



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Joint Production and Maintenance Planning Given the Effects of Imperfect Maintenance on the Amount of Defective Products

Parviz Rahimi Kakehjoob ^a, Hiwa Farughi ^{a,*}, Hasan Rasay ^b

^a Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

^b Department of Industrial Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-25

Revised: 2024-11-07

Accepted: 2025-02-02

Keywords:

Markov Decision process;
Stochastic dynamic programming;
Joint production and maintenance planning;
Imperfect maintenance;
Single-product system.

ABSTRACT

In order to plan production systems correctly and optimally, it is necessary to examine the maintenance policy, taking into account various factors such as time and cost, production rate and its effects on machine deterioration, etc. In this research, an attempt is made to jointly plan the production and maintenance process in a multi-period single-product system, considering the production capacity limitation and the effect of imperfect maintenance on reducing the probability of producing nonconforming products. For this purpose, by defining a set of states, actions, and rewards appropriate to each action, the problem is modeled in the Markov decision process framework. To determine the best action in each possible state of the problem, the stochastic dynamic programming technique is used. By solving the problem, a decision will be made regarding whether to perform imperfect maintenance and to determine the best production volume for each period. The goal is to determine the maintenance policy and optimal production volume in each period for different states in such a way that total demand can be covered during the allowed production periods at the lowest cost. The results indicate the effectiveness of the model in providing a suitable program for production and maintenance management in the given system. This issue is investigated by solving a numerical example and analyzing the effects of changing parameters on the results of the problem. If the cost of imperfect maintenance exceeds a certain threshold, increasing the probability of producing defective products is preferable to spending maintenance costs.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34245.2674>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: h.farughi@uok.ac.ir

How to cite this article:

P. Rahimi Kakehjoob, H. Farughi and H. Rasay, "Joint production and maintenance planning given the effects of imperfect maintenance on the amount of defective products," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 57-84, doi: 10.22075/jme.2025.34245.2674

برنامه ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات با هدف تأثیر تعمیرات ناقص بر میزان تولید محصولات معیوب

پرویز رحیمی کاکه جوب^۱، هیوا فاروقی^{۱*}، حسن رسائی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴	
واژگان کلیدی: فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی، برنامه‌ریزی پویای تصادفی، برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات، نگهداری و تعمیرات ناقص، سیستم تولید تک‌محصولی.	به منظور برنامه‌ریزی صحیح و بهینه سیستم‌های تولیدی، لازم است سیاست نگهداری و تعمیرات، با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله زمان و هزینه، میزان تولید و اثرات آن بر فرسایش ماشین‌آلات و ... مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش سعی بر آنست که به صورت توأمان روند تولید و تعمیرات در یک سیستم تک‌محصولی چنددوره‌ای، با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تولید و همچنین اثر تعمیرات ناقص بر کاهش احتمال تولید محصولات معیوب، برنامه‌ریزی شود. بدین منظور، با تعریف مجموعه حالات و اقدامات و پاداش‌های متناسب با هر اقدام، مسئله در قالب یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی مدل شده و برای حل آن و به عبارتی تعیین بهترین اقدام در هر حالت ممکن از مسئله، از تکنیک برنامه‌ریزی پویای تصادفی استفاده شده است. با حل مسئله در خصوص انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص و تعیین بهترین حجم تولید برای هر دوره تصمیم‌گیری خواهد شد. هدف، تعیین رویکرد تعمیرات و همچنین تعیین حجم بهینه تولید در هر دوره به ازای حالات مختلف، به گونه‌ای است که بتوان در طول دوره‌های مجاز تولید، با کمترین هزینه، کل تقاضا را پوشش داد. نتایج حاکی از اثربخشی مدل در ارائه یک برنامه مناسب برای مدیریت تولید و تعمیرات در سیستم مفروض می‌باشد. این موضوع ضمن حل یک مثال عددی، بررسی شده و تحلیل اثرات تغییر پارامترها بر نتایج مسئله ارائه شده است. چنانچه هزینه تعمیرات ناقص از مرز مشخصی عبور نماید، افزایش احتمال تولید محصولات معیوب نسبت به صرف هزینه‌های تعمیراتی ارجحیت دارد.
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.34245.2674	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

مدیریت بهینه سیستم‌های تولیدی، نیازمند برنامه‌ریزی درست در زمینه‌های متعدد و مختلفی مانند تولید، نگهداری و تعمیرات، موجودی و ... می‌باشد. لحاظ کردن روابط و اثرات متقابل این زمینه‌ها بر یکدیگر، ضروری بوده و ارائه برنامه‌های کارآمد را با چالش مواجه می‌نماید.

برنامه‌ریزی تولید، فرآیند تصمیم‌گیری بر روی منابعی است که سازمان برای عملیات تولیدی آتی خود به آن نیاز دارد. این برنامه‌ریزی، معمولاً در سه سطح انجام می‌پذیرد: سطح استراتژیک (بلند مدت)، سطح تاکتیکی (تولید تجمیعی و انبوه) و سطح عملیاتی (زمانبندی تولید) [۱]. برنامه‌ریزی تولید به دنبال تعیین اینست که چه چیزی، چه وقت و به

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.farughi@uok.ac.ir

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

استناد به این مقاله:

پرویز رحیمی کاکه جوب، هیوا فاروقی و حسن رسائی، "برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات با هدف تأثیر تعمیرات ناقص بر میزان تولید محصولات معیوب"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۵۷-۸۴، doi: 10.22075/jme.2025.34245.2674

و اولیه در ابتدای دوره) و همچنین حجم تولید در دوره جاری تصمیم‌گیری نماید. با توجه به ماهیت دوره‌ای مسئله و نیاز به اخذ تصمیمات متوالی و همچنین وجود عدم قطعیت در مواجهه با حالات مختلف تعریف شده برای مسئله، یکی از رویکردهای مناسب برای تعیین سیاست بهینه^۴، فرمول‌بندی و تحلیل مسئله در قالب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی^۵ می‌باشد.

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

برنامه‌ریزی تولید، یکی از ضروریات مدیریت بهینه سیستم‌های تولیدی به شمار می‌رود. با اینحال، بدون توجه به سایر عوامل مؤثر بر عملکرد بهینه سیستم‌های تولیدی، از جمله عملیات نگهداری و تعمیرات، تدوین این برنامه، با چالش مواجه بوده و با گذر زمان و افزایش فرسودگی ماشین‌آلات تولیدی، کارایی خود را از دست خواهد داد. انجام انواع عملیات نگهداری و تعمیرات بر روی سیستم‌های تولیدی نیز همواره با صرف هزینه‌های قابل توجهی همراه بوده و علیرغم تأثیرات مثبت آن بر عملکرد آتی سیستم، تکرار مستمر این عملیات و تحمیل هزینه‌های ناشی از آن به سیستم، توجیه‌پذیر نبوده و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و پویا برای هماهنگی با سایر جوانب تولید و تعدیل هزینه‌های مربوطه می‌باشد. به عبارتی، لازم است سیاست‌های بهینه نگهداری و تعمیرات سیستم، با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله زمان لازم برای انجام تعمیرات، هزینه هر نوع تعمیرات، میزان تولید در هر دوره و اثرات آن بر فرآیند فرسایش ماشین‌آلات تولیدی، وضعیت موجودی قطعات یدکی، تقاضای مشتریان و تعهدات تولیدی و ... مورد بررسی قرار گیرد. برنامه‌ریزی توأم عملیات تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی، یکی از رویکردهای مناسب برای مواجهه با چالش فوق‌الشاره می‌باشد.

۱-۳- هدف و نوآوری تحقیق

هدف از این پژوهش، ارائه یک سیاست بهینه برای برنامه‌ریزی توأم تولید و تعمیرات یک سیستم تولیدی تک‌محصولی تحت شرایط و مفروضات خاص مسئله می‌باشد. تولید کننده، متعهد به تأمین مقدار معینی از تقاضا در یک افق زمانی محدود بوده و تولید محصولات معیوب و خارج از استاندارد در این سیستم، اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. تصمیم‌گیرنده به منظور تأمین تقاضای مشتریان تحت

چه مقدار تولید شود تا نیازهای مشتریان را بدون تحمیل هزینه‌های زیاد در نگهداری موجودی و یا از دست رفتن سفارشات برآورده سازد. زمانبندی تولید نیز نحوه‌ی دستیابی به اهداف تعیین شده در برنامه تولید را با لحاظ کردن محدودیت در منابع دنبال می‌کند [۲].

در محیط‌های واقعی تولید، ماشین‌ها خراب می‌شوند و ممکن است در برخی اوقات در دسترس نباشند. بنابراین برنامه‌ریزی تولید بر روی ماشین‌ها بدون لحاظ کردن خرابی و فرسایش ماشین‌آلات، بهینه نمی‌باشد. نگهداری و تعمیرات، شامل تمام فعالیت‌های فنی و مدیریتی در طول حیات یک تجهیز است که هدف آن نگهداری و یا برگرداندن^۳ تجهیز به حالتی است که بتواند کارهای مورد انتظار را در سطح قابل قبولی از کیفیت به انجام برساند. در برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، زمانبندی تعمیرات ماشین برای پیشگیری از خرابی ناگهانی تجهیزات انجام می‌شود. زمانی که ماشین‌آلات در شرایط خوبی قرار نداشته و به تعمیرات نیاز دارند، محصولات تولیدی نیز از لحاظ کیفی مطلوب نبوده و نرخ تولید محصولات نامنطبق افزایش می‌یابد. زمانی که به دلیل خرابی ناگهانی یک ماشین، یک توقف برنامه‌ریزی نشده اتفاق می‌افتد، برنامه تولید جاری قابل اجرا نبوده و تأمین تقاضای مشتریان با تأخیر مواجه خواهد شد. عملیات نگهداری و تعمیرات، تغییرات فرآیند را کاهش داده و به افزایش کیفیت محصول کمک می‌کند. تعمیرات اضافی، منجر به افزایش هزینه‌ها شده و تعمیرات با تأخیر، منجر به تغییر فرآیند می‌شود [۱].

۱-۱- بیان مسئله

در پژوهش جاری، شرایط خاصی برای تولید محصولات مورد تقاضای مشتریان در یک سیستم تولیدی تک‌محصولی در نظر گرفته شده که هدف آن ارائه یک برنامه توأم پویا برای تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم در راستای تحقق تقاضای ثابت مشتریان می‌باشد. افق زمانی مسئله، محدود فرض شده و شامل چند دوره معین برای تولید، با لحاظ کردن عدم قطعیت در تولید محصولات سالم می‌باشد. ماهیت برنامه ارائه شده به گونه‌ای است که تولیدکننده قادر خواهد بود در هر دوره، متناسب با شرایط تجربه شده (میزان محصولات سالم تولید شده) در دوره‌های پیشین، در خصوص انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص (سرویس کلی

^۵ Markov decision process (MDP)

^۳ Restore

^۴ Optimal policy

مثال عددی با روش مذکور حل شده است. بخش ۸ مربوط به تحلیل نتایج بدست آمده از حل مثال عددی و با تغییر در پارامترهای مختلف مسئله می‌باشد. جمع‌بندی و پیشنهادات در بخش ۹ ارائه شده است.

۲- مبانی و پیشینه نظری پژوهش

۲-۱- ویژگی مارکوفی و فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی

یکی از مباحث مهم و پایه‌ای در فرآیندهای تصادفی و به تبع آن در مبحث یادگیری ماشین و خصوصاً یادگیری تقویتی، ویژگی مارکوف^۶ می‌باشد. آنچه که در مباحث مذکور مبنای تصمیمات متوالی برای عامل تصمیم‌گیرنده قرار می‌گیرد، تحت عنوان "حالت"^۸ یاد می‌شود. لازم است این مقوله، بسته به شرایط خاص هر مسئله و با ابعاد مناسبی تعریف شود. درک و برداشت تصمیم‌گیرنده از حالت فعلی مسئله تحت بررسی، او را در اخذ تصمیم بعدی یاری نموده و هر قدر که حالت مذکور اطلاعات بیشتری از گذشته را شامل شود، تصمیم‌گیری با اعتبار بیشتری صورت خواهد گرفت. چنانچه هر حالتی که تصمیم‌گیرنده در این دست مسائل بر مبنای آن و به صورت متوالی تصمیم‌گیری می‌نماید دربرگیرنده اطلاعات حالات گذشته نیز باشد، نیازی به دراختیار داشتن و تحلیل کل اطلاعات حالات سابق نخواهد بود. به این حالت، حالت مارکوف^۹ و به این ویژگی، ویژگی مارکوف گفته می‌شود. برای درک بهتر موضوع، بازی شطرنج را در نظر بگیرید. در این بازی، در هر لحظه، موقعیت جاری مهره‌های شطرنج در صفحه یک حالت مارکوفی را تشکیل می‌دهد. زیرا تمام اطلاعات مهم و مرتبط با سلسله‌ای از موقعیت‌های قبلی را که موجب رسیدن به موقعیت‌های فعلی هستند خلاصه کرده است [۳۳]. بازیکن یا همان تصمیم‌گیرنده، هر بار بر اساس شرایطی که از محل مهره‌ها در صفحه بازی درک می‌کند نسبت به تصمیم‌گیری و انجام حرکت بعدی اقدام می‌نماید. بدیهی است که بازیکن برای تصمیم‌گیری در خصوص حرکت بعدی صرفاً به آخرین وضعیت قرارگیری مهره‌ها توجه داشته و مسیری که از ابتدای بازی طی شده، تأثیری بر انتخاب بعدی وی نخواهد داشت. به عبارتی هر حالت از مسئله، دربرگیرنده تمام اطلاعات حالات گذشته بوده و به همین دلیل، صرفاً حالت اخیر، مبنای تصمیم‌گیری و

محدودیت‌های خاص مسئله، در ابتدای هر دوره و با توجه به شرایط تجربه شده در دوره‌های پیشین، برای آن دوره برنامه‌ریزی می‌نماید. این برنامه‌ریزی به منظور تصمیم‌گیری در خصوص انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص و تعیین مقدار تولید در هر دوره انجام می‌شود. برنامه‌ریزی مذکور به صورت توأم و با بهره‌گیری از چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی و همچنین استفاده از روش‌های مدل‌سازی برنامه‌ریزی پویای تصادفی، صورت می‌پذیرد. رویکرد حل مسئله به گونه‌ای است که امکان اخذ تصمیمات بهینه در تحقق شرایط مختلف را فراهم نموده و به عبارتی به کمک آن می‌توان سیاست بهینه تولید و تعمیرات را تعیین نمود.

