

## توسعه ی الگو بازرسی دوره ای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک در منطقه دو

### عملیات انتقال گاز

محمود کمالی<sup>۱</sup>

عاطفه امین دوست<sup>۲</sup>

#### چکیده

در صنایع فرایندی (مانند گاز، پالایشگاه، پتروشیمی و...) مواد شیمیائی متنوع و سیالات مختلفی در حجمی بالا و با دما یا فشار قابل توجهی جهت تولید محصول و تحقق اهداف سازمانی استفاده می شود. عملیات نگهداری، جابجائی و انتقال این مواد توسط تجهیزات گوناگون و در یک سیستم بسته انجام میگردد، لذا بمنظور جلوگیری از حوادث احتمالی (مانند حریق و انفجار) باید تعمیرات این تجهیزات در زمان مناسبی انجام گردد. در مورد ماشین آلات دوار (مانند کمپرسور، پمپ و توربین) که به عنوان قلب تپنده صنایع فرایندی میباشند، به دلیل وجود قطعات متحرک در آنها باید نگهداری و تعمیرات (نت) صحیحی انجام گردد تا علاوه بر تداوم تولید، ایمنی فرایند و قابلیت اطمینان سیستم نیز حفظ گردد. بیشتر سازمان ها روش منطقی و توجیه پذیری برای دوره زمانی انجام فعالیت های نت نداشته و به دستورالعمل سازنده اکتفا نموده و یا روشی را که قبلا وجود داشته، ادامه می دهند. نت مبتنی بر ریسک (RBM) یکی از رویکردهای جدید درنت بوده که علاوه بر منطقی نمودن زمان انجام فعالیت های نت باعث بهینه شدن هزینه ها و توجیه پذیر شدن اقدامات مرتبط با نت می گردد. در این استراتژی از سطوح ریسک به عنوان معیاری برای طرح و برنامه ریزی تعمیرات استفاده می شود. به این ترتیب که تجهیزاتی که در مقایسه با سایر تجهیزات دارای ریسک بیشتری هستند، باید در فواصل زمانی کمتری اقدامات نت روی آنها انجام پذیرد. در این تحقیق از RBM برای طرح ریزی در مورد تعمیرات توربین گاز در واحدهای فرایندی استفاده شده است. جهت طبقه بندی سیستم ها، زیر سیستم ها و قطعات توربین گاز از استاندارد ایزو و به منظور تحلیل ریسک خرابی ها از استاندارد ناور استفاده شده است. همچنین تحلیل برنامه های نگهداری و تعمیرات بکار گرفته شده تا با انتخاب استراتژی های بهینه نگهداری و تعمیرات، قابلیت اطمینان، صرف هزینه و زمان بهینه گردد.

**کلید واژه ها:** استراتژی های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک، قابلیت اطمینان، توربین گازی، تحلیل ریسک، PHM

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، ایمیل:

m\_kamali1394@yahoo.com

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، ایمیل: atefeh\_amin دوست@yahoo.com

**مقدمه**

نگهداری و تعمیرات از جمله تکنیک هایی هستند که در صنایع امروزه به وفور از آنها استفاده می شود. دلیل آن، گسترش و همه گیر شدن صنعت در زندگی روزمره به منظور تأمین نیازهای بشر می باشد. افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به فرآورده های مختلف صنعتی، انرژی، مواد غذایی و ... را بیشتر می کند. در حالی که منابع در دسترس هر لحظه محدودتر می گردند، تأمین این نیازها بدون شک در گرو بهره گیری از صنایع پیشرفته امروزی است که در نتیجه ی استفاده بهینه از این صنایع به صورت فزاینده ای مورد توجه می باشد (آبزی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲).

فعالیت های صورت گرفته در دو دهه اخیر در حوزه مباحث مربوط به تعمیر و نگهداری گواهی بر پیشرفت های وسیع و کارا در اتخاذ استراتژی های نوین نگهداری می باشد. پیشرفتهایی که در زمینه برنامه های نگهداری بوجود آمده است مرهون افزایش تعداد، پیچیدگی، اندازه و تنوع پروژه های صنعتی متفاوت بوده و ضمناً رشد آگاهی متخصصین امر نسبت به تاثیر فراوان برنامه نگهداری بهینه بر روی محیط زیست، ایمنی پرسنل و کیفیت محصولات، خود محرکی جهت بروزسانی روزافزون این حوزه است (سلحشور و همکاران، ۱۳۹۲).

نگهداری و تعمیرات شامل مجموعه ایی از فعالیتهای مختلف، به منظور حفظ و بقای قطعات، تجهیزات و ماشین آلات و صیانت از سرمایه ها و دارایی های به کار رفته در صنعت می شود که حتی الامکان از بروز حوادث در زمینه خرابی دستگاهها و وقفه در فرایند تولید یا روند بهره برداری از تجهیزات و کارخانه ها پیشگیری می کند (آقای، ۱۳۹۰). نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)، یک فرایند سیستماتیک است برای تعیین هر آنچه می بایست انجام گیرد تا اطمینان حاصل شود که همه تجهیزات فیزیکی می توانند پیوسته وظایف خود در بافت عملیاتی را انجام دهند. RCM منجر به طراحی یک برنامه نت می شود که تعمیرات پیشگیرانه (PM) را روی حالت های خرابی ویژه که احتمالاً رخ می دهند، متمرکز می کند. این روش، یک فرایند تصمیم گیری است برای انتخاب یک برنامه نت مقرون به صرفه برای بهبود قابلیت اطمینان بر اساس میزان بحرانی بودن حالت های خرابی که نیازمندی های نت همه حالت های خرابی را اولویت بندی کرده و فعالیت نت مؤثر برای حالت های خرابی بحرانی را انتخاب می کند (شعاعی و دشتی، ۱۳۹۵).

روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان را توسط سه مرحله زیر می توان توصیف نمود: شناسایی موارد کلیدی نگهداری و تعمیرات؛ تخصیص وظایف PM قابل اجرا و مؤثر برای موارد کلیدی نگهداری و تعمیرات؛ پیاده سازی و به روز رسانی وظایف PM. شناسایی اجزا قابل توجه نگهداری و تعمیرات یکی از مراحل کلیدی از نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان می باشد. یک مرحله غربالگری است که در آن تعدادی از اجزا برای تجزیه و تحلیل کاهش یافته اند (تانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

بازرسی فنی مبتنی بر ریسک<sup>۵</sup> (RBI) با رویکرد کمی، یک روش نوین در مدیریت بازرسی بوده که بر اساس تحلیل های آماری اطلاعات بدست آمده از عملیات پایش در فرایندهای عملیاتی و به منظور بهینه کردن برنامه و هزینه های بازرسی، استفاده می شود. هدف از اجراء، پیاده سازی یک استراتژی مدون جهت کاهش ریسک و در عین حال بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات فرایندی می باشد. تجربه موفق اجرای بازرسی مبتنی بر ریسک در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی جهان و توجه روزافزون مدیران صنایع کشور نسبت به این مقوله، بر اهمیت آن افزوده است. بهره گیری از این روش، ابزاری را برای بهبود مستمر بازرسی تجهیزات به طور سیستماتیک ایجاد می نماید که نتیجه آن کاهش ریسک شکست و پیامدهای آن خواهد بود. با استفاده از بازرسی مبتنی بر ریسک،

<sup>3</sup> Abazi<sup>4</sup> Tang et al.<sup>5</sup> Risk-Based Inspection

ضمن اجتناب از بازرسی های مکرر، می توان امکانات و توانمندی های بازرسی را بر روی دستگاه های با ریسک بالاتر متمرکز نمود. در این استاندارد روش های کمی ایجاد و برنامه ریزی پروسه بازرسی، با استفاده از محاسبات ریسک برای تجهیزات ثابت تحت فشار، شامل مخازن تحت فشار، سیستم لوله کشی، تانک ها، شیرهای فشار شکن و مبدل های حرارتی و ... ارائه شده است. RBI پایه و اساس تصمیم گیری آگاهانه در خصوص فرکانس بازرسی، میزان بازرسی و نوع تست غیر مخرب، را ارائه می دهد. در اغلب کارخانه های بهره برداری، درصد زیادی از ریسک بخاطر تعداد نسبتا کمی از تجهیزات می باشد. این تجهیزات که بطور بالقوه بیشتر در معرض ریسک هستند، نیاز به توجه بیشتری دارند که می تواند از طریق یک برنامه بازرسی اثربخش صورت گیرد. هزینه افزایش بازرسی در این مناطق گاهی اوقات ممکن است با کاهش فعالیت بازرسی در مناطق با ریسک کمتر، خنثی شود (رضانی و همکاران، ۱۳۹۴).

با توجه به اینکه تمام مصنوعات بشری و دستگاه ها دارای عمر محدود می باشند و هر لحظه امکان خرابی و در نتیجه از کار افتادگی دستگاه یا حتی کل سیستم وجود دارد. می دانیم که یک قابلیت اطمینان و کارکرد بهینه برای هر دستگاه وجود دارد. اگر بخواهیم این مقدار را از حدی بالاتر ببریم بایستی هزینه های بسیار زیادی متحمل شویم که در این صورت محصولات تولیدی جهت تولید به صرفه نخواهند بود. راه حل های بهتری هم وجود دارد. می توان با یک برنامه ریزی دقیق و مستمر کاری کرد که از همین امکانات موجود حداکثر بهره وری حاصل گردد به طوریکه دستگاه ها با حداکثر کارایی و قابلیت دسترسی کار کنند (ربانی و همکاران، ۱۳۹۲).

