

برنامه ریزی همزمان بازرسی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر تقاضا در شرایط زوال مارکفی ماشین جهت کاربرد در توربین های بادی

رضا نوری^۱، احمد صادقیه^{۲*}، محمد مهدی لطفی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵	
واژگان کلیدی:	
برنامه ریزی بازرسی ها، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط، عدم قطعیت تقاضا، برنامه ریزی پویای تصادفی، توربین بادی.	در این مقاله یک سیستم تولید تک ماشین و تک محصول در شرایط عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفته شده که در آن ماشین طبق یک فرایند مارکفی روبه زوال می رود. هدف پیدا کردن زمان بهینه برای انجام بازرسی ها و نت پیشگیرانه در برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط بازرسی های گسسته (CBMDM) است. بدین منظور با استفاده از برنامه ریزی پویای تصادفی یک مدل (مدل اول) ارائه شده که متغیر حالت آن، وضعیت ماشین می باشد. مدل اول بدون در نظر گرفتن تقاضا و با هدف کمینه کردن هزینه های بازرسی، نت و تولید از دست رفته به دلیل اختلاف ظرفیت واقعی با ظرفیت اسمی تولید ساخته شده است. سپس در مدل دوم، تقاضا به متغیر حالت پیوند داده شده و متوسط هزینه تولید از دست رفته به دلیل اختلاف ظرفیت واقعی تولید با تقاضا، جایگزین این بخش از هزینه در مدل اول شده است. در آخر به منظور اعتبارسنجی و تجزیه و تحلیل مدل های پیشنهادی، کاربردی از آن در زمینه توربین های بادی ارائه شده که نتایج عددی حاصل از آن نشان می دهد، وقتی در برنامه ریزی همزمان بازرسی و نت پیشگیرانه، تقاضا جایگزین ظرفیت اسمی شود متوسط هزینه های بازرسی و نت پیشگیرانه در افق برنامه ریزی کاهش می یابد.

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر با رویکرد تولید بهنگام در مدیریت تولید و عملیات، روند تولید تغییر کرده و اهمیت تولید پیوسته و بهنگام زیاد شده است. لذا شرکت های تولیدی برای پیروزی در بازار رقابتی باید به دنبال افزایش کارایی و بهینه سازی برنامه ریزی عملیات تولیدی خود باشند. این در حالی است که در یک سیستم تولید واقعی، پویایی و عدم قطعیت وجود دارد. برای مثال وقتی که به دلیل خرابی ماشین آلات، یک توقف برنامه ریزی نشده رخ می دهد، بخشی از ظرفیت تولید جهت انجام عملیات نگهداری و

تعمیرات اصلاحی^۲ (CM) غیرقابل دسترس می شود. در چنین شرایطی کارایی سیستم کم و غالباً برنامه های تولید جاری منسوخ می شود. اصلاح برنامه های تولید نیز هزینه های زیادی به همراه دارد. یکی از راهکارهای مواجهه با این چالش بکارگیری سیاست های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است [۱].

به طور کلی در ادبیات دو رویکرد کلی برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه وجود دارد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر زمان^۳ (TBM) و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر شرایط^۴ (CBM) [۲].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sadegheih@yazd.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

اجراء می‌شود [۶]، یا طرح بهینه برای انجام بازرسی‌ها از حل یک مدل با معیارهای اقتصادی احصاء می‌شود [۷-۱۰].

در مرحله‌ی دوم زمان اجرای عملیات نت پیشگیرانه با توجه به اطلاعات بدست آمده از مرحله‌ی اول تعیین می‌شود. در CBM فقط بعد از آنکه مقادیر یک یا چند تا از پارامترهای سیستم، از مقادیر از پیش تعیین شده‌ای بیشتر شود، فعالیت‌های نت پیشگیرانه اجرا می‌شود. این مقادیر از پیش تعیین شده، حدود کنترل نامیده می‌شوند. چالش اصلی در CBM با بازرسی گسسته، تعیین سیاست حد کنترلی بهینه برای نت پیشگیرانه است. در این سیاست فرض می‌شود هزینه‌ی نت مبتنی بر شرایط کمتر از هزینه‌ی نت اصلاحی باشد. همچنین با این فرض که حد کنترل بهینه برای نت پیشگیرانه یکی از وضعیت‌های دستگاه است، مدل‌هایی به منظور پیدا کردن حد کنترل بهینه ارائه شده است [۱۱ و ۱۲]. هدف اغلب این مدل‌ها، افزایش قابلیت اطمینان دستگاه بوده و کمتر تبعات اقتصادی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تعویض یا تعمیر ماشین مد نظر قرار گرفته می‌شود. لذا محققین با لحاظ هزینه‌هایی مثل نت پیشگیرانه، تعویض ناشی از وقوع خرابی، خرید قطعات، کاهش ظرفیت و یا توقف کامل سیستم مدل‌هایی ارائه داده‌اند که طی آن، معیارهای بهینه‌سازی مثل حد کنترل برای نت پیشگیرانه و یا سطح دسترس‌پذیری علاوه بر وضعیت دستگاه، به هزینه‌های مذکور نیز وابسته است [۸ و ۹ و ۱۳-۱۵].

برای مثال در [۸] چهار نوع عملیات برای نت در نظر گرفته شده است. نوع اول آنکه هیچ کاری صورت نگیرد، نوع دوم نت حداقلی است و ماشین را به حالت قبل از حالت فعلی بر می‌گرداند، نوع سوم آنکه نت پیشگیرانه انجام شود و ماشین به حالت صفر می‌برد و نوع چهارم نت اصلاحی است که در صورت بروز خرابی غیر منتظره رخ می‌دهد و در اثر اجرای آن ماشین به یک ماشین نو تبدیل می‌شود. به علاوه به منظور مدل‌سازی مسأله از فرایند تصمیم مارکفی استفاده شده است که هدف آن پیدا کردن سیاست بهینه برای اجرای انواع عملیات نت بر اساس حالت سیستم در زمان بازرسی است. همچنین زمان بازرسی بعدی از حل مدل آنها بدست می‌آید. در [۹] با استفاده از فرایند تجدید پاداش یک سیاست ثابت حد کنترلی چند سطحی برای

در TBM، عمر ماشین ملاک برنامه‌ریزی است و تصمیم گرفته می‌شود بعد از گذشت چه میزان از عمر ماشین، عملیات نت پیشگیرانه اجرا شود. در این رویکرد بسته به نوع سیاست برنامه‌ریزی، فاصله‌ی زمانی بین عملیات نت پیشگیرانه‌ی متوالی می‌تواند یکسان یا غیریکسان باشد. اگر فاصله‌ی زمانی بین عملیات نت پیشگیرانه‌ی متوالی بیش از حد کم باشد منجر به اجرای عملیات نت غیر ضروری شده و اگر این فاصله زیاد باشد احتمال وقوع خرابی قبل از اجرای عملیات نت پیشگیرانه و لذا هزینه‌های نت اصلاحی افزایش می‌یابد [۲].

اما در CBM، مبنای تصمیم‌گیری اطلاعاتی است که از طریق سنجش وضعیت ماشین بدست می‌آید. در این رویکرد تنها در صورت وجود شواهدی در اطلاعات سنجش وضعیت که نشان از رفتار غیرعادی دستگاه داشته باشد، اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشنهاد می‌شود. یک مدل CBM شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی اول با استفاده از بازرسی یا سنجش وضعیت، حالتی که ماشین در آن قرار دارد تشخیص داده می‌شود. بازرسی یا سنجش وضعیت برحسب نوع و عملکرد ماشین می‌تواند پیوسته یا گسسته باشد. در سنجش وضعیت پیوسته، ماشین معمولاً با استفاده از حس‌گرهای نصب‌شده روی آن تحت نظارت پیوسته قرار دارد. در بسیاری از صنایع این استراتژی مقرون به صرفه نیست. اما در سنجش وضعیت گسسته ماشین در فواصل زمانی خاصی بازرسی و متغیرهای تشخیص خرابی اندازه‌گیری می‌شود. هرچند هزینه‌ی سنجش وضعیت گسسته کمتر است، اما این استراتژی، ریسک از دست دادن علائم و هشدارهای مربوط به خرابی‌هایی را که در فاصله‌ی بین دو بازرسی متوالی ممکن است رخ دهد را به همراه دارد [۳].

در بازرسی گسسته، رویکردهای مختلفی برای مشخص کردن زمان بازرسی‌ها وجود دارد. رویکرد اول آن است که بازرسی‌ها در فواصل زمانی ثابت و از پیش تعیین شده و با نظر کارشناسان نت انجام گیرد [۴]. در رویکرد دوم فاصله‌ی بازرسی‌ها ثابت است اما از پیش تعیین شده نیست و به عنوان متغیر تصمیم از حل یک مدل با در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی استخراج می‌شود [۵]. رویکرد سوم آن است که فاصله‌ی بین بازرسی‌ها نه لزوماً ثابت و نه از پیش تعیین شده است. در این رویکرد بازرسی‌ها یا به صورت تصادفی

به تصمیمات نت پیشگیرانه وابسته است، برای سیستم چند-حالتی محاسبه و سپس با سایر تصمیمات و محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید ادغامی مثل مقدار تولید، موجودی و پس افت در هر دوره ترکیب و مدل یکپارچه توسعه داده شده- است. در مدل آن‌ها در مورد بازرسی‌ها تصمیم‌گیری نمی-شود زیرا برای هر جزء فقط دو حالت سالم یا خرابی در نظر گرفته شده و زوال تدریجی برای آن منظور نشده است.

در [۱۷] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته‌ی غیرخطی برای برنامه‌ریزی همزمان تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم ساخت مستعد خرابی ارائه شده است که در آن عملیات نت پیشگیرانه غیرکامل فرض شده است، بدین معنا که در اثر اجرای نت پیشگیرانه، ماشین به یک حالت عملیاتی بین خرابی کامل و نو تبدیل می‌شود. همچنین در مطالعه‌ی آن‌ها از یک روش ابتکاری برای حل مدل استفاده شده و عملکرد آن روی یک سری مسائل نمونه‌ای آزمایش شده است که عملکرد خوب آن را نشان می‌دهد.

در [۱۸]، مسأله‌ی زمان‌بندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در یک سیستم تولیدی با ماشین‌های موازی نامرتب مورد ملاحظه قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه با اهداف کمینه سازی مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل و کمینه‌سازی مجموع زمان‌های دیر-کرد و زودکرد ارائه شده است. در [۱۹] با استفاده از فرایند-های تصمیم نیمه‌مارکفی، یک مدل یکپارچه برای ارائه سیاست‌های کنترلی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه شده است که در آن تصمیم‌گیری بر اساس موجودی سیستم و قابلیت اطمینان دستگاه می‌باشد، که منجر به جلوگیری از عملیات نت پیشگیرانه غیرضروری و صرفه-جویی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود. همچنین در [۲۰] یک مدل یکپارچه برای کنترل تولید و نگهداری و تعمیرات پویا ارائه شده که در آن نگهداری و تعمیرات پویا شامل نت پیشگیرانه، اصلاحی و فرصت طلبانه می‌باشد. در این مدل، هم سیاست‌های کنترل تولید و هم نگهداری و تعمیرات به موجودی و عمر ماشین وابسته شده است. در [۲۱] با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی یک سیاست حد آستانه‌ای برای اجرای نت پیشگیرانه توسعه داده شده است که در آن حد کنترل بهینه، به وضعیت ماشین و تقاضا وابسته است و علاوه بر هزینه‌ی نت پیشگیرانه هزینه‌ی

تصمیم‌گیری در خصوص اجرای عملیات نت ارائه شده - است. به علاوه زمان‌های بازرسی به‌عنوان متغیر تصمیم در مدل حضور دارد.

پس به‌طور خلاصه می‌توان گفت یک‌مدل CBM که در آن بازرسی‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم ظاهر می‌شوند شامل دو-دسته تصمیم است. دسته‌ی اول تصمیمات مربوط به نحوه‌ی بازرسی سیستم و دسته‌ی دوم تصمیمات مربوط به زمان اجرای نت پیشگیرانه می‌باشد. در تمام این رویکردها اگر تناوب بازرسی‌ها زیاد باشد هزینه‌ی انجام بازرسی‌ها زیاد می‌شود ولی در عوض جلوی عملیات نت پیشگیرانه‌ی غیر-ضروری گرفته شده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش خرابی‌های غیرمنتظره می‌شود. برعکس اگر این تناوب کم-باشد، هر چند هزینه‌های بازرسی کاهش می‌یابد، اما مجموع هزینه‌های نت پیشگیرانه و نت ناشی از خرابی افزایش می-یابد.

غالباً در مدل‌های CBM که به‌تعدادی از آن‌ها در بالا اشاره شد، برای به‌دست‌آوردن تصمیمات بهینه‌ی حوزه‌ی نت به تقاضای مشتری توجهی نمی‌شود. به‌عبارت‌دیگر تصمیم-گیری در این حوزه بدون توجه به نیازمندی‌های بخش تولید صورت می‌گیرد. برای مثال، ممکن است در سیاست اتخاذ-شده، زمان بهینه‌ی اجرای نت پیشگیرانه درست زمانی باشد که ماشین در حال کار است و مشتری در انتظار دریافت سفارش خود است، که این در تعارض با تصمیمات بخش تولید است و در صورت اجرا منجر به تأخیر در تحویل سفارش مشتری و نهایتاً نارضایتی وی می‌شود. لذا اگر عملیات نت پیشگیرانه غیرضروری باشد، از ظرفیت تولید می‌کاهد و سبب تأخیر در تحویل سفارش مشتری یا افزایش هزینه‌ی فروش از دست‌رفته می‌شود و اگر نت پیشگیرانه دیرتر از موعد اجرا شود، احتمال بروز خرابی‌های غیرمنتظره را افزایش می‌دهد و این نیز تبعات مشابه و چه‌بسا بدتر به‌همراه دارد. لذا به‌منظور جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، ضروری است تصمیمات هر دو حوزه هماهنگ باهم اتخاذ گردد.

