همچنین روشهای دستیابی به راه حل های بهینه آن ها کمک می کند. یکی از این تکنیک ها، RCA است. RCA روشی نظاممند برای شناسایی ریشه اصلی بروز عیب می باشد تا با اتخاذ تصمیم مناسب از تکرار مجدد عیب مذکور جلوگیری به عمل آمده و با استانداردسازی موضوع از وقوع عیوب مشابه جلوگیری گردد (سازمان انرژی آمریکا). در این روش، با جمع آوری و بررسی شواهد موجود در زمینه عیب یا حادثه مورد نظر، نسبت به شناسایی و تحلیل علل ریشه ای وقوع عیب و تعیین، پیاده سازی و پیگیری راه حل های اصلاحی موثر برای جلوگیری از تکرار مجدد آن اقدام می شود. با استفاده از این تحلیل لازم است تا راه حل های اصلاحی یا پیشگیرانه اتخاذ شود. همچنین در طول فرایند RCA، یک سری نواقص

^۱ snazari627@gmail.com

^۲ feylizadeh_mr@yahoo.com

^۳ Root cause analysis(RCA)

^۴ Apollo

^۵ Gano

^۶ Ordinal Priority Approach(OPA)

سیستمی نیز آشکار می گردد که بعضاً قابل اصلاح هستند. یک RCA موفق تمامی ریشه های اصلی را شناسایی می کند چون بعضاً رویدادهای نامطلوب از یک سری علل ریشه ای نشات می گیرند نه تنها یک علت معلوم (رمضانی ۱۳۹۱). RCA به سازمان ها این امکان را می دهد که علل اساسی یا سیستمیک را کشف کنند، نه علت کلی یا سطحی را (سازمان ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا). ریشه های یک رویداد نامطلوب پایه و اساس بروز حوادث و سوانح هستند و شناسایی و خشکاندن این ریشه ها می تواند مانع از تکرار حوادث مشابه در آینده گردد (حلوانی و زارع، ۱۳۹۲). طبق آمارهای پزشکی قانونی از سال ۱۳۹۷-۱۳۹۰ تعداد ۵۳۹۴ حادثه برق گرفتگی در ایران رخ داده است که از این تعداد ۹۳۴ مورد مربوط به حوادث برق گرفتگی تهران بوده است. طبق اعلام سازمان پزشکی قانونی ایران، در هشت ماه اول سال ۱۳۹۸، تعداد قربانیان ناشی از حوادث برقی حدود ۴۵۷ نفر برآورد شده که این مقدار در پایان سال ۱۳۹۷ عددی معادل ۶۶۵ نفر بوده است. این در حالی است که در بسیاری از حوادث، آسیب های ناشی از جریان برق منجر به مرگ نمی شوند، اما هزینه ها و خسارات زیادی را به افراد و جامعه وارد می سازد. بنابراین با توجه به مجموعه تغییرات چشمگیری که برق گرفتگی در زندگی فرد می گذارد بررسی ابعاد مختلف این موضوع حائز اهمیت می باشد (شیرازی و حلوانی، ۱۳۹۲).

با این توصیفات ترغیب شدیم تا با استفاده از روش RCA، یک مورد "حادثه برق گرفتگی منجر به فوت" در سازمان حمل و نقل ریلی شهرداری شیراز را مورد تحلیل قرار دهیم و در ادامه کار با ارائه راه حل های کارآمد و کلیدی و اولویت بندی این راه حل ها با استفاده از رویکرد OPA از تکرار حادثه و یا حوادث مشابه در آینده تا حد امکان پیشگیری کنیم.

۲- حوادث ناشی از کار

با توجه به اینکه بشر همواره به این فکر بوده که مهارت خود را در جهت ساختن دنیایی با تکنولوژی مدرن و ایمن به کار برد، در طول تاریخ فکر و نظر او به سمتی سوق داده شد که ابزارها و روش های مدرن تری را برای به وجود آوردن شرایط مطلوب تر در زمینه ایمنی مهیا کند. بشر در این راستا از راه های جدیدی برای فهم و توسعه بهتر و کامل تر شرایط استفاده نمود، ولی در اغلب موارد رویدادها و شرایط وقوع آن درست تشخیص داده نمی شود و حتی درک بعضی از مفاهیم به سختی صورت گرفته و باعث ایجاد خسارات فراوان شده است (حلوانی ۱۳۹۱). بدیهی است که پیشرفت های تکنولوژیک برنامه های توسعه و پروژه های زیربنایی با وجود تمامی مزایا و منافعی که برای نسل بشر به همراه داشته اند، سرمنشاء مخاطرات و نارسایی های قابل توجهی نیز بوده اند. آمار نگران کننده حوادث کوچک و بزرگ که هر لحظه در گوشه ای از این دنیای پهناور و به ویژه کشور ما رخ می دهد و واقعیت انکارناپذیر آن این است که به رغم توسعه و تکامل فنون و فناوری ها، جلوگیری از حوادث کارگاه ها به طور کامل امکان پذیر نبوده و نمی توان حوادث را از صفحه زندگی بشر به طور کامل حذف کرد، ولیکن می توان با به کار بستن روش های عملی و بهره مندی از اصول مدیریت ایمنی تا حدود زیادی از وقوع آن جلوگیری کرد. چرا که آگاهی کارگران، تکنسین ها، مهندسین کارگاه های عملیاتی و کارفرمایان با عوامل و عناصر زیان بخش و نیز مخاطرات ناشی از محیط کار، و همچنین آشنایی با قوانین و مقررات، و تدابیر و تمهیدات مربوطه باعث می شود که نیروی انسانی با حداکثر راندمان و حداقل مخاطرات انجام وظیفه نماید (حلوانی و شیرازی، ۱۳۹۲). خطرات و حوادث، بخش جدایی ناپذیر محیط کار هستند و نمی توان وقوع آن ها را کاملاً برطرف کرد. معمولاً در صورت وقوع حوادث، مسئولیت کیفری کارفرما در حوادث ناشی از کار بسیار واضح است و باید آن ها را رعایت کند و با توجه به نظر مراجع رسمی، باید دیه حوادث ناشی از کار را به کارگر پرداخت کند. البته در صورتی که کارفرما تمام قوانین امنیتی و سلامتی را رعایت کرده و حادثه به دلیل اشتباه کارگر باشد، سازمان تامین اجتماعی هزینه درمان را پرداخت خواهد کرد، اما پرداخت دیه و خسارت به کارگر منتفی خواهد شد. به همین دلیل و با توجه به تمام این موارد، کارفرما باید تمام استانداردهای امنیتی را فراهم کند و البته کارگران نیز با رعایت کامل قوانین ایمنی فعالیت خود را در محیط کار انجام دهند. ایمن نبودن محیط کار کارگران و ابزار کار آن ها به علت عدم رعایت دستورالعمل های حفاظتی و بهداشتی توسط کارفرمایان از یک طرف، همچنین عدم رعایت پاره ای از مقررات ایمنی و بی احتیاطی و بی دقتی بعضی کارگران از طرف دیگر باعث بروز حوادث در کارگاه ها می باشد که همه ساله در سطوح مختلف کارگاهی شاهد آن هستیم، بدیهی است حوادثی که در کارگاه ها رخ می دهد و منجر به مرگ، قطع عضو و یا سایر صدمات جسمی و روحی کارگران می شود را می توان با ایمن کردن ابزار کار و محیط کار کارگران از طریق نصب حفاظ های مناسب روی قسمت های خطرناک دستگاه ها، رفع نقایص سیستم برق واحدهای تولیدی و تعمیراتی و دستگاه های مورد استفاده کارگران، در اختیار گذاشتن وسایل حفاظت فردی هنگام کار کارگران و غیره و همچنین آموزش های لازم در زمینه مسائل حفاظتی و بهداشتی به کارگران به نحو موثری پیشگیری نمود. ارتقاء سطح ایمنی و بهداشت در کارگاه ها از طریق اجرای دستورالعمل های حفاظتی، مراقبت از

سلامتی کارگران در محیط کارشان و بالا بردن فرهنگ حفاظت و بهداشت آنها از طریق آموزش های سمعی و بصری در کارگاه نقش بسیار موثری در کم شدن حوادث و افزایش تولید داشته و بالعکس بروز هرگونه حادثه ای در محیط کار زیان های غیر قابل جبرانی برای آنها و جامعه کارگری به وجود می آورد. در سال ۲۰۱۹ سازمان بین المللی کار اعلام کرد که سالانه دومیلیون و ۷۸۰ هزار کارگر بر اثر حوادث و بیماری های ناشی از کار در جهان فوت می کنند و هر سال ۳۷۴ میلیون کارگر دچار حوادث شغلی می شوند، هزینه حوادث و بیماری های شغلی نیز حدود ۴٪ تولید ناخالص داخلی هر کشور است. بر اساس داده های این سازمان، تعداد روزهای از دست رفته کاری بر اثر یک حادثه منجر به فوت برابر با ۷۵۰۰ روز کاری می باشد که همین موضوع اهمیت بررسی و تحلیل چنین حوادثی در راستای جلوگیری از تکرار آن را دوچندان می کند (میرسراجی و همکاران، ۱۳۹۰). البته در اینجا نیاز است تعریف حادثه ناشی از کار بیان گردد. حادثه ناشی از کار عبارت است از اتفاق یا پیامدی که در جریان انجام کار پدید آمده و با صدمات شغلی مرگبار یا غیر مرگبار همراه می باشد. به صورت کلی و طبق تعریف ماده ۶۰ قانون تامین اجتماعی، هر اتفاق ناگواری که در حین انجام وظیفه یا به سبب آن برای بیمه شده رخ دهد، جزو حوادث ناشی از کار خواهد بود. از آنجائیکه معمولاً حوادث باعث ایجاد آسیب جانی، خسارت مالی و آلودگی محیط زیست و همچنین خدشه دار کردن اعتبار سازمانی می گردند بایستی مورد بررسی دقیق قرار گرفته تا از تکرار مجدد آنها جلوگیری شود. علی الخصوص اینکه حادثه منجر به آسیب جانی و منجر به مرگ یک یا چند نفر شده باشد (حلوانی و خوش اخلاق، ۱۳۹۲). در سازمان های حمل و نقل ریلی نیز به دلیل ماهیت کاری، پرسنل مربوطه علی الخصوص پرسنل حوزه ساخت و نصب و راه اندازی با خطرات و بعضاً حوادث متنوعی روبرو می شوند. یکی از این خطرات کار با برق و تجهیزات برقی می باشد. به دلیل اینکه سوخت اصلی سیستم مترو برق می باشد، به طبع آن اکثر تجهیزات و سیستم های بکار رفته در ساخت خطوط مترویی از برق استفاده می کنند و در واقع یک محیط برقی برای پرسنل سازمان ایجاد می شود. لذا فعالیت های مربوط به نصب، راه اندازی و نگهداری و تعمیرات تجهیزات و سیستم های برقی جزء لاینفک وظایف گروه بزرگی از پرسنل مترو می باشد که به طبع آن مواجهه این افراد با خطرات تجهیزات و سیستم های برقی حین انجام وظیفه و بروز حادثه برق گرفتگی بسیار محتمل می باشد. در تحقیق حاضر نیز یک مورد حادثه برق گرفتگی که منجر به فوت یکی از پرسنل زیرمجموعه شرکت های پیمانکاری سازمان حمل و نقل ریلی شهرداری شیراز شده است به روش RCA و بر اساس مدل "آپولو" مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است تا علل ریشه ای بروز حادثه شناسایی و راه حل های موثر جهت پیشگیری از حوادث مشابه در آینده تعیین گردیده و بر اساس معیارهای مشخص، این راه حل ها اولویت بندی شوند تا به مرحله اجرا گذاشته شوند. روند اصلی بروز حادثه و شرایط کلی آن در فصل سوم این تحقیق به طور کلی بیان شده است.

۳- روش RCA

RCA را در یک بیان کلی می توان فرآیند بررسی و تحقیق ساختار یافته ای تعریف نمود که هدفش شناختن علل واقعی بروز یک رویداد (مساله) و یافتن راه حل هایی جهت حذف آن ها می باشد. آن هم رویدادها و مسائلی که هزینه های هنگفتی را به سازمان ها تحمیل نموده اند. در بسیاری از موارد، رویدادها و مسائل به صورت مزمن طی سالیان دراز وجود داشته اند و هیچ راه حلی هم برای شناسایی و رفع علت های اصلی بروز آنها اتخاذ نشده است (رضانی و همکاران، ۱۳۹۷). در تعریفی دیگر، RCA ابزاری کلیدی برای سازمان هایی است که درگیر وضعیت و فرهنگ واکنشی هستند زیرا به کمک آن می توانند هرچه سریع تر خرابی های عمده ای را شناسایی و حل و فصل و مدیریت کنند (زواشکیانی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس الزامات نظام مدیریت دارایی های فیزیکی، RCA خرابی ها و رویدادهای نامنتطبق با هدف جلوگیری از تکرار چنین وقایعی، حلقه ای کلیدی در تکمیل چرخه بهبود مستمر است. چنانچه در مجموعه استانداردهای ISO 55000^۱ نیز تشریح شده، سازمان باید رویه ها و فرایندهایی را برای بررسی و رسیدگی به خرابی ها، پیشامدهای حوادث و عدم تطابق های مرتبط با دارایی های فیزیکی، سیستم ها و فرایند مدیریت دارایی ها ایجاد و نگهداری کند. در این روش، با جمع آوری و بررسی شواهد موجود در زمینه عیب یا حادثه مورد نظر، نسبت به شناسایی و RCA وقوع عیب و تعیین، پیاده سازی و پیگیری راه حل های اصلاحی موثر برای جلوگیری از تکرار مجدد آن اقدام می شود. با استفاده از این تحلیل لازم است راه حل های اصلاحی یا پیشگیرانه اتخاذ شود. هدف از تدوین این روش، انجام مراحل RCA وقایع (حوادث ناگوار) برای تعیین علل ریشه ای موثر در وقوع رویداد نامطلوب و تعیین راه حل های کارآمد و موثر برای جلوگیری از تکرار مجدد، کنترل و یا کاهش شدت اثر حادثه و پیشگیری از رویدادهای مشابه در آینده با پیاده سازی راه حل های حاصل از آن است. به طور کلی فرایند RCA، از پنج گام اصلی

^۱ استاندارد ایزو ۵۵۰۰۰ نمای کلی از سیستم مدیریت دارایی های فیزیکی مبانی و واژگان و منافعی که از پیاده سازی مدیریت دارایی های فیزیکی حاصل می شود را ارائه کرده و زمینه لازم را برای پیاده سازی استانداردهای ISO ۵۵۰۰۱ و ISO ۵۵۰۰۲ فراهم می کند.

تشکیل شده است. در گام اول برخی مقدمات شامل دریافت گزارش عدم تطابق برای تحلیل، بررسی و مقایسه آن با معیارها و اولویت ها انجام و در اولین جلسه رسمی تحلیل، نسبت به تعریف مسئله اقدام می شود. در گام دوم، تعریف مسئله و تحلیل علت و معلولی صورت می پذیرد. در این گام، ابتدا تشکیل تیم (و در صورت نیاز برگزاری آموزش) و همچنین جمع آوری اولیه برخی شواهد، اسناد و داده ها انجام می شود و سپس اعضای تیم تحلیل، نسبت به ایجاد و توسعه روابط علت و معلولی مساله اقدام می نمایند. این مرحله عمدتاً به صورت طوفان فکری (با رعایت اصول مربوطه) است، سپس با جمع آوری و بررسی شواهد لازم، مسیرهای علت و معلولی قطعی و احتمالی، تعیین و اعتباردهی می شوند. در گام سوم شناسایی و تعیین راه حل ها صورت می پذیرد. در این مرحله طی جلسات مبتنی بر طوفان فکری در کل سطوح، علل شریاطی و کنشی شناسایی و اعتباردهی شده، اقدام به پیشنهاد راه حل اصلاحی گردیده و سپس براساس معیارهای ارزیابی راه حل، بهترین و کارآمدترین راه حل ها برای پیاده سازی انتخاب می شوند. گام چهارم مرحله پیاده سازی و پیگیری اجرای راه حل ها می باشد. در این گام راه حل های اصلاحی تعیین شده بر اساس برنامه اجرایی مصوب، اجرا و پیاده سازی گردیده و پس از دوره های از قبل تعیین شده مورد پیگیری قرار می گیرند. در گام پنجم ارزیابی اثربخشی اجرای RCA صورت می پذیرد. در این مرحله نسبت به ارزیابی اقدامات انجام شده و تعیین میزان صرفه جویی حاصله اقدام می شود. در این تحقیق فرایند انجام کار مطابق بند ۱-۶ و مراحل اعلام شده در آن صورت می پذیرد. به طور کلی RCA از این طریق با تعریف دقیق مسئله و مورد تایید تمامی اعضای کارگاه آغاز میشود، سپس از یک نمایش گرافیکی علت و معلولی به نام نمودار واقعیت استفاده و به تدریج شواهد و راه حل ها به نمودار اضافه می شود، تمام این موارد بر مبنای اصول ساختار یافته علت و معلولی شناخته شده استوار بوده و حرکت کلی نیز بر روی این مسیر مشخص می باشد. تفاوت فرایند RCA به کار رفته در این تحقیق با فرایند کلی RCA اشاره شده در بالا که شامل ۵ گام اساسی می باشد، در این است که در این تحقیق گام چهارم که همان مرحله پیاده سازی و اجرای راه حل ها و گام پنجم که همان ارزیابی و اثربخشی اجرای RCA در سازمان مورد مطالعه می باشد، آورده نشده است. در این تحقیق پس از انجام گام سوم که همان شناسایی علل ریشه ای و تعیین راه حل های کارآمد می باشد، با استفاده از رویکرد OPA، راه حل های ارائه شده بر اساس شاخص های تعیین شده، اولویت بندی گردیده تا برای مرحله اجرای راه حل ها به سازمان مربوطه پیشنهاد گردد.

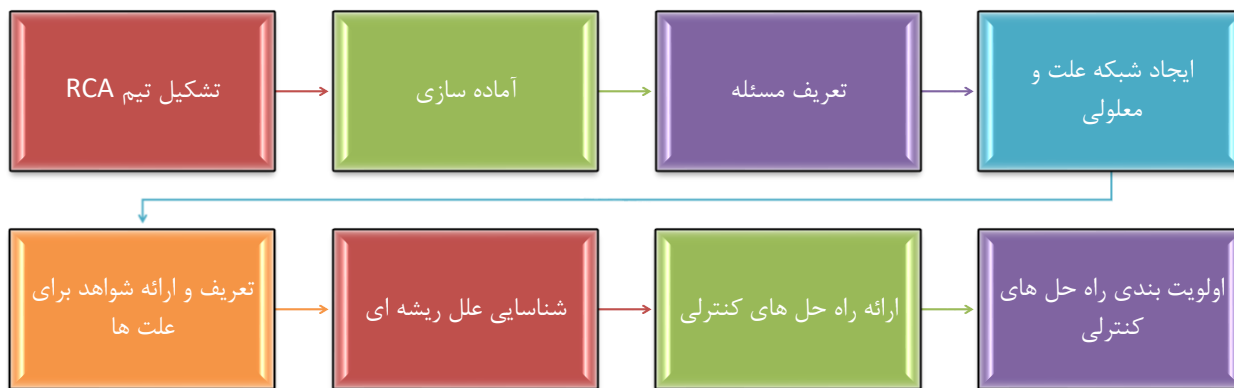
۴- رویکرد OPA

کیفیت مدیریت اساساً تابع کیفیت تصمیم گیری است زیرا عملکرد مدیریت تابع کیفیت تصمیماتی است که مدیر اتخاذ مینماید. مدیران برای اتخاذ تصمیمات مطلوب و مورد رضایت بجای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی از چند معیار سنجش استفاده میکنند که تصمیم گیری بر اساس چندین معیار نامیده میشود. در روشهای علمی تصمیم گیری مورد استفاده مدیران خطاهایی با تصمیم گیرنده همراه خواهد شد که بر نتایج نهایی تصمیم اثر میگذارد. در این روشها، ابزار جمع آوری اطلاعات، پرسشنامه و چک لیست میباشد که نیاز به تعیین روایی و پایایی آن میباشد. برخی خطاهای رایج در فرآیند تصمیم گیری عبارتند از: قیاس بین شاخص ها و گزینه ها با استفاده از متغیرهای کلامی (طیف لیکرت)، تعیین میزان عددی برتری در مقایسات زوجی (محاسبه ضریب سازگاری)، بی اطلاعی خبره از موثر بودن یا نبودن شاخص ها، تبدیل متغیرهای کلامی به عددی، بی مقیاس کردن، استفاده از میانگین (هندسی) برای تجمیع نظرات، کمی یا کیفی بودن شاخص ها، مثبت یا منفی بودن شاخص ها، استقلال مراحل و زمان فرآیند تصمیم گیری که سبب عدم شناخت خبره از وضعیت گزینه و انتخاب شاخص های غیر مرتبط، عدم شناخت خبره از وضعیت شاخص ها و تعیین ضرایب غیر واقعی برای تصمیم گیری و همچنین در مواردی که خبره نظری در خصوص وضعیت برخی گزینه ها و شاخص ها ندهد مراحل تصمیم گیری مختل میشود که همگی موارد مذکور سبب بروز خطا در فرآیند تصمیم گیری میگردد و نهایتاً، اعتماد به نتایج تصمیم کاهش مییابد. در این پژوهش با هدف حداقل نمودن خطاهای اشاره شده، روشی پیشنهاد میگردد که از خبره هیچ اطلاعات دقیق و جزئی خواسته نشده است و اطلاعات تصمیم گیری بصورت ساده تری از خبرگان جمع آوری میشود و نیاز به مقایسات زوجی و تعیین برتری دقیق عددی وجود ندارد. همچنین در روش پیشنهادی از متغیرهای کلامی و تبدیل آنها به عدد، بی مقیاس کردن، استفاده از میانگین برای تجمیع نظرات عاری میباشد. در این روش هر خبره با اطلاع از شاخص ها و وضعیت گزینه ها به علت هم زمانی و وابستگی مراحل تصمیم گیری میتواند شاخص هایی که از نظر او کلیدی هستند را در تصمیم گیری شرکت دهد. همچنین کمی یا کیفی بودن و مثبت یا منفی بودن شاخص ها تأثیری در فرآیند تصمیم گیری ندارد. در روش پیشنهادی با توجه به اینکه خبرگان رتبه شاخص ها و گزینه ها را مشخص مینمایند و این که اگر رتبه گزینه یا شاخصی نسبت به گزینه یا شاخصی دیگر بهتر باشد به این معنی است که وزن (اهمیت) آن گزینه

و یا شاخص باید بیشتر از دیگری باشد، مسئله بصورت یک مدل ریاضی چند هدفه فرموله میگردد و با استفاده از مفاهیم ریاضی، مدل چندهدفه به یک مدل تک هدفه و خطی تبدیل میشود و با حل مدل بصورت دقیق و تعیین مقادیر متغیرهای مدل که همان وزن (اهمیت) گزینه ها بر حسب شاخص ها و نظر خبرگان است میزان دقیق اهمیت هر یک از ارکان تصمیم گیری (خبره، شاخص، گزینه) مشخص میگردد و نهایتا میتوان به امتیاز هر خبره، شاخص و گزینه و همچنین امتیاز هر شاخص و گزینه از نظر هر خبره دست یافت (برگرفته از جزوه درسی نظریه تصمیم گیری- معرفی رویکرد OPA). یک بخش دیگر از موضوع تحقیق حاضر، استفاده از رویکرد OPA که در بالا توضیح داده شد برای اولویت بندی راه حل های پیشنهادی بر روی علل ریشه ای شناسایی شده در گام سوم RCA می باشد. به این صورت که پس از تعیین راه حل های کارآمد به روش RCA و براساس ارکان تصمیم گیری (خبره، شاخص، گزینه)، با استفاده از رویکرد OPA، موثرترین گزینه (راه حل) بر اساس شاخص ها (معیارهای تعیین شده در مرحله تعیین راه حل ها) و بر اساس نظر خبرگان (کارشناسان تیم RCA) رتبه بندی می گردد که با توجه به این رتبه بندی می توان راه حل ها را جهت اجرا و پیاده سازی به سازمان مربوطه پیشنهاد داد.

۵- روش انجام کار

ابتدا تشکیل تیم RCA در سازمان (تیم خبره)، در ادامه آماده سازی و تعریف مسئله و سپس تشکیل شبکه علت و معلولی برای مسئله (با توجه به اصول علت و معلولی) که شامل ترسیم شبکه و تصویری از روابط علت و معلولی، پیگیری شواهد و مستندات برای هر کدام از علت های مطرح شده در شبکه علت و معلولی، اطمینان از کامل بودن علت های هر کدام از معلول ها در شبکه علت و معلولی و در نهایت در صورت توقف در هر مسیر مشخص شدن دلایل توقف. در مرحله بعد شناسایی راه حل های کلیدی و کارآمد برای علت های مطرح شده است. مراحل طراحی و پیاده سازی RCA حادثه به روش آپولو به شرح شکل (۱) بوده است:



شکل ۱- فلوچارت مراحل پیاده سازی RCA

۵-۱ تشکیل تیم RCA در سازمان

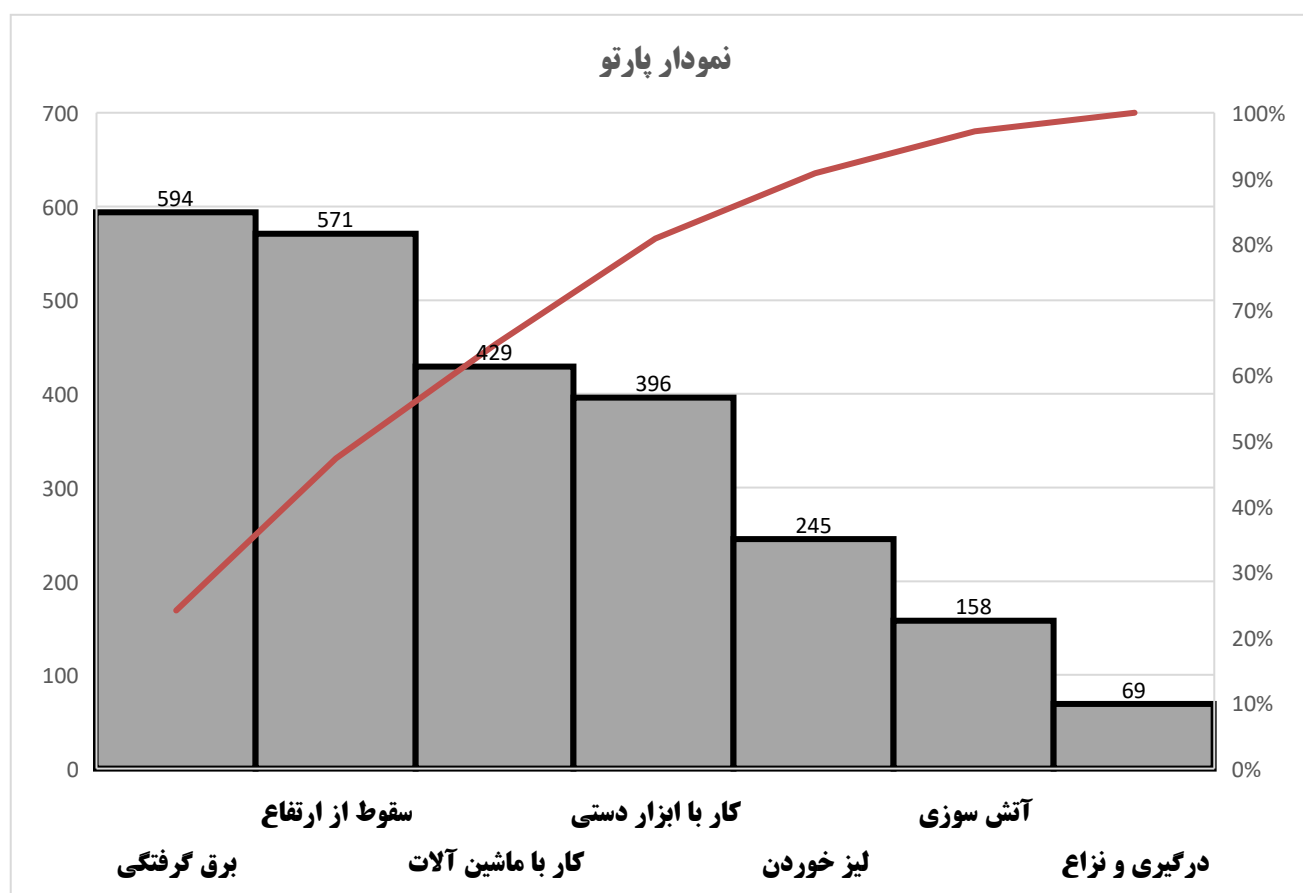
اعضای کارگاه تحلیل شامل مهم ترین افراد مطلع، ذینفع و تاثیرگذار بر رفع واقعه از جمله افراد خبره و متخصص از واحد های مختلف سازمان مطابق جدول (۱) تشکیل می شود. تیم معمولا متشکل از ۶ نفر کارشناس می باشد که دارای مشخصات زیر هستند: دارای شناخت درحوزه مورد بررسی هستند، بین رشته ای انتخاب می گردند، دارای مهارت های تحقیق و بررسی سوانح هستند، در جریان وقوع حادثه بوده اند، یکی از افراد در مورد فرایند بررسی حادثه به خوبی آموزش دیده است (سرپرست و تسهیلگر تیم).

جدول ۱- نفرات پیشنهادی جهت تشکیل تیم RCA

ردیف	گروه کاری	سمت در تیم
۱	ایمنی	کارشناس ایمنی (سرپرست و تسهیلگر تیم)
۲	امور نت	کارشناس برق
۳	مرکز کنترل	کارشناس مرکز کنترل
۴	امور واحد	کارشناس ایستگاه ها
۵	امور حقوقی	کارشناس حقوقی
۶	همکار حادثه دیده	تکنسین نت برق

۱-۱- آماده سازی

در این بخش ابتدا بر اساس اولویت های سازمانی آماده سازی جهت تعیین مسئله انجام گردید. اولویت های سازمانی شامل اولویت های ایمنی و زیست محیطی، کاهش اختلال و به تبع آن کاهش تبعات ناشی از خدشه دار شدن اعتبار سازمانی و وقفه در عملیات بهره برداری می تواند باشد. لذا با توجه به اینکه معمولاً اولویت های ایمنی در بیانیه ماموریت و چشم انداز سازمان و هم اینکه به عنوان شعار سازمان، دارای اهمیت فراوان و اولویت نخست تعیین می گردد، بررسی حوادث در راستای افزایش ایمنی به عنوان اولویت مهم شناخته می شود. در اینجا با استفاده از ابزارهای مدیریتی مانند نمودار پارتو فراوانی حوادثی که منجر به مرگ یک یا چند نفر شده اند را بررسی می کنیم (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار پارتو. آسیب منجر به فوت بر اساس نوع حادثه - آمار حوادث سال ۲۰۱۹ در جهان

لذا با توجه به اولویت های سازمان که بیشتر مبتنی بر ایجاد محیطی ایمن جهت پرسنل و خاصه مشتریان سازمان (مسافریان مترو) می باشد و همچنین با در نظر گرفتن آمارهای جهانی و در صدر بودن عامل برق گرفتگی به عنوان اصلی ترین عامل مرگ و میر افراد در

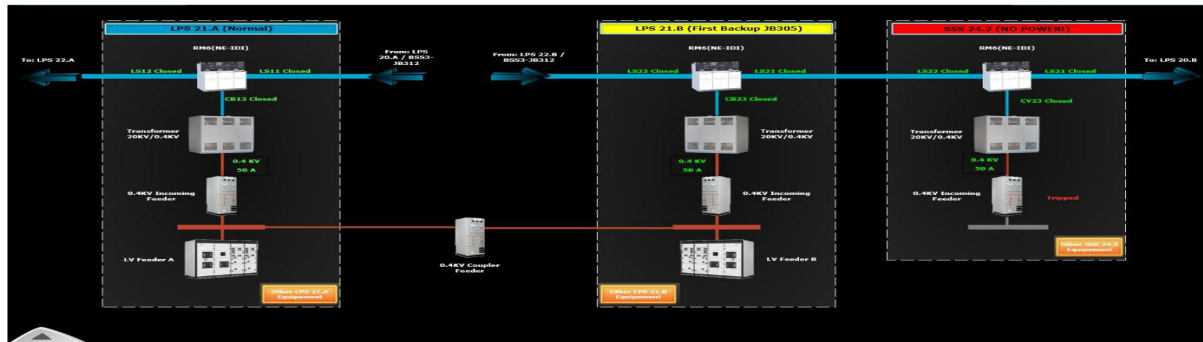
حوادث ناشی از کار جبران ناپذیر است، "بررسی حوادث برق گرفتگی منجر به فوت" به عنوان اولویت تعریف مسئله در نظر گرفته می شود.

۳-۵ شرح عملیاتی تعریف مسئله

شرح عملیاتی شامل تعریف اولیه از مسئله (نه تحلیل مسئله)، اطلاعات فنی لازم مربوط به رویداد همراه با تصاویر لازم، شرایط واقعه و شاخص های مرتبط با قبل و بعد حادثه و حین حادثه بوده که به عنوان سند اولیه در کارگاه RCA در نظر گرفته شده است. این شرح، موارد زیر را شامل گردید:

۳-۵-۱ پست های توزیع برق ایستگاه ها^۱ (LPS)

در داخل هر ایستگاه ۲ پست برق مشابه جهت تامین برق ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت از برق ۲۰ کیلو ولت بمنظور تغذیه تجهیزات داخل ایستگاه ها از قبیل آسانسورها، پله برقی ها، فن ها، پمپ ها و روشنایی ایستگاه وجود دارد که هر کدام از این دو پست قابلیت تغذیه تمامی تجهیزات را دارد و پست دیگر جهت پشتیبانی و بالا بردن ضریب اطمینان سیستم تغذیه تجهیزات بوده و عملاً در صورت بروز اشکال در هر پست از طریق دیگری پشتیبانی میگردد. در شکل (۳) نمای شماتیک تجهیزات پست های توزیع برق ایستگاه ها به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۳- نمای شماتیک تجهیزات پست های توزیع برق ایستگاه های مترو

۴-۵ تعریف مسئله (رویداد نامطلوب)

نخستین گام از حل موثر و کارآمد مسئله، تعریف مسئله است. در این مرحله تعریفی درست و دقیق از رویداد برای شروع یک تحلیل کارآمد علل ریشه ای توسط اعضای کارگاه بیان شد. این تعریف در برگیرنده چند "چه؟" می باشد.