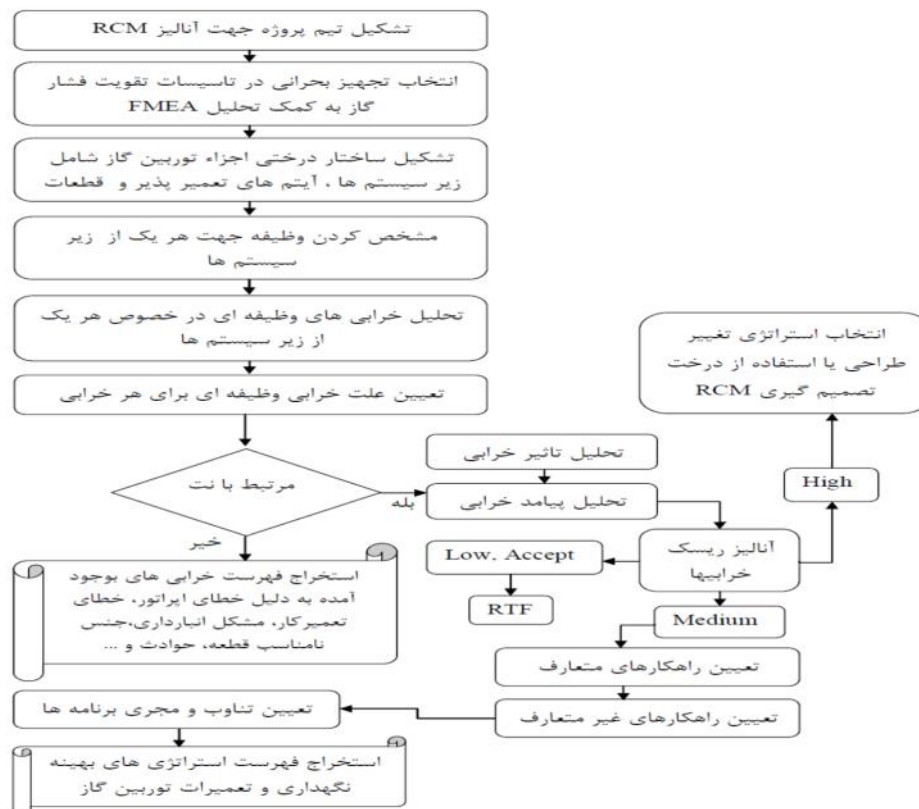
بر این اساس انتخاب یک سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات می تواند چاره ساز واحد های صنعتی باشد تا با کاهش افت ناگهانی تجهیزات، تولید و کارایی افزایش یابد و اینکه دیگر محدودیت ها از قبیل هزینه و ساعت کاری نیروی انسانی کاهش یابد. استراتژی های متفاوتی برای نگهداری و تعمیرات بیان شده است که بسته به صنعت مربوطه هر کدام از مزایا و معایبی برخوردارند. با توجه به اینکه در پژوهش های پیشین انتخاب راهبرد بهینه نگهداری و تعمیرات براساس فرایند سلسله مراتبی ارائه شده است و همچنین راهبردهای ارائه شده بر اساس انتخاب سیاست نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان در صنایع مختلف می باشد و کمتر به ارائه و توسعه یک الگو بازرسی دوره ای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک می باشد، هدف کلی از انجام این پژوهش این است که به مدیران، مهندسان فنی و کارشناسان نشان داده شود که با تمرکز بر روی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک دستگاه ها و پیاده سازی منظم آن می توان به سود دهی واحد صنعتی کمک نمود. اهمیت این مسئله در پروسه های حساس و استراتژیک نظیر صنایع گاز در شرکت های انتقال گاز بیشتر نمایان می شود. منطقه دو عملیات انتقال گاز با مقادیر زیادی از مواد قابل اشتعال، منفجره و مواد سمی سروکار داشته که اکثر این مواد در مجاورت دماها و فشارهای زیاد قرار دارند. بدیهی است که در این فرایندها ایجاد یک خرابی کوچک در یک تجهیز می تواند به یک پیامد غیر قابل تصور منجر شود. بنابراین نیاز به یک محیط ایمن با قابلیت اطمینان بالا در این صنایع ضروری می نماید. از طرفی ایجاد یک سطح ایمنی بالا و قابلیت اطمینان مناسب در این صنایع به داشتن یک برنامه تعمیر و نگهداری مناسب به شدت وابسته است. وقوع یک سناریوی خطا باعث بروز خطراتی برای نیروهای انسانی و افراد شاغل در محل می شود و از طرف دیگر بدیهیست که وقوع پیشامدهایی نظیر انتشار مواد سمی و یا آتش سوزی نمی تواند روی محیط زیست بی تاثیر باشد. یکی از اهداف مهم استراتژی نت به حداقل رساندن خطرات برای انسان و محیط است که به واسطه خرابی غیر منتظره یک تجهیز ایجاد می شود. به علاوه استراتژی استفاده از رویکرد مبتنی بر ریسک این اطمینان را حاصل می کند که به این اهداف دست پیدا شود. چنین رویکردی از اطلاعات به دست آمده از مطالعه مدهای خرابی و اثرات تحلیل ریسک یک تکنیک برای تعیین، توصیف، کمی سازی و ارزیابی اثرات ناشی از یک واقعه است. رویکرد تحلیل ریسک، قابلیت اطمینان، تحلیل اثرات، پیامدها و نتیجه را در مراحل مختلف تحلیل بررسی می نماید.

تجهیزات موجود در منطقه دو عملیات انتقال گاز باید بتواند خدمات خود را با اطمینان بالا به مشتریان عرضه کند. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و ریسک، نیاز فزاینده نگهداری و تعمیرات برای افزایش ایمنی در نیروهای انسانی و محیط اهمیت بالایی دارد. هدف از ارزیابی ریسک، مشخص کردن سطح ریسک ها ی قابل قبول و مقایسه ریسک های محاسبه شده سیستم ها و

تجهیزات با این مقادیر می‌باشد. در این مقایسه اگر سطح ریسک تجهیز از مقدار ریسک قابل قبول بیشتر باشد جهت کاهش ریسک سیستم نیاز است تمهیداتی نظیر بازنگری برنامه نگهداری و تعمیر در پیش گرفته شود. بررسی مقالات و کتب منتشر شده نشان می‌دهد که امروزه تلاش های فراوانی در استفاده از آنالیز ریسک در طراحی برنامه های نگهداری در حال انجام است البته اکثر مقالات منتشر شده در این حوزه تنها بر روی یک تجهیز خاص تمرکز کرده اند در حالیکه به نظر می‌رسد نیاز به یک برنامه نگهداری جامع و فراگیرتر برای انواع مختلف تجهیزات و در نظر گرفتن ارتباطات موجود آنها با یکدیگر امری کتمان ناپذیر باشد. شایان ذکر است که در صنایع حساسی مانند صنایع گاز نیاز به تدوین یک برنامه جامع و کامل بیشتر احساس می‌شود. هدف از انجام این پژوهش ارائه الگویی برای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و ریسک بوده است.

### روش تحقیق

در این پژوهش جهت توسعه الگوی بازرسی دوره ای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک در منطقه دو عملیات انتقال گاز اقدامات زیر انجام شد: ارزیابی ریسک، تعیین احتمال وقوع رخداد های پایه ای، آنالیز پیامد خرابی ها، ارزشیابی ریسک، برنامه ریزی نت پیشگیرانه و یا پیشگوانه. مراحل اصل انجام کار در شکل زیر ارائه شده است:



شکل ۱: روش RBM

مراحل اجرایی این پروژه، در سه فاز زیر انجام گردیده است: ۱. برنامه ریزی و آماده سازی شامل: تشکیل تیم پروژه و اولویت بندی تجهیزات جهت آنالیز. ۲. آنالیز خرابی ها شامل: تجزیه ساختار تجهیزات، تعیین وظایف، شناسایی خرابی های وظیفه ای، تعیین

علل خرابی ها ، تعیین اثرات و پیامدهای بروز خرابی ، انتخاب استراتژی مدیریت بر خرابی و تهیه کارت های فعالیت ۳. ارزیابی نتایج.

مراحل مختلف بهینه سازی استراتژی نت بر پایه شرایط RBM جهت آنالیز روغن توربین گاز به شرح زیر اجرایی گردیده است : جمع آوری اطلاعات آنالیز روغن توربین گاز، تشکیل بانک اطلاعاتی در خصوص دیتا های آنالیز روغن توربین گاز، جمع آوری سوابق خرابی توربین گاز و درج در بانک اطلاعاتی، تشکیل مدل ریاضی PHM استفاده از تستهای آماری جهت اعتبار سنجی دیتاها، تعیین بهترین ساعت کارکرد توربین در خصوص انجام تعمیرات اورهال آن، تعیین بهترین فاصله زمانی بین دو آنالیز روغن.