در [۱۶] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌منظور پیشینه‌کردن سطح دسترس‌پذیری به یک سیستم متشکل از اجزاء مختلف ارائه شده است. به‌دلیل وجود اجرای داخل سیستم که هر یک مستعد خرابی است، کل سیستم به عنوان یک سیستم چندحالتی در نظر گرفته شده است. قبل از ساخت مدل یکپارچه ابتدا معیار دسترس‌پذیری کل که

متغیر حالتی است که در زمان بازرسی آشکار شده است. در مدل اول وضعیت ماشین (s) به‌عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است و تصمیمات بهینه‌ی بازرسی و نت پیشگیرانه بدون در نظر گرفتن تقاضا و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت پیشگیرانه و جریمه‌ی ناشی از تولید از دست‌رفته به دلیل اختلاف ظرفیت تولید واقعی با ظرفیت تولید اسمی به دست می‌آید. مدل دوم، براساس مدل اول و به منظور در نظر گرفتن تقاضا و بررسی تأثیر آن روی تصمیمات و هزینه‌های مربوط به بازرسی و نت پیشگیرانه توسعه داده شده است. در این مدل برای تصمیم‌گیری در مورد زمان بازرسی و نت پیشگیرانه، علاوه بر وضعیت ماشین، تقاضای مشتری به صورت یک متغیر تصادفی گسسته با توزیع دلخواه در نظر گرفته شده است. لذا متغیر حالت مدل دوم زوج مرتب (s, z) است که در آن s وضعیت ماشین و z تقاضا را نشان می‌دهد و تصمیمات بازرسی و نت پیشگیرانه با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت پیشگیرانه و جریمه‌ی ناشی از تولید از دست‌رفته به دلیل اختلاف ظرفیت تولید واقعی با تقاضا بدست می‌آید. این امر موجب هماهنگی بین دو حوزه‌ی تولید و نت در سطح تاکتیکی می‌شود. تفاوت اصلی این مدل با مدل‌های دیگر در حوزه‌ی CBM آن است که اولاً تقاضا در مدل دیده شده است، ثانیاً مقدار متغیر حالت بعد از اجرای بازرسی که خود متغیر تصمیم است، مشخص می‌شود. علاوه بر ارائه‌ی این دو مدل، کاربردی از آن در زمینه‌ی توربین‌های بادی صورت گرفته و هریک از مدل‌ها به‌طور جداگانه و به‌زای تمام طرح‌های بازرسی ممکن حل شده است. سپس، نتایج با هم مقایسه و ترکیب بهینه برای زمان بازرسی و نت پیشگیرانه‌ی هر مدل انتخاب شده است. همچنین به منظور مقایسه‌ی دو مدل، هزینه‌های مربوط به بازرسی و نت پیشگیرانه‌ی هر مدل محاسبه و با تجزیه و تحلیل نتایج عددی تأثیر در نظر گرفتن تقاضا در مدل بررسی شده است. در ادامه و در بخش [۲] بیان مسأله و مفروضات، در بخش [۳] مدل‌های پیشنهادی و در بخش [۴] روش حل آن به تفصیل ارائه می‌شود. به منظور تشریح بیشتر مدل‌ها، در بخش [۵] ضمن ارائه‌ی کاربردی از آن در زمینه‌ی توربین‌های بادی، نتایج عددی تجزیه و تحلیل شده است. در بخش [۶] نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان شده است.

تولید از دست‌رفته نیز در نظر گرفته شده است، اما در آن فرض شده است حالت ماشین در ابتدای هر دوره معلوم است یعنی تصمیم‌گیری در مورد بازرسی‌ها در مدل دیده نشده است، همچنین مدت زمان لازم برای اجرای نت پیشگیرانه در مدل لحاظ نشده است. جزئیات بیشتری از این مرور ادبیات در جدول (۱) آورده شده است که با توجه به آن و تا آنجا که ما بررسی کرده‌ایم، تحقیقی که در آن تصمیمات مربوط به بازرسی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌طور هم‌زمان و در حضور تقاضا اتخاذ شود، وجود ندارد. جهت پرداختن به این موضوع دو مسیر پیش پای ما وجود داشت. یکی آنکه مدل‌های حوزه‌ی CBM در حضور تقاضا توسعه داده شود و دیگر آنکه تصمیمات مربوط به بازرسی به مدل‌هایی که نت پیشگیرانه را در حضور تقاضا برنامه‌ریزی می‌کنند، اضافه گردد. در این تحقیق مسیر دوم انتخاب و مدل ارائه شده در [۲۱] توسعه داده شده است. بنابراین نوآوری‌های این تحقیق عبارت‌اند از:

- زمان بازرسی به‌عنوان متغیر تصمیم به مدل ارائه شده در [۲۱] اضافه شده است.
- مدت زمان لازم برای اجرای بازرسی و نت پیشگیرانه در مدل به حساب آورده شده است.
- در مدل ارائه شده در [۲۱] فرض بر آن است که متغیر حالت در ابتدای هر دوره کاملاً معین می‌شود، در حالی که در مدل ما متغیر حالت فقط در زمان بازرسی که خود متغیر تصمیم است مشخص می‌شود و این همان چالش اصلی است که در مدل‌سازی این مسأله وجود دارد و در این تحقیق به آن پرداخته شده است.
- تأثیر در نظر گرفتن تقاضا در تصمیمات و هزینه‌های مربوط به بازرسی و نت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی، دو مدل برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر شرایط در سطح تاکتیکی و در افق متناهی ارائه شده است. در هر دو مدل، بازرسی‌ها گسسته و زمان اجرای آن‌ها نه لزوماً ثابت و نه از پیش تعیین شده است بلکه به عنوان متغیر تصمیم در مدل گنجانده شده و زمان بهینه برای نت پیشگیرانه با توجه به نتیجه‌ی بازرسی (که خود متغیر تصمیم است) مشخص خواهد شد. ساختار هر دو مدل به طرح بازرسی انتخابی وابسته است و هدف از حل آن‌ها پیدا کردن زمان بهینه برای نت پیشگیرانه براساس مقدار

جدول ۱: جزئیات مربوط به مرور ادبیات صورت گرفته

افق برنامه- ریزی	وضعیت تقاضا	تکنیک مدل سازی	رویکرد بازرسی	رویکرد نت	تابع هدف	روش حل
شماره مرجع	متنهای نامتناهی	PHM ^۳	تصمیم گیری به صورت غیر دورهای	سیاست حد کنترلی یک سطحی	کمیته کردن متوسط مجموع هزینه‌های مربوط در واحد زمان	پیاده‌سازی و حل به کمک نرم‌افزارهای بهینه‌سازی
[۵]	*	*	*	*	*	از آنه ساختار جواب بهینه
[۶]	*	*	*	*	*	حل معادلات انتگرال
[۷]	*	*	*	*	*	حل معادله‌ی بهینگی با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی
[۸]	*	*	*	*	*	روش بهبود سیاست
[۹]	*	*	*	*	*	استفاده از قضیه تجدید پاداش و روش دنباله‌ای
[۱۰]	*	*	*	*	*	روش ابتکاری
[۱۱]	*	*	*	*	*	کمیته کردن مجموع هزینه‌های مربوط
[۱۲]	*	*	*	*	*	بیشینه کردن سطح دسترس پذیری
[۱۳]	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی همزمان تولید ادغامی و نت
[۱۴]	*	*	*	*	*	تصمیم گیری هم‌زمان نت و بازرسی
[۱۶]	*	*	*	*	*	سیاست ثابت و به عنوان تابعی از حالت ماشین
[۱۷]	*	*	*	*	*	سیاست حد کنترلی چندسطحی
[۱۹]	*	*	*	*	*	سیاست حد کنترلی یک سطحی
[۲۰]	*	*	*	*	*	تصمیم گیری به صورت غیر دورهای
[۲۱]	*	*	*	*	*	تصمیم گیری به صورت دورهای
مقاله حاضر	*	*	*	*	*	تعیین زمان بازرسی‌ها به‌طور تصادفی از پیش تعیین شده

۲- بیان مسأله و مفروضات

در این مقاله، یک سیستم تولید تک محصول و تک ماشین در نظر گرفته می‌شود که در آن تولید بر مبنای سفارش مشتری صورت می‌گیرد. افق برنامه‌ریزی متناهی و طول دوره‌های زمانی مشمول در آن با هم مساوی هستند. تقاضای تمام دوره‌ها از یک متغیر تصادفی گسسته با توزیع احتمال دلخواه و مشخص تبعیت می‌کند و در ابتدای هر دوره، مقدار آن معلوم است. تقاضای هر دوره باید در همان دوره برآورده شود و چنانچه سیستم قادر به تولید بخشی از تقاضا نباشد، به‌ازای هر واحد از تقاضای برآورده نشده، متحمل جریمه می‌شود. ماشین در اثر تولید محصول به تدریج روبه‌زوال می‌رود. برای ماشین سطوح مختلفی از خرابی در نظر گرفته

شده است که هر سطح از آن یک حالت نامیده می‌شود. مجموعه‌ی حالات مجموعه‌ای متناهی است. فرایند زوال ماشین دارای رفتار مارکوفی است و از یک فرایند مارکوف همگن زمان پیوسته با فضای حالت گسسته‌ی متناهی تبعیت می‌کند. هزینه‌های مربوط به این مسأله شامل هزینه‌ی بازرسی، نت‌پیشگیرانه و تولید از دست رفته می‌باشد. تصمیمات شامل دو مرحله است. مرحله‌ی اول انتخاب دوره‌هایی است که در آن ماشین باید بازرسی شود و مرحله‌ی دوم انتخاب دوره‌هایی است که نت پیشگیرانه باید بر اساس نتیجه‌ی بدست آمده از بازرسی‌ها اجرا شود. تصمیم‌گیری در خصوص بازرسی‌ها به‌طور مستقیم روی هزینه‌ی بازرسی تأثیر می‌گذارد، در حالی که تأثیر آن روی سایر هزینه‌ها، غیرمستقیم و به دلیل آن است که زمان اجرای

دلیل اجرای عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه منظور شود.

۳- مدل‌سازی مسأله

در این تحقیق از چارچوب برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی برای مدل‌سازی مسأله استفاده شده است. لذا در- این بخش بعداز معرفی مدل پایه‌ی برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی، نمادهای مربوط معرفی و سپس مدل اول بدون در نظر گرفتن تقاضا و فرض‌های مترتب بر آن ارائه می‌شود. بعد از آن تقاضا به مدل اضافه و تأثیر در نظر گرفتن آن در مدل بررسی می‌شود.

۳-۱- مدل پایه‌ی برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق

متناهی

همان‌طور که گفته شد، در این تحقیق، برای مدل‌سازی مسأله از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی استفاده شده است. در این روش، مهمترین موضوع، ساختن معادله‌ی بهینگی است که معمولاً یک رابطه‌ی بازگشتی رو به عقب می‌باشد. اجزای این معادله عبارتند از مرحله (n) ، متغیر حالت (s) یا (s') ، متغیر تصمیم (a) ، ماتریس احتمال انتقال وقتی که تصمیم a اتخاذ شده $(P(a))$ و هزینه‌ی مرحله‌ی فعلی وقتی که حالت سیستم s است و تصمیم a اتخاذ شده است $(C(s, a))$. به‌طور کلی معادله‌ی بهینگی در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است:

$$V_n(s) = \min_{a \in A} \{C(s, a) + \sum_{s' \in S} (P(a))_{ss'} V_{n-1}(s')\} \quad (1)$$

$(\forall n \geq 1)$

که در آن S فضای حالت، A فضای تصمیم، $(P(a))_{ss'}$ مولفه‌ی مستقر در سطر s و ستون s' ماتریس $P(a)$ است و $V_n(s)$ متوسط هزینه‌ی کل را در شرایطی نشان می‌دهد که حالت سیستم s ، و n مرحله تا پایان افق برنامه‌ریزی باقیمانده باشد، به‌علاوه فرض می‌شود: $V_n(s) = 0 \quad (\forall s \in S)$

۳-۲- ارائه‌ی مدل اول بدون در نظر گرفتن تقاضا

در این بخش، مسأله بدون در نظر گرفتن تقاضا در قالب برنامه‌ریزی پویای تصادفی مدل‌سازی می‌شود. بدین‌منظور ابتدا اجزای معادله‌ی بهینگی مدل اول تعریف و بعد از آن معادله‌ی بهینگی ساخته می‌شود.

نت‌پیشگیرانه فقط بعد از انجام بازرسی مشخص می‌شود. هدف آن است که با استفاده از رویکرد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط با بازرسی‌های گسسته، اولاً، ضمن بهبود عملکرد ماشین و پاسخگویی به تقاضا، از عملیات نت-پیشگیرانه‌ی غیرضروری جلوگیری و بین هزینه‌های بازرسی، نت‌پیشگیرانه و تولید از دست‌رفته موازنه برقرار شود، ثانیاً، تأثیر در نظر گرفتن تقاضا در تصمیمات و هزینه‌های مربوط به بازرسی و نت‌پیشگیرانه مورد ارزیابی قرار گیرد. سایر مفروضات مسأله به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- بازرسی و نت‌پیشگیرانه حداکثر یک‌بار در هر دوره انجام می‌شود.
- ۲- ابتدای دوره‌ی اول یعنی آغاز افق برنامه‌ریزی بازرسی باید انجام شود.
- ۳- ابتدای دوره‌های دیگر، کاندیدایی برای انجام بازرسی است و باید تصمیم‌گرفته شود کدام دوره‌ها برای انجام بازرسی انتخاب شوند. (تصمیمات مرحله‌ی اول)
- ۴- مدت زمان و هزینه‌ی هر بار انجام بازرسی در مدل لحاظ شده و به‌حالت ماشین بستگی ندارد.
- ۵- بعد از انجام بازرسی حالت ماشین به‌درستی تشخیص داده می‌شود.
- ۶- در مورد زمان اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه با توجه به- نتیجه‌ی بدست‌آمده از آخرین بازرسی باید تصمیم‌گیری شود. (تصمیمات مرحله‌ی دوم)
- ۷- هزینه و زمان لازم برای اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه به‌حالت ماشین در لحظه‌ی اجرا وابسته است و هرچه ماشین در حالت بدتری قرار داشته باشد هزینه و زمان نت‌پیشگیرانه در آن حالت بیشتر است. همچنین فرض می‌شود وقتی ماشین در حالت صفر است هزینه و زمان نت‌پیشگیرانه‌ی آن صفر باشد.
- ۸- ماشین بعد از اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه بلافاصله به حالت صفر (وضعیت نو) تبدیل می‌شود.
- ۹- نرخ تولید ماشین به‌حالت ماشین بستگی دارد و هرچه ماشین در وضعیت بدتری قرار داشته باشد نرخ تولید آن کمتر است.
- ۱۰- در محاسبه‌ی هزینه‌ی تولید از دست‌رفته باید زوال مارکفی ماشین و غیرقابل دسترس بودن ماشین به

