

برنامه‌ریزی توأم نگهداری تعمیرات و تولید مبتنی بر شرایط در یک سیستم با افق برنامه‌ریزی محدود و تقاضا از پیش تعیین شده

پوریا محمدی پور^۱، هیوا فاروقی^{۲*}، حسن رسائی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

خلاصه

هدف مدیریت در یک سیستم تولیدی کاهش هزینه‌های کلی نگهداری تعمیرات و افزایش دسترس‌پذیری و یا قابلیت اطمینان سیستم است. در دهه‌های گذشته به علت این که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات به بخش بزرگی از هزینه‌های چرخه عمر سیستم تبدیل شده است؛ بنابراین این اقدامات پیچیده‌تر و حیاتی‌تر از قبل تعریف شده و از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط یکی از انواع رایج استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات است که اقدامات لازم را براساس پایش وضعیت سیستم پیشنهاد می‌کند. پیشرفت‌های اخیر در حوزه سنسورها و اینترنت اشیا به‌طور فزاینده‌ای امکان نظارت و کنترل تجهیزات تولید را از راه دور و در زمان واقعی فراهم می‌کند. سازمان‌ها می‌توانند از این فرصت‌ها برای کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان با استفاده از سیاست‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط استفاده کنند. علاوه بر اقدامات نگهداری و تعمیرات گزینه پیشنهادی دیگر به جهت کنترل میزان خرابی سیستم، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم، اتخاذ سیاست‌های تولید مبتنی بر شرایط است که خرابی تجهیزات را از طریق تطبیق پویای نرخ تولید کنترل می‌کند. در این پژوهش یک سیاست نگهداری و تعمیرات و تولید مبتنی بر شرایط پویا در سیستمی که دارای تقاضای از پیش تعیین شده می‌باشد، معرفی شده است که هردو سیاست نگهداری تعمیرات و تولید را ادغام می‌کند. ادغام تصمیمات تولید مبتنی بر شرایط در یک سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط، خطر خرابی سیستم را کاهش داده و باعث می‌شود اقدامات نگهداری و تعمیرات کمتری انجام شود و در نتیجه هزینه‌های کلی سیستم کاهش یابد. این مسأله به‌وسیله فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مدل‌سازی شده و سپس به‌وسیله الگوریتم تکرار ارزش، سیاست‌های بهینه برای هر حالت اتخاذ گردیده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۸/۹

بازنگری ۱۴۰۳/۹/۱۹

پذیرش ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط

تولید مبتنی بر شرایط

پایش وضعیت

فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

یادگیری تقویتی

الگوریتم تکرار ارزش

۱. مقدمه

مدرن، فرصت‌هایی را برای نظارت برچنین سیستم‌هایی به‌منظور بهبود تصمیم‌گیری عملیاتی آن‌ها ایجاد کرده است. محققان سیاست‌های پیچیده نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط را طراحی کرده‌اند که بر

بسیاری از سیستم‌های تولید به‌مرور زمان در نتیجه بار و فشارهای ناشی از تولید خراب می‌شوند. پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های حسگر

* نویسنده مسئول: هیوا فاروقی

تلفن: ۰۷۳-۳۳۶۶۰۰۸۷؛ پست الکترونیکی: h.farughi@uok.ac.ir

نیز وجود دارد. در این حالت علاوه بر این که هزینه بالای تعویض قطعات و تعمیر ماشین‌آلات را داریم؛ بلکه یک هزینه خاموشی خط تولید که ممکن است باعث عدم پاسخ‌گویی به تقاضا و فروش از دست‌رفته شود را متحمل شویم. با گذشت زمان متخصصان حوزه نت تصمیم گرفتند که بازرسی از سیستم‌های تولیدی و عملیات نت را به صورت دوره‌ای انجام دهند. در این نوع استراتژی پس از گذشت یک مدت زمان معین و یا دوره تولید، عملیات نت بر روی سیستم اجرا خواهد شد. به این نوع استراتژی، نت پیش‌گیرانه^۸ گفته می‌شود. یکی از معایب این استراتژی این است که در زمان فرا رسیدن انجام عملیات نت ممکن است عمر مفید قطعات یا تجهیزات هنوز باقی مانده و در نتیجه انجام عملیات تعویض و یا تعمیر غیرضروری باشد. حالت دیگر این است که ماشین‌آلات در فاصله بین دو دوره خراب شوند و در این حالت باید تا رسیدن دوره بعدی صبر شود تا عملیات نت لازم اجرا گردد. با گذشت زمان استراتژی دیگری در نظر گرفته شد تا معایب استراتژی‌های قبل را پوشش دهد. در این نوع استراتژی، اقدامات لازم بر اساس شرایط ماشین‌آلات اجرا خواهد شد که به آن نت پیش‌بینی‌کننده^۹ یا نت مبتنی بر شرایط^{۱۰} گفته می‌شود. نت مبتنی بر شرایط اغلب به عنوان مترادف برای نت پیش‌بینی‌کننده به کار می‌رود. این سیاست اغلب در سیستم‌هایی که قابلیت اطمینان از اهمیت بالایی برخوردار است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نت مبتنی بر شرایط بر این فرض استوار است که اکثر خرابی‌های ماشین‌آلات به طور ناگهانی اتفاق نمی‌افتند، بلکه به مرور زمان ایجاد شده و قبل از وقوع حادثه توسط سیگنال‌های هشدار خاصی، می‌توان از وقوع آن‌ها خبردار شد. بنابراین یک پیش‌نیاز برای نت مبتنی بر شرایط، نظارت بر وضعیت^{۱۱} ماشین‌آلات است که این نظارت می‌تواند به طور مداوم یا در فواصل زمانی مختلف انجام شود.

یک عامل مهم که به وسیله آن می‌توان میزان خرابی تجهیزات را کنترل کرد، نرخ تولید^{۱۲} است. در اغلب سیستم‌های تولیدی این حقیقت وجود دارد که نرخ خرابی^{۱۳} سیستم با نرخ تولید در ارتباط است و انتظار می‌رود در نرخ‌های تولید بالاتر، تجهیزات با سرعت بیشتری دچار فرسودگی شوند. به عنوان مثال این ارتباط در مورد گیربکس‌های توربین بادی و ژنراتورهایی که در سرعت‌های بالا سریع‌تر خراب می‌شوند [۵،۶]، تسمه‌های نقاله‌ای که اغلب در صورت استفاده در سرعت‌های چرخشی بالاتر از کار می‌افتند [۷]، کامیون‌هایی که در هنگام بارگیری سنگین‌تر زودتر خراب می‌شوند [۸]، ابرکامپیوترهای بزرگ که اغلب در بارهای کاری بالاتر از کار می‌افتند [۹،۱۰]، ابزارهای برشی که در سرعت‌های بالاتر سریع‌تر سایش می‌کنند [۱۱]، ماشین‌های مهرزنی که با افزایش سرعت مهرزنی سریع‌تر خراب می‌شوند [۱۲] و فیلترهای گرانشی در کارخانه‌های تصفیه آب که با

انواع مختلفی از اطلاعات شرایط تکیه دارند و بینش‌هایی را در مورد چگونگی کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات ارائه می‌دهند. باین حال، در بسیاری از سیستم‌های واقعی، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات از انعطاف‌پذیری محدودی برخوردار است.

ماشین‌آلات و تجهیزات موجود در سیستم‌های تولیدی، اغلب به علت این که به طور مداوم مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی همچون دما، رطوبت، گردوغبار، نوسانات انرژی، شرایط کاری سخت و... هستند، در معرض خرابی بوده و دچار فرسودگی و زوال^۱ می‌شوند. این خرابی‌ها، اگر به موقع شناسایی و تعمیر نشوند، ممکن است به شکست^۲ کلی سیستم منجر شده و اثرات زیانباری نظیر مشکلات ایمنی، به بار آوردن هزینه‌های زیاد، آسیب رساندن به سایر تجهیزات، کاهش کیفیت تولید، توقف ناگهانی دستگاه و... را به همراه داشته باشند. بنابراین در این حالت فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات^۳ برای حفظ یا بازگرداندن آن‌ها به شرایط عملیاتی قابل قبول ضروری است. طبق استاندارد اتحادیه اروپا^۴ (PN-EN13306:2010) نگهداری و تعمیرات ترکیبی از کلیه اقدامات فنی، اداری و مدیریتی در طول چرخه عمر یک مؤلفه است که قصد دارد عملکرد آن را حفظ کند یا آن را به حالتی بازگرداند که بتواند کارایی موردانتظار را داشته باشد. این اقدامات که از کارهای کوچک مانند تمیزکاری، تعویض روغن دستگاه‌ها تا تعویض قطعات بزرگ را شامل می‌شود؛ بخش قابل توجهی از هزینه‌های تولید بسیاری از کارخانجات و سازمان‌ها را تشکیل می‌دهند. به عنوان مثال، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شرکت‌های تولیدی معمولاً بین ۱۵ تا ۴۰ درصد از کل هزینه‌های متغیر آن‌هاست [۱]. نیروگاه‌های برق و نیروگاه‌های بادی فراساحلی^۵ تا ۳۰ درصد از کل هزینه‌های چرخه عمر خود را صرف هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌کنند [۲،۳]. در مرحله بهره‌برداری از توربین‌های بادی نیز، به طور متوسط ۶۷ درصد از کل هزینه‌ها، ناشی از فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات است و حتی مواردی وجود دارد که این میزان به بیش از ۸۵ درصد می‌رسد [۴]. این هزینه‌های قابل توجه به وضوح نشان می‌دهد که عملیات و استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مؤثر، برای سودآوری و رقابت شرکت‌ها بسیار مهم هستند.

در گذشته، نگهداری و تعمیرات به عنوان وظیفه‌ای در نظر گرفته می‌شد که پس از وقوع خرابی و مشکلات در دستگاه‌ها و تجهیزات اجرا می‌شد. به این نوع استراتژی نت، اجرا تا شکست^۶، نت اصلاحی^۷ و یا نت واکنشی^۸ گفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین معایب این نوع استراتژی این است که با خراب شدن قطعات یا ماشین‌آلات، ممکن است تولید متوقف شده و در بعضی از موارد احتمال خاموشی کل سیستم تولید

8. Reactive maintenance
9. Preventive Maintenance
10. Predictive Maintenance
11. Condition Based Maintenance
12. Condition monitoring
13. Production rate
14. Failure rate

1. Deterioration
2. Failure
3. Maintenance
4. Conformité Européenn (C E)
5. Offshore wind farm
6. Run to failure (R2F)
7. Corrective maintenance

خرابی سیستم برای اقدامات حفاظتی مختلف و انتخاب نت فرصت طلبانه به‌طور مشترک بهینه شده است [۱۵]. فاروقی و همکارانش در سال ۱۴۰۲ یک مدل ریاضی جهت برنامه‌ریزی اقدامات نت بر مبنای اطلاعات نمودارهای کنترل با رویکرد زنجیره مارکوف ارائه کردند. در تحقیق آن‌ها فرض شده است که انحراف‌های بادلیل و زوال فرآیند بر میانگین فرآیند تأثیرگذار نیست بلکه واریانس فرآیند را تحت تأثیر قرار خواهد داد و بر این مبنای رویکرد زنجیره مارکوف استفاده کردند [۱۶]. بابایی مراد و همکاران در سال ۱۳۹۸ بهینه‌سازی توأم سیاست زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه را در یک سیستم تولیدی با در نظر گرفتن کمبود از نوع پس‌افت و تقاضا به‌صورت احتمالی مورد بررسی قرار دادند [۱۷].