در توربین گاز با تعیین استراتژی های بهینه نت در خصوص تجهیز توربین گاز ، زمان بهینه جهت اجرای برنامه تعمیر/ تعویض پیشگیرانه و فواصل انجام پایش وضعیت دستگاه با استفاده از اطلاعات بدست آمده از فرآیند نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM) تعیین شد. در این پژوهش با استفاده از داده هایی که از نمونه برداری و آنالیز روغن توربین در دوره های زمانی معینی انجام گرفته است این امر میسر گردید. به کمک تابع توزیع وایبل به عنوان تابع پایه و همسازها به عنوان عوامل موثر در ریسک خرابی و تابع توام، مدلی ارائه شده است که زمان بهینه اورهال برای توربین گاز و فواصل مناسب آنالیز روغن را معین می نماید. در ابتدا، اطلاعات گرد آوری شده از آنالیز روغن شامل اطلاعات عناصر فرسایشی موجود در روغن، در بازه های زمانی یک ماهه ، جهت ایجاد پایگاه داده گرد آوری گردیده است. با استفاده از نرم افزار اکسس، پایگاه داده مورد نظر تشکیل گردیده است. این بانک اطلاعاتی شامل جداول مختلفی هست . جدول مربوط به مقادیر "فاکتورهای ریسک در وقایع" با توجه به حداکثر مقدار فاکتورهای ریسک در هر رویداد شامل شروع دوره آنالیز (B)، تعویض روغن (OC)، توقف به دلیلی غیر از خرابی و تعویض/تعمیر پیشگیرانه (ES\*) ، توقف به دلیل خرابی (EF) و توقف به دلیل تعویض/تعمیر پیشگیرانه (ES) تکمیل گردیده است . فاکتورهای ریسک در این تحقیق با توجه به جنس یاتاقان های مورد استفاده در توربین های گازی ، عناصر فرسایشی آهن و سرب در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، موثرترین فاکتورهای ریسک خرابی (آهن و سرب) با توجه به جنس یاتاقان های مورد استفاده در توربین های گازی و اهمیت آنها ، در نظر گرفته شده است و بر این اساس، تابع توام و مدل PHM تشکیل گردیده است. رابطه ی مدل ریاضی PHM به صورت زیر تعریف می شود:

$$h(t_i, z_1(t_i), z_2(t_i)) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\sum_{i=1}^m \gamma_i z_i(t)} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامترهای  $\beta$  ،  $\eta$  و  $\gamma$  به ترتیب پارامترهای شکل ، عمر و مقیاس تابع وایبل هستند. از طرفی مقادیر ارائه شده برای عوامل موثر بر خرابی  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  که به ترتیب مقادیر وزنی ذرات آهن و سرب در روغن بر حسب ppm هستند به صورت زیر به دست آمده است. بنابراین می توان تابع PHM را به صورت معادله ۲ نوشت:

$$h(t, z_1(t), z_2(t)) = \frac{5.0}{3} \left(\frac{t}{3}\right)^{4.0} e^{0.2 z_1(t)+1.0 z_2(t)} \quad (2)$$

با مراجعه به جداول استراتژی های نگهداری و تعمیرات حاصل از تحلیل RCM در خصوص توربین گاز، فواصل زمانی بازرسی و نمونه برداری جهت آنالیز روغن توربین، یک ماه می باشد . که این زمان بر اساس تجارب افراد و توصیه گروه تدوین کننده RCM پیشنهاد شده است. با توجه به این که در این تحقیق، به حداقل رساندن هزینه و وقت در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مد نظر هست (بهینه سازی )، روش COST BASIC انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است. در بخش هزینه ها ، هزینه مربوط به تعویض پیشگیرانه یک تجهیز ویا اورهال آن و هزینه مربوط به تعمیر یا تعویض بعد از خرابی تعیین شده و در نرم افزار وارد گردیده است .

**۳- مطالعه موردی: تدوین استراتژی تعمیر و نگهداری برای توربین گاز****۳-۱- محاسبه ریسک خرابی با استفاده از تابع ریسک خرابی**

توربین گاز با در نظر گرفتن مقدار وزنی ذرات معلق آهن و سرب به عنوان عوامل تاثیر گذار در خرابی با استفاده از مدل ریاضی PHM و با جایگذاری در آن، مقدار عددی ریسک که در واقع جواب تابع PHM محسوب می شود برای هر زمان به دست می آید. که نتایج در جدول (۱) آورده شده است.

$$h(t_i, z_1(t_i), z_2(t_i)) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\beta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\sum_{i=1}^m \gamma_i z_i(t)} \quad (3)$$

در این تحقیق  $Z_1(t_i)$  معرف ذرات سایشی سرب و  $Z_2(t_i)$  معرف آهن در واحد ppm و t ساعت کارکرد توربین گاز است. همچنان که دیده شد  $\beta = 4/9$  نشان دهنده این مطلب است که عمر توربین گاز تاثیر گذار در وقوع خرابی هاست. در مدل،  $\eta = 39000$  ساعت، همان پارامتر مقیاس در توزیع وایبل است. با این حال باید توجه داشت که در این حالت  $\eta$  به معنای وقوع  $63/2\%$  خرابی ها قبل از  $39000$  ساعت کارکرد نیست، چرا که در تابع مذکور کوواریت ها یا عوامل موثر بر خرابی نیز دخیل هست. مقادیر ۱ و  $0/3$  در این تابع، وزن های داده شده برای میزان ذرات فرسایشی آهن و سرب بر حسب ppm هستند که از آنالیز داده های قبلی و اطلاعات مربوط به توربین های مشابه توسط مهندسان نگهداری و تعمیرات شرکت گاز تخمین زده شده است. با جایگذاری مقادیر به دست آمده از تابع وایبل در مدل بالا، و تکرار محاسبات انجام شده به تعداد ۱۳ مرتبه ( $t_1, \dots, t_{13}$ )، عدد ریسک  $3/8\%$  بدست آمده است این مقدار از مقدار عددی ریسک پایه که مقدار  $4\%$  تعیین شده بود، کمتر است بنابراین باید میتوان در این ساعت کارکرد از توربین گاز، عملیات اورهال انجام نشود و توربین به کار خودش ادامه دهد ولی به خاطر بالا رفتن قابلیت اطمینان تجهیز سازنده اورهال توربین گاز را در  $40000$  ساعت کارکرد توصیه نموده است.