۳-۳- نمادها

تعداد دوره‌ها	K
طول هر دوره	T
مجموعه‌ی طرح‌های بازرسی	\mathbb{I}
یک طرح بازرسی دلخواه که در آن $i_k \in \{0, 1\}$ و $i_K = 1$	$I = (i_k)_{k=1}^K$
دنباله‌ی مراحل متناظر با طرح بازرسی $I = (i_k)_{k=1}^K$	$J(I) = (j(I)_n)_{n=1}^{m(I)}$
مجموعه‌ی تمام تصمیمات مربوط به انتخاب دوره‌ی اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی که فاصله‌ی بین دو بازرسی متوالی $I_{I,n}$ باشد.	$\mathbb{A} = \{0, 1, \dots, I_{I,n}\}$
فرایند مارکف همگن زمان پیوسته	$\mathcal{X} = (X_t : t \in [0, \infty))$
فضای حالت \mathcal{X} و اندیس‌های s و s' برای آن در نظر گرفته می‌شود.	$\mathbb{S} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$
ماتریس نرخ انتقال \mathcal{X}	$Q = [q_{ss'}]_{(N+1) \times (N+1)}$
ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای فرایند \mathcal{X} وقتی که نت‌پیشگیرانه اجرا نشود.	P
ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای فرایند \mathcal{X} وقتی که نت‌پیشگیرانه اجرا شود.	P_1
ماتریس احتمال انتقال فرایند \mathcal{X} وقتی که تصمیم a برای نت‌پیشگیرانه اتخاذ شود.	$P(a)$
مدت زمان لازم برای انجام هر بازرسی	t_{ins}
مدت زمان لازم برای اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی که ماشین در حالت s باشد.	$t_{pm}(s)$
زمان واقعی برای تولید در یک دوره وقتی که بازرسی اجرا شود، ماشین در حالت s باشد و تصمیم b برای نت-پیشگیرانه در آن دوره اتخاذ شود. ($b \in \{0, 1\}$, $s \in \mathbb{S}$)	$T_{A1}(s, b)$
زمان واقعی برای تولید در یک دوره وقتی که بازرسی اجرا نشود، ماشین در حالت s باشد و تصمیم b برای نت-پیشگیرانه در آن دوره اتخاذ شود. ($b \in \{0, 1\}$, $s \in \mathbb{S}$)	$T_{A2}(s, b)$
نرخ تولید ماشین وقتی که ماشین در حالت s باشد.	$r(s)$
نرخ تولید ماشین در یک دوره وقتی که در ابتدای دوره ماشین در حالت s باشد و تصمیم b در خصوص نت-پیشگیرانه اتخاذ شود. ($b \in \{0, 1\}$, $s \in \mathbb{S}$)	$r(s, b)$
هزینه‌ی هربار اجرای بازرسی	C_{ins}
هزینه‌ی اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی که ماشین در حالت s باشد.	$C_{pm}(s)$
هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به طوری که در بازرسی فعلی ماشین در حالت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم گرفته شود در دوره‌ی a ام آن، نت‌پیشگیرانه اجرا شود، که در آن $l = 1, \dots, K$ و $a = 0, \dots, l$	$\bar{C}_l(s, a)$
هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به طوری که در بازرسی فعلی ماشین در حالت s ، تقاضا z و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم گرفته شود در دوره‌ی a ام آن، نت‌پیشگیرانه اجرا شود، که در آن $l = 1, \dots, K$ و $a = 0, \dots, l$	$\bar{C}_l(s, z, a)$
تقاضا در افق برنامه‌ریزی که یک متغیر تصادفی گسسته است.	Δ
برد متغیر تصادفی Δ	\mathcal{R}_Δ
تابع توزیع احتمال متغیر تصادفی Δ	g_Δ
یک تابع نشانگر که در محاسبه‌ی هزینه بین دو بازرسی متوالی به کار می‌رود.	β_h
ظرفیت تولید اسمی ماشین در یک دوره	C_{max}
ضریب تنزیل	ρ
هزینه‌ی هر واحد تولید از دست‌رفته	h

۳-۳-۱- اجزاء مدل

جزء اول (مرحله)



شکل (۱): نمودار مربوط به طرح بازرسی مثال ۱

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود در این طرح بازرسی، بازرسی‌ها در ابتدای دوره‌ی اول، چهارم و ششم انجام می‌شود. آخرین جمله‌ی دنباله‌ی I همواره ۱ در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مراحل را تعریف کرد و به همین دلیل به شکل متفاوت از بقیه نشان داده شده است. زیر دنباله‌ی $\bar{I} = (1, 1, 1, 1)$ شامل تمام جملات یک دنباله‌ی I و دنباله‌ی $I = (0, 3, 5, 6)$ شامل اندیس جملات یک دنباله‌ی I را در- نظر بگیرد. دنباله‌ی مراحل متناظر با I به صورت زیر بدست می‌آید:

$$J(I) = (6-6, 6-5, 6-3, 6-0) = (0, 1, 3, 6)$$

دنباله‌ی $J(I) = (0, 1, 3, 6)$ نشان می‌دهد به‌ازای طرح بازرسی $I = (1, 0, 0, 1, 0, 1, 1)$ مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالی شامل ۴ مرحله می‌باشد. در مرحله‌ی اول صفر دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی باقی مانده است، زمانی است که ۱ دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی مانده است، مرحله‌ی سوم زمانی است که ۳ دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی باقی مانده است و در مرحله‌ی چهارم ۶ دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی باقی مانده است.

جزء دوم (متغیر حالت یا حالت سیستم)

وضعیت ماشین به‌عنوان متغیر حالت مدل تعریف و اندیس $s, s' \in \mathbb{S}$ برای آن در نظر گرفته می‌شود که در آن $s, s' \in \mathbb{S}$ و $\mathbb{S} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ مجموعه‌ی حالات ماشین را نشان می‌دهد که مجموعه‌ای متناهی است. ماشین در حالت صفر در بهترین وضعیت (ماشین نو) و در حالت N در بدترین وضعیت (ماشین خراب) قرار دارد. در سایر حالات، هرچه عدد مشخص کننده‌ی حالت بزرگتر باشد بدان معناست که- ماشین در وضعیت بدتری قرار دارد.

جزء سوم (متغیر تصمیم)

در مسأله‌ی ما دو نوع متغیر تصمیم وجود دارد، نوع اول مشخص می‌کند در ابتدای کدام دوره باید ماشین را بازرسی کرد و نوع دوم مشخص می‌کند در هر مرحله با توجه به مقدار متغیر حالت (وضعیت ماشین) تا زمان بازرسی بعدی (مرحله‌ی بعد) در چه دوره‌ای باید نت پیشگیرانه را اجرا کرد. هر طرح بازرسی دنباله‌ای متناهی از متغیرهای تصمیم نوع اول است. اگر $I = (i_k)_{k=0}^K$ یک طرح بازرسی دلخواه و از

هر نقطه از زمان که تصمیم به بازرسی گرفته شود به‌عنوان مرحله در نظر گرفته می‌شود. در ساختار مدل ارائه شده، تعداد دوره‌های باقیمانده تا پایان افق برنامه‌ریزی در هر مرحله مورد نیاز است. با توجه به این که در مسأله‌ی ما ابتدای هر دوره‌ی زمانی کاندیدایی برای اجرای بازرسی است، لذا بازرسی در هر دوره را می‌توان به‌عنوان یک متغیر تصمیم باینری در نظر گرفت. مجموعه‌ی جواب‌های شدنی برای بازرسی‌ها با II نشان داده می‌شود. با فرض این که در ابتدای دوره‌ی اول بازرسی باید انجام شود و جمله‌ی آخر هر جواب شدنی جهت سهولت در مدل‌سازی، مساوی ۱ باشد، هر جواب شدنی را می‌توان با $I = (i_k)_{k=0}^K$ که یک دنباله‌ی متناهی متشکل از ۰ یا ۱ است نمایش داد، به طوری که:

$$I = (i_0, i_1, \dots, i_K) = (i_k)_{k=0}^K, \quad i_0 = i_K = 1$$

که در آن K تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی است. بنابراین، تعداد اعضای II برابر با 2^{K-1} است که به‌هریک از آن‌ها یک طرح بازرسی گفته می‌شود.

فرض کنید $I = (i_k)_{k=0}^K$ یک طرح بازرسی دلخواه و از این به‌بعد ثابت باشد. \bar{I} را زیر دنباله‌ای از I شامل تمام جملات یک دنباله‌ی I در نظر می‌گیریم. یعنی،

$$\bar{I} = (\bar{i}_0, \bar{i}_1, \dots, \bar{i}_{k_m(I)}) = (\bar{i}_{k_i})_{i=0}^{m(I)}$$

که در آن،

$$\bar{i}_{k_i} = 1 \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, m(I)\}$$

و

$$i_k = 0 \quad \forall k \notin \{k_0, k_1, \dots, k_{m(I)}\}$$

حال، دنباله‌ی $J(I) = (j(I)_n)_{n=0}^{m(I)}$ را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$J(I) = (j(I)_0, j(I)_1, \dots, j(I)_{m(I)}) = (K - k_{m(I)}, K - k_{m(I)-1}, \dots, K - k_1, K - k_0)$$

دنباله‌ی $J(I)$ را که به‌طور غیرمستقیم مراحل را مشخص می‌کند، دنباله‌ی مراحل می‌نامیم. تعداد جملات این دنباله، تعداد مراحل را مشخص می‌کند. مثال ۱ به‌منظور فهم بهتر از تعریف دنباله‌ی مراحل طراحی شده است.

مثال (۱) فرض کنید $I = (1, 0, 0, 1, 0, 1, 1)$ یک طرح بازرسی برای مسأله‌ای با ۶ دوره‌ی زمانی باشد.

$$P_1 = e^{QT} \quad (۴)$$

$$P_1 = R \times P_1 = R \times e^{QT} \quad (۵)$$

که در آن R به صورت زیر تعریف می شود:

$$R = [r_{ss'}]_{(N+1) \times (N+1)}$$

$$r_{ss'} = \Pr(X_{t+1} = s' | X_t = s, a=1)$$

اما چون در مسأله‌ی ما فرض شده است که ماشین بعد از اجرای عملیات نت پیشگیرانه بلافاصله به وضعیت صفر بر گردد، لذا داریم:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

جزء پنجم (هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی)

فرض کنید $\bar{C}_l(s, a)$ هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به طوری که در بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s باشد و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم گرفته شود در دوره‌ی a ام آن، نت پیشگیرانه اجراء شود، که در آن $a = 0, \dots, l$ و $l = 1, \dots, K$ برای محاسبه‌ی $\bar{C}_l(s, a)$ از روابط (۶-۸) استفاده می شود. در این روابط، $T_{A1}(s, b)$ و $T_{A2}(s, b)$ به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$T_{A1}(s, b) = T - t_{ins} - bt_{pm}(s), \quad b \in \{0, 1\}$$

$$T_{A2}(s, b) = T - bt_{pm}(s), \quad b \in \{0, 1\}$$

$$r(s, b) = \begin{cases} r(s) & b = 0 \\ r(0) & b = 1 \end{cases}$$

به علاوه، در یک عبارت علامت + بالای پرانتز بدان معناست که اگر داخل پرانتز مثبت باشد، مقدار آن عبارت با مقدار داخل پرانتز برابر است و در غیر این صورت آن عبارت مقدار صفر می گیرد. β_h ، یک تابع نشانگر است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta_h : \{h, \dots, K\} \rightarrow \{0, 1\}$$

$$\beta_h(l) = \begin{cases} 0 & l = h \\ 1 & l \geq h + 1 \end{cases}$$

نقش این تابع در روابط (۶-۸) آن است که، تحت شرایطی، عبارتی از رابطه باید حذف شود، برای مثال در رابطه‌ی (۶)، چنانچه فاصله‌ی بین دو بازرسی متوالی یک دوره باشد، رابطه‌ی (۶) به شکل زیر در می آید:

این به بعد ثابت و $J(I) = (j(I)_n)_{n=1}^{m(I)}$ دنباله‌ی مراحل متناظر با آن در مدل برنامه ریزی پویای تصادفی باشد. در مرحله‌ی n ام، فضای تصمیم مربوط به تصمیمات نوع دوم وابسته به این طرح بازرسی، به صورت $\mathbb{A} = \{0, 1, \dots, I_{l,n}\}$ می باشد که در آن $I_{l,n} = j(I)_n - j(I)_{n-1}$. تصمیم صفر بدان معناست که بعد از اجرای بازرسی، تصمیم به اجرای نت-پیشگیرانه گرفته نشود، تصمیم $a \in \mathbb{A}$ بدان معناست که در a امین دوره بین بازرسی فعلی و بازرسی بعدی، نت-پیشگیرانه اجراء شود.

جزء چهارم (ماتریس احتمال انتقال)

همان طور که گفته شد در مسأله‌ی ما فرض بر آن است که فرایند زوال ماشین، یک فرایند مارکف همگن زمان پیوسته با فضای حالت گسسته‌ی $\mathbb{S} = \{0, 1, \dots, N\}$ باشد که با $\mathcal{X} = (X_t : t \in [0, \infty))$ نمایش داده می شود. برای بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال فرایند، کافی است ماتریس نرخ انتقال حالت را داشته باشیم. این ماتریس با Q نمایش داده می شود و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q = [q_{ss'}]_{(N+1) \times (N+1)}$$

$$q_{ss'} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Pr(X_t = s' | X_0 = s)}{t}, \quad s, s' \in \mathbb{S}, \quad s \neq s'$$

$$q_{ss} = -\sum_{s' \neq s} q_{ss'}$$

که در آن $q_{ss'}$ نرخ انتقال از حالت s به حالت s' می باشد. به علاوه، فرض می شود ماتریس Q در شرایط زیر صدق کند: شرط ۱: نرخ انتقال از یک حالت به یک حالت بهتر صفر است. زیرا در فرایند زوال ماشین، بدون اجرای عملیات نت وضعیت ماشین بهبود نمی یابد. به زبان ریاضی داریم:

$$q_{ss'} = 0, \quad \forall s' < s \quad (۲)$$

شرط ۲: همان طور که ماشین رو به زوال می رود، نرخ انتقال آن به وضعیت‌های بدتر افزایش می یابد. به بیان ریاضی داریم:

$$\sum_{s' \geq u} q_{ss'} < \sum_{s' \geq u} q_{(s+1)s'}, \quad \forall u \in \mathbb{S}, u \geq (s+2) \quad (۳)$$

اکنون با استفاده از برابری چارپمن-کولموگوروف^۶ می توان ماتریس‌های احتمال انتقال فرایند را بدست آورد. فرض کنید ماتریس احتمال انتقال فرایند، بعد از گذشت یک دوره‌ی زمانی به طول T و در صورت عدم اجرای عملیات نت پیشگیرانه با P و در صورت اجرای عملیات نت پیشگیرانه در ابتدای دوره با P_1 نشان داده شود، لذا داریم:

بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی l باشد و نت‌پیشگیرانه در دوره‌ی دوم فاصله‌ی بین دو بازرسی یا بعد از آن اجراء شود. توضیحات مربوط به اجزای این رابطه در جدول ۴ آمده است.

