# برنامه‌ریزی هم‌زمان بازرسی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر تقاضا درشرایط زوال مارکفی ماشین جهت‌کاربرد در توربین‌های بادی

رضا نوری[۱]، احمد صادقیه[۲،*] ، محمد مهدی لطفی[۳]

**اطلاعات مقاله**

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵

**واژگان کلیدی:**

برنامه‌ریزی بازرسی‌ها،

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط،

عدم قطعیت تقاضا،

برنامه‌ریزی پویای تصادفی،

توربین بادی.

**چکیده**

در این مقاله یک سیستم تولید تک‌ماشین و تک‌محصول در شرایط عدم‌قطعیت تقاضا درنظر گرفته‌شده که درآن ماشین طبق یک‌فرایند مارکفی روبه زوال می‌رود. هدف پیدا-کردن زمان‌بهینه برای انجام بازرسی‌ها و نت‌پیشگیرانه در برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات مبتنی برشرایط با بازرسی‌های گسسته (CBMDM) است. بدین‌منظور با استفاده از برنامه-ریزی پویای تصادفی یک مدل (مدل اول) ارائه‌شده که متغیر حالت آن، وضعیت ماشین می‌باشد. مدل اول بدون در نظرگرفتن تقاضا و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت و تولید از دست‌رفته به دلیل اختلاف ظرفیت واقعی با ظرفیت اسمی تولید ساخته‌شده‌است. سپس در مدل دوم، تقاضا به‌متغیر حالت پیوند داده‌شده و متوسط هزینه‌ی تولید از دست-رفته به‌دلیل اختلاف ظرفیت واقعی تولید با تقاضا، جایگزین این بخش از هزینه در مدل اول شده‌است. در آخر به‌منظور اعتبارسنجی و تجزیه و تحلیل مدل‌های پیشنهادی، کاربردی از آن درزمینه‌ی توربین‌های بادی ارائه‌شده که نتایج عددی حاصل از آن نشان می‌دهد، وقتی در برنامه‌ریزی هم‌زمان بازرسی و نت پیشگیرانه، تقاضا جایگزین ظرفیت اسمی شود متوسط مجموع هزینه‌های بازرسی و نت پیشگیرانه در افق برنامه‌ریزی کاهش می‌یابد.

## ۱- مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر با رویکرد تولید بهنگام در مدیریت تولید و عملیات، روند تولید تغییرکرده و اهمیت تولید پیوسته و بهنگام زیاد شده است. لذا شرکت‌های تولیدی برای پیروزی در بازار رقابتی باید به دنبال افزایش کارایی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیات تولیدی خود باشند. این در حالی‌است که در یک سیستم تولید واقعی، پویایی و عدم-قطعیت وجود دارد. برای‌مثال وقتی‌که به دلیل خرابی ماشین‌آلات، یک توقف برنامه‌ریزی نشده رخ می‌دهد، بخشی از ظرفیت تولید جهت انجام عملیات نگهداری و تعمیرات اصلاحی[۲] (CM) غیرقابل‌دسترس می‌شود. در چنین شرایطی کارایی سیستم کم و غالباً برنامه‌ی تولید جاری منسوخ می‌شود. اصلاح برنامه‌ی تولید نیز هزینه‌ی زیادی به‌همراه دارد. یکی از راهکارهای مواجهه با این چالش بکارگیری سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیر-انه است[۱].

به‌طورکلی در ادبیات دو رویکرد کلی برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه وجود دارد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی مبتنی بر زمان[۳] (TBM) و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی مبتنی‌بر 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

در TBM، عمر ماشین ملاک برنامه‌ریزی است و تصمیم گرفته می‌شود بعد از گذشت چه‌میزان از عمر ماشین، عملیات نت پیشگیرانه اجرا شود. در این رویکرد بسته‌به 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 درصورت وجود شواهدی در اطلاعات سنجش وضعیت که نشان‌از رفتار غیرعادی دستگاه داشته‌باشد، اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشنهاد می‌شود. یک مدل CBM شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی اول با استفاده از بازرسی یا سنجش وضعیت، حالتی‌که 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 به‌صرفه 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 رخ‌دهد را به‌همراه دارد [۳].

در بازرسی گسسته، رویکردهای مختلفی برای مشخص-کردن زمان بازرسی‌ها وجود دارد. رویکرد اول آن‌است 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 تعیین‌شده نیست و به‌عنوان متغیر تصمیم از حل یک‌مدل با در نظرگرفتن شاخص‌های اقتصادی استخراج می‌شود [۵]. رویکرد سوم آن‌است‌که فاصله‌ی بین بازرسی‌ها نه لزوماً ثابت و نه از پیش تعیین-شده‌است. در این رویکرد بازرسی‌ها یا به صورت تصادفی 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 هزینه-ی 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 تصمیم-گیری‌های 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

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 تصمیم‌است. دسته‌ی اول تصمیمات مربوط به نحوه‌ی بازرسی سیستم و دسته‌ی دوم تصمیمات مربوط‌به 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 نت‌پیشگیرانه 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 این‌حوزه بدون توجه به نیازمندی‌های بخش تولید صورت می‌گیرد. برای مثال، ممکن‌است در سیاست اتخاذ - شده، زمان بهینه‌ی اجرای نت‌پیشگیرانه درست زمانی باشد که ماشین درحال 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 نت‌پیشگیرانه غیرضروری باشد، از ظرفیت تولید می‌کاهد و سبب تأخیر در تحویل سفارش مشتری یا افزایش هزینه‌ی فروش از دست‌رفته می‌شود و اگر نت‌پیشگیرانه 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 مدل‌ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌منظور بیشینه‌کردن سطح دسترس‌پذیری به یک سیستم متشکل از اجزاء مختلف ارائه شده است. به‌دلیل وجود اجزای داخل سیستم که هریک مستعد خرابی است، کل سیستم به عنوان یک سیستم چندحالته در نظر گرفته شده است. قبل از ساخت مدل یکپارچه ابتدا معیار دسترس‌پذیری کل که به تصمیمات نت‌پیشگیرانه وابسته است، برای سیستم چند-حالته محاسبه و سپس با سایر تصمیمات و محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید ادغامی مثل مقدار تولید، موجودی و پس افت در هردوره ترکیب و مدل‌یکپارچه توسعه داده شده-است. درمدل آن‌ها در مورد بازرسی‌ها تصمیم‌گیری نمی-شود زیرا برای هر جزء فقط دوحالت سالم یا خرابی درنظر گرفته‌شده و زوال تدریجی برای‌آن منظور نشده است.

در [۱۷] یک مدل‌ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته‌ی غیرخطی برای برنامه‌ریزی همزمان تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم ساخت مستعد خرابی ارائه شده است که درآن عملیات‌نت‌پیشگیرانه غیرکامل فرض شده است، بدین‌معنا که در اثر اجرای نت‌پیشگیرانه، ماشین به یک‌حالت عملیاتی بین خرابی کامل و نو تبدیل می‌شود. همچنین در مطالعه‌ی آن‌ها از یک‌روش ابتکاری برای حل‌مدل استفاده شده و عملکرد آن روی یک‌سری 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 نامرتبط مورد ملاحظه قرار گرفته است. بدین‌منظور یک مدل‌برنامه‌ریزی 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 تعمیرات‌پیشگیرانه ارائه شده است که درآن تصمیم‌گیری بر اساس موجودی سیستم و قابلیت اطمینان دستگاه می‌باشد، که منجر به جلوگیری از عملیات نت‌پیشگیرانه غیرضروری و صرفه-جویی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود. همچنین در [۲۰] یک مدل‌یکپارچه برای کنترل تولید و نگهداری و تعمیرات پویا ارائه شده که در آن نگهداری و تعمیرات پویا شامل نت‌پیشگیرانه، اصلاحی و فرصت‌طلبانه می‌باشد. در این مدل، هم سیاست‌های کنترل تولید و هم نگهداری و تعمیرات به موجودی و عمر ماشین وابسته شده‌است. در [۲۱] با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی یک سیاست حد آستانه‌ای برای اجرای نت‌پیشگیرانه توسعه داده شده است که در آن حد کنترل بهینه، به وضعیت ماشین و تقاضا وابسته است و علاوه بر هزینه‌ی نت پیشگیرانه هزینه‌ی

تولید از دست‌رفته نیز درنظر گرفته شده است، اما در آن فرض‌شده‌است حالت ماشین در ابتدای هردوره معلوم است یعنی تصمیم‌گیری در مورد بازرسی‌ها در مدل دیده نشده-است، همچنین مدت زمان لازم برای اجرای نت‌پیشگیرانه در مدل لحاظ نشده است. جزئیات بیشتری از این مرور ادبیات در جدول (۱) آورده شده‌است که با توجه به‌آن و تا آنجا که ما بررسی کرده‌ایم، تحقیقی که درآن 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 درحضور تقاضا توسعه-داده شود و دیگر آنکه تصمیمات مربوط به بازرسی به مدل-هایی که نت‌پیشگیرانه را در حضور تقاضا برنامه‌ریزی می-کنند، اضافه‌گردد. در این تحقیق مسیر دوم انتخاب و مدل ارائه شده در [۲۱] توسعه داده شده است. بنابراین نوآوری-های این تحقیق عبارت‌اند از:

- زمان بازرسی به‌عنوان متغیر تصمیم به‌مدل ارائه شده در [۲۱] اضافه شده است.
- مدت زمان لازم برای اجرای بازرسی و نت‌پیشگیرانه در مدل به‌حساب آورده شده است.
- در مدل ارائه شده در [۲۱] فرض بر آن است که متغیر حالت در ابتدای هردوره 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 روش‌برنامه‌ریزی پویای تصادفی، دو مدل برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ی مبتنی بر شرایط در سطح تاکتیکی و در افق متناهی ارائه-شده‌است. 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 نت‌پیشگیرانه با توجه به نتیجه‌ی بازرسی (که خود متغیر تصمیم است) مشخص خواهد شد. ساختار هردو مدل به طرح بازرسی انتخابی وابسته است و هدف‌از حل آن‌ها پیداکردن زمان بهینه برای نت‌پیشگیرانه براساس مقدار متغیر حالتی است که در زمان بازرسی آشکار شده است. درمدل اول وضعیت ماشین ($s$) به‌عنوان متغیر حالت در نظرگرفته شده است و تصمیمات بهینه‌ی بازرسی و نت پیشگیرانه بدون درنظرگرفتن تقاضا و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت‌پیشگیرانه و جریمه‌ی ناشی‌از تولید ازدست‌رفته به‌دلیل اختلاف ظرفیت تولید واقعی با ظرفیت تولید اسمی به‌دست می‌آید. مدل دوم، براساس مدل اول و به‌منظور درنظرگرفتن تقاضا و بررسی تأثیر آن روی تصمیمات و هزینه‌های مربوط به بازرسی و نت‌پیشگیرانه توسعه داده شده است. در این مدل برای تصمیم‌گیری در مورد زمان بازرسی و نت‌پیشگیرانه، علاوه بر وضعیت ماشین، تقاضای مشتری به‌صورت یک متغیر تصادفی گسسته باتوزیع دلخواه در نظرگرفته شده است. لذا متغیر حالت مدل‌دوم زوج‌مرتب $(s,z)$ است که درآن $s$ وضعیت ماشین و $z$ تقاضا را نشان می‌دهد و تصمیمات بازرسی و نت‌پیشگیرانه با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های بازرسی، نت پیشگیرانه و جریمه‌ی ناشی از تولید ازدست‌رفته به‌دلیل 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 آن‌است 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 صورت‌گرفته و هریک از مدل‌ها به‌طور جداگانه و به‌ازای تمام طرح‌های بازرسی ممکن حل‌شده‌است. سپس، نتایج با هم مقایسه و ترکیب بهینه برای زمان بازرسی و نت پیشگیرانه‌ی هرمدل انتخاب شده است. همچنین به‌منظور مقایسه‌ی دو مدل، هزینه‌های مربوط به‌بازرسی و نت پیشگیرانه‌ی هر مدل محاسبه و با تجزیه و تحلیل نتایج عددی تأثیر درنظرگرفتن تقاضا در مدل بررسی شده است. در ادامه و دربخش [۲] بیان مسأله و مفروضات، دربخش [۳] مدل‌های پیشنهادی و دربخش [۴] روش حل‌آن به تفصیل ارائه می‌شود. به‌منظور تشریح بیشتر مدل‌ها، در بخش [۵] ضمن ارائه‌ی کاربردی از آن در زمینه‌ی توربین های بادی، نتایج عددی تجزیه و تحلیل شده است. در بخش [۶] نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان‌شده است.