$$h(t_1, z_1(t_1), z_2(t_1)) = \frac{4/9}{3} \left(\frac{4}{3}\right)^{3/9} e^{4+1.8} = 3.8\% \quad (4)$$

**جدول (۱) محاسبه درصد ریسک خرابی برای زمان های مختلف یازرسی**

ردیف	$t_i$	مقدار غلظت وزنی fe (ppm بر حسب $Z_2$ )	مقدار غلظت وزنی pb (ppm بر حسب $Z_2$ )	عدد ریسک
۱	۱۸۷۲۳	۰/۱۲	۰/۱۱۲	۰/۰۰۰۱۸
۲	۲۰۰۰۰	۰/۲۳۵	۰/۲۱	۰/۰۰۰۳۱
۳	۲۳۲۴۸	۰/۳۴۲	۰/۵	۰/۰۰۵۱
۴	۲۴۰۰۰	۰/۳۴۸	۰/۷	۰/۰۰۱۷
۵	۲۶۳۵۲	۰/۵۵۲	۱	۰/۰۰۴۴
۶	۲۸۵۲۰	۰/۷۶۷	۱/۳	۰/۰۰۶۲۶
۷	۲۹۵۳۰	۰/۷۷۲	۲	۰/۰۱
۸	۳۰۰۱۴	۰/۸۹	۲/۴	۰/۰۱۱۳
۹	۳۱۱۴۰	۱	۳	۰/۰۱۴۲
۱۰	۳۲۲۰۰	۱/۱۲	۳/۳	۰/۰۱۸۵
۱۱	۳۳۴۰۰	۱/۴۲	۳/۵	۰/۰۲۲
۱۲	۳۶۷۰۰	۱/۵۱	۳/۸	۰/۰۳۱
۱۳	۴۰۰۰۰	۱/۸۲	۴	۰/۰۳۸

**۲-۳- محاسبه هزینه بهینه نگهداری و تعمیرات بر اساس مدل ریاضی PHM**

در صورتیکه متوسط هزینه نت در واحد زمان را با  $\Phi(d)$  (تابعی از سطح ریسک)  $d$  بنامیم مقدار آن از رابطه زیر بدست می آید.

$$\varphi(d) = \frac{c(1-Q(d))+c+k)Q(d)}{w(d)} \quad (5)$$

که در آن  $C$  هزینه تعویض پیشگیرانه،  $(k+c)$  هزینه تعویض به دلیل خرابی و  $Q(d)$  برابر احتمال وقوع خرابی در سطح ریسک  $d$  است.  $w(d)$  متوسط زمان بین دو عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه (اورهال توربین) بهترین مقدار عددی ریسک است که موجب حداقل شدن رابطه فوق شود. هزینه تعویض پیشگیرانه (اورهال) توربین گاز به ازای هر ۴۰ هزار ساعت کارکرد ۱۴ هزار دلار و هزینه تعویض/تعمیر به دلیل خرابی ۲/۸ میلیون دلار برآورد شده است

در نظر گرفتن سطح ریسک به دست آمده از مدل PHM (۳/۸٪) می توان متوسط هزینه نت در واحد زمان را محاسبه نمود.

$$\varphi(d) = \frac{14000(1 - 0.038) + 2800000 * 0.038}{40000} = 3.8$$

بنابراین هزینه نگهداری و تعمیر بهینه برای توربین گاز با توجه به سطح ریسک تعریف شده برابر ۳/۵ دلار در ساعت هست .

**۳-۳- نتایج حاصل از بهینه سازی CBM توربین گاز با استفاده از مدل PHM**

بازرسی و سنجش وضعیت بر حسب نوع و عملکرد دستگاه ممکن است پیوسته یا دوره ای باشد، در «پایش وضعیت پیوسته» دستگاه معمولاً توسط حسگرهای نصب شده روی آن تحت نظارت پیوسته قرار دارد. سیگنالهای ارسالی از دستگاه به علت پارازیت‌های ناشی از این نوع سنجش ممکن است اطلاعات تشخیصی غلطی را ارائه دهند، وجود این عیب در سنجش وضعیت پیوسته، به همراه هزینه های بالای اجرای آن، در بسیاری از موارد منجر به طراحی و اجرای پایش وضعیت دوره ای می شود. واضح است که «پایش وضعیت دوره ای» با ریسک از دست دادن علایم و هشدارهای مربوط به خرابی هایی که ممکن است در فواصل بین بازرسی های متوالی رخ دهند، همراه خواهد بود. چالش اصلی در CBM توام با پایش وضعیت دوره ای، تعیین حد کنترل برای تعویض پیشگیرانه (اورهال) و تعیین بهترین فاصله ی بین بازرسی های متوالی است. دیدگاه های مختلفی به منظور بهینه سازی زمان اجرای بازرسی ها مطرح شده است، در این تحقیقات فرض بر آن است که دستگاه بعد از تعداد متناهی مرحله (وضعیت) دچار خرابی می شود و حد کنترل برای تعویض پیشگیرانه، وضعیت از دستگاه است که احتمال بروز خرابی برای تجهیز بعد از آن وضعیت وجود دارد. با در نظر گرفتن هزینه های تعویض پیشگیرانه و هزینه های تعویض به دلیل وقوع خرابی، مدلی ارائه شده که طی آن، حد کنترل برای تعویض پیشگیرانه، علاوه بر وضعیت دستگاه، به مقدار هزینه های مذکور نیز وابسته است، در این مدل با استفاده از سوابق اطلاعاتی حاصل از بازرسی ها و نتایج آنها و نیز وقوع خرابی ها، با معیار کمینه سازی متوسط هزینه های تعویض پیشگیرانه و هزینه های تعویض به دلیل وقوع خرابی در بلند مدت، حد کنترل بهینه برای دستگاه محاسبه می شود. یکی از مفروضات مدل PHM، ناچیز بودن هزینه انجام بازرسی در مقابل هزینه تعویض/تعمیر به دلیل وقوع خرابی است و بر همین اساس، هزینه بازرسی در محاسبات منظور نشده است. واضح است در شرایطی که انجام بازرسی مستلزم صرف هزینه است، کاهش تعداد بازرسی ها از یک سو موجب کاهش هزینه ها خواهد بود و از سویی دیگر این خطر را افزایش می دهد که به دلیل عدم اطلاع از وضعیت دستگاه، اقدامات پیشگیری به موقع صورت نگیرد و در نتیجه تعداد خرابی ها و هزینه ناشی از آنها افزایش یابد. تعیین بهترین فاصله بین بازرسی های متوالی، ملحوظ داشتن هزینه بازرسی نیز علاوه بر وضعیت دستگاه، هزینه تعویض پیشگیرانه و هزینه تعویض به دلیل وقوع خرابی