چه هدفی از تحلیل موضوع داریم؟

تعریف مسئله	
هدف	پیشگیری از وقوع حوادث برق گرفتگی منجر به فوت و عواقب آن

چه چیزی: مسئله چیست؟

تعریف مسئله	
چه چیزی	فوت تکنسین فنی برق

چه زمانی: کی اتفاق افتاد؟

تعریف مسئله	
چه زمانی	۱۳۹۷/۰۵/۱۹ ساعت ۱۱:۰۰

¹ Lighting and Power Substation(LPS)

چه مکانی: کجا اتفاق افتاد؟

تعریف مسئله	
چه مکانی	پشت تابلو کوپلر ^۱ پست برق LPS A ایستگاه

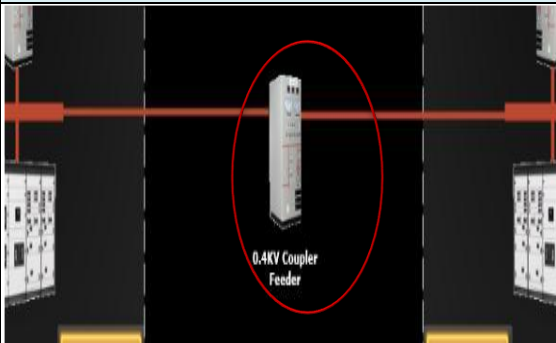
چه اهمیتی: چرا روی این مسئله کار می کنیم؟

تعریف مسئله	
ایمنی	فوت تکنسین فنی برق ناشی از برق گرفتگی
زیست محیطی	تبعات زیست محیطی نداشته است
اختلال در خدمات	به تعویق افتادن انجام کار پیمانکار نصب سیستم SCADA ^۲ به مدت ۱ هفته
نگهداری و تعمیرات	به تعویق افتادن تعمیرات پیشگیرانه شش ماهه پست برق به مدت ۱ هفته
کاهش اعتبار سازمانی	جار و جنجال رسانه ای و مخدوش شدن عملکرد سازمانی
خسارت مالی، روحی، روانی و اجتماعی برای خانواده فرد	بی سرپرست شدن همسر و فرزندان فرد

چند بار تکرار شده است؟

تعریف مسئله	
تکرار	برای اولین مرتبه رخ داده است

چه تجهیزاتی: کار بر روی چه تجهیزاتی بوده است؟

تعریف مسئله	
تجهیز برقی	فرد حادثه دیده در پشت تابلو کوپلر در حین انجام عملیات سوراخ کاری با مته برقی در کف آن بوده است. به همین دلیل همیشه یک سمت کابل های وارد شده به تابلو کوپلر و شینه آن، برقرار می باشد. 
شکل (۴). تصویر تابلو کوپلر در پست برق LPS	

شرح مختصر حادثه چه بوده است؟

تعریف مسئله	
خلاصه حادثه	گروه اجرایی شرکت پیمانکار جهت اتصال کابل های مربوط به سیستم SCADA بر روی تجهیزات پست برق ایستگاه در ساعت ۸:۴۵ صبح شروع به انجام فعالیت در پست برق LPS A می نماید که حوالی ساعت ۱۱:۰۰ تکنسین فنی این گروه در حین سوراخ کاری با استفاده از ابزار مته برقی دستی دچار برق گرفتگی شده و بعد از دقایقی فوت می کند.

^۱ کوپلر (Coupler) تابلویی است که در صورت قطع برق از یکی از پستها (LPS A یا LPS B) برق را از سمت پست برقرار به مصرف کننده های پست بی برق، انتقال می دهد و این عمل به صورت اتوماتیک صورت می پذیرد.

^۲ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

چه اقداماتی قبل از حادثه انجام شده است؟

تعریف مسئله
خلاصه اقدامات قبل از حادثه
روز قبل از انجام کار، درخواست مجوز جهت انجام فعالیت توسط سرپرست گروه داده می شود و همان روز از سمت مرکز کنترل به عنوان صادر کننده مجوز، مورد تایید واقع می گردد. در روز وقوع حادثه ابتدا برق ورودی توسط گروه نت و با دستور بخش انرژی مرکز کنترل قطع می گردد. سپس کلید ورودی به ترانس قطع و کلید ارت وصل می گردد. بعد از آن کلید ورودی به تابلوهای مصرف کننده ها نیز قطع می گردد و در ادامه تمامی کلید تابلوهای LV (فیدرهای مربوط به مصرف کنند های ایستگاه) نیز بیرون کشیده می شوند

چه اقداماتی بعد از حادثه انجام شده است؟

تعریف مسئله
اطلاع رسانی به اورژانس و انجام کمک های اولیه در محل و انتقال به مرکز درمانی
خلاصه اقدامات بعد از حادثه

چه افرادی و با چه تخصص هایی برای تحلیل نیاز است؟

تعریف مسئله
کارشناس نت برق - کارشناس ایمنی - کارشناس مرکز کنترل - کارشناس حقوقی - کارشناس امور ایستگاه - شاهد / شاهدان حادثه
افراد مطلع و یا پیشنهادی جهت عضویت در هیئت RCA

۵-۵ رتبه بندی ریسک ناشی از وقوع حادثه

جهت رتبه بندی ریسک ناشی از فعالیت وقوع حادثه از روش آنالیز حالات و اثرات بالقوه خرابی^۱ استفاده شد. در این روش با استفاده از ۳ فاکتور شدت اثر^۲، عدد وقوع^۳ و روش تشخیص^۴، که از جداول ارزیابی ریسک بدست آمده اند، عدد اولویت ریسک^۵ تعیین گردید (جدول ۲). نتایج ارزیابی به شرح جدول (۳) می باشند.

² Failure Mode and Effect Analysis(FMEA)

² Severity(S)

³ Occurrence(O)

⁴ Detection(D)

⁵ Risk Priority Number(RPN=R)

شدت اثر (C)	امتیاز	عدد وقوع (P)	امتیاز	روش تشخیص (E)	امتیاز
مرگ یک نفر	۹	در هر ماه (۱-۴) مورد رخ داده است	۷	تا یکبار در روز	۶

شرح فعالیت		نصب تجهیزات برق
نوع فعالیت	هفتگی	
رویداد	برق گرفتگی	
پیامد	آسیب جانی	
شرایط وقوع	Normal	
شدت اثر	مرگ یک نفر	
امتیاز شدت اثر	۹	
عدد وقوع	در هر ماه (۱-۴) مورد رخ داده است	
امتیاز عدد وقوع	۷	
میزان تشخیص	تا یکبار در هفته	
امتیاز میزان تشخیص	۶	
RPN	۳۷۸	
دسته بندی ریسک	High Risk	
ارزشیابی ریسک	نامطلوب	

لذا فرم تعریف مسئله مطابق جدول (۴) ایجاد شد که براساس آن تعریف مسئله صورت پذیرفت.

جدول ۴- فرم تعریف مساله جهت تحلیل و ریشه یابی حادثه

فرم تعریف مساله جهت تحلیل و ریشه یابی حادثه		کد مدرک: F-SO-2-0-..../00	تاریخ تکمیل:
واحد سازمانی:	کد پرسنلی:		
درخواست کننده:	نام و نام خانوادگی:	سمت شغلی:	واحد سازمانی:
عنوان حادثه	فوت تکنسین فنی برق		
شرح حادثه	تکنسین فنی شرکت پیمانکاری در حین فعالیت دچار برق گرفتگی شده و بعد از دقایقی فوت می کند.		
زمان وقوع حادثه	تاریخ و ساعت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۹ - ۱۱:۰۰		
اهمیت حادثه	آسیب دیدگی پرسنل *		
	زیست محیطی		
تکرار	اختلال در خدمات		
	نگهداری و تعمیرات		
خلاصه اقدامات انجام شده	برای اولین مرتبه رخ داده است		
شرایط و گروه بندی حادثه	اطلاع رسانی به اورژانس و انجام کمک های اولیه در محل و انتقال به مرکز درمانی		
	وقوع حادثه بعد از انجام PM و یا تعمیرات		
	وقوع حادثه بعد از ایجاد تغییر در تجهیز / رویه		
درجه ریسک واقعی ناشی از وقوع حادثه	وقوع علرغم داشتن سنسور و حفاظ		
	شدت اثر حادثه (Severity)		
	عدد وقوع (Occurrence)		
شرح شرایط عملیات در پس زمینه وقوع حادثه	رتبه ریسک: High Risk		
	رتبه تشخیص (Detection)		
انتخاب مسئول تیم تحلیل	گروه اجرایی شرکت پیمانکار جهت اتصال کابل های مربوط به سیستم SCADA بر روی تجهیزات پست برق ایستگاه در ساعت ۰۸:۴۵ صبح شروع به انجام فعالیت در پست برق LPS A می نماید که حوالی ساعت ۱۱:۰۰ تکنسین فنی این گروه در حین فعالیت دچار برق گرفتگی شده و بعد از دقایقی فوت می کند.		
	RCA و کمیته تسهیلگر		
افراد مطلع و یا پیشنهادی جهت عضویت در هیئت RCA	کارشناس نت برق - کارشناس ایمنی - کارشناس مرکز کنترل - کارشناس حقوقی - کارشناس امور ایستگاه - شاهد / شاهدان حادثه		
	فهرست مراجع اطلاعاتی پیشنهادی		
درخواست RCA به این دلیل رد شد			

۵-۶ تشکیل شبکه علت و معلولی برای مسئله

در RCA به روش آپولو تلاش میشود تا روش هایی به کار گرفته نشود که به انحراف ذهنی یا به طور کلی ناکارآمدی ذهنی بینجامد. در این روش همه علت ها و آثار پدید آورنده آنها در یک طوفان فکری از سوی ذینفعان و کسانی که در آن درگیر هستند مطرح شده و شبکه گسترش می یابد. این روش کمک می کند تا راه حل ها و علت های مرتبط با آن اثر که کمتر آشکار هستند دیده شوند، چرا که گاهی بهترین دلایل برای کاهش پیامدهای ناشی از وقوع یک پیشامد ناخوشایند و یا جلوگیری از تکرار وقوع آن، کمتر آشکار هستند. مهمترین بخش و هسته مرکزی RCA، ایجاد شبکه علت و معلولی است که چنانچه به درستی ایجاد نگردد، نتیجه گیری صحیح بدست نخواهد آمد. چهار ویژگی مهم و اصلی در روابط علت و معلول عبارتند از:

الف) علت و معلول در واقع یک چیزند.

ب) علت ها و معلول ها بخشی از زنجیرهای نامتناهی از علل هستند.

ج) هر معلول حداقل دو علت دارد که یکی به صورت کنش و دیگری از جنس شرایط است.

د) هر معلول فقط زمانی به وجود می آید که تمامی علت هایش همزمان در یک نقطه از زمان و مکان تلاقی کنند.

در حل مسائل مبتنی بر پیشامد، همیشه از معلولی شروع میکنیم که می خواهیم مانع تکرارش شویم و معمولاً در نقطه ای متوقف می شویم که دیگر اطلاعات بیشتری نداریم. این نقطه جایی است که صادقانه دیگر نمی دانیم «چرا» (زواشکیانی و همکاران ۱۳۹۸). اصول تشکیل شبکه علت و معلولی بر این اساس بود:

الف) ایجاد معلول اولیه

ب) پرسش «چرا» برای هر معلول اولیه

ج) جستجوی علت ها در کنشها و شرایط

د) ایجاد ارتباط بین تمامی علتها با عبارت «به علت»

ه) پشتیبانی از تمامی علت ها با شواهد

و) اتمام هر مسیر علت و معلولی با یک «؟» یا دلیلی برای توقف

۵-۶-۱ ایجاد معلول اولیه

کار را با آنچه در پرسش «چیستی برای تعریف ابتدایی مسئله به دست آوردیم، شروع کردیم. این نقطه همان طور که در بخش تعریف مسئله گفتیم «معلول اولیه» نامیده شد و از اینجا شروع به پرسیدن «چرا» های بیشتر کردیم. این نقطه اولین ستون شبکه علت و معلولی را ایجاد کرد.

فوت تکنسین فنی برق

۵-۶-۲ پرسش «چرا» برای هر معلول اولیه

در اینجا اعضای کارگروه تحلیل، توسط طوفان فکری تعدادی از علت های به وجود آورنده اثر اولیه را نوشته و دومین ستون شبکه را به وجود آوردند و به همین صورت برای هر علت که خود معلول علت قبل از آن می شد، شروع به پرسیدن «چرا» های دیگر کردند.

به علت

چرا؟

فوت تکنسین فنی برق

.....

۵-۶-۳ جست وجوی علت ها در کنش ها و شرایط

در شبکه علت و معلولی برای هر اثر حداقل ۲ علت با نام های شرایط و کنش بیان کردیم.

کنش ۱ (عمل): علت هایی هستند که با شرایط ترکیب شده و یک اثر را ایجاد میکنند.

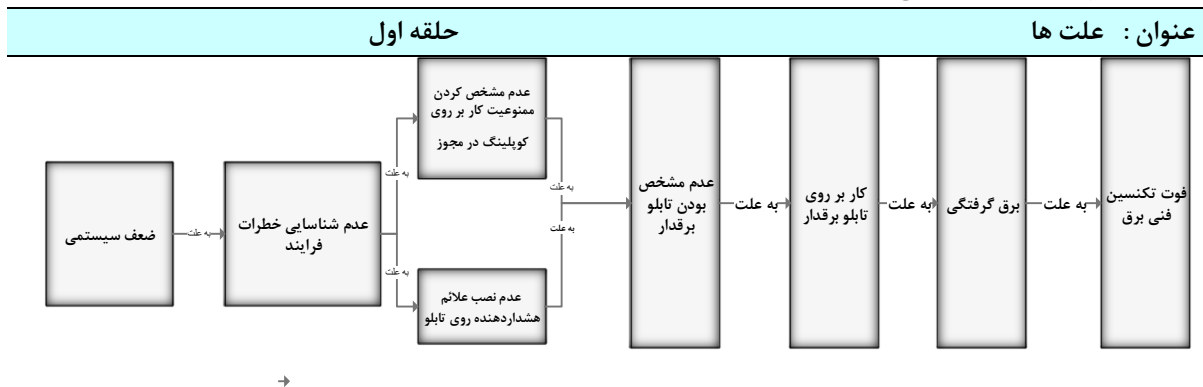
شرایط ۲ (وضع اجرایی): علت هایی هستند که قبل از کنش وجود دارند و با آن ها تلفیق شده و آثار آن را به وجود می آورند.

در شکل (۵) حلقه اول معلول اولیه به صورت جمله اصلاح شده (فوت تکنسین فنی برق) به کار رفته است و فعل به شکل «شده است» فهمیده می شود که نیامده است. علت کنشی به صورت جمله (عدم ممنوعیت کار بر روی کویل در مجوز) و فعل (مشخص کردن) است. علت شرایطی هم به شکل یک جمله (عدم نصب علائم هشدار دهنده روی تابلو) بیان شده است.

۵-۶-۴ ایجاد ارتباط بین تمامی علتها با عبارت «به علت»

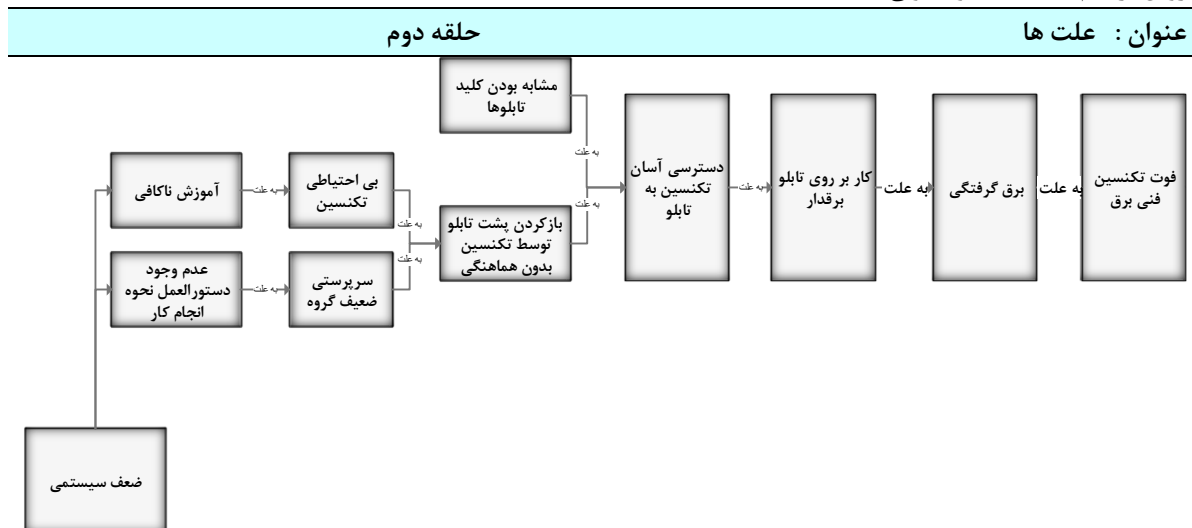
در این مرحله، تمامی علتها با عبارت «به علت» به هم ربط داده شدند. در شکل های (۵)، (۶)، (۷)، (۸) و (۹) به ترتیب حلقه اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم شبکه ترسیم شده و ارتباط بین علت ها مشخص گردیده است.

روش ترسیم: شبکه علت و معلولی

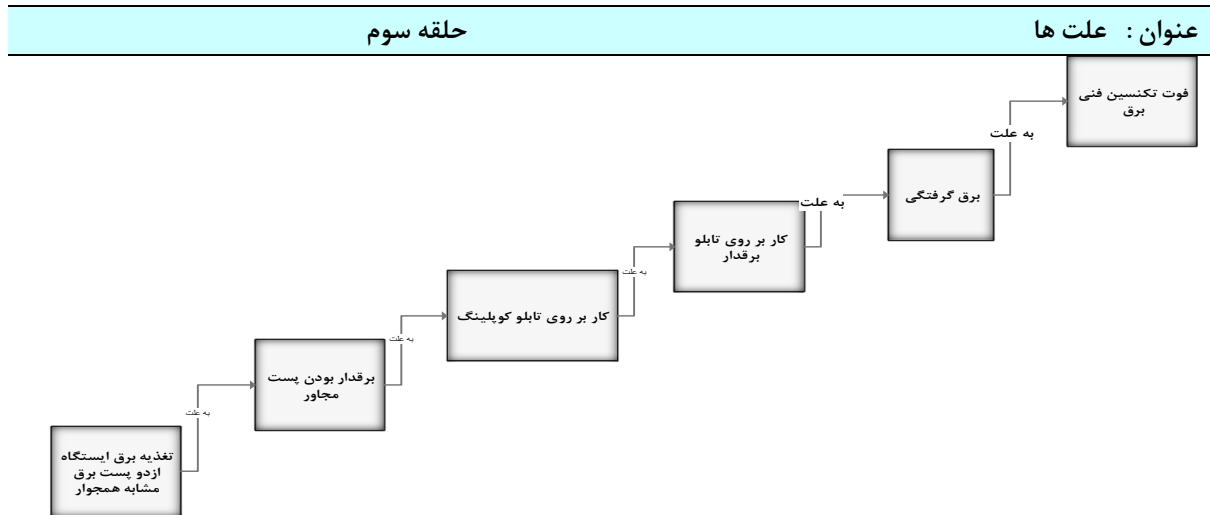


شکل ۵- حلقه اول شبکه علت و معلولی

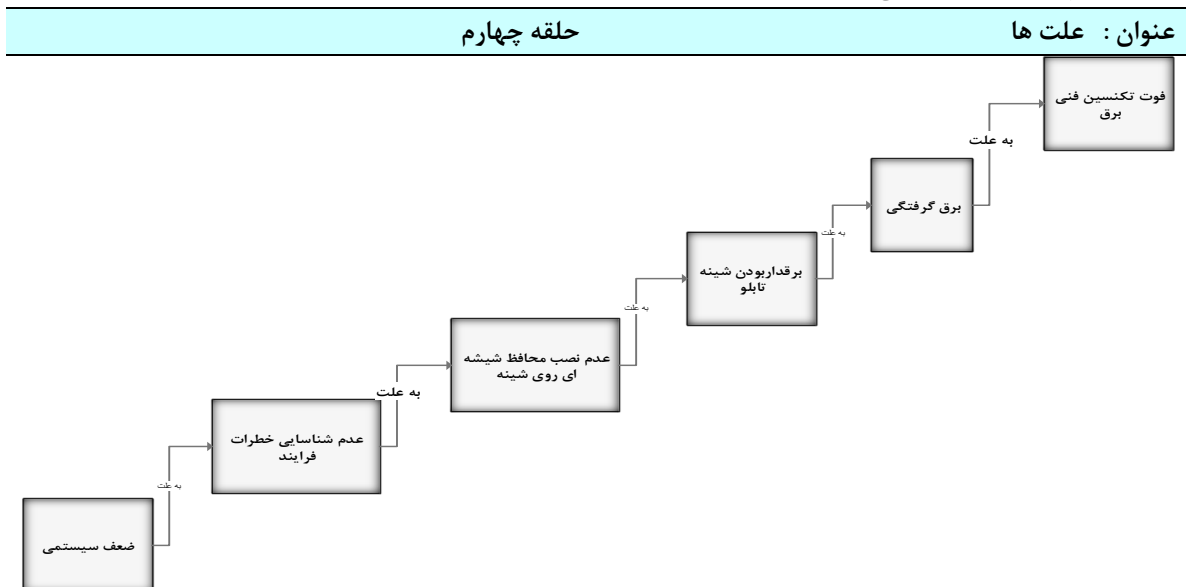
روش ترسیم: شبکه علت و معلولی



شکل ۶- حلقه دوم شبکه علت و معلولی



شکل ۷- حلقه سوم شبکه علت و معلولی

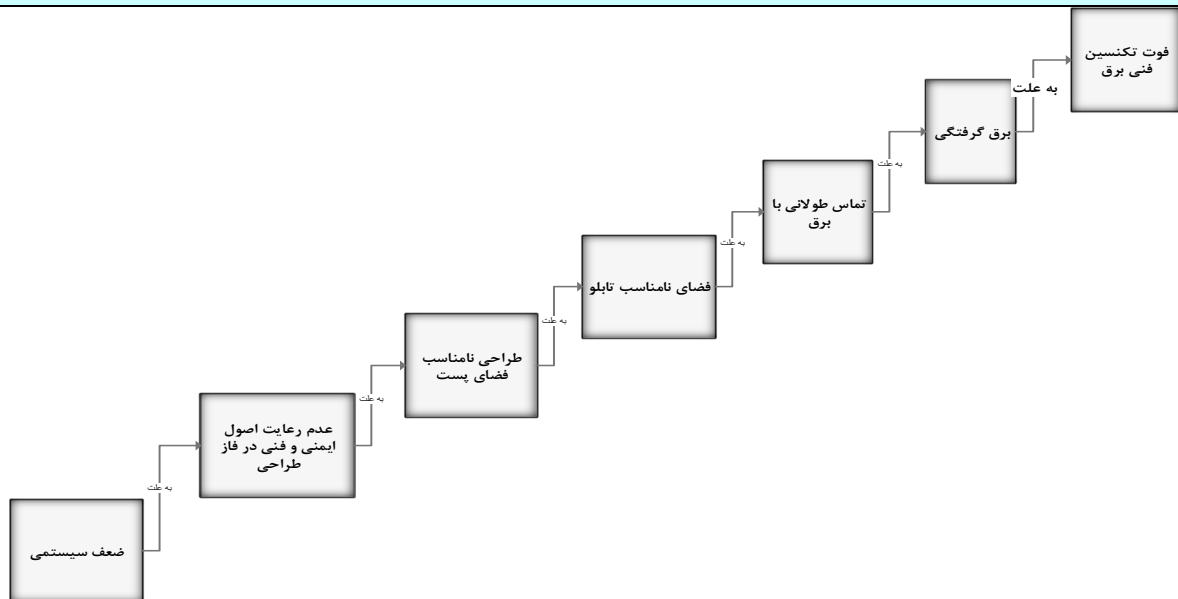


شکل ۸- حلقه چهارم شبکه علت و معلولی

روش ترسیم: شبکه علت و معلولی

حلقه پنجم

عنوان: علت ها

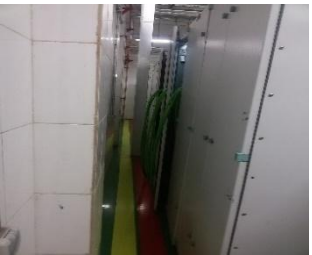


شکل ۹- حلقه پنجم شبکه علت و معلولی

۵-۶-۵ پشتیبانی از تمامی علت ها با شواهد

مرحله بعد شواهدی را برای پشتیبانی از وجود علل بیان شده جمع کردیم. جمع آوری شواهد از سوگیری و عدم پذیرش جلوگیری کرد. شواهد ارائه شده شامل شواهد فیزیکی، انسانی و اسنادی بود که برای هر علت عنوان گردید. شواهد به وسیله افراد و تجهیزات گردآوری شد و در قالب سه جدول ساماندهی گردید. شواهد فیزیکی در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵- شواهد فیزیکی

روش ترسیم: شبکه علت و معلولی	
شواهد فیزیکی	علت
	برق گرفتگی مطابق نظریه پزشک قانونی علت فوت عبور جریان برق از بدن بوده است
	برق دار بودن شینه تابلو تابلو کوپلر همیشه از یک سمت (سرکابل پایین متصل به پست LPS B) برق دار بوده است
	فضای نامناسب تابلو مطابق تصویر فضای بین دیوار و درب تابلو جهت باز شدن درب کم بوده است
	عدم مشخص بودن تابلو برق دار مطابق تصویر تابلو کوپلر تفاوت چندانی با سایر تابلوها ندارد.

عدم نصب محافظ شیشه ای روی شیشه	محافظ بر روی شیشه ها نصب نبوده
طراحی نامناسب فضای پست	فضای پست با توجه به تعداد تابلوها و تجهیزات، برای دو پست مشابه هم، کوچک است.
بازکردن پشت تابلو توسط تکنسین بدون هماهنگی	در هنگام برق گرفتگی فرد در پشت تابلو بوده و درب تابلو را جهت سوراخکاری در کف آن (با استفاده از مته) باز کرده بوده است.
مشابه بودن کلید تابلوها	درب پشت تابلوهای برقی تماما توسط کلیدهای چهارگوش مشابه باز می گردد
تغذیه برق ایستگاه ازدو پست برق مشابه همجوار	در داخل هر ایستگاه ۲ پست برق (LPS) مشابه جهت تامین برق ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت از برق ۲۰ کیلو ولت بمنظور تغذیه تجهیزات داخل ایستگاهها از قبیل آسانسورها، پله برقی ها، فنها، پمپها و روشنایی ایستگاه وجود دارد که بعضا در یک فضا و یا اتاق قرار دارند.(مانند همین پست که در آن حادثه رخ داده است)
عدم نصب برچسب نام روی تابلو	روی تابلو کوپلر نام تابلو به درستی حک نشده بود.
عدم نصب علائم هشداردهنده روی تابلو	روی تابلو کوپلر علائم هشدار دهنده نصب نشده بود.
قرار داشتن تابلو در فضای مشترک با پست مجاور	حادثه در پستی اتفاق افتاده که تجهیزات دو پست LPS A و LPS B در یک اتاق قرار دارند(پست برق LPS ایستگاه نمازی)

شواهد انسانی در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶- شواهد انسانی

روش ترسیم: شبکه علت و معلولی	
علت	شواهد انسانی
تماس طولانی با برق	طبق نظریه پزشک قانونی مدت تماس فرد با برق بیش از ۳۰ ثانیه بوده و محل ورود جریان برق از سمت شانه دست راست و محل خروج جریان برق از سمت پاها علی الخصوص زانوی پای راست بوده. همچنین مطابق اظهارات همکاران فرد در هنگام خارج کردن ایشان از پشت تابلو، ایشان کاملا بی هوش و هیچ گونه تحرکی نداشته اند.
بی احتیاطی تکنسین	با توجه به اظهارات سرپرست گروه و تایید سایر همکاران ایشان، سرپرست گروه به اعضا عنوان می کند که تابلو کوپلر برقرار است و نیاز به انجام کار بر روی این تابلو وجود ندارد و فرد حادثه دیده با علم بر این موضوع به پشت تابلو رفته و اقدام به سوراخ کاری در کف تابلو می کند
سرپرستی ضعیف گروه	مطابق شواهد تا دقایقی بعد از برق گرفتگی فرد، سرپرست گروه متوجه حضور شخص در محدوده پست نمی گردد. همچنین حادثه دیده به تنهایی به پشت تابلو رفته است. و اینکه نوار خطر در محدوده پشت تابلو کشیده نشده بوده است.

شواهد اسنادی در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷- شواهد اسنادی

روش ترسیم: شبکه علت و معلولی	
علت	شواهد اسنادی
کار بر روی تابلو برق‌دار	برق گرفتگی از تابلو کوپلر بوده که همیشه از یک سمت برق‌دار می باشد. درواقع سرکابل های آمده از سمت پست LPS B که به شینه تابلو کوپلر از سمت پایین وصل بوده، برق‌دار بوده است.
کار بر روی تابلو کوپلر	فرد حادثه دیده از پشت تابلو کوپلر بیرون کشیده شده است و تنها درب پشت این تابلو توسط حادثه دیده باز شده است.
دسترسی آسان تکنسین به تابلو	استفاده از کلید چهارگوش همراه خود فرد و عدم نوار کشی پشت تابلو ها
برق‌دار بودن پست مجاور	به دلیل تامین برق مصرف کننده های ایستگاه مانند سیستم روشنایی، پله های برقی، آسانسورها، سیستم های تهویه و ... پست LPS B برق‌دار بوده است.
عدم شناسایی خطرات فرایند	طبق بررسی های صورت گرفته شناسایی خطرات انجام شده اما برای خطرات فعالیت در پست های برق به جزئیات اشاره ای نشده است.
عدم رعایت اصول ایمنی و فنی در فاز طراحی	با توجه به فضای ناکافی جهت جانمایی تجهیزات و تابلوها در یک اتاق و همچنین سایر موارد می توان گفت که اصول فنی و ایمنی در فاز طراحی به درستی صورت نگرفته است.
عدم مشخص کردن محدوده کار در مجوز	مطابق مجوز صادر شده به شماره ۸۷۴۴۶ عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوز ذکر نشده است.