جدول (۳). اجزای رابطه‌ی (۷)

c_{ins}
هزینه‌ی بازرسی
$c_{pm}(s)$
هزینه‌ی نت‌پیشگیرانه
$h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+$
هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی
$\sum_{s'=\cdot}^N \{(P_1 P_1^{w-1})_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}$
متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$ م بین دو بازرسی متوالی

اگر فاصله‌ی بین دو بازرسی بیش از یک دوره باشد، رابطه‌ی (۸)، هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی را در شرایطی محاسبه می‌کند که در بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی l باشد و نت‌پیشگیرانه در دوره‌ی دوم فاصله‌ی بین دو بازرسی یا بعد از آن اجراء شود. توضیحات مربوط به اجزای این رابطه در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. اجزای رابطه‌ی (۸)

c_{ins}
هزینه‌ی بازرسی
$h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+$
هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی
$\sum_{s'=\cdot}^N \{(P^w)_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}$
متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$ م بین دو بازرسی متوالی قبل از اجراء نت‌پیشگیرانه
$\{(P^{a-1})_{s,s'} \{c_{pm}(s') + h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}$
متوسط مجموع هزینه‌های نت‌پیشگیرانه و تولید از دست‌رفته در دوره‌ی a م بین دو بازرسی متوالی
$\sum_{k=\cdot}^N \{(P^{a-1} P_1 P_1^{w-a})_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}$
متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$ م بین دو بازرسی متوالی بعد از اجراء نت‌پیشگیرانه

$$\bar{C}_l(s, \cdot) = c_{ins} + h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+ + \beta_l(l) \sum_{w=1}^{l-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N \{(P^w)_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\} \quad (۶)$$

$$\bar{C}_l(s, \cdot) = c_{ins} + c_{pm}(s) + h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+ + \beta_l(l) \sum_{w=1}^{l-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N \{(P_1 P_1^{w-1})_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\} \quad (۷)$$

$$\bar{C}_l(s, a) = c_{ins} + h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+ + \beta_l(a) \sum_{w=1}^{a-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N \{(P^w)_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\} + \rho^{a-1} \sum_{s'=\cdot}^N \{(P^{a-1})_{s,s'} \{c_{pm}(s') + h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}\} + \beta_a(l) \sum_{w=a}^{l-1} \rho^w \sum_{k=\cdot}^N \{(P^{a-1} P_1 P_1^{w-a})_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\} \quad (۸)$$

رابطه‌ی (۶)، هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی را در شرایطی محاسبه می‌کند که در بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی l باشد و نت‌پیشگیرانه در این فاصله اجراء نشود. اجزای این رابطه در جدول ۲ توضیح داده شده است.

جدول ۲. اجزای رابطه‌ی (۶)

c_{ins}
هزینه‌ی بازرسی
$h[c_{max} - T_{A_1}(s, \cdot)]r(s, \cdot)^+$
هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی
$\sum_{s'=\cdot}^N \{(P^w)_{s,s'} h[c_{max} - T_{A_2}(s', \cdot)]r(s', \cdot)^+\}$
متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$ م بین دو بازرسی متوالی

رابطه‌ی (۷)، هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی را در شرایطی محاسبه می‌کند که در بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی l باشد و نت‌پیشگیرانه در دوره‌ی اول فاصله‌ی بین دوبازرسی اجراء شود. اجزای این رابطه در جدول ۳ تشریح شده است. اگر فاصله‌ی بین دو بازرسی بیش از یک دوره باشد، رابطه‌ی (۸)، هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی را در شرایطی محاسبه می‌کند که در

$$\begin{aligned} \bar{C}_l(s, z, \cdot) &= c_{ins} + c_{pm}(s) + \\ & h[z - T_{A_1}(s, \cdot)r(s, \cdot)]^+ + \\ & \beta_l(l) \sum_{w=1}^{l-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N (P_l P_l^{w-1})_{s, s'} \\ & \left\{ \sum_{\delta \in \mathcal{R}_\Delta} g_\Delta(\delta) h[\delta - T_{A_\tau}(s', \cdot)r(s', \cdot)]^+ \right\} \\ & (l \in \{1, \dots, K\}, s \in \mathbb{S}, z \in \mathcal{R}_\Delta) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_l(s, z, a) &= c_{ins} + h[z - T_{A_1}(s, \cdot)r(s, \cdot)]^+ + \\ & \beta_l(a) \sum_{w=1}^{a-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N (P_l^w)_{s, s'} \\ & \sum_{\delta \in \mathcal{R}_\Delta} g_\Delta(\delta) h[\delta - T_{A_\tau}(s', \cdot)r(s', \cdot)]^+ + \rho^{a-1} \sum_{s'=\cdot}^N (P_l^{a-1})_{s, s'} \\ & \sum_{\delta \in \mathcal{R}_\Delta} g_\Delta(\delta) \{c_{pm}(s') + h[\delta - T_{A_\tau}(s', \cdot)r(s', \cdot)]^+\} + \\ & \beta_l(l) \sum_{w=a}^{l-1} \rho^w \sum_{k=\cdot}^N (P_l^{a-1} P_l^{w-a})_{s, s'} \\ & \sum_{\delta \in \mathcal{R}_\Delta} g_\Delta(\delta) h[\delta - T_{A_\tau}(s', \cdot)r(s', \cdot)]^+ \\ & (a \in \{2, \dots, K\}, l \in \{a, \dots, K\}, s \in \mathbb{S}, z \in \mathcal{R}_\Delta) \end{aligned} \quad (12)$$

اکنون که اجزای معادله‌ی بهینگی مشخص شد، معادله‌ی بهینگی مدل توسعه یافته با تغییراتی از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید. این معادله در رابطه‌ی (۱۳) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} V_{j(I)_n}(s, z) &= \min_{a \in \{1, \dots, l_{I,n}\}} \{ \bar{C}_{l_{I,n}}(s, z, a) + \\ & \rho^{l_{I,n}} \sum_{s'=\delta \in \mathcal{R}_\Delta}^N (P(a))_{s, s'} g_\Delta(\delta) V_{j(I)_{n-1}}(s', \delta) \} \\ & (n = 1, \dots, m(I)) \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن، $V_{j(I)}(s, z) = \cdot (\forall s \in \mathbb{S}, z \in \mathcal{R}_\Delta)$. به علاوه $(P(a))_{s, s'}$ و $l_{I,n}$ همان است که در ذیل رابطه‌ی (۹) تعریف شده است.

۴- روش حل پیشنهادی

در این تحقیق به دلیل آنکه بازرسی‌ها متغیر تصمیم هستند متناظر با هر طرح بازرسی یک معادله‌ی بهینگی وجود دارد که با روش رایج حل مدل‌های برنامه ریزی پویای تصادفی با افق متناهی قابل حل است. روش رایج از مقدار اولیه‌ی معادله‌ی بهینگی شروع می‌کند و با استفاده از معادله‌ی بهینگی که یک معادله‌ی برگشتی رو به عقب است بعد از تعدادی متناهی تکرار (به تعداد مراحل) خاتمه و جواب بهینه بدست می‌آید. الگوریتم پیشنهادی در واقع همان روش رایج است که به تعداد طرح‌های بازرسی ممکن تکرار می‌شود و در هر تکرار مقدار بهینه و تصمیم نت‌پیشگیرانه‌ی متناظر با آن ذخیره می‌شود و در آخر بین تمام جواب‌های ذخیره شده جواب با کمترین مقدار استخراج می‌گردد.

۳-۳-۲- معادله‌ی بهینگی و محاسبه‌ی هزینه‌ی کل مدل اول

در این بخش با توجه به تعریف اجزای معادله‌ی بهینگی و برای هر طرح بازرسی، یک معادله‌ی بهینگی ساخته می‌شود. بدین منظور فرض کنید $I = (i_k)_{k=1}^K$ یک طرح بازرسی دلخواه و از این به بعد ثابت و $J(I) = (j(I)_n)_{n=1}^{m(I)}$ دنباله‌ی مراحل متناظر با آن باشد، در این صورت، رابطه‌ی (۹)، معادله‌ی بهینگی مدل اول را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} V_{j(I)_n}(s) &= \min_{a \in \{1, \dots, l_{I,n}\}} \{ \bar{C}_{l_{I,n}}(s, a) + \\ & \rho^{l_{I,n}} \sum_{s'=\cdot}^N (P(a))_{s, s'} V_{j(I)_{n-1}}(s') \} \\ & (n = 1, \dots, m(I)) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن،

$$l_{I,n} = j(I)_n - j(I)_{n-1}, V_{j(I)}(s) = \cdot (\forall s \in \mathbb{S})$$

و $(P(a))_{s, s'}$ مولفه‌ی مستقر در سطر s و ستون s' ماتریس $P(a)$ می‌باشد، که:

$$P(a) = \begin{cases} P^{l_{I,n}} & a = \cdot \\ P^{a-1} P_l P_l^{l_{I,n}-a} & a \in \{1, 2, \dots, l_{I,n}\} \end{cases}$$

۳-۴- ارائه‌ی مدل دوم به منظور در نظر گرفتن تقاضا

در این بخش با توسعه‌ی مدل اول، تقاضای غیرقطعی به مدل اضافه شده است. مدل توسعه یافته نیز در قالب برنامه ریزی پویای تصادفی ساخته شده است. در تعریف اجزای معادله‌ی بهینگی، مرحله، متغیر تصمیم و ماتریس احتمال انتقال مشابه مدل اول تعریف شده است. اما متغیر حالت مسأله به زوج مرتب $(s, z) \in \mathbb{S} \times \mathcal{R}_\Delta$ تغییر یافته است، که در آن s وضعیت ماشین و z وقوع متغیر تصادفی Δ (تقاضا) در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی می‌باشد. هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی در مدل توسعه یافته با $\bar{C}_l(s, z, a)$ نمایش داده می‌شود و از روابط (۱۰) تا (۱۲) بدست می‌آید. در این روابط در دوره‌ی اول، تقاضای معلوم Z جایگزین C_{max} و در دوره‌های بعد δ جایگزین آن شده و امید ریاضی مربوط محاسبه شده است.

$$\begin{aligned} \bar{C}_l(s, z, \cdot) &= c_{ins} + h[z - T_{A_1}(s, \cdot)r(s, \cdot)]^+ + \\ & \beta_l(l) \sum_{w=1}^{l-1} \rho^w \sum_{s'=\cdot}^N (P_l^w)_{s, s'} \sum_{\delta \in \mathcal{R}_\Delta} \\ & \{ g_\Delta(\delta) h[\delta - T_{A_\tau}(s', \cdot)r(s', \cdot)]^+ \} \\ & (l \in \{1, \dots, K\}, s \in \mathbb{S}, z \in \mathcal{R}_\Delta) \end{aligned} \quad (10)$$

بهینه‌ی متناظر باحالت k در افق برنامه‌ریزی انتخاب و برای $I^* = (i_k^*)_{k=1}^K$ نامیده می‌شود. به‌ازای هر حالت k ، برای طرح بازرسی بهینه‌ی I^* ، (ζ) تصمیم بهینه در مورد زمان اجرای نت‌پیشگیرانه در فاصله‌ی بین بازرسی‌های متوالی را مشخص می‌کند.

۵- تجزیه و تحلیل نتایج عددی

۵-۱- کاربرد مدل پیشنهادی در توربین بادی

در این بخش به منظور تجزیه و تحلیل استراتژی مدل پیشنهادی، کاربردی از آن جهت استفاده در توربین‌های بادی بر مبنای کار ارائه شده در [۲۲] بیان شده است. یک توربین بادی وسیله‌ای است که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در مطالعه‌ی ما یک توربین بادی به‌عنوان یک ماشین و انرژی الکتریکی حاصل از آن به‌عنوان تک‌محصول آن در نظر گرفته شده است. مقدار انرژی الکتریکی تولید شده توسط یک توربین بادی به عوامل متعددی اعم از خارجی مثل سرعت و جهت باد و داخلی مثل وضعیت سلامت اجزای تشکیل‌دهنده‌ی توربین بستگی دارد. به‌عنوان نمونه در بررسی عوامل خارجی، در [۲۳] یک مدل تحلیلی جهت تعیین اثرات پارامترهای توربین بادی و مشخصه‌ی احتمالی سرعت باد بر میانگین گرهی قیمت بازار برق ارائه شده است.

یکی از اجزای اصلی، گران و بزرگ توربین بادی پره‌های آن می‌باشد که وظیفه‌ی تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی را به‌عهده دارند و در بیشتر طراحی‌ها به‌شکل سه پره‌ای می‌باشد (شکل (۲)).



شکل (۲): توربین بادی سه‌پره‌ای

بررسی عوامل و علل نقص در پره‌ها در [۲۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. مهمترین نقص‌ها لایه‌لایه شدن پره‌ها و از بین رفتن اتصال بین رویه و هسته‌ی ساندویچ پنل می‌باشد، که منشاء هردو فرسایش به‌دلیل تولید و یا اصابت

طرح بازرسی‌ای که منجر به این جواب می‌شود، طرح بازرسی بهینه است و تصمیمات نت متناظر با آن تصمیمات بهینه‌ی نت‌پیشگیرانه است. این الگوریتم خاتمه‌پذیر است چون با توجه به تعریف مرحله و طرح بازرسی هم تعداد مراحل و هم تعداد طرح‌های بازرسی متناهی هستند.

جزئیات این الگوریتم که شامل چهارگام اصلی است در ادامه ارائه شده است. قبل از ورود به گام‌های اصلی مقادیر $\bar{C}_1(s, a)$ برای مدل اول و مقادیر $\bar{C}_1(s, z, a)$ برای مدل دوم، در حوزه‌ی تعریفشان محاسبه و ذخیره می‌شود. مقادیر $\bar{C}_1(s, a)$ در معادله‌ی بهینگی مدل اول (رابطه‌ی (۹)) و مقادیر $\bar{C}_1(s, z, a)$ در معادله‌ی بهینگی مدل دوم (رابطه-ی (۱۳)) ایفای نقش می‌کند. به‌منظور راحتی در تشریح الگوریتم، نماد k برای متغیر حالت سیستم در هر دو مدل انتخاب شده است. لذا چنانچه از الگوریتم زیر برای حل مدل اول استفاده شود، $s = k$ و چنانچه از آن برای حل مدل دوم استفاده شود، $(s, z) = k$.

گام ۱: برای هر طرح بازرسی مثل $I = (i_k)_{k=1}^K$ ، گام‌های ۲ و ۳ اجرا و نتایج شامل مقدار بهینه و دوره‌ی مناسب برای نت‌پیشگیرانه (تصمیم بهینه‌ی مرحله‌ی دوم) متناظر با هر طرح بازرسی ذخیره می‌شود.