ژنگ و ماکیس^۹ در سال ۲۰۲۰ یک سیاست CBM را برای سیستمی که در معرض خرابی‌های نرم^۸ و سخت^۹ است، پیشنهاد کردند. [۱۸]. پارک و فام^{۱۰} در سال ۲۰۲۳ یک استراتژی CBM را برای یک سیستم دارای وابستگی به خرابی با دو منشاء تخریب و شوک‌های تصادفی ارائه کردند. [۱۹]. وارد و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۲۴ از مدل‌های یادگیری ماشین^{۱۲} جهت به‌دست آوردن سیاست بهینه CBM در حالتی که نظارت بر وضعیت به‌صورت ناقص صورت می‌گیرد و یا اطلاعات وضعیت ناقص است، استفاده کردند [۲۰]. ادبیات حوزه نگهداری و تعمیرات گسترده است و انواع مختلفی از مداخلات نت در نظر گرفته شده است. اولین تمایزی که می‌توان ایجاد کرد، مربوط به استراتژی نت پیش‌گیرانه و اصلاحی است. اقدامات نت پیش‌گیرانه می‌تواند مبتنی بر زمان یا مبتنی بر شرایط باشد، و سیاست‌های هردو نوع در بسیاری از مطالعات مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته‌اند [۲۱-۲۴]. این مطالعات نشان می‌دهند که سیاست‌های نت مبتنی بر شرایط، هزینه عملیاتی سیستم را کاهش داده و قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشند. مطالعات فوق به ارزش سیاست‌های نت پویا می‌پردازند، اما در آن‌ها اهمیت کنترل پویا زوال سیستم مطالعه نشده است.

مقالات مربوط به برنامه‌ریزی تولید تحت عدم قطعیت، شامل عدم قطعیت خرابی تجهیزات، توسط مولا و همکاران^{۱۳} در سال ۲۰۰۶ جمع بندی و مرور شده است [۲۵]. یک بررسی که به بهینه‌سازی مشترک تولید و نت می‌پردازد توسط ستهی و همکاران^{۱۴} در سال ۲۰۰۲ انجام شده است [۲۶]. فرانسوی و همکاران^{۱۵} در سال ۲۰۱۴ یک سیستم تولید متشکل از دو ماشین موازی که یک نوع محصول نهایی را تولید می‌کنند با تقاضای ثابت در نظر گرفتند. هدف این پژوهش یافتن یک سیاست تولید برای هر دو ماشین است که هزینه‌های موجودی و کمبود را در یک افق بی‌نهایت به حداقل برساند. در این تحقیق میزان خرابی ماشین اصلی به نرخ تولید آن بستگی دارد و میزان خرابی

افزایش نرخ فیلتراسیون زودتر خراب می‌شوند [۱۳] صدق می‌کند. در این حالت‌ها تنظیم نرخ تولید براساس اطلاعات شرایط و وضعیت سیستم برای افزایش و کاهش تولید و یا جلوگیری از خرابی پرهزینه احتمالی می‌تواند سودآور باشد. بنابراین از اطلاعات شرایط علاوه بر بحث نت می‌توان در حوزه برنامه‌ریزی تولید^۱ نیز استفاده کرد و آن را تولید مبتنی بر شرایط^۲ نامید به این معنی که باتوجه به وضعیت خرابی سیستم می‌توان نرخ تولید را تغییر داد.

در این مقاله یک سیستم تولیدی تک‌جزئی در نظر گرفته شده است که نرخ خرابی آن به نرخ تولید بستگی دارد. این سیستم در یک افق برنامه‌ریزی محدود باوجود تقاضا از پیش تعیین شده مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق اتخاذ تصمیمات یکپارچه نگهداری تعمیرات و تولید در شرایطی است که تقاضای سیستم از یک دوره به دوره بعد متغیر و پویا بوده و خرابی سیستم نیز با نرخ تولید ارتباط دارد. یکی دیگر از نوآوری‌های مهم تحقیق این است که باتوجه به مفروضاتی که در بخش سوم گفته می‌شود، یک مدل تصمیم‌گیری مارکوف ارائه و سپس از الگوریتم تکرار ارزش جهت حل آن استفاده خواهد شد.

به‌طور خلاصه نوآوری‌های اصلی تحقیق را می‌توان در سه مورد زیر بیان نمود:

- بررسی مسأله برنامه‌ریزی تولید و نگهداری تعمیرات در یک سیستم تولیدی با افق برنامه‌ریزی محدود و تقاضای پویا، در حالتی که نرخ تولید بر خرابی سیستم تأثیرگذار است.
- ارائه یک مدل تصمیم‌گیری مارکوفی برای مسأله و حل مدل ارائه شده به کمک الگوریتم تکرار ارزش
- ارائه مثال‌های عملی از کاربرد مدل و انجام تحلیل حساسیت

۲. پیشینه تحقیق

در ادبیات فعلی، تصمیمات نت و تولید اغلب به‌طور جداگانه در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی می‌شوند. به‌عنوان مثال کایزر و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۷ یک سیستم تولیدی چندواحدی موازی را با فرض وجود وابستگی اقتصادی در نظر گرفتند. در این تحقیق مسأله به‌عنوان یک مدل MDP^۴ فرموله شده و سیاست نت بهینه زمانی که میانگین هزینه در بلندمدت حداقل می‌شود، اتخاذ شده است [۱۴]. ترونک-با و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۹ یک استراتژی CBM با در نظر گرفتن فرصت‌های جزئی برای انجام عملیات نت در شرایطی که بودجه محدود است، ارائه کردند. پژوهش آن‌ها علاوه بر رویکرد CBM، شامل تحلیل مجموعه‌ای از اقدامات نت ناقص^۶ است. در این تحقیق متوسط هزینه‌های نت از طریق یک مدل MDP کمینه شده و در آن آستانه

9. Hard failure

10. Park and Pham

11. Ward et al.

12. Machine learning

13. Mula et al.

14. Sethi et al.

15. Francie et al.

1. Production planning

2. Condition Based Production

3. Keizer et al.

4. Markov decision process

5. Truong-Ba et al.

6. Imperfect maintenance

7. Zhenga and Makis

8. Soft failure

یک مدل MDP را توسعه دادند که به‌طور هم‌زمان برنامه‌های نت و تولید را برای یک سیستم تولید چندمحصولی و تک‌ماشینی تعیین می‌کند و این واقعیت را در نظر می‌گیرد که شرایط تجهیزات می‌تواند تولید انواع مختلف محصول و زمان انجام عملیات نت را تحت تأثیر قرار دهد [۳۸]. کازاز و اسلوان^۶ در سال ۲۰۱۳، سیستم مقاله قبل را با اضافه کردن محصولات با زمان‌های تولید مختلف، و در نتیجه، افزایش خرابی‌های مورد انتظار مختلف گسترش دادند. آن‌ها فرض کردند که عملیات نت را می‌توان در هر زمان و بدون نیاز به زمان برنامه‌ریزی انجام داد. در این تحقیق، تمرکز آن‌ها بر برنامه‌ریزی تولید بوده و از اطلاعات شرایط برای تنظیم نرخ تولید استفاده نشده است [۳۹].

مطالعات بسیار کمی وجود دارند که سیستم‌های تولید با نرخ تولید قابل تنظیم، نظارت بر شرایط و ارتباط بین نرخ تولید و نرخ خرابی را در نظر گرفته باشند. باتوجه به‌مرور ادبیات نتیجه می‌گیریم که تعامل بین تصمیمات تولید و رفتار خرابی سیستم‌ها به‌خوبی مطالعه شده‌است، اما جایگاه و ارزش استفاده از نظارت بر شرایط برای تنظیم پویای نرخ تولید، و در نتیجه نرخ خرابی، نادیده گرفته شده است. اولین تحقیق در این زمینه که ارتباط بین نرخ تولید و نرخ خرابی را در نظر گرفته و براساس اطلاعات شرایط سیستم تصمیمات مشترک بین نت و تولید را ارائه کردند، مقاله بروک و همکاران^۸ بود که در سال ۲۰۲۱ انجام شد. در این تحقیق یک سیستم تک‌واحدی را در نظر گرفتند و به‌طور پیوسته بر وضعیت سیستم که همان میزان خرابی بود، نظارت داشتند. آن‌ها در نظر گرفتند که در هر لحظه باتوجه به وضعیت سیستم می‌توان سه اقدام را انجام داد. (۱) عملیات نت را برنامه‌ریزی کرد. (۲) نرخ تولید را تغییر داد و (۳) هیچ کاری انجام نداد. آن‌ها فرض کردند که عملیات نت به یک زمان برنامه‌ریزی جداگانه نیاز دارد و پس از طی این زمان برنامه‌ریزی، عملیات نت به سیستم می‌رسد [۴۰]. در تحقیق دیگر از بروک و همکاران در سال ۲۰۲۱، مقاله قبلی خود را به یک سیستم با دو جزء ارتقاء داده و جهت کنترل خرابی سیستم، علاوه بر تغییر نرخ تولید از سیاست اشتراک بار نیز استفاده کردند. [۴۱].

کوپمانس و دی یونگ^۹ در سال ۲۰۲۳ یک سیستم تولیدی چندواحدی موازی را در نظر گرفتند. در این تحقیق فرض کردند که دو نوع نت اصلاحی و پیش‌گیرانه مبتنی بر شرایط با در نظر گرفتن زمان برنامه‌ریزی انجام خواهد شد که تأثیر آن‌ها بر روی سیستم کامل است. در این تحقیق محدودیت انجام نت وجود دارد و در یک زمان تنها بر روی یک واحد می‌توان عملیات نت را انجام داد. [۴۲].

رسائی و همکارانش^{۱۰} در سال ۲۰۲۳ یک سیستم تولید تک‌واحدی با نرخ تولید قابل تنظیم را در نظر گرفتند و فرض کردند خرابی سیستم را می‌توان به‌وسیله انجام عملیات نت و تنظیم نرخ تولید کنترل کرد. آن‌ها فرض کردند که وضعیت خرابی سیستم به‌صورت مداوم تحت

ماشین دوم را ثابت فرض کردند. سپس به‌وسیله برنامه‌ریزی پویا تصادفی^۱ مسأله را حل کرده و سیاست‌های بهینه به‌دست آمده‌اند [۲۷]. لو و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۵ به‌دنبال یافتن یک برنامه تولید پایدار برای یک ماشین منفرد با محدودیت‌های در دسترس بودن پرداختند. آن‌ها فرض کردند که خرابی دستگاه به سن آن بستگی داشته و دستگاه دچار خرابی‌های غیرمنتظره می‌شود. سپس یک مدل مشترک برای ادغام نت پیش‌گیرانه در مسأله زمان‌بندی تولید پیشنهاد کردند، که در آن توالی کارها، زمان‌های انجام نت و زمان‌های تکمیل کارهای برنامه‌ریزی‌شده به‌طور هم‌زمان تعیین می‌شوند [۲۸].

