MODIRIAT-E-FRDA JOURNAL
ISSN ٢٢٢٨-٦٠٤٧

Provide Proactive maintenance model using Markov Decision Process Based on stochastic dynamic planning

Mohammad Sadegh Behrooz[١] | **Mohammad Ali AfsharKazemi**[٢*] | **Adel Azar**[٣] | **Ezatolah Asgharizadeh**[٤]

١. Ph.D. student of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Branch of Science and Research, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
٢. Associate Professor, Faculty of Management, Branch of central Tehran, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (Responsible author).
٣. *Professor, Management and Accounting Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
٤. Associate professor of management faculty of Tehran University, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
Proactive Maintenance
Event-driven Decision Making
Markov Decision Process
Stochastic Dynamic Planning
Mathematical Modeling

ABSTRACT

The use of new approaches and technologies in the design of maintenance plans and policies, taking into account the changes and growth of technology, is one of the factors that are increasingly considered by experts today, and in addition to reducing costs Repair, reducing downtime of machines and increasing the useful life of machinery and equipment, create a competitive advantage in production systems. The purpose of this study is to provide a model for realizing a proactive maintenance approach. In this regard, the decision-making problem for "selecting maintenance policies and programs at the optimal time with the lowest cost" has been modeled. For conducting research, historical data related to the implementation of maintenance programs and risk assessment in the gas pipeline network have been used, and based on recursive induction in stochastic dynamic planning with Markov decision-making process in finite time, mathematical model is designed. In this research, to assign each of the specified policies and actions related to the maintenance program to the identified risks and defects, simulations and optimizations based on time and cost have been performed and sensitivity analysis and validation of the model are performed. The rate of improvement and the rate of optimization in the cost of implementing maintenance policies and the time of its implementation, indicate the efficiency of the proposed model.

نشریه مدیریت فردا
ISSN ۲۲۲۸-۶۰۴۷

ارائه مدل نگهداری و تعمیرات Proactive با استفاده از فرایند تصمیم مارکوف مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالی

محمد صادق بهروز [۱] | محمدعلی افشارکاظمی*[۲] | عادل آذر [۳] | عزت‌اله اصغری‌زاده [۴]

چکیده

استفاده از رویکردها و فناوری‌های نوین در طراحی برنامه‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات با در نظر داشتن تغییرات و رشد تکنولوژی، از عواملی است که امروزه بیش از پیش مورد توجه متخصصان قرار گرفته و این موضوع علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیراتی، کاهش زمان از کارافتادگی دستگاه‌ها و افزایش عمر مفید ماشین‌آلات و تجهیزات، سبب ایجاد مزیت رقابتی در سیستم‌های تولیدی می‌شود. هدف از انجام این پژوهش ارائه مدل برای تحقق رویکرد فعالانه و کنش‌گر در زمینه نت است. در این راستا، مسئله تصمیم‌گیری برای "انتخاب سیاست‌ها و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در زمان بهینه با کمترین هزینه"، مدلسازی شده است. برای انجام پژوهش، داده‌های تاریخی مربوط به اجرای برنامه‌های نت و ارزیابی ریسک در شبکه انتقال گاز مورد استفاده قرار گرفته است و بر اساس استقراء بازگشتی در برنامه‌ریزی پویای احتمالی با فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در زمان محدود، مدل ریاضی مسئله طراحی شده است. در این پژوهش برای تخصیص هر یک از سیاست‌ها و اقداماتِ مشخص شده‌ی مرتبط با برنامه نگهداری و تعمیرات به ریسک‌ها و نقص‌های شناسایی شده، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بر اساس زمان و هزینه، صورت گرفته و در ادامه تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل انجام شده است. میزان بهبود و نرخ بهینگی در هزینه اجرای سیاست‌های نت و زمان پیاده‌سازی آن، نشان‌دهنده کارایی مدل ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: نگهداری و تعمیرات Proactive، تصمیم‌گیری رویدادمحور، فرایند تصمیم مارکوف، برنامه‌ریزی پویای احتمالی، مدلسازی ریاضی.

دریافت مقاله: .....۱۴۰۱/۰۴/۱۱ .. پذیرش مقاله: ...۱۴۰۲/۰۵/۰۱.....