در مقاله جاری نیز به منظور پوشش برخی جنبه‌های عملیاتی که در مقالات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است، شرایط متفاوتی برای برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم تولید تک‌محصولی لحاظ شده است. اهم شرایط مذکور عبارتند از:

- برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات
- محدودیت در تعداد محصولات قابل تولید در هر دوره از افق برنامه‌ریزی و تعهد به تأمین تقاضای قطعی مشتری طی افق مذکور
- امکان تولید محصولات معیوب با روند غیرقطعی و تأثیر انجام تعمیرات ناقص بر کاهش این نوع محصولات
- مدل‌سازی مسئله در قالب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی و حل آن با رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی
- روند ارائه ادامه مقاله بدین ترتیب می‌باشد: نخست در بخش ۲ مفاهیم پایه مرتبط با موضوع پژوهش شامل تعاریف ویژگی مارکوفی و فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی، رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی و همچنین مفهوم تعمیرات ناقص^۶ ارائه خواهد شد. مرور مطالعات پیشین با دسته‌بندی این مطالعات در دو حوزه کلی برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی و برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی موضوع بخش بعدی مقاله می‌باشد. بخش ۴ مربوط به شرح کلی روش تحقیق بوده و تعریف دقیق مسئله و جزئیات آن در بخش ۵ ارائه شده است. در ادامه و در بخش ۶ به تشریح روش پیشنهادی برای حل مسئله پرداخته شده و در بخش ۷ یک

^۸ State

^۹ Markov state

^۶ Imperfect maintenance

^۷ Markov property

به صورت احتمالی بیان می‌شود. از کاربردهای این تکنیک، حل مسائلی است که در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی مدل شده‌اند.

۲-۳- تعمیرات ناقص:

به طور کلی منظور از نگهداری و تعمیرات ناقص، انجام فعالیت‌های تعمیراتی است که صرفاً موجب بهبود نسبی در سطح فرسایش سیستم خواهد شد. در واقع این نوع تعمیرات سیستم را به حالتی مابین حالت نو (کاملاً سالم)^{۱۶} و حالت فعلی (حالت سیستم قبل از انجام تعمیرات)^{۱۷} بر می‌گرداند. برای اعمال اثرات این نوع تعمیرات در مسائل و پژوهش‌های مختلف، از چندین رویکرد متنوع استفاده شده است. تصادفی بودن اثر تعمیرات ناقص، در نظر گرفتن یک فاکتور بهبود ثابت، تعریف ضرائب مختلف برای انواع مختلفی از تعمیرات ناقص، نمونه‌هایی از این رویکردها می‌باشند.

۳- مرور مطالعات پیشین

برنامه‌ریزی عملیات تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی، به سادگی امکانپذیر نبوده و ارائه یک برنامه کارا و مؤثر در این زمینه، همواره با چالش‌های خاصی همراه بوده است. از دلایل بروز این چالش می‌توان از یک سو به تنوع و پیچیدگی نیازهای مشتریان، انتظارات ایشان برای تحویل سریعتر کالاها، وجود درجات بالایی از عدم قطعیت در بازارها و از دیگر سو به پیچیدگی و هزینه‌های بالای عملیات نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات تولیدی جدید و همچنین تأثیر متقابل عملیات تولید و نگهداری و تعمیرات بر همدیگر اشاره نمود. همین امر، انگیزه محققین بسیاری برای مطالعه در زمینه‌های فوق‌الاشاره بوده و بر همین اساس، مقالات متعددی نیز ارائه و منتشر شده است. در دسته اول از این مقالات، موضوع اصلی، برنامه‌ریزی تولید بوده و گاهاً موضوعات دیگری از جمله برنامه‌ریزی تأمین مواد اولیه، طراحی تولید و یا موضوع بازتولید، در ترکیب با برنامه‌ریزی تولید مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. دسته دوم از مقالات، بر اساس رویکردهای مختلفی که در حوزه نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی مطرح می‌باشد، به ارائه مدل‌هایی برای برنامه‌ریزی بهینه تعمیرات سیستم‌های تولیدی پرداخته و رویکردهای حل متنوعی نیز

انتخاب بعدی خواهد بود.

یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی، متشکل از یک فضای حالات^{۱۰} محدود، یک فضای محدود اقدامات^{۱۱} وابسته به حالات، احتمالات انتقال^{۱۲} وابسته به هر حالت- اقدام و پاداش‌های آنی^{۱۳} مربوطه می‌باشد [۳۴]. در این چارچوب عامل تصمیم‌گیرنده با انجام هر اقدام در هر حالت از سیستم و بسته به احتمالات انتقال، ضمن دریافت پاداش آنی، حالت دیگری از سیستم را تجربه خواهد نمود. به عبارتی سیستم به حالت جدیدی منتقل خواهد شد.

۲-۲- رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی

اغلب اوقات در تلاش برای حل یک مسئله با رویکرد بالا به پایین (تفکیک و حل)، تقسیم‌بندی مسئله، چندین زیرمسئله مستقل ایجاد می‌نماید. اگر هر زیرمسئله را جداگانه و بدون بهره‌گیری از نتایج این گسترش ابعاد (اضافه شدن مسائل) حل شود، الگوریتم حاصل بسیار ناکارآمد خواهد بود. اما چنانچه مراقبت کنیم که هر زیرمسئله متمایز را صرفاً یکبار و با توجه به ثبت نتایجی که پیشتر بدست آمده، حل شود، الگوریتم می‌تواند کارآمد باشد. این همان ایده عمومی برنامه‌ریزی پویا می‌باشد. این روش با تکیه بر قواعد بهینگی بلمن^{۱۴} کار می‌کند: راه حل بهینه برای یک مسئله شامل حل بهینه برای تمام زیر مسئله‌ها می‌باشد. بنابراین، برنامه‌ریزی پویا، مسائلی از بهینه‌سازی را حل می‌کند که با بهره‌گیری از فواید یک فرمول بازگشتی^{۱۵} قواعد بهینگی بلمن را برآورده می‌سازند [۳۵]. در واقع برنامه‌ریزی پویا، یک مسئله تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای را به دنباله‌ای از مسائل تک‌مرحله‌ای تبدیل می‌کند.

برنامه‌ریزی پویا، یک تکنیک ریاضیاتی است که هدف آن گرفتن تصمیمات متوالی و به صورت مستقل از همدیگر می‌باشد. این رویکرد می‌تواند برای حل هر نوع مسئله بهینه‌سازی گسسته مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه این تکنیک پیشتر نیز استفاده شده بود اما نامگذاری و فرموله کردن آن توسط بلمن صورت پذیرفته است [۳۵].

برنامه‌ریزی پویای تصادفی نیز یکی از تکنیک‌های مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. این تکنیک، از ابزارهای برنامه‌ریزی پویا استفاده می‌کند، با این تفاوت که در این رویکرد، حالات مسئله از پیش معین نبوده و اغلب

¹⁴ Bellman's principle of optimality

¹⁵ Recursive formula

¹⁶ As-good-as-new

¹⁷ As-bad-as-old

¹⁰ State Space

¹¹ Action space

¹² Transition probability

¹³ Immediate reward

در آن‌ها ارائه شده است. دسته سوم نیز به ارائه مدل‌های توأم برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی پرداخته و مدل‌های یکپارچه‌ای را در این زمینه ارائه نموده‌اند. در ادامه، مرور مطالعات پیشین، بر اساس دسته‌بندی فوق و با تمرکز بر دسته دوم و سوم، ارائه شده است.

۳-۱- مرور مطالعات حوزه برنامه‌ریزی نگهداری و

تعمیرات در سیستم‌های تولیدی

گیوراس و همکاران^{۱۸} برنامه نگهداری و تعمیرات بهینه برای یک سیستم مونتاژ دوسطحی را در شرایطی ارائه نموده‌اند که خرابی تنها ماشین موجود در سیستم به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. برای کاهش دفعات نیاز به تعمیرات اصلاحی، عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، برنامه‌ریزی و انجام می‌شود [۳]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸، یافتن سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط برای سیستم‌های سری- موازی و با تکیه بر مدل مخاطره (خطرات) متناسب^{۱۹} را مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نقش تصادفی متغیر کمکی مدل مذکور و ماهیت ترتیبی برنامه نگهداری و تعمیرات، از یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای برای مدل کردن نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط سیستم مورد نظر استفاده شده است [۴]. در همین سال شهرخی و سبحانی، انتخاب مناسب‌ترین سطوح قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری قطعات در یک سیستم سری- موازی چندحالتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ضمن بهره‌گیری از مفاهیم رویکرد مارکوفی، مسئله در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط مدل و با روش شمارش کامل حل شده است [۵]. سربوستانا و همکاران^{۲۰} در پژوهش خود در سال ۲۰۱۹ به دنبال ایجاد یک پایگاه داده جامع و قابل اطمینان از ویژگی‌های نگهداری و تعمیرات چابک^{۲۱} در راستای انتخاب استراتژی مؤثر نگهداری و تعمیرات در یک کارخانه تولید شکر می‌باشند. چارچوب ارائه شده توسط ایشان، استراتژی‌های تعمیراتی را با یک رویکرد تصمیم‌گیری

چندشاخصه یکپارچه‌فازی^{۲۲} اولویت‌بندی و انتخاب می‌کند [۶]. در پژوهش دیگری در همین سال، ونین و همکاران^{۲۳} یک مدل هزینه‌ای وابسته به قابلیت اطمینان را برای ماشین‌ابزارها پیشنهاد داده و استراتژی نگهداری و تعمیرات اصلاحی در ترکیب با تعمیرات اساسی، به عنوان استراتژی منتخب مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور محاسبه هزینه‌های ناشی از خرابی‌ها و انجام فعالیت‌های تعمیراتی و همچنین محاسبه متوسط دسترسی‌پذیری^{۲۴} سیستم در طول حیات آن، از یک رویکرد پاداش مارکوفی^{۲۵} استفاده شده است [۷]. همچنین، زمانبندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در محیط ماشین‌های موازی، موضوع پژوهش حسام و همکاران در سال ۲۰۱۹ می‌باشد. مسئله به صورت چندهدفه مدل‌سازی شده و از رویکرد کلاسیک برنامه‌ریزی آرمانی برای حل مسائل با ابعاد کوچک و الگوریتم *NSGA-II*^{۲۶} برای حل مسائل با ابعاد بزرگ استفاده شده است [۸]. بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات یک سیستم چندجزئی با فرض وجود وابستگی ساختاری^{۲۷} و همچنین وابستگی اقتصادی^{۲۸}، موضوع پژوهش دین و همکاران^{۲۹} در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. فاکتورهای مختلفی که بر روی عملیات دمونتاز^{۳۰} اثرگذار می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته و یک سیاست نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه^{۳۱} با لحاظ کردن این اثرات و موضوع وابستگی اقتصادی، ارائه شده است [۹]. لیو و همکاران^{۳۲} در سال ۲۰۲۱ سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط^{۳۳} برای یک سیستم دوجزئی و با فرض فرآیندهای فرسایش وابسته به هم، را مورد بررسی قرار داده‌اند. افق زمانی مسئله، محدود بوده و نگهداری و تعمیرات سیستم، در قالب یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی مدل شده است. محاسبه هزینه انتظاری عملیات نگهداری و تعمیرات با روش برنامه‌ریزی پویا برای انجام می‌پذیرد [۱۰]. در همین سال، محققین در پژوهش دیگری، بهینه‌سازی عملیات نگهداری و تعمیرات را در یک سیستم در حال فرسایش و با استفاده از رویکردهای یادگیری تقویتی^{۳۴} در دستور کار قرار داده‌اند. حل مسئله

²⁷ Structural dependency

²⁸ Economic dependency

²⁹ Dinh et al

³⁰ Disassembly operations

³¹ Opportunistic maintenance

³² Liu et al

³³ Condition based maintenance

³⁴ Reinforcement learning

¹⁸ Guiras et al

¹⁹ Proportional Hazards Model

²⁰ Srivastava et al

²¹ Agile maintenance attribute

²² Fuzzy integrated MADM approach

²³ Wenbin et al

²⁴ Availability

²⁵ Markov reward

²⁶ Non-dominated sorting genetic algorithm-II

زمینه مطالعاتی غیرمشابه شامل فرآیندکاوی^{۴۱}، تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۴۲} و تلفیق داده^{۴۳} را باهم ادغام نموده‌اند تا به کمک ارزیابی ریسک و تحلیل بحرانی، ماشین‌آلات صنعتی را جهت انجام عملیات نگهداری و تعمیرات اولویت‌بندی کنند. ادغام فوق‌الاشاره منجر به ایجاد زمینه برای یک ارزیابی پویا، انعطاف‌پذیر و به موقع از سیستم خواهد شد [۱۶].

دسته‌بندی مقالات حوزه برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های تولیدی بر اساس (ماهیت کلی سیستم تحت بررسی، سیاست کلی نگهداری و تعمیرات، شرایط خاص مسئله و همچنین نوع رویکرد مدل‌سازی و حل) در جدول ۱ ارائه شده است.