هو و همکاران^۳ در سال ۱۹۹۴ نشان دادند که قابلیت اطمینان سیستم را می‌توان با کاهش نرخ تولید بهبود بخشید [۲۹]. مارتینلی در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ یک سیستم تولیدی تک‌جزئی همراه با موجودی کالا محدود را در نظر گرفت که مشمول یک فرآیند خرابی غیرهمگن مارکوف با نرخ خرابی وابسته به نرخ تولید است. هدف این مقاله به‌حداقل رساندن یک تابع هزینه که شامل یک جریمه به‌ازای مشتریان منتظر است، بود [۳۰، ۳۱]. مارتینلی در سال ۲۰۱۰ مقالات قبلی خود را توسعه داد و یک سیستم با دو ماشین و یک سیاست نت پیش‌گیرانه را برای یک مسأله زمان‌بندی تولید در نظر گرفته است [۳۲]. رسائی و فاروقی در سال ۱۴۰۲ تأثیر مکانیزم‌های مختلف خرابی فرآیندهای تولید در مدل‌های یکپارچه نگهداری و تعمیرات و کنترل فرآیند آماری را با استفاده از طراحی آزمایشات بررسی کردند [۳۳].

در بسیاری از شرایط عملی، نرخ تولید نه تنها بر احتمال خرابی فعلی تأثیر می‌گذارد، بلکه منجر به خراب شدن دائمی سیستم می‌شود. زیاد و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۱ یک تحقیق جهت نشان دادن تأثیر تغییرات نرخ تولید بر استراتژی نت بهینه انجام دادند. آن‌ها یک مسأله برنامه‌ریزی تولید و نت را با فرض این که سیستم تولیدی تک‌واحد است و یک محصول واحد تولید می‌کند بررسی کردند. ابتدا، باتوجه به تقاضای تصادفی، یک مسأله برنامه‌ریزی خطی درجه دوم فرموله و حل شده است که خروجی آن یک برنامه تولید بهینه بود. سپس، با استفاده از این طرح تولید بهینه، یک برنامه نت بهینه براساس مدت‌زمان انجام عملیات نت با در نظر گرفتن تأثیر برنامه تولید بر خرابی سیستم ایجاد شده است [۳۴]. آید و همکارانش^۵ در سال ۲۰۱۲ سیستم ارائه شده در مقاله زیاد و همکاران را به دو واحد گسترش دادند [۳۵].

به‌خوبی مشخص شده است که استفاده از نظارت بر شرایط می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تصمیم‌گیری عملیاتی را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، نت مبتنی بر شرایط قابلیت اطمینان سیستم را بهبود داده و هزینه‌های نت را نیز کمتر خواهد کرد [۲۳، ۳۶، ۳۷]. برخی دیگر از مطالعات استفاده از اطلاعات شرایط را برای برنامه‌ریزی تولید انواع متعدد محصول در نظر گرفته‌اند. اسلون و شانتيکومار^۶ در سال ۲۰۰۰

6. Sloan and Shanthikumar

7. Kazaz and Sloan

8. Broek et al.

9. Koopmans and de Jonge

10. Rasay et al.

1. Stochastic dynamic programming

2. Lu et al.

3. Hu et al.

4. Zied et al.

5. Aide et al.

به عبارت دیگر وضعیت سیستم با این آستانه، مقایسه و سنجیده می‌شود. آستانه در نظر گرفته شده معمولاً باتوجه به آزمایشات انجام شده و استانداردهای صنعتی موجود تعیین خواهد شد [۱۵].

در این مسأله یک افق برنامه‌ریزی محدود^۷ که شامل چندین دوره است در نظر گرفته می‌شود. در ابتدای هر افق برنامه‌ریزی وضعیت سیستم از حالت نو بودن^۸ آغاز شده و با گذشت زمان، سیستم به طور مداوم و تصادفی خراب می‌شود. هرگاه میزان خرابی سیستم از آستانه از پیش تعیین شده بیشتر باشد، سیستم از کار افتاده و متوقف می‌شود و به عبارت دیگر سیستم در حالت غیرعملیاتی^۹ قرار می‌گیرد. در این حالت باید اقدامات نت جهت بازگرداندن سیستم به حالت عملیاتی^{۱۰} انجام شود و بعد از انجام عملیات نت وضعیت سیستم به حالت نو بودن تبدیل خواهد شد. در غیر این صورت هرگاه میزان خرابی سیستم از آستانه کمتر باشد، سیستم در حالت عملیاتی می‌باشد.

در ابتدای هر دوره تصمیم‌گیری^{۱۱} باتوجه به وضعیت سیستم، به وسیله دو سیاست کلی، خرابی آن کنترل خواهد شد: (۱) تصمیم به انجام اقدامات نت گرفت و یا (۲) نرخ تولید را مجدداً تنظیم کرد. هرگاه تصمیم به انجام عملیات نت بر روی سیستم گرفته شود فرض می‌شود که انجام این عملیات نیازمند به یک دوره زمانی خواهد بود و باتوجه به وضعیت سیستم و میزان خرابی آن تصمیم گرفته خواهد شد که چه نوع استراتژی نگهداری و تعمیراتی بر روی سیستم انجام شود. اگر میزان خرابی سیستم بزرگتر از آستانه در نظر گرفته شده باشد نت اصلاحی انجام شده و وضعیت سیستم بعد از انجام نت و در ابتدای دوره زمانی بعدی به حالت نو بودن تبدیل خواهد شد و در صورتی که میزان خرابی سیستم کمتر از آستانه باشد، نت پیش‌گیرانه صورت خواهد گرفت، که این استراتژی هم مانند استراتژی نت اصلاحی به صورت کامل می‌باشد. هر کدام از استراتژی‌های نت اصلاحی و پیش‌گیرانه هزینه مختص به خود را دارند و چون نت اصلاحی اغلب شامل تعویض قطعات و تعمیرات اساسی است بنابراین هزینه نت اصلاحی بیشتر از هزینه نت پیش‌گیرانه در نظر گرفته خواهد شد.

علاوه بر انجام عملیات نت، یکی دیگر از سیاست‌ها که به وسیله آن می‌توان میزان خرابی سیستم را کنترل کرد، تغییر در نرخ تولید است. با کم کردن نرخ تولید خرابی سیستم به طور تصادفی دیرتر رخ خواهد داد و بالعکس در نرخ‌های تولید بالاتر این انتظار وجود دارد که سیستم به طور تصادفی سریع‌تر دچار خرابی شود. از طرف دیگر با افزایش نرخ تولید درآمد بیشتری ناشی از تولید و فروش بیشتر محصولات به دست خواهد آمد؛ اما چون خرابی سریع‌تر اتفاق می‌افتد بنابراین هزینه‌های نت نیز افزایش خواهد یافت. با کاهش نرخ تولید نیز به دلیل این که سیستم دیرتر خراب می‌شود هزینه‌های نت کاهش می‌یابد اما این به معنی کاهش درآمد هم خواهد بود. از این رو تنظیم نرخ تولید در یک

نظارت قرار می‌گیرد و در صورت نیاز می‌توان عملیات نت و تنظیم نرخ تولید را انجام داد. آن‌ها مسأله را به فرمت MDP مدل‌سازی کرده و به وسیله الگوریتم Q-Learning حل کردند [۴۳].

درنت و همکارانش^۱ در سال ۲۰۲۳ یک سیستم تولیدی تک‌واحدی که دچار خرابی تصادفی می‌شود را تحت ساختار تولید مبتنی بر شرایط تحلیل کردند. خرابی تصادفی را زمانی در نظر گرفتند که برنامه‌ریزی نت صورت گرفته و سیستم منتظر رسیدن عملیات نت باشد و در این فاصله سیستم احتمال دارد به صورت تصادفی زودتر از موعد خراب شود [۴۴].

سان و همکارانش^۲ در سال ۲۰۲۳ یک استراتژی نت دوره‌ای را برای یک سیستم تولیدی که نرخ تولید آن را می‌توان به صورت پویا قبل از انجام عملیات نت تنظیم کرد، ارائه کردند [۴۵].

ژانگ و همکارانش^۳ در سال ۲۰۲۴ بهینه‌سازی یکپارچه تولید و نت را در یک سیستم تولیدی تک‌واحدی روبه زوال با عملکرد تصادفی و تأخیر در تقاضا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرض کردند سیستم تولیدی دارای تقاضای ثابت بوده که هر دوره سفارش وارد می‌شود. خرابی سیستم به صورت تصادفی بوده و متناسب با میزان نرخ تولید یا کار سیستم است. اگر دستگاه وارد وضعیت خرابی شود، باید یک عملیات نت اصلاحی برنامه‌ریزی شود. در غیر این صورت، تصمیم‌گیرنده می‌تواند انتخاب کند که یک نت پیش‌گیرانه را برنامه‌ریزی کند یا تصمیم بگیرد که چه مقدار تولید کند. در این مسأله فرض شده است که زمان رسیدن خدمه نت غیرقابل چشم‌پوشی بوده و بنابراین تأخیر نت در نظر گرفته می‌شود. هدف این پژوهش حداقل کردن مجموع هزینه نت و تولید در افق بی‌نهایت است [۴۶].

۳. بیان مسأله

در این پژوهش یک سیستم تولیدی تک‌مؤلفه‌ای با نرخ تولید قابل تنظیم^۴ در نظر گرفته شده است. خرابی سیستم با نرخ تولید ارتباط دارد به طوری که در نرخ‌های تولید بالاتر، خرابی مورد انتظار سیستم افزایش می‌یابد. برای اطلاع از وضعیت سیستم که همان میزان خرابی^۵ آن است، سیستم تحت نظارت یا پایش^۶ قرار می‌گیرد. در هر سیستم تولیدی باتوجه به یک سری پارامترها وضعیت سیستم که همان میزان خرابی آن است بیان خواهد شد. به عنوان مثال، در گیربکس توربین‌های بادی، لرزش دستگاه به عنوان یک مشخصه در نظر گرفته می‌شود که به وسیله آن میزان سلامت سیستم نشان داده خواهد شد؛ و یا در سیستم‌های برش از صدای دستگاه و در اتاق‌های سرور از دمای محیط به عنوان مشخصه استفاده کرد. معمولاً در مواردی که از نظارت بر وضعیت استفاده می‌شود یک آستانه^۷ تعریف خواهد شد و این آستانه به عنوان یک وسیله برای سنجش وضعیت سیستم استفاده شده و

7. Threshold

8. Finite planning horizon

9. As-good-as-new

10. Non-operational state

11. Operational state

12. Decision epoch

1. Drent et al.

2. Sun et al.

3. Zhang et al

4. Adjustable production rate

5. Deterioration

6. Monitoring

اتمام افق برنامه‌ریزی و حالت T به معنی این است که سیستم در ابتدای افق برنامه‌ریزی می‌باشد.

۳-۱-۲. اقدامات^۲ مسئله

در هر دوره باتوجه به وضعیت سیستم می‌توان اقدامات زیر را لحاظ کرد:

(۱) اگر وضعیت خرابی ماشین در حالت m باشد، نت اصلاحی باید انجام شود و فرض می‌شود که بعد از انجام نت وضعیت سیستم به حالت نو بودن تبدیل خواهد شد.