[۱] دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران . sadeqbehruz@ut.ac.ir ۰۹۱۲۲۹۹۱۱۹۵

[۲] دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت، وا حد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایرا ن. dr.mafshar@gmail.com ۰۹۱۲۳۳۳۶۷۳۱(نویسنده مسئول).

[۳] استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران azara@modares.ac.ir . ۰۲۱۸۲۸۸۳۶۰۹

[۴] دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایرا ن. asghari @ut.ac.ir ۰۹۱۲۷۳۸۰۳۲۳

مقدمه

در عصر حاضر یکی از ارکان اساسی در صنعت و تولید، بدون شک، تجهیزات و ماشین‌آلات است. از طرفی افزایش اثربخشی و راندمان تولید و دستیابی به استانداردهای جهانی، صیانت از سرمایه‌های ملی، رقابت در صحنه‌های تولید و حضور فعال در بازارهای داخلی و جهانی، بدون افزایش زمان قابلیت استفاده و بهره‌برداری از تجهیزات و ماشین‌آلات و سیستم‌های تولید و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیراتی و زمان از کارافتادگی میسر نخواهد بود. بنابراین برخورداری از نظام نگهداری و تعمیرات مناسب از مباحث مهم هر صنعت است. به‌کارگیری رویکردهای نوین مبتنی بر فناوری‌های روز و ایجاد مزیت‌های رقابتی بر اساس آن، موضوعی است که علاوه بر کارآمدی سیستم‌های نت بایستی مورد توجه قرار گیرد. این گزاره بیش از هرچیز هوشمندسازی فرایند نت مبتنی بر رویدادها و داده‌ها را یادآور می‌نماید. از این رهگذر، می‌توان به سیستم‌های نت مبتنی بر شرایط اشاره کرد که در بسیاری از صنایع تولیدی مورد بهره‌برداری قرار گرفته و متناسب با تکنولوژی روز دنیا به‌کارگیری می‌شود. از جدیدترین رویکردهای نت مبتنی بر شرایط، سیستم‌های کنش‌گر یا فعالانه هستند که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. نت فعالانه، علاوه بر پیش‌بینی، تصمیم‌گیری برای انتخاب اقدام اصلاحی یا سیاست مناسب نت را مورد توجه قرار می‌دهد. این رویکرد بر خلاف سایر سیستم‌های نت به پیش‌بینی و کشف رویدادها و نقائص بسنده نکرده و بر ارائه پیشنهاد و تصمیم یا ارائه سیاست بهینه برای مقابله با خرابی‌ها و از کارافتادگی‌ها، متمرکز است. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری رویدادمحورِ تصادفی و جستجوی غیرقطعی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی، از دیگر وجوه تمایز پژوهش با سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه است. در پژوهش حاضر، با استفاده از نت فعالانه، سیاست‌های بهینه برای مجموعه نقص‌ها و خرابی‌های شناسایی شده در شبکه انتقال گاز پیشنهاد شده است. برای این منظور، از مدل تصمیم‌گیری مارکوف مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالی در محیط مورد مطالعه بهره‌گیری شده است و بر اساس دو شاخص "زمان" و "هزینه نقص"، مقادیر بهینه محاسبه و سیاست‌های بهینه به نقص‌ها و خرابی‌ها تخصیص یافته است. در این مطالعه برای هر تجهیز ۴ حالت بررسی شده است که عبارتند از : ۱. وضعیت سیستم درحالت خطر ۲. وضعیت سیستم درحالتی که یک رویداد تصادفی یا نقص اتفاق بیفتد ۳. وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای سیاست یا اقدام ۴. وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری سیاست یا اقدام. هدف از انجام این پژوهش ارائه مدل تصمیم‌گیری برای اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در زمان بهینه با کمترین هزینه است. با توجه به مطالب ذکر شده، چگونگی تحقق رویکرد تصمیم‌گیری فعالانه و کنشگرایانه با تمرکز بر اتخاذ راهکارها و اقدامات اصلاحی و همچنین میزان اثربخشی و بهبود، سؤال اصلی تحقیق است. این مطالعه درپنج بخش شامل مقدمه، مبانی نظری و پیشینه پژوهش، روش‌شناسی و طراحی مدل ریاضی، تجزیه و تحلیل یافته‌ها و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای مطالعات آتی تنظیم شده است.