جدول ۱: جزئیات مربوط به مرور ادبیات صورت‌گرفته

| شماره مرجع | افق برنامه‌ریزی: متناهی | افق برنامه‌ریزی: نامتناهی | وضعیت تقاضا: با در نظرگرفتن تقاضا | وضعیت تقاضا: بدون در نظرگرفتن تقاضا | تکنیک مدل‌سازی: PHM[5] | تکنیک مدل‌سازی: برنامه‌ریزی پویای تصادفی | تکنیک مدل‌سازی: فرایند تصمیم مارکفی | تکنیک مدل‌سازی: فرایند تصمیم نیمه مارکفی | تکنیک مدل‌سازی: برنامه‌ریزی عدد صحیح | رویکرد بازرسی: از پیش تعیین‌شده | رویکرد بازرسی: تعیین زمان بازرسی‌ها به‌طور تصادفی | رویکرد بازرسی: تصمیم‌گیری به‌صورت دوره‌ای | رویکرد بازرسی: تصمیم‌گیری به‌صورت غیر دوره‌ای | رویکرد نت: سیاست حد کنترلی یک‌سطحی | رویکرد نت: سیاست حد کنترلی چندسطحی | رویکرد نت: سیاست ثابت و به عنوان تابعی از حالت ماشین | رویکرد نت: تصمیم‌گیری هم‌زمان نت و بازرسی | رویکرد نت: برنامه‌ریزی همزمان تولید ادغامی و نت | تابع‌هدف: بیشینه‌کردن سطح دسترس‌پذیری | تابع‌هدف: کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های مربوط | تابع‌هدف: کمینه‌کردن متوسط مجموع هزینه‌های مربوط در واحد زمان | روش حل: روش ابتکاری | روش حل: استفاده از قضیه تجدید پاداش و روش دنباله‌ای | روش حل: روش بهبود سیاست | روش حل: حل معادله‌ی بهینگی به روش بازگشتی | روش حل: حل معادله‌ی بهینگی با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی | روش حل: حل معادلات انتگرال | روش حل: ارائه ساختار جواب بهینه | روش حل: پیاده‌سازی و حل به کمک نرم‌افزارهای بهینه‌سازی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [۵] | | * | | * | * | | | | | | | * | | * | | | | | | | | * | | | | | | |
| [۶] | | * | | * | | | * | | | | * | | | | * | | | | | | * | | * | | | | | |
| [۷] | | * | | * | * | | | | | | | | | * | * | | | | | | | * | | | | | | |
| [۸] | | * | | * | | * | | | | | | | | * | * | | * | | | | * | | | | | | | |
| [۹] | | * | | * | | | * | | | | | | | * | * | * | * | | | | | * | | | | | | |
| [۱۰] | | * | | * | | | | * | | | | | | * | * | | | * | | * | | | | | | | | |
| [۱۱] | | * | | * | | | * | | | | * | | | | | * | | | | | | * | | | | | * | |
| [۱۲] | | * | | * | | * | | * | | * | | | | | * | | | | | | | * | | | | | | |
| [۱۳] | | * | | * | * | | | | | | | | | | * | | | | | | | | | * | | | | |
| [۱۴] | | * | | * | * | | | | | | | | | | * | | | * | | | | | * | | | | | |
| [۱۶] | * | | * | | | | | | * | | | | | | | | | | | * | * | | | | | | | * |
| [۱۷] | * | | * | | | | | | * | | | | | | | | | | | * | | * | | * | | | | |
| [۱۹] | | * | * | | | | | * | | | | | | | | | | | | * | | * | | | * | | | |
| [۲۰] | | * | * | | | * | | | | | | | | | | | | | | * | | * | | | * | | * | |
| [۲۱] | | * | | * | | * | | | | | | * | | | | | * | | | | | * | | | | | | |
| مقاله حاضر | * | | * | | | * | * | | | | | | | * | | | | * | | | | | | | | | | |

## ۲- بیان مسأله و مفروضات

در این‌مقاله، یک سیستم تولید تک‌محصول و تک‌ماشین درنظر گرفته‌می‌شود که درآن تولید برمبنای سفارش مشتری صورت می‌گیرد. افق برنامه‌ریزی متناهی و طول دوره‌های زمانی مشمول درآن باهم مساوی هستند. تقاضای تمام دوره‌ها ازیک متغیر تصادفی گسسته با توزیع احتمال دلخواه و مشخص تبعیت می‌کند و درابتدای هر دوره، مقدار آن معلوم‌است. تقاضای هردوره باید درهمان دوره برآورده‌شود و چنانچه سیستم قادر به‌تولید بخشی‌از تقاضا نباشد، به‌ازای هر واحد از تقاضای برآورده نشده، متحمل جریمه‌می‌شود. ماشین در اثر تولید محصول به تدریج روبه‌زوال می‌رود. برای ماشین سطوح مختلفی از خرابی در نظرگرفته شده است که هرسطح ازآن یک‌حالت نامیده می‌شود. مجموعه‌ی حالات مجموعه‌ای متناهی است. فرایند زوال ماشین دارای رفتار مارکفی است و ازیک فرایند مارکف 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 دوره‌هایی‌است که‌درآن ماشین باید بازرسی شود و مرحله‌ی‌دوم انتخاب دوره‌هایی است‌که نت پیشگیرانه باید بر‌اساس نتیجه‌ی بدست‌آمده از بازرسی‌ها اجراشود. تصمیم‌گیری در خصوص بازرسی‌ها به‌طور مستقیم روی هزینه‌ی بازرسی تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که تأثیر آن روی سایر هزینه‌ها، غیرمستقیم و به‌دلیل آن است که زمان اجرای

نت‌پیشگیرانه فقط بعد از انجام بازرسی مشخص می‌شود. هدف آن‌است‌که با استفاده از رویکرد نگهداری و تعمیرات مبتنی برشرایط 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 ازدست‌رفته موازنه برقرار-شود، ثانیاً، تأثیر درنظرگرفتن تقاضا در تصمیمات و هزینه-های مربوط به بازرسی و نت‌پیشگیرانه مورد ارزیابی قرار-گیرد. سایر مفروضات مسأله به‌شرح 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 هربار 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 تصمیم گیری‌شود. (تصمیمات مرحله‌ی دوم)
۷- هزینه و زمان لازم برای اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه به حالت ماشین در لحظه‌ی اجرا وابسته است و هرچه ماشین درحالت بدتری قرار داشته باشد هزینه و زمان نت‌پیشگیرانه در آن حالت بیشتر است. همچنین فرض می‌شود وقتی ماشین درحالت صفر است هزینه و زمان نت‌پیشگیرانه‌ی آن صفر باشد.
۸- ماشین بعدازاجرای عملیات نت‌پیشگیرانه بلافاصله به حالت صفر (وضعیت نو) تبدیل می‌شود.
۹- نرخ تولید ماشین به‌حالت ماشین بستگی‌دارد 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 دسترس‌بودن ماشین به دلیل اجرای عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه منظور شود.

## ۳- مدل‌سازی مسأله

در این تحقیق از چارچوب برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی برای‌مدل‌سازی مسأله استفاده‌شده‌است. لذا در-این بخش بعداز معرفی مدل‌پایه‌ی برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی، نمادهای مربوط معرفی و سپس مدل اول بدون درنظرگرفتن تقاضا و فرض‌های مترتب بر آن ارائه‌می‌شود. بعد از آن تقاضا به مدل اضافه و تأثیر در نظرگرفتن آن در مدل بررسی‌می‌شود.

### ۳-۱- مدل پایه‌ی‌برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق متناهی

همان‌طورکه 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 این‌معادله عبارتنداز مرحله (n)، متغیر حالت (s یا $s'$)، متغیر تصمیم (a)، ماتریس احتمال انتقال وقتی‌که تصمیم a اتخاذ شده $(P(a))$ و هزینه‌ی مرحله‌ی فعلی وقتی‌که حالت سیستم s است و تصمیم a اتخاذ شده است $(C(s,a))$. به‌طورکلی معادله‌ی بهینگی در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است:

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

که‌درآن $\mathbb{S}$ فضای حالت، $\mathbb{A}$ فضای تصمیم، $(P(a))_{ss'}$ مولفه‌ی مستقر در سطر s و ستون $s'$ ماتریس $P(a)$است و $V_n(s)$ متوسط هزینه‌ی‌کل را درشرایطی نشان می‌دهد که حالت سیستم s، و n مرحله تا پایان افق برنامه‌ریزی باقیمانده باشد، به‌علاوه فرض می‌شود: $V_0(s) = 0\ (\forall s \in \mathbb{S})$

### ۳-۲- ارائه‌ی مدل اول بدون در نظرگرفتن تقاضا

در این‌بخش، مسأله بدون در نظرگرفتن تقاضا در قالب برنامه‌ریزی پویای تصادفی مدل‌سازی می‌شود. بدین‌منظور ابتدا اجزای معادله‌ی بهینگی مدل اول تعریف و بعدازآن معادله‌ی بهینگی ساخته می‌شود.