بسیار ضروری است. براساس سابقه اطلاعاتی موجود، حد کنترل برای تعویض پیشگیرانه با هدف کمینه سازی متوسط مجموع هزینه های تعویض پیشگیرانه و تعویض به دلیل خرابی در بلند مدت به دست آمده است. در این مدل، فرض بر این است که دستگاه مورد بحث دارای رفتار مارکوفی است و در طول بهره برداری می تواند دچار خرابی نرم، ناشی از افزایش عمر و عملکرد یا خرابی سخت، ناشی از شوک های مقطعی شود. همچنین در طول بهره برداری، هیچ فعالیت تعمیراتی در راستای بهبود وضعیت آن صورت نمی گیرد در صورت وقوع خرابی، با یک دستگاه نو تعویض می شود. یک مدل کارا برای تخمین ریسک خرابی دستگاه با لحاظ داده های کنترل وضعیت، مدل PHM است که در سال ۱۹۷۲ توسط COX معرفی شده است.

#### ۴-۳- مدل سازی PHM به کمک نرم افزار EXAKT

ابزاری جهت پشتیبانی تصمیم گیری برای پیش بینی قابلیت اطمینان و بهینه سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط می باشد. این نرم افزار می تواند برای پیش بینی شکست تجهیزات و تخمین باقی مانده عمر مفید آنها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تعریف فعالیت های نگهداری و تعمیرات به صورت ترکیبی از تعویض پیشگیرانه و به کارگیری تا زمان خرابی از ویژگیهای این نرم افزار است. بهینه سازی هزینه ها، بهینه سازی قابلیت اطمینان و دستیابی به تعادل در ریسک / هزینه / قابلیت اطمینان از جمله توانایی های این نرم افزار محسوب میشود.

با استخراج پارامتر های تابع وایبل و ترکیب آنها با همسازها ( $\gamma_{1,2}$ ) یا عوامل موثر بر خرابی مدل ریاضی PHM (تابع نرخ خرابی) مربوط به توربین گاز بدست می آید:

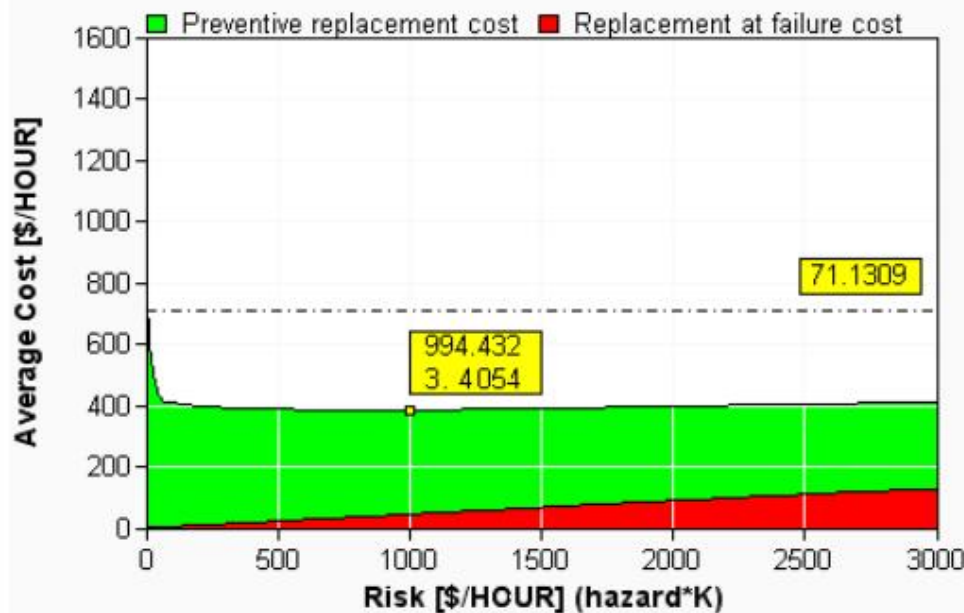
$$\gamma_1(f) = 0.262626 \quad \gamma_2(p) = 1.0522 \quad \beta = 5.00742 \quad \eta = 38988.3$$

در این جا باید به این نکته دقت شود که حد هشدار بروز خرابی بر اساس مقدار وزنی ذرات آهن و سرب در روغن تعیین می شود. با توجه به گزارش ارائه شده از نرم افزار می توان تابع نرخ خرابی توربین گاز را به صورت زیر نوشت:

$$h(t_i, z_1(t_i), z_2(t_i)) = \frac{5}{38988} \left( \frac{t}{338988} \right)^4 e^{1.0 + 0.2}$$

با انجام مدل سازی PHM در نرم افزار و ورود اطلاعات مورد نیاز آن، نمودارها و اطلاعات سودمندی از نرم افزار قابل استخراج هست. در این نمودار بهترین زمان برای انجام عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه ( $t_p^*$ )، هزینه نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و هزینه تعمیر بعد از خرابی بر اساس اپتیمم هزینه- زمان، تعیین می گردد.