۳-۲- مرور مطالعات حوزه برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های تولیدی

یلدریم و نظامی^{۴۴} در سال ۲۰۱۴، به ارائه یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم چندمحصولی چنددوره‌ای تک‌ماشین پرداخته‌اند. فرض بر اینست که سطح فرسایش ماشین، بر روی زمان پردازش محصولات تأثیر داشته و انجام عملیات نگهداری و تعمیرات، این زمان و همچنین انرژی مصرفی را بهبود می‌بخشد [۱۷]. محققین در پژوهش دیگری در همین سال، ابتدا یک مدل تصمیم‌گیری مارکوفی برای تعیین برنامه نگهداری و تعمیرات هر ماشین در یک سیستم چنددوره‌ای چندماشینی را ارائه نموده و سپس به کمک یک مدل برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط، برنامه توأم تولید و تعمیرات را در سیستم مذکور دنبال می‌کنند [۱۸]. برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم تولید مستعد شکست^{۴۵}، موضوع پژوهش اقیاز و همکاران^{۴۶} در سال ۲۰۱۵ می‌باشد. ایشان با مبنا قرار دادن عمر تجهیزات، حالات عملیاتی سیستم را به صورت تصادفی پیش‌بینی و از تعمیرات پیشگیرانه ناقص^{۴۷} برای کاهش احتمال وقوع خرابی استفاده می‌کنند. علاوه بر حالت عملیاتی، ظرفیت سیستم نیز در مسئله لحاظ و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی عددصحيح مختلط مدل شده است

به کمک یک الگوریتم یادگیری کیوی^{۳۵} تعدیل شده، انجام و طی آن سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات سیستم بدست آمده است [۱۱]. تاجی و همکاران در سال ۲۰۲۲ رویکرد جدیدی را برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم چندجزئی ارائه نموده‌اند. در این پژوهش، فرض بر آنست که عوامل دیگری غیر از بازرسی و خرابی نیز منجر به توقف سیستم خواهد شد. خرابی اجزاء دارای وابستگی متقابل بوده و ممکن است نرخ خرابی هر یک از اجزاء در اثر شوک‌های ناشی از خرابی سایر اجزاء افزایش یابد. ضمن تعدیل پارامترها با روش تاگوچی^{۳۶} از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده شده است [۱۲]. در همین سال و در پژوهش دیگری محققین با بهره‌گیری از مفاهیم یادگیری ماشین^{۳۷} روش جدیدی برای پیش‌بینی خرابی‌های ماشین و همچنین زمان‌های تعمیر ارائه نموده و از داده‌های بدست آمده برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بهره می‌برند. چارچوب ارائه شده در این پژوهش دارای سه مرحله اصلی شامل نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، برآورد زمان‌های نگهداری و تعمیرات و بهینه‌سازی می‌باشد [۱۳]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۳، ایلماز و همکاران^{۳۸} به منظور بهبود عملکرد نگهداری و تعمیرات، از روش DEMATEL فازی استفاده کرده‌اند. روش پیشنهادی ایشان، مؤثرترین شاخص‌ها بر روی عملکرد نگهداری و تعمیرات سیستم را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند. رویکرد ارائه شده، پردازش و نمایش روابط علت و معلولی بین زمینه‌ها و معیارهای مختلف عملکرد تعمیراتی را فراهم می‌نماید [۱۴]. دوفوا و همکاران^{۳۹} در سال ۲۰۲۴، با مبنا قرار دادن مفهوم نگهداری و تعمیرات بازگردانی^{۴۰}، به ارائه یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تعمیرات شبکه‌ای از کارخانه‌های تولیدی در زنجیره تأمین صنایع فرآیندی پرداخته‌اند. نگهداری و تعمیرات بازگردانی نسبت به تعمیرات اساسی گسترده‌تر بوده و شامل توقف دوره‌ای همه کارخانه‌های شبکه جهت انجام اقدامات بازرسی و انواع تعمیرات می‌باشد [۱۵]. محققین در پژوهش دیگری در همین سال چند

⁴² Multi Criteria Decision Making (MADM)

⁴³ Data fusion

⁴⁴ Yildirim & Nezami

⁴⁵ Failure-Prone

⁴⁶ Aghezzaf et al

⁴⁷ Imperfect preventive maintenance

³⁵ Q-Learning

³⁶ Taguchi method

³⁷ Machine learning

³⁸ Yilmaza et al

³⁹ Duffuaa et al

⁴⁰ Turnaround maintenance planning

⁴¹ Process mining

اتوماسیون بالا و همچنین اجتناب‌ناپذیر بودن موضوع نگهداری و تعمیرات در کنار تولید را دلایل اصلی پژوهش خود برشمرده و به ارائه یک مدل یکپارچه برای تعیین زمان بهینه تعمیرات پیشگیرانه و همچنین تعیین ظرفیت بهینه تولید در هر دوره پرداخته‌اند. محدودیت سطح خدمات^{۵۶} برای بالا بردن احتمال تأمین به موقع تقاضای مشتریان نیز در مدل مسئله لحاظ شده است [۲۵]. محققین در سال ۲۰۲۱، سیاست تولید و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط^{۵۷} را در یک سیستم تک‌جزئی و در راستای توازن بین هزینه‌های تولید و تعمیرات مورد بررسی قرار داده‌اند. نرخ تولید، قابل تنظیم بوده و نرخ خرابی تجهیز به نرخ تولید وابسته می‌باشد. فرآیند فرسایش سیستم، یک فرآیند تصادفی پیوسته‌زمان پیوسته‌حالت بوده و بر مبنای آن، مسئله در قالب یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی مدل شده است [۲۶]. در همین سال ریورا و همکاران^{۵۸} در پژوهش خود، یافتن سیاست بهینه بازرسی، تولید و تعمیرات را در یک سیستم در حال فرسایش و با لحاظ کردن محدودیت‌های مربوط به کیفیت محصول دنبال کرده‌اند. تأثیرگذاری فرسایش سیستم بر روی قابلیت اطمینان سیستم و کیفیت محصولات در مسئله لحاظ شده است. برای مدل کردن مسئله و پوشش ابعاد مختلف فوق‌الاشاره از یک مدل ریاضی تصادفی استفاده شده است [۲۷]. در پژوهش دیگری در همین سال یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی توأم تولید و تعمیرات در یک سیستم تک‌ماشین با فرض حالات خرابی چندگانه^{۵۹} ارائه کرده‌اند. چندین اقدام تعمیراتی مختلف شامل جایگزینی، تعمیرات اصلاحی و تعمیرات پیشگیرانه کامل و ناقص نیز در مسئله لحاظ شده و به دلیل پیچیدگی بالای مسئله از الگوریتم‌های ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی شده^{۶۰} و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری^{۶۱} برای حل آن استفاده شده است [۲۸]. در حال فرسایش و با لحاظ کردن محدودیت‌های مربوط به کیفیت محصول دنبال کرده‌اند. تأثیرگذاری فرسایش سیستم بر روی قابلیت اطمینان سیستم و کیفیت محصولات در مسئله لحاظ شده است. برای مدل کردن

[۱۹]. دفورژ و همکاران^{۴۸} با بهره‌گیری از قوانین استنباط^{۴۹}، یک تابع عمومی را برای ارزیابی دسترسی‌پذیری آتی یک سیستم پیچیده پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان از نتایج آن به عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات استفاده نمود. تابع مذکور برای دستیابی به احتمالات خرابی سیستم، از شبکه‌های بیزی مبتنی بر هدف^{۵۰} بهره‌برداری می‌کند [۲۰]. مسئله برنامه‌ریزی ظرفیت، تولید و نگهداری و تعمیرات یک سیستم تولیدی موازی و متشکل از ماشین‌آلات اجاره‌ای، موضوع پژوهش محققین در سال ۲۰۱۸ می‌باشد. سیستم مذکور باید یک تقاضای تصادفی را در دوره‌های معینی برآورده نماید. تعداد ماشین‌هایی که باید اجاره شود، مقدار تولید با هر ماشین و تقاضای مشتریان متغیر فرض شده است. مسئله با یک رویکرد چندمرحله‌ای حل شده است [۲۱]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۹ یک رویکرد استوار^{۵۱} برای برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات یک سیستم تولیدی چندحالتی همراه با نواسات تقاضا، ارائه شده است. مدل ارائه شده به گونه‌ای است که می‌توان برای انجام تعمیرات پیشگیرانه به صورت ناقص و کامل، تصمیم‌گیری نمود [۲۲]. در همین سال سو و همکاران^{۵۲} برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات برای یک سیستم تولیدی تک‌ماشین را در دستور کار خود قرار داده‌اند. بر اساس ترکیبات مختلفی از سیاست‌های تعمیرات و اهداف مختلف، شش مدل مختلف برای مسئله ارائه شده و از رویکردهای دقیق و ابتکاری برای حل آنها در مقیاس‌های مختلف، استفاده شده است. مبنای مدل‌های ارائه شده، مسئله کلاسیک بسته‌بندی با جعبه^{۵۳} می‌باشد [۲۳]. کوین‌مینگ و همکاران^{۵۴} نیز در سال ۲۰۱۹، مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات برای یک سیستم تک‌ماشین را در حالتی ارائه نموده‌اند که علاوه بر تعمیرات پیشگیرانه، کاربرد اطلاعات تشخیصی و پیش‌بینی میزان فرسایش سیستم و عمر آن نیز در مدل لحاظ شده است [۲۴]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۰، لیو و همکاران^{۵۵} وجود فضای رقابتی بین شرکت‌های تولیدی و موضوع استقبال از سیستم‌های تولیدی با درجه

⁵⁵ Liu et al

⁵⁶ Service level

⁵⁷ Condition-based maintenance and production (CBMP)

⁵⁸ Rivera et al

⁵⁹ Multi-failure modes

⁶⁰ Simulated annealing (SA)

⁶¹ Teaching-learning-based optimization (TLBO)

⁴⁸ Desforgesa et al

⁴⁹ Inferences rules

⁵⁰ Object Oriented Bayesian Networks (OOBN)

⁵¹ Robust

⁵² Xu et al

⁵³ Bin Packing Problem

⁵⁴ Qinminga et al

مسئله و پوشش ابعاد مختلف فوق‌الاشاره از یک مدل ریاضی تصادفی استفاده شده است [۲۷].

جدول ۱- دسته‌بندی مقالات پیشین (حوزه نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی)

شماره مرجع	سال انتشار	نوع سیستم تحت بررسی	سیاست کلی نگهداری و تعمیرات	سایر شرایط خاص مسئله	رویکرد کلی مدل‌سازی / حل مسئله
[۳]	۲۰۱۸	تک‌ماشین	پیشگیرانه / اصلاحی	لحاظ کردن موضوع مدیریت موجودی اجزاء تولید و محصولات در یک سیستم مونتاژ دو سطحی	مدل ریاضی مبتنی بر ارزیابی ریسک
[۴]	۲۰۱۸	سیستم های سری- موازی	مبتنی بر شرایط	تعیین حدود کنترل پویای مختلف برای هر تجهیز/ استفاده از مدل مخاطره متناسب	مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای/ الگوریتم متاهیوریستیک هیبریدی
[۵]	۲۰۱۸	سری- موازی	-	سیستم دارای افزونه و حالت نیمه‌بار/ تغییر نرخ تعمیر	رویکرد مارکوفی/ مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عددصحيح مختلط
[۶]	۲۰۱۹	سیستم عمومی (کارخانه تولید شکر)	استراتژی‌های گوناگون نگهداری و تعمیرات	ایجاد و استفاده از یک پایگاه داده قابل اطمینان از ویژگی‌های نگهداری و تعمیرات چابک	رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه یکپارچه فازی
[۷]	۲۰۱۹	تک ماشین (ماشین ابزار)	اصلاحی/ تعمیرات اساسی	لحاظ کردن موضوع قابلیت‌اطمینان در مسئله	رویکرد پاداش مارکوفی/ الگوریتم ژنتیک
[۸]	۲۰۱۹	محیط ماشین‌های موازی	پیشگیرانه/ اضطراری	لحاظ کردن زمان پردازش قابل کنترل	برنامه‌ریزی آرمانی و الگوریتم NSGA-II
[۹]	۲۰۲۰	چندجزئی	فرصت‌طلبانه	فرض وجود وابستگی اقتصادی و ساختاری بین تعمیرات اجزاء	مدل ریاضی مبتنی بر نرخ خرابی و اثرات عملیات دمونتاژ
[۱۰]	۲۰۲۱	دو جزئی	مبتنی بر شرایط	فرض وابستگی فرآیندهای فرسایش اجزاء به همدیگر	مدل مبتنی بر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی/ برنامه‌ریزی پویا
[۱۱]	۲۰۲۱	تک جزئی	مبتنی بر شرایط	فرض شناخته و ناشناخته بودن فرآیند فرسایش تجهیز	رویکردهای یادگیری تقویتی (الگوریتم یادگیری کیو)
[۱۲]	۲۰۲۲	چندجزئی	پیشگیرانه	فرض توقف سیستم بر اثر عوامل دیگر غیر از بازرسی و خرابی	تعدیل پارامترها با روش تاگوچی/ حل با الگوریتم ژنتیک
[۱۳]	۲۰۲۲	چندجزئی	پیشگویانه	استفاده از مفاهیم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خرابی و زمان تعمیر	رویکرد سه مرحله‌ای (پیشگویی، برآورد و بهینه‌سازی)
[۱۴]	۲۰۲۳	سیستم تولیدی عمومی	-	-	شناسایی و تعیین شاخص‌های تعمیراتی/ بهبود عملکرد تعمیراتی با روش DEMATEL فازی
[۱۵]	۲۰۲۴	شبکه‌ای از کارخانه‌های تولیدی/ صنایع فرآیندی	بازگردانی (شامل توقف کامل و بازرسی و انواع تعمیرات)	تقسیم‌بندی اجزاء (کارخانه‌ها) به سطوح مختلف و فرض وجود جریان متوالی بین اجزاء	مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط/ استفاده از الگوریتم‌های دقیق و ابتکاری
[۱۶]	۲۰۲۴	سیستم عمومی (ماشین‌های صنعتی)	-	ادغام چند زمینه مطالعاتی غیرمشابه	ادغام فرآیند کاوی، تصمیم‌گیری چندمعیاره و تلفیق داده/ ارزیابی ریسک و تحلیل بحرانی

مدل کرده‌اند. تقاضا به صورت ثابت فرض شده و بازده تصادفی سیستم، متناسب با مقدار ورودی آن می‌باشد. نگهداری و تعمیرات اصلاحی، پیشگیرانه و تعیین حجم تولید به عنوان اقدامات ممکن برای تصمیم‌گیرنده تعریف شده است [۳۲]. دسته‌بندی مقالات حوزه برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات بر اساس (ماهیت کلی سیستم تحت بررسی، سیاست کلی نگهداری و تعمیرات، شرایط خاص مسئله و همچنین نوع رویکرد مدل‌سازی و حل) در جدول ۲ ارائه شده است.

۴- روش تحقیق

ماهیت پژوهش حاضر از جهاتی توسعه‌ای و از جهاتی کاربردی می‌باشد. زیرا هم به ارائه مدلی جدید برای برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های تولید تحت شرایط خاص تعریف شده پرداخته و هم می‌کوشد تا راهکاری عملی برای مدیریت بهینه سیستم‌های تولیدی در زمینه ایجاد توازن بین فعالیت‌های تولید و نگهداری و تعمیرات را فراهم نماید. بدین منظور، نخست مقالات علمی در زمینه‌های مذکور، هم در بخش ارائه برنامه‌های مجزا و هم در بخش ارائه برنامه‌های توأم تولید و نگهداری و تعمیرات مورد بررسی قرار گرفته و چارچوب خاص هر مقاله و مدل‌های استفاده شده، تحلیل و دسته‌بندی شده‌اند. در ادامه بر اساس مقایسات و تحلیل‌های صورت گرفته و به منظور واقعی‌تر کردن شرایط، مدلسازی یک مسئله تحت شرایط جدیدی که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است انجام شده است. با توجه به لزوم اخذ تصمیمات متوالی در دوره‌های مختلف افق برنامه‌ریزی و با توجه به رویکردهای مشابه در سایر مقالات، از چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی برای مدل‌سازی استفاده شده است. حل مدل نیز با روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی صورت پذیرفته است. به منظور بررسی اثر بخشی مدل ارائه شده، یک مثال عددی، متناسب با شرایط خاص مسئله تدوین و ضمن کدنویسی در نرم افزار پایتون^{۱۰} با الگوریتم پیشنهادی حل شده است. در نهایت تحلیل گسترده نتایج حل بر اساس تغییر در پارامترهای مختلف مسئله ارائه شده است.