مرحله بعدی با واداشتن ما به بیان علت توقف، مانع از توقف زود هنگام شد. این به ما کمک کرد که بی دلیل در برخی مسیرها وقت صرف نکنیم. هر مسیر علت و معلولی را با یک علامت «؟» به پایان بردیم یا اینکه دلیلی برای توقف کار اعلام کردیم (شکل ۱۰)

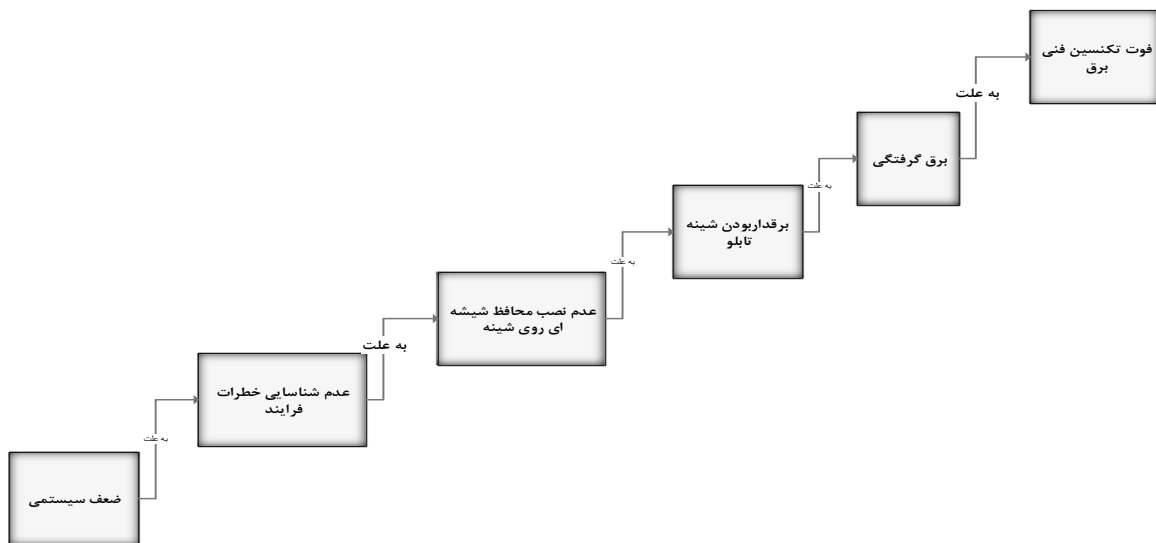
عنوان : انتهای حلقه با علامت سوال "؟"

علل ریشه ای

```

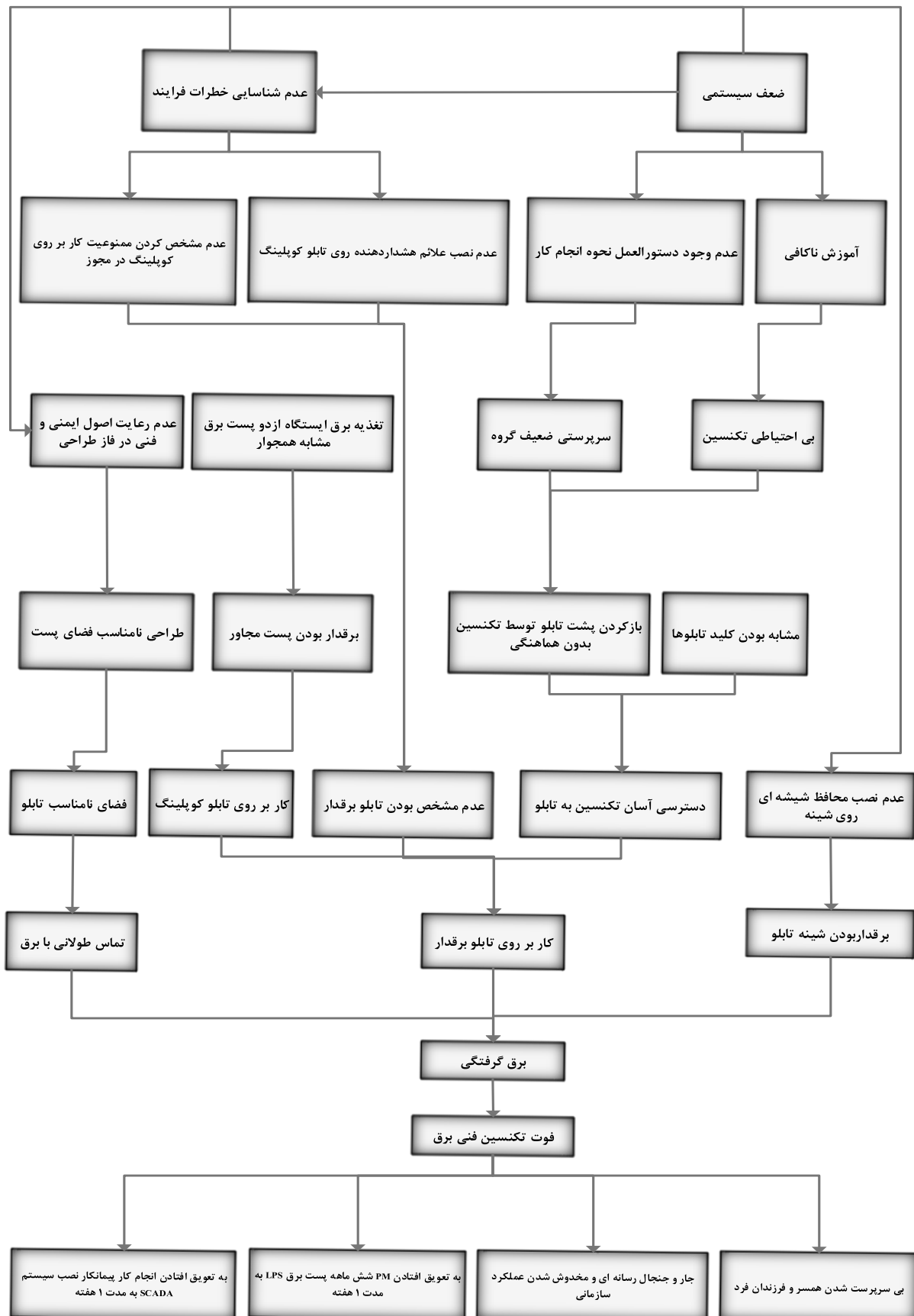
graph LR
    A[ضعف سیستمی] --> B[عدم شناسایی خطرات فرایند]
    B --> C[عدم مشخص کردن ممنوعیت کار بر روی کویلینگ در مجوز]
    B --> D[عدم نصب علائم هشداردهنده روی تابلو]
    C --> E[عدم مشخص بودن تابلو برقدار]
    D --> E
    E --> F[تابلو برق گرفتگی]
    F --> G[فوت تکنسین فنی برق]
  
```

?



?

در انتها دوباره به حلقه معلول اولیه بازگشتیم و مجدداً مراحل بالا را تکرار کردیم تا مسیرهای علت و معلولی جدید را بدست آوردیم و شبکه علت و معلولی را کامل کردیم. در این مرحله ترسیم شبکه علت و معلولی بر اساس اصول علت و معلولی تکمیل گردید و علل ریشه ای وقوع حادثه شناسایی شد. نمای کلی از نمودار علت و معلولی را در شکل (۱۱) مشاهده می کنیم.

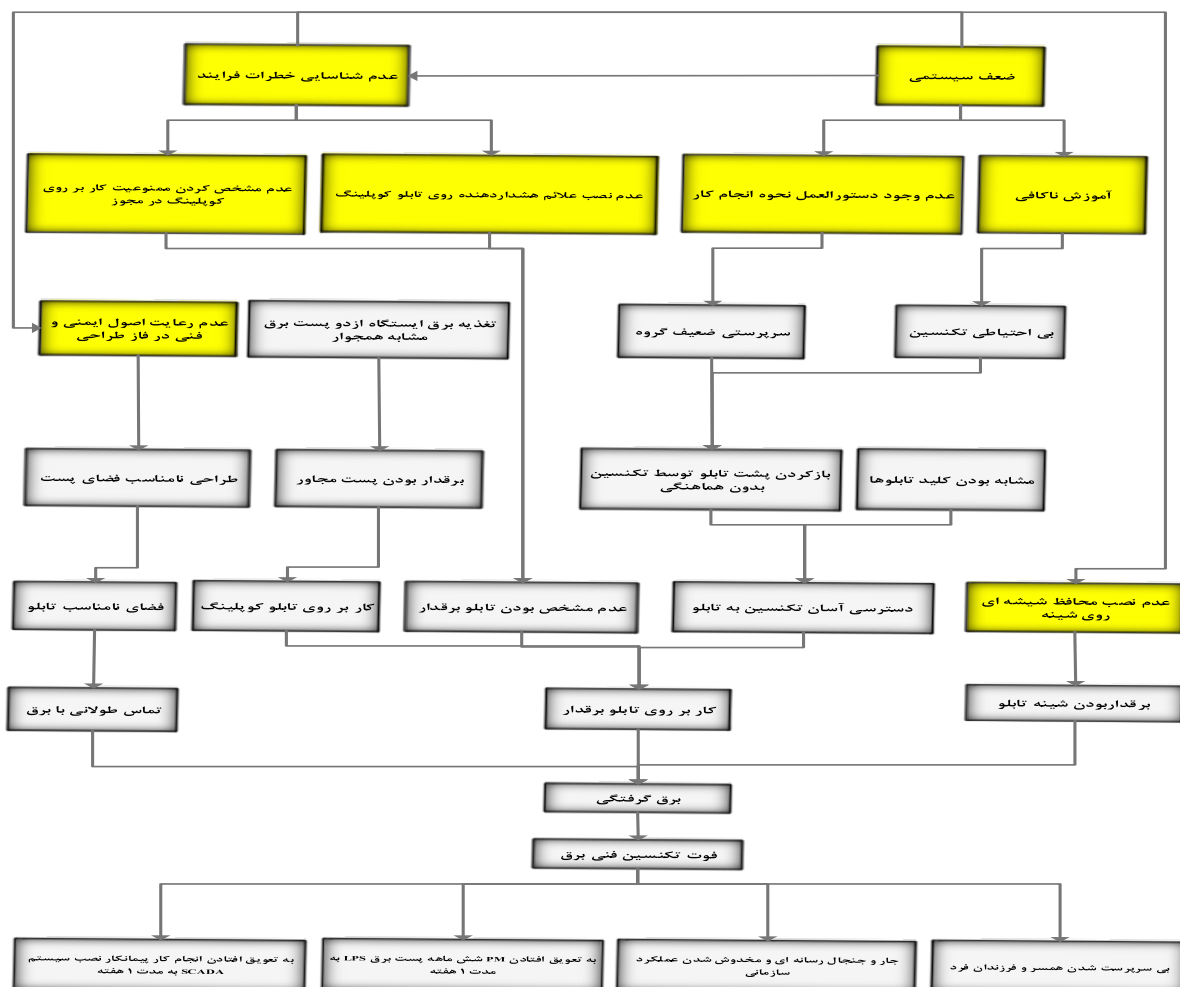


شکل ۱۱- شبکه علت و معلولی

۶- علل ریشه ای شناسایی شده

پس از اتمام و کامل شدن شبکه علت و معلولی (شکل ۱۱)، با نظر اعضاء کمیته RCA، علل ریشه ای وقوع حادثه شناسایی گردید. همانطور که انتظار می رفت علل ریشه ای لزوما در انتهای زنجیره شبکه قرار نداشتند. برای بدست آوردن علل ریشه ای به معلول اولیه توجه ویژه داشتیم و علل را از منظر هدف اصلی تحقیق که همان "پیشگیری از وقوع مجدد حادثه" بود نگرینستیم به همین خاطر در حلقه های شبکه، عللی را که مستقیما ما را در رسیدن به هدف نهایی هدایت می کرد به عنوان علل ریشه ای معرفی کردیم. در ادامه کار به همین روش و با جستجو در شبکه علت و معلولی آندسته از علت هایی که در وقوع معلول اولیه نقش ریشه ای و اصلی را داشتند مطابق شکل (۱۲)، شناسایی و به عنوان خروجی شبکه علت و معلولی در نظر گرفتیم. لذا نتایج به شرح زیر مشخص گردید.

- ۱- عدم رعایت اصول ایمنی و فنی در فاز طراحی
- ۲- عدم شناسایی خطرات فرایند
- ۳- عدم ذکر ممنوعیت فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوز
- ۴- عدم نصب علائم هشدار دهنده روی تابلو کوپلر
- ۵- عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق
- ۶- آموزش ناکافی
- ۷- عدم نصب محافظ شیشه ای روی شیشه ها
- ۸- ضعف سیستمی



شکل ۱۲- علل ریشه ای شناسایی شده (زرد رنگ)

۷- شناسایی راه حل های کلیدی و کارآمد برای علت های مطرح شده

پس از شناسایی علل ریشه ای حادثه (نمایش داده در شکل ۱۲)، نوبت به تعیین راه حل ها برای علل مذکور رسید. در اینجا به دنبال راه حل هایی بودیم که حامل یک ویژگی منحصر به فرد بودند و آن اینکه «از تکرار یا بروز دوباره پیشامد جلوگیری کنند». این راه حل ها باید معیارهایی را محقق می کردند: اول اینکه از بروز مجدد حادثه و حوادث مشابه جلوگیری می کردند، دوم در حیطه ی کنترل اعضا قرارداد شده باشند، سوم اجرای آنها آسان و کاربردی باشد و نهایتاً اجرای آنها باعث اختلال در روند نگهداری و تعمیرات نشود. با این توضیحات شروع به شناسایی راه حل ها کردیم. برای شناسایی راه حل ها مانند شبکه علت و معلولی، اصولی داشتیم که عبارت بودند از: محل شروع راه حل گرفتن در شبکه، قضاوت نکردن راه حل ها، خلاقیت در مسیر راه حل ها و ارزیابی راه حل ها. برای ارزیابی راه حل ها بدین شکل عمل کردیم:

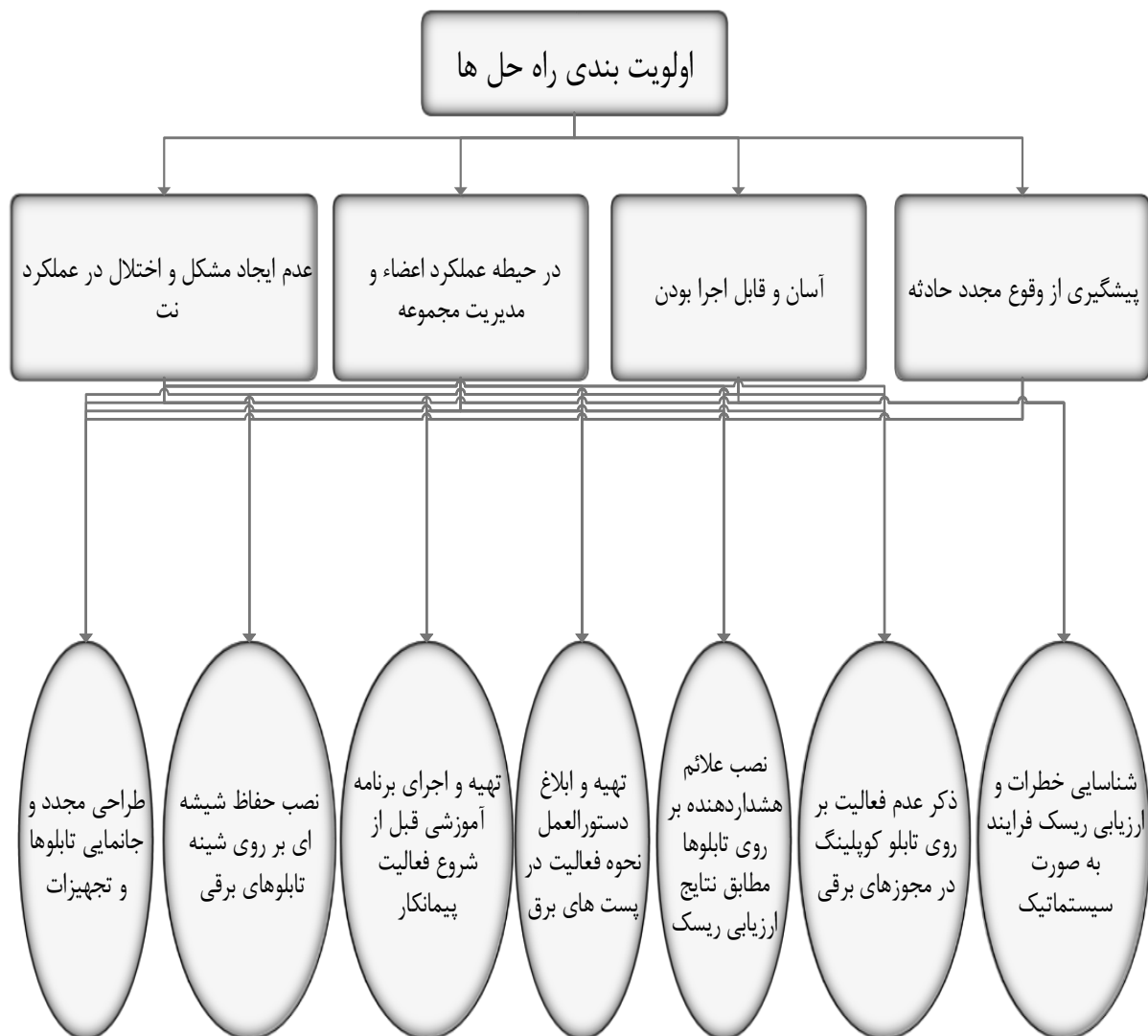
- (الف) از سمت چپ شبکه علت و معلولی شروع کرده و علت ها را با پرسش های زیر به چالش کشیدیم.
- چرا این علت اینجاست؟ - چه عملی برای حذف، کنترل یا تغییر این علت می توان انجام داد تا معلول اولیه اتفاق نیفتد؟ - این علت به چه معناست؟ - آیا علت های دیگری قابل اضافه شدن به این مجموعه اولیه هستند؟
- (ب) راه حل های ممکن برای علت را پیشنهاد دادیم و آنها را یادداشت کردیم.
- (ج) برای به چالش کشیدن علت ها هیچ قانون خاصی نداشتیم.
- (د) کار را از بالا به پایین شروع کرده و سپس از چپ به راست حرکت کردیم.
- (ه) با اتمام کار درباره علتی که در بالای سمت چپ قرار داشت، به سراغ علت بعدی در زیر آن می رفتیم.
- (و) هنگامی که به انتهای ستون می رسیدیم، به بالا برگشته و یک ستون به سمت راست حرکت می کردیم.
- (ی) در طول مسیر، راه حل خود را برای هر علت ارائه کردیم.
- پس از انجام کار با رعایت اصول ذکر شده نتیجه کار به شرح جدول (۸) تعیین شد.

جدول ۸- علل ریشه ای و راه حل های ارائه شده

علت	راه حل
عدم رعایت اصول ایمنی و فنی در فاز طراحی	طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات
عدم شناسایی خطرات فرایند	شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک
عدم ذکر ممنوعیت فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوز	ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی
عدم نصب علائم هشدار دهنده روی تابلو کوپلر	نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها
عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق	تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق
آموزش ناکافی	تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار
عدم نصب محافظ شیشه ای روی شیشه ها	نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی
ضعف سیستمی	بازبینی روند انجام فرایندها

۸- اولویت بندی راه حل های ارائه شده

با توجه به معیارهای ذکر شده در قسمت ارائه راه حل های کارآمد و همچنین سایر زیرشاخه های آنها می بایست در این بخش راه حل ها را طوری اولویت بندی می کردیم که بیشترین اثر مطلوب در رسیدن به هدف نهایی که همان جلوگیری از تکرار یا بروز دوباره پیشامد مورد نظر می باشد، را داشته باشد. لذا برای دستیابی به این هدف از یکی از تکنیک های تصمیم گیری چند شاخصه به نام رویکرد OPA استفاده کردیم. هدف (اولویت بندی راه حل ها)، شاخص ها (مشمول بر ۴ مشخصه راه حل) و گزینه ها (شامل ۷ راه حل کارآمد) به عنوان درخت واره تصمیم گیری گروهی تعیین شد. قابل ذکر است راه حل علت ریشه ای ضعف سیستمی در قالب راه حل علت عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق آورده شده است و آن راه حل، تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق می باشد لذا راه حل ها در مرحله اولویت بندی، از ۸ راه حل به ۷ راه حل کاهش پیدا کرده اند که در شکل (۱۳) قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۳- تصمیم گیری گروهی براساس رویکرد OPA

گام های اساسی رویکرد OPA برای رتبه بندی راه حل ها به شرح زیر اجرا شده است.

۸-۱ گام اول تعیین خبرگان (کارشناسان) و رتبه بندی آنها:

با توجه به اعضا تیم RCA تعداد خبرگان ۶ نفر می باشند. اولویت بندی خبرگان بر اساس تخصص، سابقه کار و سوابق علمی بوده که توسط سرپرست تیم تحقیق (تسهیلگر) با همفکری رؤسای بخش های مختلف حوزه کاری کارشناسان تیم تحلیل تعیین شده است. در نتیجه رتبه بندی خبرگان به شرح جدول (۹) انجام شد.

جدول ۹- تعیین خبرگان و رتبه بندی آنها

رتبه	نام گذاری خبره	خبره
4	E4	کارشناس مرکز کنترل و فرمان
2	E2	کارشناس ایمنی
1	E1	کارشناس برق
3	E3	تکنسین نت برق
6	E6	کارشناس حقوقی
5	E5	کارشناس ایستگاه ها

۸-۲ گام دوم تعیین شاخص ها:

با توجه به موضوع مورد بررسی و هدف اصلی تحقیق، ۴ شاخص برای ارزیابی و اولویت بندی راه حل ها در نظر گرفته شد (جدول ۱۰) که عبارتند از:

- ۱- پیشگیری از وقوع مجدد حادثه مشابه در آینده
- ۲- آسان و قابل اجرا بودن
- ۳- در حیطه عملکرد اعضاء و مدیریت مجموعه
- ۴- باعث ایجاد مشکل و یا اختلال در عملکرد نت نشود

جدول ۱۰- شاخص ها

نام گذاری شاخص	شاخص
C1	پیشگیری از وقوع مجدد حادثه مشابه در آینده
C2	آسان و قابل اجرا بودن
C3	در حیطه عملکرد اعضاء و مدیریت مجموعه
C4	عدم ایجاد مشکل و اختلال در عملکرد نت

۸-۳ گام سوم رتبه بندی شاخص ها توسط هر یک از خبرگان:

کارشناسان شاخص های تصمیم گیری را اولویت بندی نمودند. که نتایج به شرح جدول (۱۱) تعیین شد.

جدول ۱۱- رتبه بندی شاخص ها توسط هر یک از خبرگان

خبره	اولویت اول	اولویت دوم	اولویت سوم	اولویت چهارم
E1	C1	C4	C2	C3
E2	C1	C2	C4	C3
E3	C1	C4	C2	C3
E4	C1	C3	C2	C4
E5	C1	C2	C3	C4
E6	C1	C3	C2	C4

۸-۴ گام چهارم رتبه بندی راه حل ها براساس هر یک از شاخص ها توسط هر یک از خبرگان:

در این مرحله ابتدا راه حل ها مطابق جدول (۱۲) نام گذاری گردید و سپس رتبه بندی راه حل ها بر اساس هر یک از شاخص ها توسط هر یک از خبرگان به شرح جدول (۱۳) تعیین شد.

جدول ۱۲- نام گذاری راه حل ها

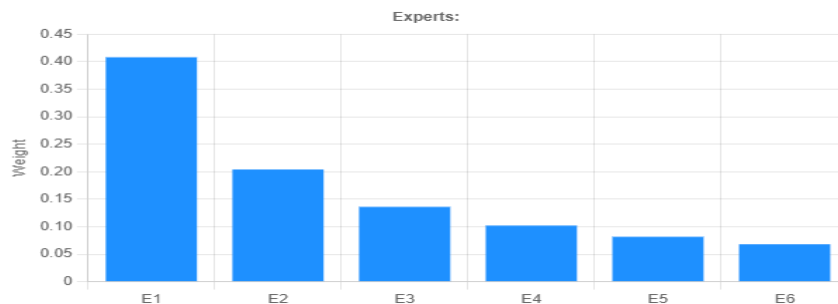
راه حل	نام گذاری راه حل
A	تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق
B	طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات
C	شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک
D	ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی
E	نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها
F	تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار
G	نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی

جدول ۱۳- رتبه بندی راه حل ها براساس هریک از شاخص ها توسط هر یک از خبرگان

خبره	شاخص	اولویت اول	اولویت دوم	اولویت سوم	اولویت چهارم	اولویت پنجم	اولویت ششم	اولویت هفتم
E1	C1	G	A	D	E	F	C	B
	C2	G	E	A	D	C	F	B
	C3	G	A	D	E	F	C	B
	C4	C	D	A	E	F	B	G
E2	C1	G	C	B	A	D	F	E
	C2	G	D	E	A	C	F	B
	C3	G	D	E	A	F	C	B
	C4	E	D	C	F	A	G	B
E3	C1	G	A	E	D	F	C	B
	C2	G	E	A	D	C	F	B
	C3	G	A	D	E	F	C	B
	C4	C	D	A	E	F	B	G
E4	C1	G	A	E	D	F	C	B
	C2	E	G	D	A	F	C	B
	C3	G	E	D	A	C	F	B
	C4	D	G	E	C	F	A	B
E5	C1	G	D	E	A	C	F	B
	C2	G	E	D	A	F	C	B
	C3	G	E	D	F	A	C	B
	C4	E	D	A	G	C	F	B
E6	C1	G	A	D	E	F	C	B
	C2	E	D	G	A	C	F	B
	C3	E	G	D	F	A	C	B
	C4	G	E	C	D	F	B	A

در قسمت اول روش انجام کار، که تشکیل تیم RCA می باشد، به این نتیجه رسیدیم که جهت بررسی حادثه منجر به فوت می بایست یک تیم با ترکیب علمی و تجربی همراه با موضوع و در واقع ذی نفعان و خبرگان (کارشناسان) مسئله مورد نظر تشکیل گردد و به همین دلیل تیم متشکل از افراد آورده شده در جدول (۱) انتخاب گردیدند. رتبه بندی خبرگان بر اساس تخصص، سابقه کار و سوابق علمی بوده که با انتقال اطلاعات به فرایند رویکرد OPA (گام اول - بخش ۸-۱) و محاسبات صورت گرفته از طریق نرم افزار تحت وب این رویکرد، نتایج به شرح شکل (۱۴) بدست آمده است.

W (E1) : 0.408163
W (E2) : 0.204082
W (E3) : 0.136054
W (E4) : 0.102041
W (E5) : 0.081633
W (E6) : 0.068027



شکل ۱۴- نمودار نتایج رتبه بندی خبرگان بر اساس رویکرد OPA

محاسبات نشان می دهد که بیشترین وزن مربوط به کارشناس برق (E1) و سپس به ترتیب کارشناس ایمنی (E2)، تکنسین برق (E3)، کارشناس مرکز کنترل و فرمان (E4)، کارشناس ایستگاه (E5) و در آخر کارشناس حقوقی (E6) می باشد. لذا با توجه به محاسبات، نظر کارشناس برق بر نظر سایر کارشناسان ارجحیت دارد. ذکر این نکته لازم است که قبل از همفکری و ایجاد طوفان فکری توسط تیم تحلیل، گمان می رفت کارشناس ایمنی و یا تکنسین فنی همکار حادثه دیده بیشترین ارجحیت را در اظهار نظر داشته باشند در صورتی که با انجام محاسبات و وزن دهی صورت گرفته در رویکرد OPA، این فرضیه تغییر پیدا کرد. همچنین تسهیلگری گروه با استفاده از فرد آموزش دیده صورت گرفته که نسبت به اصول RCA آشنایی لازم را داشته است.

در مرحله آماده سازی مسئله نکته مهمی که وجود دارد، رسالت سازمان هدف در ایجاد محیط ایمن جهت پرسنل و مشتریان می باشد که این موضوع اولویت طرح مسئله برای بررسی را مشخص میکند. از طرفی با توجه به آمارهای جهانی در خصوص موضوع حوادث برق گرفتگی منجر به فوت که با استفاده از نمودار پارتو (شکل ۳-۲) نمایش داده شد، توانستیم به یک نقطه مشترک جهت تعریف مسئله برسیم چون ایجاد تشکیلات لازم جهت پیاده سازی و اجرای رویکرد RCA مستلزم تعیین و تعریف یک مسئله با درجه اهمیت بالا می باشد تا جوابگوی هزینه و زمان صرف شده برای روش فوق باشد.

پس از ایجاد تیم تحلیل و آماده سازی برای تعریف مسئله، تعریف دقیق مسئله آغاز شده و چپستی مسئله که همان فوت تکنسین فنی برق می باشد، مشخص شده است. همچنین در این اینجا متوجه گردیدیم که مسئله مورد نظر چه اهمیتی دارد و این اهمیت از ابعاد مختلف قابل دیدن است. خوب، اولین اهمیت از دست رفتن جان یک انسان می باشد که خود درجه اهمیت بالایی را بدون توضیح خواهد داشت. یکی دیگر از دلایل، تبعات فوت انسان مورد اشاره و عواقب بعد از آن، برای خانواده و حتی جامعه می باشد که این نیز خود جای بحث مفصل دارد و خارج از توضیح در این تحقیق می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از روش آنالیز حالات و اثرات بالقوه خرابی، رتبه ریسک ناشی از فعالیت وقوع حادثه که درواقع فعالیت نصب و راه اندازی سیستم های برقی می باشد، بدست آمده است که نتایج این بخش در جدول (۳) نشان داده شد. عدد اولویت ریسک فعالیت مطابق فرمول زیر و با استفاده از سه فاکتور شدت اثر، عدد وقوع و میزان تشخیص بدست آمد که نشان از بالا بودن عدد ریسک فعالیت وقوع حادثه می دهد.

$$RPN=S*O*D \longrightarrow RPN=9*7*6 = 378$$

این عدد با توجه به دسته بندی ریسک در زمره ریسک های بالا به شمار می رود و می بایست اقدامات کنترلی فوری جهت مهار آن به کار رود که این ارزیابی ریسک خود نشان داد موضوع مورد بررسی از نظر پتانسیل ایجاد حادثه در سطح بالایی قرار دارد. در انتهای مرحله تعریف مسئله، با رعایت اصول روش RCA یک شمای کلی از تعریف مسئله ایجاد شده که در قالب یک فرم (جدول ۴) نشان داده شده است.

پس از تعریف مسئله به سراغ ایجاد شبکه علت و معلولی رفته ایم. همانطور که مشخص گردید، ۵ حلقه در شبکه علت و معلولی شکل گرفته است. در حلقه اول (شکل ۵) به دو علت کنشی و شرایطی برخورد کرده ایم. یکی عدم مشخص کردن ممنوعیت کار بر روی تابلو کوپلر در مجوز که جزء علل کنشی بوده و با استفاده از شواهد اسنادی (جدول ۷) درستی آن اثبات شده است و علت دوم عدم نصب علائم هشداردهنده روی تابلو بوده که این علت جزء علل شرایطی محسوب می گردد و با استفاده از شواهد فیزیکی (جدول ۵) درستی آن اثبات شده است. در مورد علت کنشی (عدم مشخص کردن ممنوعیت کار بر روی تابلو کوپلر در مجوز) می توان نتیجه گرفت که به علت ضعف سیستمی، شناسایی خطرات فرایند نصب و راه اندازی تجهیزات برقی به درستی صورت نگرفته و چنانچه این مهم به خوبی انجام می گردید، اعمال این دست علت های کنشی در مجوز صورت می پذیرفت. در خصوص علت شرایطی (عدم نصب علائم هشداردهنده روی تابلو کوپلر) نیز چنانچه شناسایی خطرات فرایند به درستی انجام گرفته بود، قاعدتا رنگ تابلو تغییر پیدا می کرد و یا علائم هشداردهنده بر روی تابلو کوپلر نصب می گردید و یک وجه تمایز با سایر تابلوها ایجاد می شد. البته با بررسی شواهد اسنادی مشخص گردید که شناسایی خطرات ایمنی در سازمان انجام گرفته بوده اما موارد بالا در آن گنجانده نشده بود و این نشان از ضعف سیستمی دارد. بعد از ادامه دادن فرایند علت و معلولی در این حلقه به دو علت عدم شناسایی خطرات فرایند و نهایتاً ضعف سیستمی می رسیدیم. لذا در حلقه اول ما با ۴ علت ریشه ای مواجهه هستیم به این دلیل که هر کدام از علل مذکور به طور موثر در بروز حادثه دخیل بوده اند. در حلقه دوم همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می شود شبکه علت و معلولی ماند حلقه اول به صورت غیرخطی می باشد و از یک نقطه به بعد (دسترسی آسان تکنسین به تابلو) دو علت کنشی و شرایطی نمایان شده است. یکی از علل به نام باز کردن درب پشت تابلو توسط تکنسین فنی بدون هماهنگی بوده که جزء علل شرایطی محسوب می گردد و پس از بررسی شواهد فیزیکی (جدول ۵) به این نتیجه رسیدیم که این موضوع رخ داده است و تکنسین از طریق کلید عمومی که بر روی همه تابلوها کاربرد داشته، درب پشت تابلو کوپلر را باز می کند. با ادامه دادن فرایند در این مسیر به دو علت دیگر به نام های بی احتیاطی تکنسین و سرپرستی ضعیف گروه (چون که تکنسین بدون هماهنگی درب پشت تابلو را باز کرده است) رسیدیم. در خصوص علت بی احتیاطی تکنسین، یک بحث در اینجا پیش خواهد آمد و آن نحوه تماس بدن فرد با قسمت برقدار تابلو کوپلر (شینه برقدار) بوده است. با توجه به شواهد فیزیکی و اسنادی (جدول ۵ و ۷)، فرد حادثه دیده بعد از باز کردن درب پشت تابلو کوپلر، اقدام به سوراخ کاری کف فلزی تابلو با استفاده از مته برقی می کند و جهت ایجاد تعادل و فشار مناسب جهت تسریع در عملیات سوراخ کاری، زانوی راست خود را بر روی زمین گذاشته و به صورت نیم تنه به داخل تابلو خم می شود و در حالی که مته برقی در دست راست فرد بوده، اقدام به اعمال نیروی وزن بدن به مته می کند که بعد از ثانیه هایی، مته کف تابلو را سوراخ و به سمت پایین حرکت می کند در این حالت چون قسمت زیادی از وزن بدن بر روی مته قرار دارد، با پایین رفتن مته بدن نیز از سمت شانه راست به درون تابلو حرکت می کند که در همین لحظه تماس شانه راست با شینه برقدار که متصل به سرکابل های آمده از پست برقدار LPS B هستند برقرار شده و باعث برق گرفتگی می شود. این مورد نشان از عدم آموزش کافی تکنسین فنی در مورد فعالیت مورد اشاره دارد. با ادامه مسیر در این حلقه در نهایت هر کدام از این علت ها خود معلول دو علت ریشه ای به نام های آموزش ناکافی و عدم وجود دستورالعمل نحوه انجام کار در پست های برق، بوده اند و این دو علت خود معلول علت آخر به نام ضعف سیستمی هستند. اما با توجه به اینکه دو علت آموزش ناکافی و عدم وجود دستورالعمل نحوه انجام کار خود به طور موثر در بروز حادثه دخیل بوده اند به همراه علت آخر یعنی ضعف سیستمی، ۳ علت ریشه ای در این حلقه را نمایان می کنند. در حلقه سوم (شکل ۷) پس از پیشروی بر اساس اصول علت و معلولی، تیم تحلیل به علت ریشه ای دست پیدا نکرد. در واقع علت انتهایی در این حلقه به نام تغذیه برق ایستگاه از دو پست برق مشابه مجاور، یک علت موثر در بروز حادثه محسوب نمی گردد لذا به عنوان علت ریشه ای شناخته نمی شود. در حلقه چهارم (شکل ۸) یک علت موثر در وقوع برق گرفتگی فرد نمایان شده که مربوط می شود به برقدار بودن شینه ها و نهایتاً طبق شواهد فیزیکی بررسی شده نشان از عدم نصب محافظ شیشه ای بر روی شینه ها داده است که این علت به طور مستقیم باعث مرگ فرد شده چرا که تماس مستقیم با جسم رسانای برق ایجاد شده است. نکته حائز اهمیت اینکه این علت در میانه زنجیره حلقه چهارم قرار دارد و در واقع در انتهای حلقه قرار نگرفته است و این نشان از آن دارد که علل ریشه ای الزاماً در انتهای شبکه و یا حلقه قرار نمی گیرند و می توانند در اوایل شبکه و یا حلقه و یا میانه آنها قرار گیرند. در انتهای این حلقه مجدداً دو علت ریشه ای عدم شناسایی خطرات فرایند و نهایتاً ضعف سیستمی که در حلقه اول نمایان شده بود، قرار می گیرد و بدین ترتیب در حلقه چهارم ما ۳ علت ریشه ای را شناسایی میکنیم. در حلقه پنجم همانگونه که در شکل (۹) قابل مشاهده است، یکی از علت ها تماس طولانی مدت فرد با جریان برق بوده که مطابق شواهد انسانی (جدول ۶) مدت تماس فرد با جریان برق بیش از ۳۰ ثانیه بوده است. در اینجا باید عنوان