گام ۲: دنباله‌ی مراحل متناظر با $I = (i_k)_{k=1}^K$ باروشی که در مثال ۱ توضیح داده شد، تشکیل و $J(I) = (j(I))_{n=1}^{m(I)}$ نامیده می‌شود.

گام ۳: به‌ازای هر حالت k با استفاده از معادله‌ی بهینگی مربوط (رابطه‌ی (۹) برای مدل اول و رابطه‌ی (۱۳) برای مدل دوم) مقدار بهینه‌ی $V_{j(I)m(I)}^*(\zeta)$ محاسبه و تصمیم بهینه‌ی متناظر با آن $a_i^*(\zeta)$ نامیده می‌شود. در واقع (ζ) ، تصمیمات بهینه در مورد اجرای نت‌پیشگیرانه در فاصله‌ی بین بازرسی‌های متوالی به‌ازای طرح بازرسی I است در صورتی که در زمان بازرسی اول حالت سیستم k باشد.

بعد از اینکه گام‌های ۲ و ۳ برای تمام طرح‌های بازرسی ممکن اجرا شد، گام ۴ به‌منظور پیدا کردن طرح بازرسی بهینه‌وقتی که در زمان بازرسی اول حالت سیستم k باشد اجراء می‌شود.

گام ۴: به‌ازای هر حالت k ، طرح بازرسی‌ای که کمترین مقدار $V_{j(I)m(I)}^*(\zeta)$ را دارد، به‌عنوان طرح بازرسی

شکل (۳): فرایند زوال توربین بادی

بعلاوه نرخ انتقال آغازین از حالت ۰ به ۱ که با λ_{init} نمایش داده می‌شود مساوی یک فرض شده‌است و چون تأثیر زیادی در جواب‌ها دارد حساسیت متوسط مجموع هزینه‌ی بازرسی و نت نسبت به آن دربخش [۵-۲] آمده است. همچنین نرخ وقوع خرابی‌های ناگهانی که با λ_1 نمایش داده می‌شود ۰/۰۱ فرض شده‌است. برای نرخ‌های انتقال از ۱ به ۲ (λ_2) و ۲ به ۳ (λ_3) و ۳ به ۴ (λ_4) یک روند افزایشی نمایی با ضریب دلخواه (در اینجا ۲) فرض شده است. این فرض به-این دلیل است که طول یک ترک به‌عنوان تابعی از زمان به-طور کلی محدب‌است. به‌علاوه به‌دلیل مارکفی بودن فرایند زوال، زمان توقف در هر حالت از توزیع نمایی تبعیت می‌کند. در اینجا متوسط زمان تا خرابی کامل که از زوال تدریجی حادث می‌شود با T_{crack} نمایش داده و مساوی ۱ سال فرض-شده‌است. البته با توجه به عدم قطعیت‌های زیاد مربوط به آن، تحلیل حساسیتی در این خصوص دربخش [۵-۲] آمده است. لذا داریم:

$\lambda_4 = 2^3 \lambda_{det} = 8 \lambda_{det}$, $\lambda_3 = 2^2 \lambda_{det} = 4 \lambda_{det}$, $\lambda_2 = 2^1 \lambda_{det} = 2 \lambda_{det}$, $\lambda_1 = \lambda_{det}$ و بدین ترتیب به کمک رابطه‌ی زیر می‌توان مقدار λ_{det} و در-نتیجه سایر نرخ‌های انتقال را بدست آورد:

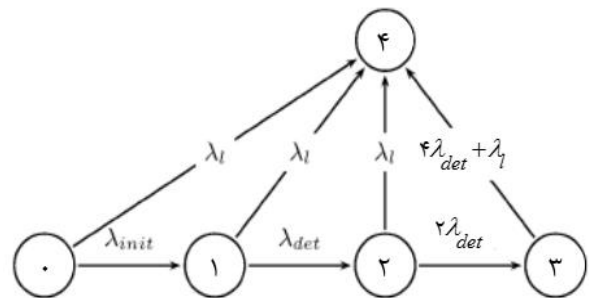
$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} = T_{crack} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{det}} + \frac{1}{2\lambda_{det}} + \frac{1}{4\lambda_{det}} = T_{crack} \Rightarrow \lambda_{det} = \frac{7}{4T_{crack}}$$

به این ترتیب ماتریس نرخ انتقال حالت به صورت زیر بدست می‌آید که در روابط (۲) و (۳) به منظور رعایت شرط‌های ۱ و ۲ صدق می‌کند.

$$Q = \begin{bmatrix} -(\lambda_{init} + \lambda_1) & \lambda_{init} & \cdot & \cdot \\ \cdot & -(\lambda_{det} + \lambda_1) & \lambda_{det} & \cdot \\ \cdot & \cdot & -(2\lambda_{det} + \lambda_1) & 2\lambda_{det} \\ \cdot & \cdot & \cdot & -(4\lambda_{det} + \lambda_1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

رعد و برق، برخورد پرندگان و طوفان‌های شدید می‌باشد. پس از شروع یک فرسایش، نقص (یا ترک) می‌تواند رشد کند، و در صورت رسیدن به اندازه بحرانی (به‌عنوان مثال، ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر در لایه‌ها، این نقص باعث کاهش مقاومت باقیمانده‌ی تیغه‌ها می‌شود و در نهایت ممکن است منجر به شکست شود. طول یک ترک به‌عنوان تابعی از زمان به‌طور-کلی محدب است. این ویژگی در ساختن ماتریس نرخ انتقال حالت بکاررفته‌است [۲۴].

فرایند زوال پره‌های توربین در این مطالعه یک فرایند مارکفی زمان پیوسته مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است، که در آن علاوه بر زوال تدریجی خرابی‌های ناگهانی هم دیده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای پره‌های توربین ۵ وضعیت سلامت از ۰ تا ۴ در نظر گرفته شده که فضای حالت ماشین را تشکیل می‌دهد ($S = \{0, 1, 2, 3, 4\}$). حالت نو با ۰ و حالت ۴ بیانگر خرابی کامل است. حالت‌های ۱، ۲ و ۳ حالت‌های میانی هستند که هر یک درجه‌ای از خرابی را دارند. برای مثال حالت ۱ درجه-۱ از خرابی را نشان می‌دهد که با روش‌های تزریق می‌توان پره را ترمیم کرد. در حالی که حالت ۳ درجه‌ای از خرابی را نشان می‌دهد که با روش‌های وصله‌کردن به حالت ۰ تبدیل می‌شود.



$$\lambda_1 = \begin{bmatrix} -1/0.1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot/0.1 \\ \cdot & -1/76 & 1/75 & \cdot & \cdot/0.1 \\ \cdot & \cdot & -3/51 & 3/50 & \cdot/0.1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & -7/0.1 & 7/0.1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

متوسط ۲ مگاوات در سال برق تولید می‌کند مشروط بر این که در بهترین وضعیت سلامت خود یعنی در حالت ۰ باشد. نرخ تولید ماهیانه توربین به صورت خطی و نسبت به

بعلاوه، ماتریس‌های انتقال یک مرحله‌ای در صورت عدم-اجرای نت‌پیشگیرانه و در صورت اجرای آن، با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه و در روابط (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. توربین بادی مورد بررسی در این مطالعه به‌طور

تقاضا مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده است و واحد آن کیلووات در ماه است.

جدول (۶): جدول توزیع احتمال تقاضا

δ	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
$g_{\Delta}(\delta)$	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵

هدف از حل هر دو مدل، پیدا کردن طرح بازرسی بهینه در افق برنامه‌ریزی و همچنین زمان بهینه برای اجرای نت پیشگیرانه با توجه به حالت سیستم (S در مدل اول و (S, Z) در مدل دوم) در زمان‌های بازرسی می‌باشد. هر دو مدل با استفاده از روش حل پیشنهادی در نرم‌افزار متلب^۷ پیاده‌سازی و حل شده است. نتایج نشان می‌دهد طرح بازرسی بهینه در مدل اول و دوم، ترکیبی از دو طرح $I_{11} = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ و $I_{21} = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ می‌باشد، به این ترتیب که طرح‌های بازرسی I_{11} به ترتیب برای مدل‌های اول و دوم، زمانی بهینه هستند که مقدار متغیر حالت در ابتدای افق برنامه‌ریزی (زمان اولین بازرسی) یکی از حالت‌هایی باشد که در جدول ۷ با رنگ سفید مشخص شده است و طرح بازرسی I_{21} برای مدل‌های اول و دوم زمانی بهینه است که در زمان اولین بازرسی، حالت سیستم یکی از حالت‌هایی باشد که با رنگ خاکستری مشخص شده است. بنابراین طرح بازرسی بهینه به حالت سیستم در ابتدای افق برنامه‌ریزی وابسته است. به علاوه، تصمیمات بهینه‌ی مربوط به زمان اجرای نت پیشگیرانه به حالت سیستم در لحظه‌ی بازرسی وابسته است که برای مدل اول و دوم به ترتیب در جداول ۸-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، چنانچه در ابتدای افق برنامه‌ریزی (زمان بازرسی اول) حالت سیستم یکی از حالت‌هایی باشد که در جدول (۷) با رنگ سفید مشخص شده است، طرح بازرسی I_{11} برای مدل اول بهینه است و تصمیم بهینه برای نت پیشگیرانه در ابتدای دوره‌های ۱، ۳، ۵ وابسته به حالت سیستم اتخاذ می‌شود. برای مثال، در مدل اول اگر حالت سیستم در بازرسی اول ۰ باشد، تصمیم به اجرای نت-پیشگیرانه در یک دوره بعد ($a=2$) یعنی ابتدای دوره‌ی دوم گرفته می‌شود، در بازرسی‌های دوم و سوم، اگر حالت سیستم ۰ باشد، نت پیشگیرانه در یک دوره بعد از بازرسی یعنی در دوره ۴ و ۶ و در بقیه‌ی حالات نت پیشگیرانه در همان دوره‌ی بازرسی ($a=1$) یعنی در دوره‌ی ۳ و ۵ باید اجرا گردد. اما همان‌طور که در جدول ۹ نشان داده شده

وضعیت سلامت توربین توزیع شده است به طوری که در-حالت ۰ دارای بیشترین مقدار یعنی ۱۶۶ کیلووات و در-حالت ۴ دارای کمترین مقدار یعنی ۰ کیلو وات می‌باشد. به علاوه زمان و هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به وضعیت سلامت پره‌های توربین بستگی دارد. مقادیر این پارامترها در جدول ۵ نمایش داده شده است.

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0/066 & 0/066 & 0/066 & 0/066 & 0/066 \\ 0/1152 & 0/1152 & 0/1152 & 0/1152 & 0/1152 \\ 0/2622 & 0/2622 & 0/2622 & 0/2622 & 0/2622 \\ 0/8451 & 0/8451 & 0/8451 & 0/8451 & 0/8451 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0/066 & 0/066 & 0/066 & 0/066 & 0/066 \\ 0/1039 & 0/1039 & 0/1039 & 0/1039 & 0/1039 \\ 0/2462 & 0/2462 & 0/2462 & 0/2462 & 0/2462 \\ 0/928 & 0/928 & 0/928 & 0/928 & 0/928 \\ 0/4750 & 0/4750 & 0/4750 & 0/4750 & 0/4750 \\ 0/9322 & 0/9322 & 0/9322 & 0/9322 & 0/9322 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

جدول (۵): هزینه و زمان اجرای نت-پیشگیرانه

واحد	۰	۱	۲	۳	۴	S
c_{pm}	۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۹۰۰۰	۴۴۰۰۰	توربو
t_{pm}	۰	۰/۱۵	۱	۱/۱۵	۲	روز
r	۱۶۹	۱۳۴/۱۵	۸۳	۴۱/۱۵	۰	کیلووات در ماه

هزینه‌ی اجرای بازرسی، مطابق با بازرسی مبتنی بر شرایطی که نیازمند نصب تجهیزات است به ترتیب برابر با $c_{ins} = 20000$ و $t_{ins} = 0/5$ و هزینه‌ی هر واحد تولید از دست‌رفته $h = 2400$ در نظر گرفته شده است. تمام این پارامترها از مرجع [۲۲] استخراج شده است. افق برنامه‌ریزی متشکل از $K = 6$ دوره‌ی زمانی هر یک به طول $T = 30$ روز و ضریب تنزیل $\rho = 0.9$ در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در مدل دوم تقاضا می‌تواند هر توزیع گسسته‌ی دلخواهی داشته باشد در این مطالعه جدول توزیع

مدل ما به عنوان توسعه‌ای از مدل پایه، در شرایط مشابه نتایج یکسان به همراه دارد. اما به منظور اعتبار سنجی مدل در شرایطی که $t_{pm} \neq 0$ ، $t_{ins} \neq 0$ و $c_{ins} \neq 0$ ، حساسیت هزینه‌ی کل نسبت به هزینه‌ی هر واحد بازرسی (c_{ins}) و با فرض ثابت بودن سایر پارامترها بررسی شده است. بدین منظور به ازای مقادیر مختلف c_{ins} ، مدل‌های پیشنهادی حل و تصمیمات بهینه‌ی بازرسی بدست آمده است. این تصمیمات به حالت سیستم در شروع افق برنامه‌ریزی وابسته است که در جدول (۱۱) به منظور نمایش در یک-نگاه نتایج، برای هر طرح یک‌رنگ انتخاب شده است. در این جدول، هزینه‌ی کل بدست آمده از حل هر دو مدل به ازای دو استراتژی مختلف مقایسه شده است. استراتژی اول، استراتژی بازرسی در هر دوره است که متناظر با جواب بدست آمده از حل مدل‌ها با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش [۴] به ازای طرح بازرسی I_{zz} می‌باشد. استراتژی دوم، استراتژی تصمیم‌گیری در خصوص بازرسی‌ها است و به منظور دستیابی به آن هر یک از مدل‌ها باید به ازای تمام طرح‌های بازرسی ممکن با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش [۴] حل و طرح بازرسی بهینه استخراج شود. نتایج نشان می‌دهد وقتی c_{ins} مساوی صفر است، استراتژی اول و دوم نتایج یکسانی دارند. اما وقتی c_{ins} مثبت است، طرح بازرسی I_{zz} به ازای برخی یا هیچ‌یک از حالات سیستم بهینه نیست و این یعنی چنانچه بازرسی هزینه داشته باشد، استراتژی اول در هیچ‌یک از مدل‌ها منجر به بهینگی نمی‌شود و این موضوع، اهمیت برنامه‌ریزی همزمان بازرسی‌ها و نتایج بهینه را در شرایط مسأله نشان می‌دهد.