(۲) اگر وضعیت خرابی ماشین در حالت m نباشد، به این معنی که ماشین در حالت عملیاتی است، پس اپراتور می‌تواند:

- i. نرخ تولید را به هر سطحی از نرخ تولید مجاز از $K = k \in \{0, 1, \dots, n\}$ تنظیم کند.
- ii. اقدامات نت پیش‌گیرانه انجام دهد که همانند نت اصلاحی به صورت کامل می‌باشد.
- iii. هیچ کاری انجام ندهد.^۴

۳-۱-۳. توابع بازگشتی مسئله و محاسبه ارزش هر حالت

در جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در مسئله ارائه شده است.

جدول (۱). پارامترهای مسئله

ω_k	نرخ تولید ماشین در هر دوره باتوجه به سطح تولید k ام
π_0	هزینه ثابت مرتبط با نرسیدن به هدف تولید در آن دوره
π_1	هزینه‌های کمبود برای هر واحد تقاضا برای یک دوره
π_2	پاداش اضافه تولید برای هر واحد تولید که از هدف تولید در آن دوره فراتر می‌رود.
φ_t	هدف تولید از پیش تعیین شده دوره t ام
C_{CM}	هزینه نت اصلاحی
C_{PM}	هزینه نت پیش‌گیرانه
$p_{i,j}^k$	احتمال انتقال از حالت i به j باتوجه به این که نرخ تولید در سطح k تنظیم شده است
p^k	ماتریس انتقال زنجیره مارکوف باتوجه به این که نرخ تولید در سطح k تنظیم شده است
T	طول افق برنامه‌ریزی

قبل از ارائه توابع بازگشتی ابتدا باید ارتباط بین میزان خرابی و نرخ تولید سیستم را نشان داد. در این مسئله با استفاده از ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال سیستم با هر میزان خرابی و باتوجه به هر سطح تولید نشان داده خواهد شد. همان‌طور که گفته شد، در این مسئله فرض شده است که نرخ تولید با میزان خرابی سیستم ارتباط دارد، بنابراین این انتظار وجود دارد که در نرخ‌های تولید بالاتر، خرابی سیستم زودتر اتفاق بیفتد. در این مسئله چون تعداد حالات خرابی برابر m حالت عملیاتی و یک حالت غیرعملیاتی است، بنابراین ماتریس احتمال انتقال $(m+1) \times (m+1)$ بوده و به صورت زیر تعریف خواهد شد.

مقدار جهت ایجاد تعادل^۱ بین دو هدف متناقض (افزایش درآمد یا پاسخ به هدف تولید و کاهش هزینه‌های نت) اهمیت پیدا می‌کند.

در این پژوهش فرض می‌شود که در هر دوره یک تقاضا وارد سیستم می‌شود و باتوجه به میزان تولید در آن دوره به این تقاضا پاسخ داده خواهد شد. در هر دوره باتوجه به مقایسه میزان تولید و تقاضا در آن دوره یک سری جریمه و پاداش تعریف خواهد شد که شامل جریمه کلی در صورت برآورد نشدن تقاضا، جریمه به‌ازای هر واحد کالای برآورده نشده و پاداش کلی به‌ازای برآورده شدن تقاضا می‌باشد.

در این مسئله، هدف حداقل کردن ارزش انتظاری هزینه‌های عملیاتی سیستم در افق برنامه‌ریزی خواهد بود به‌طوری‌که به تولید مورد انتظار یا همان تقاضا پاسخ داده شود. بنابراین در حالت کلی سیاست‌های نگهداری و تعمیرات و تولید باید به گونه‌ای اتخاذ شوند که این هدف محقق گردد. لازم به ذکر است که مسئله ارائه شده را درحالتی که هم نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه و اصلاحی داریم با حالتی که تنها نت اصلاحی وجود دارد (یعنی حالتی که سیستم از کار افتاده و سپس نت اجرا می‌شود) مقایسه خواهد شد.

اقدامات مسئله درحالتی که تنها نت اصلاحی وجود دارد به‌صورتی است که تا زمانی که سیستم در حالت عملیاتی می‌باشد تنها اقدام جهت کنترل خرابی سیستم تغییر میزان تولید می‌باشد و هنگامی وضعیت خرابی سیستم از آستانه تعریف شده فراتر رود جهت بازگرداندن سیستم به حالت عملیاتی تنها می‌توان نت اصلاحی را انجام داد و در این حالت هم فرض می‌شود که نت به‌صورت کامل بوده و بعد از انجام آن وضعیت سیستم در دوره بعد به حالت نو بودن تبدیل خواهد شد.

۳-۱-۳. مدل سازی فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

۳-۱-۱. حالات مسئله

در این مقاله فرض می‌شود که هرگاه نگهداری و تعمیرات مورد نیاز باشد، این عملیات بلافاصله بر روی سیستم اجرا خواهد شد و زمان برنامه‌ریزی برای انجام نت به‌صورت ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. میزان خرابی سیستم در مسئله ارائه شده به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر جهت تعریف حالت مسئله استفاده می‌شود. از طرف دیگر باتوجه به این که در این مسئله یک افق برنامه‌ریزی تعریف خواهد شد پس باید از تعداد دوره‌های سپری شده تا اتمام افق برنامه‌ریزی نیز اطلاع داشت. بنابراین حالت^۲ مسئله به‌صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$System\ state = (i, t) \quad (1)$$

که در آن i میزان خرابی سیستم و t تعداد دوره‌های باقی مانده تا اتمام افق برنامه‌ریزی می‌باشد.

وضعیت خرابی سیستم متعلق به مجموعه X است به‌طوری‌که $X = i \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$ که در آن وضعیت ۰ به معنی حالت نو بودن بوده و حالت m به معنی این است که سیستم از کار افتاده و درحالت غیرعملیاتی وجود دارد. از طرف دیگر t متعلق به مجموعه T است به‌طوری‌که $T = t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$ که در آن وضعیت ۰ به معنی

3. Actions
4. Do Nothing

1. Tradeoff
2. State

معادله (۴) مربوط به حالتی است که سیستم در حالت غیرعملیاتی بوده و متوقف شده است. در این وضعیت تنها اقدامی که می‌توان انجام داد این است که عملیات نت اصلاحی باید بر روی سیستم اجرا شود و همانند حالت قبلی بعد از گذشت یک دوره سیستم با وضعیت نو بودن در دسترس می‌باشد.

$$V(m, t) = C_{cm} + \pi_0 + \pi_1 * \varphi_j + V(0, t - 1) \quad (۴)$$

معادله (۵) مربوط به حالتی است که به انتهای افق برنامه‌ریزی رسیده‌ایم و باتوجه به این که باید ماشین در ابتدا افق برنامه‌ریزی بعدی در حالت نو بودن باشد، بنابراین اقدامات نت باید اجرا گیرد. در این حالت تصمیم برای انجام نت اصلاحی یا پیش‌گیرانه براساس میزان خرابی سیستم گرفته خواهد شد و همان‌طور که گفته شد، هر دو استراتژی نت فرض شده است که به‌صورت کامل می‌باشند.

$$V(i, \cdot) = \begin{cases} C_{cm} & i = m \\ C_{pm} & i \neq m \end{cases} \quad (۵)$$

در حالتی که فقط نت اصلاحی وجود دارد معادلات مربوط به فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی به‌صورت زیر می‌باشند:

$$V(i, t) = \min_{u \in K} \left\{ \pi_0 \cdot y_t + \pi_1 \cdot \max\{0, \varphi_t - \omega_u\} - \pi_2 \cdot \max\{0, \omega_u - \varphi_t\} + \sum_{j=i}^m P_{ij}^k V(j, t - 1) \right\} \quad \forall i \neq m; t \in \{1, 2, 3, \dots, T\} \quad (۶)$$

$$y_t = \begin{cases} 1 & \text{if } \varphi_t > \omega_u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

معادله (۶) همانند معادله (۳) می‌باشد با این تفاوت که در این حالت زمانی که سیستم در حالت عملیاتی می‌باشد تنها اقدام تغییر نرخ تولید وجود دارد. معادله (۴) در این حالت بدون تغییر خواهد ماند.

$$V(i, \cdot) = C_{cm} \quad (۷)$$

معادله (۵) نیز به‌صورت معادله (۷) تبدیل شده و به این معنی است که هرگاه به انتهای افق برنامه‌ریزی برسیم، اقدامات نت اصلاحی بر روی سیستم اجرا خواهد شد و در ابتدای افق برنامه‌ریزی بعدی وضعیت سیستم به‌صورت نو بودن شروع به کار خواهد کرد.

۳-۱-۴. روش حل پیشنهادی

در مسأله ارائه شده باید در هر حالت تصمیمات مرتبط با آن حالت گرفته شود بنابراین این مسأله از نوع مسائل تصمیم‌گیری متوالی^۱ خواهد بود. علاوه بر این باتوجه به این که در هر مرحله وضعیت سیستم تنها به وضعیت گذشته بستگی دارد و یا این که وضعیت آینده تنها به وضعیت حال بستگی دارد، بنابراین مسأله با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف (MDP) مدل‌سازی خواهد شد. یک MDP شامل یک سری فضای حالت^۲ محدود، یک سری اقدامات^۳ وابسته به هر حالت، تابع پاداش^۴ دریافتی نسبت به اقدام انجام شده، احتمالات انتقال^۵ وابسته به حالت و اقدام و یک نرخ تنزیل^۶ است. بنابراین ابتدا مسأله را به فرمت یک مدل MDP تبدیل کرده و سپس با استفاده از

$$P^k = \begin{pmatrix} p_{0,0}^k & p_{0,1}^k & p_{0,2}^k & \dots & p_{0,m-1}^k & p_{0,m}^k \\ 0 & p_{1,1}^k & & & p_{1,m-1}^k & p_{1,m}^k \\ 0 & 0 & p_{2,2}^k & & p_{2,m-1}^k & p_{2,m}^k \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{m-1,m-1}^k & p_{m-1,m}^k \\ 0 & 0 & & & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (۲)$$

ماتریس بالا به‌صورت بالا مثلثی می‌باشد به این معنی که وضعیت خرابی سیستم به‌خودی خود بهبود پیدا نمی‌کند و سیستم در همان وضعیت باقی خواهد ماند و یا این که وضعیت خرابی آن بدتر خواهد شد به عبارت دیگر: $p_{i,j}^k = 0$ for $j < i$

تنها اقدام جهت بهبود وضعیت سیستم انجام عملیات نت بر روی آن می‌باشد. در ماتریس بالا همان‌طور که گفته شد، فرض می‌شود که سیستم به k سطح می‌تواند تولید داشته باشد و این انتظار وجود دارد که هر چقدر k بزرگتر باشد خرابی سیستم زودتر اتفاق بیفتد.

لازم به ذکر است که احتمالات انتقال را هم می‌توان از طریق توزیع‌های احتمالی به‌دست آورد و هم این که ثابت در نظر گرفت که در این تحقیق به‌صورت ثابت در نظر گرفته خواهد شد. درایه‌های ماتریس بالا احتمال انتقال سیستم با خرابی مشخص به حالت دیگر را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، $p_{0,2}^k$ بیانگر احتمال انتقال سیستم از حالت صفر به حالت ۲ زمانی که نرخ تولید در سطح k است، می‌باشد.

