

زمانبندی تولید و بازرسی تجهیزات با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از افت تجهیزات

پرویز فتاحی^{۱*}، سعیده اسدزاده ملکی^۲، ساناز شیخ تاجیان^۳، سمانه بابایی مراد^۴

۱. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران
۳. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران
۴. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

خلاصه

استفاده‌ی مداوم از تجهیزات و سیستم‌ها، آن‌ها را در معرض خرابی (مانند کهنگی، سایش، خوردگی و خزش) قرار می‌دهد. آثار خرابی صرفاً محدود به کاهش کارایی، کاهش قابلیت اطمینان و کاهش عمر سیستم نبوده و می‌تواند منجر به تخریب و آسیب‌های زیست‌محیطی نیز گردد. بررسی اثرات نامطلوب افت سیستم‌ها منجر به شکل‌گیری مطالعات گسترده در حوزه‌ی استراتژی‌های نگهداری و تعمیر مبتنی بر پایش وضعیت گشته است. یکی از رویکردهای مورد توجه در این حوزه بحث حفظ و نگهداری و تعمیر بهینه براساس وضعیت سلامت و کارکرد سیستم است که با کنترل اثرات نامطلوب افت سیستم بر محیط‌زیست، هزینه‌های سربار ناشی از جریمه‌های مرتبط را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش بررسی و مدل‌سازی سیاست نگهداری و تعمیر بهینه شامل تعیین زمان بهینه‌ی بازرسی‌ها با هدف کمینه‌سازی متوسط هزینه کل در واحد زمان در شرایط عدم قطعیت است. در این مقاله متغیرهای مدت‌زمان از ابتدای دوره تا رسیدن به سطح هشدار، مدت‌زمان از لحظه عبور از سطح هشدار تا وقوع خرابی و مدت‌زمان از لحظه شناسایی عبور سیستم از سطح هشدار (با انجام فرآیند بازرسی) تا آغاز عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه، به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و اثرات آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل توسط سه روش جستجوی مستقیم نلدر مید، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO برای یک مثال عددی حل شده و زمان‌های بهینه بازرسی به دست آمده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۳/۸

پذیرش ۱۳۹۸/۷/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر

پایش وضعیت

مخاطرات زیست‌محیطی

زمانبندی

روش جستجوی مستقیم

الگوریتم نلدر مید

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم PSO

۱. مقدمه
با هدف کاهش انتشار گازهای آلاینده می‌باشند. اهمیت هزینه‌های مرتبط با جریمه‌هایی که سازمان‌ها به دلیل ایجاد اثرات نامطلوب سیستم بر محیط‌زیست متحمل می‌شوند، باعث شده سازمان‌ها در هنگام استقرار و پیاده‌سازی یک استراتژی نگهداری و تعمیر منحصراً به هزینه‌های مرتبط با نگهداری و تعمیر (شامل هزینه‌های نگهداری و تعمیر اصلاحی، هزینه‌های نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و هزینه‌های بازرسی) اکتفا ننموده و هزینه‌های مرتبط با جریمه‌های زیست‌محیطی را نیز در نظر بگیرند.

فرسایش تدریجی سیستم‌ها، علاوه بر تأثیرات مشخص بر عملکرد سیستم و کیفیت خروجی، می‌تواند اثرات مخربی در محیط‌زیست نیز پدید آورد. اهمیت روزافزون حفاظت از محیط‌زیست و فشاری‌های اجتماعی، دولت‌ها را بر آن داشته تا با استفاده از ابزارهای محدودکننده مانند قوانین الزام‌آور و جریمه‌ها، سازمان‌ها را ملزم به رعایت استانداردهای زیست‌محیطی نمایند. نمونه‌ای از این الزامات پروتکل بین‌المللی کیوتو است که اعضای آن ملزم به اجرای قوانین وضع شده

* نویسنده مسئول: پرویز فتاحی

تلفن: ۰۲۱-۸۵۶۹۲۱۹۱؛ پست الکترونیکی: p.fattahi@alzahra.ac.ir

در رویکرد CBM با بازرسی‌های دوره‌ای، سیستم موردبررسی در زمان‌های مشخصی مورد بازرسی قرار می‌گیرد. برای مثال طبق یک برنامه زمانی، آنالیز روغن برای موتور انجام می‌شود و داده‌های مربوط به کیفیت روغن موردبررسی قرار می‌گیرد. در صورت محرز شدن پایین آمدن کیفیت روغن از حد مجاز ضمن بررسی منشأ افت کیفیت، عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه برنامه‌ریزی می‌شود. در رابطه با CBM با بازرسی‌های دوره‌ای می‌توان به پژوهش کاستانیر و همکاران [۸] اشاره کرد. یانگ و همکاران [۹] به بررسی پیاده‌سازی CBM برای پیشگیری از خرابی‌های ناشی از شوک‌های داخلی و خارجی در سیستم‌های پیچیده‌ی صنعتی پرداخته‌اند که سیاست CBM پیشنهادی آن‌ها از آستانه‌های نرمال و آستانه‌ی خرابی در کنار بازرسی دوره‌ای برای کاهش هزینه‌های نگهداری ناشی از خرابی‌ها تشکیل شده است. مدل CBM پیشنهادی ون هورنیک و همکاران [۱۰] نخستین ادغام عوامل محیطی با تصمیم‌سازی و بهینه‌سازی بود. این مدل یک ابزار تحلیل اکولوژیکی و اقتصادی است که شامل چندین استراتژی نگهداری و تعمیر (مانند نگهداری و تعمیر مبتنی بر شکست، نگهداری و تعمیر مبتنی بر block و نگهداری و تعمیر مبتنی بر استفاده) می‌باشد. با استفاده از این ابزار تحلیلی، می‌توان بازه‌های نگهداری و تعمیر بهینه با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و اکولوژیکی و یکپارچگی به دست آورد. چلبی و آیت کادی [۱۱] به بررسی بازه‌های بهینه‌ی بازرسی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل در بازه‌ی زمانی نامحدود پرداخته‌اند. زو و کائو [۱۲] از کارایی بهره‌وری انرژی به‌عنوان تابع هدف عملیات نگهداری و تعمیر با به‌روزرسانی نگهداری و تعمیر دوره‌ای براساس ارزیابی کارایی بهره‌وری انرژی استفاده کرده‌اند (کاربردی از فرآیند مارکوف). شیوخی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۲ یک روش مدل‌سازی CBM برای ادغام مسائل زیست‌محیطی با عملیات نگهداری و تعمیر پیشنهاد کردند. آن‌ها فرض کردند دو پارامتر «مدت‌زمان از لحظه‌ای که تجهیزات در شرایط خوب قرار دارند تا لحظه‌ای که پس از بازرسی مشاهده می‌شود وضعیت سیستم از سطح هشدار فراتر رفته است» و «مدت‌زمان از لحظه عبور از سطح هشدار تا لحظه خرابی» دارای تابع چگالی احتمالی مشترک هستند بنابراین احتمال نگهداری و تعمیر پیشگیرانه، احتمال نگهداری و تعمیر اصلاحی و بازرسی می‌تواند به‌دست‌آمده و در نتیجه، هزینه کل متوسط در واحد زمان در طول دوره جدید را می‌توان محاسبه نمود. تللی و همکاران [۱۴] چندین بهبود در روش [۱۱] ایجاد کرده و پیشنهاد یک آستانه پایین‌تر از سطح هشدار تعیین شده توسط قانون را به‌عنوان معیاری برای تصمیم‌گیری در مورد انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و در نتیجه اجتناب از جریمه‌های زیست‌محیطی داده‌اند. واسیلیادیس و پیستیکوپول [۱۵] یک چارچوب بهینه‌سازی با در نظر گرفتن آسیب‌های زیست‌محیطی و ویژگی‌های عملیاتی در مرحله‌ی اولیه طراحی فرآیند، ایجاد کرده‌اند. این چارچوب برنامه زمانی نگهداری و تعمیر پیشگیرانه بهینه را به‌دست می‌دهد.