### ۳-۳- نمادها

| | |
|---|---|
| K | تعداد دوره‌ها |
| T | طول هر دوره |
| $\mathbb{I}$ | مجموعه‌ی طرح‌های بازرسی |
| $I=(i_k)_{k=0}^{K}$ | یک طرح بازرسی دلخواه که در آن $i_0=i_K=1$ و $i_k\in\{0,1\}$ |
| $J(I)=(j(I)_n)_{n=0}^{m(I)}$ | دنباله‌ی مراحل متناظر با طرح بازرسی $I=(i_k)_{k=0}^{K}$ |
| $\mathbb{A}=\{0,1,...,l_{I,n}\}$ | مجموعه‌ی تمام تصمیمات مربوطبه انتخاب دوره‌ی اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی که فاصله‌ی بین دو بازرسی متوالی $l_{I,n}$ باشد. |
| $\mathcal{X}=(X_t:t\in[0,\infty))$ | فرایند مارکف همگن زمان پیوسته |
| $\mathbb{S}=\{0,1,2,...,N\}$ | فضای‌حالت $\mathcal{X}$ و اندیس‌های s و $s'$ برای آن در نظر گرفته‌می‌شود. |
| $Q=[q_{ss'}]_{(N+1)\times(N+1)}$ | ماتریس نرخ انتقال $\mathcal{X}$ |
| $P_0$ | ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای فرایند $\mathcal{X}$ وقتی‌که نت‌پیشگیرانه اجرا نشود. |
| $P_1$ | ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای فرایند $\mathcal{X}$ وقتی‌که نت‌پیشگیرانه اجرا شود. |
| $\mathcal{P}(a)$ | ماتریس احتمال انتقال فرایند $\mathcal{X}$ وقتی‌که تصمیم a برای نت‌پیشگیرانه اتخاذ شود. |
| $t_{ins}$ | مدت زمان لازم برای انجام هر بازرسی |
| $t_{pm}(s)$ | مدت زمان لازم برای اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی‌که ماشین در حالت s باشد. |
| $T_{A1}(s,b)$ | زمان واقعی برای تولید در یک‌دوره وقتی که بازرسی اجراشود، ماشین در حالت s باشد و تصمیم b برای نت-پیشگیرانه در آن‌دوره اتخاذ شود. ($b\in\{0,1\},\ s\in\mathbb{S}$) |
| $T_{A2}(s,b)$ | زمان واقعی برای تولید در یک‌دوره وقتی‌که بازرسی اجرانشود، ماشین در حالت s باشد و تصمیم b برای نت-پیشگیرانه در آن‌دوره اتخاذ شود. ($b\in\{0,1\},\ s\in\mathbb{S}$) |
| $r(s)$ | نرخ تولید ماشین وقتی‌که ماشین در حالت s باشد. |
| $r(s,b)$ | نرخ تولید ماشین در یک‌دوره وقتی‌که در ابتدای دوره ماشین در حالت s باشد و تصمیم b در خصوص نت-پیشگیرانه اتخاذ شود. ($b\in\{0,1\},\ s\in\mathbb{S}$) |
| $c_{ins}$ | هزینه‌ی هربار اجرای بازرسی |
| $c_{pm}(s)$ | هزینه‌ی اجرای نت‌پیشگیرانه وقتی که ماشین در حالت s باشد. |
| $\bar{C}_l(s,a)$ | هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به‌طوری‌که در بازرسی فعلی ماشین در حالت s و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم‌گرفته‌شود در دوره‌ی a اُم آن، نت‌پیشگیرانه اجراشود، که درآن $l=1,...,K$ و $a=0,\cdots,l$. |
| $\bar{C}_l(s,z,a)$ | هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به طوری‌که در بازرسی فعلی ماشین در حالت s ، تقاضا z و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم‌گرفته‌شود در دوره‌ی a اُم آن، نت پیشگیرانه اجراشود، که‌درآن $l=1,...,K$ و $a=0,\cdots,l$. |
| $\Delta$ | تقاضا در افق برنامه‌ریزی که یک متغیر تصادفی گسسته است. |
| $\mathcal{R}_\Delta$ | برد متغیر تصادفی $\Delta$ |
| $g_\Delta$ | تابع توزیع احتمال متغیر تصادفی $\Delta$ |
| $\beta_h$ | یک تابع نشانگر که در محاسبه‌ی هزینه بین دو بازرسی متوالی به‌کار می‌رود. |
| $c_{\max}$ | ظرفیت تولید اسمی ماشین در یک دوره |
| $\rho$ | ضریب تنزیل |
| h | هزینه‌ی هر واحد تولید از دست‌رفته |

**۳-۳-۱- اجزاء مدل**

**جزء اول (مرحله)**

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 این‌که در مسأله‌ی ما ابتدای هر دوره‌ی زمانی کاندیدایی برای اجرای بازرسی است، لذا بازرسی درهردوره را می‌توان به‌عنوان یک متغیر تصمیم باینری در نظرگرفت. مجموعه‌ی جواب‌های شدنی برای بازرسی‌ها با $\mathbb{I}$ نشان داده می‌شود. با فرض این‌که در ابتدای دوره‌ی‌اول 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 نمایش‌داد، به طوری‌که:

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

که درآن $K$ تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی‌است. بنابراین، تعداد اعضای $\mathbb{I}$ برابر با $2^{K-1}$ است که به‌هریک از آن‌ها یک طرح بازرسی گفته‌می‌شود.

فرض‌کنید $I=(i_k)_{k=0}^{K}$ یک طرح بازرسی دلخواه و ازاین به‌بعد ثابت‌باشد. $\bar{I}$ را زیر دنباله‌ای از $\mathrm{I}$ شامل تمام جملات یکِ دنباله‌ی $\mathrm{I}$ در نظر می‌گیریم. یعنی،

$$\bar{I}=(\bar{i}_{k_0},\bar{i}_{k_1},\cdots,\bar{i}_{k_{m(I)}})=(\bar{i}_{k_i})_{i=0}^{m(I)}$$

که درآن،

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

و

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

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

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

دنباله‌ی $J(I)$ را که به‌طور غیرمستقیم مراحل را مشخص می‌کند، دنباله‌ی مراحل می‌نامیم. تعداد جملات این دنباله، تعداد مراحل را مشخص‌می‌کند. مثال۱ به‌منظور فهم بهتر از تعریف‌دنباله‌ی مراحل طراحی‌شده‌است.

مثال۱) فرض‌کنید $I=(1,0,0,1,0,1,1)$ یک طرح بازرسی برای مسأله‌ای با ۶ دوره‌ی زمانی باشد.

شکل (۱): نمودار مربوط به طرح بازرسی مثال۱

همان‌طورکه در شکل (۱) دیده می‌شود دراین طرح بازرسی، بازرسی‌ها در ابتدای دوره‌ی اول، چهارم و ششم انجام می‌شود. آخرین جمله‌ی دنباله‌ی $\mathrm{I}$ همواره ۱ در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مراحل را تعریف‌کرد و به‌همین دلیل به‌شکل متفاوت از بقیه نشان‌داده شده است. زیر دنباله‌ی $\bar{I}=(1,1,1,1)$ شامل تمام جملات یکِ دنباله‌ی $\mathrm{I}$ و دنباله‌ی $k=(0,3,5,6)$ شامل اندیس جملات یکِ دنباله‌ی $\mathrm{I}$ را در-نظربگیرید. دنباله‌ی مراحل متناظر با $\mathrm{I}$ به صورت زیر بدست‌می‌آید:

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

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 تاپایان افق برنامه‌ریزی باقی مانده است، مرحله‌ی‌دوم زمانی است‌که ۱ دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی مانده‌است، مرحله‌ی سوم زمانی‌است که ۳ دوره تا پایان افق برنامه ریز-ی 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 $s,s'$ برای‌آن درنظرگرفته‌می‌شود که‌درآن $s,s'\in\mathbb{S}$ و $\mathbb{S}=\{0,1,2,\ldots,N\}$ مجموعه‌ی حالات ماشین را نشان‌می-دهد که مجموعه‌ای متناهی‌است. ماشین در حالت صفر در بهترین وضعیت (ماشین نو) و در حالت $\mathrm{N}$ در بدترین وضعیت (ماشین خراب) قراردارد. در سایر حالات، هرچه-عدد مشخص کننده‌ی‌حالت بزرگترباشد بدان‌معناست که-ماشین در وضعیت بدتری قراردارد.

**جزء سوم (متغیر تصمیم)**

در مسأله‌ی ما دو نوع متغیر تصمیم وجوددارد، نوع اول مشخص می‌کند در ابتدای کدام‌دوره باید ماشین را بازرسی کرد و نوع دوم مشخص می‌کند درهرمرحله با توجه به‌مقدار متغیر حالت (وضعیت ماشین) تا زمان بازرسی بعدی (مرحله‌ی‌بعد) در چه‌دوره‌ای باید نت پیشگیرانه را اجراکرد. هر طرح بازرسی دنباله‌ای متناهی از متغیرهای تصمیم نوع اول است. اگر $I=(i_k)_{k=0}^{K}$ یک طرح بازرسی دلخواه و از

این به‌بعد ثابت و $J(I)=(j(I)_n)_{n=0}^{m(I)}$ دنباله‌ی مراحل متناظر باآن در مدل‌برنامه‌ریزی پویای تصادفی باشد. در مرحله‌ی n اُم، فضای تصمیم مربوط به‌تصمیمات نوع‌دوم وابسته‌به‌این طرح بازرسی، به‌صورت $\mathbb{A}=\{0,1,...,l_{I,n}\}$ می‌باشد که‌در آن $l_{I,n}=j(I)_n-j(I)_{n-1}$. تصمیم صفر بدان‌معناست که‌بعداز اجرای بازرسی، تصمیم به‌اجرای نت-پیشگیرانه گرفته نشود، تصمیم $a\in\mathbb{A}$ بدان‌معناست که در a اُمین دوره‌بین بازرسی فعلی و بازرسی بعدی، نت-پیشگیرانه اجراءشود.

**جزء چهارم (ماتریس احتمال انتقال)**

همان‌طور که‌گفته‌شد در مسأله‌ی ما فرض برآن‌است‌که فرایند زوال ماشین، یک فرایند مارکف همگن زمان‌پیوسته با فضای حالت گسسته‌ی $\mathbb{S}=\{0,1,...,N\}$ باشد که با $\mathcal{X}=(X_t:t\in[0,\infty))$ نمایش داده‌می‌شود. برای بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال فرایند، کافی است ماتریس نرخ انتقال حالت را داشته‌باشیم. این ماتریس با $Q$ نمایش داده‌می‌شود و به‌صورت‌زیر تعریف‌می‌شود:

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

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

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

که‌درآن $q_{ss'}$ نرخ انتقال ازحالت s به‌حالت $s'$ می‌باشد. به علاوه، فرض‌می‌شود ماتریس $Q$ در شرایط زیر صدق‌کند:

**شرط ۱:** نرخ انتقال ازیک حالت به‌یک حالت بهتر صفر است. زیرا در فرایند زوال ماشین، بدون اجرای عملیات نت وضعیت ماشین بهبودنمی‌یابد. به‌زبان ریاضی داریم:

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

**شرط ۲:** همان‌طور که ماشین رو به زوال می‌رود، نرخ انتقال آن به وضعیت‌های بدتر افزایش می‌یابد. به‌بیان ریاضی داریم:

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

اکنون با استفاده از برابری‌چاپمن-کولموگوروف[۶] می‌توان ماتریس‌های احتمال انتقال فرایند را بدست‌آورد. فرض کنید ماتریس احتمال انتقال فرایند، بعد از گذشت یک دوره‌ی زمانی به‌طول T و درصورت عدم اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه با $P_0$ و درصورت اجرای عملیات نت پیشگیرانه درابتدای دوره با $P_1$ نشان‌داده‌شود، لذا داریم:

$$P_0=e^{QT} \qquad (۴)$$

$$P_1=R\times P_0=R\times e^{QT} \qquad (۵)$$

که در آن R به‌صورت‌زیر تعریف می‌شود:

$$R=[r_{ss'}]_{(N+1)\times(N+1)}$$
$$r_{ss'}=\Pr(X_{0^+}=s'\mid X_0=s,a=1)$$

اما چون در مسأله‌ی ما فرض‌شده‌است که ماشین بعداز اجرای عملیات نت‌پیشگیرانه بلافاصله به‌وضعیت صفر بر گردد، لذا داریم:

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

**جزء پنجم (هزینه‌ی بین دو بازرسی متوالی)**

فرض کنید $\bar{C}_l(s,a)$ هزینه بین دو بازرسی متوالی باشد به‌طوری‌که در بازرسی فعلی ماشین در وضعیت s باشد و فاصله‌ی بین دو بازرسی، l دوره‌ی زمانی باشد و تصمیم گرفته‌شود در دوره‌ی a اُم آن، نت‌پیشگیرانه اجراءشود، که در آن $l=1,\ldots,K$ و $a=0,\cdots,l$. برای محاسبه‌ی $\bar{C}_l(s,a)$ از روابط (۶-۸) استفاده می‌شود. در این‌روابط، $T_{A1}(s,b)$، $T_{A2}(s,b)$ و $r(s,b)$ به‌صورت‌زیر محاسبه می‌شوند:

$$T_{A1}(s,b)=T-t_{ins}-bt_{pm}(s),\qquad b\in\{0,1\}$$
$$T_{A2}(s,b)=T-bt_{pm}(s),\qquad b\in\{0,1\}$$
$$r(s,b)=\begin{cases}r(s) & b=0\\ r(0) & b=1\end{cases}$$