در ادامه باتوجه به پارامترهای تعریف شده به ارائه توابع بازگشتی و محاسبه ارزش هر حالت پرداخته شده است. مسأله ارائه شده را در دو حالت، زمانی که استراتژی نت پیش‌گیرانه وجود دارد و حالت عدم وجود نت پیش‌گیرانه بررسی خواهیم کرد.

عادل (۳) مربوط به حالتی می‌باشد که در آن سیستم در وضعیت عملیاتی بوده ($i < m$) و t دوره تا پایان افق برنامه‌ریزی باقی مانده است. در انتهای هر دوره با یک احتمال انتقال ثابتی که به نرخ تولید بستگی دارد، وضعیت خرابی سیستم به وضعیت دیگری منتقل می‌شود. در این حالت تا زمانی که وضعیت سیستم در حالت عملیاتی باشد ($i < m$)، علاوه بر تصمیم به تغییر در نرخ تولید، می‌توان نت پیش‌گیرانه را نیز بر روی سیستم اعمال کرد که نحوه انتخاب تغییر در نرخ تولید و یا انجام عملیات نت پیش‌گیرانه توسط مقایسه هزینه‌ها در هر حالت به‌دست خواهد آمد و اگر تصمیم به انجام عملیات نت پیش‌گیرانه شود، بعد از گذشت یک دوره سیستم با وضعیت نو بودن در دسترس خواهد بود.

$$V(i, t) = \min_{u \in K} \left\{ \pi_0 \cdot y_t + \pi_1 \cdot \max\{0, \varphi_t - \omega_u\} - \pi_2 \cdot \max\{0, \omega_u - \varphi_t\} + \sum_{j=i}^m P_{ij}^k V(j, t - 1) \right\}, C_{pm} + \pi_0 + \pi_1 * \varphi_j + V(0, t - 1) \quad \forall i \neq m; t \in \{1, 2, 3, \dots, T\} \quad (۳)$$

$$y_t = \begin{cases} 1 & \text{if } \varphi_t > \omega_u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

4. Reward Function
5. Transition Function
6. Discount Factor

1. Sequential decision making problems
2. State
3. Action

استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم با به‌روزرسانی‌های متوالی مقادیر ارزش، تضمین می‌کند که مقدار ارزش نهایی به مقدار ارزش واقعی که بیانگر میزان مطلوبیت یک حالت است، نزدیک شود. بنابراین، الگوریتم تکرار ارزش به‌عنوان روشی مبتنی بر ارزش شناخته می‌شود که بر اصل ارزیابی مکرر حالت‌ها و اصلاح مقادیر آن‌ها استوار است. روند اجرای این الگوریتم در سه مرحله کلی مقداردهی اولیه، به‌روزرسانی تکراری ارزش‌ها و استخراج سیاست بهینه خلاصه می‌شود. در جدول (۲) شبه‌کد الگوریتم تکرار ارزش ارائه شده است.

۴. ارائه مثال عددی

فرض شده است که یک سیستم تولیدی تک‌مؤلفه داریم که می‌تواند با پنج سطح، تولید داشته باشد ($K = 5$). به عبارت دیگر این سیستم می‌تواند نرخ تولیدی برابر با ۰، ۰.۲۵، ۰.۵۰، ۰.۷۵ و یا ۱.۰۰ حداکثر توان خود تولید داشته باشد. در این مسئله فرض شده است که افق برنامه‌ریزی شامل ۱۰ دوره می‌باشد که در هر دوره یک سفارش از پیش تعیین شده در سیستم وجود دارد. در هر دوره در صورت عدم پاسخ‌گویی به تقاضا سیستم مشمول یک جریمه کلی $\pi_0 = 10$ واحد پولی و به‌ازای هر واحد کمبود جریمه برابر با $\pi_1 = 2$ در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر اگر تقاضا برآورده شود یک پاداش کلی برابر با $\pi_2 = 3$ واحد پولی به سیستم می‌رسد. هزینه‌های نت هم به‌صورت $C_{CM} = 1000$ و $C_{PM} = 500$ واحد پولی می‌باشد. فرض می‌شود که سیستم در ابتدای افق برنامه‌ریزی با وضعیت نو بودن شروع به‌کار کرده و سپس در انتهای افق برنامه‌ریزی نیز باید عملیات نت انجام شود تا در افق برنامه‌ریزی بعدی سیستم در حالت نو بودن در دسترس باشد. سطوح خرابی در مثال ارائه شده برابر با $m \in \{0, 1, 2, 3\}$ در نظر گرفته شده است که در آن $m = 3$ به معنی این است که سیستم از کار افتاده و حالت $m = 0$ به این معنی است که سیستم در حالت نو بودن می‌باشد. ماتریس احتمالات انتقال با توجه به وضعیت خرابی سیستم به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$P^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.15 & 0.05 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^3 = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.45 & 0.25 & 0.15 \\ 0 & 0.15 & 0.5 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0.15 & 0.85 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

الگوریتم‌های موجود در یادگیری تقویتی، مانند الگوریتم تکرار ارزش^۱، تکرار سیاست^۲، Q-Learning و... مدل را حل و سیاست بهینه مشترک نت و تولید را برای افق برنامه‌ریزی به‌دست آورد. فرآیندهای تصمیم‌مارکوف معمولاً برای مسائل زمان گسسته با تعداد محدودی از حالت‌ها استفاده می‌شوند.

در دنیای امروز، هوش مصنوعی^۳ به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته و روزافزون، در انواع صنایع و زمینه‌های مختلف مانند بهداشت و درمان، شرکت‌های خدماتی، بازارهای مالی و... به‌کار گرفته می‌شود. در صنعت نیز هوش مصنوعی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند و به‌جهت بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها به‌کار می‌رود. یادگیری تقویتی^۴ یکی از حوزه‌های اصلی در علوم کامپیوتر، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است که در حل مسائل مربوط به صنعت نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. این نوع یادگیری به ماشین‌ها این امکان را می‌دهد که از تجربیات خود در تعامل با محیط یاد بگیرند و تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.

در مجموع، تولید هوشمند و به‌کارگیری فناوری‌های نوین نظیر یادگیری تقویتی، نه تنها امکان بهبود کیفیت و کارایی را فراهم می‌آورد، بلکه موجب ارتقاء توان رقابتی صنایع در عصر دیجیتال و افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها در مواجهه با تغییرات سریع و نیازهای متنوع مشتریان نیز می‌شود. این امر نشان‌دهنده تحول بنیادی در مدیریت و بهینه‌سازی عملیات تولیدی است که با سرعت به‌سوی تکامل و نوآوری بیشتر پیش می‌رود.

جدول (۲). شبه‌کد الگوریتم تکرار ارزش [۴۷]

$V_0(s) \leftarrow 0$	$\forall s \in S$
$V_1(s) \leftarrow R(s, a)$	$\forall s \in S \quad \forall a \in A$
$t \leftarrow 1$	
while $\exists s \in S$ such that $ V_t(s) - V_{t-1}(s) > \epsilon$	
for all $s \in S$	
for all $a \in A$	
$Q(s, a) \leftarrow R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') V_{t-1}(s')$	
$V_t(s) \leftarrow \max_a Q(s, a)$	
$\pi(s) \leftarrow \arg \max_a Q(s, a)$	
$t \leftarrow t + 1$	

الگوریتم تکرار ارزش یکی از روش‌های بنیادی در حوزه یادگیری تقویتی و کنترل بهینه است که به‌منظور حل مسائل تصمیم‌گیری در محیط‌های نامطمئن به‌کار گرفته می‌شود. این الگوریتم بر مبنای فرآیندهای تصمیم‌گیری مارکوفی عمل کرده و هدف آن یافتن سیاست بهینه برای عامل تصمیم‌گیرنده است. سیاست بهینه، دنباله‌ای از اقدامات را شامل می‌شود که منجر به حداکثرسازی ارزش تجمعی پاداش در طول زمان می‌شود. در الگوریتم تکرار ارزش، به‌جای تلاش برای یادگیری مستقیم یک سیاست، ابتدا ارزش هر حالت برآورد می‌شود. سپس این ارزش‌ها به‌منظور استخراج یک سیاست بهینه مورد

پیش‌گیرانه بر روی سیستم اجرا شود.

همان‌طور که در تعریف مسئله به آن اشاره شد و در جدول نیز نشان داده شده است، سیستم در انتهای افق برنامه‌ریزی یعنی $\forall m(0, m)$ و هنگامی که سیستم در وضعیت خرابی قرار دارد یعنی $\forall t(3, t)$ ، چون سیستم از کار افتاده و متوقف شده است، پس سیاست بهینه در این حالت انجام عملیات نت بر روی سیستم می‌باشد که باتوجه به وضعیت خرابی سیستم و مفروضات گفته شده، نوع استراتژی نت در جدول ارائه شده است.

در جدول (۵) نیز همانند جدول (۴) سیاست‌های بهینه باتوجه به آنالیز هزینه درحالتی که نت پیش‌گیرانه وجود ندارد اتخاذ شده است. همان‌طور که گفته شد در این حالت تا زمانی که سیستم در حالت عملیاتی می‌باشد تنها تصمیم به‌جهت کنترل میزان خرابی سیستم، تغییر در نرخ تولید می‌باشد. به‌عنوان مثال، در حالت (2, 4) تصمیم گرفته شده است که سیستم با سطح ۲ تولید داشته باشد؛ به‌عبارت دیگر سیستم با نرخ ۵۰٪ تولید خواهد داشت.

جدول (۵). سیاست بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت عدم وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	CM	۴	۴	۱	۲	۱	۱	۴	۱	۳	۴
۱	CM	۴	۴	۱	۲	۱	۱	۴	۱	۳	۴
۲	CM	۴	۴	۱	۲	۱	۱	۴	۱	۳	۴
۳	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM

همانند جدول (۴)، هرگاه به انتهای افق برنامه‌ریزی برسیم و هنگامی که سیستم از کار افتاده است، باید عملیات نت بر روی سیستم اجرا شود، که باتوجه به این که در این حالت تنها استراتژی نت اصلاحی داریم، پس در حالت‌های گفته شده باید عملیات نت اصلاحی بر روی سیستم اجرا شود.

در جدول (۱۲) و (۱۳) مقدار ارزش بهینه هر حالت در صورت وجود نت پیش‌گیرانه و عدم وجود آن نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اعداد نوشته شده در این جدول بیانگر هزینه هر حالت می‌باشد که در ادامه به تحلیل آن پرداخته می‌شود.

در جدول (۱۲) ارزش بهینه برای حالتی که نت پیش‌گیرانه وجود دارد نوشته شده است. به‌عنوان مثال ارزش بهینه حالت (1,4) که همان هزینه آن می‌باشد برابر با ۴۸۳/۱۵ واحد پولی است.