با اهمیت روزافزون بهینه‌سازی کارایی تصمیمات مربوط به عملیات نگهداری و تعمیر، در سال ۱۹۷۵ رویکرد نگهداری و تعمیر مبتنی بر پایش وضعیت (CBM) مطرح گردید. این رویکرد براساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق فرآیند پایش وضعیت سیستم، تصمیمات مربوط به نگهداری و تعمیر را پیشنهاد می‌دهد [۱]. تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص بررسی رویکرد نگهداری و تعمیر مبتنی بر پایش وضعیت انجام‌گرفته است. به‌عنوان مثال بنگستون [۲] به بررسی استانداردها و رویکردهای استانداردسازی CBM و جنبه‌های سازمانی مرتبط با آن پرداخته است. هاشمیان و بین [۳] در مطالعه خود روش‌های CBM را به سه گروه براساس منابع داده تقسیم‌بندی نموده‌اند: ۱- روش نگهداری مبتنی بر سنسور موجود، ۲- روش نگهداری مبتنی بر سنسور آزمایشی و ۳- روش نگهداری مبتنی بر سیگنال آزمایشی. در واقع CBM زمانی که از نظر فنی مقدور باشد، با شناسایی مؤثر و به هنگام خرابی‌های منتج به نشی و یا خرابی‌هایی که منجر به افزایش مصرف انرژی می‌گردند و ... مناسب‌ترین سیاست جهت جلوگیری از انتشار آلودگی محسوب می‌گردد زیرا بخش عمده‌ای از آلودگی‌های زیست‌محیطی در سیستم‌های تولیدی به دلیل افت سیستم، اتفاق می‌افتند. به همین دلیل رویکرد نگهداری و تعمیر مبتنی بر پایش وضعیت با مدنظر قرار دادن آسیب‌های زیست‌محیطی مرکز توجه حجم گسترده‌ای از تحقیقات آکادمیک بوده است. هوانگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۶ یک مدل بهینه برای استراتژی CBM براساس نظریه‌ی فرآیندهای تصادفی ارائه دادند. مارتورل و همکاران [۵] تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ای برای دستیابی به قابلیت اطمینان، دسترسی، قابلیت نگهداری، ایمنی بیشتر و هزینه کمتر (RAMS+C) در نیروگاه‌های هسته‌ای پیشنهاد می‌کنند. روش پیشنهادی علاوه بر موارد اشاره شده مخاطرات زیست‌محیطی را نیز در نظر می‌گیرد. یان و هو [۶] نشان دادند که خرابی ماشین‌آلات باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود که می‌تواند با استفاده از استانداردهای مرتبط، به میزان انتشار کربن تبدیل شود؛ بنابراین، زمانی که از لحاظ فنی امکان‌پذیر است، پایش مبتنی بر شرایط، تعمیر و نگهداری، مناسب‌ترین اقداماتی است که باید اتخاذ شود. این امر سبب می‌شود سطح خرابی سیستم و در نتیجه میزان آسیب زیست‌محیطی بررسی گردد و اقدامات پیشگیرانه مناسب صورت گیرد و ریسک جریمه و گاهی فاجعه محدود شود.

بررسی ادبیات موضوع مرتبط با مدل‌های CBM نشان‌دهنده دو رویکرد کلی پایش گسسته و پایش مستمر در این خصوص است: داده‌ها در فرآیند پایش وضعیت که بسته به نوع سیستم می‌تواند به‌صورت پایش ارتعاشات، پایش فیزیکی، الکتریکی، حرارتی و ... باشد [۷]، از طریق انجام بازرسی‌های دوره‌ای (پایش در زمان‌های گسسته) یا پایش مستمر (بررسی پیوسته‌ی سیگنال‌هایی که به‌صورت مداوم به کمک سنسورهای خاص و یا سایر نمایانگرها مخابره می‌شوند) جمع‌آوری می‌شوند و به‌عنوان معیاری برای بررسی وضعیت کارکرد سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در جدول ۱ آورده شده است.

در این مقاله یک موتور مکانیکی بررسی شده است که در اثر فرسایش تدریجی موجب ایجاد آلودگی در محیط زیست می‌شود و در طول مدتی که در این وضعیت مانده هزینه‌هایی به‌عنوان جریمه به سیستم تولید تحمیل می‌کند. در بازرسی‌های دوره‌ای کیفیت روغن موتور (آنالیز روغن) سنجیده می‌شود. مقدار اندازه‌گیری شده در آنالیز روغن موتور یک متغیر وضعیت برای عملکرد موتور است زمانی که اندازه‌ی این متغیر از آستانه‌ی خاصی که به آن سطح هشدار می‌گوییم تجاوز کند، موتور در وضعیت نامناسب بوده و آلودگی زیست‌محیطی ایجاد می‌کند به محض تشخیص عبور از سطح هشدار در بازرسی، عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه برنامه‌ریزی می‌شود و پس از گذشت مدت‌زمان خاصی که الزاماً ثابت نیست، عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه صورت می‌گیرد. این مدل در واقع توسعه‌ای از کار شیوخ و همکاران [۱۳] می‌باشد که در آن اثر تصادفی مدت‌زمان انتظار تا شروع عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه موردبررسی قرار گرفته است.

۲. تشریح مسئله

در این مقاله یک موتور از یک سیستم تولیدی که در گذر زمان به دلیل فرسایش تدریجی، منجر به آسیب زیست‌محیطی می‌شود موردبررسی قرار گرفته است. آسیب‌های زیست‌محیطی جریمه‌ها را به همراه دارند. میزان آسیب زیست‌محیطی ایجاد شده به‌صورت تصادفی می‌باشد. موتور مورد اشاره یا در حال کار کردن است و یا خراب است و وضعیت عملکرد آن به‌صورت دو حالت انجام عملیات و حالت خرابی تعریف می‌شود. به‌منظور کاهش هزینه‌های ناشی از جریمه‌های زیست‌محیطی، سلامت عملکرد موتور بایستی به‌صورت دوره‌ای مورد بازرسی قرار گیرد و در صورت لزوم عملیات نگهداری و تعمیر انجام شود. در این مورد طی بازرسی‌های دوره‌ای، آنالیز روغن صورت می‌گیرد و مقدار حاصل از این اندازه‌گیری با یک متغیر وضعیت نمایش داده می‌شود. در صورتی که مقدار این متغیر از یک سطح هشدار تجاوز کند، موتور از لحاظ عملکردی دچار افت شده و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی قابل‌ملاحظه‌ای پدید می‌آورد. در صورتی که در بازرسی‌های زمانبندی شده مشاهده شود مقدار متغیر وضعیت از آستانه هشدار تجاوز نموده، عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه برنامه‌ریزی می‌شود و در سریع‌ترین زمان ممکن انجام می‌شود. مدت‌زمان از لحظه شناسایی افت سطح عملکرد سیستم تا لحظه شروع عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه شامل برنامه‌ریزی‌ها و انجام هماهنگی‌های لازم اعم از آماده‌سازی و اقدامات لجستیکی بوده و بسته به دسترس بودن منابع، امکانات و نیروی انسانی متغیر است و در طول این مدت موتور همچنان به کار ادامه می‌دهد تا لحظه‌ای که خراب شود یا عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه آغاز گردد. در صورتی که در بازرسی‌ها مقدار متغیر وضعیت حاکی از عملکرد مطلوب زیست‌محیطی موتور داشته باشد، موتور به انجام عملیات خود ادامه