به‌علاوه، در یک‌عبارت علامتِ + بالای پرانتز بدان معناست که اگر داخل پرانتز مثبت باشد، مقدارآن عبارت با مقدار داخل پرانتز برابراست و در غیراین‌صورت آن عبارت مقدار صفر می‌گیرد. $\beta_h$، یک تابع نشانگر است که‌به‌صورت زیر تعریف‌می‌شود:

$$\beta_h:\{h,\cdots,K\}\to\{0,1\}$$
$$\beta_h(l)=\begin{cases}0 & l=h\\ 1 & l\geq h+1\end{cases}$$

نقش این تابع در روابط (۶-۸) آن‌است‌که، تحت شرایطی، عبارتی از رابطه‌باید حذف‌شود، برای مثال در رابطه‌ی (۶)، چنانچه فاصله‌ی بین دو بازرسی متوالی یک دوره باشد، رابطه‌ی (۶) به شکل زیر در می‌آید:

$$\bar{C}_l(s,\cdot)=c_{ins}+h[c_{\max}-T_{A_1}(s,\cdot)r(s,\cdot)]^+ + \beta_1(l)\sum_{w=1}^{l-1}\rho^w\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^w)_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}\quad (l\in\{1,\cdots,K\},s\in\mathbb{S}) \tag{۶}$$

$$\bar{C}_l(s,1)=c_{ins}+c_{pm}(s)+h[c_{\max}-T_{A_1}(s,1)r(s,1)]^+ + \beta_1(l)\sum_{w=1}^{l-1}\rho^w\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_1P_\cdot^{w-1})_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}\quad (l\in\{1,\cdots,K\},s\in\mathbb{S}) \tag{۷}$$

$$\bar{C}_l(s,a)=c_{ins}+h[c_{\max}-T_{A_1}(s,\cdot)r(s,\cdot)]^+ + \beta_2(a)\sum_{w=1}^{a-2}\rho^w\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^w)_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\} + \rho^{a-1}\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^{a-1})_{s,s'}\{c_{pm}(s')+h[c_{\max}-T_{A_2}(s',1)r(s',1)]^+\}\}+ \beta_a(l)\sum_{w=a}^{l-1}\rho^w\sum_{k=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^{a-1}P_1P_\cdot^{w-a})_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}\quad (a\in\{2,\cdots,K\},l\in\{a,\cdots,K\},s\in\mathbb{S}) \tag{۸}$$

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 نت پیشگیرانه در این فاصله اجراء نشود. اجزای این رابطه‌در جدول ۲ توضیح داده‌شده 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 |
| $\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^w)_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}$ |
| متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$اُم 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 نت پیشگیرانه در دوره‌ی اول فاصله‌ی بین دوبازرسی اجرا 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 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 |
| $h[c_{\max}-T_{A_1}(s,1)r(s,1)]^+$ |
| هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی |
| $\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_1P_\cdot^{w-1})_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}$ |
| متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$اُم 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 |
| $h[c_{\max}-T_{A_1}(s,1)r(s,1)]^+$ |
| هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی |
| $\sum_{s'=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^w)_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}$ |
| متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$اُم بین دو بازرسی متوالی قبل از اجرای نت‌پیشگیرانه |
| $\{(P_\cdot^{a-1})_{s,s'}\{c_{pm}(s')+h[c_{\max}-T_{A_2}(s',1)r(s',1)]^+\}\}$ |
| متوسط مجموع هزینه‌های نت‌پیشگیرانه و تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $a$اُم بین دو بازرسی متوالی |
| $\sum_{k=\cdot}^{N}\{(P_\cdot^{a-1}P_1P_\cdot^{w-a})_{s,s'}h[c_{\max}-T_{A_2}(s',\cdot)r(s',\cdot)]^+\}$ |
| متوسط هزینه‌ی تولید از دست‌رفته در دوره‌ی $(w+1)$اُم بین دو بازرسی متوالی بعد از اجرای نت‌پیشگیرانه |

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

در این‌بخش با توجه‌به‌تعریف اجزای معادله‌ی بهینگی و برای هرطرح بازرسی، یک معادله‌ی بهینگی ساخته‌می‌شود. بدین‌منظور فرض‌کنید $I=(i_k)_{k=0}^{K}$ یک طرح بازرسی دلخواه و ازاین‌به‌بعد ثابت و $J(I)=(j(I)_n)_{n=0}^{m(I)}$ دنباله‌ی مراحل متناظر باآن‌باشد، در این‌صورت، رابطه‌ی (۹)، معادله‌ی بهینگی مدل اول را نشان می‌دهد.

$$V_{j(I)_n}(s)=\min_{a\in\{0,1,\ldots,l_{I,n}\}}\{\bar{C}_{l_{I,n}}(s,a)+ \rho^{l_{I,n}}\sum_{s'=0}^{N}(\mathcal{P}(a))_{s,s'}V_{j(I)_{n-1}}(s')\} \quad (9)$$
$$(n=1,\ldots,m(I))$$

که‌درآن،

$$l_{I,n}=j(I)_n-j(I)_{n-1},\ V_{j(I)_0}(s)=0\ \ (\forall s\in\mathbb{S})$$

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

$$\mathcal{P}(a)=\begin{cases}P^{l_{I,n}} & a=0\\ P^{a-1}P_1P^{l_{I,n}-a} & a\in\{1,2,\cdots,l_{I,n}\}\end{cases}.$$

### ۳-۴- ارائه‌ی مدل دوم به‌منظور درنظرگرفتن تقاضا

در این‌بخش با توسعه‌ی مدل اول، تقاضای غیرقطعی به مدل اضافه‌شده‌است. مدل توسعه‌یافته نیز در قالب برنامه ریزی پویای تصادفی ساخته‌شده‌است. در تعریف اجزای معادله‌ی بهینگی، مرحله، متغیر تصمیم و ماتریس احتمال انتقال مشابه مدل اول تعریف‌شده‌است. اما متغیر حالت مسأله به‌زوج مرتب $(s,z)\in\mathbb{S}\times\mathcal{R}_\Delta$ تغییریافته‌است، که درآن s وضعیت ماشین و z وقوع متغیر تصادفی $\Delta$ (تقاضا) در دوره‌ی اول بین دو بازرسی متوالی می‌باشد. هزینه‌ی‌بین دو بازرسی متوالی در مدل توسعه‌یافته با $\bar{C}_l(s,z,a)$ نمایش داده‌می‌شود و ازروابط (۱۰) تا (۱۲) بدست می‌آید. در این‌روابط در دوره‌ی اول، تقاضای معلوم z جایگزین $c_{max}$ و در دوره‌های بعد $\delta$ جایگزین آن‌شده و امید ریاضی مربوط محاسبه‌شده‌است.

$$\bar{C}_l(s,z,0)=c_{ins}+h[z-T_{A_1}(s,0)r(s,0)]^+ + \beta_1(l)\sum_{w=1}^{l-1}\rho^w\sum_{s'=0}^{N}(P^w)_{s,s'}\sum_{\delta\in\mathcal{R}_\Delta} \{g_\Delta(\delta)h[\delta-T_{A_2}(s',0)r(s',0)]^+\} \quad (10)$$
$$(l\in\{1,\cdots,K\},s\in\mathbb{S},z\in\mathcal{R}_\Delta)$$

$$\bar{C}_l(s,z,a)=c_{ins}+h[z-T_{A_1}(s,0)r(s,0)]^+ + \beta_2(a)\sum_{w=1}^{a-2}\rho^w\sum_{s'=0}^{N}(P^w)_{s,s'} \sum_{\delta\in\mathcal{R}_\Delta}g_\Delta(\delta)h[\delta-T_{A_2}(s',0)r(s',0)]^+ + \rho^{a-1}\sum_{s'=0}^{N}(P^{a-1})_{s,s'} \sum_{\delta\in\mathcal{R}_\Delta}g_\Delta(\delta)\{c_{pm}(s')+h[\delta-T_{A_2}(s',1)r(s',1)]^+\}+ \beta_a(l)\sum_{w=a}^{l-1}\rho^w\sum_{k=0}^{N}(P^{a-1}P_1P^{w-a})_{s,s'} \sum_{\delta\in\mathcal{R}_\Delta}g_\Delta(\delta)h[\delta-T_{A_2}(s',0)r(s',0)]^+ \quad (12)$$
$$(a\in\{2,\cdots,K\},l\in\{a,\cdots,K\},s\in\mathbb{S},z\in\mathcal{R}_\Delta)$$

اکنون که اجزای معادله‌ی بهینگی مشخص شد، معادله‌ی بهینگی مدل توسعه‌یافته با تغییراتی از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید. این‌معادله در رابطه‌ی (۱۳) نشان‌داده‌شده است.

$$V_{j(I)_n}(s,z)=\min_{a\in\{0,1,\ldots,l_{I,n}\}}\{\bar{C}_{l_{I,n}}(s,z,a)+ \rho^{l_{I,n}}\sum_{s'=0}^{N}\sum_{\delta\in\mathcal{R}_\Delta}(\mathcal{P}(a))_{s,s'}g_\Delta(\delta)V_{j(I)_{n-1}}(s',\delta)\} \quad (13)$$
$$(n=1,\ldots,m(I))$$

که درآن، $V_{j(I)_0}(s,z)=0(\forall s\in\mathbb{S},\ z\in\mathcal{R}_\Delta)$. به‌علاوه $(\mathcal{P}(a))_{s,s'}$ و $l_{I,n}$ همان‌است‌که در ذیل رابطه‌ی (۹) تعریف‌شده‌است.

## ۴- روش حل پیشنهادی

در این‌تحقیق به‌دلیل‌آنکه بازرسی‌ها متغیر تصمیم هستند متناظر با هرطرح بازرسی یک معادله‌ی بهینگی وجود دارد که با روش رایج حل مدل‌های برنامه‌ریزی پویای تصادفی با افق متناهی قابل‌حل است. روش رایج از مقدار اولیه‌ی معادله‌ی بهینگی شروع می‌کند و با استفاده از معادله‌ی بهینگی که یک معادله‌ی برگشتی رو به عقب است بعداز تعدادی متناهی تکرار (به‌تعداد مراحل) خاتمه و جواب بهینه بدست می‌آید. الگوریتم پیشنهادی درواقع همان روش رایج است که به‌تعداد طرح‌های بازرسی ممکن تکرار می‌شود و در هرتکرار مقداربهینه و تصمیم نت‌پیشگیرانه ی‌متناظر با آن ذخیره می‌شود و درآخر بین تمام جواب های ذخیره شده جواب باکمترین مقدار استخراج می‌گردد.

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 ارائه‌شده‌است. قبل از ورودبه گام‌های اصلی مقادیر $\bar{C}_l(s,a)$ برای مدل اول و مقادیر $\bar{C}_l(s,z,a)$ برای مدل دوم، در حوزه‌ی تعریفشان محاسبه و ذخیره می‌شود. مقادیر $\bar{C}_l(s,a)$ در معادله‌ی بهینگی مدل اول (رابطه‌ی (۹)) و مقادیر $\bar{C}_l(s,z,a)$ در معادله‌ی بهینگی مدل دوم (رابطه‌ی (۱۳)) ایفای نقش می‌کند. به‌منظور راحتی در تشریح الگوریتم، نماد $\zeta$ برای متغیر حالت سیستم در هر دومدل انتخاب‌شده‌است. لذا چنانچه از الگوریتم زیر برای حل مدل‌اول استفاده شود، $\zeta = s$ و چنانچه ازآن برای حل مدل‌دوم استفاده شود، $\zeta = (s,z)$.

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

**گام ۲:** دنباله‌ی مراحل متناظر با $I = (i_k)_{k=.}^{K}$ باروشی‌که در مثال ۱ توضیح‌داده‌شد، تشکیل و $J(I) = (j(I)_n)_{n=.}^{m(I)}$ نامیده‌می‌شود.