کرد که این علت در واقع نشانگر نمای کلی از اثرات برق بر روی بدن انسان است که اثرات برق گرفتگی و آسیب های ناشی از آن را بر روی بافت های بدن به مدت تماس، شدت جریان، نوع جریان، مسیر عبور جریان، فرکانس، مقاومت بدن و ولتاژ نسبت می دهند. به طور مثال عبور جریانی در حدود ۱۰۰ میلی آمپر در مدت زمان تماس ۳ ثانیه باعث از کار افتادگی قلب و قطع تنفس می شود. در این حادثه ولتاژ برق از نوع ضعیف سه فاز ۳۸۰ ولت (V) بوده است، چنانچه مقاومت بدن فرد (R) را ۵۰۰ اهم در نظر بگیریم، میزان جریان عبوری (I) از بدن فرد مطابق فرمول زیر بدست خواهد آمد.

$$I=V/R \quad \longrightarrow \quad I=380/500 \quad \longrightarrow \quad I=.76 \text{ A}$$

همانطور که مشخص است یک جریان برق در حدود ۷۶۰ میلی آمپر برای مدت ۳۰ ثانیه از بدن فرد عبور نموده است که با توجه به مثال بالا (۱۰۰ میلی آمپر) این مقدار تمامی بافت های بدن را از درون می سوزاند. و یا به طور مثال خطرناک ترین مسیر عبور جریان برق از دست راست به پاها می باشد، همان حالتی که در این حادثه برای فرد رخ داده است (آورده شده در جدول شواهد انسانی ۶). همچنین در ادامه همین مسیر علت و معلولی به این نتیجه رسیدیم که عدم استفاده از وسیله حفاظت فردی مانند دستکش عایق برق علت دقیقی نبوده چون همانطور که در جدول شواهد انسانی (۶) عنوان شد محل ورود برق از قسمت شانه بوده و استفاده از دستکش عایق برق نمی توانسته جلوی عبور جریان برق را بگیرد. در ادامه مسیر به یک علت دیگر به نام فضای نامناسب پشت تابلو کوپلر برخوردیدم. این علت در ایجاد علت قبل یعنی تماس طولانی مدت با برق موثر بوده است چون که همانگونه که در جدول شواهد فیزیکی (۵) آورده شده است فضای درب پشت تابلو کوپلر (شکل ۴) با دیوار پست در حدود ۵۰ سانتی متر عرض داشته و یک نفر به راحتی نمی توانسته در این فضا تردد کند به همین خاطر زمانی که فرد درب پشت تابلو را باز می کند درب به صورت نیمه باز قرار می گیرد و فرد خود را به سختی به درون تابلو جا می دهد و در هنگام برق گرفتگی درب تابلو که به دیوار پست برخورد کرده است، اجازه رها شدن فرد از شینه برقرار را نمی دهد و همین باعث طولانی شدن مدت تماس فرد با برق می گردد و این موضوع خود معلول علتی به نام طراحی نامناسب فضای پست می باشد. با این تفاسیر پس از ادامه دادن مسیر حلقه پنجم، انتهای حلقه مجددا علت ریشه ای ضعف سیستمی نمایان شده است و این نشان از آن دارد که معمولا انتهای حلقه های شبکه به یک یا دو علت ریشه ای مشابه منتهی می شوند و در واقع حلقه ها به هم پیوسته می شوند و ریشه ها یکی می گردد و به همین دلیل است که نام فرایند به نام شبکه علت و معلولی و حلقه های آن شناخته می شود. علل انتهای حلقه ها، در واقع محلی است که دیگر نمی توان علت مشخصی را برایشان تصور کرد و به طور کلی عللی هستند که کلیت یک بحث را ایجاد می کنند و به سایر موضوعات نیز مرتبط می شوند و اینجاست که دیگر نمی توان علت خاصی را برای به وجود آمدنشان اختصاص داد. با این تفاسیر، نتایج فرایند تحلیل از طریق ایجاد شبکه علت و معلولی، نشان از وجود ۸ علت ریشه ای می دهد که به شرح زیر می باشند:

- ۱- عدم رعایت اصول ایمنی و فنی در فاز طراحی
- ۲- عدم شناسایی خطرات فرایند
- ۳- عدم ذکر ممنوعیت فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوز
- ۴- عدم نصب علائم هشدار دهنده روی تابلو کوپلر
- ۵- عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق
- ۶- آموزش ناکافی
- ۷- عدم نصب محافظ شیشه ای روی شینه ها
- ۸- ضعف سیستمی

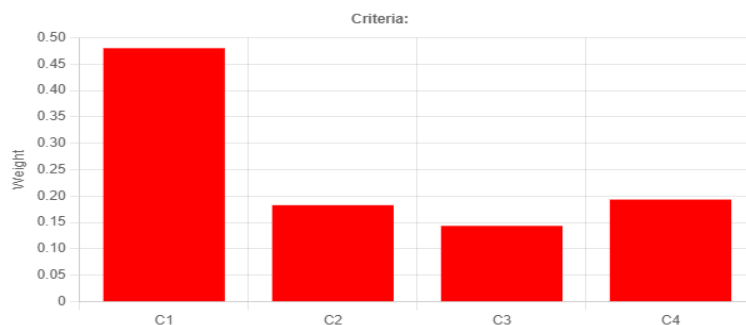
همانطور که نتایج نشان داد علل زیادی در بروز حادثه دخیل بوده اند و موارد بالا جزء علل ریشه ای بروز حادثه تلقی می گردند که می بایست اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه به منظور جلوگیری از تکرار مجدد حادثه بر روی هریک از این علل طراحی و اجرا گردد. در اینجا باید توجه کرد که در این حادثه یک نفر نیروی متخصص برق، جان خود را از دست داده است، لذا می توان عنوان کرد که تماس مستقیم ایشان با شینه های برقدار عامل اصلی مرگ بوده و لذا عدم نصب محافظ شیشه ای روی شینه ها از علل ریشه ای مهم در این حادثه محسوب می گردد. سایر علل نیز مانند، عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق و دیگر علل در زمره علل ریشه ای وقوع حادثه به حساب می آیند که به عنوان علل واسط و تشدید کننده در خط زمانی وقوع رویداد قرار دارند. به طور کلی در مرحله ایجاد شبکه علت و معلولی به این نتیجه میرسیم که ترسیم شبکه علت و معلولی بر اساس اصول مربوط به همین بخش که در فصل سوم بدان

اشاره کردیم، تصویر دقیقی از مسئله نسبت به آنچه قبلاً تصور می شد، به ما داده است. در این بخش نه تنها یک علت ریشه ای بلکه شبکه ای از علل ریشه ای در حلقه های مختلف شبکه نمایان شده اند. تمامی علت ها با استفاده از شواهد اثبات گردیده اند (شامل شواهد فیزیکی، انسانی و اسنادی که به ترتیب در جدول های ۵، ۶ و ۷ آورده شده اند) و این نشان از آن دارد که قضاوت کردن در خصوص علل به صورت مستند و واقع گرایانه بوده است.

در مرحله تعیین راه حل ها، همانگونه که در بخش ۷ بیان شده، راه حل های کارآمد براساس اصول مشخص توسط تیم تحلیل مشخص شده است. نکته قابل توجه در این بخش این است که تیم تحلیل پس از شناسایی ۸ علت ریشه ای در شبکه علت و معلولی، در مرحله تعیین راه حل ها نیز می بایست به همین تعداد راه حل پیشنهاد می داد اما با توجه به همراستایی راه حل برای دو علت ضعف سیستمی و عدم وجود دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق، که در عمل می توانند در قالب یک دستورالعمل واحد به عنوان راه حل، پیشنهاد کردند، تصمیم بر آن شد که برای این دو علت یک راه حل به نام تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق ارائه گردد، لذا تعداد راه حل ها از ۸ مورد به ۷ مورد کاهش پیدا می کند. با این توضیح مهمترین راه حل ها عبارتند از:

- ۱- تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق
- ۲- شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک
- ۳- ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی
- ۴- نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها مطابق نتایج ارزیابی ریسک
- ۵- تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار
- ۶- نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی
- ۷- طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات

در مرحله اولویت بندی راه حل ها همانگونه که در قسمت بالا عنوان شد، گام اول مربوط به رتبه بندی خبرگان (کارشناسان تیم تحلیل) بود که نتیجه گیری آن نیز بیان گردید. در ادامه کار در گام دوم (بخش ۸-۲) رویکرد OPA، به منظور تعیین و اولویت بندی راه حل ها، ابتدا شاخص های وزن دهی توسط خبرگان (کارشناسان تیم تحلیل) تعیین گردید. با توجه به مسئله مورد بررسی که حادثه منجر به فوت یک نفر بوده، کارشناسان به این نتیجه رسیده اند که در نظر گرفتن شاخص هزینه انجام راه حل، نباید در تصمیم گیری به عنوان شاخص مهم و مستقل در نظر گرفته شود چون همانگونه که اشاره شد حفظ جان یک انسان با هر هزینه ای معقولی، می تواند توجیه پذیر باشد. لذا کارشناسان، شاخص هزینه اجرای راه حل را در قالب سایر شاخص ها در نظر گرفته اند. لذا شاخص ها با توجه به هدف اصلی تحقیق، اصول رویکرد RCA، برقراری شرایط مطلوب و کاربردی بودن، تعیین شده اند. بدین ترتیب شاخص های در نظر گرفته شده عبارتند از: پیشگیری از بروز مجدد حادثه مشابه در آینده، در حیطه ی کنترل اعضا قرارداداشتن، اجرای آسان و کاربردی و عدم ایجاد اختلال در روند نگهداری و تعمیرات که در جدول (۱۰) آورده شده اند. در اینجا به منظور تعیین بهترین راه حل می بایست شاخص ها از دیدگاه هر یک از خبرگان (کارشناسان) رتبه بندی گردد تا بهترین نتیجه در رویکرد OPA ایجاد گردد. به همین منظور در گام سوم (بخش ۸-۳) رویکرد OPA، هر یک از شاخص ها توسط هریک از کارشناسان اولویت بندی شد و اطلاعات بدست آمده (جدول ۱۱) وارد نرم افزار تحت وب قرار گرفت و اوزان هر یک مشخص شد که نتایج به شرح شکل (۱۵) می باشد.



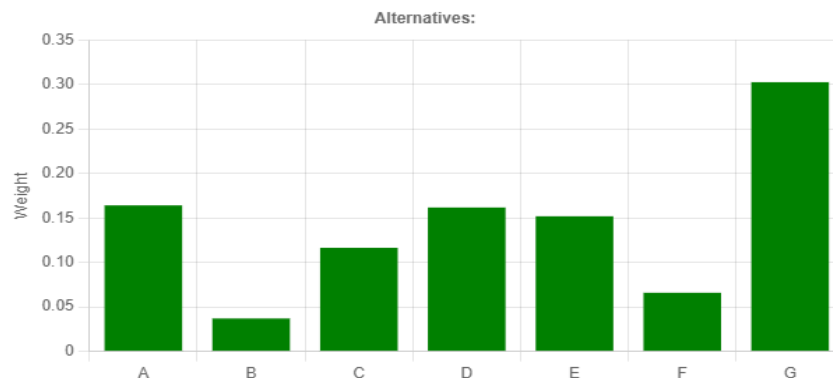
W (C1) : 0.480000
W (C2) : 0.182857
W (C3) : 0.143673
W (C4) : 0.193469

شکل ۱۵- نمودار نتایج رتبه بندی شاخص ها توسط هر یک از خبرگان

محاسبات نشان می دهد که در گروه شاخص ها، بیشترین وزن مربوط به شاخص پیشگیری از وقوع حادثه مشابه در آینده (C1) و سپس به ترتیب شاخص عدم ایجاد اختلال در روند نگهداری و تعمیرات (C4)، شاخص آسان و قابل اجرا بودن (C2) و شاخص درحیطه ی عملکرد اعضاء و مدیریت مجموعه (C3)، می باشد. لذا با توجه به محاسبات، شاخص پیشگیری از وقوع حادثه مشابه در آینده (C1) بر سایر شاخص ها ارجحیت دارد.

در گام چهارم (بخش ۸-۴) رویکرد OPA، رتبه بندی راه حل ها بر اساس هر یک از شاخص ها توسط هر یک از خبرگان به شرح جدول (۱۳) تعیین و اطلاعات وارد نرم افزار تحت وب قرار گرفت و اوزان هر یک مشخص شد که نتایج به شرح شکل (۱۶) می باشد.

W (A) :0.164205
W (B) :0.037007
W (C) :0.116433
W (D) :0.161791
W (E) :0.151924
W (F) :0.065909
W (G) :0.302731



شکل ۱۶- نمودار نتایج رتبه بندی راه حل ها بر اساس هر یک از شاخص ها توسط هر یک از خبرگان

محاسبات نشان میدهد که در گروه راه حل ها، بیشترین وزن مربوط به راه حل نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی (G) و سپس به ترتیب راه حل تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق (A)، راه حل ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی (D)، راه حل نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها (E)، راه حل شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک (C)، راه حل تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار (F) و در آخر راه حل طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات (B) می باشد. لذا با توجه به محاسبات، راه حل نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی (G) بر سایر راه حل ها ارجحیت دارد. بدین صورت ترتیب اجرای راه حل ها، با توجه به اوزان هر کدام به شرح زیر می باشد:

اولویت اول: نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی

اولویت دوم: تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق

اولویت سوم: ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی

اولویت چهارم: نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها

اولویت پنجم: شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک

اولویت ششم: تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار

اولویت هفتم: طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات

نتایج بدست آمده نشان داده که اولویت اول نصب حفاظ شیشه ای بر روی شیشه تابلوهای برقی و سپس تهیه و ابلاغ دستورالعمل نحوه فعالیت در پست های برق می باشد که می تواند در پیشگیری از بروز حوادث مشابه در آینده بسیار موثر باشند. اولویت های بعدی شامل: ذکر عدم فعالیت بر روی تابلو کوپلر در مجوزهای برقی، نصب علائم هشداردهنده بر روی تابلوها، شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرایند به صورت سیستماتیک، تهیه و اجرای برنامه آموزشی قبل از شروع فعالیت پیمانکار و در آخر راه حل طراحی مجدد و جانمایی تابلوها و تجهیزات می باشد.

۱۰- نتیجه گیری

همانطور که در این تحقیق مشخص گردید با استفاده از روش RCA بر اساس مدل "گانو"، توانستیم علل موثر و ریشه ای در بروز حادثه برق گرفتگی منجر به فوت را شناسایی و مورد تحلیل منطقی قرار دهیم. این رویکرد به ما نشان داد که برای حل مسئله نیاز به اصول و چارچوب علمی بوده و مراحل آن می بایست با تفکر جمعی و با در نظر گرفتن واقعیات انجام پذیرد. نتایج نشان داد که برای RCA یک حادثه یک تیم از افراد متخصص و واقف به موضوع نیاز است تا با تعریف دقیقی از حادثه یا همان مسئله مورد تحلیل، هزینه های مربوط به پیاده سازی روش تحلیل را با بدست آوردن ریشه های اصلی وقوع رویداد و در ادامه با ارائه راه حل های کارآمد جبران نمایند. درمقابل ما افرادی بودند که اعتقاد داشتند ما با مسئله جدی مواجه نیستیم که نیاز به مهارت حل مسئله داشته باشیم. با توجه به نتایج بدست آمده از طریق ترسیم شبکه علت و معلولی روش تحلیل، ۸ علت ریشه ای برای وقوع حادثه مورد بررسی شناسایی شد و مشخص گردید که اکثر ریشه های بروز حادثه به صورت مزمن بوده اند به معنای آنکه ریشه ها در طی گذشت روزها و سالها فعالیت سازمان وجود داشته اند و مجموعه با وجود آنها فعالیت می کرده و تنها زمانی علائم خود را نشان داده اند که باعث بروز حادثه شده اند و این کشف حقایق است که توسط RCA حادثه بدست آمده است. به عنوان مثال در بررسی حادثه مورد اشاره در این تحقیق و علت اصلی وقوع حادثه که منجر به مرگ یک انسان شده است، تا قبل از انجام این تحقیق و تحلیل صورت گرفته در آن، آنان که از حادثه باخبر بودند تصور می کردند علت اصلی رویداد بی احتیاطی و خطای انسانی فرد فوت شده بوده اما همانگونه که توضیح داده شد، نه تنها بی احتیاطی علت اصلی حادثه نبوده بلکه علل مختلفی در وقوع رویداد و فوت فرد دخیل بوده اند و این نقطه ای بود که توانستیم با انجام تحقیق فوق، روش حل مسئله را از روش های سنتی و رایج حل مسئله مانند توهّم وجود برداشت رایج و واقعیت یگانه، تفکر خطی، سرزنش و افسانه وجود تک علت به دور کنیم و این نشان از بکارگیری رویکرد اصولی RCA در این تحقیق می باشد. در ادامه راه حل های کارآمد که می تواند از بروز حوادث مشابه در آینده جلوگیری نماید را با ادامه فرایند منطقی روش مذکور بدست آوردیم و دریافتیم که RCA رویکردی است که می توان آن را برای هر نوع پیشامدی به اجرا گذاشت. رویدادها چه مزمن باشند چه پراکنده و نامنظم و ... همگی مستلزم پیروی از یک فرایند منطقی فکری یکسان و مشابه است که نمونه آن در این تحقیق ارائه گردید. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده در خصوص راه حل ها دریافتیم که استفاده از رویکرد OPA برای رتبه بندی راه حل های کارآمد در راستای پیشگیری از وقوع مجدد حادثه، با در نظر گرفتن معیارهای کلی که در اکثر صنایع مشترک می باشند مانند پیشگیری از تکرار مجدد حادثه مشابه در آینده، عدم از دست دادن جان افراد متخصص، قابلیت اجرای راه حل ها، عدم ایجاد اختلال در فرایند کاری، کاهش هزینه های مستقیم و غیرمستقیم حادثه، برای اولویت بندی راه حل های کارآمد در تجزیه و تحلیل چنین حوادثی بسیار موثر و کارآمد خواهد بود.

منابع

- [1] برور راجر ال. ۱۳۹۱. ایمنی و بهداشت برای مهندسين (ایمنی در صنعت). حلوانی غلامحسین. تهران. سوم.
- [2] گانو دین ال. ۱۳۹۸. RCA (رویکردی کارآمد برای حل مسئله). زواشکیانی علی. آزادگان رضا. ورمزیار مرتضی. تهران. اول.
- [3] رضانی سعید. ۱۳۹۱. جزوه کارگاه آموزشی راهکارهای تحلیل و ریشه یابی خرابیها و حوادث (در نگهداری و تعمیرات). تهران. اول.
- [4] حلوانی غلامحسین. شیرازی جواد. ۱۳۹۲. ایمنی برق برای مهندسين. تهران. اول.
- [5] حلوانی غلامحسین. خوش اخلاق امیرحسین. ۱۳۹۲. مهندسی ایمنی پیشرفته. تهران. اول.
- [6] میرسراجی شبنم و همکاران. ۱۳۹۰. ایمنی برای محیط کار. تهران. اول.

[1] Poespito Hadi, W., Zuhair, S., Haryono, B. S., Amin, F., Fanani, Z., & Hermawa, R. (2020). Analysis of Regional Defense Threat for Non-Military Aspect at Bandung Municipality using Root Cause Analysis (RCA) and Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(2), 492-500.

[2] Wang, Z., Pang, Y., Gan, M., Skitmore, M., & Li, F. (2022). Escalator accident mechanism analysis and injury prediction approaches in heavy capacity metro rail transit stations. *Safety science*, 154, 105850.

[3] Trávníček, P., Kotek, L., & Junga, P. (2022). Prevention of accidents in facilities for the treatment and storage of selected agricultural products. *Safety Science*, 153, 105800.

انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیر و یا جایگزینی تجهیزات

ابوالفضل باغشاهی^۱

رییس برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مهندسی مجتمع مس سرچشمه

عارف خوارزمی^۲*

برنامه ریز و تحلیل گر اداره برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مهندسی مجتمع مس سرچشمه، کارشناس ارشد

مهندسی صنایع، گرایش مدیریت سیستم و بهره وری

چکیده

یکی از موارد مهم در امر مدیریت ماشین ها، تصمیم گیری در مورد زمان جایگزینی ماشین ها می باشد. چرا که اگر ماشین ها به موقع جایگزین نشوند هزینه های سرسام آور تعمیرات از یک سو و عدم انجام به موقع کارهای محوله به دستگاه از سوی دیگر باعث تحمیل هزینه های بی جا و بی مورد شده و به تبع آن باعث کاهش سود حاصله گردد. در همین راستا مطالعه ای به منظور تعیین عمر اقتصادی ماشین آلات با توجه به در نظر گرفتن هزینه های نگهداری و تعمیرات ماشین آلات و جایگزینی ماشین آلات در یکی از شرکت های صنعتی شاغل در حوزه معادن استان کرمان صورت پذیرفت در این مطالعه با در نظر گرفتن نظریه کمینه سازی هزینه ها، نظریه بیشینه سازی سود و کارایی انرژی و با بدست آوردن مقدار مثبت و منفی برای اختلاف NPV می توان در مورد خرید یا تعمیر ماشین آلات به نتیجه رسید.

کلمات کلیدی: نگهداری و تعمیرات، جایگزینی تجهیزات، استراتژی نت، کمینه سازی هزینه، بیشینه سازی سود

۱-مقدمه

امروزه صنایع تولیدی با هدف کارایی عملیاتی بالاتر، اثربخشی و مقرون به صرفه ای برای زنده ماندن در اقتصاد جهانی به شدت رقابتی ظهور پیدا کردند. نگهداری و تعمیرات مناسب توجه بیشتری در مساعدت صنایع به سوی طولانی تر کردن عمر عملیاتی موثر سیستم و همچنین بهبود قابلیت اطمینان و دسترس پذیری سیستم قرار دادند تا تحویل محصول با کیفیت بالا به مشتریان را تضمین نماید. روی هم رفته، نگهداری و تعمیرات میتواند به عنوان یک ترکیبی از همه اعمال فنی و اداری شامل سرپرستی، عمل به قصد حفظ یا بازیابی سیستم به یک حالت در جایی که سیستم میتواند یک نقش ضروری و مورد احتیاج را اجرا کند. (سوانسون، ۲۰۰۱)^۳

با این حال ضروری است که تأکید کنیم که هزینه نگهداری و تعمیرات می تواند حتی به ۱۵ تا ۷۰ درصد مخارج یا حتی می توانست در موارد زیادی از سود خالص سالیانه فراتر رود. با این وجود اهمیتی ندارد که مقدار مخارج چقدر زیاد می باشد، برای صنایع تولیدی غیر ممکن است که نگهداری و تعمیرات را رها کنند. بنابراین یک سیاست نگهداری و تعمیرات بهینه و مناسب برای مدیریت نگهداری و تعمیرات در انجام دادن همه فعالیتهای نگهداری و تعمیرات مورد احتیاج هست تا از قسمت چشمگیری از مخارج صرفه جویی کنند، به عبارت دیگر، سیاست نگهداری و تعمیرات بهینه قادر است تا یک طرح هدفمندانه عملی که معمولاً شامل یک مجموعه ای از قوانین مورد استفاده جهت فراهم کردن یک راهنما برای مدیریت نگهداری و تعمیرات در هدایت به سوی یک نگهداری و تعمیرات موثر می باشد ارائه دهد. (محمد صابر فلاح نژاد، مرتضی پور غریب شاهی، ۱۳۹۵)

به مرور زمان و به علت بالا رفتن عمر تجهیز، هزینه های مربوط به نگهداری و تعمیرات آن افزایش می یابد و تأمین لوازم یدکی با مشکل همراه خواهد بود که این امر نیاز به تعویض تجهیزات را اجتناب ناپذیر میکند. هزینه های نگهداری و تعمیرات که بخش عمده های از هزینه های تولید را در برمی گیرد، با توجه به نوع صنعت مورد بررسی، چیزی در حدود ۱۵ تا ۷۰ درصد هزینه محصول تولید شده را در بر میگیرد. بنابراین تعیین زمان بهینه استفاده از تجهیزات، یکی از مسائل مهم در حوزه تصمیم گیری های مدیریتی می باشد. مدیران

^۱ : رییس برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مهندسی مجتمع مس سرچشمه،

^۲ : برنامه ریز و تحلیل گر اداره برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مهندسی مجتمع مس سرچشمه، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گرایش مدیریت

سیستم و بهره وری، نویسنده مسئول، ۰۹۱۳۲۴۰۸۶۰۵، eraref@gmail.com

^۳ :Swanson L

سازمان برای اتخاذ تصمیم های مناسب، باید زمان بهینه تعمیر، تعویض و یا از رده خارج کردن تجهیزات را به گونه ای تعیین کنند تا بیشترین منافع و کمترین هزینه را برای سازمان داشته باشد. (ایمان کمال احمدی، حبیب رجیب مشهدی، ۱۳۹۵)

در بسیاری از سیستمهای تولیدی، به منظور حفظ شرایط عملیاتی تجهیزات، سرویسهای منظم و برنامه ریزی شده نگهداری و تعمیرات (نت) اجرا می شوند. اجرای برنامه های نت به طور مناسب نقش بسیار مهمی در ارتقاء بهره وری و همچنین کاهش هزینه های عملیاتی و خرابی های پیش بینی نشده ایفا می کنند. فعالیت های نگهداری و تعمیرات که روی ماشین ها انجام می شود موجب بهبود عملکرد ماشین ها و بهبود کیفیت محصولات می شود (یانگ، ۲۰۱۳)^۱

هر مجموعه سازمانی بدون بکارگیری یک برنامه صحیح نگهداری از امکانات و بالخصوص تجهیزات و ماشین ها، منابع و توانمندی های خود را به سرعت از دست می دهد. نبود یا ضعف مدیریت نگهداری و مراقبت، باعث استهلاک سریع تجهیزات و ماشین ها خواهد شد. هزینه های سنگین قطعات یدکی و تعمیرات زود هنگامی که به علت نبود مراقبت صحیح انجام می شود و نیز تأثیرات زیان باری که به علت توقف های طولانی و متوالی تجهیزات و ماشین ها بر ارائه خدمات به موقع و مطلوب وارد می شود، آشنا نبودن کاربران با دستگاههای جدید، عدم معرفی روشهای نگهداری و سرویس و بازبینی کامل و جامع تجهیزات، بار مالی فراوان ایجاد شده برای سازمان به دلیل رفت و آمدهای شرکت های خدمات پس از فروش، ضررهای جبران ناپذیر به ازاء هر بار خرابی دستگاه به سازمان تا زمان تعمیر مجدد، روشن نبودن نقش و وظیفه هر کس نسبت به تجهیزات، از جمله ایرادهایی است که بر روند سیستم نگهداری و تعمیرات تجهیزات و ماشین آلات وارد است. (شرزه یی، ۱۳۹۴)

۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

استراتژیهای مختلفی از قبیل نت اصلاحی، نت پیشگیرانه، نت بهره ور فراگیر، نت مبتنی بر قابلیت اطمینان، نت مبتنی بر وضعیت و ... تاکنون مورد استفاده شرکت های مختلف قرار گرفته است. اما چالش اساسی رو در روی دست اندرکاران امور مربوط به نگهداری و تعمیرات، تنها یادگیری این تکنیک ها نیست، بلکه تصمیم گیری در رابطه با انتخاب بهترین گزینه و موثرترین تکنیکهای نگهداری و تعمیرات برای سازمان می باشد. (موبری، ۱۹۹۷)^۲

تصمیماتی از قبیل زمان سرویس دهی، تعمیر، بازسازی، خرید و یا تعویض ماشین از جمله مواردی هستند که همیشه مدیر در طول مدت عمر ماشین با آن مواجه میباشد. نظریه کمینه سازی هزینه، هزینه های ماشین را به دو گروه هزینه های مالکیتی و هزینه های عملیاتی تقسیم بندی می کنند. با افزایش عمر ماشین، متوسط هزینه مالکیت روند کاهشی و متوسط هزینه عملیاتی روند افزایشی دارد. هدف این نظریه پیدا کردن نقطه زمانی است که متوسط کل هزینه ها به حداقل برسد. عمر اقتصادی زمانی به اتمام می رسد که شیب منحنی متوسط کل هزینه ها به صفر برسد. یکی دیگر از روش های حل مسئله جایگزینی اقتصادی، بیشینه سازی سود است. این مدل متشکل از سه منحنی متوسط کل هزینه ها، منحنی متوسط درآمد و منحنی متوسط سود می باشد. زمانی که منحنی متوسط سود به نقطه اوج خود برسد، عمر اقتصادی ماشین نیز به اتمام میرسد. زمانی که متوسط درآمد ثابت باشد، منحنی متوسط سود دقیقاً قرینه منحنی متوسط کل هزینه ها می شود و در این حالت عمر اقتصادی حاصل از دو روش بیشینه سازی سود و کمینه سازی هزینه یکسان خواهد شد. مسئله جایگزینی، برحسب محدودیت مقدار پول پرداختی توسط مدیر برای تعمیر ماشین در نظریه محدودیت تعمیر قابل حل می باشد (عباس روحانی، حسین غفاری، رضا فعله گری، خسرو محمدی قرمز گلی، حسن مسعودی، ۱۳۹۳)

الگوی مناسب تعمیر و نگهداری میتواند سطح مطلوبی از قابلیت اطمینان را در کمترین هزینه ممکن فراهم نماید. به طور کلی اهدافی که در سیاست گذاری تعمیر و نگهداری دنبال میشود افزایش طول عمر مفید تجهیزات موجود و افزایش میانگین زمان بین خرابیهای (کاهش فرکانس خرابیها و یا کاهش زمان وقفه) آنها می باشد. تأثیرات بسیار زیاد زمانهای از دست رفته در محیط کاری و تولیدی و افزایش رقابت در سطح جهانی، سیستمهای نگهداری و تعمیرات را به سمتی می برد تا بتوان با پیشگیری از

¹ :Yang

² : Moubray, j

وقوع کارافتادگی و از دست دادن زمان، با افزایش قابلیت اطمینان، تجهیزات صنعتی را به سمتی که صرفه اقتصادی داشته باشد هدایت نمود (حمید رضا عبدلیان، محمد رضا وسیلی، ۱۳۹۹)

به عبارت دیگر تعویض ماشین آلات وقتی اتفاق می افتد که، عمر ماشین آلات به اندازه ای زیاد شود که هزینه های عملیاتی و تعمیرات مربوط به ماشین مورد نظر افزایش چشمگیری داشته و تعویض ماشینی قدیمی با یک ماشین جدید مقرون به صرفه باشد (مسعود ربانی، مهدی علینقیان، محمد رضا تقی زاده، ۱۳۸۴)

یکی از موارد مهم در امر مدیریت ماشین ها، تصمیم گیری در مورد زمان جایگزینی ماشین ها می باشد. چرا که اگر ماشین ها به موقع جایگزین نشوند هزینه های سرسام آور تعمیرات از یک سو و عدم انجام به موقع کارهای محوله به دستگاه از سوی دیگر باعث تحمیل هزینه های بی جا و بی مورد شده و به تبع آن باعث کاهش سود حاصله خواهد گردید (حسین غفاری، ایرج رنجبر، خسرو محمدی قرمز گلی، محمد دولت علیزاده، ۱۳۸۹)

اهداف مهندسی نگهداری و تعمیرات عبارتند از:

- بهبود عملیات نگهداری و تعمیرات،
 - کاهش میزان و تکرار نگهداری و تعمیرات،
 - کاهش تأثیر پیچیدگی،
 - کاهش میزان خدمات پشتیبانی،
 - برقراری حد بهینه تکرار و گسترده نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه ای که بایستی انجام شود،
 - بهبود و حصول اطمینان از حداکثر بهره برداری از تسهیلات نگهداری و تعمیرات،
- بهبود سازمان نگهداری و تعمیرات (سید محسن حسینی، مسلم فدایی، سید جواد طباطبایی، تاج محمد سالاری، ۱۳۹۴)

۳- مرور ادبیات در زمینه مسأله جایگزینی ماشین

ایوی و نمبهرد یک روش تصمیم گیری برای مسأله جایگزینی ماشین دو حالتی ارائه دادند. آنها با یکپارچه سازی تکنیک کنترل کیفیت آماری و روش فرآیند مارکوفی مشاهدات جزئی یک مدل تصمیم گیری برای نگهداری و تعمیرات تحت شرایط عدم قطعیت ارائه دادند. آنها همچنین با استفاده از تکنیک شبیه سازی سعی داشتند تا مدل های تصمیم گیری برای نگهداری و تعمیرات را به دنیای واقعیت نزدیک تر کنند (ایوی و نمبهرد، ۲۰۰۵)^۱

کووا یک مدل برنامه ریزی پویا برای مسأله ترکیبی از نگهداری و تعمیرات ماشین و کنترل کیفیت محصول با افق زمانی محدود ارائه داد. در این مقاله با به کارگیری از روش فرآیند مارکوفی مشاهدات جزئی سعی در طراحی یک سیستمی دارند تا به کمک آن یک اصول نگهداری و تعمیرات ماشین و کنترل کیفیت محصول پیاده کنند تا هزینه های مورد انتظار سیستم را حداقل کنند. (کووا، ۲۰۰۵)^۲

فلاح نژاد و همکاران یک روش نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر مدل آماری-پایایی با به کارگیری از استنتاج بیزی ارائه داده اند. هدف در این مقاله استفاده از استنتاج بیزی برای به دست آوردن نقطه بازرسی می باشد، آنها با ترکیب استنتاج بیزی و روش نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر مدل آماری-پایایی سعی داشتند تا یک روش دقیق که کاربردی تر و دقیق تر باشد، ارائه دهند (فلاح نژاد، ۲۰۱۴)

¹: J. S. Ivy and H. B. Nembhard

²: Y. Kuo

۴- مرور ادبیات در زمینه نگهداری و تعمیرات

سبیطی و همکاران در پژوهشی با عنوان (به کارگیری آنالیز نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در ماشین سوزن) انجام داد. بعد از انجام آنالیز نت مبتنی بر قابلیت اطمینان، برنامه جامع و جدید نگهداری و تعمیرات برای تجهیز تدوین گردید که منجر به افزایش میزان اثربخشی فعالیتهای نت و شفاف سازی برنامه ها، کارآمدی فعالیت های نگهداری و تعمیرات، پوشش گسترده تر علل خرابی، بسترسازی جهت اصلاح قراردادهای برون سپاری نت، افزایش طول عمر ماشین سوزن، دسته بندی استاندارد حالات و علل خرابی و همچنین کاهش هزینه ها و حجم فعالیتهای تعمیراتی گردید (سبیطی و همکاران، ۱۳۹۹).