در رویکرد CBM با پیش مستمر، سیگنال‌هایی که به‌صورت مداوم به کمک سنسورهای خاص و یا سایر نمایانگرها مخابره می‌شوند، تحلیل می‌گردند و به محض شناسایی افت عملکرد برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر پیشگیرانه برنامه‌ریزی می‌گردد (کوپنو [۱۶]). در عمل، در بسیاری از مواقع استفاده از رویکرد پیش مستمر بسیار پرهزینه و دشوار می‌باشد و برای همین رویکرد غالب، بحث بازرسی‌های دوره‌ای است. ژائو و همکاران [۱۷] به بررسی کمینه‌سازی مقدار متوسط نرخ هزینه در سیاست CBM پرداخته‌اند که در آن عملیات نگهداری با تأخیرات تصادفی انجام می‌گیرد. برنگور و همکاران [۱۸] و مایر-هیرمر و همکاران [۱۹] استراتژی نگهداری و تعمیر با پیش مستمر را بررسی کرده‌اند که در آن مدت‌زمان تأخیر در دریافت عملیات نگهداری و تعمیر ثابت در نظر گرفته شده است. در مدل یانگ و همکاران [۲۰]، فرض بر این است که اگر خرابی خیلی زود در چرخه بازرسی رخ دهد، تعویض سیستم به تعویق بیفتد و سیاست‌های بازرسی/نگهداری برای سیستم‌های تک‌واحدی موردبررسی قرار گرفته‌اند. هی و همکاران [۲۱] استراتژی بهینه نگهداری و تعمیر پیشگیرانه را با اقدامات نگهداری در زمان‌هایی خارج از برنامه مورد مطالعه قرار داده‌اند.

براساس مرور ادبیات انجام شده طیف گسترده‌ای از مطالعات در این خصوص صورت گرفته ولی پژوهش‌های معدودی مدت‌زمان تأخیر برای دریافت عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را برای سیستم‌های دچار افت عملکرد موردبررسی قرار داده‌اند. برنگور و همکاران [۱۸] سیستمی با پیش مستمر را موردبررسی قرار داده‌اند که در آن زمان انتظار برای دریافت عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه را ثابت در نظر گرفته شده و سطح هشدار پرداخته که هزینه‌های زیست‌محیطی را کمینه می‌کند، محاسبه شده است. مایر-هیرمر و همکاران [۱۹] با ثابت در نظر گرفتن زمان انتظار، به کمینه‌سازی هزینه عملیات نگهداری و تعمیر درازمدت در سیستمی با پیش مستمر پرداخته‌اند. شیوخ و همکاران [۱۳] به بررسی سیستمی با پیش دوره‌ای پرداخته‌اند که در آن زمان انتظار برای دریافت عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه ثابت بوده و با کمینه‌سازی مقدار متوسط نرخ هزینه، زمان‌های بازرسی بهینه را محاسبه کرده‌اند. در مطالعه اخیر ژائو و همکاران [۱۷] در یک سیستم با پیش مستمر، با در نظر گرفتن زمان انتظار تصادفی برای دریافت عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه، با کمینه‌سازی مقدار متوسط نرخ هزینه، مقدار بهینه سطوح هشدار محاسبه شده است.

سیستم موردبررسی در کار ژائو و همکاران یک سیستم با پیش پیوسته است بنابراین این نیاز احساس می‌شود که در سیستم با رویکرد پیش دوره‌ای نیز چنین مطالعاتی انجام گیرد. در این مقاله به بررسی میزان تأثیر تصادفی بودن این زمان بر هزینه متوسط کل در رویکرد پیش دوره‌ای اشاره دارد. طبق نتایج به‌دست آمده، زمان انتظار تصادفی نیاز بیشتر برای دریافت عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (تعداد دفعات بازرسی بیشتری را به دنبال دارد. خلاصه‌ای از ادبیات تحقیق

موتور و عبور از سطح هشدار است، در این لحظه فراخوانی عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه صورت می‌گیرد و از آن پس زمان سپری شده، شامل زمان آماده‌سازی و لجستیک تا شروع عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و یا خرابی سیستم است.

می‌دهد. دوره عملکرد سیستم، با مدت‌زمان از لحظه شروع به کار سیستم تا خاتمه کار آن با یکی از دو رخداد خرابی یا عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه معرفی می‌گردد.

شکل ۱ نمایی از افت عملکرد سیستم در طول زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازرسی چهارم مشخص می‌شود که مقدار سنجیده شده از آنالیز روغن نشان‌دهنده افت عملکرد

جدول (۱): خلاصه‌ای از مرور ادبیات رویکرد CBM

تأخیر زمانی تا آغاز عملیات PM	سیاست بازرسی مورداستفاده در رویکرد CBM		نوع سیستم	پژوهشگران
	بازرسی دوره‌ای	پایش پیوسته		
صرف نظر شده	●		سیستم دو واحدی	کاستانیر و همکاران [۸]
بررسی نشده	●		سیستم تک‌واحدی	یانگ و همکاران [۹]
ثابت	●		سیستم تک‌واحدی	چلبی و آیت‌کادی [۱۱]
ثابت	●		سیستم تک‌واحدی	شیوخی و همکاران [۱۳]
صرف نظر شده	●		سیستم در حالت کلی	تلیلی و همکاران [۱۴]
تصادفی	●		سیستم در حالت کلی	واسیلیادیس و پیستیکوپول [۱۵]
ثابت		●	سیستم تک‌واحدی	کوپنو [۱۶]
تصادفی		●	سیستم در حالت کلی	ژائو و همکاران [۱۷]
ثابت		●	سیستم تک‌واحدی	برنگور و همکاران [۱۸]
ثابت	●		سیستم در دو حالت ساده و پیچیده	مایر-هیرمر و همکاران [۱۹]
تصادفی		●	سیستم تک‌واحدی	یانگ و همکاران [۲۰]
مقایسه حالات انجام PM به موقع، با تأخیر و زود هنگام		●	سیستم در دو حالت ساده و پیچیده	هی و همکاران [۲۱]
تصادفی	●		سیستم تک‌واحدی	پژوهش حاضر

پارامترها

- C_c : هزینه‌ی متوسط هر عمل نگهداری و تعمیر اصلاحی
- C_p : هزینه‌ی متوسط هر عمل نگهداری و تعمیر پیشگیرانه
- C_d : هزینه‌ی متوسط در واحد زمان برای آسیب‌های زیست‌محیطی، نظیر جریمه
- C_i : هزینه‌ی متوسط هر بازرسی
- C_t : هزینه‌ی تصادفی کل
- T : متغیر تصادفی مدت‌زمان سپری شده از ابتدای دوره تا رسیدن به سطح هشدار
- τ : لحظه‌ی رسیدن سیستم به سطح هشدار

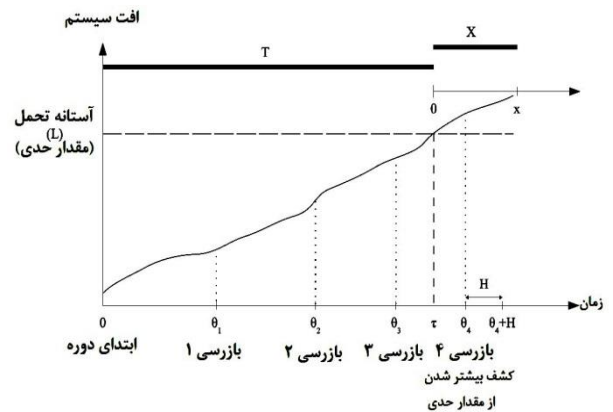
$f(\cdot)$: تابع چگالی احتمال T

X : متغیر تصادفی مدت‌زمان سپری شده از لحظه T تا وقوع خرابی (عمر باقیمانده سیستم از لحظه‌ای که سیستم به سطح هشدار رسیده است)

$g(\cdot)$: تابع چگالی احتمال X

$G(\cdot)$: تابع چگالی تجمعی X

N : متغیر تصادفی تعداد بازرسی‌ها



شکل (۱): نمایی از افت وضعیت سیستم در طول زمان

۳. مدل ریاضی

در ذیل مدل ریاضی مساله موردبررسی ارائه می‌گردد:

نمادها

اندیس‌ها

i : اندیس شمارنده بازرسی‌ها

مشاهده‌شده از سطح هشدار عبور کرده و قبل از اجرای عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه خراب شود:

$$P_c = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{\infty} G(X \leq \theta_i + h - t) f(t) r(h) dh dt \quad (۴)$$

اثبات رابطه بالا

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{i=1}^{\infty} p(\theta_{i-1} < T \leq \theta_i \& 0 \leq H \leq \infty \& X \leq \theta_i + H - T) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{\infty} p(\theta_{i-1} < T \leq \theta_i \& X \leq \theta_i + H - T | H = h) r(h) dh \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{\infty} p(X \leq \theta_i + H - T | H = h \& T = t) r(h) f(t) dh dt \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{\infty} p(X \leq \theta_i + h - t) r(h) f(t) dh dt \end{aligned}$$

با توجه به اینکه یک دوره با یکی از دو اقدام نگهداری و تعمیرات اصلاحی یا نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه خاتمه می‌یابد به‌وضوح می‌توان ادعا کرد:

$$P_c + P_p = 1 \quad (۵)$$

متوسط تعداد بازرسی‌ها $E(N)$ (برای اثبات رجوع کنید به [17])

$$E(N) = \sum_{i=1}^{\infty} i \left(\int_0^{\theta_{i+1}} G(\theta_{i+1} - t) f(t) dt - \int_0^{\theta_i} G(\theta_i - t) f(t) dt \right) \quad (۶)$$

$E(T_d)$ مدت‌زمان متوسط وقوع آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از افت سطح سیستم و گذر از سطح هشدار در یک دوره است. (برای اثبات رجوع کنید به [17])

$$E(T_d) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \left(\int_0^{\theta_i + H - \tau} [1 - G(x)] dx \right) f(\tau) d\tau \quad (۷)$$

$E(T_t)$ به مقدار متوسط مدت‌زمان دوره اشاره دارد و از رابطه زیر قابل محاسبه است: (برای اثبات رجوع کنید به [17])

$$E(T_t) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \left(\tau + \int_0^{\theta_i + H - \tau} [1 - G(x)] dx \right) f(\tau) d\tau \quad (۸)$$

۴. حل مدل

همان‌طوری که در قسمت قبل اشاره شد، به‌منظور دستیابی به زمان‌های بهینه برای بازرسی‌ها با حداقل هزینه، بایستی مسئله زیر حل شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } J(\theta) &= \frac{C_c P_c + C_p P_p + C_i E(N) + C_d E(T_d)}{E(T_t)} \quad (۹) \\ \text{s.t. } &\theta \geq 0 \end{aligned}$$

H : متغیر تصادفی مدت‌زمان انتظار از لحظه شناسایی کاهش افت سیستم و تجاوز از سطح هشدار تا شروع نگهداری و تعمیر پیشگیرانه

$r(\cdot)$: تابع چگالی احتمال H

$R(\cdot)$: تابع چگالی تجمعی H

T_d : مدت‌زمان تصادفی برای آسیب‌های زیست‌محیطی

T_c : مدت‌زمان تصادفی دوره (دوره با انجام عملیات نگهداری و تعمیر اصلاحی یا نگهداری و تعمیر پیشگیرانه خاتمه می‌یابد).

P_c : احتمال خاتمه‌ی دوره با یک عمل نگهداری و تعمیر اصلاحی

P_p : احتمال خاتمه‌ی دوره با یک عمل نگهداری و تعمیر پیشگیرانه

متغیرهای تصمیم

θ_i : زمان بازرسی i ام

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ بردار زمان‌های بازرسی

زمان ابتدای دوره را صفر فرض می‌کنیم. هدف مسئله، کاهش هزینه‌های کل اعم از هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (پیشگیرانه و اصلاحی)، هزینه‌های بازرسی و هزینه‌های سربار ناشی از آسیب‌های زیست‌محیطی است. در این بررسی تابع هزینه کل متوسط در واحد زمان برای یافتن زمان‌های بهینه برای بازرسی‌ها و تعداد دفعات بازرسی مورد‌استفاده قرار گرفته است، با توجه به تعریف دوره در بخش قبل، می‌توان افق زمانی فرآیند فوق را نامحدود در نظر گرفت و تصور نمود دوره مورد‌نظر بارها و بارها تکرار می‌شود. تابع نرخ هزینه را می‌توان با مقدار متوسط هزینه کل هر دوره و متوسط زمان هر دوره تخمین زد.

$$J(\theta) = \frac{E(C_t)}{E(T_t)} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، $E(C_t)$ ، قدار متوسط هزینه کل هر دوره را نشان می‌دهد و $E(T_t)$ ، به قدار متوسط مدت‌زمان دوره اشاره دارد.

هزینه‌های بازرسی + هزینه‌های زیست‌محیطی = هزینه کل یک دوره
هزینه‌های نت اصلاحی + هزینه‌های نت پیشگیرانه +

با توجه به رابطه بالا، متوسط هزینه کل یک دوره با رابطه (۲) داده می‌شود:

$$E(C_t) = C_c P_c + C_p P_p + C_i E(N) + C_d E(T_d) \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $E(N)$ متوسط دفعات بازرسی در یک دوره و $E(T_d)$ مدت‌زمان متوسط وقوع آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از افت سطح سیستم و گذر از سطح هشدار در یک دوره است.

احتمال اینکه دوره با N بازرسی و با خرابی سیستم خاتمه یابد معادل این است که سیستم تا بازرسی $N-1$ ام از سطح هشدار عبور نکند و قبل از اجرای عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه خراب شود:

$$\begin{aligned} P_c &= p(0 \leq H \leq \infty \& \theta_{N-1} < T \leq \theta_N \& T + X \leq \theta_N + H) \\ &= \int_{\theta_{N-1}}^{\theta_N} \int_0^{\infty} G(\theta_N + h - t) f(t) r(h) dh dt \quad (۳) \end{aligned}$$

در حالت کلی احتمال اینکه دوره با خرابی سیستم خاتمه یابد معادل این است که سیستم در فاصله‌ی بین آخرین بازرسی که

مدل (۹) در رده مسائل حداقل سازی بدون محدودیت قرار می‌گیرد. الگوریتمی که برای حل این مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است برگرفته از مقاله شیوخی و همکاران [۱۷] است، با این تفاوت که شالوده اصلی حل آن علاوه بر روش نلدنر، با الگوریتم ژنتیک و روش PSO نیز جایگزین شده است تا کارایی استفاده از این روش‌ها در مقایسه با روش نلدنر مورد بررسی قرار گیرد. قبل از پرداختن به الگوریتم حل به اختصار به تشریح روش‌های عنوان شده پرداخته می‌شود.

۱-۴. روش نلدنر مید [۲۲]

الگوریتم نلدنر-مید در سال ۱۹۶۵ توسط جان نلدنر و روجر مید ارائه شده است. این الگوریتم برای بهینه‌سازی توابع هدف چند متغیره بدون محدودیت به صورت جستجوی مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش شامل ایجاد سیمپلکسی از $n+1$ رأس $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n+1}$ است که n نشان‌دهنده اندازه بردار جواب $\theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in})$ است. فرض می‌کنیم θ_i ها با ترتیب غیرکاهشی مقدار تابع هدفشان مرتب شده‌اند یا به عبارتی:

$$J(\theta_1) \leq J(\theta_2) \leq \dots \leq J(\theta_n) \leq J(\theta_{n+1})$$

θ_1 بهترین رأس و θ_{n+1} بدترین رأس است. الگوریتم سعی دارد رأس θ_{n+1} با رأسی به فرم زیر جایگزین کند:

$$\theta(\mu) = (1 + \mu)\bar{\theta} - \mu\theta_{n+1} \quad (9)$$

که $\bar{\theta}$ مرکز پوشش محدب $\theta_1, \dots, \theta_n$ است: $\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$ و مقدار μ از دنباله $-1 \leq \mu_{ic} \leq 0 \leq \mu_r \leq \mu_e$ انتخاب می‌شود.