**گام ۳:** به‌ازای هرحالت $\zeta$ بااستفاده از معادله‌ی بهینگی مربوط (رابطه‌ی (۹) برای مدل‌اول و رابطه‌ی (۱۳) برای مدل‌دوم) مقدار بهینه‌ی $V^*_{j(I)_{m(I)}}(\zeta)$ محاسبه و تصمیم بهینه‌ی متناظر باآن $a_I{}^*(\zeta)$ نامیده می‌شود. درواقع $a_I{}^*(\zeta)$، تصمیمات بهینه‌درمورد اجرای نت‌پیشگیرانه‌در فاصله‌ی بین بازرسی‌های متوالی به‌ازای طرح بازرسی I است درصورتی‌که‌درزمان بازرسی اول حالت سیستم $\zeta$ باشد.

بعد ازاینکه گام‌های ۲ و ۳ برای تمام طرح‌های بازرسی ممکن اجراشد، گام ۴ به‌منظور پیداکردن طرح بازرسی بهینه‌وقتی‌که‌در زمان بازرسی اول حالت سیستم $\zeta$ باشد اجراءمی‌شود.

**گام ۴:** به‌ازای هرحالت $\zeta$، طرح بازرسی‌ای که‌کمترین مقدار $V^*_{j(I)_{m(I)}}(\zeta)$ را دارد، به‌عنوان طرح بازرسی بهینه‌ی متناظر باحالت $\zeta$ در افق برنامه‌ریزی انتخاب و $I^* = \left(i_k^*\right)_{k=.}^{K}$ نامیده‌می‌شود. به‌ازای هرحالت $\zeta$، برای طرح بازرسی بهینه‌ی $I^*$، $a_{I^*}{}^*(\zeta)$ تصمیم بهینه در مورد زمان اجرای نت‌پیشگیرانه در فاصله‌ی بین بازرسی‌های متوالی را مشخص می‌کند.

## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج عددی

### ۵-۱- کاربرد مدل‌پیشنهادی در توربین‌بادی

در این‌بخش به‌منظور تجزیه و تحلیل استراتژی مدل پیشنهادی، کاربردی ازآن جهت استفاده در توربین‌های بادی بر مبنای کار ارائه شده در [۲۲] بیان شده است. یک توربین بادی وسیله‌ای‌است‌که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در مطالعه‌ی ما یک توربین بادی به‌عنوان یک ماشین و انرژی الکتریکی حاصل از آن به عنوان تک‌محصول آن درنظرگرفته شده است. مقدار انرژی الکتریکی تولید شده توسط یک توربین‌بادی به عوامل متعددی اعم از خارجی مثل سرعت و جهت باد و داخلی مثل وضعیت سلامت اجزای تشکیل‌دهنده‌ی توربین بستگی‌دارد. به‌عنوان‌نمونه در بررسی عوامل‌خارجی، در [۲۳] یک مدل‌تحلیلی جهت تعیین‌اثرات پارامترهای توربین‌بادی و مشخصه‌ی احتمالی سرعت باد بر میانگین گرهی قیمت بازار برق ارائه شده است.

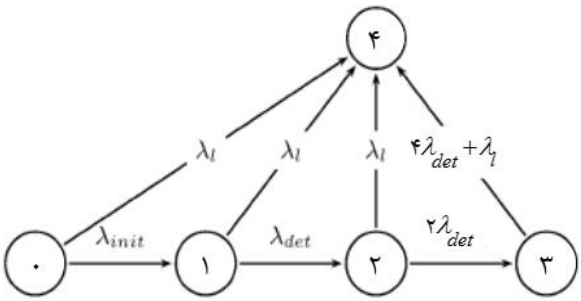
یکی‌از اجزای اصلی، گران و بزرگ توربین‌بادی پره‌های آن می‌باشد که وظیفه‌ی تبدیل انرژی‌جنبشی باد به انرژی مکانیکی را به‌عهده دارند و در بیشتر طراحی‌ها به‌شکل سه پره‌ای می‌باشد (شکل (۲)).

شکل (۲): توربین بادی سه‌پره‌ای

بررسی عوامل و علل نقص در پره‌ها در [۲۴] موردمطالعه قرارگرفته‌است. مهمترین نقص‌ها لایه‌لایه شدن پره‌ها و از بین‌رفتن اتصال بین رویه و هسته‌ی ساندویچ پنل می‌باشد، که‌منشاء هردو فرسایش به‌دلیل تولید و یا اصابت

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

فرایند زوال پره‌های توربین در این مطالعه یک فرایند مارکفی زمان پیوسته مطابق شکل (۳) در نظرگرفته شده است، که درآن علاوه بر زوال تدریجی خرابی‌های ناگهانی هم دیده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، برای پره‌های توربین ۵ وضعیت سلامت از ۰ تا ۴ درنظر گرفته شده که فضای حالت ماشین را تشکیل می‌دهد ($\mathbb{S}=\{۰,۱,۲,۳,۴\}$). حالت نو با ۰ و حالت ۴ بیانگر خرابی کامل‌است. حالت‌های ۱، ۲ و ۳ حالت‌های میانی هستند که هریک درجه‌ای از خرابی را دارند. برای مثال حالت ۱ درجه-ای از خرابی را نشان می‌دهد که با روش‌های تزریق می‌توان پره را ترمیم‌کرد. درحالی‌که حالت ۳ درجه‌ای از خرابی را نشان می‌دهد که با روش‌های وصله‌کردن به‌حالت ۰ تبدیل می‌شود.




شکل (۳): فرایند زوال توربین بادی

به‌علاوه نرخ انتقال آغازین از حالت ۰ به ۱ که با $\lambda_{init}$ نمایش داده‌می‌شود مساوی یک فرض شده‌است و چون تأثیر زیادی درجواب‌ها دارد حساسیت متوسط مجموع هزینه‌ی بازرسی و نت نسبت به‌آن دربخش [۵-۲] آمده است. همچنین نرخ وقوع خرابی‌های ناگهانی که با $\lambda_l$ نمایش داده می‌شود ۰/۰۱ فرض شده‌است. برای نرخ‌های انتقال از ۱ به ۲ ($\lambda_۲$) و ۲ به ۳ ($\lambda_۳$) و ۳ به ۴ ($\lambda_۴$) یک روند افزایشی نمایی با ضریب دلخواه (دراینجا ۲) فرض شده است. این فرض به-این‌دلیل‌است که طول یک ترک به‌عنوان تابعی از زمان به-طورکلی محدب‌است. به‌علاوه به‌دلیل مارکفی‌بودن فرایند زوال، زمان توقف درهرحالت از توزیع نمایی تبعیت می‌کند. در اینجا متوسط زمان تا خرابی کامل که از زوال تدریجی حادث می‌شود با $T_{crack}$ نمایش‌داده و مساوی ۱ سال فرض-شده‌است. البته باتوجه به‌عدم قطعیت‌های زیاد مربوط به‌آن، تحلیل حساسیتی دراین‌خصوص دربخش [۵-۲] آمده است. لذاداریم:

$$\lambda_۲ = ۲^۰\lambda_{\det} = \lambda_{\det},\ \lambda_۳ = ۲^۱\lambda_{\det} = ۲\lambda_{\det},\ \lambda_۴ = ۲^۲\lambda_{\det} = ۴\lambda_{\det}$$

و بدین‌ترتیب به‌کمک رابطه‌ی زیر می‌توان مقدار $\lambda_{\det}$ و در-نتیجه سایر نرخ‌های انتقال را بدست‌آورد:

$$\frac{۱}{\lambda_۲}+\frac{۱}{\lambda_۳}+\frac{۱}{\lambda_۴}=T_{crack}\ \Rightarrow$$

$$\frac{۱}{\lambda_{\det}}+\frac{۱}{۲\lambda_{\det}}+\frac{۱}{۴\lambda_{\det}}=T_{crack}\ \Rightarrow \lambda_{\det}=\frac{۷}{۴T_{crack}}$$

به‌این‌ترتیب ماتریس نرخ انتقال حالت به‌صورت‌زیر بدست می‌آید که در روابط (۲) و (۳) به‌منظور رعایت شرط‌های ۱ و ۲ صدق می‌کند.

$$Q=\begin{bmatrix} -(\lambda_{init}+\lambda_l) & \lambda_{init} & ۰ & ۰ & \lambda_l \\ ۰ & -(\lambda_{\det}+\lambda_l) & \lambda_{\det} & ۰ & \lambda_l \\ ۰ & ۰ & -(۲\lambda_{\det}+\lambda_l) & ۲\lambda_{\det} & \lambda_l \\ ۰ & ۰ & ۰ & -(۴\lambda_{\det}+\lambda_l) & ۴\lambda_{\det}+\lambda_l \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -۱/۰۱ & ۱ & ۰ & ۰ & ۰/۰۱ \\ ۰ & -۱/۷۶ & ۱/۷۵ & ۰ & ۰/۰۱ \\ ۰ & ۰ & -۳/۵۱ & ۳/۵۰ & ۰/۰۱ \\ ۰ & ۰ & ۰ & -۷/۰۱ & ۷/۰۱ \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۰ \end{bmatrix}$$

بعلاوه، ماتریس‌های انتقال یک‌مرحله‌ای درصورت عدم-اجرای نت‌پیشگیرانه و درصورت اجرای آن، با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه و در روابط (۱۴) و (۱۵) نشان‌داده شده است. توربین بادی مورد بررسی در این مطالعه به‌طور متوسط ۲ مگاوات در سال برق تولید می‌کند مشروط بر این‌که در بهترین وضعیت سلامت خود یعنی درحالت ۰ باشد. نرخ تولید ماهیانه توربین به‌صورت خطی و نسبت به

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

$$P_1=\begin{bmatrix} ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \\ ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \\ ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \\ ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \\ ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

$$P_2=\begin{bmatrix} ۰/۸۴۵۱ & ۰/۱۱۵۲ & ۰/۰۲۶۲ & ۰/۰۰۶۹ & ۰/۰۰۶۶ \\ ۰ & ۰/۵۵۷۱ & ۰/۲۴۶۲ & ۰/۰۹۲۸ & ۰/۱۰۳۹ \\ ۰ & ۰ & ۰/۳۱۰۹ & ۰/۲۱۴۱ & ۰/۴۷۵۰ \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۰/۰۹۶۸ & ۰/۹۰۳۲ \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

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

| $s$ | ۰ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | واحد |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $c_{pm}$ | ۰ | ۳۵۰۰ | ۳۵۰۰۰ | ۳۹۰۰۰۰ | ۴۴۰۴۰۰ | یورو |
| $t_{pm}$ | ۰ | ۰/۵ | ۱ | ۱/۵ | ۲ | روز |
| $r$ | ۱۶۶ | ۱۲۴/۵ | ۸۳ | ۴۱/۵ | ۰ | کیلووات در ماه |

هزینه‌ی اجرای بازرسی، مطابق با بازرسی مبتنی بر شرایطی که نیازمند نصب تجهیزات است به‌ترتیب برابر با $c_{ins}=۲۰۰۰۰$ و $t_{ins}=۰/۵$ و هزینه‌ی هر واحد تولید از دست‌رفته $h=۲۴۰۰$ در نظر گرفته شده است. تمام این پارامترها از مرجع [۲۲] استخراج شده است. افق برنامه ریزی متشکل از $K=۶$ دوره‌ی زمانی هریک به‌طول $T=۳۰$ روز و ضریب تنزیل $\rho=۰.۹$ در نظر گرفته‌شده است. باتوجه به‌این‌که در مدل دوم تقاضا می‌تواند هر توزیع گسسته‌ی دلخواهی داشته‌باشد در این‌مطالعه‌جدول توزیع تقاضا مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده است و واحد آن کیلووات در ماه است.