**Cost Function**

شکل (۲) تابع هزینه

تابع هزینه در واقع نموداری است که براساس ریسک- متوسط هزینه، ترسیم می شود با توجه به اینکه در مدل PHM،  $\beta = 5$  محاسبه شده است، بنابراین عامل عمر در خرابی موثر است و با افزایش عمر تجهیز، احتمال بروز خرابی (ریسک خرابی) در آن افزایش می یابد. منطقه قرمز رنگ در نمودار (۲) به این موضوع اشاره دارد. مقدار ماکزیمم هزینه تعویض بعد از خرابی با خط نقطه نمایش داده شده است که مقدار آن برای توربین گاز ۷۱ دلار بر ساعت خواهد بود. همچنین زمان اپتیمم برای فواصل انجام عملیاتهای نگهداری و تعمیر پیشگیرانه ۹۹۴ ساعت (تقریباً ۴۱ روز) و هزینه این عملیات ۳/۴۱ دلار بر ساعت برآورد شده است.

**۵-۳- نمودار تصمیم گیری (تعویض - اورهال)**

فعالیت های تعمیراتی توصیه شده توسط سازنده توربین گاز THM1304 MAN در خصوص برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه توربین گاز مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه توربین گاز

عنوان فعالیت	کد فعالیت تعمیراتی
Routine inspections and operation maintenance	R
10000 EOH inspection	V1
20000 and 4000 inspection	V2
40000 EOH inspection and overhaul	V3
80000 EOH inspection and major overhaul	V4

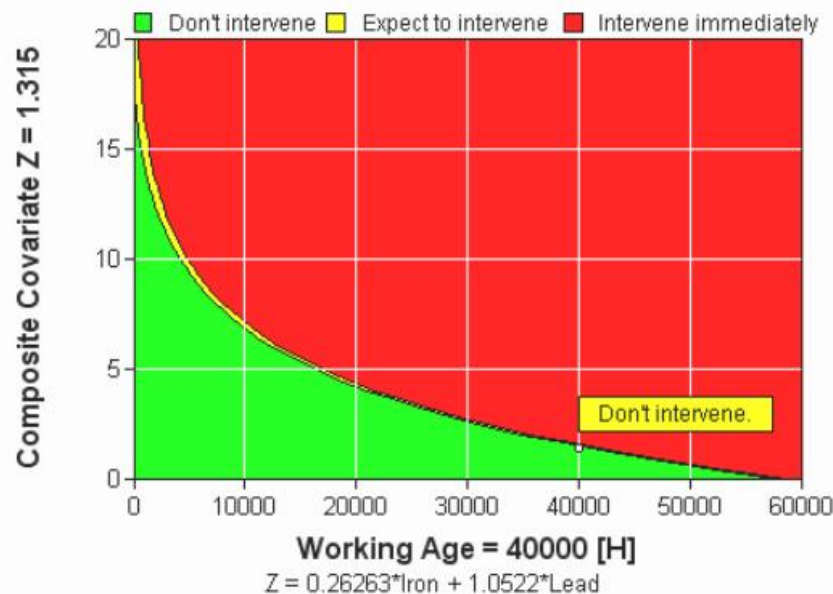
توجه به توصیه سازنده برای توربین گاز THM1304 MAN، به ازای هر ۴۰ هزار ساعت کارکرد معادل (EOH)، تعمیرات کلی (اورهال) در نظر گرفته شده است. ساعت کارکرد معادل، بر اساس تعریف سازنده تجهیز، نشان داده شده است.

$$EOH = OH + 10 \times \text{Number Of Starts}$$

ساعت کارکرد توربین های گازی بر اساس ساعت کارکرد معادل و ساعت کارکرد واقعی محاسبه می شود. ساعت کارکرد واقعی توربین گاز همان ساعت کارکردی است که توربین در حال کار بوده و ساعت کارکرد معادل در این نوع از توربین های گازی (بنابر توصیه کارخانه سازنده تجهیز) شامل مجموع ساعت کارکرد واقعی و ضریب ۱۰ برابری از استارت ها هست. ساعت کارکرد مورد نیاز در محاسبات نگهداری و تعمیرات همان ساعت کارکرد معادل هست. لازم به ذکر است تعیین ساعت کارکرد معادل در تجهیزات مختلف با توجه به نوع تجهیز و شرایط کارکردی آن متفاوت است که توسط کارخانه سازنده اعلام می شود.

شکل ۳ تصمیم گیری اورهال را نشان می دهد. این نمودار در واقع علاوه بر تایید زمان اورهال پیشنهادی سازنده توربین (۴۰۰۰۰ ساعت)، نشان می دهد که با توجه به آهنگ تغییرات عوامل ریسک یا تاثیر گذار بر خرابی، تعویق عملیات اورهال با توجه به اطلاعات دریافتی از ذرات فرسایشی روغن که از آزمایش روغن بدست آمده است، تا ۴۲۰۰۰ ساعت نیز امکان پذیر است.

### Replacement Decision



شکل ۳ تصمیم گیری اورهال توربین گاز

این نمودار از سه منطقه به رنگهای قرمز، زرد و سبز تشکیل شده است و از یکدیگر قابل تفکیک هستند، قسمت قرمز نمودار در واقع ناحیه خطر بروز حتمی خرابی است و با قرار گیری وضعیت تجهیز در این ناحیه عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه هر چه سریعتر باید انجام شود ناحیه زرد بیانگر ناحیه هشدار خرابی بوده و نشان می دهد احتمال بروز خرابی وجود دارد و بهتر است که عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه انجام شود و ناحیه سبز رنگ که نشان دهنده ی وضعیت خوب فعلی تجهیز است (احتمال بروز خرابی ناچیز است)، بیانگر این است که در این حالت نیازی به انجام عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه نیست. نقطه نمایش داده شده در شکل ۳ که نشان دهنده پیش بینی وضعیت توربین گاز در زمان کارکرد ۴۰۰۰۰ ساعت است از محل برخورد خطوط امتداد یافته از مجموع وزنی عوامل تاثیر گذار بر خرابی برحسب ppm (محور y ها) است که توسط نرم افزار محاسبه می گردد و عمر کارکرد تجهیز، برحسب ساعت (محور x ها) به دست می آید، با توجه به اینکه این نقطه در منطقه سبز قرار گرفته است انجام عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه می تواند در ۴۰۰۰۰ ساعت از کارکرد توربین گاز انجام شود ولی فعلا ضرورتی وجود ندارد در

نتیجه توصیه سازنده مبنی بر انجام عملیات تعمیرات کلی (اورهال) توربین گاز در کارکرد ۴۰۰۰۰ ساعت محتاطانه در نظر گرفته شده است.