۲-۴. الگوریتم نلدنر-مید

۱. مقدار تابع هدف برای تمام رأس‌ها محاسبه شود و رؤس به ترتیب غیرکاهشی مرتب شود:

$$J(\theta_1) \leq J(\theta_2) \leq \dots \leq J(\theta_n) \leq J(\theta_{n+1})$$

۲. مقدار شمارنده را یک قرار دهید: $Jcount=1$

۳. تا زمانی که $J(\theta_{n+1}) - J(\theta_1) > \omega$ مراحل زیر را انجام دهید:

۱-۳. مقادیر $\bar{\theta}$ ، $\theta(\mu_r)$ و $J(\theta(\mu_r))$ را محاسبه کنید و قرار دهید: $Jcount=Jcount+1$

۲-۳. بازتاب: اگر $Jcount=kmax$ الگوریتم خاتمه می‌یابد. اگر $J(\theta_1) \leq J_r \leq J(\theta_{n+1})$ ، $\theta(\mu_r)$ را با θ_{n+1} جایگزین کنید و به مرحله ۳،۷ بروید

۳-۳. گسترش: اگر $Jcount=kmax$ الگوریتم خاتمه می‌یابد. اگر $J_r \leq J(\theta_1)$ ، آنگاه $J_e = J(\theta(\mu_e))$ را محاسبه کنید و قرار دهید $Jcount=Jcount+1$. اگر $J_e < J_r$ باشد، θ_{n+1} را با $\theta(\mu_e)$ جایگزین کنید؛ در غیر این صورت، θ_{n+1} را با $\theta(\mu_r)$ جایگزین کنید و به مرحله ۳،۷ بروید

۴-۳. انقباض بیرونی: اگر $Jcount=kmax$ الگوریتم خاتمه می‌یابد.

۳-۵. انقباض درونی: اگر $Jcount=kmax$ الگوریتم خاتمه می‌یابد.

اگر $J(\theta_{n+1}) \geq J_r$ ، آنگاه $J(\theta(\mu_{ic})) = J_c$ را محاسبه کنید و قرار دهید $Jcount=Jcount+1$. اگر $J_c < J(\theta_{n+1})$ ، θ_{n+1} را با $\theta(\mu_{ic})$ جایگزین کنید و به مرحله ۳،۷ بروید؛ در غیر این صورت به مرحله ۳،۶ بروید.

۳-۶. فشردن: اگر $Jcount \geq kmax - n$

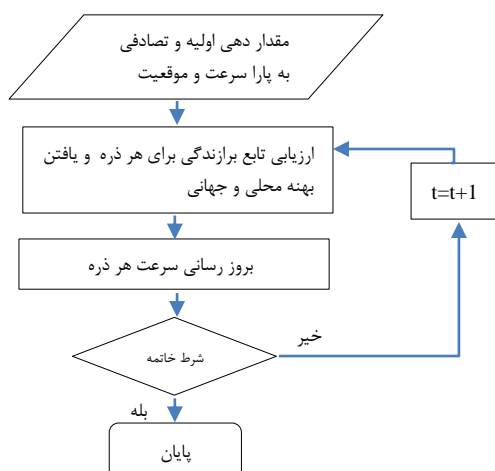
برای $2 \leq i \leq n+1$ قرار دهید $\theta_i = \theta_1 - \frac{\theta_i - \theta_1}{2}$ و مقدار $J(\theta_i)$ ها را محاسبه کنید.

۳-۷. رؤس $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n+1}$ به ترتیب غیرکاهشی مرتب شود:

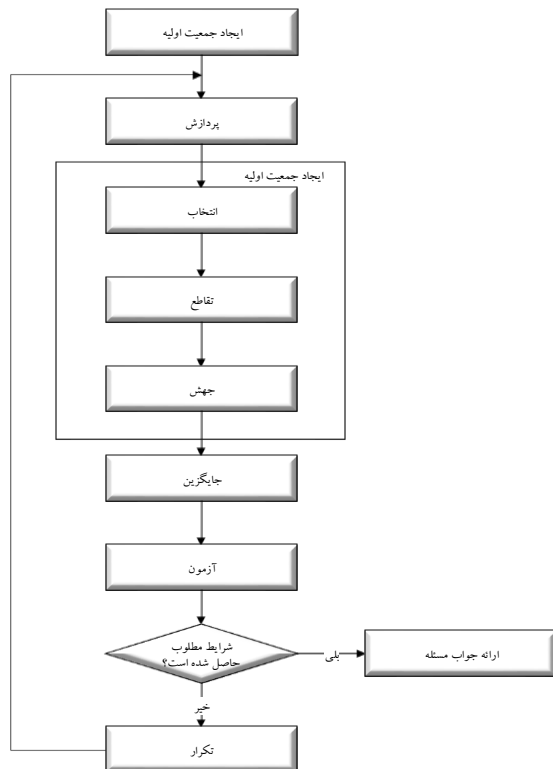
$$J(\theta_1) \leq J(\theta_2) \leq \dots \leq J(\theta_n) \leq J(\theta_{n+1})$$

۳-۴. روش ازدحام ذرات یا PSO

PSO در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات و کندی به‌عنوان یک روش جستجوی غیرقطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح گشت. این روش یک روش جستجوی جمعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. در PSO، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است؛ بنابراین موقعیت دیگر توده ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دست‌آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. الگوریتم پایه در شکل ۲ نشان داده شده است.

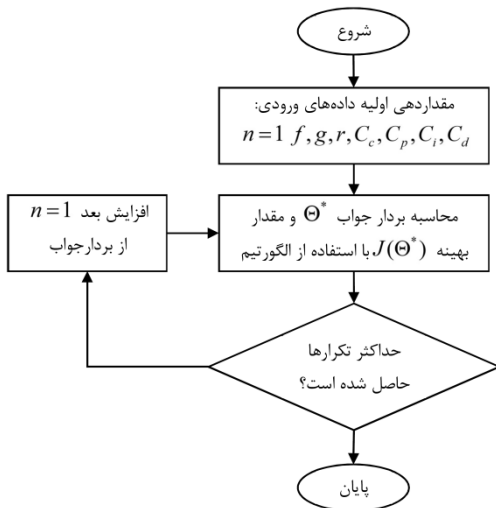


شکل (۲): فرآیند کلی الگوریتم PSO



شکل (۳): فرآیند کلی الگوریتم ژنتیک

سه روش فوق به‌عنوان شالوده اصلی جریان حل مسئله بهینه‌سازی مطرح هستند. در شکل ۴ الگوریتم حل ارائه شده است که به بیان نحوه به‌کارگیری این روش‌ها برای جستجوی جواب بهینه مسئله مورد بحث می‌پردازد:



شکل (۴): الگوریتم حل

۴-۴. الگوریتم ژنتیک [۲۳]

الگوریتم ژنتیک (GA) روش جستجوی احتمالاتی فراگیر است که بر مبنای فرآیند زیست‌شناختی طبیعی تعریف شده است. الگوریتم ژنتیک بر جمعیت جواب‌های بالقوه عمل می‌کند و اصول تنازع بقا را در تولید تقریب‌های بهتر برای جواب مسئله به کار می‌گیرد.