جدول (۷): افزایش حالت‌ها بر اساس طرح بازرسی بهینه

مدل اول	مدل دوم			
S	(s, z)			
۰	(۰, ۵۰)	(۰, ۱۰۰)	(۰, ۱۵۰)	(۰, ۲۰۰)
۱	(۱, ۵۰)	(۱, ۱۰۰)	(۱, ۱۵۰)	(۱, ۲۰۰)
۲	(۲, ۵۰)	(۲, ۱۰۰)	(۲, ۱۵۰)	(۲, ۲۰۰)
۳	(۳, ۵۰)	(۳, ۱۰۰)	(۳, ۱۵۰)	(۳, ۲۰۰)
۴	(۴, ۵۰)	(۴, ۱۰۰)	(۴, ۱۵۰)	(۴, ۲۰۰)

است، در مدل دوم زمان بهینه برای نت‌پیشگیرانه به تقاضا نیز وابسته است. مثلاً اگر حالت سیستم در بازرسی اول (۰, ۵۰) باشد، تصمیم $a=2$ بهینه است و این بدان معنا است که نت‌پیشگیرانه باید در دومین دوره از دوره‌هایی که بین زمان بازرسی اول و دوم قرار می‌گیرد (دوره‌ی دوم)، اجراء شود. سپس وقتی به ابتدای دوره‌ی سوم رسیدیم، بسته به حالت سیستم، نت‌پیشگیرانه در همان دوره‌ی بازرسی ($a=1$) یا یک دوره بعد از آن ($a=2$) باید اجراء شود. این روند در بازرسی‌های بعدی ادامه می‌یابد. در هر دو مدل، روند مشابهی برای حالت‌هایی از سیستم که در جدول ۷ با رنگ خاکستری مشخص شده است وجود دارد. پس به طور خلاصه می‌توان گفت، در فاز اجراء، بازرسی‌ها با توجه به حالت سیستم در آغاز افق برنامه‌ریزی و براساس طرح بازرسی بهینه‌ی مربوط انجام و سپس نت‌پیشگیرانه با توجه به نتیجه‌ی بازرسی، در زمان مقرر اجراء می‌شود.

۵-۲- بحث و تحلیل حساسیت

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق مدل پایه‌ی ارائه شده در [۲۱] بخش‌های ۱.۴ و ۱.۵، با هدف اضافه کردن تصمیمات بازرسی و همچنین به حساب آوردن مدت زمان مورد نیاز برای اجرای عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه توسعه داده شده است. لذا به منظور اعتبار سنجی، در وهله‌ی اول هر یک از مدل‌های پیشنهادی با شرایط مدل پایه حل شده است. بدین منظور مدل‌های ۱ و ۲ با فرض $t_{pm} = 0$ ، $t_{ins} = 0$ و $c_{ins} = 0$ حل شده‌اند. همان‌طور که نتایج جدول (۱۰) نشان می‌دهد، به ازای همه‌ی حالت‌های سیستم، بهینگی وقتی رخ می‌دهد که طرح بازرسی $I_{zz} = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$ انتخاب شود و در هر دوره بازرسی صورت گیرد. همچنین هزینه‌ی کل، نسبت به تقاضا و حالت ماشین نازولی است و سیاست نت‌پیشگیرانه از نوع حد-آستانه‌ای است، یعنی به ازای یک مقدار ثابت از تقاضا، اگر وضعیت ماشین از یک حدی بدتر باشد، نت‌پیشگیرانه باید اجراء شود و این حد آستانه‌ای نسبت به تقاضا نازولی است، و به ازای یک مقدار ثابت از وضعیت ماشین، اگر تقاضا از یک حدی بدتر باشد، نت‌پیشگیرانه باید اجراء شود و این حد-آستانه‌ای نسبت به وضعیت ماشین نازولی است، و این یعنی

جدول (۸): زمان بهینه برای اجرای نت‌پیشگیرانه در مدل اول

$a_{I_{11}}^*(s)$							$a_{I_{21}}^*(s)$						
	S	دوره ۱		دوره ۳		دوره ۵		S	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۴
۰	۲		۲		۲		۰	۲		۲		۲	
۱	۱		۱		۱		۱	۱		۱		۱	
۲	۱		۱		۱		۲	۱		۱		۱	
۳	۱		۱		۱		۳	۱		۱		۱	
۴	۱		۱		۱		۴	۱		۱		۱	

جدول (۹): زمان بهینه برای اجرای نت‌پیشگیرانه در مدل دوم

$a_{I_{11}}^*(s, z)$												
	دوره ۱				دوره ۳				دوره ۵			
	Z											
S	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
$a_{I_{21}}^*(s, z)$												
	دوره ۱				دوره ۲				دوره ۴			
	Z											
S	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۱۰): جواب بهینه و هزینه کل حاصل از حل مدل پیشنهادی با فرض $t_{pm} = 0$ ، $t_{ins} = 0$ و $c_{ins} = 0$

هزینه کل					طرح بازرسی بهینه				تصمیمات بهینه نت در هر بازرسی				
Z					Z				Z				
S	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	
۰	۲۳۶۳۵	۲۳۶۳۵	۲۳۶۳۵	۲۳۶۳۵	$I_{32} = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۲۷۱۳۵	۲۷۱۳۵	۲۷۱۳۵	۲۷۱۳۵		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۵۸۶۳۵	۵۸۶۳۵	۵۸۶۳۵	۵۸۶۳۵		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۴۱۳۶۳۵	۴۱۳۶۳۵	۴۱۳۶۳۵	۴۱۳۶۳۵		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۴۶۴۰۳۵	۴۶۴۰۳۵	۴۶۴۰۳۵	۴۶۴۰۳۵		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

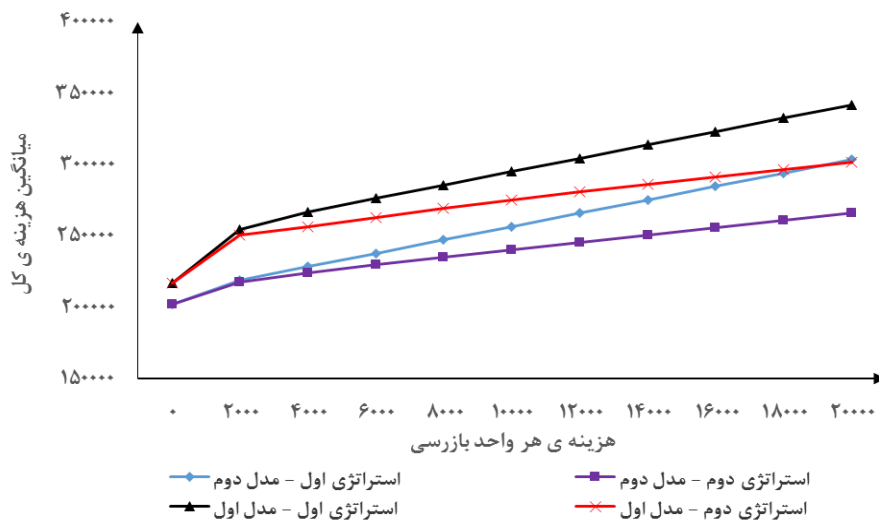
جدول (۱۱). مقایسه‌ی هزینه‌ی کل بدست‌آمده از مدل اول و دوم به‌ازای استراتژی اول و دوم و حساسیت آن نسبت به (C_{ins})													
$I_{33} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$					$I_{32} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$					$I_{21} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$			
$I_{11} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$			$I_{22} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$			$I_{13} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$			$I_{33} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$				
C_{ins}	هزینه کل متناظر با استراتژی اول						هزینه کل متناظر با استراتژی دوم						
	مدل ۲					مدل ۱	مدل ۲					مدل ۱	
	z						z						
s	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	میانگین	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	میانگین			
۰	۰	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۳۰۱۵۶	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۲۴۹۰۴	۳۰۱۵۶		
	۱	۲۸۴۰۴	۲۸۴۰۴	۲۸۴۰۴	۳۵۰۴۴	۴۰۲۹۶	۲۸۴۰۴	۲۸۴۰۴	۲۸۴۰۴	۳۵۰۴۴	۴۰۲۹۶		
	۲	۵۹۹۰۴	۵۹۹۰۴	۵۹۹۰۴	۷۳۱۸۴	۷۸۴۳۶	۵۹۹۰۴	۵۹۹۰۴	۵۹۹۰۴	۷۳۱۸۴	۷۸۴۳۶		
	۳	۴۱۴۹۰۴	۴۱۴۹۰۴	۴۱۴۹۰۴	۴۳۴۸۲۴	۴۴۰۰۷۶	۴۱۴۹۰۴	۴۱۴۹۰۴	۴۱۴۹۰۴	۴۳۴۸۲۴	۴۴۰۰۷۶		
	۴	۴۶۵۳۰۴	۴۶۵۳۰۴	۴۶۵۳۰۴	۴۹۱۸۶۴	۴۹۷۱۱۶	۴۶۵۳۰۴	۴۶۵۳۰۴	۴۶۵۳۰۴	۴۹۱۸۶۴	۴۹۷۱۱۶		
	میانگین	۲۰۲۰۰۴					۲۱۷۲۱۶	۲۰۲۰۰۴					۲۱۷۲۱۶
		میزان بهبود (%) در مدل اول					۰	میزان بهبود (%) در مدل دوم					۰
۲۰۰۰	۰	۴۰۲۸۹	۴۰۲۸۹	۴۰۲۸۹	۴۶۹۲۹	۶۷۴۵۴	۳۶۵۲۸	۳۶۵۲۸	۳۶۵۲۸	۴۳۱۶۸	۵۷۵۹۷		
	۱	۴۳۷۸۹	۴۳۷۸۹	۴۳۷۸۹	۵۷۰۶۹	۷۷۵۹۴	۴۳۳۲۲	۴۳۳۲۲	۴۳۳۲۲	۵۶۶۰۲	۷۵۱۰۸		
	۲	۷۵۲۸۹	۷۵۲۸۹	۷۵۲۸۹	۹۵۲۰۹	۱۱۵۷۳۴	۷۴۸۲۲	۷۴۸۲۲	۷۴۸۲۲	۹۴۷۴۲	۱۱۳۲۴۸		
	۳	۴۳۰۲۸۹	۴۳۰۲۸۹	۴۳۰۲۸۹	۴۵۶۸۴۹	۴۷۷۳۷۴	۴۲۹۸۲۲	۴۲۹۸۲۲	۴۲۹۸۲۲	۴۵۶۳۸۲	۴۷۴۸۸۸		
	۴	۴۸۰۶۸۹	۴۸۰۶۸۹	۴۸۰۶۸۹	۵۱۳۸۸۹	۵۳۴۴۱۴	۴۸۰۲۲۲	۴۸۰۲۲۲	۴۸۰۲۲۲	۵۱۳۴۲۲	۵۳۱۹۲۸		
	میانگین	۳۱۹۰۴۹					۲۵۴۵۱۴	۲۱۷۹۲۳					۲۵۰۵۵۴
		میزان بهبود (%) در مدل اول					۱/۶	میزان بهبود (%) در مدل دوم					۰/۵
۴۰۰۰	۰	۴۹۷۵۷	۴۹۷۵۷	۴۹۷۵۷	۵۶۳۹۷	۷۹۹۶۴	۴۱۹۴۵	۴۱۹۴۵	۴۱۹۴۵	۴۸۵۸۵	۶۲۵۲۹		
	۱	۵۳۲۵۷	۵۳۲۵۷	۵۳۲۵۷	۶۶۵۳۷	۹۰۱۰۴	۵۰۰۹۵	۵۰۰۹۵	۵۰۰۹۵	۶۳۳۷۵	۸۱۶۷۹		
	۲	۸۴۷۵۷	۸۴۷۵۷	۸۴۷۵۷	۱۰۴۶۷۷	۱۲۸۲۴۴	۸۱۵۹۵	۸۱۵۹۵	۸۱۵۹۵	۱۰۱۵۱۵	۱۱۹۸۱۹		
	۳	۴۳۹۷۵۷	۴۳۹۷۵۷	۴۳۹۷۵۷	۴۶۶۳۱۷	۴۸۹۸۸۴	۴۳۶۵۹۵	۴۳۶۵۹۵	۴۳۶۵۹۵	۴۶۳۱۵۵	۴۸۱۴۵۹		
	۴	۴۹۰۱۵۷	۴۹۰۱۵۷	۴۹۰۱۵۷	۵۲۳۳۵۷	۵۴۶۹۲۴	۴۸۶۹۹۵	۴۸۶۹۹۵	۴۸۶۹۹۵	۵۲۰۱۹۵	۵۳۸۴۹۹		
	میانگین	۳۲۸۵۱۷					۲۶۷۰۲۴	۲۲۴۴۲۵					۲۵۶۷۹۷
		میزان بهبود (%) در مدل اول					۳/۸	میزان بهبود (%) در مدل دوم					۱/۸
۶۰۰۰	۰	۵۹۱۲۹	۵۹۱۲۹	۵۹۱۲۹	۶۵۷۶۹	۸۹۳۳۵	۴۶۸۷۷	۴۶۸۷۷	۴۶۸۷۷	۵۳۵۱۷	۶۷۴۶۱		
	۱	۶۲۶۲۹	۶۲۶۲۹	۶۲۶۲۹	۷۵۹۰۹	۹۹۴۷۵	۵۶۰۲۹	۵۶۰۲۹	۵۶۰۲۹	۶۹۳۰۹	۸۸۲۴۹		
	۲	۹۴۱۲۹	۹۴۱۲۹	۹۴۱۲۹	۱۱۴۰۴۹	۱۳۷۶۱۵	۸۷۵۲۹	۸۷۵۲۹	۸۷۵۲۹	۱۰۷۴۴۹	۱۲۶۳۸۹		
	۳	۴۴۹۱۲۹	۴۴۹۱۲۹	۴۴۹۱۲۹	۴۷۵۶۸۹	۴۹۹۲۵۵	۴۴۲۵۲۹	۴۴۲۵۲۹	۴۴۲۵۲۹	۴۶۹۰۸۹	۴۸۸۰۲۹		
	۴	۴۹۹۵۲۹	۴۹۹۵۲۹	۴۹۹۵۲۹	۵۳۲۷۲۹	۵۵۶۲۹۵	۴۹۲۹۲۹	۴۹۲۹۲۹	۴۹۲۹۲۹	۵۲۶۱۲۹	۵۴۵۰۶۹		
	میانگین	۳۳۷۸۸۹					۲۷۶۳۹۵	۲۳۰۱۵۹					۲۶۳۰۳۹
		میزان بهبود (%) در مدل اول					۴/۸	میزان بهبود (%) در مدل دوم					۳/۲
۸۰۰۰	۰	۶۸۵۰۰	۶۸۵۰۰	۶۸۵۰۰	۷۵۱۴۰	۹۸۷۰۷	۵۱۸۰۹	۵۱۸۰۹	۵۱۸۰۹	۵۸۴۴۹	۷۳۳۹۴		
	۱	۷۲۰۰۰	۷۲۰۰۰	۷۲۰۰۰	۸۵۲۸۰	۱۰۸۸۴۷	۶۱۲۸۷	۶۱۲۸۷	۶۱۲۸۷	۷۴۵۶۷	۹۴۸۱۹		
	۲	۱۰۳۵۰۰	۱۰۳۵۰۰	۱۰۳۵۰۰	۱۲۳۴۲۰	۱۴۶۹۸۷	۹۲۷۸۷	۹۲۷۸۷	۹۲۷۸۷	۱۱۲۷۰۷	۱۳۳۹۵۹		
	۳	۴۵۸۵۰۰	۴۵۸۵۰۰	۴۵۸۵۰۰	۴۸۵۰۶۰	۵۰۸۶۲۷	۴۴۷۷۸۷	۴۴۷۷۸۷	۴۴۷۷۸۷	۴۷۴۳۴۷	۴۹۴۵۹۹		
	۴	۵۰۸۹۰۰	۵۰۸۹۰۰	۵۰۸۹۰۰	۵۴۲۱۰۰	۵۶۵۶۶۷	۴۹۸۱۸۷	۴۹۸۱۸۷	۴۹۸۱۸۷	۵۳۱۳۸۷	۵۵۱۶۳۹		
	میانگین	۳۴۷۲۶۰					۲۸۵۷۶۷	۲۳۵۳۵۲					۲۶۹۲۸۲
		میزان بهبود (%) در مدل اول					۵/۸	میزان بهبود (%) در مدل دوم					۴/۸