در جدول (۱۳) نیز ارزش بهینه زمانی که نت پیش‌گیرانه وجود ندارد ارائه شده است. با مقایسه مقادیر دو جدول فوق به این نتیجه خواهیم رسید که وجود سیاست نت پیش‌گیرانه در سیستم باعث می‌شود که در اغلب موارد هزینه‌های سیستم کاهش یابد و درحالت کلی هزینه‌های سیستم زمانی که نت پیش‌گیرانه در نظر گرفته خواهد شد؛ کوچکتر مساوی حالتی است که نت پیش‌گیرانه وجود ندارد. نمودار (۱) نیز این نتیجه را برای حالتی که خرابی سیستم در وضعیت صفر است ($m=0$)، در طول افق برنامه‌ریزی نشان داده و به مقایسه هردو حالت پرداخته است.

$$P^4 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.5 & 0.3 & 0.15 \\ 0 & 0.05 & 0.55 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.95 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

در ماتریس‌های احتمال انتقال ارائه شده فرض ارتباط نرخ تولید و نرخ خرابی رعایت شده است. P^0 ماتریس انتقال درحالتی است که نرخ تولید صفر است و به‌عبارت دیگر تولید متوقف می‌شود. این ماتریس همانی است بدین معنا که در صورتی که دستگاه تولید نداشته باشد سطح خرابی در دوره‌های بعد ثابت باقی خواهند ماند. با افزایش نرخ تولید از سطح صفر به سمت حداکثر (که در این مثال سطح تولید ۴ است) سیستم به‌صورت احتمالی زودتر خراب می‌شود و در ماتریس‌های ارائه شده فوق این موضوع در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که تقاضا در هر دوره به‌صورت ازپیش تعیین شده می‌باشد که در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳). میزان تقاضا در هر دوره

t	۱	۲	۳	۴	۵
φ_t	۱۵۰۰	۸۵۰	۱۸۰	۵۰۰	۲۰۰
t	۶	۷	۸	۹	۱۰
φ_t	۲۵۰	۱۴۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۲۵۰۰

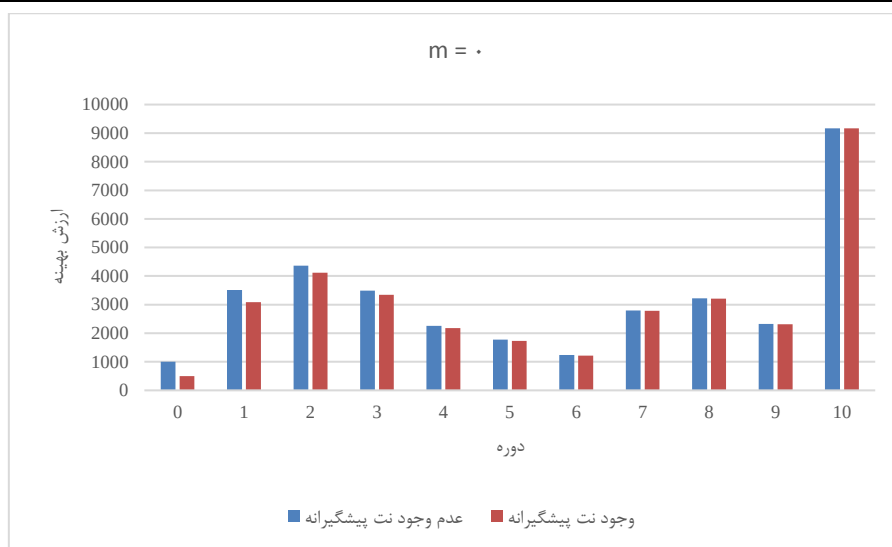
مسئله ارائه شده در دو حالت زمانی که نت اصلاحی و پیش‌گیرانه داریم و زمانی که تنها نت اصلاحی موجود است با استفاده از الگوریتم تکرار ارزش حل و نتایج حاصله در ادامه ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به ارائه سیاست‌های بهینه در هر حالت پرداخته خواهد شد.

جدول (۴). سیاست بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	PM	۴	۴	۱	۲	۱	۱	۴	۱	۳	۴
۱	PM	۴	۴	PM	۲	۱	۱	۴	PM	۳	۴
۲	PM	۴	۴	۱	۲	PM	PM	۴	PM	۳	۴
۳	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM

در جدول (۴) سیاست‌های بهینه برای حالتی که نت پیش‌گیرانه وجود دارد، ارائه شده است. در این حالت همان‌طور که گفته شد هرگاه سیستم در حالت عملیاتی باشد دو تصمیم می‌تواند اتخاذ گردد، یا این که نرخ تولید تغییر یابد و یا این که نت پیش‌گیرانه بر روی سیستم اجرا شود که باتوجه به آنالیز هزینه سیاست بهینه انتخاب شده است. به‌عنوان مثال هنگامی که سیستم در حالت (۰,۷) می‌باشد، یعنی وضعیت خرابی سیستم درحالت نو بودن و ۷ دوره تا اتمام افق برنامه‌ریزی باقی مانده است. در این حالت از بین تغییر نرخ تولید و یا انجام عملیات نت پیش‌گیرانه، تصمیم گرفته شده است که نرخ تولید تغییر یابد و سیستم با حداکثر توان یعنی سطح ۴ تولید داشته باشد. به‌عبارت دیگر در این حالت نرخ تولید برابر با ۱۰۰٪ می‌باشد. لازم به ذکر است در حالت‌هایی که سیاست بهینه PM انتخاب شده است به‌معنی این است که در این حالت تصمیم گرفته شده که عملیات نت



نمودار (۱). مقایسه هزینه‌های سیستم در دو حالت وجود و عدم وجود نت پیشگیرانه

فرض می‌کنیم که افق برنامه‌ریزی محدود و دارای ۶ دوره می‌باشد و در هر دوره یک تقاضا از پیش تعیین شده در سیستم وجود دارد که در جدول (۶) ارائه شده است. سایر پارامترهای استفاده شده در این مسأله به صورت جدول (۷) می‌باشد.

جدول (۶). میزان تقاضا در هر دوره

t	۱	۲	۳	۴	۵	۶
φ_t	۷۰۰	۲۵۰	۱۴۰۰	۱۵۰۰	۱۱۵	۸۵۰

جدول (۷). پارامترهای مورد استفاده در مسأله

C_{CM}	C_{PM}	π_0	π_1	π_2
۲۰۰۰	۲۰۰	۵	۰/۵	۱

مسأله ارائه شده به وسیله الگوریتم تکرار ارزش حل شده است و سیاست‌ها و ارزش بهینه در دو حالت وجود و عدم وجود نت پیشگیرانه نمایش داده شده است. در جداول (۸) و (۹) سیاست‌های بهینه در هر دو حالت ارائه شده است و همان‌طور که در مثال قبل نیز گفته شد منظور از PM انجام عملیات نت پیشگیرانه و CM به معنی انجام عملیات نت اصلاحی می‌باشد.

در جداول (۱۰) و (۱۱) مقدار ارزش بهینه برای هر دو حالت نمایش داده شده است. باتوجه به جداول ارائه شده، ارزش بهینه در حالتی که نت پیشگیرانه وجود ندارد بیشتر از حالتی است که نت پیشگیرانه وجود دارد. استفاده از نت پیشگیرانه علاوه بر کاهش هزینه‌ها، بهبود بهره‌وری سیستم، کاهش ریسک خرابی‌های شدید، و افزایش طول عمر تجهیزات را به دنبال دارد. بنابراین، منطقی است در سیستم‌هایی که تنها بر نت اصلاحی تکیه می‌کنند، هزینه‌ها به دلیل ریسک بالاتر خرابی و توقف‌های ناگهانی بیشتر باشد. نمودار (۲) نیز این واقعیت را برای هر دو حالت زمانی که وضعیت خرابی سیستم برابر با ۲ می‌باشد ($m=2$)، نشان می‌دهد.

۵- ارائه مثال کاربردی

در منبع [۴۸]، کاربرد تصمیمات مشترک برنامه‌ریزی تولید و نت مبتنی بر شرایط جهت کنترل نرخ تولید یک سیستم اکسترودر مورد بررسی قرار گرفته است. یک اکسترودر با استفاده از یک قطعه چرخشی به نام ماردون برای انتقال مواد خام پلاستیکی ذوب شده از طریق یک سیلندر، درب بطری‌ها را تولید می‌کند. به دلیل سایش ماردون، مواد ذوب شده ممکن است به داخل سیلندر نشت کند و سپس یک مقاومت حرارتی برای خنک کردن فعال می‌شود. از این رو، میانگین فرکانس استفاده روزانه از مقاومت حرارتی به عنوان یک سیگنال جهت نظارت بر وضعیت سیستم استفاده می‌شود. داده‌های مربوط به میزان خرابی یک اکسترودر در یک کارخانه ایتالیایی از تاریخ انجام بازرسی در ژوئیه ۲۰۱۷ تا ژوئیه ۲۰۱۹ جمع‌آوری شده است. در طول دوره مطالعه، سرعت چرخش ماردون و میزان تخریب (استفاده از مقاومت حرارتی) در هر ماه ثبت شده است. بنابراین در مجموع ۲۴ مشاهده وجود دارد. در مثال ارائه شده آستانه خرابی برابر با ۴ در نظر گرفته و فرض شده است که ماردون می‌تواند با سه سرعت بچرخد ($K=3$) و یا به عبارت دیگر نرخ تولید آن برابر با ۰/۵ و ۱ می‌باشد. بنابراین ماتریس احتمال انتقال نیز باتوجه به رابطه بین سرعت چرخش ماردون و میزان خرابی که در منبع [۴۸] ارائه شده است به صورت زیر می‌باشد.

$$P^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P^1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

جدول (۱۰). ارزش بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۰	۲۰۰	۲۹۵	۴۲۵	۵۶۹	۷۰۶	۷۶۹	۷۴۷
۱	۲۰۰	۲۸۵	۴۱۵	۴۹۱	۵۹۱	۶۵۴	۵۵۹
۲	۲۰۰	۱۸۵	۳۱۵	۳۳۱	۳۸۷	۴۴۹	۳۲۹
۳	۲۰۰	۱۰۵	۱۳۰	۲۰۵	۲۵۵	۶۲	۱۵۰
۴	۲۰۰۰	۲۵۵۵	۲۴۲۵	۳۱۳۰	۳۳۲۴	۲۷۶۹	۳۱۹۹

جدول (۸). سیاست بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۰	PM	۱	PM	۲	۲	PM	۲
۱	PM	۱	PM	۲	۲	PM	۲
۲	PM	۱	PM	۲	۲	PM	۲
۳	PM	۱	PM	۲	۲	۰	۲
۴	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM

جدول (۱۱). ارزش بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت عدم وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۰	۲۰۰۰	۲۰۰۵	۱۸۰۹	۱۴۴۹	۱۲۱۵	۱۲۱۲	۹۹۸
۱	۲۰۰۰	۱۹۰۵	۱۳۰۴	۹۳۶	۸۰۵	۸۶۸	۶۵۸
۲	۲۰۰۰	۹۰۵	۶۱۲	۴۴۹	۴۳۴	۴۹۷	۳۴۸
۳	۲۰۰۰	۱۰۵	۱۳۰	۲۰۵	۲۵۵	۶۲	۱۵۰
۴	۲۰۰۰	۴۳۵۵	۴۱۳۵	۴۵۱۴	۴۲۰۴	۳۲۷۸	۳۶۴۲

جدول (۹). سیاست بهینه برای حالت (x, t)

(در صورت عدم وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۰	CM	۱	۱	۲	۲	۱	۲
۱	CM	۱	۱	۲	۲	۰	۲
۲	CM	۱	۱	۲	۲	۰	۲
۳	CM	۱	۰	۲	۲	۰	۲
۴	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM

جدول (۱۲). مقدار ارزش بهینه هر حالت (x, t)

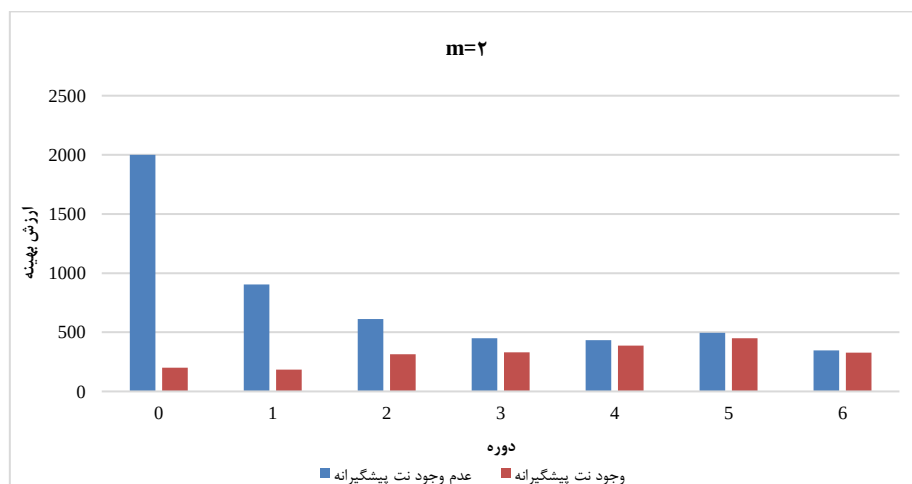
(در صورت وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۵۰۰	۳۰۸۵	۴۱۱۳/۷۵	۳۳۴۲/۹۳	۲۱۷۹/۴۵	۱۷۲۷/۳۲	۱۲۱۳/۱	۲۷۸۹/۱۵	۳۲۱۳/۸۴	۲۳۱۸/۲۶	۹۱۷۱/۷۹
۱	۵۰۰	۲۸۱۰	۱۹۷۱	۱۳۳۰/۵	۴۸۳/۱۵	۳۹۱/۵۷۵	۲۴۰/۷۸۷	۲۰۲۲/۰۴	۲۰۶۴/۰۲	۶۸۴/۶۰۳	۷۶۲۶/۷۳
۲	۵۰۰	۲۳۱۲	۹۹۸	۹۱۴	۳۱۰	۱۵۰	۱۶۵	۱۹۹۸	۱۳۲۴	۴۲۳	۷۳۰۸
۳	۱۰۰۰	۹۰۱۰	۸۳۴۵	۶۰۲۳/۷۵	۶۸۵۲/۹۳	۴۱۸۹/۴۵	۳۹۸۷/۳۲	۹۲۲۳/۱	۴۲۹۹/۱۵	۷۷۲۳/۸۴	۱۵۸۲۸/۳

جدول (۱۳). مقدار ارزش بهینه هر حالت (x, t)

(در صورت عدم وجود نت پیش‌گیرانه)

$t \backslash m$	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۱۰۰۰	۳۵۱۰	۴۳۶۰	۳۴۹۱/۸	۲۲۵۱/۷۴	۱۷۷۱/۵۸	۱۲۳۹/۱۹	۲۷۹۷/۳۷	۳۲۱۹/۲۷	۲۳۲۰/۳۱	۹۱۷۲/۷۱
۱	۱۰۰۰	۳۱۱۰	۱۹۸۶	۱۳۳۸	۴۸۵/۴	۳۹۲/۷	۲۴۱/۳۵	۲۰۲۲/۰۷	۲۰۶۴/۰۳	۶۸۴/۶۰۵	۷۶۲۶/۷۳
۲	۱۰۰۰	۲۵۱۰	۱۱۲۰	۱۰۰۸	۳۲۸	۲۸۷	۲۰۵	۲۰۱۰	۱۵۶۰	۵۸۹	۷۵۱۰
۳	۱۰۰۰	۹۵۱۰	۸۷۷۰	۶۲۷۰	۷۰۰۱/۸	۴۲۶۱/۷۴	۴۰۳۱/۵۸	۹۲۴۹/۱۹	۴۳۰۷/۳۷	۷۷۲۹/۲۷	۱۵۸۳۰/۳



نمودار (۲). مقایسه هزینه‌های سیستم در دو حالت وجود و عدم وجود نت پیش‌گیرانه برای مثال کاربردی

اجزای دیگر سیستم می‌شوند. این وضعیت اغلب موجب فشار بر منابع، کاهش بهره‌وری و در نهایت افزایش هزینه‌ها می‌گردد. از سوی دیگر، تغییر نرخ تولید نیز می‌تواند به عنوان ابزاری مکمل در کنار نت پیش‌گیرانه به کار گرفته شود. کاهش نرخ تولید در دوره‌های اوج استهلاك، فشار بر تجهیزات را کاهش داده و زمان کافی برای اجرای فعالیت‌های نت پیش‌گیرانه فراهم می‌کند. این رویکرد در دوره‌های با تقاضای بالا نیز امکان افزایش نرخ تولید را بدون افزایش ریسک خرابی فراهم می‌سازد، چراکه سیستم پس از انجام نت پیش‌گیرانه در شرایط مطلوب‌تری قرار دارد.

بنابراین از منظر تصمیم‌گیری مدیریتی، ترکیب استراتژی‌های نت پیش‌گیرانه، نت اصلاحی، و تنظیم نرخ تولید، انعطاف‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد و مدیران را قادر می‌سازد منابع سازمان را به صورت بهینه تخصیص دهند. این استراتژی نه تنها هزینه‌های عملیاتی و توقف‌های ناخواسته را کاهش می‌دهد، بلکه موجب افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد کلی سازمان می‌شود. به عنوان تحقیقات آتی می‌توان این مسأله را به یک سیستم با دو مؤلفه بسط داد و یا این که می‌توان تقاضا را به صورت تصادفی در نظر گرفت. همچنین یک فرض اصلی در این مقاله این است که انجام عملیات نت به زمان برنامه‌ریزی نیاز ندارد؛ که به عنوان تحقیقات آتی می‌توان زمان برنامه‌ریزی جهت انجام عملیات نت را نیز به مدل اضافه کرد.

مراجع

- [1] Wireman, T., (2014). *Benchmarking Best practices for maintenance, reliability and asset management*. Industrial Press. ISBN: 978-0831135034
- [2] Blanco, M. I., (2009). The economics of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7): p. 1372-1382. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.004>
- [3] Röckmann, C., S. Lagerveld, and J. Stavenuiter, (2017). *Operation and maintenance costs of offshore wind farms and potential multi-use platforms in the Dutch North Sea. Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene*, p. 97-113. ISBN 978-3-319-51159-7
- [4] Irena, I., 2018(2018). *Renewable power generation costs in 2017. Report*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN: 978-92-9260-040-2
- [5] Feng Y, Qiu Y, Crabtree CJ, Long H, Tavner PJ. (2013). Monitoring wind turbine gearboxes. *Wind energy*. Jul, 16(5):728-40. <https://doi.org/10.1002/we.1521>
- [6] Zhang, T., R. Dwight, and K. El-Akruti. (2015). Condition based maintenance and operation of wind turbines. In: *Engineering Asset Management-Systems, Professional Practices and Certification: Proceedings of the 8th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2013) & the 3rd International Conference on Utility Management & Safety (ICUMAS)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3_87
- [7] Nourelfath, M. and F. Yalaoui, (2012). Integrated load distribution and production planning in series-parallel multi-state systems with failure rate depending on load. *Reliability Engineering & System Safety*, 106: p. 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.06.006>
- [8] Filus, J., (1987). The load optimization of a repairable system with gamma-distributed time-to-failure. *Reliability*

در جدول (۸) سیاست‌های بهینه برای حالتی که استراتژی نت پیش‌گیرانه نیز در کنار تغییر نرخ تولید وجود دارد ارائه شده است. همان‌طور که نمایش داده شده است، استراتژی نت پیش‌گیرانه در طول افق برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گرفته است. میزان استفاده از این استراتژی به صورتی است که تقریباً به‌طور یکنواخت افق برنامه‌ریزی را پوشش داده است و همین امر باعث شده که هزینه‌های سیستم کاهش یابد و وضعیت خرابی سیستم در حالت بهتری باشد زیرا هربار که نت پیش‌گیرانه بر روی سیستم اجرا می‌شود وضعیت سیستم به حالت نو بودن تبدیل خواهد شد. وجود نت پیش‌گیرانه این امکان را فراهم می‌کند که با برنامه‌ریزی دقیق، خرابی‌ها در مراحل ابتدایی شناسایی و رفع شوند. این موضوع نه تنها هزینه‌های مستقیم تعمیرات را کاهش می‌دهد، بلکه از توقف‌های طولانی مدت تولید جلوگیری کرده و بهبود پایداری سیستم را به همراه دارد. همچنین، استفاده از این رویکرد موجب افزایش طول عمر تجهیزات، کاهش استهلاك، و کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری‌های پرهزینه برای تعویض زود هنگام تجهیزات می‌شود.

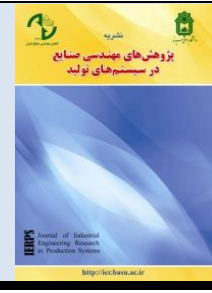
۶. نتیجه‌گیری

در مدیریت و مهندسی ساخت و تولید، تولیدکنندگان همیشه قصد دارند تا سود خود را از طریق برآورده کردن تقاضای مشتریان و مدیریت هزینه‌ها به حداکثر برسانند. برنامه‌ریزی تولید برای افزایش درآمد، سود و رضایت مشتری ضروری است. با توجه به پیچیدگی و ویژگی‌های تجهیزات بزرگ مقیاس، زوال و خرابی آن‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌شود. امروزه با حضور اینترنت اشیا و تکنیک‌های داده‌کاوی، مدیران می‌توانند با تنظیم فرآیند تولید و ایجاد برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پویا، تصمیم‌گیری‌های عملیاتی را بهبود بخشند. در این پژوهش، یک سیستم تک‌مؤلفه با تقاضای پویا و از پیش تعیین شده در نظر گرفته شده است که نرخ تولید با میزان خرابی سیستم ارتباط دارد. مسأله ارائه شده در صورت وجود نت پیش‌گیرانه و عدم وجود آن، به فرم فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مدل‌سازی شده و سپس به وسیله الگوریتم تکرار ارزش سیاست‌های بهینه اتخاذ شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، هزینه‌های کلی سیستم در حالتی که نت پیش‌گیرانه وجود دارد کمتر از حالتی است که این استراتژی وجود ندارد. ترکیب نت پیش‌گیرانه با نت اصلاحی و استراتژی‌های عملیاتی مانند تنظیم نرخ تولید، رویکردی هوشمندانه برای دستیابی به تعادل بین هزینه و بهره‌وری سیستم است. این ترکیب، ضمن کاهش هزینه‌ها، انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم را افزایش می‌دهد و به مدیران کمک می‌کند تا از منابع سازمان به بهترین نحو استفاده کنند. اجرای موفق این استراتژی‌ها نیازمند تحلیل دقیق داده‌ها، هماهنگی بین تیم‌های مختلف و استفاده از ابزارهای مدیریتی پیشرفته است.