در پژوهش دیگری در همین سال یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی توأم تولید و تعمیرات در یک سیستم تک‌ماشین با فرض حالات خرابی چندگانه^۱ ارائه کرده‌اند. چندین اقدام تعمیراتی مختلف شامل جایگزینی، تعمیرات اصلاحی و تعمیرات پیشگیرانه کامل و ناقص نیز در مسئله لحاظ شده و به دلیل پیچیدگی بالای مسئله از الگوریتم‌های ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی شده^۲ و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری^۳ برای حل آن استفاده شده است [۲۸]. جیانگ و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۳، موضوع برنامه‌ریزی یکپارچه جریان کارگاهی^۵ و نگهداری و تعمیرات را در شرایطی مورد بررسی قرار داده‌اند که فرض شده سرعت‌های پردازش محصولات متغیر می‌باشد. تعمیرات دارای دو حالت پیشگیرانه و جایگزینی بوده و ارتباطات بین سرعت تولید، توالی پردازش‌ها و برنامه نگهداری و تعمیرات در مسئله لحاظ شده است. برای حل مسئله از یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته با انتخاب سرعت پردازش‌های متغیر استفاده شده است [۲۹]. در همین سال لئو و اینجل^۶ در راستای برنامه‌ریزی همزمان تولید و تعمیرات در یک سیستم با تولید پیوسته، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های درون‌زای (نوع ۱ و ۲)^۷ استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، همچنین از یک مدل فرسایش تصادفی برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده^۸ تجهیزات مبتنی بر شرایط آنها، استفاده شده است [۳۰]. محققین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۴، به برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم با چند جزء موازی پرداخته‌اند. در این پژوهش فرض شده است که فرسایش تجهیزات متأثر از وابستگی متقابل اجزاء بوده و از یک رویکرد دو مرحله‌ای برای مواجهه با مسئله استفاده شده است. نخست ظرفیت واقعی تولید محاسبه شده و سپس اثرات وابستگی اجزاء بر قابلیت دسترسی و خرابی سیستم تحلیل می‌شود. نهایتاً به منظور تعیین برنامه توأم بهینه، مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل شده است [۳۱]. ژنگ و همکاران^۹ نیز در سال ۲۰۲۴، موضوع بازده تصادفی و تأخیر در تعمیرات را در مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط لحاظ کرده و آن را در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی

^۶ Leo & Engell

^۷ Type-I and Type-II endogenous uncertainties

^۸ Remaining Useful Life

^۹ Zhang et al

^{۱۰} Python

^۱ Multi-failure modes

^۲ Simulated annealing (SA)

^۳ Teaching-learning-based optimization (TLBO)

^۴ Jiang et al

^۵ Flow shop

جدول ۲- دسته‌بندی مقالات پیشین (برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات)

شماره مرجع	سال انتشار	نوع سیستم تحت بررسی	سیاست کلی نگهداری و تعمیرات	سایر شرایط خاص مسئله	رویکرد کلی مدل‌سازی/ حل مسئله
[۱۷]	۲۰۱۴	تک‌ماشین	پیشگیرانه	لحاظ کردن زمان تعمیرات و انرژی مصرفی در مسئله	مدل ریاضی غیرخطی عددصحیح مختلط
[۱۸]	۲۰۱۴	چندماشین (جریان کارگاهی)	مبتنی بر شرایط	در نظر گرفتن موضوع تقاضای مشتریان و فرض مشخص شدن تقاضا در ابتدای هر دوره	مدل تصمیم‌گیری مارکوفی/ مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط
[۱۹]	۲۰۱۵	سیستم تولیدی عمومی	پیشگیرانه ناقص	پیش‌بینی حالت عملیاتی بر مبنای عمر تجهیز/ لحاظ کردن ظرفیت سیستم در مسئله	استفاده از مدل نرخ خرابی هیبریدی/ بهینه‌سازی غیرخطی عددصحیح مختلط
[۲۰]	۲۰۱۷	پیچیده	تشخیصی/ مبتنی بر شرایط	استفاده از شبکه‌های بیزی مبتنی بر هدف برای برآورد احتمالات خرابی سیستم	استفاده از یک تابع عمومی برای ارزیابی دسترسی‌پذیری با بهره‌گیری از قوانین استنباط
[۲۱]	۲۰۱۸	چندجزئی موازی	پیشگیرانه/ اصلاحی	لحاظ کردن موضوع ماشین‌آلات اجاره و تصادفی بودن تقاضای مشتریان	رویکرد چندمرحله‌ای
[۲۲]	۲۰۱۹	عمومی چندحالتی	پیشگیرانه	لحاظ کردن نوسانات تقاضا	تصمیم‌گیری با رویکرد استوار
[۲۳]	۲۰۱۹	تک‌ماشین	پیشگیرانه	لحاظ کردن بازه‌های زمانی ثابت و منعطف بین دو تعمیر متوالی	ارائه شش مدل مختلف/ حل با رویکردهای دقیق و ابتکاری
[۲۴]	۲۰۱۹	تک‌ماشین	تشخیصی/ پیشگیرانه	پیش‌بینی فرسایش و عمر سیستم	مدل ریاضی/ الگوریتم ژنتیک
[۲۵]	۲۰۲۰	تک‌ماشین	پیشگیرانه/ اصلاحی	اعمال محدودیت سطح خدمات برای افزایش احتمال تأمین به موقع تقاضا	مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط
[۲۶]	۲۰۲۱	تک‌جزئی	مبتنی بر شرایط	قابل تنظیم بودن نرخ تولید و وابستگی نرخ خرابی به نرخ تولید	مدل‌سازی در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی
[۲۷]	۲۰۲۱	تولید تک‌محصولی	تعمیرات جزئی و عمده مبتنی بر عمر و بازرسی ناقص	لحاظ کردن تأثیر فرسایش سیستم بر قابلیت اطمینان سیستم و موضوع کنترل کیفیت	مدل ریاضی با رویکرد کنترل بهینه تصادفی
[۲۸]	۲۰۲۱	تک‌ماشین	جایگزینی/ اصلاحی/ پیشگیرانه ناقص و کامل	فرض وجود حالات خرابی چندگانه با تأثیرات مختلف بر کیفیت محصولات	مدل ریاضی مبتنی بر ماتریس/ الگوریتم ژنتیک/ تبرید شبیه‌سازی شده/ بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری
[۲۹]	۲۰۲۳	سیستم جریان کارگاهی متشکل از چند ماشین	جایگزینی/ پیشگیرانه	لحاظ کردن موضوع سرعت تولید، متغیر بودن سرعت پردازش محصولات	الگوریتم ژنتیک بهبود یافته
[۳۰]	۲۰۲۳	سیستم تولیدی پیوسته با چند ورودی و چند محصول	مبتنی بر شرایط	لحاظ کردن موضوع عدم قطعیت درون‌زای نوع ۱ و ۲/ لحاظ کردن هزینه انرژی‌های مصرفی	مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط
[۳۱]	۲۰۲۴	چندجزئی موازی	پیشگیرانه	فرض تأثیر وابستگی متقابل اجزاء بر روند فرسایش آن‌ها	برنامه‌ریزی عددصحیح
[۳۲]	۲۰۲۴	تک‌ماشین	مبتنی بر شرایط/ اصلاحی/ پیشگیرانه	لحاظ کردن موضوع بازده تصادفی و تأخیر در تعمیرات در مسئله	چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی
پژوهش جاری		سیستم تولیدی تک‌محصولی	پیشگیرانه (ناقص)	محدودیت در تعداد دوره‌های تولیدی و میزان تولید در هر دوره/ تصادفی بودن کیفیت محصولات و لحاظ کردن اثر تعمیرات بر کیفیت محصولات	رویکرد فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی/ روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی

۵- تعریف مسئله و تشریح جزئیات آن

یک سیستم تولیدی متعهد است تعداد N واحد محصول سالم را در حداکثر T دوره زمانی تولید و در پایان دوره آخر به مشتری تحویل دهد. هر واحد محصول تولیدی با احتمال p سالم و با احتمال $1-p$ معیوب است. در ابتدای هر دوره و قبل از راه‌اندازی ماشین‌آلات، چنانچه تعمیرات ناقص بر روی ماشین‌آلات انجام شود، باعث بهبود نسبی وضعیت ماشین‌آلات تولیدی شده و با ضریب مشخصی منجر به افزایش احتمال تولید محصولات سالم (کاهش احتمال تولید محصولات معیوب) در آن دوره خواهد شد. در واقع از نوعی رویکرد فاکتور بهبود ثابت، برای اعمال اثرات تعمیرات ناقص، استفاده خواهد شد. میزان افزایش مذکور یا به عبارتی ضریب اعمال شده برای بهبود احتمال تولید محصولات سالم، به شماره دوره‌ای که تعمیرات انجام می‌پذیرد، وابسته نبوده و ثابت در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش، منظور از تعمیرات ناقص در ابتدای هر دوره، انجام یک سری عملیات مشخص در قالب سرویس کلی ماشین‌آلات تولیدی بوده و شامل مواردی مانند روغن‌کاری، تمیزکاری، آچارکشی و غیره می‌باشد. تولیدکننده در ابتدای هر دوره می‌تواند در مورد راه‌اندازی سیستم تولید، مقدار تولید در آن دوره و همچنین انجام یا عدم انجام تعمیرات ناقص تصمیم‌گیری کند. چنانچه در دوره‌ای تصمیم بر عدم تولید باشد، انجام تعمیرات ناقص نیز در ابتدای آن دوره مجاز نمی‌باشد. در هر دوره اگر تولیدکننده تصمیم به تولید بگیرد، هزینه ثابت راه‌اندازی، معادل E واحد بوده و علاوه بر این، تولید هر واحد محصول، هزینه متغیر C را به دنبال دارد. هزینه تعمیرات ناقص، ثابت و معادل h واحد در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود ماشین‌آلات، نو نبوده و در ابتدای دوره اول نیز انجام تعمیرات توجیه داشته باشد. با توجه به ماهیت تصادفی تولید محصولات سالم، در آخرین دوره (پایان افق برنامه‌ریزی) امکان تحقق یکی از شرایط زیر وجود دارد:

حالت اول: تعداد محصولات سالم تولیدی، کمتر از مقدار تعهد شده برای تحویل به مشتری می‌باشد. در این صورت، هر واحد محصول تولیدی سالم، درآمدی معادل r_1 ($r_1 > C$) داشته و به ازاء هر واحد اختلاف با میزان تعهد شده، باید جریمه‌ای معادل k واحد پرداخت شود.

حالت دوم: تعداد محصولات سالم تولید شده بیشتر یا مساوی مقدار تعهد شده برای تحویل به مشتری می‌باشد. در این حالت، هر واحد محصول تولیدی سالم، درآمدی معادل r_1 ($r_1 > C$) و هر واحد تولید مازاد بر مقدار تعهد شده، درآمدی معادل r_2 ($r_2 \leq C$)، نصیب تولیدکننده خواهد نمود.

هدف، یافتن سیاست بهینه یا همان برنامه بهینه عملیات تولید و نگهداری و تعمیرات ناقص برای این سیستم تولیدی است به گونه‌ای که ارزش انتظاری هزینه‌های سیستم در افق برنامه‌ریزی محدود T دوره، حداقل شود. از یک سو انجام تعمیرات ناقص، هزینه‌های خاصی را به سیستم تحمیل می‌نماید و از دیگر سو، منجر به کاهش تولید محصولات معیوب در دوره متناظر با انجام تعمیرات مذکور خواهد شد. به تدریج و با نزدیک شدن به دوره‌های پایانی و حصول اطمینان نسبی از تأمین تقاضای مشتری، حساسیت به تولید محصولات معیوب، کاهش یافته و ضرورت انجام سرویس کلی (یا همان تعمیرات ناقص) قبل از راه‌اندازی سیستم تولیدی در ابتدای هر دوره، کاهش می‌یابد. ایجاد یک توازن بهینه بین دفعات انجام تعمیرات ناقص در طول افق زمانی و تولید تعداد معینی از محصولات در هر دوره و با لحاظ کردن سقف تولیدات مجاز در هر دوره و همچنین در نظر گرفتن امکان تولید محصولات معیوب، لازمه اصلی دستیابی به تعداد محصول سالم تعهد شده با کمترین هزینه خواهد بود.

در ادامه نخست چارچوب کلی یک مدل تصمیم‌گیری مارکوفی توصیف و سپس اجزاء مدل مذکور برای مسئله تحت بررسی معرفی خواهد شد. بر مبنای اجزاء معرفی شده و با تکیه بر معادلات بهینگی بلمن و همچنین بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی، روش پیشنهادی برای حل مسئله و معادلات مربوطه ارائه خواهد شد.

۶- شرح روش پیشنهادی

۶-۱- مدل تصمیم‌گیری مارکوفی

مدل‌سازی مسائل در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی، مستلزم تعریف حالات، اقدامات و پاداش‌های مناسب برای انجام هر اقدام در هر حالت می‌باشد. اغلب مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات، ماهیت دوره‌ای داشته و به عبارتی نیاز به انجام تصمیمات

محصولاتی تولیدی در هر دوره تصمیم‌گیری شود.