شنگی قهی و همکاران پژوهشی را با عنوان (استفاده از روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به منظور ارتقاء قابلیت اطمینان واحدهای خدماتی) انجام دادند. نتایج نشان داد سیستم روان کاری، بالاترین اولویت خطرپذیری را در موتور داشته و در نتیجه این سیستم در موتور لکوموتیو، بحرانی است. سپس با کمک فرآیند نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، عملکردها، خرابی های عملکردی، حالات خرابی، اثرات خرابی و پیامدهای خرابی این سیستم، تعیین و بر اساس اطلاعات به دست آمده نسبت به برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات در موتور لکوموتیو اقدام شده است. (شنگی قهی و همکاران، ۱۳۹۸)

یوسفی پژوهشی را با عنوان (ارائه مدل استقرار سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان RCM برای ماشینآلات پروژه های راه) انجام داد. در بین عوامل مورد بررسی، شاخص عوامل قابل اطمینان دارای بیشترین درجه اهمیت و شاخص عوامل اقتصادی از کمترین اهمیت برخوردار است. (یوسفی، ۱۳۹۶)

داودی پژوهشی را با عنوان (انتخاب روش نگهداری و تعمیرات مناسب با ادغام رویکرد نت مبتنی بر قابلیت اطمینان RCM) و توسعه عملکرد کیفیت) انجام داد. در این پژوهش بیشترین اهمیت و نیز کمترین اهمیت به وسیله تکنیک فرایند تحلیل سلسله مراتبی، شناسایی شده و با توجه به نمره به دست آمده از اعمال روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی، روش های مناسب نت ارائه شد و مشخص گردید که استفاده از روش های پیشنهادی به خوبی می تواند هزینه های نت را کاهش داده و باعث افزایش کیفیت شود. (داودی، ۱۳۹۶)

یوکنین، اولن و پوتسیا مدلی را برای به دست آوردن ارزش افزوده حاصل از سیاستهای نت ارائه کرده اند. این مدل توسط چهار سیاست اساسی برای نت آزمایش شده است. در این تحقیق، از آنجاکه فرایند تولید از دیدگاه مدیریت نت مدلسازی شده است، مدل ارائه شده، جزئیات نت را نیز لحاظ کرده است و تأثیرات نت اصلاحی، نت پیشبین و نت برنامه ریزی شده با تنظیم شاخص های اولیه بررسی شده اند (یوکنین و همکاران، ۲۰۱۱)

بصیرت، فضل الله تبار و مهدوی نیز مدلی را برای بررسی سیستم نت ارائه کرده اند. مدل معرفی شده به نسبت بزرگ و شامل متغیرهای زیادی است. هدف این مدل، ارزیابی قابلیت اطمینان و کنترل آن است. نتایج مدل نشان داده است که تغییری کوچک در فاکتورهای ثابت، سبب تغییرات زیادی در کارایی کلی سیستم می شود. (بصیرت و همکاران، ۲۰۱۳)

۵- روش تحقیق

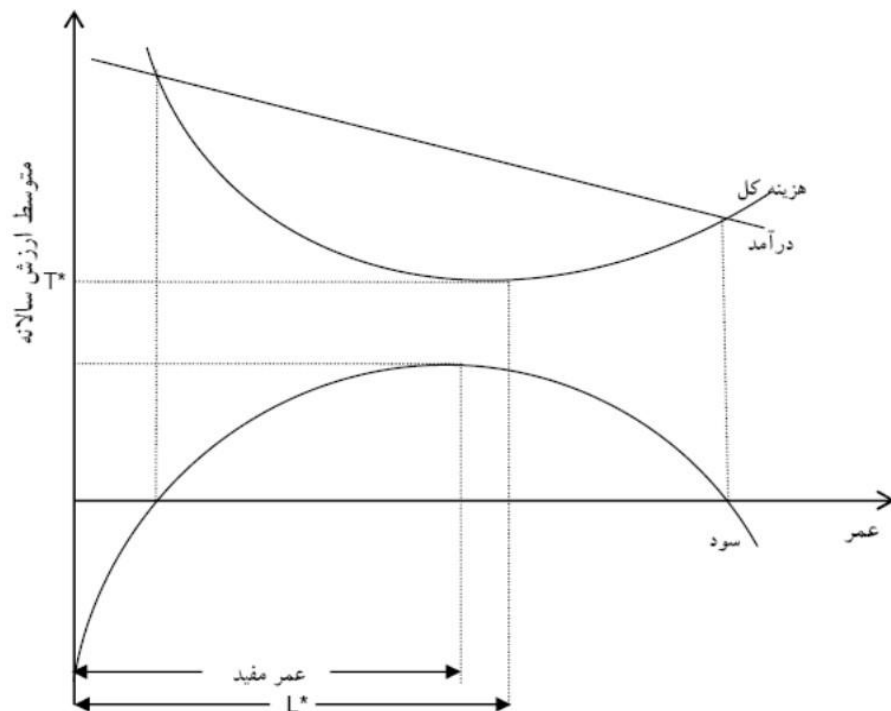
۵-۱- نظریه کمینه سازی هزینه ها

غالباً هزینه های یک ماشین را می توان در دو گروه هزینه های ثابت (مالکیت) و هزینه های متغیر (عملیاتی) تقسیم بندی کرد. در ابتدای خرید ماشین، هزینه های سرمایه های مالکیت مقادیر زیادی دارند اما هر چه از عمر ماشین می گذرد به دلیل سرشکن شدن هزینه های مالکیت بر تعداد ساعات استفاده بیشتر، مقدار هزینه ثابت سالانه بر واحد کار کاهش خواهد یافت. در مقابل، متوسط هزینه های عملیاتی با گذشت زمان روند افزایشی دارد چرا که در سال های اولیه مالکیت ماشین، میزان هزینه های

متغیر بسیارپایین است و ماشین تحت پوشش خدمات گارانتی می باشد و با بالا رفتن سن ماشین ، تعدد نیاز به تعمیرات و به تبع آن افزایش در هزینه های متغیر رخ خواهد داد. نظریه کمینه سازی هزینه ها به دنبال نقطه زمانی است که کاهش هزینه های مالکیت و افزایش هزینه های عملیاتی به یک حالت تعادلی برسند. عمر بهینه اقتصادی زمانی خواهد بود که در آن مجموع هزینه های مالکیت و عملیات کمترین مقدار خود را داشته باشند (حسین غفاری، ایرج رنجبر، خسرو محمدی قرمز گلی، محمد دولت علیزاده، ۱۳۸۹)

۵-۲- نظریه بیشینه سازی سود

این نظریه با سه منحنی متوسط کل هزینه ها ، منحنی متوسط در آمد و منحنی متوسط سود قابل توصیف است. متوسط در آمد با محاسبه متوسط مقدار عایدی از سرمایه موجود یا ماشین و متوسط سود نیز از کم کردن متوسط هزینه از متوسط در آمد حاصل می گردد. منحنی متوسط سود تقریباً قرینه منحنی متوسط کل هزینه ها است. عمر بهینه اقتصادی در نقطه اوج منحنی متوسط کل هزینه ها اتفاق می افتد. اگر متوسط در آمد ثابت باشد آن گاه منحنی متوسط سود دقیقاً قرینه منحنی متوسط کل هزینه ها خواهد شد و عمر اقتصادی بر آورد شده از روش بیشینه سازی سود مشابه عمر اقتصادی تخمینی از کمینه سازی هزینه خواهد شد. اما با ادامه استفاده از ماشین و در نتیجه دو واقعه فرسودگی و منسوخ شدن مقدار و در آمد حاصله از سرمایه کاهش خواهد یافت. به این دلیل عمر اقتصادی به دست آمده از بیشینه سازی سود و کمینه سازی هزینه هیچ وقت مشابه نخواهند شد. با ادامه استفاده از ماشین ، در آمد ها روند نزولی دارند بنابراین عمر مفید به دست آمده از نظریه بیشینه سازی سود کوچکتر از عمر اقتصادی بهینه برای کمینه سازی هزینه خواهد بود. شکل ۱ عمر اقتصادی پیش بینی شده از نظریه بیشینه سازی سود در شکل با عمر مفید نشان داده شده است (را در مقایسه با نظریه کمینه سازی هزینه ها نشان می دهد. متوسط حداقل هزینه سالانه و عمر اقتصادی بهینه برای کمینه سازی هزینه می باشد (حسین غفاری، ایرج رنجبر، خسرو محمدی قرمز گلی، محمد دولت علیزاده، ۱۳۸۹)



شکل ۱- نظریه جایگزینی بیشینه سازی سود نقل شده از (روحانی، ۱۳۸۸) در (حسین غفاری، ایرج رنجبر، خسرو محمدی قرمز

گلی، محمد دولت علیزاده، ۱۳۸۹)

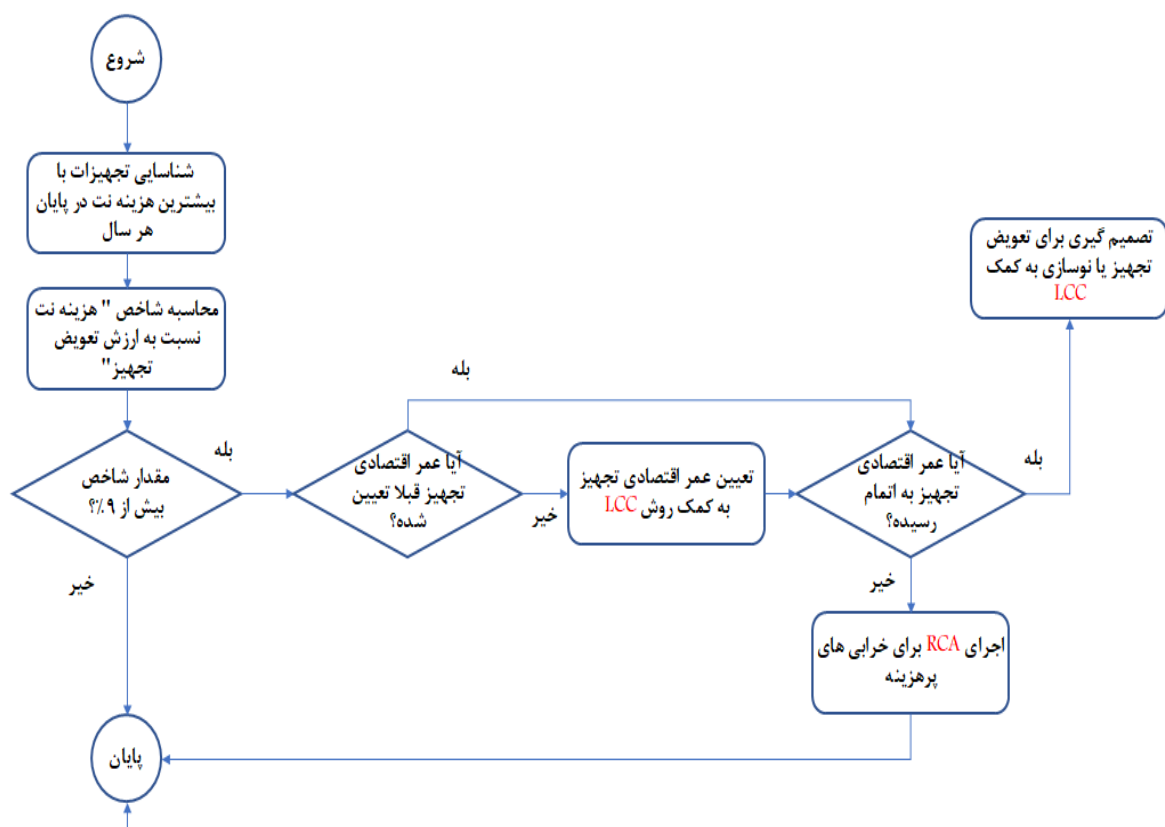
۵-۳- کارآیی انرژی

کارآیی انرژی برابر است با تولیدات مفید فرایند تقسیم بر انرژی ورودی به پروسه. به عبارت دیگر کارآیی انرژی حاصل تقسیم ستاده به نهاده می باشد. در صورتی که کارآیی انرژی بزرگتر از یک باشد استفاده از ماشین مقرون به صرفه است. از این روش برای تعیین مقرون به صرفه بودن استفاده از ماشین ها استفاده شد (شکیبایی، ۱۳۸۱)

۵-۴- مواد و روشها

برای به دست آوردن عمر جایگزینی و همچنین تعیین مقرون به صرفه بودن استفاده از ماشین ها بایستی کل هزینه های ماشین اعم از هزینه های مالکیت (ثابت) و هزینه های عملیاتی محاسبه شوند. هزینه های ثابت شامل استهلاک، سود سرمایه، جایگاه نگهداری ماشین، بیمه و مالیات می باشد. هزینه های متغیر نیز مشتمل بر هزینه های سوخت، دستمزد اپراتور و هزینه های تعمیر و نگهداری ماشین (شامل هزینه قطعات یدکی، مواد مصرفی و روانساز و دستمزد تعمیرات) می باشد (الماسی و همکاران، ۱۳۸۷)

با توجه به نمودار بالا می توان به دیاگرام زیر جهت تصمیم سازی دست پیدا نمود



شکل ۲- الگوریتم ابتکاری تعیین عمر اقتصادی

با توجه به طراحی الگوریتم ابتکاری در شکل ۲ و با داشتن هزینه های جایگزینی و تعمیرات می توان به جدول زیر دست پیدا نمود

تصمیم سازی برای "تعمیر اساسی تجهیز فعلی" یا "خرید تجهیز جدید"				
مشخصات تجهیز فعلی				
شرکت	شرکت صنایع تولیدی			
نام تجهیز	لیفتراک ۲ تن			
کد تجهیز				
محل استقرار تجهیز				
تعمیر و نوسازی تجهیز فعلی				
سازنده تجهیز	کلارک			
قیمت خرید اولیه (ریال)	200,000,000			
سال شروع بهره برداری (به تاریخ میلادی)	2014			
تاریخ شروع LCC (میلادی)	2023	سال اجرای LCC	2/8/2023	
تعداد سالهای کارکرد تجهیز تا زمان اجرای LCC	10			
هزینه سالیانه مصرف انرژی (ریال)	0			
برآورد هزینه نوسازی در سال ...	2,000,000,000	0		
میانگین هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه	69,562,768			
هزینه سالیانه نت نسبت به ارزش تعویض تجهیز (بر اساس هزینه خرید اولیه تجهیز)	۳۵٪			
نسبت هزینه نوسازی تجهیز فعلی به هزینه خرید تجهیز جدید	12%			
عمر پیش بینی شده برای تجهیز فعلی بعد از اجرای نوسازی	6			
ارزش اسقاط نسبت به قیمت خرید (ریال) . اگر اسقاط هزینه دارد، درصد به صورت منفی درج شود	100,000,000	50%		
Net Present Value (ریال)	-4,858,698,035	-47,206,487,412		
اختلاف NPV				
خرید تجهیز جدید				
سازنده تجهیز جدید	کوماتسو ۲۰۱۵			
مجموع هزینه های تجهیز جدید	16,550,000,000			
هزینه نصب و راه اندازی	50,000,000			
توسعه برنامه نت تجهیز جدید	0%	0		
هزینه خرید تجهیز جدید	16,500,000,000			
برآورد هزینه سالیانه انرژی مصرفی تجهیز جدید	0			
هزینه به روزآوری موجودی قطعات در انبار (شامل اسقاط قطعات تجهیز قدیمی و تامین موجودی قطعات تجهیز جدید)	0			
هزینه سالیانه نت نسبت به ارزش تعویض تجهیز	10%			
برآورد هزینه سالیانه نت شامل PM، CBM و تعمیرات (ریال)	1,614,732,081			
عمر مفید پیش بینی شده (حداکثر ۴۰ سال) اگر بازه زمانی کمتری مدنظر است، مقدارش در سلول رویرو درج شود	10			
ارزش اسقاط نسبت به قیمت خرید (ریال) . اگر اسقاط هزینه دارد، درصد به صورت منفی درج شود	8,250,000,000	50%		
Net Present Value (ریال)	-42,347,789,377	-		

مقدار منفی برای اختلاف NPV = خرید تجهیز جدید مقدار مثبت برای اختلاف NPV = نوسازی تجهیز فعلی

برآورد هزینه های نگهداری و تعمیرات تجهیز جدید			بازه زمانی برای آنالیز و پارامترهای مالی		
180,000,000	برآورد هزینه سالیانه PM	پیش فرض استفاده شده است	10	تعداد سال مورد نظر برای تحلیل (پیش فرض معادل با عمر مفید تجهیز جدید)	
0	برآورد هزینه سالیانه CBM		23.00%	نرخ بهره (%)	
1,434,732,081	هزینه نت تجهیز جدید در مقایسه با هزینه تجهیز قدیمی (به صورت درصدی از ارزش تعویض (RAV))		40.00%	نرخ تورم (%)	

جدول ۱- محاسبات جایگزینی و یا تعمیر تجهیز فعلی

بحث و نتیجه گیری

با توجه به داده های جدول ۱ به تصمیمات زیر می توان رسید:

- مقدار منفی برای اختلاف NPV = خرید تجهیز جدید

- مقدار مثبت برای اختلاف NPV = نوسازی تجهیز فعلی

تعویض ماشین ها زمانی معقول به نظر می رسد که هزینه های تعمیر و نگهداری ماشین ها تا حدی افزایش یابد که از هزینه استهلاک و سود سرمایه دستگاه نو بیشتر شود که این موضوع با توجه به دستمزد کم تعمیراتی ، ارزانی نیروی کار در ایران، مقادیر کمتر هزینه های تعمیر و نگهداری تجمعی ماشین ها و دقت اپراتور در بکارگیری ماشین آلات فعلا اتفاق نیفتاده است.

منابع

۱. الماسی م، لویمی ن و کیانی ش، ۱۳۸۷ مبانی مکانیزاسیون کشاورزی، انتشارات حضرت معصومه
۲. ایمان کمال احمدی، حبیب رجبی مشهدی، (۱۳۹۵). تعیین زمان بهینه جایگزینی و برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات ترانسفورماتور های توزیع سی و یکمین کنفرانس بین المللی برق (p. 1). تهران: سی و یکمین کنفرانس بین المللی برق.
۳. داودی، ن (۱۳۹۶) انتخاب روش نگهداری و تعمیرات مناسب با ادغام رویکرد نت مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) و توسعه عملکرد کیفیت. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علامه طباطبائی، دانشکده مدیریت و حسابداری
۴. روحانی ع، (۱۳۸۸) تحلیل هزینه های تعمیر و نگهداری و عمر اقتصادی تراکتور با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک. رساله دکتری تخصصی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز
۵. حسین غفاری، ایرج رنجبر، خسرو محمدی قرمز گلی، محمد دولت علیزاده، (۱۳۸۹). تعیین عمر جایگزینی تراکتور چرخ زنجیری و کاربرد اقتصادی آن با استفاده از روش کارآیی انرژی. ششمین کنفرانس ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون (p. 1). کرج: دانشگاه تهران.
۶. حمید رضا عبدلیان، محمد رضا وسیلی، (۱۳۹۹). شناسایی و رتبه بندی عوامل مؤثر بر پیاده سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرکت فولاد مبارکه سومین کنفرانس بین المللی و ملی مطالعات مدیریت، حسابداری و حقوق (p. 1). تهران: سومین کنفرانس بین المللی و ملی مطالعات مدیریت، حسابداری و حقوق..
۷. سید محسن حسینی، مسلم فدایی، سید جواد طباطبائی، تاج محمد سالاری، (۱۳۹۴). رویکردی نوین به نگهداری و تعمیرات در فرآیند های صنایع چوب نخستین همایش ملی چوب و فرآورده های لیگوسلولزی (p. 1). گنبد کاووس: دانشگاه گنبد کاووس.
۸. سبطی، س؛ تیره کار، ا و راجی پور، ز (۱۳۹۹) به کارگیری آنالیز نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان در ماشین سوزن. فصلنامه علمی پژوهش در مهندسی نگهداشت دفاعی، ۳، ۲۰-۸.
۹. شرزیه بی، ط. (۱۳۹۴). افزایش بهره وری با کاربرد سیستم نگهداری و تعمیرات فراگیر دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در علوم انسانی (p. 1). تهران: دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در علوم انسانی.
۱۰. شکیبایی ع، ۱۳۸۱ اقتصاد انرژی. انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان
۱۱. شنگی قهی، م؛ اوحدی اصفهانی، ا؛ قوسی، ر و نصر، ا (۱۳۹۸) استفاده از روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به منظور ارتقاء قابلیت اطمینان واحدهای خدماتی-مطالعه موردی در موتور لکوموتیو GM-820، ششمین کنفرانس بین المللی پیشرفتهای اخیر در مهندسی راه آهن، تهران
۱۲. عباس روحانی، حسین غفاری، رضا فعله گری، خسرو محمدی قرمز گلی، حسن مسعودی، (۱۳۹۳). پیش بینی عمر اقتصادی کمباین براساس مدل هزینه های تعمیر و نگهداری نشریه ماشین های کشاورزی- 360 , 367.
۱۳. محمد صابر فلاح نژاد، مرتضی پور غریب شاهی، (۱۳۹۵). طراحی یک سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات برای مسأله جایگزینی ماشین با استفاده از طرح نمونه گیری دنباله ای سیزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع (p. 2). بابل: دانشگاه علوم و فنون مازندران.
۱۴. مسعود ربانی، مهدی علینقیان، محمد رضا تقی زاده، (۱۳۸۴). ارائه یک مدل برنامه ریزی ریاضی به منظور تعویض ماشین آلات موازی در یک واحد تولیدی با در نظر گرفتن تغییرات تقاضا و نرخ تورم. اولین کنفرانس بین المللی (هفتمین کنگره ملی) مهندسی ساخت و تولید ایران (p. 1). تهران: دانشگاه تربیت مدرس.

۱۵. یوسفی، ب (۱۳۹۶) ارائه مدل استقرار سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان RCM برای ماشین آلات پروژه های راه. پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ایوانکی، دانشکده مهندسی عمران و معماری

16. Basirat, P., Fazlollahtabar, H. & Mahdavi, I. (2013). System dynamics metamodelling for reliability considerations in maintenance, *Process Management and Benchmarking*, 3(2): 136–153.
17. J. S. Ivy and H. B. Nembhard, "A modeling approach to maintenance decisions using statistical quality control and optimization," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 21, pp. 355-366, 2005
18. Jokinen, T., Ylén, P., & Pyötsiä, J. (2011). Dynamic model for estimating the added value of maintenance services. In *Proceedings of the 29th International Conference of the System Dynamics Society*. Washington, DC, USA
19. Y. Kuo, "Optimal adaptive control policy for joint machine maintenance and product quality control," *European Journal of Operational Research*, vol. 171, pp. 586-597, 2006
20. M. F. Nezhad, A. Mostafaeipour, and M. Sajadieh, "Implementation of traditional (SR)-based PM method with Bayesian inference," *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 25, pp. 27-32, 2014.
21. Moubray, j. (1997). *Reliability_Centred Maintenance*, Oxford Butterworth Heinemann
22. Swanson.L. (2001). Linking maintenance strategies to performance. *Int J Prod Econ*, 237
23. Yang. (2013). Unrelated parallel-machine scheduling with deterioration effects and deteriorating multimaintenance activities for minimizing the total completion time. *Applied mathematical modelling*, 37(5), (pp. 2995-3005).

کنترل موجودی و سفارشگذاری قطعات یدکی طی سه آنالیز همزمان ارزش مصرف (ABC)^۱، میزان بحرانیت (VED)^۲ و لیدتایم تامین قطعه (SDE)^۳

مطالعه موردی بر روی اقلام یدکی معاونت خدمات فنی شرکت ایران خودرو

سید محمدرضا ابوالبقایی*^۴

کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب

سید مهدی دستجردی^۵

کارشناس ارشد مدیریت صنعتی دانشگاه سازمان مدیریت صنعتی

محمد قاسمی^۶

کارشناس ارشد مدیریت پروژه دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

چکیده

در این تحقیق پیاده سازی روش MUSIC-3D^۷ که جامع ترین روش دسته بندی قطعات یدکی در دنیا است برای تدوین سیاست های مدیریت موجودی، پیاده سازی گردید ابتدا بر اساس تحلیل میزان بحرانیت (الویت بندی اقلام بحرانی و غیر بحرانی) انجام گرفت به این صورت که تقسیم بندی قطعات یدکی از نظر بحرانی بودن و ضرورت ویا نیازمندی عادی بر اساس وزن شدت آسیب به تجهیزات و وزن احتمال نیاز به قطعه به صورت یک ماتریس اولویت بندی ایجاد و مقادیر سطح ریسک تعیین گردید سپس دسته بندی بر اساس میزان ارزش مصرف و همچنین دسته بندی و تحلیل بر اساس زمان تامین قطعات یدکی به صورت مشترک تدوین و این تحلیل به صورت دو سطح در هر بُعد، ادغام و منجر به دسته بندی هشت گروه مختلف و متعاقبا هشت استراتژی گردید که به هر دسته بندی تصمیمات مختص به همان دسته اختصاص داده میشود. در اولین گام تجزیه و تحلیل قطعات یدکی بر روی ۷۳۸ آیتم از مجموع کل قطعات مصرف شده در معاونت خدمات فنی شرکت ایران خودرو به منظور تدوین استراتژی های کنترل موجودی در دستور کار قرار گرفت. بنابر این به این منظور پیشنهادات و تحلیل هایی از منابع کتابخانه ای و خبره گان این موضوع جمع آوری شده و تصمیم بر این داریم که در کنار شرایط موجود در شرکت نتایج تجزیه و تحلیل فوق را به منظور تدوین استراتژی بهینه مورد بررسی قرار دهیم و در نهایت نتایج سیاست های پیشنهادی کنترل موجودی و خرید مورد بهره برداری بهینه قرار گرفته و سطح ریسک عدم کنترل و سفارشگذاری قطعات یدکی کاهش یابد.

واژگان کلیدی: مدیریت موجودی، MUSIC-3D، سیاستگذاری خرید، دسته بندی قطعات یدکی

^۱ - مدیریت موجودی از طریق طبقه بندی در سه رده بر اساس میزان اهمیت کالا به ترتیب به طبقات A و B و C

^۲ - (اورژانسی: Vital) - ضروری (Essential) و غیرضروری (Desirable)

^۳ - کمیاب (Scarce) - سخت (Difficult) و آسان (Easily)

4 mr.abolbaghaei@ikco.ir ۰۹۳۷۹۵۷۲۱۶۳

5 Snhoeini@ikco.ir

6 .Moghasmi@ikco.ir

۱-مقدمه

از آنجا که تنوع اقلام موجود در انبارهای شرکت به بیش از چندین هزار کالا می رسد، برای مدیریت بهتر این حجم انبوه از اقلام و به منظور اتخاذ تصمیمات مناسب برای هر دسته لازم است تا مواد و قطعات بر اساس معیارها و روشهای مختلف دسته بندی شوند تا برای هر گروه از آنها تصمیمات متناسب با آن گروه اتخاذ گردد. قطعا کنترل موجودی و خرید بهینه اقلام از طریق محاسبات کمی و مدلسازی های ریاضی است؛ اما با توجه به حجم بسیار زیاد اقلام در سازمان ها و دشوار بودن پیاده سازی محاسبات ریاضی به دلیل ویژگی های متفاوت و تنوع قطعات یدکی، اتخاذ تصمیمات مدیریتی و تدوین سیاست برای کنترل موجودی و خرید قطعات یدکی مناسب تر است. گرچه سیاست ها لزوما مقدار بهینه را برای تک تک اقلام مشخص نمی کنند اما نزدیک به نقاط بهینه هستند و همچنین هزینه پایین و سادگی در تدوین و پیاده سازی منجر به استفاده متداول تر از آنها می شود. برای اتخاذ تصمیمات و تدوین سیاست نیاز به دسته بندی قطعات یدکی وجود دارد؛ روش های مختلفی برای دسته بندی قطعات یدکی وجود دارد اما جامع ترین روش دسته بندی که در دنیا استفاده می شود، روش MUSIC-3D می باشد که سه آنالیز ارزش مصرف (ABC)، میزان بحرانی (VED) و لیدتایم (SDE) را به صورت دو سطح در هر بُعد، ادغام می کند. از این دسته بندی برای سیاستگذاری و تصمیمات مدیریتی شرکت ها و سازمان ها در مدیریت موجودی استفاده می شود. دسته بندی MUSIC-3D در واقع حاصل ترکیب دسته بندی های نامبرده مطابق جدول شماره (۲) است؛ اما با توجه به اینکه ترکیب سه دسته بندی که هر کدام دارای سه طبقه هستند منجر به پدید آمدن تعداد 27 طبقه منحصر به فرد می شود، طبق نظر (کریشنان و بنرجی 2013) هر کدام از دسته بندی های تک معیاره به صورت دو سطح (و نه سه طبقه) در نظر گرفته می شوند که در نهایت تعداد 8 دسته به وجود بیاید تا از تعداد زیاد طبقه ها جلوگیری کرده و سهولت در تصمیم گیری و مدیریت دسته ها وجود داشته باشد.

۲-پیشینه تحقیق:

مرور ادبیات با تجزیه و تحلیل مقالات مرتبط منتشر شده در مجلات بین المللی انجام شد. به طور کلی علی رغم کاربردی بودن رویکرد MUSIC-3D مطالعات زیادی با استفاده از این رویکرد انجام نشده است. مقالات منتشر شده در این حوزه در سال های اخیر برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است، زیرا هر چه به زمان کنونی نزدیک می شویم تحقیقات بیشتر و عمیق تری در این زمینه انجام شده است.

(تحقیق گوتولو 2021) بر روی کاربرد تکنیکهای کنترل موجودی انتخابی یعنی تحلیل ABC، FSN SDE و MUSIC-3D در مدیریت موجودی انبار قطعات معامله شده تمرکز دارد. هدف اصلی این مقاله مدیریت تکنیک های موجودی تک بعدی و رویکرد سه بعدی در مدیریت موجودی قطعات معامله شده است. این مطالعه در یک شرکت واقع در کرالا هند انجام شد. داده های اولیه با ادغام داده ها از سیستم ERP-SAP آنها جمع آوری شد. این شرکت حدود 720 قطعه معامله شده را اداره می کند. تمام 720 قطعه معامله شده در این مطالعه در نظر گرفته شده است. در مرحله اول، طبقه بندی ABC، تجزیه و تحلیل FSN و SDE به صورت جداگانه انجام می شود. سپس، تجزیه و تحلیل سه بعدی با ترکیب هر سه تکنیک کنترل موجودی انجام شد. توصیه می شود که شرکت باید کنترل دقیقی روی اقلام کلاس A، اقلام غیر متحرک و اقلام کمیاب اعمال کند. کنترل متوسط بر روی آیتم های کلاس B، آیتم های آهسته متحرک و موارد مطلوب. کنترل کمتر بر روی اقلام کلاس C، اقلام با حرکت سریع و موارد ضروری. (توماس و سنجیوی 2014) اجرای یک سیستم مدیریت و کنترل موجودی بهبود یافته در یک صنعت فرآوری شیمیایی را مطالعه کرده اند. این مطالعه به منظور کنترل موجودی قطعات یدکی صنعت کرالیایی انجام شد. نویسندگان سه تکنیک کنترل موجودی انتخابی به نامهای ABC، VED و MUSIC SDE (3D) را ترکیب کرده اند. شاخص های کلیدی عملکرد نیز برای ارائه عملیات نیمکتی ایجاد شدند. (جیریا و بت 2013) با استفاده از تکنیک کنترل فهرست انتخابی چند واحدی (MUSIC-3D) را برای طبقه بندی داروهای داروخانه ای و ابزار جراحی بر اساس بحرانی بودن، مصرف و زمان تحویل از داده های موجود از دو بیمارستان چند تخصصی پیشنهاد کرده اند. نویسندگان ادعا میکنند که اقلام به هشت دسته طبقه بندی شده اند که سپس به مدیریت بیمارستان کمک میکند تا مواد را به طور مؤثر مدیریت کند و به طور همزمان به کاهش هزینه های لازم دست یابد و بخش مواد را به یک مرکز سود تبدیل کند. نویسندگان همچنین بر نیاز به اتوماسیون و کامپیوتری شدن در بخش داروسازی تأکید میکنند، زیرا استفاده عاقلانه از منابع و مراقبتهای بهداشتی مؤثر را تضمین میکند.

(زیداتون و همکاران 2019) از رویکرد کنترل موجودی یدکی چند واحدی (MUSIC 3D) برای مدیریت موجودی استفاده کرده اند. در این تحقیق از سه تحلیل ABC، SDE، FSN استفاده شده است. این مطالعه در شرکت بازرگانی در زمینه تجهیزات در بخش های مختلف انجام شده است.

(شاردا و گورانا 2016) در تحقیق خود اجرای یک سیستم فهرست موجودی انتخابی یکپارچه به نام کنترل موجودی انتخابی چند واحدی (MUSIC-3D) را با ترکیب سه دسته بندی از تکنیک های مهم اقلام مانند ABS، FSN و VED برجسته کرده اند.

(گورومورثی و همکاران 2020) از این آنالیز برای طبقه بندی لوازم پزشکی به دسته های مختلف استفاده کرده اند. آنها پیشنهاد کردند که برخی از لوازم پزشکی که در دو دسته حیاتی و کمیاب قرار می گیرند، بیمارستان باید میزان موجودی تعداد کمی از آنها را با مقدار سفارش اقتصادی (EOQ) با احتساب ذخیره احتیاطی کنترل کند زیرا این اقلام از سایر ایالت های هند ارسال میشوند.