۱۰۰۰۰	۰	۷۷۸۷۱	۷۷۸۷۱	۷۷۸۷۱	۸۴۵۱۱	۱۰۸۰۷۸	۵۶۷۴۲	۵۶۷۴۲	۵۶۷۴۲	۶۳۳۸۲	۷۷۳۲۶
	۱	۸۱۳۷۱	۸۱۳۷۱	۸۱۳۷۱	۹۴۶۵۱	۱۱۸۲۱۸	۶۶۵۴۵	۶۶۵۴۵	۶۶۵۴۵	۷۹۸۲۵	۱۰۱۳۸۹
	۲	۱۱۲۸۷۱	۱۱۲۸۷۱	۱۱۲۸۷۱	۱۳۲۷۹۱	۱۵۶۳۵۸	۹۸۰۴۵	۹۸۰۴۵	۹۸۰۴۵	۱۱۷۹۶۵	۱۳۹۵۲۹
	۳	۴۶۷۸۷۱	۴۶۷۸۷۱	۴۶۷۸۷۱	۴۹۴۴۳۱	۵۱۷۹۹۸	۴۵۳۰۴۵	۴۵۳۰۴۵	۴۵۳۰۴۵	۴۷۹۶۰۵	۵۰۱۱۶۹
	۴	۵۱۸۲۷۱	۵۱۸۲۷۱	۵۱۸۲۷۱	۵۵۱۴۷۱	۵۷۵۰۳۸	۵۰۳۴۴۵	۵۰۳۴۴۵	۵۰۳۴۴۵	۵۳۶۶۴۵	۵۵۸۲۰۹
	میانگین	۲۵۶۶۳۱				۲۹۵۱۳۸	۲۴۰۵۴۴				۲۷۵۵۲۵
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۶/۶	میزان بهبود (%) در مدل دوم			
۱۲۰۰۰	۰	۸۷۲۴۲	۸۷۲۴۲	۸۷۲۴۲	۹۳۸۸۲	۱۱۷۴۴۹	۶۱۶۷۴	۶۱۶۷۴	۶۱۶۷۴	۶۸۳۱۴	۸۲۲۵۸
	۱	۹۰۷۴۲	۹۰۷۴۲	۹۰۷۴۲	۱۰۴۰۲۲	۱۲۷۵۸۹	۷۱۸۰۳	۷۱۸۰۳	۷۱۸۰۳	۸۵۰۸۳	۱۰۶۸۵۹
	۲	۱۲۲۲۴۲	۱۲۲۲۴۲	۱۲۲۲۴۲	۱۴۲۱۶۲	۱۶۵۷۲۹	۱۰۳۳۰۳	۱۰۳۳۰۳	۱۰۳۳۰۳	۱۲۳۲۲۳	۱۴۴۹۹۹
	۳	۴۷۷۲۴۲	۴۷۷۲۴۲	۴۷۷۲۴۲	۵۰۳۸۰۲	۵۲۷۳۶۹	۴۵۸۳۰۳	۴۵۸۳۰۳	۴۵۸۳۰۳	۴۸۴۸۶۳	۵۰۶۶۳۹
	۴	۵۲۷۶۴۲	۵۲۷۶۴۲	۵۲۷۶۴۲	۵۶۰۸۴۲	۵۸۴۴۰۹	۵۰۸۷۰۳	۵۰۸۷۰۳	۵۰۸۷۰۳	۵۴۱۹۰۳	۵۶۳۶۷۹
	میانگین	۲۶۶۰۰۲				۳۰۴۵۰۹	۲۴۵۷۳۷				۲۸۰۸۸۷
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۷/۸	میزان بهبود (%) در مدل دوم			
۱۴۰۰۰	۰	۹۶۶۱۳	۹۶۶۱۳	۹۶۶۱۳	۱۰۳۲۵۳	۱۲۶۸۲۰	۶۶۶۰۶	۶۶۶۰۶	۶۶۶۰۶	۷۳۲۴۶	۸۷۱۹۰
	۱	۱۰۰۱۱۳	۱۰۰۱۱۳	۱۰۰۱۱۳	۱۱۳۳۹۳	۱۳۶۹۶۰	۷۷۰۶۱	۷۷۰۶۱	۷۷۰۶۱	۹۰۳۴۱	۱۱۲۱۱۷
	۲	۱۳۱۶۱۳	۱۳۱۶۱۳	۱۳۱۶۱۳	۱۵۱۵۳۳	۱۷۵۱۰۰	۱۰۸۵۶۱	۱۰۸۵۶۱	۱۰۸۵۶۱	۱۲۸۴۸۱	۱۵۰۲۵۷
	۳	۴۸۶۶۱۳	۴۸۶۶۱۳	۴۸۶۶۱۳	۵۱۳۱۷۳	۵۳۶۲۴۰	۴۶۳۵۶۱	۴۶۳۵۶۱	۴۶۳۵۶۱	۴۹۰۱۲۱	۵۱۱۸۹۷
	۴	۵۳۷۰۱۳	۵۳۷۰۱۳	۵۳۷۰۱۳	۵۷۰۲۱۳	۵۹۳۷۸۰	۵۱۳۹۶۱	۵۱۳۹۶۱	۵۱۳۹۶۱	۵۴۷۱۶۱	۵۶۸۹۳۷
	میانگین	۲۷۵۳۷۳				۳۱۳۸۸۰	۲۵۰۹۳۰				۲۸۶۰۷۹
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۸/۹	میزان بهبود (%) در مدل دوم			
۱۶۰۰۰	۰	۱۰۵۹۸۴	۱۰۵۹۸۴	۱۰۵۹۸۴	۱۱۲۶۲۴	۱۳۶۱۹۱	۷۱۵۳۸	۷۱۵۳۸	۷۱۵۳۸	۷۸۱۷۸	۹۲۱۲۲
	۱	۱۰۹۴۸۴	۱۰۹۴۸۴	۱۰۹۴۸۴	۱۲۲۷۶۴	۱۴۶۳۳۱	۸۲۳۱۹	۸۲۳۱۹	۸۲۳۱۹	۹۵۵۹۹	۱۱۷۳۷۵
	۲	۱۴۰۹۸۴	۱۴۰۹۸۴	۱۴۰۹۸۴	۱۶۰۹۰۴	۱۸۴۴۷۱	۱۱۳۸۱۹	۱۱۳۸۱۹	۱۱۳۸۱۹	۱۳۳۷۳۹	۱۵۵۵۱۵
	۳	۴۹۵۹۸۴	۴۹۵۹۸۴	۴۹۵۹۸۴	۵۲۲۵۴۴	۵۴۶۱۱۱	۴۶۸۸۱۹	۴۶۸۸۱۹	۴۶۸۸۱۹	۴۹۵۳۷۹	۵۱۷۱۵۵
	۴	۵۴۶۳۸۴	۵۴۶۳۸۴	۵۴۶۳۸۴	۵۷۹۵۸۴	۶۰۳۱۵۱	۵۱۹۲۱۹	۵۱۹۲۱۹	۵۱۹۲۱۹	۵۵۲۴۱۹	۵۷۴۱۹۵
	میانگین	۲۸۴۷۴۴				۳۲۳۲۵۱	۲۵۶۱۲۳				۲۹۱۲۷۲
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۹/۹	میزان بهبود (%) در مدل دوم			
۱۸۰۰۰	۰	۱۱۵۳۵۶	۱۱۵۳۵۶	۱۱۵۳۵۶	۱۲۱۹۹۶	۱۴۵۵۶۳	۷۶۴۷۰	۷۶۴۷۰	۷۶۴۷۰	۸۳۱۱۰	۹۷۰۵۵
	۱	۱۱۸۸۵۶	۱۱۸۸۵۶	۱۱۸۸۵۶	۱۳۲۱۲۶	۱۵۵۷۰۳	۸۷۵۷۷	۸۷۵۷۷	۸۷۵۷۷	۱۰۰۸۵۷	۱۲۲۶۳۳
	۲	۱۵۰۳۵۶	۱۵۰۳۵۶	۱۵۰۳۵۶	۱۷۰۲۷۶	۱۹۳۸۴۳	۱۱۹۰۷۷	۱۱۹۰۷۷	۱۱۹۰۷۷	۱۳۸۹۹۷	۱۶۰۷۷۳
	۳	۵۰۵۳۵۶	۵۰۵۳۵۶	۵۰۵۳۵۶	۵۳۱۹۱۶	۵۵۵۴۸۳	۴۷۴۰۷۷	۴۷۴۰۷۷	۴۷۴۰۷۷	۵۰۰۶۳۷	۵۲۲۴۱۳
	۴	۵۵۵۷۵۶	۵۵۵۷۵۶	۵۵۵۷۵۶	۵۸۱۹۵۶	۶۱۲۵۲۳	۵۲۴۴۷۷	۵۲۴۴۷۷	۵۲۴۴۷۷	۵۵۷۶۷۷	۵۷۹۴۵۳
	میانگین	۲۹۴۱۱۶				۳۳۲۶۲۳	۲۶۱۳۱۶				۲۹۶۴۶۵
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۱۰/۹	میزان بهبود (%) در مدل دوم			
۲۰۰۰۰	۰	۱۲۴۷۲۷	۱۲۴۷۲۷	۱۲۴۷۲۷	۱۳۱۳۶۷	۱۵۴۹۳۴	۸۱۴۰۳	۸۱۴۰۳	۸۱۴۰۳	۸۸۰۴۳	۱۰۱۹۸۷
	۱	۱۲۸۲۲۷	۱۲۸۲۲۷	۱۲۸۲۲۷	۱۴۱۵۰۷	۱۶۵۰۷۴	۹۲۸۳۵	۹۲۸۳۵	۹۲۸۳۵	۱۰۶۱۱۵	۱۲۷۸۹۱
	۲	۱۵۹۷۲۷	۱۵۹۷۲۷	۱۵۹۷۲۷	۱۷۹۶۴۷	۲۰۳۲۱۴	۱۲۴۳۳۵	۱۲۴۳۳۵	۱۲۴۳۳۵	۱۴۴۲۵۵	۱۶۶۰۳۱
	۳	۵۱۴۷۲۷	۵۱۴۷۲۷	۵۱۴۷۲۷	۵۴۱۲۸۷	۵۶۴۸۵۴	۴۷۹۳۳۵	۴۷۹۳۳۵	۴۷۹۳۳۵	۵۰۵۸۹۵	۵۲۷۶۷۱
	۴	۵۶۵۱۲۷	۵۶۵۱۲۷	۵۶۵۱۲۷	۵۹۸۳۲۷	۶۲۱۸۹۴	۵۲۹۷۳۵	۵۲۹۷۳۵	۵۲۹۷۳۵	۵۶۲۹۳۵	۵۸۴۷۱۱
	میانگین	۳۰۳۴۸۷				۳۴۱۹۹۴	۲۶۶۵۰۹				۳۰۱۶۵۸
	میزان بهبود (%) در مدل اول						۱۱/۸	میزان بهبود (%) در مدل دوم			

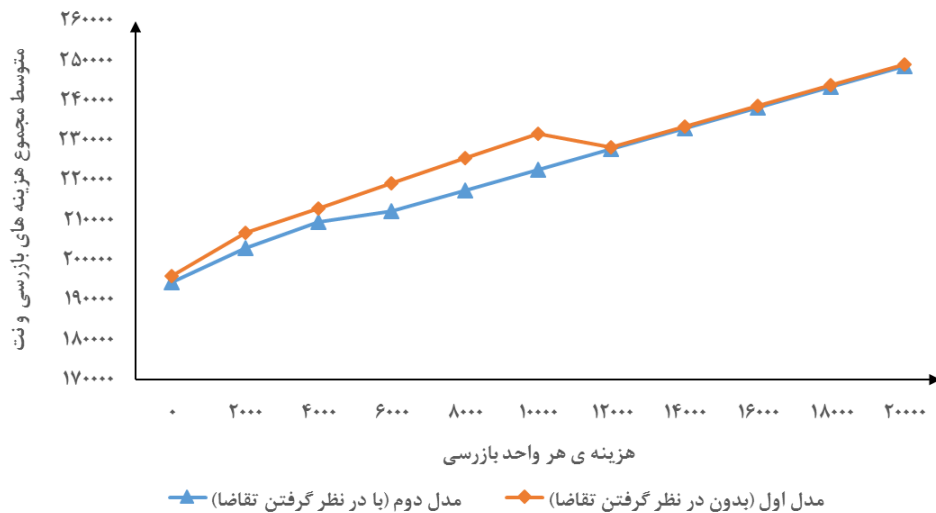
به‌علاوه شکل (۴) که به‌منظور مقایسه‌ی میانگین هزینه‌ی کل مدل اول و دوم با استراتژی‌های اول و دوم، طراحی شده‌است.

بررسی و نتایج در شکل‌های (۵)-(۷) نشان داده شده است. چرا که بخش دیگری از هزینه‌ی کل هزینه‌ی تولید از دست رفته است که در مدل اول، جریمه‌ی اختلاف مقدار تولید واقعی با وضعیت ایده‌آل (ظرفیت اسمی) و در مدل دوم، جریمه‌ی اختلاف مقدار تولید واقعی با تقاضا را نشان می‌دهد و مقایسه‌ی آن‌ها نمی‌تواند ملاک درستی برای ارزیابی باشد. در این بررسی مقدار سایر پارامترها همان است که در مطالعه‌ی کاربردی اخیر بکار رفته است، به‌علاوه در هر یک از تحلیل حساسیت‌ها سایر پارامترها ثابت فرض شده است.