جدول (۶): جدول توزیع احتمال تقاضا

| $\delta$ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ |
|---|---|---|---|---|
| $g_\Delta(\delta)$ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ |

هدف از حل هردو مدل، پیداکردن طرح بازرسی بهینه در افق برنامه‌ریزی و همچنین زمان بهینه برای اجرای نت پیشگیرانه با توجه‌به‌حالت 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] پیاده-سازی و حل شده است. نتایج نشان می‌دهد طرح بازرسی بهینه درمدل اول و دوم، ترکیبی از دو طرح $I_{11}=(۱,۰,۱,۰,۱,۰,۱)$ و $I_{21}=(۱,۱,۱,۰,۰,۱,$ می‌باشد، به‌این 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) یکی‌از حالت‌هایی‌باشد که در جدول ۷ با رنگ سفید مشخص شده-است و طرح بازرسی $I_{21}$ برای مدل‌های اول و دوم زمانی بهینه‌است که در زمان اولین بازرسی، حالت سیستم یکی‌از حالت‌هایی باشد که با رنگ خاکستری مشخص شده است. بنابراین طرح بازرسی بهینه به‌حالت سیستم در ابتدای افق برنامه‌ریزی وابسته است. به‌علاوه، تصمیمات بهینه‌ی مربوط‌به زمان اجرای نت‌پیشگیرانه به‌حالت سیستم در لحظه‌ی بازرسی وابسته است که برای مدل اول و دوم به-ترتیب در جداول ۸-۹ نشان داده شده است. همان‌طورکه در جدول ۸ مشاهده می‌شود، چنانچه در ابتدای افق برنامه-ریزی (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 نت‌پیشگیرانه 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 به‌اجرای نت-پیشگیرانه در یک‌دوره بعد ($a=۲$) یعنی ابتدای دوره‌ی دوم گرفته می‌شود، در بازرسی‌های دوم و سوم، اگر حالت سیستم ۰ باشد، نت‌پیشگیرانه در یک دوره بعد از بازرسی یعنی در دوره ۴ و ۶ و در بقیه‌ی حالات نت‌پیشگیرانه در-همان دوره‌ی بازرسی ($a=۱$) یعنی در دوره‌ی ۳ و ۵ باید اجرا گردد. اما همان‌طورکه در جدول ۹ نشان داده شده

است، در مدل دوم زمان بهینه برای نت‌پیشگیرانه به‌تقاضا نیز وابسته است. مثلاً اگر حالت سیستم در بازرسی اول (۰،۵۰) باشد، تصمیم $a=۲$ بهینه‌است و این بدان معنا است که نت‌پیشگیرانه باید در دومین دوره از دوره‌هایی که بین زمان بازرسی اول و دوم قرارمی‌گیرد (دوره‌ی دوم)، اجراء شود. سپس وقتی به ابتدای دوره‌ی سوم رسیدیم، بسته به حالت سیستم، نت‌پیشگیرانه در همان دوره‌ی بازرسی($a=۱$) یا یک‌دوره بعد از آن ($a=۲$) 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 شده‌است وجود دارد. پس به طورخلاصه می‌توان گفت، در فاز اجرا، 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 اجرا 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 حساب‌آوردن مدت زمان مورد نیاز برای اجرای عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه توسعه داده‌شده‌است. لذا به‌منظور اعتبارسنجی، در وهله‌ی-اول هر یک از مدل‌های پیشنهادی با شرایط مدل پایه حل-شده‌است. بدین‌منظورمدل‌های ۱ و۲ با فرض $t_{pm}=۰$، $t_{ins}=۰$ و $c_{ins}=۰$ حل شده‌اند. همان‌طورکه نتایج جدول (۱۰) نشان می‌دهد، به‌ازای همه‌ی حالت‌های سیستم، بهینگی وقتی رخ می‌دهد که‌طرح بازرسی $I_{۲۲}=(۱,۱,۱,۱,۱,۱,۱)$ انتخاب شود و در هر دوره بازرسی صورت‌گیرد. همچنین هزینه‌ی‌کل، نسبت‌به تقاضا و حالت ماشین نانزولی است و سیاست نت‌پیشگیرانه از نوع حد-آستانه‌ای است، یعنی به‌ازای یک مقدار ثابت از تقاضا، اگر وضعیت ماشین از یک‌حدی بدتر باشد، نت‌پیشگیرانه باید اجرا شود و این حد آستانه‌ای نسبت به تقاضا نانزولی‌است، و به‌ازای یک‌مقدار ثابت از وضعیت ماشین، اگر تقاضا از یک حدی بدترباشد، نت‌پیشگیرانه باید اجرا شود و این حد-آستانه‌ای نسبت‌به وضعیت ماشین نانزولی است، و این یعنی مدل ما به‌عنوان توسعه‌ای از مدل پایه، در شرایط مشابه نتایج یکسان به‌همراه دارد. اما به‌منظور اعتبار سنجی مدل در شرایطی که $t_{pm}\neq۰$، $t_{ins}\neq۰$ و $c_{ins}\neq۰$، حساسیت هزینه‌ی کل نسبت‌به هزینه‌ی هر واحد بازرسی ($c_{ins}$) و بافرض ثابت‌بودن سایر پارامترها بررسی‌شده‌است. بدین منظور به‌ازای 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 نمایشِ در یک-نگاهِ نتایج، برای هر طرح یک‌رنگ انتخاب شده است. در این جدول، هزینه‌ی کل بدست آمده ازحل هردو مدل به‌ازای دو استراتژی مختلف مقایسه شده است. استراتژی اول، استراتژیِ بازرسی در هردوره است که متناظر با جواب بدست‌آمده از حل مدل‌ها با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش [۴] به‌ازای طرح بازرسی $I_{۲۲}$ می‌باشد. استراتژی دوم، استراتژی تصمیم‌گیری در خصوص بازرسی‌ها است و به‌منظور دستیابی به آن هریک از مدل‌ها باید به‌ازای تمام طرح‌های بازرسی ممکن با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش [۴] حل و طرح بازرسی بهینه استخراج شود. نتایج نشان‌می‌دهد وقتی $c_{ins}$ مساوی صفر است، استراتژی اول و دوم نتایج یکسانی دارند. اما وقتی $c_{ins}$ مثبت است، طرح بازرسی $I_{۲۲}$ به‌ازای برخی یا هیچ‌یک‌از حالات سیستم بهینه نیست و این یعنی چنانچه بازرسی هزینه داشته باشد، استراتژی اول در هیچ‌یک از مدل‌ها منجر به بهینگی نمی-شود و این موضوع، اهمیت برنامه‌ریزی همزمان بازرسی‌ها و نت‌پیشگیرانه را درشرایط مسأله نشان‌می‌دهد.

جدول (۷): افراز 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) | (۱,۵۰) | (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) |

جدول (۸): زمان بهینه‌برای اجرای نت‌پیشگیرانه در مدل اول

| $a^*_{I_{11}}(s)$ | زمان‌های بازرسی مطابق طرح بازرسی $I_{11}$ | | | $a^*_{I_{21}}(s)$ | زمان‌های بازرسی مطابق طرح بازرسی $I_{21}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **S** | دوره‌ی ۱ | دوره‌ی ۳ | دوره‌ی ۵ | **S** | دوره‌ی ۱ | دوره‌ی ۲ | دوره‌ی ۴ |
| ۰ | ۲ | ۲ | ۲ | ۰ | | ۲ | ۲ |
| ۱ | | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۲ | | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۳ | | ۱ | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۴ | | ۱ | ۱ | ۴ | ۱ | ۱ | ۱ |

جدول (۹): زمان بهینه‌برای اجرای نت‌پیشگیرانه در مدل دوم

| $a^*_{I_{11}}(s,z)$ | زمان‌های بازرسی مطابق طرح بازرسی $I_{11}$ | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | دوره‌ی ۱ | | | | دوره‌ی ۳ | | | | دوره‌ی 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 |
| ۲ | | | | | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۳ | | | | | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۴ | | | | | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| $a^*_{I_{21}}(s,z)$ | زمان‌های بازرسی مطابق طرح بازرسی $I_{21}$ | | | | | | | | | | | |
| | دوره‌ی ۱ | | | | دوره‌ی ۲ | | | | دوره‌ی ۴ | | | |
| | **z** | | | | | | | | | | | |
| **S** | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ |
| ۰ | | | | | 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 هزینه‌ی کل حاصل از حل مدل پیشنهادی با فرض $t_{pm}=۰$، $t_{ins}=۰$ و $c_{ins}=۰$

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

جدول (۱۱). مقایسه‌ی هزینه‌ی کل بدست‌آمده از مدل اول و دوم به‌ازای استراتژی اول و دوم و حساسیت آن نسبت‌به ( $c_{ins}$ )

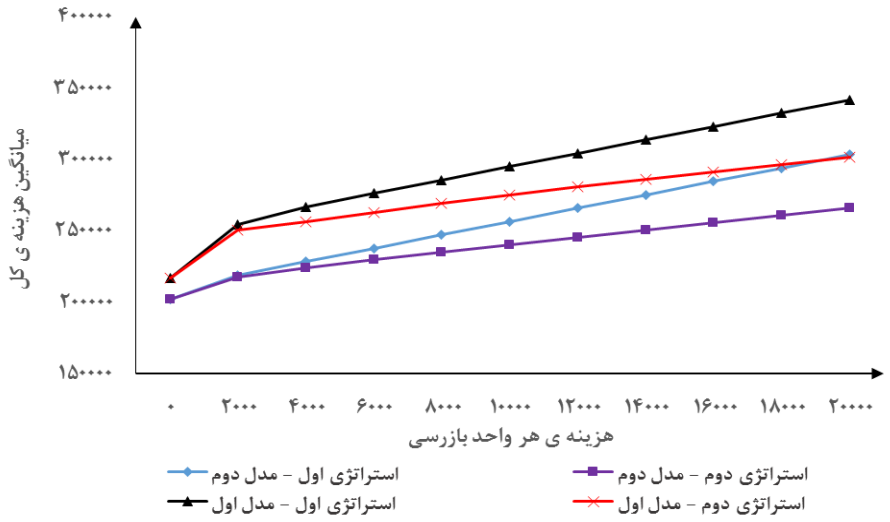
| $I_{۲۱}=(۱,۱,۰,۱,۰,۰,۱)$ | $I_{۲۲}=(۱,۱,۰,۱,۰,۱,۱)$ | $I_{۳۲}=(۱,۱,۱,۱,۱,۱,۱)$ |
|---|---|---|
| $I_{۲۳}=(۱,۱,۰,۱,۱,۰,۱)$ | $I_{۱۴}=(۱,۰,۱,۱,۰,۱,۱)$ | $I_{۳۰}=(۱,۱,۱,۱,۱,۰,۱)$ | $I_{۱۱}=(۱,۰,۱,۰,۱,۰,۱)$ |

| $c_{ins}$ | s | هزینه کل متناظر با استراتژی اول: مدل ۲ z=۵۰ | z=۱۰۰ | z=۱۵۰ | z=۲۰۰ | مدل ۱ میانگین | هزینه کل متناظر با استراتژی دوم: مدل ۲ z=۵۰ | z=۱۰۰ | z=۱۵۰ | z=۲۰۰ | مدل ۱ 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 | ۲۱۹۰۴۹ | | | | 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 | ۲۲۸۵۱۷ | | | | 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 | ۲۳۷۸۸۹ | | | | 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 | ۷۲۳۹۴ |
| | ۱ | ۷۲۰۰۰ | ۷۲۰۰۰ | ۷۲۰۰۰ | ۸۵۲۸۰ | ۱۰۸۸۴۷ | ۶۱۲۸۷ | ۶۱۲۸۷ | ۶۱۲۸۷ | ۷۴۵۶۷ | ۹۴۸۱۹ |
| | ۲ | ۱۰۳۵۰۰ | ۱۰۳۵۰۰ | ۱۰۳۵۰۰ | ۱۲۳۴۲۰ | ۱۴۶۹۸۷ | ۹۲۷۸۷ | ۹۲۷۸۷ | ۹۲۷۸۷ | ۱۱۲۷۰۷ | ۱۳۲۹۵۹ |
| | ۳ | ۴۵۸۵۰۰ | ۴۵۸۵۰۰ | ۴۵۸۵۰۰ | ۴۸۵۰۶۰ | ۵۰۸۶۲۷ | ۴۴۷۷۸۷ | ۴۴۷۷۸۷ | ۴۴۷۷۸۷ | ۴۷۴۳۴۷ | ۴۹۴۵۹۹ |
| | ۴ | ۵۰۸۹۰۰ | ۵۰۸۹۰۰ | ۵۰۸۹۰۰ | ۵۴۲۱۰۰ | ۵۶۵۶۶۷ | ۴۹۸۱۸۷ | ۴۹۸۱۸۷ | ۴۹۸۱۸۷ | ۵۳۱۳۸۷ | ۵۵۱۶۳۹ |
| | میانگین | ۲۴۷۲۶۰ | | | | ۲۸۵۷۶۷ | ۲۳۵۳۵۲ | | | | ۲۶۹۲۸۲ |
| | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | ۵/۸ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۴/۸ |