(سوریا و متئو 2020) در تحقیق خود سیستم کنترل موجودی یک شرکت را مورد تحلیل قرار داده اند و بر اساس یافته های خود، تنها به ارائه پیشنهاداتی برای بهبود سیستم کنترل موجودی آنجا بسنده کرده اند

(رایس 2020) در مقاله خود بزرگترین تولید کننده گاز طبیعی مایع را در اندونزی مورد تحلیل قرار داده است. او برنامه ریزی موجودی بیشتر را برای مواد قرار گرفته در دسته های 1 و 2 و استفاده از سیستم مرور دائم را برای کنترل موجودی پیشنهاد داده است. با سناریوی شبیه سازی مونت کارلو، میانگین افزایش سطح سرویس 4 درصد از طریق پیاده سازی روش پیشنهادی او به دست می آید

(آستانتی 2015) سیستم تأمین قطعات و موجودی انبار را به کمک این آنالیز را در یک شرکت داروسازی مورد بررسی قرار داده است؛ او قطعات را هر کدام دارای طبقه بندی متفاوتی قرار داده است و برخورد متفاوت از یکدیگر را با توجه به طبقه بندی آنها ضروری دانسته است و برای آن پیشنهاداتی ارائه داده است.

(لیفانا 2021) در پژوهش اخیر خود یک مرکز توزیع دارویی را با هدف تجزیه و تحلیل و به دست آوردن بهترین روش های پیشبینی و مدیریت موجودی برای داروهای قرار گرفته در دسته 1 و 2 این آنالیز مورد بررسی قرار داده است. او در نهایت با توجه به ویژگی های آن قطعات، برای برخی از داروهای قرار گرفته در این دسته ها استفاده از سیستم موجودی مرور دائم و برای بقیه استفاده از سیستم موجودی مرور دوره ای را پیشنهاد داده است.

۳- یافته ها:

با توجه به بررسی هایی که بر روی ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق کاربرد آنالیز MUSIC-3D در مدیریت موجودی اقلام صورت گرفت، پیشنهاداتی در خصوص هر کدام از دسته های مختلف آنالیز به دست آمد؛ با توجه به اینکه پیشنهادات موجود بر اساس شرایط شرکت یا سازمان تحت مطالعه ارائه شده است، در کنار یکدیگر قرار دادن این پیشنهادات گاهی منجر به بروز تناقض در تصمیم گیری می شود؛ بنابراین لازم است پیشنهادات جمع آوری شده بر شرایط موجود در شرکت خودروساز تحت مطالعه تطبیق داده شود. بر همین اساس پیشنهادات جمع آوری شده از منابع مختلف در کنار شرایط موجود در شرکت خودروساز تحت مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت؛ سپس مصاحبه هایی با خبرگان صنعتی در حوزه مدیریت زنجیره تأمین قطعات یدکی در خصوص پیشنهادات جمع آوری شده صورت گرفت و در نهایت برآیند استفاده از پیشینه تحقیق و نظرات خبرگان، به عنوان پیشنهادات کنترل موجودی و خرید ارائه شد. گاهی در مطالعات دیده می شود که سه معیار مدنظر برای تشکیل ماتریس MUSIC-3D متفاوت است؛ عمدتاً دو معیار دسته بندی بر اساس لیدتایم (SDE) و دسته بندی بر اساس میزان بحرانی (VED) بصورت مشترک مورد استفاده قرار گرفته اما در بعد سوم آنالیز مکرر دیده شده است که از دسته بندی سرعت مصرف (FSN) استفاده گردیده است. مطابق آنچه که در کتاب (کریشان و بنرجی 2013) پیشنهاد شده و در کتاب (رمضانی و حسین زاده 2022) استفاده گردیده است، در این تحقیق نیز از دسته بندی ارزش مصرف (ABC) برای بعد سوم آنالیز استفاده شده است.

۴- روش پیاده سازی:

برای پیاده سازی آنالیز MUSIC-3D که به نوعی دسته بندی چند معیاره محسوب می شود، لازم است ابتدا دسته بندی های تک معیاره آن بر روی اقلام انجام شده باشد.

MUSIC-3D بر اساس یک رویکرد سه بعدی استوار است

ABC-1 (ارزش ریالی مصرف سالانه)

VED-2 (بحرانی و غیر بحرانی)

SDE-3 (لیدتایم تامین قطعه)

دسته بندی ABC با توجه به مصرف و قیمت اقلام تشکیل می شود و دسته ی A آن تعداد کمی از اقلام هستند که ارزش مصرف (مصرف * قیمت) آنها 80 درصد از ارزش ریالی کل مصرف شرکت را شامل می شود . دسته بندی SDE با توجه به لیدتایم اقلام تشکیل می شود و کلیه اقلام را بر اساس زمان تدارک به سه دسته ی کمیاب، تأمین دشوار و تأمین آسان تقسیم میکند . دسته بندی VED نیز بر اساس میزان بحرانیات اقلام تشکیل می شود و اقلام را به دسته های حیاتی، ضروری و عادی تقسیم می نماید.

تحلیل VED : اولویت بندی قطعات یدکی: (حیاتی ، ضروری و معمولی)

یک دسته بندی بر اساس درجه بحرانی بودن اقلام است. بحرانی بودن به معنای این است که چقدر یک قطعه برای عملکرد تجهیزات و یا انجام خدمات مهم است.

تجهیزات اولویت ۱: (اقلام حیاتی) به اقلامی گفته میشود که اگر در دسترس نباشند، باعث از کار افتادگی کامل تولید و یا خدمات میگردد.

* طی ۲۴ ساعت آینده قطعاً منجر به توقف کامل تولید و یا خدمات میشوند و تا زمان تامین قطعه وضعیت ادامه خواهد داشت. (این اقلام میبایست در دسته اقلام بیمه ای لحاظ شوند)

* نسبت به تعداد کل قطعات تعداد اقلام حیاتی از ۸ درصد کل قطعات بیشتر نباشد.

تذکر: تنها به سراغ انبار و قطعات مصرف شده نرویم با تحلیل درخت اجزا، (BOM¹ تجهیزات) اقدام به شناسایی و احیانا خرید قطعات دارای اولویت حیاتی کنید.

تجهیزات اولویت ۲: (اقلام ضروری) به اقلامی گفته میشود که در صورت فقدان آنها در هنگام نیاز، باعث کاهش میزان تولید و یا خدمات میشوند و یا ممکن است فقدان وجود آنها باعث ایجاد آسیب به تجهیزات دیگر بشود

تجهیزات اولویت ۳: (اقلام معمولی) به گروهی از اقلام اطلاق میشود که تاثیر آنچنانی بر میزان تولید و خدمات ندارد.

ابزار آلات و تجهیزات اندازه گیری جزو اقلام معمولی لحاظ میشود.

اقلامی که ماهیت دارایی ثابت دارند و یا به صورت موردی (تنها برای یک بار) مورد استفاده قرار گرفته اند نیاز به بررسی اولویت ندارند.

جدول شماره (۱): ماتریس اولویت بندی سطح ریسک

وزن شدت آسیب به تجهیزات		وزن احتمال نیاز به قطعه		وزن شدت آسیب به تجهیزات					
۶- جبران ناپذیر	۶- کاملاً قطعی	6	12	18	24	30	36	وزن احتمال نیاز به قطعه	
۵- عمده	۵- کاملاً محتمل	5	10	15	20	25	30		
۴- مهم	۴- محتمل	4	8	12	16	20	24		
۳- قابل توجه	۳- کمی محتمل	3	6	9	12	15	18		
۲- کم	۲- احتمال بسیار کم	2	4	6	8	10	12		
۱- بسیار کم	۱- کاملاً نامحتمل	1	2	3	4	5	6		
اولویت		سطح ریسک		محدوده		درصد مجاز			
اقدام حیاتی		۳۰-۳۶		قرمز		۸٪			
ضروری		۱۰-۲۵		زرد		۴۵٪			
معمولی		۱-۹		سبز		۴۷٪			

پس از تشکیل دسته بندی های نامبرده، هر کدام از آنها به صورت دو سطح در هر دسته بندی در نظر گرفته می شود تا تعداد دسته های حاصل از ترکیب آنها به 8 دسته مطابق جدول شماره (۲) برسد.

جدول شماره (۲): دسته بندی چند معیاره MUSIC-3D

MUSIC- 3D	ارزش مصرف بالا		ارزش مصرف پایین	
	لیدتایم بالا	لیدتایم پایین	لیدتایم بالا	لیدتایم پایین
بحرانی	۱	۲	۳	۴
غیر بحرانی	۵	۶	۷	۸

برای هر دسته به دست آمده از این روش می توان تدابیری اتخاذ نمود تا مدیریت قطعات و کالاهای شرکت بهتر صورت گیرد. گاهی استفاده از فرمول ها و محاسبات بهینه سازی موجودی باعث رفع کامل مشکلات نمی شود و تنها از میزان آن می کاهد اما تدابیر و سیاست هایی که برای این 8 دسته در نظر گرفته می شود، در شرایطی می تواند آن دغدغه را بطور کلی رفع کند. لذا هم اندیشی و اتخاذ سیاستگذاری مناسب برای گروه های بدست آمده حائز اهمیت فراوان می باشد.

۵- سیاستگذاری کنترل موجودی و خرید:

برخی از سیاست های عمومی کاربردی که برای دسته های مختلف آنالیز MUSIC-3D در مراجع و بهترین عملکردهای دنیا وجود دارد و استفاده می شود، به همراه برخی پیشنهادات قابل پیاده سازی طبق شرایط شرکت ایران خودرو تحت مطالعه، در جدول شماره (۳) پیشنهاد شده است.

بدیهی است که با توجه به شرایط هر سازمان، برخی سیاست گذاری های دیگر نیز می تواند در کنار موارد پیشنهاد شده قرار گیرد. لذا ایجاد سیاست های دقیق تر مربوط به هر دسته از آنالیز MUSIC-3D با توجه به شرایط هر شرکت و ویژگی های هر دسته، می تواند توسط خبرگان آن شرکت مورد هم اندیشی قرار گیرد.

جدول شماره (۳): سیاست های عمومی دسته های مختلف MUSIC-3D

شماره دسته	ویژگی دسته	شرح
۱	بحرانی ارزش مصرف بالا لیدتایم طولانی	این اقلام باید حداکثر مدیریت و پایش موجودی را داشته باشند. کمبود مجاز نیست و سطح سرویس هر کالا دقیق حفظ شود. مقادیر بهینه روش کنترل موجودی حفظ شود. برای کاهش لیدتایم قطعات این دسته، منبع یابی شود اطلاعات و اسناد فنی از قبل بطور کامل آماده باشد. امکان تغییر طرح جهت کاهش بحرانیت و کاهش مصرف بررسی شود
۲	بحرانی ارزش مصرف بالا لیدتایم کوتاه	مانند دسته 1 عمل شود؛ البته به دلیل لیدتایم کمتر، کنترل آسان تری خواهند داشت. مدیریت و پایش موجودی این اقلام باید تحت کنترل باشد. کمبود مجاز نیست و سطح سرویس هر کالا دقیق حفظ شود. مقادیر بهینه روش کنترل موجودی حفظ شود. اطلاعات و اسناد فنی از قبل بطور کامل آماده باشد. امکان تغییر طرح جهت کاهش بحرانیت و کاهش مصرف بررسی شود. بکارگیری روش های مختلف آماری برای کاهش سطح موجودی این اقلام مطلوب است.
۳	بحرانی ارزش مصرف پایین لیدتایم طولانی	سطح موجودی کالا باید زیاد باشد (بطور مثال برای ۱.۵ سال خریداری و ذخیره شود). به هیچ وجه نباید کمبود شود و سطح سرویس باید حفظ شود. در هنگام خرید می توان به سراغ تخفیف خرید عمده رفت. آیتم هایی که نیاز به محاسبه زمان بندی با استفاده از روش EOQ بدون نیاز به نظارت مستقیم دارند.
۴	بحرانی ارزش مصرف پایین	سطح موجودی کالا می تواند زیاد باشد (بطور مثال برای یک سال خریداری و ذخیره شود). به هیچ وجه نباید کمبود شود و سطح سرویس باید حفظ شود.

	لیدتایم کوتاه	در هنگام خرید می توان به سراغ تخفیف خرید عمده رفت. آیتم هایی که نیاز به محاسبه زمان بندی با استفاده از روش EOQ بدون نیاز به نظارت مستقیم دارند.
۵	غیر بحرانی ارزش مصرف بالا لیدتایم طولانی	موجودی و مصرف کالا دقیقاً پایش شود. درخواست خرید اقلام این دسته می تواند بصورت تجمیعی با سایر اقلام همین دسته صادر شود. وقوع کمبود پس از صدور سفارش به تأمین کننده اشکالی ندارد. استفاده از انواع تکنیک های کاهش هزینه برای این دسته پیشنهاد می شود.
۶	غیر بحرانی ارزش مصرف بالا لیدتایم کوتاه	به هیچ وجه خرید عمده نشود. پایش مصرف جهت کاستن از ارزش مصرف، انجام شود. سطح موجودی کم یا صفر نگهداری شود و سطح سرویس پایین ارائه شود. اقلام این دسته را می توان از روش هنگام نیاز کنترل موجودی و خرید کرد. استفاده از انواع تکنیک های کاهش هزینه برای این دسته پیشنهاد می شود.
۷	غیر بحرانی ارزش مصرف پایین لیدتایم طولانی	خرید بصورت عمده و تجمیعی با سایر اقلام همین دسته صادر شود. جهت صرفه جویی در هزینه ها، کاهش لیدتایم اقلام این دسته در دستور کار قرار گیرد. در هنگام خرید می توان به سراغ تخفیف خرید عمده رفت.
۸	غیر بحرانی ارزش مصرف پایین لیدتایم کوتاه	کمبود مجاز است. اقلام با فاصله منظم خریداری شوند. اقلام این دسته را می توان از روش هنگام نیاز کنترل موجودی و خرید کرد.

جدول شماره (۴): نتایج پس از اجرای تحلیل بر روی ۷۳۸ آیتم از مجموع کل قطعات مصرف شده در معاونت خدمات فنی

تعداد آیتم های دارای درخواست در جریان	فاقد موجودی و درخواست در جریان	تعداد اقلام وارد شده در استراتژی	ویژگی اقلام شناسایی شده در گروه	استراتژی
2	8	18	بحرانی - ارزش مصرف بالا - لیدتایم طولانی مدت	استراتژی گروه ۱

3	28	45	بحرانی - ارزش مصرف بالا - لیدتایم کوتاه مدت	استراتژی گروه ۲
1	13	38	بحرانی - ارزش مصرف پایین - لیدتایم طولانی مدت	استراتژی گروه ۳
5	231	278	بحرانی - ارزش مصرف پایین - لیدتایم کوتاه مدت	استراتژی گروه ۴
0	1	1	غیربحرانی - ارزش مصرف بالا - لیدتایم طولانی مدت	استراتژی گروه ۵
0	10	12	غیربحرانی - ارزش مصرف بالا - لیدتایم کوتاه مدت	استراتژی گروه ۶
0	21	24	غیربحرانی - ارزش مصرف پایین - لیدتایم طولانی مدت	استراتژی گروه ۷
0	217	322	غیربحرانی - ارزش مصرف پایین - لیدتایم کوتاه مدت	استراتژی گروه ۸

۶- مزایا و دستاوردهای حاصله از اجرای تحقیق براساس معیارها:

- ❖ تعداد کل قطعات یدکی هر بخش با کنترل روند مصرف ۴ سال گذشته مشخص میشود. رفع مغایرتهای BOM تجهیزات (لیست کل)
- ❖ مشخص میشود که چه تعداد از کل قطعات یدکی شناسایی شده هر بخش وارد استراتژی شده است. (ماهیت قطعه یدکی)
- ❖ مشخص میشود که در هر استراتژی چه تعداد کالا را داریم و چه تصمیمات کنترل موجودی را برای هر دسته باید لحاظ کنیم
- ❖ فعال کردن بهره بردار از نظر استراتژی (مثلا جهت کاهش لیدتایم قطعاتی که زمان تامین قطعه طولانی، ارزش مصرف بالا و بحرانی هستند، منبع یابی شود. اطلاعات و اسناد فنی از قبل بطور کامل آماده باشد. امکان تغییر طرح جهت کاهش بحرانی و کاهش مصرف بررسی شود)
- ❖ مقادیر بهینه روش کنترل موجودی هر دسته با عنایت به محاسبات اماری مقادیر بهینه سفارش همان دسته حفظ می شود.
- ❖ کاهش هزینه های سفارش گذاری (درخواست خرید اقلام با توجه به بعضی استراتژیها می تواند بصورت تجمیعی با سایر اقلام همان دسته صادر شود).
- ❖ استفاده از انواع تکنیک های کاهش هزینه برای قطعاتی که غیر بحرانی هستند مد نظر قرار میگیرد

- ❖ اطمینان از شناسایی کامل قطعات بحرانی خارج از تصمیماتی که صرفاً بر اساس خبرگی تعیین میشود (استفاده از مدل ماتریس تصمیم گیری)
- ❖ در بحث اجرای موجب کاهش هزینه های مرتبط با توقفات تجهیزاتی به لحاظ عدم وجود به موقع قطعات یدکی می شود
- ❖ پیگیری از برنامه ریزی و خرید به لحاظ کاهش تعداد درخواستها و تمرکز بر درخواستهای بحرانی هدفمندتر و آسانتر میشود.
- ❖ کاهش زمان تامین قطعه در ساپکو
- ❖ کاهش خواب سرمایه
- ❖ جهت اقلامی که زمان تامین کوتاه و ارزش مصرف پایین و غیر بحرانی میتوانیم در هزینه ها صرفه جویی کنیم به طوری که در هنگام خرید می توان به سراغ تخفیف خرید عمده رفت و می توان از روش هنگام نیاز، کنترل موجودی و خرید کرد.
- ❖ کاهش ریسک اقلام فاقد موجودی و درخواست در جریان جهت کلیه قطعات یدکی مورد بررسی قرار میگیرد

۷- نکات مهم اجرای تحقیق براساس معیارها :

- ✓ تذکر: تنها به سراغ انبار و قطعات مصرف شده نرویم با تحلیل درخت اجزاء (BOM تجهیز) اقدام به شناسایی و احیانا خرید قطعات دارای اولویت حیاتی بشود.
- ✓ استفاده از اولویت بندیهای تجهیزات بحرانی ، استخراج قطعات یدکی تجهیزات بحرانی و بررسی سطح ریسک عدم وجود قطعات تجهیزات بحرانی و عواقب آن توسط کارشناس مرتبط بررسی و اعلام نظر گردد.
- ✓ پارامترهای کنترلی: (فرکانس خرابی (دفعات خرابی در سال) - اثرات ایمنی و زیست محیطی - کیفیت محصول و خدمات - قابلیت اطمینان (دسترس پذیری عملیاتی تجهیزات) و
- ✓ برای تحقق هدف اجرای پروژه، واحدها و افراد مختلفی در سازمان باید به صورت هماهنگ کار کنند. (بخش اجرایی - خدمات فنی - برنامه ریزی - خرید - انبار)
- ✓ استعمال دقیق پارامترهای مستقل جهت تحلیل و دسته بندی کلیه قطعات (قیمت قطعات یدکی و میزان بحرانی و زمان تامین قطعه)
- ✓ به منظور دقت در اقدام اصلاحی و بهبود میبایست میزان موجودی و درخواست در جریان کلیه قطعات یدکی به درستی استخراج و استعمال گردد.

۸- بحث و نتیجه گیری

بسیاری از مسائل موجود در مدیریت زنجیره تأمین قطعات یدکی و مدیریت موجودی، می تواند تا حد قابل قبولی از طریق اتخاذ تدابیر مناسب برای دسته های مختلف قطعات بهبود یابد .طبق آنچه که در چارچوب های مدیریت قطعات یدکی پیشنهاد می شود، دسته بندی های مختلف قطعات برای این منظور انجام می شود که بتوان برای دسته های مختلف قطعات یدکی، سیاست های کنترل موجودی و خرید متناسب با ویژگی های آن دسته تدوین کرد .همانطور که در پیشینه تحقیق نیز مشاهده شد، از آنالیز MUSIC-3D استفاده های زیادی برای تدوین سیاست می شود .مشکلی که گاهی در برخی از تحقیقات مشاهده می شود، استفاده از دسته بندی سرعت مصرف (FSN) به جای دسته بندی ارزش مصرف (ABC) است که طبق مرجع اصلی این آنالیز درست نیست؛ همچنین استفاده از ارزش مصرف به جای سرعت مصرف، منجر به دخالت غیرمستقیم قیمت اقلام در این آنالیز می شود که مطلوب می باشد. در ادامه این تحقیق، در نظر گرفتن برخی شرایط خاص کشور مانند تحریم و تورم که منجر به وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدیریت قطعات یدکی می شود، می تواند سیاست های دقیق تری برای کنترل موجودی و خرید اقلام پدید آورد. همچنین می توان کمیسازی در پیاده سازی این آنالیز و ارائه راهکارهای ریاضی و آماری جهت بهینه سازی کنترل موجودی و خرید اقلام را مد نظر قرار داد.

منابع

1. Sengottuvelu, C. (2021). Multi Unit Selective Inventory Control-Three Dimensional Approach (Music 3d) To Inventory Management-A Case Study. *Industrial Engineering Journal* (Issn-0970-2555), 14(03), 19-25.
2. Sanjeevy, C And Ciby Thomas (2014). Use And Application Of Selective Inventory Control Techniques Of Spares For A Chemical Processing Plant. *International Journal Of Engineering & Technology (Ijert)*, Vol.3, Issue 10, October, 2014 Pp. 301-306
3. V.R.Girija And M.S.Bhat (2013). Multi-Unit Selective Inventory Control. A Three Dimensional Approach (Music-3d). *Cvr Journal Of Science And Technology*, December 2013, Pp.98-104
4. Ni'mah, Z., & Farida, Y. (2019). Multi-Unit Spares Inventory Control–Three Dimensional (Music 3d) Approach To Inventory Control. *Jurnal Matematika Mantik*, 5(1), 19-27.
5. Sandeep Sharda And Vijay Kumar Gorana (2016). Framework For Spare Parts Inventory Cost Optimization And Adequacy In Stock Control Management Using Techniques Of Multi-Unit Selective Inventory Control: Perspective Downstream Parts Of Petroleum Industry. *International Journal Of Science Technology And Management*. Vol. 5, Issue 04, April, 2016 .
6. Gurumurthy, A., Nair, V. K., & Vinodh, S. (2020). Application Of A Hybrid Selective Inventory Control Technique In A Hospital: A Precursor For Inventory Reduction Through Lean Thinking. *The Tqm Journal*.
7. Soorya, D. B., & Mathew, L. S. (2021). A Study On The Impact Of Inventory Control On Enhancing Organisational Efficiency Of Travancore Titanium Products Limited. *Asian Journal Of Economics, Finance And Management*, 31-40.
8. Rais, M. (2020). Perencanaan Persediaan Spare Part Shutdown Boiler Berdasarkan Analisis Multi Unit Spares Inventory Control-Three Dimensional Approach (Music-3d) Dengan Simulasi Monte Carlo (Studi Kasus Material Planning And Warehouse Section, Pt. Badak Ngl) (Doctoral Dissertation, Universitas Hasanuddin).
9. Astanti, Y. D. (2015). Analisis Klasifikasi Persediaan Suku Cadang Menggunakan Music-3d View Of Spares (Studi Kasus Perusahaan Farmasi Di Pt. Xyz). *Telematika: Jurnal Informatika Dan Teknologi Informasi*, 11(1).
10. Tunggadevi, L. (2021). Analisis Peramalan Dan Manajemen Pengendalian Persediaan Obat Di Fasilitas Kesehatan Berjaringan (Studi Kasus: Upt Poak Kabupaten Sleman) (Doctoral Dissertation, Universitas Gadjah Mada).
11. Gopalakrishnan, P., & Banerji, A. K. (2013). Maintenance and spare parts management. PHI Learning Pvt. Ltd.
12. Ramezani, S., & Hoseinzadeh, M. R. (2022). MRO Spare Parts Management and Inventory Optimization. In *Cases on Optimizing the Asset Management Process* (pp. 266-301). IGI Global.

ارائه الگویی به منظور توسعه برنامه نگهداری و تعمیرات شناورها در صنعت فراساحل (شرکت مهندسی سازه دریایی رال)

رضا کتابچی^۱

کارشناس ارشد مهندسی صنایع-دانشگاه علم و صنعت ایران

مدیر واحد برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات شرکت مهندسی سازه دریایی رال

چکیده

با توجه به اهمیت عملیاتی بودن شناورها و تجهیزات آن با قابلیت اطمینان بالا در پروژه های فراساحل و هزینه های نگهداری و تعمیرات شناورها و حساسیت این موضوع در جهت کاهش حوادث و ریسک اجرای پروژه ها در صنعت فراساحل، این حوزه به عنوان یک مزیت رقابتی شرکت های مهندسی دریایی تبدیل گردیده است. قوانین بین المللی دریانوردی و دستورالعمل ها و استانداردهای نگهداری و تعمیرات و همچنین شرایط کشور ایران از نظر تحریم تامین قطعات یدکی و استفاده از متخصصین نگهداری و تعمیرات^۲ در سطح بین الملل، برنامه ریزی در این حوزه را پیچیده تر نموده است. این الگو با استفاده از نقاط مشترک این قوانین و دستورالعمل ها و همچنین استانداردهای نگهداری و تعمیرات و بکارگیری ابزارهای مختلف در جهت سهولت برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات شناورها و تجهیزات آنها در پروژه های فراساحل اقدام نموده است در پژوهش انجام شده با استفاده از این الگو در شرکت سازه دریایی رال، میزان خرابی تجهیزات حین عملیات حدود ۸۰ درصد کاهش پیدا نموده است. همچنین با کاهش تردد های غیر برنامه ای جهت تعمیرات به خارج از ایران باعث بهینه نمودن و کاهش حدود ۴۰ درصدی هزینه ها آن گردیده است. در این مقاله یک الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)^۳ جهت آماده بودن شناورها و تجهیزات آن در صنعت فراساحل جهت انجام پروژه ها و کاهش هزینه ها ارائه می گردد.

واژه های کلیدی: الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)، شناور ها در صنعت فراساحل، استانداردهای دریایی، دستورالعمل ها و استانداردهای نگهداری و تعمیرات

۱-مقدمه

نگهداری و تعمیرات به دو روش عمده پیشگیرانه و اصلاحی تقسیم بندی می گردد. (Jaramillo Jimenez, Bouhmala, & Haugen Gausdal, 2020) سرویس نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)^۴ مجموعه فعالیت ها و روش های منظم و دوره ای است که به منظور بررسی وضعیت موجود، به روز رسانی و حفظ تجهیزات در شرایط مطلوب، انجام می شود. به نحوی که افزایش بهره وری و کاهش فرسایش تجهیزات و در نتیجه کاهش هزینه های سنگین خرید و تعمیرات قطعه برای مجموعه به حداقل برسد. نگهداری و تعمیرات اصلاحی فعالیتهایی هستند که به منظور حفظ تجهیز در سطح استاندارد به هنگام بروز شکست و یا پدید آمدن عیوب انجام می شود. این فعالیتها می توانند به منظور اصلاح و یا بهبود وضعیت تجهیزات بکار برده شوند. در این شاخه نت امکان برنامه ریزی

^۱ rketabchi1990@gmail.com

09229037264

^۲ Specialist

^۳ RAL Plan Maintenance System

^۴ Preventive Maintenance

جهت تخصیص بهینه منابع و از بین بردن عیوب وجود دارد و می توان از انبار نمودن بیهوده ابزارآلات، تجهیزات، قطعات یدکی و مواد مصرفی جلوگیری نمود و با حداقل نیروی انسانی خدمات لازم را ارائه نمود. تفاوت نت اصلاحی با نت اضطراری در حساس بودن و یا غیر حساس بودن نوع فعالیتهای نگهداری و تعمیرات تجهیزات می باشد. این جمله بدان معنا است که در اجرای فعالیتهای نت اضطراری نمی توان هیچگونه تاخیری را متصور بود ولی فعالیتهای نت اصلاحی را می توان در برنامه های سیستم نت وارد نمود و آن را در زمان مقرر انجام داد.

انواع روش های نگهداری و تعمیرات عبارت اند از نگهداری و تعمیرات اصلاحی^۱ (نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شکست^۲ و کار تا خرابی (RTF)^۳ شناخته می شود (Zaal, 2014) که همه اصطلاحات مربوط به تعمیر و نگهداری اصلاحی هستند، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات پیشگویانه (مراقب وضعیت)^۴، نگهداری و تعمیرات بهره ور جامع (TPM)^۵، نگهداری و تعمیرات ناب^۶، نگهداری و تعمیرات دوره ای^۷، نگهداری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM)^۸، سیستم های نت واکنش سریع (QRM)^۹ که در این پژوهش یک الگوی جامع و یکپارچه از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه می گردد.

اهمیت طرح ریزی سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به عنوان بخشی از استراتژی شرکت در سود اوری را نمیتوان نادیده گرفت. تعمیرات پیشگیرانه یک فعالیت کلیدی هر سازمان برای کاهش و حداقل کردن نرخ خرابی است لذا حفظ قابلیت سود اوری و توان رقابتی در بازارهای جهانی به تعمیرات پیشگیرانه نیاز خواهد داشت. (Campbell, 2006 & Langevin, Perrier)

تعمیر و نگهداری در شناورها اغلب یک سیستم نگهداری پیشگیرانه (PM) یا برنامه ریزی شده را اتخاذ کرده است که ممکن است شامل یک طرح نظارت بر شرایط باشد یا نباشد. به گفته شورتن (Shorten, 2012) تنها ۱۷ درصد از کشتی های طبقه بندی شده با سیستم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه تایید شده (PM) کار می کنند، و تنها ۱۲ درصد از آنها از نظارت بر وضعیت^{۱۰} استفاده می کنند، که حدود ۲ درصد از کشتی های طبقه بندی شده را با یک طرح نظارت مبتنی بر شرایط باقی می گذارد. در سال های اخیر، PM برای صنایعی مانند تولید، ساخت و هوانوردی اهمیت فزاینده ای پیدا کرده است که به عنوان یک ابزار راهنما برای افزایش استفاده از تجهیزات، کاهش زمان خرابی، اجتناب از تعمیر و نگهداری غیر ضروری و تخمین طول عمر باقی مانده عمل می کند. با این حال، این مورد هنوز در صنعت کشتیرانی رخ نداده است زیرا مراحل نگهداری کشتی به عنوان یک حوزه مورد نیاز برای هزینه در نظر گرفته نشده است. (Lazakis & Ölçer, 2016)

۲- مرور ادبیات

برنامه ریزی تعمیر و نگهداری برای کشتی ها و کشتی های نیروی دریایی نیازمند بهبود مستمر برای مدیریت افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری در محدودیت های موجود است. (Cullum, Binns, Lonsdale, Abbassi, & Garaniya, 2018) برنامه ریزی تعمیر و نگهداری انجام شده با استفاده از روش های فعلی نمی تواند این الزامات را بدون سرمایه گذاری مالی و منابع قابل توجه برآورده کنید. روش های فعلی شامل تعمیر و نگهداری پیشگیرانه دوره ای (PM) و چارچوب تعمیر و نگهداری متمرکز بر قابلیت اطمینان (RCM) است. PM دوره ای و PM مبتنی بر شرایط ممکن است در چارچوب RCM استفاده شود. در طول ۵۰ سال گذشته، PM دوره ای به کشتی های نیروی دریایی اجازه داده است که سطح قابل قبولی از دسترسی را حفظ کنند. (Cordle, 2017) تعمیر و نگهداری پیشگیرانه سنتی برای اصلاح خرابی های تصادفی کافی نیست (Heap, 1978 & Nowlan)

Corrective Maintenance^۱

Breakdown maintenance^۲

Run-to-failure^۳

PDM Predictative Maintenance^۴

Total Productive Maintenance^۵

Lean Maintenance^۶

Shut Down Periodic Maintenance^۷

Reliability Centered Maintenance^۸

Quick Response Maintenance^۹

Condition monitoring^{۱۰}

نگهداری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM) به عنوان یک چارچوب تعمیر و نگهداری و یک استراتژی کلی مدیریت دارایی برای بخش های انرژی، نیرو و حمل و نقل توصیه می شود. (Seow, Nguyen, Tan, & Van Oeveren, 2016) برای به حداقل رساندن استفاده از ماشین آلات و به حداقل رساندن جایگزینی غیرضروری عناصر آن، در دهه ۱۹۷۰ صنعت دفاع و هوانوردی آمریکا پیشگام CBM شد. (Ganesan, 2012 & Prajapati, Bechtel)

۳- مهمترین مشکلات سیستم های نگهداری پیشگیرانه موجود

با جستجو در منابع موجود به این نتیجه خواهیم رسید که سیستم های موجود، محدودیت ها و مشکلات زیر را دارا می باشند:

- جامع نبودن سیستم های موجود و استفاده از سیستم های مستقل از یکدیگر
- نداشتن راه حل برای کشورهای که با محدودیت تحریم روبه رو می باشند
- با توجه به محدودیت ها و ثابت بودن قالب اکثر سیستم های موجود، شخصی سازی برای هر شرکت مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد بوده و گاه انتظار مهم از استقرار سیستم، به ناچار نادیده گرفته می شود.
- یکپارچگی اطلاعات و بسته های کاری مربوطه و ارتباط با سایر سیستم های مورد نیاز برای مدیریت سیستم نگهداری پیشگیرانه در اکثر ساز و کارها و یا نرم افزارهای موجود دیده نمی شود.
- بیشتر سیستم ها نگهداری و تعمیرات تهیه شده، از منابع خارجی کپی برداری / الهام گرفته شده و غامض بودن امکانات و مطالب راهنمای موجود، کاربران را با مشکلات متعدد روبرو می نماید.