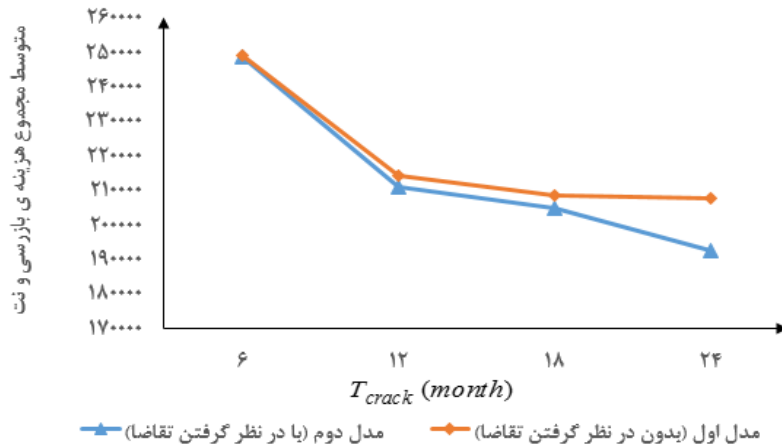
نشان می‌دهد در هر دو استراتژی مدل دوم که تقاضا را در نظر می‌گیرد از مدل اول عملکرد بهتری دارد که اهمیت در نظر گرفتن تقاضا در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. به‌علاوه، در هر دو مدل استراتژی دوم از استراتژی اول بهتراست و میزان این بهبود با افزایش مقدار c_{ins} بیشتر می‌شود که اهمیت گنجاندن تصمیمات بازرسی در مدل‌ها به‌ویژه زمانی که c_{ins} بزرگ باشد را نشان می‌دهد. در ادامه به‌منظور بررسی تأثیر در نظر گرفتن تقاضا در مدل حساسیت بخشی از هزینه‌ی کل که مربوط به عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه می‌باشد، نسبت به c_{ins} ، T_{crack} و λ_{init}



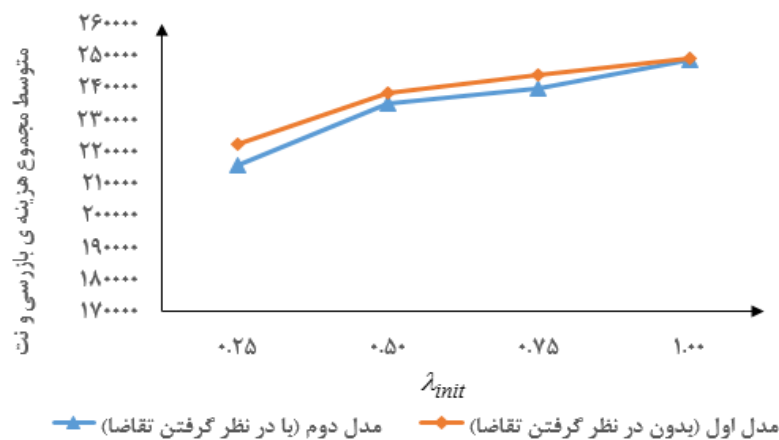
شکل (۴). حساسیت هزینه‌ی کل نسبت به c_{ins}



شکل (۵): حساسیت متوسط مجموع هزینه‌ی بازرسی و نت نسبت به c_{ins}



شکل (۶): حساسیت متوسط مجموع هزینه‌ی بازرسی و نت نسبت به T_{crack}



شکل (۷): حساسیت متوسط مجموع هزینه‌ی بازرسی و نت نسبت به λ_{init}

مجموع هزینه‌های بازرسی و نت در مدل دوم بیشتر می‌شود و این یعنی در ۶ ماهه اول که ماشین در وضعیت بهتری است اجرای نت سخت‌گیرانه (استراتژی بدست‌آمده از مدل اول) سودی ندارد بلکه به حساب آوردن تقاضا که مانع از اجرای عملیات نت غیرضروری می‌شود مؤثرتر است. شکل (۷) نشان می‌دهد هرچه λ_{init} بیشتر باشد یا به عبارتی ماشین در وضعیت نو باشد ولی عمر بیشتری از آن سپری شده باشد، تأثیر در نظر-گرفتن تقاضا در کاهش مجموع هزینه‌های بازرسی و نت کمتر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم تولید تک محصول و تک ماشین که در آن ماشین طبق یک فرایند مارکفی روبه زوال می‌رود، مورد بررسی قرار گرفت. تقاضا یک متغیر تصادفی گسسته با توزیع احتمال دلخواه در نظر گرفته و فرض شد بعد از اجرای نت، ماشین مثل یک ماشین نو شود. به منظور برنامه‌ریزی هم‌زمان بازرسی‌ها و نگهداری و تعمیرات در یک افق متناهی و در سطح تاکتیکی

شکل‌های (۵) و (۷) نشان می‌دهد، اولاً مستقل از این که مقادیر c_{ins} ، T_{crack} و λ_{in} چه باشد، به حساب آوردن تقاضا در مدل‌سازی مسأله منجر به کاهش مجموع هزینه‌های بازرسی و نت و در نتیجه بهبود نتایج می‌شود. ثانیاً میزان این بهبود متأثر از مقدار این پارامترها می‌باشد. برای مثال با توجه به شکل (۵) با افزایش هزینه‌ی واحد بازرسی میزان این بهبود بیشتر می‌شود تا این که در $c_{ins} = 10000$ به اوج خود می‌رسد، بعد از آن علیرغم این که بهبود وجود دارد اما میزان آن کاهش می‌یابد و از یک جایی به بعد تفاوت چندانی بین دو مدل در مجموع هزینه‌های بازرسی و نت وجود ندارد و این بدان معناست که به ازای مقادیر بزرگ c_{ins} ، در نظر گرفتن تقاضا تأثیر چندانی در کاهش مجموع هزینه‌های نت و بازرسی ندارد. شکل (۶) نشان می‌دهد هرچه T_{crack} بیشتر باشد یا به عبارتی روند زوال کندتر باشد، تأثیر در نظر گرفتن تقاضا در کاهش مجموع هزینه‌های بازرسی و نت بیشتر است. به علاوه با توجه به اینکه افق برنامه‌ریزی ۶ ماهه است اگر طول عمر پره‌ها از یک حدی بیشتر باشد (در اینجا ۱۸ ماه)، سرعت کاهش

بدست آمد. تجزیه و تحلیل نتایج عددی نشان می‌دهد، اولاً تصمیم‌گیری در خصوص بازرسی‌ها به‌جای اجرای بازرسی در هردوره موجب کاهش متوسط هزینه‌ی کل در افق برنامه‌ریزی می‌شود، ثانیاً در نظرگرفتن تقاضا در مدل‌سازی مسأله موجب کاهش در متوسط مجموع هزینه‌های بازرسی و نت می‌شود که البته میزان کاهش به‌مقدار برخی پارمترهای ورودی بستگی دارد. در پایان به‌عنوان زمینه‌ی تحقیقاتی بعدی در این حوزه، می‌توان مدل‌سازی مسأله با تقاضای تصادفی پیوسته را بررسی کرد و اضافه کردن سایر تصمیمات برنامه‌ریزی تولید ادغامی به مدل پیشنهادی را مدنظر قرارداد. به‌علاوه مدل‌های پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان مدل‌های پایه در سیستم‌های تولید پیچیده‌تر مثل صنعت نساجی و صنایع تولید محصولات نیمه‌هادی بکار گرفته‌شود. به‌عنوان زمینه‌ی تحقیقاتی دیگر می‌توان به مدل‌سازی مسأله در افق نامتناهی پرداخت که در این صورت می‌توان از روش‌های حل موجود در برنامه‌ریزی پویای تصادفی با افق نامتناهی مثل روش بهبود سیاست یا روش تقریب‌های متوالی در صورت وجود سیاست ثابت و از فرایند تجدید پاداش یا روش‌های تحلیلی جهت پیدا کردن ساختار سیاست بهینه در صورت عدم وجود سیاست ثابت بهره‌جست.

ابتدا بدون در نظرگرفتن تقاضا و با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی، یک مدل برای پیدا کردن زمان بهینه‌ی بازرسی و نت پیشگیرانه ارائه‌شد، که ساختار آن به‌طرح بازرسی انتخابی وابسته‌بوده و هدف آن کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت-پیشگیرانه و جریمه‌ی ناشی از تولید از دست‌رفته به‌دلیل اختلاف ظرفیت واقعی تولید با ظرفیت اسمی آن می‌باشد. در این مدل وضعیت ماشین را در ابتدای هردوره به عنوان متغیر حالت در نظرگرفتیم و سپس به منظور بررسی تأثیر تقاضای تصادفی روی تصمیمات و هزینه‌ها، مدل دوم توسعه داده شد. به این صورت که تقاضا به-متغیر حالت مدل اول پیوند داده شد و متوسط جریمه‌ی ناشی از تولید از دست‌رفته به‌دلیل اختلاف ظرفیت واقعی تولید با تقاضا جایگزین این‌بخش از هزینه در مدل اول شد. با توجه به این که در هر مدل، زمان بازرسی را به عنوان متغیر تصمیم در نظرگرفتیم و فرض شد مقدار متغیر حالت تنها بعد از بازرسی آشکار گردد، به‌ازای هر طرح بازرسی معادله‌ی بهینگی مربوطه حل و نتایج حاصل از آن ذخیره شد. نتایج مذکور شامل زمان‌های بهینه برای اجرای نت پیشگیرانه‌ی وابسته به طرح بازرسی مفروض می‌باشد که این کار برای همه‌ی طرح‌های بازرسی ممکن تکرار و نتایج با هم مقایسه شد و در آخر طرح بازرسی بهینه‌ی هر یک از مدل‌ها

مراجع

- [1] M. Aramon Bajestani, "Integrating Maintenance Planning and Production Scheduling: Making Operational Decisions with a Strategic Perspective", Doctoral dissertation, University of Toronto, 2014.
- [2] V. Legat, A. Žaludová, V. Červenka, and V. Jurča, "Contribution to optimization of preventive replacement", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 3, No. 51, 1996, pp. 259-266.
- [3] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", Mechanical systems and signal processing, Vol. 7, No. 20, 2006, pp. 1483-1510.
- [4] S. Alaswad, and Y. Xiang, "A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 1, No. 157, 2017, pp. 54-63.
- [5] H. R. Golmakani, and F. Fattahipour, "Optimal replacement policy and inspection interval for condition-based maintenance", International Journal of Production Research, Vol. 17, No. 49, 2011, pp. 5153-5167.
- [6] V.N. Achutha Naikan, and P. Naga Srinivasa Rao, "A condition-based preventive maintenance policy for Markov deteriorating systems", International Journal of Performability Engineering, Vol. 2, No. 2, 2006, pp. 175-189.
- [7] H. R. Golmakani, and F. Fattahipour, "Age-based inspection scheme for condition-based maintenance", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1, No. 17, 2011, pp. 93-110.
- [8] V. Amari, Suprasad, Leland McLaughlin, and Hoang Pham., "Cost-effective condition-based maintenance using Markov decision processes", Reliability and maintainability symposium, RAMS'06. Annual, IEEE, 2006, pp. 464-469.
- [9] A. Grall, C. Bérenguer, and L. Dieulle, "A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 2, No. 76, 2002, pp. 167-180.
- [10] D. Chen, and K. S. Trivedi, "Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 1, No. 90, 2005, pp. 25-29.
- [11] B. Liu, S. Wu, M. Xie, and W. A. Kuo, "Condition-based maintenance policy for degrading systems with age- and state-dependent operating cost", European journal of operational research, Vol. 3, No. 263, 2017, pp. 879-887.

[12] Q. Liu, M. Dong, W. Lv, and C. Ye, "Manufacturing system maintenance based on dynamic programming model with prognostics information", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 3, No. 30, 2019, pp. 1155-1173.

[13] J. Y. J. Lam, and D. A. Banjevic, "A myopic policy for optimal inspection scheduling for condition based maintenance", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 1, No. 144, 2015, pp. 1-11.

[14] M. Xu, M. N.-E. Alam, and S. Kamarthi, "A Modified Dynamic Programming Model in Condition-Based Maintenance Optimization", *12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2017.

[۱۵] محمود شهرخی، زهرا سبحانی، "بهینه‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم‌های دارای افزونه با در نظر گرفتن حالت نیمه‌بار، تخفیف و تغییر نرخ تعمیر"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پائیز ۱۳۹۷، صفحه ۲۶۷-۲۸۱.

[16] M. Saeedi Mehrabad, A. Jabarzadeh, and M. Alimian, "An integrated production and preventive maintenance planning model with imperfect maintenance in multi-state system", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 4, No. 10, 2017, pp. 28-42.

[17] E.-H. Aghezaf, A. Khatab, and P. Le Tam, "Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 1, No. 145, 2016, pp. 190-198.

[۱۸] حسام عابد، سعید امامی و رمضان نعمتی کشتلی، "زمان‌بندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در محیط ماشین‌های موازی نامرتب"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۷، شماره ۵۸، پائیز ۱۳۹۸، صفحه ۲۳۳-۲۴۷.

[19] K. Kang, and V. Subramaniam, "Integrated control policy of production and preventive maintenance for a deteriorating manufacturing system", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 1, No. 118, 2018, pp. 266-277.

[20] V. Polotski, J.-P. Kenne, and A. Gharbi, "Optimal production and corrective maintenance in a failure-prone manufacturing system under variable demand", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 1, No. 1, 2019, pp. 1-32.

[21] M. Aramon Bajestani, D. Banjevic, and J. C. Beck, "Integrated maintenance planning and production scheduling with Markovian deteriorating machine conditions", *International Journal of Production Research*, Vol. 24, No. 52, 2014, pp. 7377-7400.

[22] F. Besnard, and L. Bertling, "An approach for condition-based maintenance optimization applied to wind turbine blades", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 1, 2010, pp. 77-83.

[۲۳] الهه زکی‌خانی، مهدی صمدی و محمد ابراهیم حاجی‌آبادی، "ارائه مدلی تحلیلی جهت تعیین اثرات پارامترهای توربین بادی و مشخصه احتمالی سرعت باد بر میانگین قیمت گرهی بازار برق"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، doi: 10.22075/jme.2019.17192.1687.

[24] B. Hayman, J. Wedel-Heinen, and P. Brøndstedt, "Materials challenges in present and future wind energy", *MRS bulletin*, Vol. 4, No. 33, 2008, pp. 343-353.