### بحث و نتیجه گیری

وقتی تجهیزاتی را مورد نگهداری و تعمیرات قرار می دهیم، می خواهیم وضعیتی را حفظ نماییم که در آن، تجهیز بگونه ای که کاربرانش انتظار دارند، به ادامه فعالیت پردازد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک، فرآیندی است جهت تعیین آنچه باید انجام شود تا در شرایط عملیاتی موجود، ریسک عملیات کاهش یابد. امروزه استفاده از این روش بعنوان یک پیش نیاز برای ارتقاء میزان اثربخشی برنامه های نگهداری و تعمیرات مطرح بوده و برهمین اساس گرایش سازمانها به این رویکرد بسیار افزایش یافته است. در یک نگاه، اجرای این فرآیند منجر به کاهش ریسک و افزایش قابلیت اطمینان در کنار صرفه جویی قابل توجه در هزینه های نگهداری و تعمیر ماشین آلات و تجهیزات مهم صنایع گردیده است. توربین های گازی یکی از پیچیده ترین تجهیزات در صنایع به حساب می آیند. این تجهیزات به دلیل داشتن قیمت بالا و حساسیت فوق العاده، دارای اهمیت بالایی در صنایع مختلف بوده و به این لحاظ وجود یک برنامه نگهداری و تعمیرات که اطمینان از کارکرد صحیح و دقیق این تجهیزات را فراهم آورد، بسیار ضروری به نظر می رسد. لذا تحلیل نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و تدوین برنامه های نگهداری و تعمیرات در خصوص توربین های گازی در تاسیسات گاز، با توجه به لزوم استمرار عملیات انتقال گاز، گامی مهم در جلوگیری از خرابی های حاصل از عدم اجرای برنامه های نگهداری و تعمیرات بر مبنای کاهش ریسک و افزایش قابلیت اطمینان خواهد بود. در این تحقیق، به تحلیل برنامه های نگهداری و تعمیرات بر مبنای ریسک توربین گاز، که یکی از تجهیزات مهم در بسیاری از صنایع از جمله تاسیسات تقویت فشار گاز محسوب می شود، پرداخته شده است. جهت طبقه بندی سیستم ها، زیر سیستم ها و قطعات توربین گاز از استاندارد ایزو و به منظور تحلیل ریسک خرابی ها از استاندارد ناویر استفاده شده است. کاهش چشمگیر هزینه و زمان در نگهداری و تعمیرات دستگاهها، باعث شد که RBM امروزه بعنوان یکی از اصلی ترین روشها برای بهینه سازی نگهداری و تعمیرات، مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که برنامه های پایش وضعیت (آنالیز روغن، آنالیز ارتعاشات، ترموگرافی و ...) در تحلیل RBM توربین گاز تعریف شده و در اولویت اجرای برنامه های نگهداری و تعمیرات قرار دارد، بهینه سازی این استراتژی ها از طریق پردازش اطلاعات حاصل از آنها، به منظور تخمین ریسک خرابی تجهیز، امری ضروری بنظر می رسد. در این تحقیق، روش آنالیز روغن مورد بررسی قرار گرفته است. از میزان عناصر فرسایشی در روغن به عنوان عاملی موثر در خرابی ها، بهره گیری شده است. به این ترتیب که با تشکیل پایگاه داده حاصل از نتایج آنالیز روغن توربین گاز نصب شده در منطقه دو عملیات انتقال گاز، وبا بهره گیری از مدل ریاضی تخمین ریسک خرابی (PHM) و دیاگرام تابع هزینه، بهینه سازی فرآیند آنالیز روغن مورد بررسی قرار گرفته است.

### مراجع

- Abazi, S. Zineb ; Mascolo, Maria Di ; Gascar, Eric ;, "Performance evaluation of centralized maintenance workshop by using Queuing Networks," *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering*, pp. 175-180, 22-23 November 2012.
- Tang, Y., Liu, Q., Jing, J., Yang, Y and Zou, Z. (2016). " A framework for identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance ". *Energy xxx* , 1- 9.
- آقایی، ر. آقایی، ا. ناجی زاده، م. ح. (۱۳۹۴)، شناسایی و رتبه بندی شاخص های موثر بر تعمیرات و نگهداری چابک با رویکرد دلفی فازی و دی متل فازی، فصلنامه مدیریت صنعتی دانشگاه تهران، دوره ۱، شماره ۱.



- ربانی، علی؛ زارع حبیب؛ بهنیا فروغ (۱۳۹۲). ارائه الگوی مناسب جهت پیاده سازی سیستم نگهداری و تعمیرات در کارخانجات خطوط تولید پیوسته با رویکرد مدل های تصمیم گیری و برنامه ریزی آرمانی فازی، فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، سال یازدهم، شماره ۳۱، صص ۸۵-۱۰۰
- سلحشور، ک. هورفرد، ف. عباسی نیاد، ر. عطایی، س. (۱۳۹۲). طراحی و پیاده سازی برنامه نگهداری ریسک مبنا برای تعیین طول دوره بازدید تجهیزات ابزاردقیقی و نگهداری بهینه از آنها در پالایشگاه گاز سرخون، مجله کنترل، جلد ۷، شماره ۴، صص ۱۹-۲۹.
- شعاعی، ع. دشتی، ر. (۱۳۹۵). بهینه سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان برای سیستم های توزیع نیرو، همایش ملی مهندسی برق مجلسی.