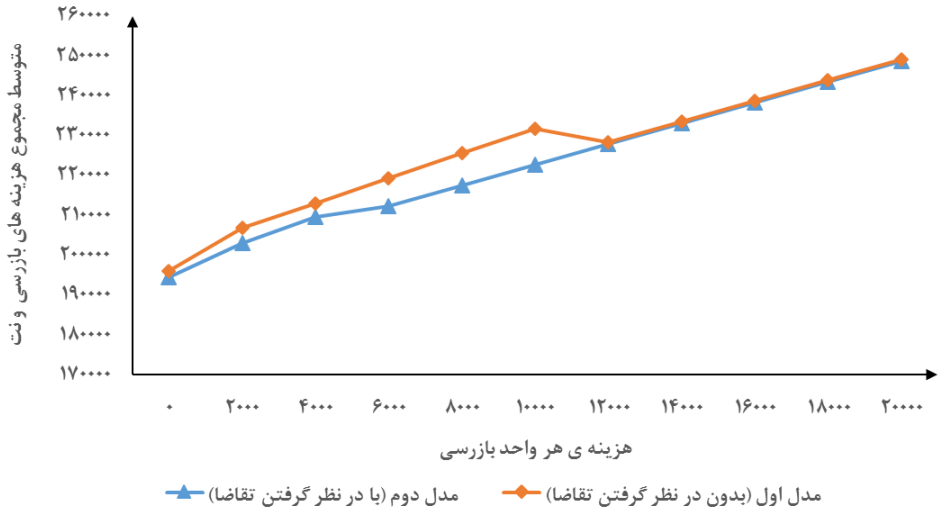
| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۷۷۳۲۶ | ۶۳۳۸۲ | ۵۶۷۴۲ | ۵۶۷۴۲ | ۵۶۷۴۲ | ۱۰۸۰۷۸ | ۸۴۵۱۱ | ۷۷۸۷۱ | ۷۷۸۷۱ | ۷۷۸۷۱ | ۰ | |
| ۱۰۱۳۸۹ | ۷۹۸۲۵ | ۶۶۵۴۵ | ۶۶۵۴۵ | ۶۶۵۴۵ | ۱۱۸۲۱۸ | ۹۴۶۵۱ | ۸۱۳۷۱ | ۸۱۳۷۱ | ۸۱۳۷۱ | ۱ | |
| ۱۳۹۵۲۹ | ۱۱۷۹۶۵ | ۹۸۰۴۵ | ۹۸۰۴۵ | ۹۸۰۴۵ | ۱۵۶۳۵۸ | ۱۳۲۷۹۱ | ۱۱۲۸۷۱ | ۱۱۲۸۷۱ | ۱۱۲۸۷۱ | ۲ | |
| ۵۰۱۱۶۹ | ۴۷۹۶۰۵ | ۴۵۳۰۴۵ | ۴۵۳۰۴۵ | ۴۵۳۰۴۵ | ۵۱۷۹۹۸ | ۴۹۴۴۳۱ | ۴۶۷۸۷۱ | ۴۶۷۸۷۱ | ۴۶۷۸۷۱ | ۳ | ۱۰۰۰۰ |
| ۵۵۸۲۰۹ | ۵۳۶۶۴۵ | ۵۰۳۴۴۵ | ۵۰۳۴۴۵ | ۵۰۳۴۴۵ | ۵۷۵۰۳۸ | ۵۵۱۴۷۱ | ۵۱۸۲۷۱ | ۵۱۸۲۷۱ | ۵۱۸۲۷۱ | ۴ | |
| ۲۷۵۵۲۵ | ۲۴۰۵۴۴ | | | | ۲۹۵۱۳۸ | ۲۵۶۶۳۱ | | | | میانگین | |
| ۶/۳ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۶/۶ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |
| ۸۲۲۵۸ | ۶۸۳۱۴ | ۶۱۶۷۴ | ۶۱۶۷۴ | ۶۱۶۷۴ | ۱۱۷۴۴۹ | ۹۳۸۸۲ | ۸۷۲۴۲ | ۸۷۲۴۲ | ۸۷۲۴۲ | ۰ | |
| ۱۰۶۸۵۹ | ۸۵۰۸۳ | ۷۱۸۰۳ | ۷۱۸۰۳ | ۷۱۸۰۳ | ۱۲۷۵۸۹ | ۱۰۴۰۲۲ | ۹۰۷۴۲ | ۹۰۷۴۲ | ۹۰۷۴۲ | ۱ | |
| ۱۴۴۹۹۹ | ۱۲۳۲۲۳ | ۱۰۳۳۰۳ | ۱۰۳۳۰۳ | ۱۰۳۳۰۳ | ۱۶۵۷۲۹ | ۱۴۲۱۶۲ | ۱۲۲۲۴۲ | ۱۲۲۲۴۲ | ۱۲۲۲۴۲ | ۲ | |
| ۵۰۶۶۳۹ | ۴۸۴۸۶۳ | ۴۵۸۳۰۳ | ۴۵۸۳۰۳ | ۴۵۸۳۰۳ | ۵۲۷۳۶۹ | ۵۰۳۸۰۲ | ۴۷۷۲۴۲ | ۴۷۷۲۴۲ | ۴۷۷۲۴۲ | ۳ | ۱۲۰۰۰ |
| ۵۶۳۶۷۹ | ۵۴۱۹۰۳ | ۵۰۸۷۰۳ | ۵۰۸۷۰۳ | ۵۰۸۷۰۳ | ۵۸۴۴۰۹ | ۵۶۰۸۴۲ | ۵۲۷۶۴۲ | ۵۲۷۶۴۲ | ۵۲۷۶۴۲ | ۴ | |
| ۲۸۰۸۸۷ | ۲۴۵۷۳۷ | | | | ۳۰۴۵۰۹ | ۲۶۶۰۰۲ | | | | میانگین | |
| ۷/۶ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۷/۸ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |
| ۸۷۱۹۰ | ۷۳۲۴۶ | ۶۶۶۰۶ | ۶۶۶۰۶ | ۶۶۶۰۶ | ۱۲۶۸۲۰ | ۱۰۳۲۵۳ | ۹۶۶۱۳ | ۹۶۶۱۳ | ۹۶۶۱۳ | ۰ | |
| ۱۱۲۱۱۷ | ۹۰۳۴۱ | ۷۷۰۶۱ | ۷۷۰۶۱ | ۷۷۰۶۱ | ۱۳۶۹۶۰ | ۱۱۳۳۹۳ | ۱۰۰۱۱۳ | ۱۰۰۱۱۳ | ۱۰۰۱۱۳ | ۱ | |
| ۱۵۰۲۵۷ | ۱۲۸۴۸۱ | ۱۰۸۵۶۱ | ۱۰۸۵۶۱ | ۱۰۸۵۶۱ | ۱۷۵۱۰۰ | ۱۵۱۵۳۳ | ۱۳۱۶۱۳ | ۱۳۱۶۱۳ | ۱۳۱۶۱۳ | ۲ | |
| ۵۱۱۸۹۷ | ۴۹۰۱۲۱ | ۴۶۳۵۶۱ | ۴۶۳۵۶۱ | ۴۶۳۵۶۱ | ۵۳۶۷۴۰ | ۵۱۳۱۷۳ | ۴۸۶۶۱۳ | ۴۸۶۶۱۳ | ۴۸۶۶۱۳ | ۳ | ۱۴۰۰۰ |
| ۵۶۸۹۳۷ | ۵۴۷۱۶۱ | ۵۱۳۹۶۱ | ۵۱۳۹۶۱ | ۵۱۳۹۶۱ | ۵۹۳۷۸۰ | ۵۷۰۲۱۳ | ۵۳۷۰۱۳ | ۵۳۷۰۱۳ | ۵۳۷۰۱۳ | ۴ | |
| ۲۸۶۰۷۹ | ۲۵۰۹۳۰ | | | | ۳۱۳۸۸۰ | ۲۷۵۳۷۳ | | | | میانگین | |
| ۸/۹ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۸/۹ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |
| ۹۲۱۲۲ | ۷۸۱۷۸ | ۷۱۵۳۸ | ۷۱۵۳۸ | ۷۱۵۳۸ | ۱۳۶۱۹۱ | ۱۱۲۶۲۴ | ۱۰۵۹۸۴ | ۱۰۵۹۸۴ | ۱۰۵۹۸۴ | ۰ | |
| ۱۱۷۳۷۵ | ۹۵۵۹۹ | ۸۲۳۱۹ | ۸۲۳۱۹ | ۸۲۳۱۹ | ۱۴۶۳۳۱ | ۱۲۲۷۶۴ | ۱۰۹۴۸۴ | ۱۰۹۴۸۴ | ۱۰۹۴۸۴ | ۱ | |
| ۱۵۵۵۱۵ | ۱۳۳۷۳۹ | ۱۱۳۸۱۹ | ۱۱۳۸۱۹ | ۱۱۳۸۱۹ | ۱۸۴۴۷۱ | ۱۶۰۹۰۴ | ۱۴۰۹۸۴ | ۱۴۰۹۸۴ | ۱۴۰۹۸۴ | ۲ | |
| ۵۱۷۱۵۵ | ۴۹۵۳۷۹ | ۴۶۸۸۱۹ | ۴۶۸۸۱۹ | ۴۶۸۸۱۹ | ۵۴۶۱۱۱ | ۵۲۲۵۴۴ | ۴۹۵۹۸۴ | ۴۹۵۹۸۴ | ۴۹۵۹۸۴ | ۳ | ۱۶۰۰۰ |
| ۵۷۴۱۹۵ | ۵۵۲۴۱۹ | ۵۱۹۲۱۹ | ۵۱۹۲۱۹ | ۵۱۹۲۱۹ | ۶۰۳۱۵۱ | ۵۷۹۵۸۴ | ۵۴۶۳۸۴ | ۵۴۶۳۸۴ | ۵۴۶۳۸۴ | ۴ | |
| ۲۹۱۲۷۲ | ۲۵۶۱۲۳ | | | | ۳۲۳۲۵۱ | ۲۸۴۷۴۴ | | | | میانگین | |
| ۱۰/۱ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۹/۹ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |
| ۹۷۰۵۵ | ۸۳۱۱۰ | ۷۶۴۷۰ | ۷۶۴۷۰ | ۷۶۴۷۰ | ۱۴۵۵۶۳ | ۱۲۱۹۹۶ | ۱۱۵۳۵۶ | ۱۱۵۳۵۶ | ۱۱۵۳۵۶ | ۰ | |
| ۱۲۲۶۳۳ | ۱۰۰۸۵۷ | ۸۷۵۷۷ | ۸۷۵۷۷ | ۸۷۵۷۷ | ۱۵۵۷۰۳ | ۱۳۲۱۳۶ | ۱۱۸۸۵۶ | ۱۱۸۸۵۶ | ۱۱۸۸۵۶ | ۱ | |
| ۱۶۰۷۷۳ | ۱۳۸۹۹۷ | ۱۱۹۰۷۷ | ۱۱۹۰۷۷ | ۱۱۹۰۷۷ | ۱۹۳۸۴۳ | ۱۷۰۲۷۶ | ۱۵۰۳۵۶ | ۱۵۰۳۵۶ | ۱۵۰۳۵۶ | ۲ | |
| ۵۲۲۴۱۳ | ۵۰۰۶۳۷ | ۴۷۴۰۷۷ | ۴۷۴۰۷۷ | ۴۷۴۰۷۷ | ۵۵۵۴۸۳ | ۵۳۱۹۱۶ | ۵۰۵۳۵۶ | ۵۰۵۳۵۶ | ۵۰۵۳۵۶ | ۳ | ۱۸۰۰۰ |
| ۵۷۹۴۵۳ | ۵۵۷۶۷۷ | ۵۲۴۴۷۷ | ۵۲۴۴۷۷ | ۵۲۴۴۷۷ | ۶۱۲۵۲۳ | ۵۸۸۹۵۶ | ۵۵۵۷۵۶ | ۵۵۵۷۵۶ | ۵۵۵۷۵۶ | ۴ | |
| ۲۹۶۴۶۵ | ۲۶۱۳۱۶ | | | | ۳۳۲۶۲۳ | ۲۹۴۱۱۶ | | | | میانگین | |
| ۱۱/۲ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۱۰/۹ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |
| ۱۰۱۹۸۷ | ۸۸۰۴۳ | ۸۱۴۰۳ | ۸۱۴۰۳ | ۸۱۴۰۳ | ۱۵۴۹۳۴ | ۱۳۱۳۶۷ | ۱۲۴۷۲۷ | ۱۲۴۷۲۷ | ۱۲۴۷۲۷ | ۰ | |
| ۱۲۷۸۹۱ | ۱۰۶۱۱۵ | ۹۲۸۳۵ | ۹۲۸۳۵ | ۹۲۸۳۵ | ۱۶۵۰۷۴ | ۱۴۱۵۰۷ | ۱۲۸۲۲۷ | ۱۲۸۲۲۷ | ۱۲۸۲۲۷ | ۱ | |
| ۱۶۶۰۳۱ | ۱۴۴۲۵۵ | ۱۲۴۳۳۵ | ۱۲۴۳۳۵ | ۱۲۴۳۳۵ | ۲۰۳۲۱۴ | ۱۷۹۶۴۷ | ۱۵۹۷۲۷ | ۱۵۹۷۲۷ | ۱۵۹۷۲۷ | ۲ | |
| ۵۲۷۶۷۱ | ۵۰۵۸۹۵ | ۴۷۹۳۳۵ | ۴۷۹۳۳۵ | ۴۷۹۳۳۵ | ۵۶۴۸۵۴ | ۵۴۱۲۸۷ | ۵۱۴۷۲۷ | ۵۱۴۷۲۷ | ۵۱۴۷۲۷ | ۳ | ۲۰۰۰۰ |
| ۵۸۴۷۱۱ | ۵۶۲۹۳۵ | ۵۲۹۷۳۵ | ۵۲۹۷۳۵ | ۵۲۹۷۳۵ | ۶۲۱۸۹۴ | ۵۹۸۳۲۷ | ۵۶۵۱۲۷ | ۵۶۵۱۲۷ | ۵۶۵۱۲۷ | ۴ | |
| ۳۰۱۶۵۸ | ۲۶۶۵۰۹ | | | | ۳۴۱۹۹۴ | ۳۰۳۴۸۷ | | | | میانگین | |
| ۱۲/۲ | میزان بهبود (٪) در مدل دوم | | | | ۱۱/۸ | میزان بهبود (٪) در مدل اول | | | | | |