۱. مروراديبات

یکی از موضوعات مهمی که در شرکت‌ها، کارگاه‌های صنعتی، کارخانجات و بطور کلی مراکز تولیدی و صنعتی مطرح است، نحوه سرویس، نگهداری و تعمیرات تجهیزات، ماشین آلات و دستگاه‌ها، یا به عبارت دیگر حفاظت فنی از دارایی‌های فیزیکی است. نگهداری شامل ترکیبی از فعالیت‌های مشخص و برنامه‌ریزی شده است که برای حفظ یک وسیله یا رساندن آن به شرایط قابل قبول و جلوگیری از خرابی ماشین‌آلات، تجهیزات و تأسیسات انجام

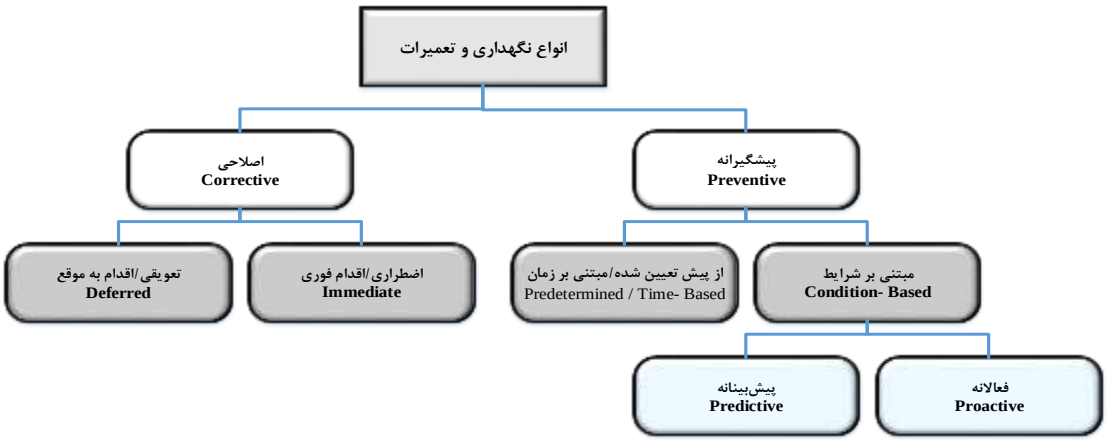
می‌شود. این اقدامات قابلیت اطمینان، بهره‌وری، کارایی، ایمنی و در دسترس بودن دستگاه‌ها را افزایش می‌دهد. تعمیرات نیز در بر گیرنده فعالیت‌هایی است که روی سیستم دارای نقص یا از کار افتاده انجام می‌شود تا آن‌را به حالت آماده و قابل بهره‌برداری باز گرداند (فقیه و همکاران،۱۳۹۱).