جدول ۳- معرفی اندیس‌ها، پارامترها و سایر نمادها

نماد	شرح
N	مقدار کل تقاضا
n	تعداد دوره‌های مجاز تولید
s	حالات مسئله (تعداد محصول سالم در ابتدای هر دوره)
E	هزینه راه‌اندازی در ابتدای هر دوره
c	هزینه مستقیم تولید هر واحد محصول
r_1	درآمد تولید هر واحد محصول سالم (برای تعداد کمتر یا مساوی مقدار کل تقاضای تعهد شده)
r_2	درآمد تولید هر واحد محصول سالم (برای موارد خارج از (بیشتر از) کل تقاضای تعهد شده)
p	احتمال تولید محصول سالم
k	میزان جریمه برای هر واحد محصول کمتر از میزان تعهد و در پایان دوره‌های مجاز تولید
M	سقف تولید مجاز در هر دوره
h	هزینه انجام تعمیرات در ابتدای دوره
p_I	فاکتور بهبود (ضریب تعدیل برای افزایش احتمال تولید محصولات سالم در صورت انجام تعمیرات در ابتدای دوره/ عدد بزرگتر از یک)
x_n	متغیر تصمیم ۱: مقدار تولید در هر دوره
m_n	متغیر تصمیم ۲ (متغیر باینری): (انجام و یا عدم انجام تعمیرات در هر دوره)

انجام و یا عدم انجام عملیات سرویس و نگهداری اولیه یا همان تعمیرات ناقص مفروض در این پژوهش، با یک متغیر باینری در مدل لحاظ شده است. مقدار ۱ به مفهوم انجام تعمیرات در ابتدای دوره و مقدار ۰ به مفهوم عدم انجام تعمیرات می‌باشد. بر همین مبنا، یکی دیگر از اجزاء فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی یا همان "اقدام"، تعریف و معادل ترکیب‌های دوتایی مربوط به تعیین تکلیف عملیات تعمیرات ناقص و تعداد محصولاتی تولیدی (شامل محصولات سالم و ناسالم) در هر دوره در نظر گرفته می‌شود. A نمایش مجموعه اقدامات با ترکیب فوق‌الاشاره می‌باشد.

$$A = \{(x_n, m_n) | x_n = 0, 1, 2, \dots, M, m_n = 0, 1\} \quad (2)$$

متوالی در مقاطع^۱ مختلف وجود دارد. در مسئله تحت بررسی، چند مقطع متوالی برای تصمیم‌گیری در خصوص انجام عملیات نگهداری و تعمیرات ناقص و همچنین تصمیم‌گیری در خصوص میزان تولید در هر دوره در نظر گرفته شده است. مبنای تعریف این مقاطع، شروع فرآیند تولید در ابتدای هر دوره زمانی و پایان تولید در دوره قبل می‌باشد. البته بدیهی است که اولین نقطه تصمیم‌گیری، مصادف با اولین راه‌اندازی سیستم بوده و در این مورد خاص، پایان یافتن تولید در دوره قبل، موضوعیت ندارد. به منظور لحاظ کردن شرایط دنیای واقعی در این مسائل، مواجهه با موضوع عدم قطعیت در برخی پارامترها نیز اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. برای حل این دسته از مسائل، لازم است از رویکردهایی برای مدل‌سازی و حل مسائل استفاده شود که بتواند ضمن پوشش جنبه‌های فوق‌الاشاره، کارایی مناسبی در حل این گونه مسائل داشته باشد.

۶-۲- معرفی و تشریح عناصر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی برای مسئله تحت بررسی

لیست اندیس‌ها، پارامترها و نمادهای به کاررفته در عبارات و معادلات مربوطه، در جدول ۳ ارائه شده است.

۶-۲-۱- فضای حالات^۲:

در مدل MDP، مبنای تصمیم‌گیری در مقاطع مختلف، حالت مسئله می‌باشد. در مسئله تحت بررسی، تعداد محصولات سالم تولید شده تا ابتدای هر دوره، به عنوان "حالت" مسئله تعریف می‌شود. در دوره نخست، این تعداد یا همان حالت مسئله، معادل صفر است. مجموعه S نشان‌دهنده حالات مذکور برای مسئله می‌باشد.

$$S = \{s | s = 0, 1, 2, 3, \dots, nM\} \quad (1)$$

۶-۲-۲- اقدامات^۳:

همانطور که پیشتر اشاره شد، انجام عملیات تعمیر و نگهداری ناقص (سرویس اولیه در ابتدای هر دوره)، منجر به کاهش احتمال تولید محصولات معیوب در آن دوره خواهد شد. با توجه به احتمال تولید محصولات معیوب و همچنین با توجه به محدودیتی که در دوره‌های مجاز تولید و به عبارتی محدودیتی که در تعداد دفعات مجاز راه‌اندازی سیستم وجود دارد، لازم است در ابتدای هر دوره، نسبت به انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص و همچنین تعداد

³ Actions

¹ Epoch

² State space

۶-۲-۳- پاداش آنی^۱:

برنامه‌ریزی t ، معادل s واحد باشد (حالت سیستم s باشد). این حالت، مبنای تصمیم‌گیری در مورد انجام اقدام متناسب در ابتدای دوره مذکور خواهد بود. چنانچه تصمیم مربوط به اقدام تعمیراتی، معادل m_n بوده و در زمینه تولید هم تصمیم بر تولید x_n واحد محصول باشد، در این صورت، سیستم با احتمال $P_{ss'}(x_n, m_n)$ از حالت s به حالت s' منتقل خواهد شد. در واقع با تعیین احتمال تولید محصولات سالم (p) بر مبنای مقدار متغیر باینری m_n ، از تعداد x_n واحد محصول تولیدی، $s' - s$ واحد سالم بوده و بقیه معیوب می‌باشد.

$$p_{ss'}(x_n, m_n) = \binom{x_n}{s' - s} [p \times (p_I)^{m_n}]^{s' - s} [1 - p \times (p_I)^{m_n}]^{x_n - s' + s} \quad (4)$$

۶-۳- شرح مراحل روش پیشنهادی

مطابق رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی و با توجه به معادلات بهینگی بلمن، نحوه محاسبه ارزش حالات (محاسبه کمینه هزینه در هر دوره و برای هر حالت) به صورت زیر می‌باشد:

$$V_n^*(s) = \min(V_n(s, x_n, m_n)) \quad (5)$$

$$x_n = 1, 2, 3, \dots, \quad m_n = 0, 1$$

$$V_n^*(s) = \min_{(x_n, m_n)} \left\{ R(s, x_n, m_n) + \sum_{s'} V_{n+1}^*(s') p_{ss'}(x_n, m_n) \right\} \quad (6)$$

مقادیر ارزش حالات مسئله برای انتهای دوره پایانی (پایان دوره تصمیم‌گیری یا پایان دوره برنامه‌ریزی) نیز بر اساس معادله غیربازگشتی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{n+1}(s) = \begin{cases} -r_1 s + k(N - s); & \text{if } s < N \\ -r_1 \cdot N - r_2(s - N); & \text{if } s \geq N \end{cases} \quad (7)$$

۶-۴- رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی - تکنیک

پس رو

به منظور حل مسئله تحت بررسی و با تکیه بر معادلات فوق، از روش پس‌رو در برنامه ریزی پویا استفاده می‌کنیم. شمای کلی روش مذکور با فرض اینکه تعداد دوره‌های مجاز

انجام هر اقدام خاص در هر یک از حالات مسئله، دارای "پاداش" متناسب با آن اقدام می‌باشد. در این مسئله، پاداش، بر اساس تحقق هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات ناقص، راه‌اندازی سیستم و تولید محصولات تعریف می‌شود. چنانچه تصمیم یا اقدام مورد نظر، عدم تولید در یک دوره خاص باشد، هیچ هزینه‌ای در محاسبه پاداش آنی، لحاظ نخواهد شد. در شرایطی که سیستم بدون انجام سرویس اولیه، راه‌اندازی شود، نتیجه آنی اقدام تصمیم‌گیرنده، تحمیل هزینه راه‌اندازی سیستم و هزینه ناشی از تولید محصولات در ابتدای دوره مربوطه خواهد بود. چنانچه در ابتدای دوره، نگهداری و تعمیرات ناقص نیز انجام شود، علاوه بر هزینه‌های اخیر، هزینه سرویس اولیه نیز محقق خواهد شد. با توجه به توضیحات فوق معادله چندضابطه‌ای محاسبه پاداش آنی به قرار زیر می‌باشد.

$$R(s, x_n, m_n) = \begin{cases} h + E + cx_n & \text{if } x_n > 0, m_n = 1 \\ E + cx_n & \text{if } x_n > 0, m_n = 0 \\ 0 & \text{if } x_n = 0, m_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

مجموعه تصمیماتی که در ابتدای ادوار مختلف در خصوص انجام یا عدم انجام تعمیرات ناقص و تعیین مقادیر تولید گرفته می‌شود، سیاست^۲ نامیده می‌شود. برای تعیین ارزش سیاست نهایی اتخاذ شده، پس از پایان دوره‌های مجاز تولید، درآمد ناشی از عرضه محصولات به مشتری و اختلاف آن با هزینه‌های تحمیل شده به سیستم محاسبه می‌شود. هدف اینست که با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی، این هزینه در حداقل بوده و به عبارتی، سیاست بهینه یا همان برنامه بهینه توأم تولید و نگهداری و تعمیرات تعیین (انتخاب) شود.

۶-۲-۴- احتمال انتقال^۳:

با توجه به فرض امکان تولید محصولات معیوب، کلیه محصولات تولیدی در هر دوره، الزاماً سالم نبوده و انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره نیز منجر به تغییر احتمال تولید محصولات سالم خواهد شد. بنابراین انتقال بین حالات مختلف مسئله، تصادفی بوده و با اخذ یک تصمیم مشخص، حالت بعدی مسئله از قبل مشخص نمی‌باشد. فرض کنید مجموع محصولات تولیدی سالم تا ابتدای دوره

³ Transition probability¹ Immediate reward² Policy



شکل ۱- شمای کلی روش پس‌رو در برنامه‌ریزی پویا

جدول ۴- معرفی اندیس‌ها، پارامترها و سایر نمادها برای مثال عددی

نماد	مقدار مفروض برای حل مثال عددی	نماد	مقدار مفروض برای حل مثال عددی
N	۵	P	۰/۸
n	۳	k	۱۰
E	۵	M	۱۰
c	۱	h	۱
r_1	۱/۵	p_i	۱/۱۲۵
r_2	۰/۵		

جدول ۵- محاسبه ارزش بهینه حالات در پایان دوره سوم

حالت مسئله در پایان دوره سوم و ابتدای دوره فرضی چهارم	محاسبه ارزش بهینه حالات با معادله غیربازگشتی شماره ۴
۰	$V_4^*(0) = -1.5 \times 0 + 10(5 - 0) = 50$
۱	$V_4^*(1) = -1.5 \times 1 + 10(5 - 1) = 38.5$
۲	$V_4^*(2) = -1.5 \times 2 + 10(5 - 2) = 27$
۳	$V_4^*(3) = -1.5 \times 3 + 10(5 - 3) = 15.5$
۴	$V_4^*(4) = -1.5 \times 4 + 10(5 - 4) = 4$
۵	$V_4^*(5) = -1.5 \times 5 - 0.5(5 - 5) = -7.5$
۶	$V_4^*(6) = -1.5 \times 5 - 0.5(6 - 5) = -8$
۷	$V_4^*(7) = -1.5 \times 5 - 0.5(7 - 5) = -8.5$
۸	$V_4^*(8) = -1.5 \times 5 - 0.5(8 - 5) = -9$
۹	$V_4^*(9) = -1.5 \times 5 - 0.5(9 - 5) = -9.5$
۱۰	$V_4^*(10) = -1.5 \times 5 - 0.5(10 - 5) = -10$

تولید سه دوره باشد، در شکل (۱) ارائه شده است. بر مبنای رویکرد فوق، نخست با استفاده از معادله شماره ۷، مقادیر مربوط به ارزش بهینه حالات مختلف در انتهای دوره تصمیم‌گیری آخر و به عبارتی ابتدای دوره فرضی $n+1$ ام، محاسبه می‌شود. این مقادیر با $V_{(n+1)}^*$ نمایش داده می‌شود. در ادامه و در گام اول از روش بازگشتی فوق‌الشاره، لازم است برای هر یک از حالات ممکن دوره پایانی، مقدار بهینه اشاره شده در معادله شماره ۶ را به ازای اقدامات مختلف (یعنی همان مقادیر (x_n, m_n) و در واقع همان تصمیم‌گیری‌های و مقادیر تولید در هر دوره)، محاسبه نمود. در این معادله مقادیر s' ، معادل حالاتی است که بر اساس حالت فعلی (s) در دوره جاری و با توجه به انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره و تعداد محصول سالم تولید شده، انتقال به آن حالات در دوره بعدی محتمل می‌باشد. در انتهای این گام، مقادیر بهینه ارزش حالات و همچنین اقدام بهینه به ازای هر حالت مشخص خواهد شد. در گام دوم از مراحل روش بازگشتی، با مبنا قرار دادن ارزش‌های محاسبه شده در گام اول و با رویکرد مشابه گام اول، مقادیر ارزش بهینه حالات و همچنین اقدامات بهینه برای دوره دوم تصمیم‌گیری را تعیین می‌کنیم. گام سوم، مربوط به تعیین ارزش بهینه و تعیین تصمیم (اقدام) بهینه برای شروع فرآیند تولید در سیستم تولیدی مورد بحث می‌باشد. در این دوره، با توجه به اینکه پیشتر از آن تولیدی صورت نپذیرفته، تنها حالت ممکن که در ابتدای دوره با آن مواجه هستیم، حالت صفر می‌باشد. به منظور محاسبه ارزش این حالت، مشابه گام‌های قبلی و با مبنا قرار دادن ارزش‌های بهینه محاسبه شده در گام پیشین، به کمک معادله شماره ۶، اقدام بهینه برای این دوره را نیز تعیین می‌نمائیم. بدین ترتیب و با بهره‌گیری از یک رویه بازگشتی، سیاست بهینه در زمینه برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم و به عبارتی مقادیر بهینه تولید و تصمیم تعمیراتی مناسب، برای مواجهه با هر یک از حالات ممکن در ابتدای هر دوره، تعیین خواهد شد.

۷- حل مثال عددی

به منظور حل یک مثال موردی از مسئله تحت بررسی، پارامترهای مسئله مطابق جدول ۴، تنظیم، و محاسبات لازم برای تعیین سیاست بهینه انجام شده است. ضمن حل مثال، جزئیات بیشتری از مسئله و روش پیشنهادی تشریح شده است.

در زیر ارائه شده است. موارد مذکور با فونت برجسته نمایش داده شده است.

محاسبات تفصیلی سلول های مشخص شده با فونت برجسته:

در جدول ۶ و برای سلول مشخص شده واقع در سطر دوم و ستون هشتم (از چپ)، ابتدا احتمال انتقال از حالت صفر به هر یک از حالات و تحت انجام اقدام مربوطه (انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره و تولید سه محصول در طول دوره) را به کمک معادله شماره ۴ محاسبه می‌کنیم. سیستم در حالتی قرار دارد که تعداد محصولات سالم ابتدای دوره صفر می‌باشد (عدد سطر دوم و ستون اول از چپ، معادل حالت سیستم و در این مورد، برابر صفر می‌باشد). انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره، احتمال تولید محصولات سالم را با ضریب مشخصی (P_I) افزایش داده و با توجه به احتمالی بودن سلامت هر محصول تولیدی، با تولید سه واحد محصول، به یکی از حالت های ۰، ۱، ۲ و ۳ منتقل خواهیم شد. پس از محاسبه احتمالات انتقال به کمک معادله شماره ۴، ارزش انجام اقدام فوق‌الاشاره در حالت صفر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} V_n(s, x_n, m_n) &= \left(R(s, x_n, m_n) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s'} V_{n+1}^*(s') p_{ss'}(x_n, m_n) \right) \\ &= V_n(0, x_3, m_3) = V_n(0, 3, 1) \\ &= \left(3 + 5 + 1 \times 3 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s'} V_{n+1}^*(s') p_{ss'}(x_n, m_n) \right) \\ &= 1 + 5 + 1 \times 3 \\ &\quad + 50 \times 0.001 + 38.5 \times 0.027 \\ &\quad + 27 \times 0.243 + 15.5 \times 0.729 \\ &= 27.94 \end{aligned}$$

مقادیر ارزش بهینه حالات برای انتهای دوره سوم و ابتدای دوره فرضی چهارم، مبنای انجام محاسبات در گام‌های اصلی روش پس‌رو می‌باشد. این مقادیر، با استفاده از معادله شماره ۷، محاسبه و نتایج آن در جدول ۵ نمایش داده شده است.