۴-الگوی جامع مدیریت نگهداری پیشگیرانه

۴-۱-هدف

هدف از ارائه این الگو، عملیاتی بودن شناورها با قابلیت اطمینان بالا در زمان پروژه های فراساحل می باشد. همچنین کارآمدی و یکپارچه سازی اطلاعات و مدیریت عوامل مهم و تاثیرگذار بر نگهداری و تعمیر مناسب تجهیزات که منجر به کاهش توقفات پیش بینی نشده، افزایش راندمان آنها و نتیجتاً کاهش هزینه های مربوطه و آمادگی در زمان خرابی های ناگهانی خواهد بود.

۴-۲-دامنه کاربرد

الگوی مدیریت نگهداری پیشگیرانه (RPMS)، نگهداری انواع تجهیزات مراکز صنعتی و خدماتی مستقر در خشکی، کشتی ها، تاسیسات دریایی و غیره را در بر گرفته و زیربخش های مربوطه متناسب با نیازمندی های تعریف شده، توسعه و استقرار می یابند.

۴-۳-مراجع و استانداردها

الگوی مدیریت نگهداری پیشگیرانه (RPMS) بر اساس مفاد و الزامات استانداردهای مدیریت دارایی ISO 55000 و PAS 55، استاندارد ISM¹، استاندارد مدیریت کیفیت ISO9001 استاندارد فرایندهای نگهداری و تعمیرات EN 17007 و نیز تجارب استقرار سیستم های نگهداری پیشگیرانه² (PMS) طراحی و توسعه یافته است. در این طرح با علاوه بر اینکه هیچ منافاتی با استاندارد های در این حوزه ندارد بلکه با استفاده از اصول موجود در این استانداردها توانسته زمینه های اطلاعاتی مفیدی را در جهت پیاده سازی استاندارد های فوق در سازمان ایجاد نماید.

¹ International Safety Management

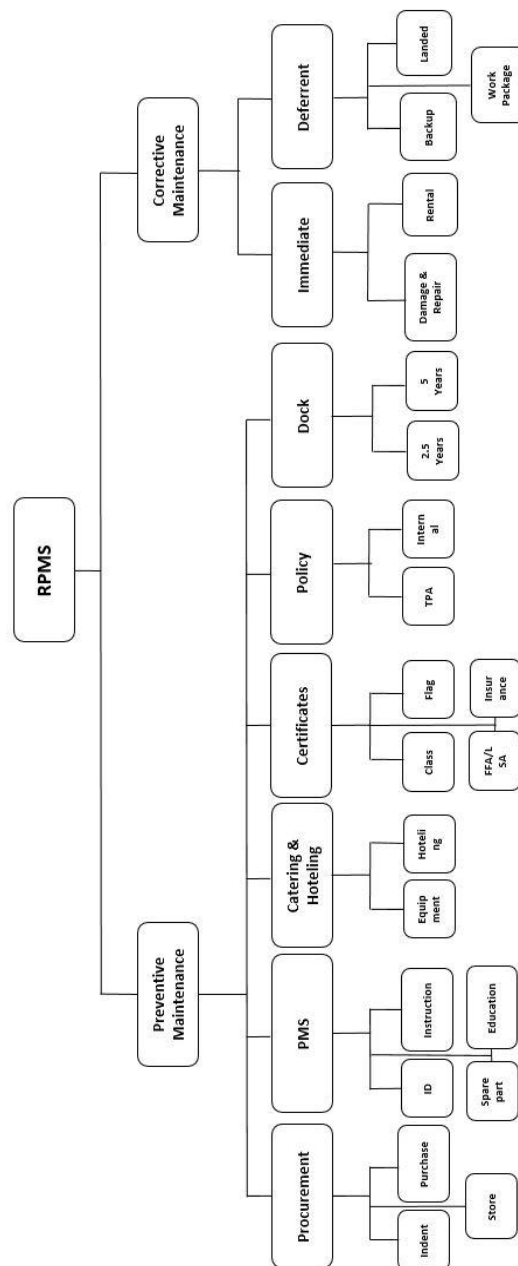
² Preventive Maintenance System

۴-۴- الزامات مهم در الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)



شکل ۳: الزامات مهم در الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)

۵-۴- بخش های الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)



شکل ۴: بخش های الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)

قابل ذکر است برخی از زیر سیستم های شکل بالا دارای همپوشانی بوده ولی به علت اهمیت آنها در برنامه ریزی و تعمیرات نگهداری شناورها به صورت مستقل در نظر گرفته شده است که در ادامه به معرفی این بخش ها خواهیم پرداخت :

۱-۵-۴- نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه^۱:۱-۵-۴-۱- تدارکات^۲

شناسایی و کدینگ کالا، ثبت ورود و خروج کالا در انبارها، تعریف ذخیره اطمینان (بر اساس زمان تحویل و میزان مصرف) و ارائه آخرین موجودی کالا در این زیر سیستم وجود دارد. در این زیر سیستم، بر اساس موجود کالا و تطابق با ذخیره اطمینان تعریف شده، لیست کسری ها به عنوان اطلاعات پایه ایندنت استخراج و در اختیار واحد متقاضی قرار می گیرد.

با توجه به ارتباط فی مابین دستورالعمل نگهداری تجهیزات و خرید اقلام با توجه به زمان تحویل اقلام، در دسترس بودن و بودجه های مورد نیاز به اتخاذ برنامه های بهینه دارد. لذا وظیفه اصلی زیر سیستم تدارکات موجود بودن اقلام در زمان مورد نیاز و کاهش هزینه های انباشت کالا در انبارها می باشد.

در این بسته، روش های اجرای خرید کالا، شناسایی و ارزیابی تامین کنندگان و نیز ممیزی فرایند خرید، فرمت ها و بانک های اطلاعاتی لازم بر مبنای استاندارد ISO9001 ارائه می گردد. همچنین روش کنترل پروژه کالا از زمان دریافت درخواست کالا (ایندنت) تا زمان تحویل به مقصد به انضمام بانک اطلاعاتی مربوطه، در اختیار واحدهای نگهداری و تعمیرات قرار می گیرد.

۱-۵-۴-۲- سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه^۳ (PMS):

این بخش به عنوان یکی از بخش های اصلی این الگو که شامل چهار ارکان بوده می باشد که در زیر به تشریح آنها خواهیم پرداخت:

- شناسای تجهیزات^۴

در قدم اول تجهیزاتی که می خواهیم برای نگهداری و تعمیرات آنها سیستم ایجاد نموده را شناسای نماییم. برای این منظور می بایست ابتدا تجهیزات اصلی و سپس اجزای تشکیل دهنده هر دستگاه را هم شناسایی نموده و بررسی نماییم.

در کارت شناسایی یا شناسنامه تجهیزات مشخصات کلی با انضمام مشخصات فنی آنها ثبت می گردد. این کارت شامل اطلاعاتی است نظیر شماره صفحه، نام دستگاه، نوع دستگاه، سازنده، شماره سریال و ... کارت ثبت می گردد.

- دستورالعمل نگهداری تجهیزات:

با استفاده از دفترچه های راهنما هر یک از تجهیزات و استفاده از نظرات خبره برنامه زمانبندی فعالیتهای نگهداری از تجهیزات را تهیه می گردد. این دستورالعمل ها می بایست بر اساس متریکال موجود در بازار ایران (اقلامی که خریداری می گردد) بومی سازی گردد. خاطر نشان می گردد یکی از اصلی ترین و مهمترین قسمت های مدل این بخش می باشد که می توان گفت خط اصلی برنامه تعمیرات و نگهداری تجهیزات را مشخص می نماید.

- قطعات یدکی مورد نیاز:

بر اساس دستورالعمل تهیه شده لیست قطعات یدکی، مصرفی و ابزار آلات مورد نیاز جهت اجرا دستورالعمل ها تهیه می گردد. در این قسمت با توجه به حساسیت تجهیزات ممکن است یک تجهیز یا قسمتی از آن نیاز به تجهیزات پشتیبان داشته باشد که در این قسمت ثبت می گردد.

این بخش با بخش تدارکات ارتباط مستقیم داشته و هشدارهای لازم را در زمان های مشخص شده به زیر سیستم تدارکات می دهد تا سفارش گذاری اقلام صورت پذیرد.

¹ Preventive Maintenance

² Procurement

³ Preventive Maintenance System

⁴ Identification

- آموزش پرسنل نگهداری و تعمیرات

یکی از قسمت های مهم هر مدل از سیستم های نگهداری و تعمیرات بخش نیروی انسانی آن می باشد. در واقع نیروی انسانی متخصص میتواند کاهش چشمگیری در هزینه های نگهداری و تعمیرات و همچنین افزایش زمان عملیاتی تجهیزات نماید. لذا آموزش و افزایش مهارت آنها باعث افزایش بهره وری نیروی انسانی و متعاقب آن افزایش کارایی تجهیزات می گردد.

۳-۱-۵-۴- مدیریت خدمات هتل داری کمپ ها و شناورها و غیره^۱

در شناور ها بجز نگهداری از تجهیزات و آماده بکار بودن آنها می بایست استانداردها سرویس دهی به نفرات رعایت گردد. این استانداردها در دو بخش تجهیزات مورد نیاز هر کابین با توجه به رنگ نفرات و همچنین سرویس دهی به نفرات وجود دارد. در این بخش، بر اساس خط مشی های شرکت متقاضی، استانداردهای هتل داری تدوین شده و با تهیه روش اجرایی و فرمت های لازم، گزارش گیری و کنترل اجرای مفاد آنها صورت می گیرد. همچنین با توجه به تجارب حاصله، سازوکار گزارش گیری از انبارهای پروژن، رصد مصرف اقلام و درخواست اقلام پروژن از دفتر مرکزی، قابل ارائه می باشد.

۴-۱-۵-۴- گواهی نامه ها و مدارک^۲:

شناور بدون گواهینامه هیچ ارزشی ندارد و مهمترین فعالیت هر شرکت که شناور خریداری می نماید تمدید بموقع و در زمان بهینه گواهینامه ها می باشد. گواهینامه های شناور ها در چهار دسته (کلاس^۳، پرچم^۴، ایمنی^۵ و بیمه) تقسیم بندی می گردد در این زیر سیستم، مدارک و گواهینامه های تجهیزات با جزییات لازم من جمله تاریخ انقضا ثبت و با گزارش دهی های متنوع، وضعیت آنها مدیریت می گردد. هدف از وجود این زیر سیستم در برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات شناور ها این می باشد که جهت تمدید گواهینامه ها می بایست تجهیزات هم عملیاتی بوده و هم استاندارد های دریانوردی را رعایت نماید که نیازمند برنامه ریزی یکپارچه جهت بهینه نمودن تردد شناورها جهت تمدید گواهینامه ها می باشد.

۵-۱-۵-۴- سیاست ها^۶

این بخش نظارتی بر حسن انجام برنامه تعمیرات و نگهداری می باشد و به دو بخش بازررسی داخلی و خارجی تقسیم بندی می گردد که بر اساس سیاست های نگهداری و تعمیرات شرکت در بازه های زمانی مختلف برنامه ریزی می گردد. با توجه به وجود تجهیزات پیشرفته و با تکنولوژی بالا در پروژه های فراساحل و به صرفه نبودن استخدام نفرات متخصص هر تجهیز، از نفرات بیرون سازمان جهت نظارت بر حسن انجام برنامه های نگهداری و تعمیرات در بازه های زمانی مختلف استفاده می گردد. برای ساینز تجهیزات که حالت عمومیت داشته و در تمام شناور ها موجود بوده از نفرات داخلی سازمان جهت نظارت استفاده می گردد. نتایج این بازررسی ها جهت بروز رسانی دستورالعمل ها و برنامه های نگهداری و تعمیرات بسیار موثر می باشد.

¹ Catering & Accommodation

² Certificates

³ Class

⁴ Flag

⁵ LSA/FFA

⁶ Policy

۶-۱-۵-۴- تعمیرات حوضچه خشک^۱

در کنار ساخت و خرید کشتی‌های جدید، تعمیر و نوسازی کشتی‌های کوچک و بزرگ کار کرده نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. تعمیر کشتی‌ها معمولاً یا در سفر صورت می‌گیرد، یا به صورت دوره‌ای و در یک محیط مخصوص انجام می‌شود. تعمیراتی که به صورت غیر متمرکز و سفری صورت می‌گیرند، به حوضچه خشک نیازی ندارند، اما تعمیرات دیگر که در بین فعالان این صنعت به عملیات «داکینگ کشتی» معروف است، در یک حوضچه‌ی خشک صورت می‌گیرد. عملیات داکینگ، عملیات ورود کشتی‌ها به حوضچه خشک به‌منظور تعمیر یا نوسازی کردن است که این عملیات با نظم، دقت و ظرافت خاصی انجام می‌شود و در صنعت کشتیرانی و در حوزه دریایی، عملیات مهمی تلقی می‌شود. عملیات داکینگ کشتی تنها زمانی صورت می‌گیرد که حوضچه خالی از آب است و به محض ورود آب به حوضچه، شناور، محل را از درِ باز شو ترک خواهد کرد.

این بخش پیش نیازی تمديد گواهینامه می‌باشد. برنامه ریزی در این بخش بصورت پروژه ای صورت می‌پذیرد و تمام ارکان پروژه مانند نقطه شروع و پایان، موقتی بودن و منحصر به فرد بودن و... را دارا می‌باشد. تعمیرات حوضچه خشک (تعمیرات اساسی) در بازه‌های زمانی ۲.۵ ساله و ۵ ساله صورت می‌پذیرد ولی برنامه ریزی‌های آن از ماه‌ها قبل انجام شده تا در مدت زمان بهینه و با کمترین هزینه صورت پذیرد. با توجه به تحریم‌ها تامین قطعات یدکی و هماهنگی با ورکشاپ‌های تخصصی از خارج از کشور سختی‌های برنامه ریزی این بخش را دوچندان نموده است.

زمان انجام تعمیرات اساسی زیرآبی شناورها در **داک یاردها** از اهمیت بالایی از نظر مالی برای مالکان شناورها چه خصوصی و چه دولتی دارد هر شناوری که از چرخه عملیاتی و بهره‌وری و کسب درآمد بدلیل تعمیرات خارج سرویس و بروی داک مستقر گردد به معنای حذف درآمد زیادی آن و افزایش هزینه‌های سربار می‌باشد و این مهم که مورد توجه مالکان شناور بواسطه کاهش زمان استقرار شناور بر روی داک می‌باشد که امروزه بواسطه مشکلات عدیده‌ای نظیر نحوه مدیریتها، بکارگیری از نیروی انسانی عدم تمکنهای مالی و... این خواسته مهم و الزام آور جهت مشتریان مالکان شناورها از سوی **داک یاردها** محقق نمی‌گردد. و همواره **داک یاردها** با **افزایش زمان** در تعمیرات مورد تعهد و توافق اولیه خود را نقص و پایبند به آن نمی‌باشند و این معضل که موجب گرایش و رجوع صاحبان شناورها به سایر داک یاردهای کشورهای حاشیه خلیج فارس گردیده است.

۲-۵-۴- نگهداری و تعمیرات اصلاحی^۲:۱-۲-۵-۴ نگهداری و تعمیرات فوری^۳

نگهداری و تعمیرات اضطراری هنگامی که یک دارایی یا قطعه‌ای از تجهیزات دچار خرابی غیرمنتظره یا تغییر در وضعیت می‌شود که منجر به تهدید فوری برای سلامت و ایمنی باشد، مورد نیاز است. نگهداری و تعمیرات اضطراری همچنین به عنوان نگهداری و تعمیرات خرابی نیز شناخته می‌شود. شرایط اضطراری تقریباً همیشه بدون هشدار اتفاق می‌افتند، بنابراین نت اضطراری را نمی‌توان برنامه‌ریزی کرد. اما هر برنامه نت باید شامل برنامه‌هایی برای مقابله با شرایط اضطراری در صورت وقوع باشد. نگهداری و تعمیرات اضطراری اغلب با انواع دیگر نت برنامه ریزی نشده اشتباه گرفته می‌شود. متداول‌ترین اشتباهات بین نگهداری و تعمیرات اضطراری، واکنشی و ناموفق رخ می‌دهد. شباهت‌های زیادی بین هر سه نوع نت وجود دارد، بنابراین به راحتی می‌توان فهمید که چرا آنها قابل تعویض هستند. با این حال، چند تفاوت کلیدی وجود دارد که آنها را منحصر به فرد می‌کند.

نت واکنشی زمانی که خرابی به طور غیرمنتظره و بدون هیچ برنامه‌ای برای جلوگیری یا رفع آن رخ دهد اتفاق می‌افتد. تفاوت بین نت واکنشی و اضطراری در زمان و فوریت تعمیرات نهفته است. نگهداری و تعمیرات واکنشی زمانی آغاز می‌شود که تجهیزات با مشکل تعمیر و نگهداری در سطح خرابی از هر نوع (نه فقط خرابی کامل) مواجه می‌شوند و می‌تواند روی هر نوع دارایی (نه فقط آنهایی که بزرگترین خطر را برای تولید یا ایمنی دارند) اتفاق بیفتد.

¹ Dock² Corrective Maintenance³ Immediate Maintenance

در این بخش تجهیزاتی که بصورت ناگهانی خراب شده و با توجه به شرایط تجهیز قابلیت نگهداری تجهیز پشتیبان روی شناور نمی باشد قرار می گیرند. لذا این گونه خرابی ها به دو روش برطرف خواهند شد : ۱- تعمیر تجهیز روی شناور ۲- استفاده از تجهیز پشتیبان یا اجاره ای که می بایست از خشکی به شناور ارسال گردد. این گونه نگهداری و تعمیرات معمولاً غیر قابل برنامه ریزی بوده و تنها میتوان پیش بینی لازم در جهت برطرف نمودن آنها در زمان وقوع را انجام داد.

خرابی ها و توفقات پیش بینی نشده، علل بروز و فعالیت های تعمیراتی انجام شده توسط نیروهای فنی داخلی و یا کارگاه های فراخوانده شده از بیرون^۱ در این بخش ثبت و برای بهره برداری های آینده و اتخاذ تدابیر و یا اقدامات اصلاحی لازم، در اختیار کاربران قرار می گیرد.

۲-۵-۴- نگهداری و تعمیرات معوق^۲:

نگهداری و تعمیرات معوق، به تعمیر زیرساخت ها و دارایی هایی گفته می شود که به دلیل کمبود بودجه و محدودیت سرمایه و یا عدم امکان، به تاخیر می افتند یا متوقف می شوند.

تحقیقات مستدل نشان می دهند که به تاخیر انداختن فرآیند تعمیر و نگهداری، می تواند مخارج پیش رو و هزینه های سرمایه ای را تا ۶۰۰ درصد افزایش دهد. به تاخیر انداختن تعمیرات مهم می تواند پیامدهای جدی من جمله تعمیر و نگهداری اضطراری، را به دنبال داشته باشد. با این وجود، متأسفانه تعمیر و نگهداری معوق از انواع استراتژی های نگهداری و تعمیرات است

این گونه نگهداری و تعمیرات معمولاً بر اثر خرابی های ناگهانی صورت می پذیرد و امکان انجام فوری آنها وجود ندارد ولی در الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)، با استفاده از تجهیزات پشتیبان می توان راه اندازی دوباره آن قسمت را صورت داد تا در زمان مناسب و پیاده نمودن تجهیز خراب کار تعمیرات آنها را ادامه داد و یا اینکه به عنوان یک بسته کاری مجزا برای آن برنامه ریزی نمود و در زمان مناسب انجام داد. لازم به ذکر است این گونه نگهداری و تعمیرات معمولاً قابل برنامه ریزی می باشد و می توان تمهیدات لازم جهت برطرف نمودن آنها را پیش بینی نمود.

۶-۴- پیاده سازی استاندارد های مدیریت دارایی ISO 55000 و PAS 55:

از جمله بخش های تکمیلی در الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)، سفارشی سازی، طراحی فرآیندها، تدوین روش های اجرایی، آموزش و استقرار استاندارد مدیریت دارایی بر مبنای دو مرجع ISO 55000 و PAS 55 می باشد.

استاندارد ایزو ۵۵۰۰۰ نمای کلی از سیستم مدیریت دارایی های فیزیکی مبانی و واژگان و منافعی که از پیاده سازی مدیریت دارایی های فیزیکی حاصل می شود را ارائه کرده و زمینه لازم را برای پیاده سازی استانداردهای ISO 55001 و ISO 55002 فراهم می کند. استاندارد ISO 55000 بیان می کند که منافع مدیریت دارایی می تواند شامل موارد زیر باشد اما محدود به این موارد هم نیست:

- بهبود بازگشت سرمایه و کاهش هزینه ها همزمان با حفظ ارزش دارایی
- توانمندسازی سازمان جهت بهبود تصمیم گیری و متوازن کردن هزینه ها، ریسک ها و فرصت ها
- کاهش اتلاف های مالی، بهبود سلامت و ایمنی، افزایش اعتبار و وجهه و حداقل سازی اثرات زیست محیطی
- اطمینان از عملکرد دارایی ها و در نتیجه ارائه خدمات و محصولات بهبود یافته

در تعریف استاندارد PAS 55 با هدف تحقق برنامه استراتژیک سازمانی، مدیریت دارایی های فیزیکی مجموع شیوه ها و فعالیت هایی منظم و هماهنگ که سازمان از طریق آن ها دارایی ها و سیستم های دارایی ها و نیز هزینه ها و ریسک ها و عملکرد آن ها را به طور بهینه و

¹ Workshop

² Deferred Maintenance

پایدار و در طی چرخه عمر دارایی‌ها مدیریت می‌کند، است. در نگاه این استاندارد سیستم مدیریت دارایی‌های فیزیکی بر اساس اصول پایه‌ای لزوم یکپارچگی، نگاه کل‌نگرانه و نظام‌مند، فراگیر بودن در کل فرایندهای چرخه عمر دارایی‌های فیزیکی، توجه به ریسک محوری و بهینه بودن تصمیمات و در نظر گرفتن اصول توسعه پایدار و حفظ محیط زیست بنا می‌شود.

سیستم مدیریت دارایی نیازمند اطلاعات دقیقی از دارایی‌هاست اما یک سیستم مدیریت دارایی فراتر از یک سیستم اطلاعات مدیریت (IMS) است که این اطلاعات را می‌توان از الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS) دریافت نماید. ساختار الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS) به گونهای طراحی گردیده که با الزامات این استاندارد هم راستا باشد.

۷-۴- مزایای الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)

با تحلیل مشکلات یاد شده و برگزاری جلسات فراوان کارشناسی، مهندسی روش‌ها و نیز بهره‌گیری از مفاهیم و الزامات استانداردهای مدیریت دارایی، ISO9001 و ISM، الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS) طراحی و مزیت‌های زیر را به کاربران ارائه نموده است:

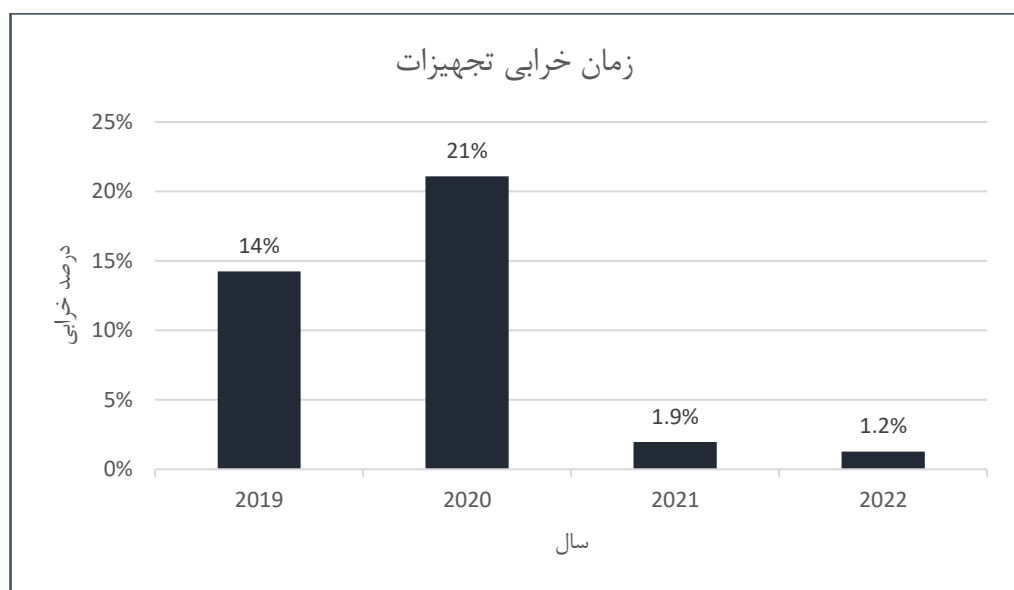
- این الگو با بررسی نیازهای اکثر استفاده‌کنندگان و با هدف همپوشانی آنها تهیه شده و کمترین شخصی سازی را نیاز دارد که خود منجر به تسریع در استقرار آن در شرکت‌های متقاضی می‌گردد.
 - با توجه به زیر سیستم‌های اصلی و تکمیلی که قبلاً تشریح گردید، یکپارچگی و پیوستگی اطلاعات و مستندات به منظور مدیریت کارآمد سیستم نگهداری پیشگیرانه تجهیزات از مهمترین مزیت‌های حاصله است.
 - استفاده از کلیه امکانات فراهم شده در این سیستم، به آسانی مقدور است.
 - با توجه به قابلیت ارائه برنامه‌های متنوع نگهداری پیشگیرانه بر اساس متغیرهای زمان و ساعات کارکرد، داده‌های لازم برای خرید، تامین نیروی انسانی مورد نیاز، اعزام کارگاه‌های تخصصی^۱ رزرو حوزچه خشک و غیره را به منظور برنامه ریزی‌های پیش رو در اختیار کاربران می‌گذارد.
 - ارائه مشاوره تخصصی و فنی برای پردازش اطلاعات ورودی، تحلیل نتایج عملکرد نگهداری و تعمیر تجهیزات و گزارش‌گیری، در حوزه پشتیبانی سیستم وجود دارد. شایان ذکر است که مهمترین و زمانبرترین فاز بهره‌برداری از هر سیستم PMS، گردآوری داده‌ها و مستندات معتبر و مرتبط، پایش و دسته‌بندی، فرمت نمودن نتایج و سپس ورود به سیستم است که اگر به کیفیت مناسب صورت نگیرد، طبیعتاً نتایج حاصله مطلوب نخواهد بود و بدین سبب، استفاده از پشتیبانی فنی و تخصصی خود را به تمام کاربران توصیه می‌نماییم.
 - کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و افزایش عملیاتی بودن تجهیزات
 - بهینه نمودن تردد شناور در جهت نگهداری و تعمیرات تجهیزات به خارج از کشور
- به تعبیری، استقرار الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS)، یک سرمایه‌گذاری سودآور است.

¹ Workshop

۵- نتیجه گیری

الگوی برنامه ریزی و نگهداری و تعمیرات (RPMS) طراحی شده با بکار گیری تمام حوزه های نگهداری و تعمیرات شناور ها در صنعت فراساحل و یکپارچگی آنها توانسته مشکلات این حوزه را تا حدودی برطرف نماید و یک الگوی جامع در این حوزه را ایجاد نماید. برنامه ریزی برای شناور ها بالاخص در پروژه های فراساحل دارای ابعاد بیشتری نسبت به دیگر برنامه ریزی های نگهداری و تعمیرات داشته که با یکپارچه سازی و اضافه نمودن استانداردها به دستورالعمل های نگهداری و تعمیرات باعث بهینه سازی و سهولت در کنترل و برنامه ریزی آنها گردیده است.

مهمترین نکته در شرکت هایی که پروژه های خود را با شناور های فراساحل انجام می دهند عملیاتی بودن این شناور ها با قابلیت اطمینان بالا در زمان عملیات باشد زیرا هزینه های توقف عملیات در پروژه های فراساحل بسیار زیاد بوده لذا عدم خرابی شناورها و تجهیزات روی آن به عنوان مزیت رقابتی آنها محسوب می گردد. این الگو با ایجاد هماهنگی بین تمام بخش ها و در نظر گرفتن محدودیت ها توانسته گامی در جهت بهبود برنامه های نگهداری و تعمیرات بردارد.



نمودار ۱: زمان خرابی تجهیزات در زمان اجرای پروژه های فراساحل

با توجه به استقرار این مدل در سال ۲۰۲۱ مشاهده می گردد زمان خرابی تجهیزات به طور چشمگیری در زمان های عملیات های دریایی کاهش پیدا نموده که این امر علاوه بر کاهش هزینه ها باعث افزایش اعتبار این شرکت در جهت عملیاتی بودن تجهیزات و انجام پروژه ها در زمان برنامه ریزی شده گردیده است.

مراجع

- Cordle, J. (2017). Revitalizing shipboard PMS: out with the MIP, in with the App. Naval Engineers.
- Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018). Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. Ocean Engineering.
- Jaramillo Jimenez, V., Bouhmala, N., & Haugen Gausdal, A. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. Ocean Engineering and Science, 2.
- Lazakis, I., & Ölçer, A. (2016). Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment. Engineering for the Maritime Environment .
- Nowlan, F., & Heap, H. (1978). Reliability-centered maintenance. United Air Lines Inc, San Francisco Ca.
- Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. (2006). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I: System design for spreading and plowing. Computers & Operations Research .
- Prajapati, A., Bechtel, J., & Ganesan, S. (2012). Condition based maintenance: a survey. Quality in Maintenance Engineering.
- Seow, K., Nguyen, L., Tan, K., & Van Oeveren, K.-J. (2016). Moving towards reliability-centred management of energy, power and transportation assets. Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification, (pp. 1-7).
- Shorten, D. C. (2012). Marine Machinery Condition Monitoring. Why has the shipping industry been slow to adopt. TECHNICAL INVESTIGATIONS DEPARTMENT (ed.). Lloyd's Register EMEA, United Kingdom.
- Zaal, T. (2014). Profit-driven maintenance for physical assets. Maj Engineering Publishing.

مدیریت دارایی ناوگان ترانسفورماتوری مبتنی بر شاخص سلامت استخراج شده از متغیرهای کیفی روغن و گاز کروماتوگرافی

رشید دهسنگی

چکیده

تجزیه و تحلیل آزمایشات گازهای محلول در روغن و آزمایشات کیفی روغن از روش‌های شناخته شده در شناسایی عیوب داخلی ترانسفورماتورها است. با توجه به اینکه عیوب داخلی در مراحل پیشرفته به طور همزمان در چندین متغیر، تغییرات ایجاد می‌کنند، در این مقاله سعی شده است به کمک تعریف ضریب همبستگی بین متغیرها، شاخص‌های جدیدی معرفی شوند. به این ترتیب وقوع همزمانی در متغیرهای مختلف شناسایی و میزان هم‌سویی آن‌ها بررسی می‌گردد. به هر یک از این ضرایب همبستگی وزن مشخصی با توجه به اهمیت آن‌ها داده می‌شود و ضرایب همبستگی که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین متغیرها باشند، در محاسبه شاخص سلامت هر ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت با توجه به اهمیت هر ترانسفورماتور در شبکه و همچنین شاخص سلامت محاسبه شده، هدف این مقاله که ارائه یک ابزار مدیریت دارایی مبتنی بر پایش وضعیت است، محقق می‌گردد. بنابراین ترانسفورماتورهایی که احتمالاً در افق‌های زمانی آینده نیاز بیشتری به اقدام اصلاحی، تعمیرات و یا جایگزینی در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها دارند، شناسایی می‌شوند و به این وسیله با انجام اقدامات متناسب و اولویت بندی شده، می‌توان از خاموشی مصرف کنندگان و یا توقفات تولید برنامه ریزی نشده در کارخانه‌جات صنعتی پیشگیری کرد. به منظور بررسی روش ارائه شده، اطلاعات مربوط به آزمایشات گاز کروماتوگرافی و کیفی روغن 4 ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی و 3 ترانسفورماتور قدرت موجود در مجتمع فولاد خراسان، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن در بخش سوم این مقاله نشان داده شده است. مدل سازی ریاضی و محاسبات روش ارائه شده در این مقاله، به کمک نرم افزار متلب انجام شده است.

کلمات کلیدی: ضریب همبستگی، آزمایشات گاز کروماتوگرافی، آزمایشات کیفی روغن، شاخص سلامت، پایش وضعیت ترانسفورماتور، مدیریت دارایی

۱- مقدمه

ترانسفورماتور قدرت نقش مهمی در هر سیستم قدرت ایفا می‌کند. خرابی ترانسفورماتور ممکن است منجر به حوادث جدی و آسیب غیرقابل پیش‌بینی به سیستم قدرت شود. بنابراین، پیش‌بینی دقیق خرابی‌های احتمالی ترانسفورماتورهای قدرت امری ضروری است. در هر سیستم الکتریکی مانند شبکه انتقال، شبکه توزیع، کارخانه‌جات و صنایع، ترانسفورماتورها یکی از گران‌قیمت‌ترین تجهیزات آن سیستم می‌باشند. خرابی و از مدار خارج شدن هر ترانسفورماتور علاوه بر زیان مالی ناشی از خرید و جایگزینی و یا هزینه تعمیرات آن، توقف تولید در صنایع را نیز به همراه خواهد داشت. از این رو کاهش توقفات ناشی از خرابی ترانسفورماتورها همواره یکی از اهداف اصلی مهندسان برق در صنایع مختلف می‌باشد. به طور کلی خرابی ترانسفورماتور ناشی از عیوب مختلف ساخت، شرایط عملیاتی نامناسب و فرآیندهای بهره برداری پر تنش است [۱]. در این میان اکثر خرابی‌ها ناشی از ترکیبی از تنش‌های عملیاتی، به عنوان مثال، الکتریکی، مکانیکی و حرارتی است که بر اجزای ترانسفورماتور اثر می‌گذارند. اگر یک یا تعدادی از این تنش‌ها از حدود طراحی و عملیاتی فراتر رود، ممکن است عمر مفید باقی مانده ترانسفورماتور به شدت کاهش یابد و یا خرابی رخ دهد [۲].