نتایج این تحقیق به روشنی نشان می‌دهد که ترکیب استراتژی‌های نت با تغییر نرخ تولید، نه تنها از نظر کاهش هزینه‌ها بلکه از منظر مدیریت سیستم، تأثیرات مثبت قابل توجهی دارد. در سیستمی که تنها به نت اصلاحی وابسته است، خرابی‌های ناگهانی منجر به افزایش هزینه‌های اضطراری، توقف‌های غیرمنتظره، و آسیب‌های گسترده‌تر به

- influence of practical factors on the benefits of condition-based maintenance over time-based maintenance. *Reliability engineering & system safety*, 158: 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.10.002>
- [23] Kim, M.J. and V. Makis, (2013). Joint optimization of sampling and control of partially observable failing systems. *Operations Research*, 61(3): p. 777-790. <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1171>
- [24] Panagiotidou, S. and G. Tagaras, (2010). Statistical process control and condition-based maintenance: A meaningful relationship through data sharing. *Production and operations management*, 19(2): p. 156-171. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01073.x>
- [25] Mula J, Poler R, García-Sabater JP, Lario FC. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International journal of production economics*. 103(1): 271-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.09.001>
- [26] Sethi SP, Yan H, Zhang H, Zhang Q. (2002). Optimal and hierarchical controls in dynamic stochastic manufacturing systems: A survey. *Manufacturing & Service Operations Management*. 4(2): 133-70. <https://doi.org/10.1287/msom.4.2.133.281>
- [27] Francie KA, Jean-Pierre K, Pierre D, Victor S, Vladimir P. (2014). Stochastic optimal control of manufacturing systems under production-dependent failure rates. *International Journal of Production Economics*. 150: 174-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.032>
- [28] Lu, Z., W. Cui, and X. Han, (2015). Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 80: 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.017>
- [29] Hu, J.-Q., P. Vakili, and G.-X. Yu, (1994). Optimality of hedging point policies in the production control of failure prone manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(9): ۱۸۸۰-۱۸۷۵. <https://doi.org/10.1109/9.317116>
- [30] Martinelli, F., (2005). Control of manufacturing systems with a two-value, production-dependent failure rate. *Automatica*, 41(11): 1943-1948. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2005.05.016>
- [31] Martinelli, F., (2007). Optimality of a two-threshold feedback control for a manufacturing system with a production dependent failure rate. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(10): p. 1937-1942. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.906229>
- [32] Martinelli, F., (2007). Manufacturing systems with a production dependent failure rate: structure of optimality. *IEEE Transactions on Automatic Control*, (55)10: 2401-2406. <https://doi.org/10.1109/TAC.2010.2054790>
- [۳۳] رسائی، حسن، فاروقی، هیوا. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر مکانیزم‌های مختلف خرابی فرایندهای تولیدی در مدل‌های یکپارچه نگهداری و تعمیرات و کنترل فرایند آماری با استفاده از طراحی آزمایشات. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید <https://doi.org/10.22084/ier.2023.27913.2130>
- [34] Zied, H., D. Sofiene, and R. Nidhal, (2011). Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate. *International Journal of Production Research*, 49(19): 5695-5712. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.528063>
- [35] Aayed, S., D. Sofiene, and R. Nidhal, (2012). Joint optimisation of maintenance and production policies considering random demand and variable production rate. *International Journal of Production Research*, 50(23): 6870-6885. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.631601>
- Engineering*, 18(4): p. 275-28. [https://doi.org/10.1016/0143-8174\(87\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0143-8174(87)90032-1)
- [9] Ang, C.-W. and C.-K. (2007). Tham, Analysis and optimization of service availability in a HA cluster with load-dependent machine availability. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, 18(9): p. 1307-1319. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2007.1071>
- [10] Iyer, R.K. and D.J. (1986). Rossetti, A measurement-based model for workload dependence of CPU errors. *IEEE Transactions on computers*, 1986. 100(6): p. 511-519. <https://doi.org/10.1109/TC.1986.5009428>
- [11] Dolinšek, S., B. Šuštaršič, and J. Kopáč, (2001). Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. *Wear*, 250(1-12): p. 349-356. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00620-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00620-2)
- [12] Hao L, Liu K, Gebraeel N, Shi J. (2015). Controlling the residual life distribution of parallel unit systems through workload adjustment. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 26;14(2):1042-52. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2481703>
- [13] Sun Q, Ye ZS, Revie M, Walls L. (2019). Reliability modeling of infrastructure load-sharing systems with workload adjustment. *IEEE Transactions on Reliability*. 68(4):1283-95. <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2900845>
- [14] Keizer MC, Teunter RH, Veldman J, Babai MZ. (2018). Condition-based maintenance for systems with economic dependence and load sharing. *International Journal of Production Economics*. 195: 319-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.030>
- [15] Truong-Ba H, Borghesani P, Cholette ME, Ma L. (2020). Optimization of condition-based maintenance considering partial opportunities. *Quality and Reliability Engineering International*. 36(2): 529-46. <https://doi.org/10.1002/qre.2585>
- [۱۶] فاروقی، هیوا، رسائی، حسن، رضائی، سمیه. (۱۴۰۲). ارائه یک مدل ریاضی جهت برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات بر مبنای اطلاعات نمودارهای کنترل با رویکرد زنجیره مارکوف، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید <https://doi.org/10.22084/ier.2024.5571>
- [۱۷] بابایی مراد، سمانه، فتاحی، پرویز، باقری، حسن. (۱۳۹۸). بهینه‌سازی توأم سیاست زمان‌بندی تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن کمبود از نوع پس‌افت و تقاضا به‌صورت احتمالی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید <https://doi.org/10.22084/ier.2019.19543.1870>
- [18] Zheng, R. and V. Makis, (2020). Optimal condition-based maintenance with general repair and two dependent failure modes. *Computers & Industrial Engineering*, 141: p. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106322>
- [19] Park, M. and H. Pham, (2023). Condition-based maintenance for a degradation-shock dependence system under warranty. *International Journal of Production Research*, 61(15): p. 5212-5227. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2099319>
- [20] Ward, T., K. Jenab, and J. Ortega-Moody, (2024). Machine learning models for condition-based maintenance with regular truncated signals. *Decision Science Letters*, 13(1): 197-210. <https://doi.org/10.36001/ijphm.2024.v15i2.3850>
- [21] Bouvard K, Artus S, Béranger C, Cocquempot V. (2011). Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. Application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*. 96(6): 601-10. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.11.009>
- [22] de Jonge, B., R. Teunter, and T. Tinga, (2017). The

- maintenance and production speed optimization under limited maintenance capacity. *Computers & Industrial Engineering*, 179: 109155. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109155>
- [44] Rasay, H., F. Naderkhani, and A. M. Golmohammadi. (2022). *Reinforcement learning based on stochastic dynamic programming for condition-based maintenance of deteriorating production processes*. in 2022 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPHM53196.2022.9815668>
- [45] Drent, C., M. Drent, and J. Arts, (2023). *Condition-Based Production for Stochastically Deteriorating Systems: Optimal Policies and Learning*. arXiv preprint arXiv: 2308.07507, <https://doi.org/10.1287/msom.2022.0473>
- [46] Sun Q, Chen P, Wang X, Ye ZS. (2023). Robust condition-based production and maintenance planning for degradation management. *Production and Operations Management*. 32(12): 3951-67. <https://doi.org/10.1111/poms.14071>
- [47] Zhang, N., Cai, K., Deng, Y., & Zhang, J. (2024). Joint optimization of condition-based maintenance and condition-based production of a single equipment considering random yield and maintenance delay. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109694. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109694>
- [48] Sutton, R. S. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. A Bradford Book. <https://doi.org/10.1017/S0263574799271172>
- [49] Sun, Q., Chen, P., Wang, X., Ye, Z.-S. (2023). Robust condition-based production and maintenance planning for degradation management. *Production and Operations Management* 32(12): 3951–3967 <https://doi.org/10.1111/poms.14071>
- [36] De Jonge, B. and E. Jakobsons, (2018). Optimizing block-based maintenance under random machine usage. *European Journal of Operational Research*, 265(2): 703-709. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.051>
- [37] Liu B, Wu S, Xie M, Kuo W. (2017). A condition-based maintenance policy for degrading systems with age-and state-dependent operating cost. *European Journal of Operational Research*. Dec 16;263(3):879-87. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.006>
- [38] Makis, V. and X. Jiang, (2003). Optimal replacement under partial observations. *Mathematics of operations research*, 28(2): 382-394. <https://doi.org/10.1287/moor.28.2.382.14484>
- [39] Sloan, T.W. and J.G. Shanthikumar, (2000). Combined production and maintenance scheduling for a multiple-product, single-machine production system. *Production and Operations Management*, 9(4): p. 379-399. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2000.tb00465.x>
- [40] Kazaz, B. and T. W. Sloan, (2013). The impact of process deterioration on production and maintenance policies. *European Journal of Operational Research*, 227(1): p. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.052>
- [41] uit het Broek MA, Teunter RH, De Jonge B, Veldman J. (2021). Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization. *Reliability Engineering & System Safety*. 214: 107743. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107743>
- [42] Broek MA, Teunter RH, De Jonge B, Veldman J. (2021). Joint condition-based maintenance and load-sharing optimization for two-unit systems with economic dependency. *European Journal of Operational Research*. 295(3): 1119-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.044>
- [43] Koopmans, M. and B. de Jonge, (2023). Condition-based



Joint Condition-Based Maintenance and Condition-Based Production Optimization in Production System with Finite Planning Horizon and Predetermined Demand

Pourya Mohammadipour¹, Hiwa Farughi^{2*}, Hasan Rasay³

¹ PhD student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

² Professor Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³ Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Management, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 - 10 - 2024

Revised: 9 - 12 - 2024

Accepted: 7 - 1 - 2025

Keywords:

Condition-Based Maintenance
Condition-Based Production
Condition Monitoring
Markov Decision Process
Reinforcement Learning
Value Iteration Algorithm

ABSTRACT

The goal of management in a production system is to reduce the overall maintenance costs and increase the availability or reliability of the system. Given that maintenance costs have become a large part of system life cycle costs, these measures are becoming more complex and important. Condition-based maintenance is one of the most common types of maintenance strategies that suggest actions based on monitoring the system's condition. Recent developments in the field of sensors and the Internet of Things increasingly enable remote monitoring and control of production equipment in real time. Organizations can take advantage of these opportunities to reduce costs and increase reliability by using condition-based maintenance policies. In addition to maintenance actions, another suggested option to control system failure rates, reduce costs, and increase system reliability and availability is to adopt condition-based production policies that control equipment failure through dynamic adaptation of production rates. In this paper, condition-based maintenance and production in a system with fixed demand is introduced, which integrates both maintenance and production policies. Integrating production decisions into a condition-based maintenance policy reduces the risk of system failure and causes fewer maintenance actions to be taken, thereby reducing overall system costs. This problem is modeled by the Markov decision process and then by the value iteration algorithm, the optimal policies are adopted for each state.

* Corresponding author. H. Farughi
Tel.: 087-33660073; E-mail address: h.farughi@uok.ac.ir