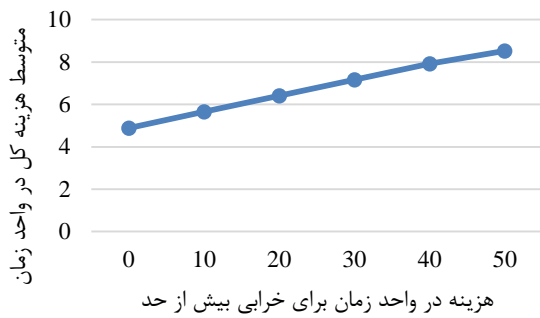
در هر نسل مجموعه جدیدی از تقریب‌ها با فرآیند انتخاب بهترین عضو براساس میزان برازش آن‌ها در دامنه مسئله و تکثیر با عملگرهای گرفته شده از ژنتیک طبیعی ساخته می‌شود. این فرآیند نهایتاً به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌شود که نسبت به اعضا اولیه که در واقع والدین اصلی آن‌هاست با محیط سازگاری بیشتری دارند. رویه کلی الگوریتم ژنتیک به شرح ذیل است:

- شروع: ایجاد جمعیتی از n کروموزوم (جواب‌های بالقوه مسئله) به صورت تصادفی
- برازش: ارزیابی میزان سازگاری هر کروموزوم (x) با استفاده از تابع برازش $f(x)$
- جمعیت جدید: ایجاد جمعیت جدید با تکرار مراحل زیر تا تکمیل جمعیت جدید

- انتخاب: انتخاب دو کروموزوم مادر از میان جمعیت براساس میزان سازگاری آن‌ها (سازگاری بیشتر = احتمال انتخاب بیشتر)
 - تقاطع: کروموزوم‌های مادر مرحله قبل به‌طور تصادفی با میزان احتمال تعیین شده جفت‌گیری می‌کنند و دو فرزند جدید به وجود می‌آورند. اگر تقاطع صورت نگیرد فرزندان عیناً مشابه دو کروموزوم مادر می‌شوند.
 - جهش: کروموزوم‌های فرزند ایجاد شده به صورت تصادفی با میزان احتمال تعیین شده جهش می‌یابد.
 - قبول: فرزندان ایجاد شده در جمعیت جدید قرار می‌گیرند.
 - جایگزینی: از جمعیت جدید برای تکرار الگوریتم استفاده می‌شود.
 - آزمون: اگر شرایط مطلوب حاصل شود الگوریتم متوقف و جمعیت موجود جواب مطلوب را نشان می‌دهد.
 - حلقه تکرار: به مرحله برازش برگشت داده می‌شود.
- این مراحل در شکل ۳ نشان داده شده است.

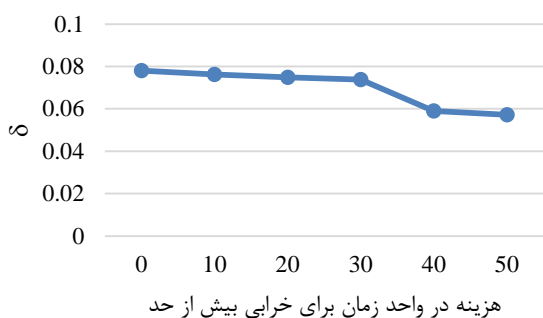
۵. مثال عددی

اکنون به بررسی رفتار مدل با استفاده از یک مثال عددی می‌پردازیم. برای تعیین مقدار بهینه‌ی تاریخ‌های بازرسی، از سه روش نلدر مید، PSO و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. فرض می‌کنیم هزینه‌ی بازرسی، C_i ، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (پیشگیرانه C_p و اصلاحی C_c) و هزینه‌های جریمه ناشی از آسیب‌های زیست‌محیطی



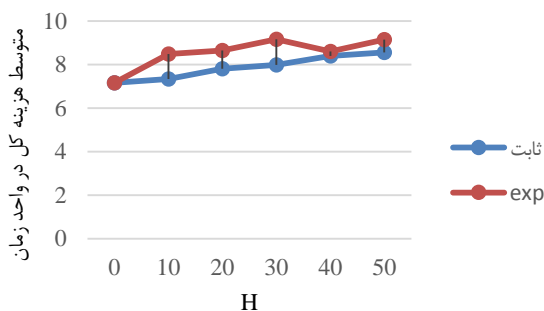
شکل (۵): تأثیر تغییرات C_d در متوسط هزینه کل در واحد زمان با

روش حل نلدر مید و $H=0$



شکل (۶): تأثیر تغییرات C_d بر نرخ δ با روش حل نلدر مید و $H=0$

با فرض عدم حضور هزینه جریمه‌های زیست‌محیطی و به عبارتی صفر در نظر گرفتن C_d ، نتایج حل مدل به ازای مقادیر مختلف H در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول علاوه بر مقادیر ثابت H ، نتایج حل مدل برای حالتی که H یک متغیر تصادفی با میانگین مشخص است، نیز آورده شده است و شکل‌های ۷ و ۸ به شکل ترسیمی این نتایج را نمایش می‌دهند.



شکل (۷): تأثیر تغییرات H در متوسط هزینه کل در واحد زمان با

روش حل نلدر مید و $C_d=0$

C_d مشخص است. توابع چگالی احتمال متغیر تصادفی مدت‌زمان سپری شده از ابتدای دوره تا رسیدن به سطح هشدار T ، متغیر تصادفی مدت‌زمان انتظار از لحظه شناسایی کاهش افت سیستم و تجاوز از سطح هشدار تا شروع نگهداری و تعمیر پیشگیرانه H و متغیر تصادفی مدت‌زمان سپری شده از لحظه t تا وقوع خرابی X مشخص می‌باشند. فرض شده است متغیرهای تصادفی T و X دارای تابع توزیع وایبول با پارامترهای $\alpha_f = 1164.1$ و $\beta_f = 8.7$ برای T و $\alpha_g = 144.2$ و $\beta_g = 3.6$ برای X می‌باشند. همچنین فرض شده است متغیر تصادفی H دارای تابع توزیع نمایی با پارامتر $\alpha_h = 15$ است:

$$f(t) = \left(\frac{\beta_f}{\alpha_f}\right) \left(\frac{t}{\alpha_f}\right)^{\beta_f-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha_f}\right)^{\beta_f}}; \alpha_f = 1164.1; \beta_f = 8.7$$

$$g(x) = \left(\frac{\beta_g}{\alpha_g}\right) \left(\frac{x}{\alpha_g}\right)^{\beta_g-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha_g}\right)^{\beta_g}}; \alpha_g = 144.2; \beta_g = 3.6$$

$$h(r) = \left(\frac{1}{\alpha_h}\right) e^{-\left(\frac{r}{\alpha_h}\right)}; \alpha_h = 15$$

هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات (پیشگیرانه و اصلاحی) و بازرسی به ترتیب برابر $C_c = 6180$ ، $C_p = 4170$ ، $C_i = 492$ هستند. فرض کنیم $\delta = \frac{E(T_d)}{E(T_c)}$ معیاری برای تعیین نسبتی از طول دوره عملکرد سیستم است که آلودگی تولید می‌کند، باشد.

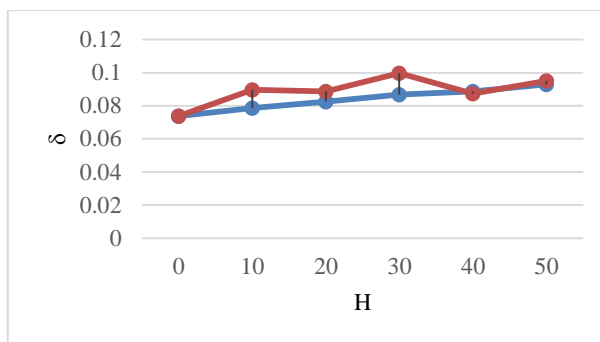
عامل پیچیدگی تابع هدف در این مقاله موجب گردید تا نتوانیم به سمت حل با روش‌های دقیق برویم. برای حل چنین مسائلی می‌توان از دو رویکرد کلی روش‌های تقریبی و برآورد عددی و یا الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک و یا ازدحام ذرات استفاده نمود. در این پژوهش مبنای انتخاب روش حل در نظر گرفتن سرعت الگوریتم‌ها در رسیدن به جواب بهینه و همچنین کیفیت جواب ملاک انتخاب بوده است.