به همین ترتیب برای سایر حالات بزرگتر از ۱۰، هر بار صرفاً به میزان ۰/۵- به مقدار قبلی اضافه خواهد شد.

۷-۱- محاسبه مقادیر ارزش حالت- عمل به ازای حالات و اقدامات مختلف و تعیین مقادیر بهینه

همانطور که پیشتر اشاره شد، اقدامات تعریف شده در مسئله تحت بررسی، انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص در ابتدای هر دوره و تولید تعداد مشخصی از محصولات (سالم و ناسالم) در طول دوره می‌باشد. کلیه ترکیبات مختلف این دو اقدام در سطر اول (بالترین سطر) جدول ۶ نشان داده شده است. برای نمونه، مقدار (۴، ۱) در سطر اول جدول، به مفهوم تولید ۴ عدد محصول در دوره سوم و همچنین انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره مذکور بوده و مقدار (۸، ۰) نیز به مفهوم تولید ۸ عدد محصول در طول دوره سوم و عدم انجام تعمیرات ناقص در ابتدای این دوره می‌باشد. با استفاده از معادله شماره ۶، ارزش کلیه ترکیب‌های مختلف این اقدامات به ازای هر حالت مختلف بررسی و بهترین ترکیب (بهترین اقدام) به ازای هر حالت انتخاب می‌شود. نتایج محاسبات فوق‌الاشاره، برای دوره‌های سوم تا اول در جداول شماره ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است. مطابق آنچه که در بخش ۶-۳ تشریح شد، در واقع در هر حالت باید به ازای ترکیبات مختلف اقدامات ممکن (یعنی همان ترکیب‌های مختلف مقادیر (x_n, m_n) در هر دوره)، مقدار بهینه اشاره شده در معادله مذکور را محاسبه نمود.

به منظور درک رویکرد محاسبات جدول ۶، محاسبات تفصیلی (بسط یافته) دو مورد از مقادیر درج شده در جدول

جدول ۶- مرحله اول روش برنامه ریزی پویا و یافتن مقادیر بهینه دوره سوم تولید

[illegible]

در گام دوم روش بازگشتی و بر مبنای ستون $V_3^*(x_3, m_3)$ در جدول ۶، محاسبات مشابه برای دوره دوم تصمیم‌گیری انجام و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. با مبنای قرار دادن مقادیر ارزش بهینه حالات در این جدول و با رویکرد مشابه گام دوم، محاسبات مربوط به تنها حالت دوره اول نیز انجام و نتایج آن در جدول ۸ آمده است.

۷-۲- تعیین سیاست بهینه تولید و نگهداری و تعمیرات سیستم بر اساس جداول محاسبات ارزش:

برای انتخاب سیاست بهینه، کافی است در هر یک از جداول فوق و با توجه به مقادیر درج شده در ستون دوم (از راست)، اقدام ترکیبی مناسب برای هر حالت را تشخیص داد. هر سطر از جداول فوق، مربوط به یک حالت خاص سیستم بوده و کمترین مقدار در هر سطر تعیین کننده اقدام بهینه برای آن حالت می باشد. بدین منظور، جداول تهیه شده را از انتها به ابتدا (از جدول ۸ به جدول ۶) بررسی می کنیم. با توجه به جدول ۸، اقدام بهینه برای دوره اول، تولید ۷ واحد محصول و انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره اول می باشد.

برای سلول مشخص شده در سطر هفتم و ستون هفتم از چپ، با توجه به اینکه سیستم در حالت ۵ قرار دارد (تعداد محصولات سالم ابتدای دوره، پنج واحد می‌باشد)، با توجه به احتمالی بودن سلامت هر محصول تولیدی، با تولید سه واحد محصول آنهم در شرایطی که تعمیرات ناقص در ابتدای دوره انجام نشده است، به یکی از حالت های ۵، ۶، ۷ و یا ۸ منتقل خواهیم شد. پس از محاسبه احتمالات انتقالات، محاسبه ارزش حالت-عمل به قرار زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} V_n(s, x_n, m_n) &= \left(R(s, x_n, m_n) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s'} V_{n+1}^*(s') p_{ss'}(x_n, m_n) \right) \\ &= V_n(5, x_3, m_3) = V_n(5, 3, 0) \\ &= \left(5 + 1 \times 3 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{s'} V_{n+1}^*(s') p_{ss'}(x_n, m_n) \right) \\ &= 5 + 1 \times 3 \\ &\quad + (-7.5) \times 0.008 \\ &\quad + (-8) \times 0.096 \\ &\quad + (-8.5) \times 0.384 \\ &\quad + (-9) \times 0.512 = -0.7 \end{aligned}$$

[illegible][illegible]

همانطور که پیشتر هم اشاره شد، فرض بر مستعمل بودن ماشین‌آلات بوده و انجام تعمیرات در دوره اول نیز موجه است. بنابراین در دوره اول، پس از سرویس اولیه ماشین‌آلات، به تعداد ۷ واحد محصول تولید می‌کنیم. بسته به اینکه چه تعداد از این محصولات سالم باشد، در حالت مشخصی از حالات بررسی شده در جدول قبلی (جدول ۷) قرار خواهیم گرفت. برای حالت مذکور و به کمک جدول مربوطه، اقدام بهینه برای دوره دوم را تعیین می‌کنیم. تشخیص اقدام بهینه برای دوره سوم نیز با رویکردی مشابه آنچه گفته شد، صورت می‌پذیرد.

۷-۳- اعتبارسنجی

ارزیابی روایی^۱ یا اعتبارسنجی یک ابزار اندازه‌گیری یا یک روش تحقیق، با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌پذیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به تحلیل محتوا، نظرات خبرگان، استفاده از داده‌های ادبیات موضوع،

مجله مدل سازی در مهندسی

شرکت، منجر به سودآوری شود، مقدار نهایی هزینه، منفی خواهد بود. بر همین اساس، نرخ‌های هزینه محاسبه شده در این بخش، الزاماً معادل میزان هزینه لازم برای تولید هر واحد محصول نبوده و بسته به علامت نرخ مذکور، می‌تواند نشان‌دهنده هزینه و یا سود ناشی از تولید هر واحد محصول باشد. سوم اینکه، بعد از اعمال تغییرات در هر یک از پارامترها، اقدام بهینه برای دوره اول، به راحتی، از نتایج حل مدل، قابل تشخیص است. اما در واقعیت و در حین تصمیم‌گیری برای تعیین اقدام بهینه در دوره دوم، این اقدام، مشروط به تعیین حالت مسئله (تعداد محصولات سالم تولید شده) تا ابتدای دوره دوم می‌باشد. همانطور که از جدول ۷ پیداست، حل مسئله از روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی، اقدامات بهینه را به ازای کلیه حالات ممکن ارائه کرده و اینکه در ابتدای دوره مذکور در چه حالتی قرار داریم، مشروط به انجام عملیات تولید در دنیای واقعی و تعیین حالت مسئله می‌باشد. به منظور رفع این چالش، با بهره‌گیری از مفاهیم و اصول شبیه‌سازی، رویکرد زیر برای ایجاد امکان تحلیل و مقایسه نتایج اتخاذ شده است.

نخست، تغییرات لازم در پارامتر تحت بررسی را در کد مسئله اعمال نموده و پس از حل مدل، اقدام بهینه در دوره اول تعیین شده است. این اقدام در قالب یک ترکیب دوتایی (دو بُعدی) تعریف شده است. یک بُعد مربوط به تعداد محصول تولیدی و دیگری مربوط به عملیات نگهداری و تعمیرات می‌باشد. با ضرب تعداد محصول تولیدی در احتمال تولید محصول سالم، حالت محتمل برای دوره دوم، تعیین می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که احتمال تولید محصول سالم در هر دوره، بسته به انجام و یا عدم انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره، متفاوت خواهد بود. پس از تعیین حالت محتمل برای دوره دوم، با تکرار عملیات مشابه برای این دوره و با تجمیع محصولات تولید شده در دوره‌های اول و دوم، حالت محتمل در دوره سوم نیز تعیین و مجدداً با تکرار عملیات مذکور برای دوره سوم، متوسط تعداد محصول سالم تحویل شده به مشتری، برآورد شده است. در هر دوره و در مسیر انجام عملیات مذکور، چنانچه بُعد اول اقدام بهینه برای حالات برآورد شده، یعنی همان میزان تولید محصول، معادل صفر باشد، هزینه راه‌اندازی لحاظ نشده و در غیر اینصورت این هزینه در محاسبات مربوطه اعمال شده است. نکته قابل توجه اینکه، ضرب احتمال سالم بودن هر محصول در تعداد محصولات تولید

باشد، همچنان وابستگی زمان، حجم و کیفیت تولید به عملیات نگهداری و تعمیرات، تأمین به موقع و درست تقاضای مشتریان را تحت تأثیر قرار داده و لازم است این دو مقوله به صورت توأم و در قالب یک برنامه یکپارچه مورد بررسی قرار گیرد. محققین، در راستای مواجهه با این چالش، به ارائه مدل‌ها و راهکارهای متنوعی پرداخته و در هر یک از این مدل‌ها، به گونه‌ای در تلاش برای دستیابی به یک سیاست بهینه در شرایط خاص هر مسئله هستند که اغلب امکان تعمیم آن به سایر مسائل و شرایط به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. ماهیت عمومی مسئله ارائه شده در پژوهش جاری به گونه‌ای است که اگرچه ممکن است نتوان مستقیماً آن را به مسائل و شرایط دیگر تعمیم داد، اما رویکرد مدل‌سازی و حل آن، راه‌گشای طیف وسیعی از مسائل مشابه بوده و با تغییرات اندکی در مدل پایه، امکان پوشش دادن مسائل متنوعی از حوزه تحت بررسی را فراهم نموده است.

در بخش ۷ به منظور بررسی کاربرد و اعتبار روش پیشنهادی، یک مثال موردی در ابعاد کوچک، در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی، مدل و با بهره‌گیری از رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی حل شده و به عبارتی سیاست بهینه تولید در افق زمانی مفروض بدست آمده است. با توجه به وابستگی نتایج حل مسئله به پارامترهای مختلف و در راستای بررسی نحوه تأثیر تغییرات این پارامترها، در ادامه ضمن اشاره به تغییرات اعمال شده در پارامترهای مذکور، نتایج حل مسئله به ازای هر تغییر، بررسی و روند تغییر نتایج گزارش شده است. توجه به سه موضوع اساسی، در این بخش، ضروری به نظر می‌رسد. نخست اینکه، یافته‌ها، بر اساس، مثال عددی حل شده در بخش ۷ ارائه شده‌اند. مبنای محاسبه متوسط نرخ هزینه، تقسیم مجموع کلیه هزینه‌ها (با علامت مثبت) و درآمدها (با علامت منفی) بر تعداد محصولات سالم تحویل شده به مشتری می‌باشد. به منظور بررسی اثر تغییر هر یک از پارامترها بر متوسط نرخ هزینه، در هر یک از موارد مربوطه، صرفاً همان پارامتر، در بازه خاصی تغییر یافته و سایر پارامترها و مقادیر، مطابق با جدول ارائه شده برای حل مثال عددی (جدول ۴) می‌باشد. دوم، با توجه به اینکه تابع هدف اصلی مسئله در قالب حداقل کردن هزینه تعریف شده است، همواره هزینه‌ها با علامت مثبت و درآمدها با علامت منفی در معادلات و محاسبات اعمال شده‌اند. بنابراین چنانچه اجرای تعهدات

شده، منجر به تولید اعداد صحیح نخواهد شد. به همین منظور چنانچه ارقام اعشار عدد بدست آمده کمتر از ۰/۵ بوده باشد، عدد به سمت عدد صحیح کوچکتر و در غیر اینصورت به سمت عدد صحیح بزرگتر گرد شده است. در ادامه و بر مبنای رویکرد فوق‌الشاره، اثرات تغییر پارامترهای مختلف بر روند تغییرات متوسط نرخ هزینه مورد بررسی قرار گرفته است:

۸-۱- بررسی اثر تغییرات هزینه راه‌اندازی بر متوسط

نرخ هزینه تولید

چنانچه در یک دوره تصمیم بر تولید تعدادی محصول

گرفته شود، متعاقب آن هزینه راه‌اندازی نیز در محاسبات لحاظ خواهد شد. اثر تغییرات این هزینه بر روی متوسط نرخ هزینه، بررسی و نتایج محاسبات مربوطه در جدول ۹ ارائه شده است. در شرایط مثال ارائه شده در این پژوهش و با فرض ثبات سایر پارامترها، در حالت کلی با افزایش هزینه راه‌اندازی، متوسط نرخ هزینه تولید هر واحد محصول افزایش یافته و امید اینکه اجرای تعهدات شرکت منجر به سودآوری شود، کاهش می‌یابد. روند تغییرات متوسط نرخ هزینه به ازای تغییرات هزینه راه‌اندازی، در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۹- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات هزینه راه‌اندازی

ردیف	پارامتر تحت بررسی	دوره اول	کل افق زمانی مسئله (سه دوره)				متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)
			متوسط تعداد دفعات راه‌اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط تعداد محصول نهایی	متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)	
۱	۰	(۵, ۰)	۶	۲	۵	-۰/۳۰	۱
۲	۱	(۶, ۰)	۶	۱	۵	-۰/۱۰	۲
۳	۲	(۶, ۱)	۶	۱	۵	+۰/۳۰	۳
۴	۳	(۶, ۱)	۶	۱	۵	+۰/۵۰	۴
۵	۴	(۶, ۱)	۶	۱	۵	+۰/۷۰	۵
۶	۵	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۰/۸۳	۶
۷	۶	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۱/۰۰	۷
۸	۷	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۱/۱۷	۸
۹	۸	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۱/۳۳	۹
۱۰	۹	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۱/۵۰	۱۰
۱۱	۱۰	(۷, ۱)	۷	۱	۶	+۱/۶۷	۱۱



شکل ۲- نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه به ازای افزایش هزینه راه‌اندازی

۸-۲- بررسی اثر تغییرات هزینه انجام عملیات

نگهداری و تعمیرات ناقص بر متوسط نرخ هزینه تولید همانطور که از جدول ۱۰ پیداست، افزایش هزینه عملیات

نگهداری و تعمیرات ناقص و گذر از مقدار ۱، موجب غیرموجه شدن این عملیات خواهد شد. در تنظیم سایر پارامترها، چنانچه احتمال تولید محصولات معیوب، زیاد

بوده و تأثیر انجام نگهداری و تعمیرات ناقص بر کاهش این احتمال، قابل توجه باشد، این امکان وجود دارد که افزایش بیشتر هزینه نگهداری و تعمیرات، همچنان دارای توجیه بوده و حداقل یکبار در طول افق زمانی مسئله انجام پذیرد.