۱,۲. سیستم‌های نگهداری و تعمیرات

به طور کلی می‌توان نگهداری تعمیرات را به دو دسته کلی نت اصلاحی و نت پیشگیرانه تقسیم‌بندی نمود. نگهداری تعمیرات اصلاحی بعد از خرابی انجام می‌شود و شامل همه اقداماتی است که در صورت خرابی سیستم باید انجام شود. نت اصلاحی به دو صورت اضطراری و تعویقی اجرا می‌شود. در نت اضطراری، تعمیرات صرفاً بعد از وقوع خرابی و به صورت اضطراری انجام می‌گیرند و معمولاً هیچگونه آمادگی قبلی در مورد نوع مشکلات و روش رویارویی با آنها وجود ندارد و در نت تعویقی، روش فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، برای صرفه‌جویی در منابع و نیروی انسانی، کاهش هزینه‌ها و یا سر به سر کردن بودجه تخصیص داده شده، با تأخیر انجام می‌شود. نگهداری تعمیرات پیشگیرانه، نگهداری تعمیراتی است که قبل از خرابی سیستم و به منظور نگهداشتن تجهیزات در سطح خاصی از آمادگی با استفاده از بازرسی‌ها، اکتشافات و جلوگیری از وقوع خرابی اولیه به صورت سیستماتیک، انجام می‌شود. نت پیشگیرانه خود به دو دسته نت از پیش تعیین‌شده[۱] (مبتنی بر زمان) و نت مبتنی بر وضعیت تقسیم می‌شود (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۴). نت پیشگیرانه به منظور افزایش قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی به تجهیزات با کاهش ضعف‌ها، اجتناب از نیاز به تعمیرات اصلاحی برنامه‌ریزی نشده برای رفع خرابی‌های کوچک قبل از تبدیل شدن به خرابی‌های بزرگ انجام می‌شود. با انجام این تعمیرات از ایجاد خرابی و خروج تجهیز از شبکه جلوگیری به عمل می‌آید. (کریم‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۷). نگهداری و تعمیرات از پیش تعیین شده یا مبتنی بر زمان یکی از رویکردهای نت پیشگیرانه است که امروزه کاربرد وسیعی در صنایع داشته و در تصمیم‌گیری‌ها و اجرای اقدامات مرتبط با برنامه‌های نت تأثیرگذار می‌باشد. اقدامات مربوط به نت از پیش تعیین شده، در بازه‌های زمانی مشخص و بر اساس طرح از قبل تعیین شده برای پیش‌گیری از وقوع نقص‌ها و خرابی‌های احتمالی در طول دوره عمر تجهیز انجام شده و بر بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌های نگهداری تجهیزات با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان، آنالیز ریسک و تعیین سطح مطلوبیت هر یک بر مبنای اطلاعات پایه و عملیاتی تمرکز دارد (Zou et al, ۲۰۱۹). در تعمیرات شرایط‌محور، برنامه‌ی تعمیراتی وابسته به شرایط خرابی تجهیز خواهد بود. در این سیستم برای آگاهی از وضعیت خرابی، تجهیز باید مورد بازبینی قرار گیرد و با توجه به وضعیتش مشخص می‌شود که تعمیر مورد نیاز است و اگر باید مورد تعمیر قرار گیرد چه نوع تعمیری باید انجام شود (رامشخواه و همکاران، ۱۳۹۶). امروزه نت مبتنی بر شرایط در حال گسترش بوده و این موضوع با استفاده از تست‌های غیرمخرب، فناوری‌های سنجش و نظارت و استفاده از ابزار جمع‌آوری داده مانند حسگرها و الگوریتم-های مرتبط، سرعت بیشتری گرفته است. در این رویکرد، اطلاعات و داده‌ها در مورد پاسخ‌های ساختاری و شرایط آسیب درطول عملیات جمع‌آوری شده و پس از ارزیابی تصمیم‌گیری‌های منطقی در مورد شیوه مناسب و سیاست بهینه نت اتخاذ می‌شود. این اطلاعات را می‌توان با استفاده از بازرسی‌های دوره‌ای یا به صورت لحظه‌ای مورد ارزیابی قرار داد (Zou et al, ۲۰۱۹). در طراحی سیستم‌های نت مبتنی بر زمان و نت مبتنی بر شرایط (مبتنی بر وضعیت)، معمولاً از تئوری قابلیت اطمینان استفاده شده و بر این اساس، سیستم‌های نت، قابلیت اطمینان‌محور[۲] هستند. (زارعی و همکاران، ۱۳۹۶). از