جدول ۲ نشان‌دهنده میانگین نتایج حاصل از سه روش نلدر مید، ژنتیک و ازدحام ذرات برای یک حالت از مسئله موردبررسی، برای ۲۰ بار اجرای مسئله است. براساس نتایج اجرای مدل کیفیت جواب هر دو الگوریتم ژنتیک و نلدر مید در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات مطلوب می‌باشد. با در نظر گرفتن زمان طولانی الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش نلدر مید (در حدود ۴ برابر) روش نلدر مید به‌عنوان روش مورد استفاده در این مسئله انتخاب گردید.

اگر فرض کنیم عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بلافاصله پس از تشخیص عبور از سطح هشدار صورت می‌گیرد و به عبارتی مدت‌زمان H برابر صفر است، نتایج حل مدل به ازای مقادیر مختلف C_d در جدول ۳ آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی هزینه کل متوسط افزایش و درصد زمان‌هایی از طول دوره که دستگاه آلودگی تولید می‌کند کاهش می‌یابد.

در واقع عامل جریمه در تابع کمینه‌سازی موجب می‌شود الگوریتم به نحوی عمل نماید که میزان تأثیر منفی این عامل کاهش یابد. طبیعتاً با افزایش مقدار جریمه، تأثیر منفی بر مقدار تابع هدف بیشتر شده و به همان نسبت الگوریتم به سمتی می‌رود که حیطه خارج از محدوده‌ی مجاز زیست‌محیطی را کوچک‌تر نماید و در نتیجه درصد خارج از حیطه بودن از متوسط طول عمر سیستم کاهش خواهد یافت. دیگر اثر بلادرنگ افزایش هزینه جریمه، افزایش دفعات بازرسی و به عبارتی انجام زودتر اولین بازرسی است. به‌طوری‌که با دو بازرسی در ردیف اول ($C_d=0$) جدول ۲، نهایتاً به پنج بازرسی در ردیف ۶ ($C_d=10$) می‌رسیم. بدین معنی که با افزایش هزینه جریمه بازرسی‌ها زودتر و با فواصل زمانی نزدیک‌تر به هم برنامه‌ریزی می‌شوند تا زمان لحظه تجاوز از حد آستانه سریع‌تر نمایان گردد.



شکل (۸): تأثیر تغییرات H در δ با روش حل نلدر مید و $C_d=0$

۵-۱. بررسی تأثیر هزینه جریمه در واحد زمان بر درصد زمان‌های خارج از حیطه سالم سیستم همان‌گونه که نتایج اجرای مدل در جدول (۳) نشان می‌دهد با افزایش هزینه جریمه درصد زمان‌های خارج از رنج کاهش می‌یابد.

جدول (۲): مقایسه روش‌های حل نلدر مید، الگوریتم PSO و الگوریتم ژنتیک با فرض $C_d=10$

روش حل	C_d	Θ^*	$\left(\frac{E(C_f)}{E(T_c)}\right)^*$	δ	زمان اجرا بر حسب ثانیه
نلدر-مید	۱۰	۱۱۷۳,۴۲۶	۱۳۱۰,۳۶۵	۰,۰۷۸۶۴۵	۴۷
ژنتیک	۱۰	۱۱۷۳,۴۲۶	۱۳۱۰,۳۶۵	۰,۰۷۸۶۴۵	۱۱۳
PSO	۱۰	۳۲۸۲,۵۱۴	۳۶۰,۵۲۹	۰,۸۹	۴۸۰

جدول (۳): تأثیر تغییرات C_d در جواب بهینه با روش حل نلدر مید و $H=0$

C_d	Θ^*	$\left(\frac{E(C_f)}{E(T_c)}\right)^*$	δ
۰	۱۱۹۹,۹۷۱	۱۳۴۸,۲۸۸	۰,۰۷۸۰۳۱
۱۰	۱۱۸۵,۴۱	۱۳۳۱,۷۹۴	۰,۰۷۶۲۶۳
۲۰	۱۱۷۳,۳۴۸	۱۳۱۸,۵۹۹	۰,۰۷۴۹۰۳
۳۰	۱۱۶۷,۵۳۳	۱۳۰۷,۵۱۳	۰,۰۷۳۷۸۳
۴۰	۳۳۸,۶۶۶۴	۶۰۴,۲۷۷۶	۰,۰۵۹۰۳۷
۵۰	۲۵۴,۸۴۷	۵۷۱,۶۳۵۶	۰,۰۵۷۲۱

جدول (۴): تأثیر تغییرات H در جواب بهینه با روش حل نلدر مید و $C_d=0$

H	Θ^*	$\left(\frac{E(C_f)}{E(T_c)}\right)^*$	δ
0	۱۲۰۴,۲۵۶	۱۳۴۷,۳۲۲	۰,۰۷۳۷۸۳
$H \sim \exp(0)$	۱۱۶۷,۵۳۳	۱۳۰۷,۵۱۳	۰,۰۷۳۷۸۳
10	۱۱,۷۳,۴۲۶	۱۳۱۰,۳۶۵	۰,۰۷۸۶۵۴
$H \sim \exp(10)$	۴۰۳,۷۷۴	۸۳۴,۲۸۷	۰,۰۸۹۶۱۶
20	۶۲۷,۲۶۲۷	۱۲۳۳,۴۹۶	۰,۰۸۲۵۶۱
$H \sim \exp(20)$	۳۷۳,۵۶۲۵	۱۱۷۵,۳۱	۰,۰۸۸۷۰۷
30	۶۱۰,۰۵۰۶	۱۲۳۲,۸۴۶	۰,۰۸۶۶۷۴
$H \sim \exp(30)$	۳۹۸,۷۱۵	۱۱۸۲,۰۱۲	۰,۰۹۹۷۵۹
40	۶۰۸,۱۹۳۲	۱۲۰۸,۹۸۶	۰,۰۸۸۶۱۵
$H \sim \exp(40)$	۲۷۶,۴۶۴۵	۱۱۸۸,۶۶	۰,۰۸۷۳۵۵
50	۳۲۱,۴۸۲۸	۱۱۹۵,۹۱۷	۰,۰۹۲۹۹۷
$H \sim \exp(50)$	۲۵۵,۱۸۴۲	۴۸۸,۶۲۰۵	۰,۰۹۵۰۴۵

که اجتناب از آسیب‌های زیست‌محیطی نقش تعیین‌کننده‌ای برای سیستم و هزینه‌های تحمیل شده به آن دارد، ایفا می‌کند. در بحث هزینه‌های نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و اصلاحی هزینه متوسط برای تمام شرایط در نظر گرفته شده است.