جدول ۱۰- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات هزینه عملیات نگهداری و تعمیرات ناقص

ردیف	پارامتر تحت بررسی	دوره اول	کل افق زمانی مسئله (سه دوره)			
			متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)	متوسط تعداد دفعات راه اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط تعداد محصول سالم نهایی
۱	۰	(۷, ۱)	۷	۱	۱	۶
۲	۰/۵	(۷, ۱)	۷	۱	۱	۶
۳	۱	(۷, ۱)	۷	۱	۱	۶
۴	۱/۵	(۸, ۰)	۸	۱	۰	۶
۵	۲	(۸, ۰)	۸	۱	۰	۶
۶	۲/۵	(۸, ۰)	۸	۱	۰	۶
۷	۳	(۸, ۰)	۸	۱	۰	۶

سالم، تأثیری در تکرار دفعات راه اندازی نخواهد داشت. - بدیهی است که با افزایش احتمال تولید محصولات سالم، نیاز به انجام تعمیرات ناقص در ابتدای دوره و بالا بردن احتمال تولید محصولات سالم کمتر خواهد شد. همچنین با توجه به هزینه نسبتاً پایین انجام تعمیرات، ترجیح مدل اینست که به نفع افزایش نسبی احتمال تولید محصولات سالم و بالا بردن اطمینان اجرای تعهدات و اجتناب از تحمیل جریمه‌های کمبود، تعمیرات ناقص برای حداقل یکبار انجام پذیرد.

- در حالتی که احتمال تولید محصولات سالم تقریباً کم و معادل ۰/۲ است، با وجود انجام تعمیرات ناقص و متعاقب آن تأثیر فاکتور بهبود احتمال بر احتمال تولید محصولات سالم، به طور متوسط، امکان اجرای تعهدات (تولید ۵ محصول سالم) وجود نداشته و اعمال جرائم مربوط به کمبود محصولات در انتهای افق زمانی، نرخ هزینه را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. گواه این موضوع تفاوت قابل توجه متوسط نرخ هزینه در ردیف ۱ جدول با سایر مقادیر می‌باشد.

نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر افزایش احتمال تولید محصولات سالم در شکل (۳) و همچنین نمودار تغییرات متوسط محصولات تولید شده، متوسط دفعات نیاز به راه اندازی و متوسط دفعات تعمیرات ناقص در اثر افزایش احتمال مذکور در شکل (۴) نمایش داده شده است.

۸-۳- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات احتمال تولید محصولات سالم

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۱، با افزایش احتمال تولید محصولات سالم (کاهش احتمال تولید معیوب)، متوسط نرخ هزینه تولید هر واحد محصول، کاهش یافته و شرکت می‌تواند با تمرکز بر روی سایر پارامترهای تأثیرگذار در این نرخ و انجام تعديلات لازم، به ایجاد امکان سودآوری در اجرای تعهد خود (تحويل ۵ محصول سالم به مشتری)، امیدوار باشد. اثر مثبت افزایش احتمال تولید محصولات سالم بر کاهش هزینه‌های تولید، از لحاظ منطق ذهنی نیز امری بدیهی به نظر می‌رسد. این موضوع، مؤید اعتبار مدل و نتایج ارائه شده می‌باشد.

سایر نتایج قابل توجه در جدول ۱۱ به قرار زیر می‌باشد:

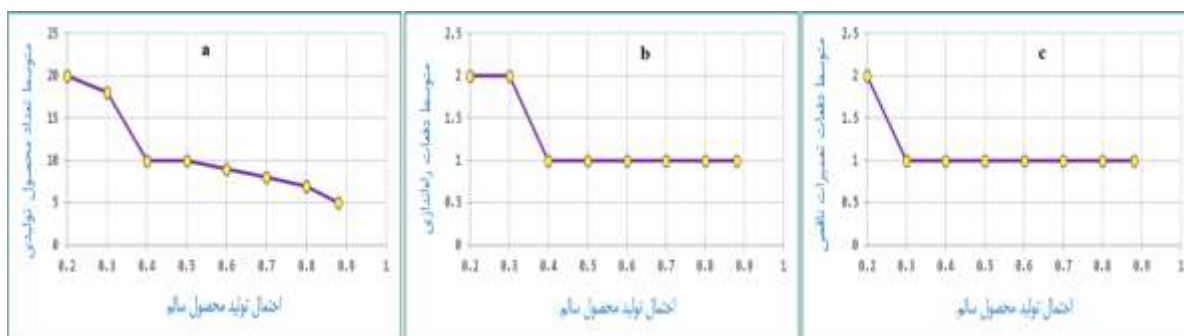
- افزایش احتمال تولید محصولات سالم منجر به کاهش متوسط تعداد محصولات تولید شده خواهد شد. روند این تغییرات در شکل (a) ۳ نمایش داده شده است
- برای تولید محصولات و اجرای تعهدات شرکت، حداقل یکبار راه اندازی سیستم اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. روند تغییرات متوسط تعداد دفعات راه اندازی، بعد از قوت گرفتن احتمال تولید محصولات سالم، تثبیت شده و با حداقل دفعات راه اندازی، امکان اجرای تعهدات فراهم خواهد شد. افزایش بیشتر احتمال تولید محصولات

جدول ۱۱- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات احتمال تولید محصولات سالم

ردیف	پارامتر تحت بررسی	دوره اول	کل افق زمانی مسئله (سه دوره)			
			اقدام بهینه (x_n, m_n)	متوسط تعداد محصول تولیدی	متوسط دفعات راه‌اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص
متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)	متوسط تعداد محصول سالم نهایی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط تعداد دفعات	متوسط نرخ هزینه	متوسط تعداد دفعات	متوسط دفعات تعمیرات ناقص
۱	۰/۲	(۱۰, ۱)	۲۰	۲	۲	۴
۲	۰/۳	(۱۰, ۱)	۱۸	۲	۱	۵
۳	۰/۴	(۱۰, ۱)	۱۰	۱	۱	۵
۴	۰/۵	(۱۰, ۱)	۱۰	۱	۱	۶
۵	۰/۶	(۹, ۱)	۹	۱	۱	۷
۶	۰/۷	(۸, ۱)	۸	۱	۱	۶
۷	۰/۸	(۷, ۱)	۷	۱	۱	۶
۸	۰/۸۸	(۵, ۱)	۵	۱	۱	۵



شکل ۳- نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات احتمال تولید محصولات سالم



شکل ۴- (a) نمودار تغییرات متوسط تعداد محصولات تولیدی / (b) نمودار تغییرات متوسط دفعات نیاز به راه‌اندازی / (c) نمودار تغییرات متوسط دفعات تعمیرات ناقص - به ازای تغییرات (افزایش) احتمال سالم بودن محصولات تولیدی

نرخ هزینه که از تقسیم مجموع کلیه هزینه‌ها (با علامت مثبت) و درآمدها (با علامت منفی) بر تعداد محصولات سالم تحویل شده به مشتری بدست می‌آید، متفاوت می‌باشد. مورد نخست، جزو پارامترهای ورودی مسئله بوده و مورد اخیر در نتیجه حل مسئله تحت بررسی و اعمال

۸-۴- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات هزینه تولید هر واحد محصول

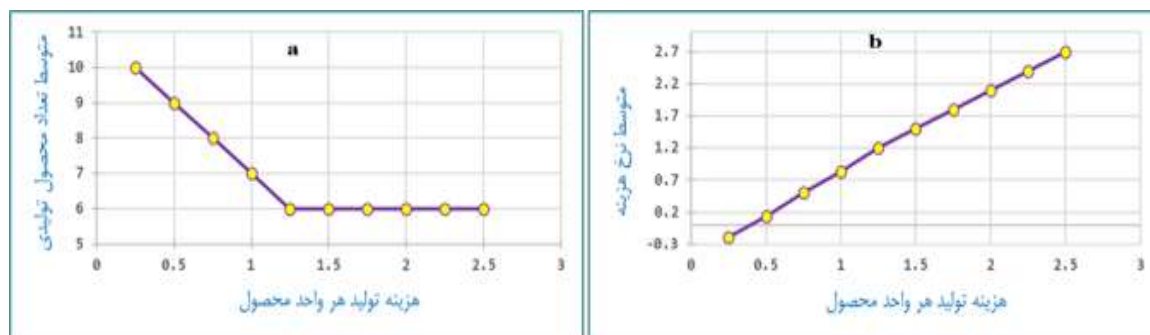
یادآوری می‌شود که هزینه تولید هر واحد محصول، صرفاً مربوط به هزینه مستقیم مفروض برای تولید محصولات است که در جدول ۱۲ با نماد c معرفی شده و با متوسط

نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج حاکی از آنست که به مرور و با افزایش هزینه تولید هر واحد محصول، متوسط نرخ هزینه نیز افزایش یافته و امید به سودآور بودن اجرای تعهدات، کاهش می‌یابد. بر همین اساس، استقبال از انجام تعمیرات ناقص در راستای کاهش احتمال تولید محصولات معیوب نیز افزایش یافته است.

هزینه‌های مربوط به تولید، راه‌اندازی، انجام تعمیرات ناقص، جرائم کمبود و درآمدهای ناشی از فروش محصولات سالم (به میزان تعهد شده و مقادیر فراتر از آن) محاسبه و برآورد شده است. بر مبنای مفروضات پژوهش جاری، تغییرات متوسط تعداد محصول تولیدی و همچنین تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات هزینه تولید هر واحد محصول، در جدول ۱۲ ارائه و روند این تغییرات به صورت گرافیکی

جدول ۱۲- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات هزینه تولید هر واحد محصول

ردیف	پارامتر تحت بررسی	دوره اول	کل افق زمانی مسئله (سه دوره)			
			متوسط تعداد محصول تولیدی	متوسط دفعات راه‌اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط تعداد محصول نهایی
	هزینه مستقیم تولید هر واحد محصول	اقدام بهینه (x_n, m_n)	متوسط تعداد محصول تولیدی	متوسط دفعات راه‌اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)
۱	۰/۲۵	(۱۰, ۰)	۱۰	۱	۰	۸
۲	۰/۵	(۹, ۰)	۹	۱	۰	۷
۳	۰/۷۵	(۸, ۰)	۸	۱	۰	۶
۴	۱	(۷, ۱)	۷	۱	۱	۶
۵	۱/۲۵	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵
۶	۱/۵	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵
۷	۱/۷۵	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵
۸	۲	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵
۹	۲/۲۵	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵
۱۰	۲/۵	(۶, ۱)	۶	۱	۱	۵



شکل ۵- (a) نمودار تغییرات متوسط تعداد محصولات تولیدی / (b) نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه به ازای تغییرات (افزایش) هزینه مستقیم تولید هر واحد محصول



شکل ۶- نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات جریمه کمبود هر واحد محصول

۸-۵- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر

تغییرات جریمه کمبود

همانطور که پیشتر و در بخش تعریف مسئله اشاره شد، چنانچه در پایان افق زمانی، شرکت نتواند تعداد محصول سالم تعهد شده را به مشتری تحویل دهد، به ازای هر واحد کمبود محصول، متحمل جریمه‌ای معادل k واحد خواهد شد. این پارامتر، بر خلاف سایر پارامترهای مسئله، در محاسبه پاداش آنی مؤثر نبوده و صرفاً بر روی محاسبات مربوط به پایان افق زمانی (معادله غیر بازگشتی شماره ۷) تأثیرگذار می‌باشد. مطابق محاسبات و نتایج ارائه شده در

جدول شماره (۱۳)، زمانی که این هزینه خیلی کم و برابر با هزینه انجام تعمیرات ناقص باشد، ریسک عدم اجرای تعهدات و تحمیل ضرر به شرکت چندان بالا نیست. به مرور با افزایش نسبی این هزینه، انجام تعمیرات ناقص در راستای افزایش احتمال تولید محصولات سالم، توجیه یافته و بعد از رسیدن جریمه کمبود به عدد ۵ که برابر با هزینه راه‌اندازی سیستم می‌باشد، افزایش بیشتر این جریمه، تأثیری در روند تغییرات متوسط نرخ هزینه نخواهد داشت. این نتایج و روند کلی تغییرات، از شکل (۶) قابل برداشت می‌باشد.

جدول ۱۳- بررسی تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات جریمه کمبود

ردیف	پارامتر تحت بررسی	دوره اول	کل افق زمانی مسئله (سه دوره)			
			اقدام بهینه (x_n, m_n)	متوسط تعداد محصول تولیدی	متوسط دفعات راه‌اندازی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص
متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)	متوسط تعداد محصول نهایی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)	متوسط تعداد محصول نهایی	متوسط دفعات تعمیرات ناقص	متوسط نرخ هزینه (هزینه واحد محصول)
۱	۱	۰	۱	۶	۱	۵
۲	۲	۱	۱	۶	۱	۵
۳	۳	۱	۱	۶	۱	۵
۴	۴	۱	۱	۶	۱	۵
۵	۵	۱	۱	۷	۱	۶
۶	۶	۱	۱	۷	۱	۶
۷	۷	۱	۱	۷	۱	۶
۸	۸	۱	۱	۷	۱	۶
۹	۹	۱	۱	۷	۱	۶
۱۰	۱۰	۱	۱	۷	۱	۶



شکل ۶- نمودار تغییرات متوسط نرخ هزینه در اثر تغییرات جریمه کمبود هر واحد محصول

۹- جمع‌بندی و پیشنهادات:

امروزه عواملی از جمله پیشرفت تکنولوژی و توسعه امکانات پایش برخط^۱ سیستم‌های تولیدی، سرعت بالای تغییرات بازار و تنوع نیازهای مشتریان، برنامه‌ریزی توأم و یکپارچه عملیات مختلف مرتبط با عملکرد سیستم‌های تولیدی را به امری اجتناب‌ناپذیر بدل نموده است. برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، کنترل موجودی و ... از جمله عملیات مذکور به شمار می‌روند.