عمر مفید یک ترانسفورماتور به عوامل متعددی مانند تغییرات بار، شرایط محیطی و تعداد و شدت خطاهایی که در طول زمان تحمل کرده است، بستگی دارد. خطاهایی مانند اتصال کوتاه خط متصل به ترانسفورماتور و یا خطاهای داخلی ترانسفورماتور می‌توانند بر خصوصیات فنی اجزای مختلف ترانسفورماتور به ویژه عایق آن تأثیر گذار باشند [۳]. از این رو ارزیابی وضعیت سلامت عایقی ترانسفورماتور به افزایش قابلیت اطمینان، افزایش راندمان و افزایش طول عمر مورد انتظار، کمک می‌کند [۴]. استانداردهایی مانند مرجع [۵] بیان می‌کنند که طول عمر مورد انتظار یک ترانسفورماتور قدرت نزدیک به ۲۰ سال است. سیستم عایق ترانسفورماتور اساساً از روغن معدنی،

کاغذ و سایر مواد سلولزی تشکیل شده است. حتی اگر ترانسفورماتورها در شرایط عالی نیز کار کنند، سیستم عایقی آنها عمر محدودی دارد. امروزه با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه‌های نگهداری و تعمیرات و همچنین ساخت ترانسفورماتورها صورت گرفته است، عمر مورد انتظار یک ترانسفورماتور در حدود ۲۵ تا ۴۰ سال تخمین زده می‌شود [۶].

بخش قابل توجهی از انواع خطاهایی که در ترانسفورماتورها رخ می‌دهند، دارای شواهدی هستند که در روغن مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه ترانسفورماتور در حال کار در معرض انواع تنش‌های الکتریکی و حرارتی قرار دارد، روغن ترانسفورماتور می‌تواند در نتیجه این تنش‌ها تجزیه شده و گاز تولید کند. به نحوی که ماهیت و مقدار این گازها ممکن است نشان دهنده نوع و درجه ناهنجاری موجود در داخل ترانسفورماتور باشد. تجزیه و تحلیل گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور (DGA) یکی از روش‌های مهم شناسایی عیوب داخلی ترانسفورماتورها است [۷]، [۸]. از نظر تئوری، با استفاده از DGA، می‌توان عیوب داخلی مانند تخلیه الکتریکی شدید، تخلیه الکتریکی جزئی، اضافه بار شدید و گرمای بیش از حد حاصل از اضافه بار را در سیستم عایق تشخیص داد.

مرجع [۹] فهرست کدگذاری شده‌ای از عیوب قابل تشخیص با تجزیه و تحلیل گازهای محلول را ارائه می‌دهد و مرجع [۱۰] نیز به کمک جدول‌های چهارگانه‌ای ترانسفورماتورها را از نظر سطوح مجاز گازهای مختلف طبقه‌بندی می‌کند. چندین تکنیک کلاسیک برای تفسیر DGA مانند راجرز^۲، دورنبرگ^۳ و مثلث دوآل^۴ در ۳۰ سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]، [۱۲]. اکثر این روش‌ها بر اساس نسبت گازها مانند نسبت استیلن به اتیلن، نسبت متان به هیدروژن و... توسعه یافته‌اند. با این حال، همه این روش‌ها در شرایطی که از وضعیت غیر عادی ترانسفورماتور اطلاع داریم و تنها هدف تشخیص نوع خطا می‌باشد، کارایی دارند و به منظور بررسی طولانی مدت شاخص سلامت ترانسفورماتور استفاده نمی‌شوند [۱۳]. بنابراین DGA به تنهایی اطلاعات کافی برای بررسی شاخص سلامت ترانسفورماتور را ارائه نمی‌دهد، بلکه دستیابی به این مهم، نیازمند بررسی همزمان عوامل و متغیرهای دیگر نظیر متغیرهای کیفی روغن است. مرجع [۱۴] فهرستی از پارامترهای کیفی روغن ترانسفورماتور را به همراه حدود مجاز آنها ارائه می‌دهد.

در مرجع [۱۵] با استفاده از اطلاعات مربوط به بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، آزمایشات گازکروماتوگرافی، آزمایشات کیفی روغن و همچنین وضعیت لوازم جانبی ترانسفورماتور نظیر پوشینگ‌ها، سیستم خنک‌کننده و... شاخص سلامت ترانسفورماتور محاسبه می‌شود. به تمام متغیرها وزن داده می‌شود و به وضعیت هر متغیر نیز نمره‌ای اطلاق می‌گردد و در نهایت یک نمره کلی از وضعیت سلامت ترانسفورماتور تحت عنوان شاخص سلامت بدست می‌آید. اما جمع‌آوری تمام دیتاهای مورد نیاز این روش، در عمل کاری بسیار دشوار می‌باشد.

مرجع [۱۶] از روش‌های یادگیری ماشین (ML)^۵ کمک گرفته و ابتدا به کمک تکنیک‌های اولویت‌بندی و دسته‌بندی، متغیرهای مهم را از میان تمام متغیرها شناسایی می‌کند. در این مرجع نشان داده می‌شود که متغیرهای رطوبت، عدد اسیدی، ولتاژ شکست و دو فوران^۶ بیشترین اهمیت را در شناسایی سلامت ترانسفورماتور دارند و سپس به کمک دسته‌بندی دو مرحله‌ای به صورت کیفی، وضعیت ترانسفورماتور را خوب، بد و یا متوسط اعلام می‌کند. اما در این مرجع، از اثر دیگر متغیرهای مهم نظیر گازهای محلول در روغن صرف نظر شده است. همچنین روش معرفی شده در مرجع [۱۶] نیازمند تعداد دیتاهای بسیار بالا می‌باشد که در عمل دستیابی به آن بسیار دشوار است.

در مرجع [۱۷] از نتایج آزمایشات گازکروماتوگرافی و نتایج آزمایشات مگر^۷ استفاده شده است. در این مرجع به کمک ضریب همبستگی نشان داده می‌شود که رابطه خطی بین مقاومت اندازه‌گیری شده و گازهای محلول وجود دارد و به کمک بررسی این رابطه می‌توان وضعیت عایقی ترانسفورماتور را پیش‌بینی کرد. اما ضریب همبستگی بین متغیرهای دیگر مانند متغیرهای کیفی روغن که می‌توانند در شناسایی وضعیت سلامت ترانس نقش داشته باشند مورد بررسی قرار نگرفته است.

^۲ Dissolved gas analysis
^۳ Rogers Ratios
^۴ Doernenburg Ratios
^۵ Duval Triangle
^۶ Machine Learning
^۷ 2-Furaldehyde
^۸ Megger

علاوه بر این، انجام آزمایشات مگر مستلزم از مدار خراج کردن ترانس و خاموشی مصرف کنندگان می باشد که این مساله خود می تواند منجر به محدودیت در استفاده از این روش گردد.

در مرجع [۱۸] به کمک مدل رگرسیون چندجمله ای^۱، زمان انجام سرویس ترانس پیش بینی و تخمین زده می شود. در این مرجع نشان داده می شود که رابطه ای بین متغیرهای ولتاژ شکست، عدد اسیدی و رطوبت با زمان سرویس ترانسفورماتور وجود دارد که به کمک این رابطه می توان ترانسفورماتوری که نیاز به انجام سرویس دارد را شناسایی کرد. در این مرجع روابط میان آزمایشات کیفی روغن مورد بررسی قرار گرفته است و از بررسی دیگر متغیرهای مرتبط با سلامت ترانس صرف نظر شده است و نیاز به انجام سرویس ترانسفورماتور تنها با متغیرهای کیفی روغن مورد مطالعه قرار گرفته است.

در مرجع [۱۹] از الگوریتم شبکه های عصبی^۲ استفاده شده و به کمک تاریخچه دیتاهای جمع آوری شده در گذشته، میزان تولید گازهای محلول در روغن، در آینده پیش بینی می شود و به کمک آن، عمر باقی مانده ترانسفورماتور تخمین زده می شود. اما در این مرجع از بررسی دیگر متغیرهای موثر بر وضعیت ترانسفورماتور مانند متغیرهای کیفی روغن صرف نظر شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مقاله از آزمایشات کیفی روغن و گازهای محلول در روغن استفاده شده و ضریب همبستگی بین متغیرهای این آزمایشات با یکدیگر محاسبه شده است. با توجه به اینکه احتمال وقوع وضعیت بحرانی در ترانسفورماتور با غیر قابل قبول شدن چندین متغیر به طور همزمان محتمل تر خواهد بود، شناسایی وقوع این همزمانی به کمک استخراج ضریب همبستگی بین آن ها می تواند مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله با توجه به ارتباط منطقی بین متغیرهای آزمایشات کیفی روغن و گازهای محلول در روغن و اهمیت هریک، به ضرایب همبستگی بین آن ها وزن داده شده و در نهایت نمره برآیندی استخراج شده است که معرف وضعیت سلامت ترانسفورماتور می باشد. در جدول (۱-۲) متغیرهایی از آزمایشات کیفی روغن و گازهای محلول در روغن که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است به همراه شرح مختصری از هریک معرفی شده است. در این میان ارتباط مستقیم در برخی از متغیرها و ارتباط معکوس در برخی دیگر، می تواند نشان از شروع و یا شدت یافتن شرایط غیرقابل قبول در ترانسفورماتور باشد. به کمک معادله (۱-۲) می توان ضریب همبستگی بین دو دسته متغیرهای A_1 و A_2 را محاسبه کرد. در این معادله $Cr(A_1, A_2)$ ضریب همبستگی، $Cov(A_1, A_2)$ کوواریانس بین دو متغیر و σ_{A_1} و σ_{A_2} نیز انحراف معیار متغیرهای A_1 و A_2 است.

$$Cr(A_1, A_2) = \frac{Cov(A_1, A_2)}{\sigma_{A_1} \sigma_{A_2}} \quad (1-2)$$

ضریب همبستگی محاسبه شده به کمک معادله (۱-۲) همواره عددی بین -۱ و +۱ خواهد بود. مقدار +۱ زمانی حاصل می شود که هر دو دسته متغیر کاملاً روند تغییرات یکسانی داشته باشند و مقدار -۱ نیز زمانی حاصل می شود که کاملاً روند تغییرات خلاف جهت هم دارند. همچنین هر عدد بین -۱ و +۱ نشان دهنده میزان و شدت همبستگی بین دو متغیر می باشد.

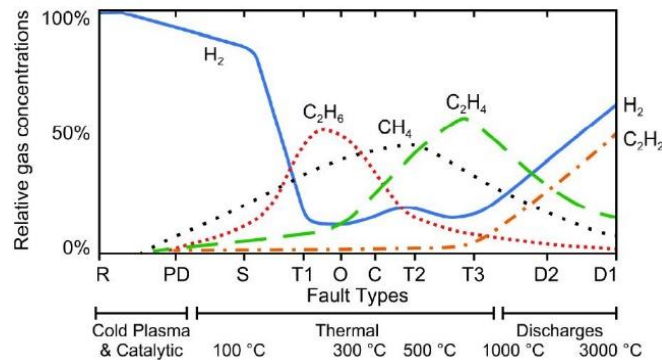
بنابراین می توان شباهت و شدت رفتار دو متغیر را به کمک مقدار ضریب همبستگی بین آن ها مورد ارزیابی قرار داد. دو متغیر را در صورتی دارای ارتباط قوی و معکوس معرفی می کنیم که ضریب همبستگی آن ها بین -۱ و -۰.۸ باشد. همچنین دو متغیر را در صورتی دارای ارتباط قوی و مستقیم معرفی می کنیم که ضریب همبستگی آن ها بین +۰.۸ و +۱ باشد. بدیهی است که این کران ها (+۰.۸ و -۰.۸) انتخابی بوده و هدف از این انتخاب این است که جفت متغیرهایی که ضریب همبستگی قوی تری دارند، شناسایی شوند. لازم به ذکر است هرچه این کران ها را به مقدار +۱ و -۱ نزدیک تر کنیم، سختگیرانه تر جفت متغیرها را انتخاب کرده ایم.

جدول (۱-۲) متغیرهای آزمایشات کیفی روغن و گاز کروماتوگرافی

متغیر	شرح و اهمیت
ولتاژ شکست	این متغیر می‌تواند به عنوان معرف کلی وضعیت روغن در نظر گرفته شود. چراکه هرگونه ناخالصی مانند رطوبت، ذرات فلزی و رسا، محصولات ناشی از اسیدی شدن روغن و... که در متغیرهای دیگر اثر خود را نشان می‌دهند، مقدار این متغیر را تحت تاثیر قرار می‌دهند. هرچه مقدار این متغیر بیشتر باشد و روند ثابت و یا کاهشی کندتری داشته باشد، نشانگر وضعیت بهتر ترانسفورماتور می‌باشد.
رطوبت	با توجه به سیکل رطوبت میان کاغذ و روغن، رطوبت موجود در روغن تابعی از دمای کاری ترانس می‌باشد. در دماهای پایین بخش عمده رطوبت در کاغذ و در دماهای بالا بخش عمده رطوبت در روغن حضور دارد که رطوبت موجود در بخش‌های سلولزی ضخیم مانند پرس بردها و ... بخش قابل توجهی از آن را تشکیل می‌دهد. بخش دیگر این رطوبت ناشی از تجزیه سلولز، ورود رطوبت از محفظه تنفس و ورود از طریق نشتی‌های جزئی روغن و تجزیه و پیری روغن می‌باشد. افزایش رطوبت اثر شدیدی در کاهش ولتاژ شکست دارد.
ضریب تلفات عایقی	این متغیر به شدت به آلودگی‌های قطبی روغن، محصولات پیری روغن و اکسیداسیون و هرگونه ذرات ناخالصی در روغن حساسیت دارد. ثبات و عدم افزایش شدید این متغیر، نشان دهنده وضعیت بهتر ترانسفورماتور می‌باشد.
عدد اسیدی	این متغیر نشان دهنده میزان اکسید شدن روغن می‌باشد. به طور معمول با افزایش عمر ترانس و در گذر زمان، مقدار این متغیر به کندی افزایش پیدا می‌کند. رطوبت و دما می‌تواند به روند اکسید شدن روغن سرعت بیشتری ببخشد. محصول اکسیداسیون روغن، لجن و رسوب می‌باشد. این لجن و رسوب بر روی بخش‌های مختلف داخلی ترانس نشست و در صورت شدت یافتن، می‌تواند فرایند انتقال حرارت را در این نقاط مختل کند. حرارت در این نقاط بالا رفته و این خود موجب تشدید اکسید شدن خواهد شد. علاوه بر این، اسیدی شدن روغن سبب سرعت بخشیدن به تجزیه سلولز و حتی خوردگی جزئی در بخش‌های فلزی می‌شود که می‌تواند منجر به تغییرات در متغیر ضریب تلفات عایقی گردد.
کشش سطحی	این متغیر نیز مانند عدد اسیدی نشان دهنده میزان پیری روغن می‌باشد. رابطه‌ای منطقی بین کشش سطحی و عدد اسیدی وجود دارد، به نحوی که با افزایش عمر بهره برداری از ترانس روند نسبتاً کند و ثابتی از کاهش کشش سطحی و افزایش عدد اسیدی را شاهد هستیم. به طور کلی به کمک این متغیر و عدد اسیدی، وضعیت شیمیایی روغن معرفی می‌شود.
دو فوران	این متغیر معرف وضعیت پیری عایق کاغذی ترانسفورماتور می‌باشد.
هیدروژن و گازهای هیدروکربن	تغییرات در میزان گازهای حاصل از تجزیه روغن ترانسفورماتور می‌تواند نشان دهنده وجود نقاطی با دماهای مختلف در داخل ترانسفورماتور باشد. هیدروژن و هریک از هیدروکربن‌های استیلن، اتیلن، اتان و متان در دمای مشخصی شروع به آزاد شدن از ترکیب روغن می‌کنند. حال آنکه افزایش حرارت در داخل ترانسفورماتور می‌تواند منجر به تخریب عایق و یا بیانگر وقوع خطاهای الکتریکی باشد. در این میان با توجه به اینکه استیلن در دماهای بیش از ۷۰۰ درجه سانتیگراد آزاد می‌شود، این گاز به عنوان خطرناکترین هیدروکربن شناخته می‌شود.

شکل (۱-۲) روند تولید گازهای هیدروکربن در بازه‌های دمایی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، می‌توان مشاهده کرد که در ناحیه‌های D1 و D2، T3 که نشان دهنده وجود نقاطی با رنج دمایی ۷۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه است، روند تغییرات گازهای هیدروژن

(H₂) و استیلن (C₂H₂) افزایشی و دارای ضریب همبستگی مستقیم می‌باشند. با توجه به اینکه در دماهای حدود ۲۵۰ درجه سانتیگراد گاز اتان (C₂H₆) و در دماهای حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد گاز اتیلن (C₂H₄) از محصولات تجزیه روغن ترانسفورماتور می‌باشند، بنابراین همراه شدن گاز هیدروژن (H₂) به عنوان گازی که در تمام خطاها حضور دارد با هر یک از این گازها نیز می‌تواند به عنوان شاخص جدید معرفی شود. همچنین با توجه به اینکه همراه شدن هر کدام از هیدروکربن‌ها با گاز استیلن می‌تواند نشان از خطای پیشرونده در ترانسفورماتور باشد، ارتباط مستقیم و قوی بین استیلن و هر کدام از هیدروکربن‌ها را نیز می‌توان به عنوان شاخص در نظر گرفت.



شکل (۱-۲) روند تولید گازهای هیدروکربن در هریک از بازه‌های دمایی [۱۰]

بنابراین می‌توان به کمک تعریف ضریب همبستگی بین متغیرهای جدول (۱-۲) و همچنین با توجه به ارتباط میان گازهای هیدروکربن نشان داده شده در شکل (۱-۲) به شاخص‌های جدیدی به منظور ارزیابی وضعیت سلامت ترانسفورماتور دست پیدا کرد. در جدول (۲-۲) این شاخص‌ها، به همراه وزن هریک از آن‌ها نشان داده شده است. همچنین می‌توان به کمک معادله (۲-۲) و جدول (۲-۲)، یک شاخص سلامت و خرابی برای هر ترانسفورماتور معرفی کرد.

$$(۲-۲)FIF = \frac{\sum_{i=1}^j |Cr_i| \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad HIF = 1 - (FIF)$$

در معادله (۲-۲)، عبارت FIF ^۱ برابر است با شاخص خرابی و HIF ^۲ برابر است با شاخص سلامت ترانسفورماتور، n برابر است با تعداد کل ضرایب همبستگی، j برابر است با تعداد کل ضرایب همبستگی با ارتباط قوی و i شمارنده آن‌ها، Cr_i برابر است با ضریب همبستگی i ام و W_i برابر است با وزن ضریب همبستگی i ام. با توجه به مرجع [۱۶] از میان متغیرهای آزمایشات کیفی روغن متغیرهای عدد اسیدی، ولتاژ شکست، رطوبت و دو فوران در تعیین شاخص سلامت ترانسفورماتور از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. بنابراین به ضرایب همبستگی بین این متغیرها با هم، وزن بیشتری در مقایسه با ضرایب همبستگی بدون این متغیرها یا تنها با مشارکت یکی از آن‌ها داده شده است.

با توجه به مرجع [۱۰] خطرناک‌ترین متغیر در آزمایشات گازکروماتوگرافی گاز استیلن می‌باشد. بنابراین به همراه شدن این گاز با هریک از متغیرهای مهم کیفی روغن وزن بیشتری در مقایسه با همراه شدن آن با دیگر متغیرهای کیفی روغن داده شده است. همچنین با توجه به شکل (۱-۲) همراه شدن گاز هیدروژن و استیلن به عنوان شرایطی با وقوع بیشترین حرارت معرفی شده است و بیشترین وزن را در میان تمام ضرایب همبستگی به خود اختصاص داده است. علاوه بر این، به همراه شدن هیدروژن با اتیلن در مقایسه با اتان به علت ایجاد اتیلن در دمای بالاتر، وزن بیشتری داده شده است.

¹ Failure Index Factor

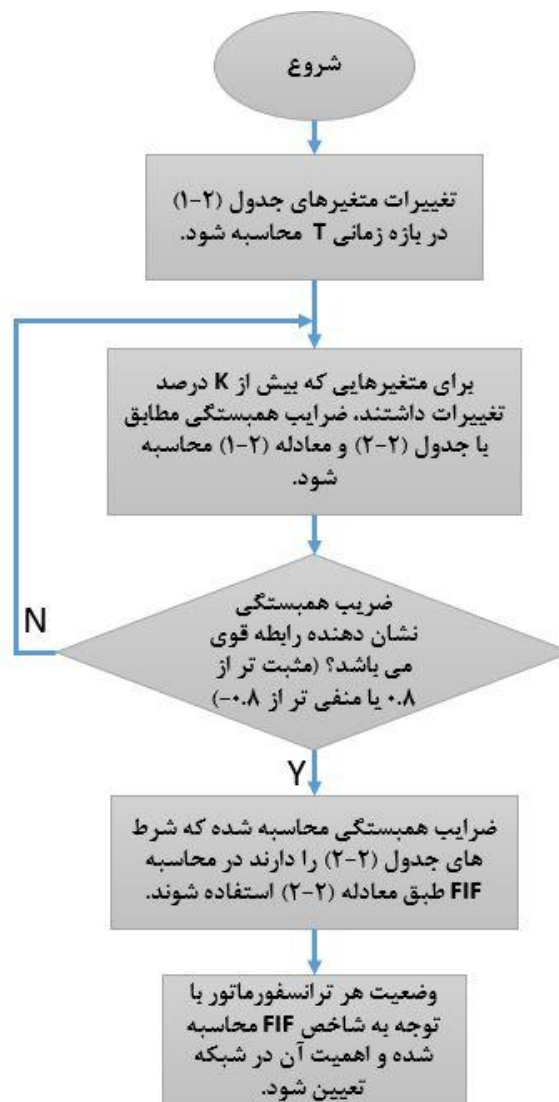
² Health Index Factor

جدول (۲-۲) ضرایب همبستگی، شرط ارتباط و وزن هر جفت از متغیرها

ردیف (i)	شاخص (Cr_i)	ارتباط معکوس قوی	ارتباط مستقیم قوی	وزن (W_i)
۱	ولتاژ شکست _ کشش سطحی		■	۲
۲	ولتاژ شکست _ رطوبت	■		۴
۳	ولتاژ شکست _ عدد اسیدی	■		۴
۴	ولتاژ شکست _ ضریب تلفات عایقی	■		۲
۵	کشش سطحی _ رطوبت	■		۲
۶	کشش سطحی _ عدد اسیدی	■		۴
۷	کشش سطحی _ ضریب تلفات عایقی	■		۱
۸	رطوبت _ عدد اسیدی		■	۴
۹	رطوبت _ ضریب تلفات عایقی		■	۲
۱۰	ضریب تلفات عایقی _ عدد اسیدی		■	۲
۱۱	استیلن _ ولتاژ شکست	■		۵
۱۲	استیلن _ عدد اسیدی		■	۵
۱۳	استیلن _ رطوبت		■	۵
۱۴	استیلن _ کشش سطحی	■		۴
۱۵	استیلن _ ضریب تلفات عایقی		■	۴
۱۶	دو فوران _ ولتاژ شکست	■		۴
۱۷	دو فوران _ رطوبت		■	۴
۱۸	دو فوران _ عدد اسیدی		■	۴
۱۹	دو فوران _ کشش سطحی	■		۲
۲۰	دو فوران _ استیلن		■	۵
۲۱	دو فوران _ ضریب تلفات عایقی		■	۲
۲۲	C ₂ H ₂ _ H ₂		■	۶
۲۳	هر کدام از هیدرو کربن ها _ C ₂ H ₂		■	۴

۲۴	C2H4 _ H2		■	۴
۲۵	C2H6 _ H2		■	۳

با توجه به الگوریتم نشان داده شده در شکل (۲-۲) ابتدا متغیرهایی از جدول (۱-۲) که بیش از K درصد تغییرات در بازه زمانی T داشته باشند، شناسایی می‌شوند. سپس برای این متغیرها ضرایب همبستگی مطابق با جدول (۲-۲) محاسبه و G_i ها استخراج می‌شوند. حال به کمک معادله (۲-۲) شاخص سلامت و خرابی هر ترانسفورماتور محاسبه می‌شود. در نهایت با توجه به اهمیت هر ترانسفورماتور در شبکه، وضعیت ترانسفورماتور از نظر اولویت تعمیراتی در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها به دست می‌آید. به نحوی که در صفحه مختصات، محور افقی معرف وضعیت سلامت ترانسفورماتور و محور عمودی معرف اهمیت ترانسفورماتور در شبکه می‌باشد و هر ترانسفورماتور نقطه‌ای از صفحه را به خود اختصاص می‌دهد. در این مقاله بازه زمانی T پنج سال و همچنین حداقل تغییرات K برابر ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل (۲-۲) الگوریتم روش ارائه شده

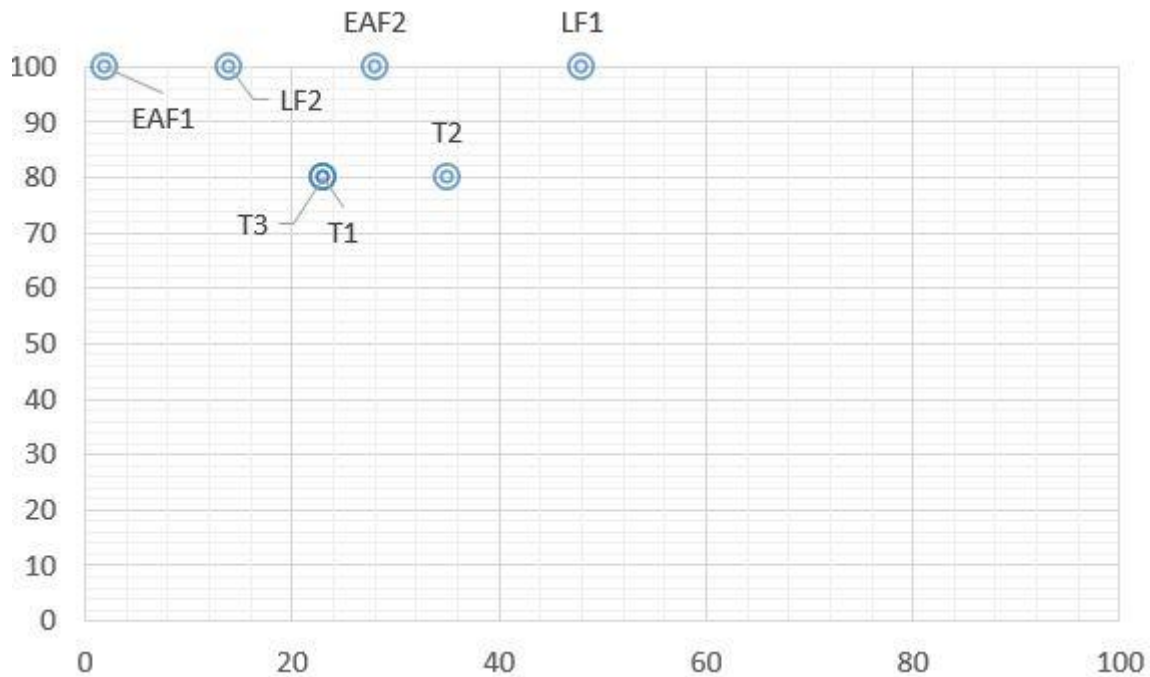
۳- نتایج و بحث

روش ارائه شده به کمک اطلاعات ۳ ترانس قدرت که بر روی یکی از آن‌ها تعمیرات اساسی صورت گرفته و ۴ ترانس کوره که یکی از آن‌ها دچار خرابی شدید و از مدار خارج شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات این ۷ ترانسفورماتور در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳) مشخصات ترانسفورماتورهای بررسی شده

ترانسفورماتور	مشخصات نامی	عمر بهره برداری	وضعیت
T1	400/33 KV, 62.5MVA	۲۳	درحال بهره برداری
T2	400/33 KV,165MVA	۲۳	به علت شرایط نامطلوب در تست‌های الکتریکال تعمیرات اساسی بر روی ترانس انجام شد
T3	400/33 KV,165MVA	۷	درحال بهره برداری
LF1	33KV/300V, 17MVA	۲۳	خرابی و خارج شدن از مدار به علت اتصال حلقه
LF2	33KV/300V 22MVA	۷	درحال بهره برداری
EAF1	33KV/500V, 120MVA	۳	درحال بهره برداری
EAF2	33KV/500V, 120MVA	۷	درحال بهره برداری

به منظور ارزیابی روش ارائه شده، از نتایج آزمایشات کیفی روغن و گاز کروماتوگرافی در مدت زمان ۵ سال گذشته استفاده شده که دوره انجام این آزمایشات اغلب ۶ ماهه بوده است. برای متغیرهایی که در این بازه زمانی تغییرات بیش از ۲۰ درصد داشته‌اند، ضرایب همبستگی مطابق با جدول (۲-۲) محاسبه شده و در نهایت برای هریک از ترانسفورماتورها شاخص FIF مطابق با الگوریتم شکل (۲-۲) محاسبه شده و با در نظر گرفتن اهمیت هر ترانسفورماتور در شبکه، ترانسفورماتورهایی که احتمالاً در افق‌های زمانی آینده نیاز بیشتری به اقدام اصلاحی، تعمیرات و یا جایگزینی در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها دارند، مطابق شکل (۱-۳) شناسایی شده‌اند. همانطور که در شکل (۱-۳) مشاهده می‌شود، ترانسفورماتورهای LF1 و T2 در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورهای بررسی شده، وضعیت بدتری دارند. با توجه به اینکه از اطلاعات LF1 قبل از خرابی و T2 قبلاً از انجام تعمیرات اساسی استفاده شده است، مشاهده می‌شود که روش ارائه شده در این مقاله به درستی این دو ترانسفورماتور را در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها در اولویت تعمیرات شناسایی کرده است. همچنین با توجه به شکل (۱-۳) مشاهده می‌شود که ترانسفورماتور EAF1 که تنها ۳ سال از بهره‌برداری آن می‌گذرد، بهترین وضعیت را در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها دارد.



شکل (۳-۱) وضعیت ترانسفورماتورهای شبکه در مقایسه با یکدیگر

۴- نتایج بدست آمده و تجزیه و تحلیل

با توجه به اینکه عیوب داخلی ترانسفورماتور در مراحل پیشرفته، در چندین متغیر به طور همزمان، نشانه‌هایی از خود را آشکار می‌کنند، در این مقاله با استفاده از تعریف ضریب همبستگی بین متغیرهای پایش وضعیت ترانسفورماتور از جمله متغیرهای کیفی روغن و گازکروماتوگرافی، این همزمانی تغییرات شناسایی شد. با توجه به اولویت بندی انجام شده، به هرکدام از ضرایب همبستگی وزنی داده شد و به این وسیله نمره برآیندی تحت عنوان شاخص سلامت و خرابی برای هر ترانسفورماتور استخراج گردید. روش ارائه شده به کمک اطلاعات مربوط به ۷ ترانسفورماتور موجود در مجتمع فولاد خراسان مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج به دست آمده، کارایی آن را در شناسایی ترانسفورماتورهایی که در مقایسه با دیگر ترانسفورماتورها نیاز بیشتری به تعمیرات، جایگزینی و یا اقدام اصلاحی دارند، نشان داد.

پیش‌بینی می‌شود که انجام آزمایشات گازکروماتوگرافی و کیفی روغن در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر باعث افزایش دقت روش ارائه شده خواهد شد و زمینه‌های مطالعات بعدی را فراهم می‌کند. همچنین با توجه به اینکه ترانسفورماتورهای کوره قوس الکتریکی در معرض نیروهای شدید الکترومکانیکی قرار دارند و این نیرو می‌تواند منجر به لرزش‌های شدید، آسیب به عایق و یا تغییرات در ساختار هسته شود، استفاده از اطلاعات مربوط به آنالیز ارتعاشات ترانسفورماتور و همچنین آزمایشات پاسخ فرکانسی (FRA) نیز می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات بعدی باشد.

منابع

- [1] Soni R, Mehta B. "Review on asset management of power transformer by diagnosing incipient faults and faults identification using various testing methodologies", *Engineering Failure Analysis*, 2021.
- [2] de Faria Jr H, Costa JG, Olivas JL. "A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 46, 2015, pp 201-209.
- [3] Kaliappan G, Rengaraj M. "Aging assessment of transformer solid insulation: A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, 2021, pp 272-277.
- [4] Murugan R, Ramasamy R. "Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities", *Engineering Failure Analysis*, vol. 96, 2019, pp 274-288.
- [5] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators", IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995).
- [6] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service and W. Fan, "An approach to power transformer asset management using health index", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, 2009 pp. 20-34.
- [7] O. E. Gouda, S. H. El-Hoshy and S. S. M. Ghoneim, "Enhancing the Diagnostic Accuracy of DGA Techniques Based on IEC-TC10 and Related Databases", *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 118031-118041.
- [8] Thiviyathan, V.A., Ker, P.J., Leong, Y.S., Abdullah, F., Ismail, A. and Jamaludin, M.Z., "Power transformer insulation system: A review on the reactions, fault detection, challenges and future prospects", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, 2022, pp. 7697-7713.
- [9] IEC 60599, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", 2007.
- [10] "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers", IEEE Std C57.104-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008).
- [11] "ABB Service Handbook for Transformers" Zurich, Switzerland: ABB Management Service, 2007.
- [12] M. Wang, A. J. Vandermaar and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, 2002, pp. 12-25.
- [13] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, 2002, pp. 8-17.
- [14] IEC 60422, "Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance Guidance", 2013.
- [15] W. Wattakapaiboon and N. Pattanadech, "The new developed Health Index for transformer condition assessment", 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016, pp. 32-35.
- [16] K. Benhmed, A. Mooman, A. Younes, K. Shaban and A. El-Hag, "Feature Selection for Effective Health Index Diagnoses of Power Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, 2018, pp. 3223-3226.
- [17] J. Sebastian Juris, I. Camilo Duran and A. Rafael Marulanda, "Correlation between Insulation Resistance and Dissolved Gas Analysis Tests in Power Transformers", 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA), 2020, pp. 1-6.
- [18] Gouda OE, El Dein AZ. "Prediction of aged transformer oil and paper insulation", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, 2019, pp 406-419.
- [19] Luo D, Fang J, He H, Lee WJ, Zhang Z, Zai H, Chen W, Zhang K. "Prediction for Dissolved Gas in Power Transformer Oil Based On TCN and GCN", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, 2022, pp 7818-7826.