به‌علاوه شکل (۴) که‌به‌منظور مقایسه‌ی میانگین هزینه‌ی کل مدل اول و دوم با استراتژی‌های اول و دوم، طراحی‌شده‌است،

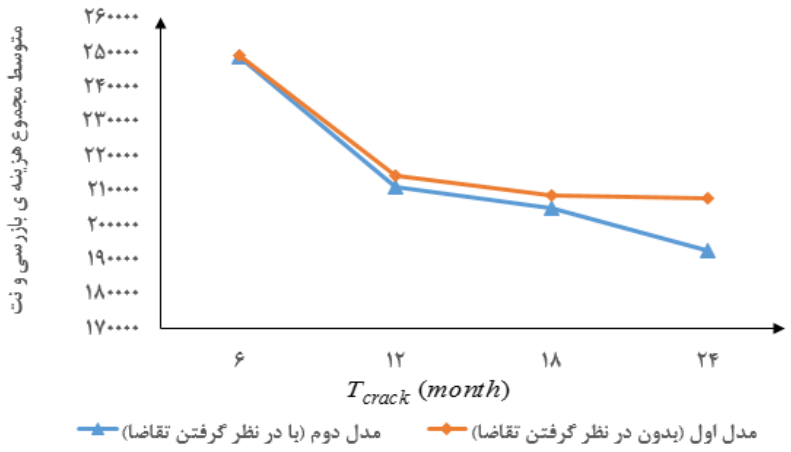
نشان‌می‌دهد در هر دو استراتژی مدل دوم که تقاضا را در نظر می‌گیرد از مدل اول عملکرد بهتری دارد که اهمیت در نظر گرفتن تقاضا در مدل‌سازی را نشان‌می‌دهد. به‌علاوه، در هردو مدل استراتژی دوم از استراتژی اول بهتراست و میزان این بهبود با افزایش مقدار $c_{ins}$بیشتر می‌شود که اهمیت گنجاندن تصمیمات بازرسی در مدل‌ها به‌ویژه زمانی‌که $c_{ins}$ بزرگ‌باشد را نشان‌می‌دهد. در ادامه به‌منظور بررسی تأثیر در نظرگرفتن تقاضا در مدل حساسیت بخشی از هزینه‌ی کل که مربوط به عملیات بازرسی و نت‌پیشگیرانه می‌باشد، نسبت به $c_{ins}$، $T_{crack}$ و $\lambda_{init}$ 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 مدل‌اول، 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 همان‌است‌که در مطالعه‌ی کاربردی اخیر بکار رفته است، به‌علاوه در هریک از تحلیل حساسیت‌ها سایر پارامترها ثابت فرض شده است.



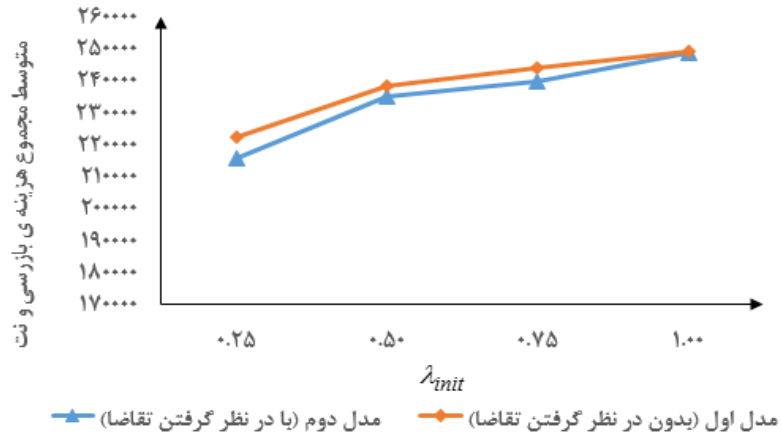

شکل (۴). حساسیت هزینه‌ی کل نسبت‌به $c_{ins}$




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 $\lambda_{init}$

شکل‌های (۵)-(۷) نشان می‌دهد، اولاً مستقل از این‌که مقادیر $c_{ins}$، $T_{cra}$ و $\lambda_{in}$ چه باشد، به‌حساب‌آوردن تقاضا در مدل‌سازی مسأله منجربه 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 به‌شکل (۵) با افزایش هزینه‌ی واحد بازرسی میزان این بهبود بیشتر می‌شود تا این‌که در $c_{ins}$ =۱۰۰۰۰ به‌اوج خود می‌رسد، بعد ازآن علیرغم این‌که بهبود وجود دارد اما میزان آن کاهش می‌یابد و از یک‌جایی به بعد تفاوت چندانی بین دو مدل در مجموع هزینه های بازرسی و نت وجود ندارد و این بدان معناست که به‌ازای مقادیر بزرگ $c_{ins}$، در نظرگرفتن تقاضا تأثیر چندانی در کاهش مجموع هزینه-های نت و بازرسی ندارد. شکل (۶) نشان‌می‌دهد هرچه $T_{crack}$ بیشتر باشد یا به‌عبارتی روند زوال کندترباشد، تأثیر در نظرگرفتن تقاضا در کاهش مجموع هزینه‌های بازرسی و نت بیشتراست. به‌علاوه باتوجه به‌اینکه افق برنامه‌ریزی ۶ ماهه‌است اگر طول عمر پره‌ها از یک‌حدی بیشتر باشد (در اینجا ۱۸ ماه)، سرعت کاهش 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 $\lambda_{init}$ بیشترباشد یا به‌عبارتی ماشین در وضعیت نو باشد ولی عمر بیشتری از آن سپری شده‌باشد، تأثیر در نظر-گرفتن تقاضا در کاهش مجموع هزینه‌های بازرسی و نت کمتر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این‌مقاله، یک سیستم تولید تک محصول و تک ماشین که در آن ماشین طبق یک فرایند مارکفی روبه زوال می‌رود، مورد بررسی قرارگرفت. تقاضا یک متغیر تصادفی گسسته با توزیع احتمال دلخواه در نظرگرفته و فرض شد بعداز اجرای نت، ماشین مثل یک ماشین‌نو شود. به‌منظور برنامه‌ریزی همزمان بازرسی‌ها و نگهداری و تعمیرات در یک افق متناهی و در سطح تاکتیکی

ابتدا بدون در نظرگرفتن تقاضا و با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی، یک مدل برای پیداکردن زمان بهینه‌ی بازرسی و نت‌پیشگیرانه 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 تقاضا روی تصمیمات و هزینه‌ها، مدل دوم توسیع داده شد. به‌این‌صورت که تقاضا به-متغیر حالت مدل اول پیوند داده شد و متوسط جریمه‌ی ناشی از تولید ازدست‌رفته به‌دلیل اختلاف ظرفیت واقعی تولید با تقاضا جایگزین این‌بخش از هزینه در مدل اول شد. باتوجه به‌این‌که در هر مدل، زمان بازرسی را به عنوان متغیر تصمیم در نظرگرفتیم و فرض‌شد مقدار متغیر حالت تنها بعد از بازرسی آشکار گردد، به‌ازای هر طرح بازرسی معادله‌ی بهینگی مربوطه حل و نتایج حاصل ازآن ذخیره شد. نتایج مذکور شامل زمان‌های بهینه برای اجرای نت پیشگیرانه‌ی وابسته به طرح بازرسیِ مفروض می‌باشد که این‌کار برای همه‌ی طرح‌های بازرسی ممکن تکرار و نتایج با هم مقایسه شد و در آخر طرح بازرسی بهینه‌ی هریک از مدل‌ها 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 این‌حوزه، می‌توان مدل‌سازی مسأله با تقاضای تصادفی پیوسته را بررسی‌کرد 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 مدل سازی مسأله در افق نامتناهی پرداخت که دراین‌صورت می‌توان از روش‌های حل موجود در برنامه‌ریزی پویای تصادفی با افق نامتناهی مثل روش بهبود سیاست یا روش تقریب‌های متوالی در صورت‌وجود سیاست ثابت و از فرایند تجدید پاداش یا روش‌های تحلیلی جهت پیداکردن ساختار سیاست بهینه در صورت عدم وجود سیاست ثابت بهره‌جست.

## 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 نرخ‌تعمیر"، 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. Aghezzaf, 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 نامرتبط"، *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. Brøndsted,, "Materials challenges in present and future wind energy", MRS bulletin, Vol. 4, No. 33, 2008, pp. 343-353.