مراجع

- [1] Bonissone, P., Goebel, K. (2001). "Soft computing applications in equipment maintenance and service", *Proceedings joint 9th IFSA world congress and 20th NAFIPS international conference, Canada, 2752-2757*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/NAFIPS.2001.943660>.
- [2] Bengtsson, M. (2004). Condition Based Maintenance Systems an Investigation of Technical Constituents and Organizational Aspects. Mlardalen University Licentiate Thesis.
- [3] Hashemian, HM., Bean, WC. (2011). "State-of-the-art predictive maintenance techniques", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(10): 3480-3492
- [4] Hoang, A., Do, P. and Iung, B. (2017). "Energy efficiency performance based prognostics for aided maintenance decision-making: Application to a manufacturing platform", *Journal of Cleaner Production*, 142: 2838-2857.
- [5] Martorell, S., Villanueva, J. F., Carlos S., et al. (2005). "RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms", *Reliability Engineering & System Safety*, 87(1): 65-75.
- [6] Yan, J., Hua, D. (2010). "Energy consumption modeling for machine tools after preventive maintenance", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management Macao, China, (IEEM '10)*, 2201-2205.
- [7] Shin, J., Jun, H., (2015). "On condition based maintenance policy", *Journal of Computational Design and Engineering*, 2: 119-127.
- [8] Castanier, B., Grall, A., B'ereguier, C. (2005). "A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two unit series system", *Reliability Engineering and System Safety*, 87(1): 109-120.
- [9] Yang, L., Ma, X., & Zhao, Y. (2017). "A condition-based maintenance model for a three state system subject to degradation and environmental shocks", *Computers & Industrial Engineering*, 105: 210-222.
- [10] Van Horenbeek, A., Kellens, K., Pintelon, L., Dufloy, J. R. (2014). "Economic and environmental aware maintenance optimization", *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Norway*, 343-348.
- [11] Chelbi, A., Ait-Kadi, D. (1999). "An optimal inspection strategy for randomly failing equipment", *Reliability Engineering and System Safety*, 63(2): 127-131.
- [12] Zhou, X., Xi, L., Lee, J. (2007). "Reliability-

۵-۲. بررسی تأثیر مدت‌زمان تأخیر در انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر فواصل بازرسی

بررسی نتایج اجرای مدل در جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش میزان زمان تأخیر در انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه فواصل بازرسی کمتر می‌گردد. افزایش تأخیر در انجام عملیات نت پیشگیرانه منجر می‌گردد سیستم نسبت به رفع سریع مشکل و در نتیجه کاهش هزینه‌های تحمیلی بر سیستم اطمینان خود را از دست می‌دهد. این موضوع خود را در کوتاه کردن فواصل بازرسی به‌منظور کاهش ریسک ورود به محدود غیرمجاز و همچنین خرابی سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در صورت قطعی بودن زمان تأخیر در انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، نسبت به حالتی که این زمان تصادفی است به بازرسی‌های کمتری نیاز است و اولین بازرسی دیرتر برنامه‌ریزی خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله به بررسی یک موتور مکانیکی که وضعیت کارکرد آن در بازرسی‌های برنامه‌ریزی شده مورد پایش قرار می‌گیرد (با اندازه‌گیری مقدار یک متغیر نشان‌دهنده وضعیت و مقایسه با سطح هشدار)، پرداخته شده است. هدف مطالعه دستیابی به زمانبندی بهینه بازرسی‌ها است به‌نحوی که هزینه کل (هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (پیشگیرانه و اصلاحی)، هزینه‌های بازرسی و هزینه‌های سربار ناشی از آسیب‌های زیست‌محیطی)، کمینه گردد. مدل ارائه شده بسطی از مدل شیوخی و همکاران بوده که در آن زمان انتظار برای آغاز عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه یک متغیر تصادفی دارای تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده و از روش‌های نلد-مید، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی استفاده گردید.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش زمان انتظار برای آغاز عملیات نگهداری و تعمیر فواصل زمان بازرسی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با تصادفی در نظر گرفتن زمان انتظار برای آغاز عملیات نگهداری و تعمیرات سیستم درصد زمان کارکرد سیستم خارج از حیطه‌ی مورد تأیید از نظر زیست‌محیطی افزایش و متحمل هزینه‌های بیشتری به علت جرائم زیست‌محیطی می‌گردد. افزایش جرائم تأثیر عکس بر میزان آلاینده‌ی داشته که با در نظر گرفتن توان و محدودیت‌های تولیدکنندگان به‌عنوان یک سیاست کنترلی موردتوجه قرار می‌گیرد. نتایج حل این مسئله با روش‌های عددی و فراابتکاری حاکی از مناسب‌تر بودن روش حل عددی نلد-مید می‌باشد که البته با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله استفاده از روش‌های فراابتکاری توجه بیشتری خواهد یافت.

به‌عنوان پیشنهادی برای مطالعات آینده می‌توان رفتار متغیری که معیار وضعیت سیستم در هر لحظه از زمان است موردبررسی قرار داد. برای مثال اگر $S(t)$ که نشان‌دهنده‌ی سطح متغیر وضعیت در لحظه t است، در دست باشد، محاسبات دقیق‌تری از هزینه‌های مرتبط با آسیب‌های زیست‌محیطی فراهم می‌آید. این امر در مواردی

- centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation”, *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4): 530-534.
- [13] Chouikhi, H., Khatab, A., & Rezg, N. (2012). “A condition-based maintenance policy for a production system under excessive environment degradation”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(4): 727-737.
- [14] Tlili, L., Radhoui, M., Chelbi, A. (2015). “Condition-based maintenance strategy for production systems generating environmental damage”, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12.
- [15] Vassiliadis, C. G., and Pistikopoulos, E. N. (2000). “Maintenance-based strategies for environmental risk minimization in the process industries”, *Journal of Hazardous Materials*, 71(1-3): 481-501.
- [16] Kopnov, V.A. (1999). “Optimal degradation processes control by two level policies”, *Reliability Engineering and System Safety*, 66(1): 1-11.
- [17] Zhao, X., He, S., He, Z., Xie, M. (2018). “Optimal condition-based maintenance policy with delay for systems subject to competing failures under continuous monitoring”, *Computers & Industrial Engineering*, 124: 535-544.
- [18] Bérenguer, C., Grall, A., Dieulle, L., Roussignol, M. (2003). “Maintenance policy for a continuously monitored deteriorating system”, *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 17(02): 235-250.
- [19] Meier-Hirmer, C., Riboulet, G., Sourget, F., and Roussignol, M. (2009). “Maintenance optimization for a system with a gamma deterioration process and intervention delay: application to track maintenance”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 223(3): 189-198
- [20] Yang, L., Ma, X., Zhai, Q., Zhao, Y. (2016). “A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement.”, *Reliability Engineering & System Safety*, 150: 96-104.
- [21] He, K., Maillart, L. M., and Prokopyev, O. A. (2017). “Optimal planning of unpunctual preventive maintenance”. *IIE Transactions*, 49(2): 127-143
- [22] Kelley, C.T. (1999). *Iterative Methods for Optimization*, 1st Edition, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [۲۳] البرزی، محمود، (۱۳۸۸). *الگوریتم ژنتیک*، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، چاپ اول: سال ۱۳۸۸.



DOI: 10.22084/ier.2020.19256.1855

Production and Equipment Detection Scheduling with Environmental Degradation Costs Caused by System Deteriorations

P. Fattahi^{1*}, S. Asadzadeh², S. Sheikhtajain³, S. Babaei⁴

^{1, 2, 3, 4} Department of Industrial Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 May 2019

Accepted 3 October 2019

Keywords:

Environmental hazards

Scheduling

Direct search method

Nelder–Mead optimization

Method

Genetic algorithm

PSO algorithm

ABSTRACT

Machines and equipment continuous operation exposes them to failure (such as aging, wear, corrosion and creep). Consequences of such deteriorations are not limited to efficiency, reliability and life cycle reduction, they also may lead to environmental degradation. Investigating adverse effects of system's failures have led to many academic studies on condition-based maintenance strategies. One of prominent approaches in this area is maintenance policy based on the system's performance and status, which reduces the overhead costs of the associated penalties by controlling environmental damages. The purpose of this study is to model an optimal maintenance policy including production and inspection periods scheduling with minimal average total cost, under uncertainty conditions. In this article, the threshold exceeding period, time to failure from exceeding threshold point and the delay time to start maintenance activities are considered random variables and their effects have been studied. Numerical examples of the proposed maintenance model have been solved by Nelder–Mead, PSO and Genetic algorithms, and optimal inspection times are computed. Sensitivity analyses have been done numerically to study the effect of changes of different parameters on the optimal inspection times.

* Corresponding author. P. Fattahi
Tel.: 021-85692191; E-mail address: p.fattahi@alzahra.ac.ir