در این پژوهش و در راستای دغدغه فوق‌الاشاره، نمونه‌ای نسبتاً عمومی از مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی توأم تولید و نگهداری و تعمیرات در یک سیستم تک‌محصولی ارائه شده که در آن قرار است تقاضای معین مشتری طی چند دوره و با لحاظ کردن محدودیت ظرفیت تولید در هر دوره تأمین شود. عملیات نگهداری و تعمیرات، به صورت ناقص تعریف شده و صرفاً در ابتدای هر دوره، در قالب سرویس اولیه ماشین‌آلات تولیدی، قابل انجام است. وجود احتمال غیرصفر برای تولید محصولات معیوب و کاهش این احتمال با یک ضریب خاص (فاکتور بهبود)، انگیزه اصلی مدیران سیستم برای انجام تعمیرات ناقص می‌باشد. فرض امکان تولید محصولات معیوب، ایجاد توازن بین تعداد محصولات تولیدی در هر دوره، تعداد دفعات راه‌اندازی مجدد و تعداد دفعات انجام تعمیرات ناقص در کل افق برنامه‌ریزی را با چالش مواجه می‌نماید. مسئله، در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی مدل شده و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی حل شده است. حل مثال عددی و تحلیل نتایج آن به تفصیل در بخش ۷ و ۸ ارائه شده است. نتایج بدست آمده، با منطق ذهنی سازگار بوده و به نحوی مؤید اعتبار مدل ارائه شده نیز می‌باشد. از جمله مهمترین این نتایج، می‌توان به ارتباط مستقیم بین متوسط نرخ هزینه تولید و هزینه راه‌اندازی در هر دوره و همچنین ارتباط مستقیم نرخ مذکور با هزینه تولید هر واحد محصول اشاره نمود. علیرغم مستقیم بودن ارتباط هزینه نگهداری و تعمیرات ناقص با متوسط نرخ هزینه، افزایش هزینه مذکور تا مرز مشخصی (مقدار ۱)، معتبر بوده و افزایش بیشتر از آن، انتخاب و انجام این عملیات را غیرموجه می‌سازد. نتایج، حاکی از وجود رابطه معکوس بین متوسط نرخ هزینه تولید هر واحد محصول و احتمال تولید محصولات سالم می‌باشد.

با توجه به اینکه یکی از پارامترهای اساسی در تعیین متوسط نرخ هزینه، درآمد حاصل از فروش محصولات به مشتری می‌باشد، می‌توان از رویکرد ارائه شده در این پژوهش برای تعیین سطحی از درآمد که منجر به منفی شدن نرخ هزینه و به عبارتی سودآور شدن اجرای تعهدات شرکت می‌شود، استفاده نمود. همچنین مدیران سیستم‌های مشابه می‌توانند پس از برآورد صحیح احتمال قوع خرابی در محصول تولیدی خود، از چارچوب ارائه شده در این پژوهش استفاده نموده و از نتایج آن در راستای تنظیم یک برنامه تولید و نگهداری و تعمیرات بهینه به منظور تحقق تقاضای مشتریان با هزینه منطقی بهره‌برداری نمایند.

پژوهش جاری از لحاظ کلیات چارچوب انتخاب شده برای مدل‌سازی و همچنین روش حل استفاده شده دارای شباهت‌هایی با سایر مقالات می‌باشد. همچنین هدف دنبال شده در آن که همانا تسهیل مدیریت سیستم‌های تولیدی در حالت کلان و به صورت جزئی‌تر، کاهش هزینه‌های عملیاتی تولید و نگهداری و تعمیرات می‌باشد، در اغلب مقالات مشابه نیز دنبال شده است. لکن شرایط خاص لحاظ شده در مسئله، خصوصاً در جزئیات عملیاتی، و نحوه تعریف حالات و اقدامات در مدل مارکوفی، پژوهش جاری را از سایر موارد مشابه متمایز نموده است. ارزیابی سیاست بهینه بدست آمده، حاکی از کارآمد بودن رویکرد مدل‌سازی و روش حل پیشنهادی در کاهش هزینه‌های عملیاتی بوده و فرصتی برای مدیریت بهینه سیستم‌های تولیدی مشابه فراهم نموده است.

با توجه به تنوع بالای سیستم‌های مختلف تولیدی و همچنین تأثیر عوامل متعدد بر برنامه‌ریزی بهینه و کارآمد این سیستم‌ها، در ادامه ضمن اشاره به برخی محدودیت‌های پژوهش فعلی، پیشنهاداتی در راستای کاربردی‌تر کردن شرایط مسئله و ایجاد زمینه برای انجام پژوهش‌های آتی ارائه شده است. برخی از مهمترین محدودیت‌ها عبارتند از:

- تک محصولی بودن فرآیند تولید بررسی شده و همچنین فرض یکپارچه بودن تجهیزات سیستم تولیدی
- عدم لحاظ نمودن محدودیت‌های موجود در نیروهای متخصص و امکانات لازم برای نگهداری و تعمیرات سیستم‌های تولیدی

^۱Online

- عدم لحاظ نمودن سایر انواع سیاست‌های کلی نگهداری و تعمیرات
- در راستای رفع برخی محدودیت‌های فوق‌الشاره و توسعه این پژوهش، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:
- لحاظ کردن موضوع کنترل موجودی هم در تولید محصولات و هم در قطعات یدکی مورد استفاده در انواع تعمیرات
- اضافه نمودن فرض تصادفی بودن تقاضای مشتریان و امکان تأمین آن در طول یک افق زمانی بلندمدت و در شرایط خاص مسئله فعلی
- تعریف انواع سیاست‌ها و عملیات نگهداری و تعمیرات در سطوح مختلف و با لحاظ نمودن تأثیرات مختلف این عملیات بر بهبود شرایط سیستم و تحت یک سقف هزینه‌ای مشخص
- لحاظ کردن حالات عملیاتی مختلف برای سیستم که هریک دارای احتمالات خاص خود برای تولید محصولات سالم می‌باشد.

تقدیر و تشکر:

بدینوسیله از حمایت دانشگاه کردستان از نویسندگان مقاله کمال تشکر را دارم.

مراجع

- [1] Farahani, Ameneh, and Hamid Tohid. "Integrated optimization of quality and maintenance: A literature review." *Computers & Industrial Engineering* 151 (2020): 106924.
- [2] Sule, Dileep R. *Production planning and industrial scheduling*. Taylor & Francis Group, 2008.
- [3] Guiras, Zouhour, Sadok Turki, Nidhal Rezg, and Alexandre Dolgui. "Optimal maintenance plan for two-level assembly system and risk study of machine failure." *International Journal of Production Research* 57, no. 8 (2018): 2446-2463.
- [4] Yahyatabar, Ali, and Amir Abbas Najafi. "Condition based maintenance policy for series-parallel systems through Proportional Hazards Model: A multi-stage stochastic programming approach." *Computers & Industrial Engineering* 126 (2018): 30-46.
- [5] Shahrokhi, Mahmoud, and Zahra Sobhani. "Optimization of availability the system with the redundant considering the half-state deals and repair rates change." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 54 (2018): 267-281. (in Persian)
- [6] Srivastava, Priyank, Dinesh Khanduja, and V. P. Agrawal. "Agile maintenance attribute coding and evaluation based decision making in sugar manufacturing plant." *Operational Research* 57, no. 4 (2019): 553-583.
- [7] Wenbin, Zeng, Ilia Frenkel, Shen Guixiang, Igor Bolvashenkov, Jorg Kammermann, Hans-Georg Herzog, and Lev Khvatskin. "Markov Reward Approach and Reliability Associated Cost Model for Machine Tools Maintenance-Planning Optimization." *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences* 4, no. 4 (2019): 824-840.
- [8] Hesam, Abed, Saeed Emami, and Ramezan Nemati Keshteli. "Scheduling of jobs and maintenance activities in an unrelated parallel machines environment." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 58 (2019): 233-247. (in Persian)

تعارض منافع:

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:

پرویز رحیمی کاکه جوب: تهیه و نگارش مقاله، کدنویسی الگوریتم حل و انجام تحلیل‌های لازم

هیوا فاروقی: نظارت عالی بر مراحل تدوین و نگارش مقاله، بررسی و تأیید مدل و تحلیل‌های انجام شده و ارائه پیشنهادات اصلاحی

حسن رسائی: نظارت بر مراحل تدوین و نگارش مقاله، بررسی و تأیید مدل و تحلیل‌های انجام شده و ارائه پیشنهادات اصلاحی

منابع مالی:

منابع مالی خاصی در تهیه و تدوین مقاله استفاده نشده است.

- [9] Dinh, Duc-Hanh, Phuc Do, and Benoit Iung. "Maintenance optimisation for multi-component system with structural dependence: Application to machine tool sub-system." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 69 (2020): 417-420.
- [10] Liu, Bin, Mahesh D. Pandey, Xiaolin Wang, and Xiuji Zhao. "A finite-horizon condition-based maintenance policy for a two-unit system with dependent degradation processes." *European Journal of Operational Research* 265, no. 2 (2021): 705-717.
- [11] Zhang, Ping, Xiaoyan Zhu, and Min Xie. "A model-based reinforcement learning approach for maintenance optimization of degrading systems in a large state space." *Computers & Industrial Engineering* 161, no. 7 (2021): 107622.
- [12] Taji, Jalal, Hiwa Farughi, and Hasan Rasay. "A new approach to preventive maintenance planning considering non-failure stops and failure interdependence between components." *Advances in Industrial Engineering* 56, no. 2 (2022): 231-249.
- [13] Yeardley, Aaron S., Jude O. Ejeh, Louis Allen, Solomon F. Brown, and Joan Cordiner. "Integrating machine learning techniques into optimal maintenance scheduling." *Computers and Chemical Engineering* 166 (2022): 107958.
- [14] Yilmaz, Ibrahim, Babek Erdebili, Mehdi Amine Naji, and Ahmed Mousrij. "A Fuzzy DEMATEL framework for maintenance performance improvement: A case of Moroccan Chemical Industry." *Journal of Engineering Research* 11 (2023): 100019.
- [15] Duffuaa, Salih., Mohamed Idris, Ahmet Kolus, and Umar Al-Turki. "A mathematical model for optimal turnaround maintenance planning and scheduling for a network of plants in process industry supply chain." *Computers & Chemical Engineering* 180, (2024): 108477.
- [16] Santos, Cleiton Ferreira dos, Eduardo de Freitas Rocha Loures, and Eduardo Alves Portela Santos. "A smart framework to perform a criticality analysis in industrial maintenance using combined MCDM methods and process mining techniques." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 132 (2024).
- [17] Yildirim, Mehmet Bayram, and Farnaz Ghazi Nezami. "Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (2014): 1419-1430.
- [18] Bajestani, Maliheh Aramon, Dragan Banjevic, and J. Christopher Beck. "Integrated maintenance planning and production scheduling with Markovian deteriorating machine conditions." *International Journal of Production Research* 52, no. 24, (2014): 7377-7400.
- [19] Aghezaf, El-Houssaine, Phuoc Le Tam, and Abdelhakim Khatib. "Optimizing Production and Imperfect Preventive Maintenance Planning's Integration in Failure-Prone Manufacturing Systems." *Reliability Engineering and System Safety* 145 (2015): 190-198.
- [20] Desforges, Xavier, Mickael Dievart, and Bernard Archimede. "A prognostic function for complex systems to support production and maintenance co-operative planning based on an extension of object oriented Bayesian networks." *Computers in Industry* 86 (2017): 34-51.
- [21] Hajej, Zied, Nidhal Rezg, and Tarek Askri. "Joint optimization of capacity, production and maintenance planning of leased machines." *Journal of Intelligent Manufacturing* 31 (2018): 351-374.
- [22] Alimian, Mahyar, Mohammadsaidi-Mehrabadi, and Armin Jabbarzadeh. "A robust integrated production and preventive maintenance planning model for multi-state systems with uncertain demand and common cause failures." *Journal of Manufacturing Systems* 50 (2019): 263-277.
- [23] Xu, Shengliang, Wenquan Dong, Mingzhou Jin, and Liya Wang. "Single-Machine Scheduling with Fixed or Flexible Maintenance." *Computers & Industrial Engineering* 139 (2019): 106203.
- [24] Qinming, Liu, Dong Ming, Chen F.F., Lv Wenyuan, and Ye Chunming. "Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling." *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 51 (2018): 238-247.
- [25] Liu, Bin, Kangzhe He, and Min Xie. "Integrated production and maintenance planning for a deteriorating system under uncertain demands." *IFAC-PapersOnLine* 53, no. 3 (2020): 222-226.
- [26] Uit Het Broek, Michiel A.J., Ruud H. Teunter, Bram de Jonge, and Jasper Veldman. "Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization." *Reliability Engineering and System Safety* 214 (2021): 107743.

- [27] Rivera-Gomez, Hector, Ali Gharbi, Jean-Pierre Kenne, Ruth Ortiz-Zarco, and Jose Ramon Corona-Armenta. "Joint production, inspection and maintenance control policies for deteriorating system under quality constraint." *Journal of Manufacturing Systems* 60 (2021): 585-607.
- [28] Sharifi, Mani, and Sharareh Taghipour. "Optimal production and maintenance scheduling for a degrading multi-failure modes single-machine production environment." *Applied Soft Computing* 106 (2021): 107312.
- [29] Jiang, Junwei, Youjun An, Yuanfa Dong, Jiawen Hu, Yinghe Li, and Ziyi Zhao. "Integrated optimization of non-permutation flow shop scheduling and maintenance planning with variable processing speed." *Reliability Engineering & System Safety* 234 (2023): 109143.
- [30] Leo, Egidio, and Sebastian Engell. "Handling Type-I and Type-II endogenous uncertainties in simultaneous production planning and condition-based maintenance optimization in continuous production." *Computers and Chemical Engineering* 174 (2023): 108227.
- [31] Bahou, Ziyad, Mohamed Reda Lemnaouar, and Issam Krimi. "Integrated non-cyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-parallel component production systems with interdependencies-induced degradation." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 130 (2024): 4723-4749.
- [32] Zhang, Nan, Kaiquan Cia, Yingjun Deng, and Jun Zhang. "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 (2024): 109694.
- [33] Derhami, Vali, Farinaz Alamiyan Harandi, and Mohammad Bagher Dowlatshahi. *Reinforcement learning*. Yazd University Pres, 2017. (in Persian)
- [34] Koopmans, Marco, and Bram de Jonge. "Condition-based maintenance and production speed optimization under limited maintenance capacity." *Computers & Industrial Engineering* 179 (2023): 109155.
- [35] El Hami, Abdelkhalak, and Bouchaib Radi. *Optimization and programming*. Wiley & Sons, 2021.