[۱] Predetermined Maintenance
[۲] Reliability Centered Maintenance

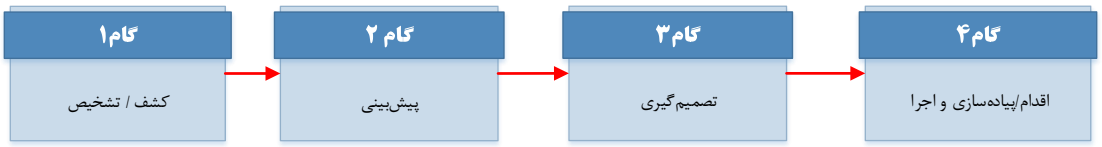
عواملی که سبب می‌شود نت قابلیت اطمینان‌محور، تأثیرگذاری بیشتر داشته و دقت آن افزایش یابد، شناسایی و تحلیل رویدادها و نقص‌ها در سیستم است. (Fang et al,۲۰۱۹)(Souza and Avares, ۲۰۰۷)(Aziz and Helal,۲۰۱۲). بر اساس تحقیقات صورت گرفته اگر RCM به شکل دقیق استفاده شود، حجم کارهای روتین و معمولی نگهداری و تعمیرات را بین ۴۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. انجام نت قابلیت اطمینان محور، معمولاً در دو مقوله کاهش ریسک و حفظ سرمایه و صرفه‌جویی در هزینه خود را نشان داده و نقش‌آفرینی پررنگ دارد و می‌تواند مبنای توسعه سیستم‌های CBM و TBM قرار گیرد و به عنوان یک ارزیابی مقدماتی و استراتژی مدیریت ابتدایی خطرات و نقص‌ها استفاده شود. (Niu et al, ۲۰۱۰). استراتژی پیش‌بینانه که یکی از سیاست‌های نت مبتنی بر وضعیت است، احتمال وقوع ناگهانی خرابی‌های دوره‌ای را از طریق تشخیص و بازرسی‌های به‌موقع کاهش می‌دهد. (روانبخش، ۱۳۹۷). در این راهبرد با پیش‌بینی این که چه وقت مقدار یک کمیت کنترلی از میزان آستانه و سر حد خود تجاوز خواهد کرد، اقدامات لازم انجام می‌شود. (ربانی و همکاران، ۱۳۹۲). در این راهبرد نه تنها بر کشف و تشخیص خرابی اجزا تمرکز می‌شود بلکه همچنین کار پیش‌بینی خرابی و کنترل وضعیت‌ها را انجام می‌دهد. به طورکلی نت پیش‌بینانه می‌تواند به عنوان روشی که برای کاهش عدم قطعیت فعالیت‌های نت به کار می‌رود، شناخته شده و مطابق نیازهای شناسایی شده از وضعیت دستگاه ها، اجرا گردد. درنتیجه، سبب می‌شود که قبل از وقوع خرابی در دستگاه‌ها، مشکلات شناسایی شوند. (نصرت‌پناه و اسدی، ۱۳۹۷). در شکل ۱ انواع سیستم‌های نگهداری و تعمیرات ارائه شده است.



شکل(۱). انواع نگهداری و تعمیرات (۲۰۰۱، استاندارد SS-EN ۱۳۳۰۶ و IEEE Std ۱٤٥۱) (Niu et al, ۲۰۱۰)

با افزایش نیاز به پیش‌بینی روند به وقوع پیوستن نقص‌ها و فرسودگی تجهیزات، نت مبتنی بر شرایط توسعه یافته و کارکردهای بیشتری را که بر ضرورت پیش‌آگاهی‌ها و هشدارها تأکید دارد، در بر گرفته است. (Niu et al, ۲۰۱۰). CBM مبتنی بر تصمیم‌گیری، برای انجام اقدامات و پیاده‌کردن توصیه‌ها بر اساس کنترل‌ها و مانیتورینگ، صورت گرفته و برای جلوگیری از وقوع نقص و صرفه‌جویی در هزینه‌ها انجام می‌شود و یک استراتژی فعالانه و پیش‌نگر است که بر اساس پیش‌بینی رویدادها با استفاده از داده‌های سامانه‌های الکترونیک و پردازش‌های رویدادمحور، مؤثر واقع می‌شود. مانیتورینگ با استفاده

از حسگرهایی صورت می‌گیرد که حجم زیادی از داده‌ها را فراهم می‌نماید. در شکل ۲ گام‌های اجرای نت مبتنی بر شرایط بر اساس اصول تصمیم‌گیری فعالانه و رویدادمحور نشان داده شده است. (Bousdekis et al, ۲۰۱۷)



شکل(۲). اصول "نت مبتنی بر شرایط بر اساس تصمیم‌گیری "فعالانه رویدادمحور" (Bousdekis et al, ۲۰۱۷)

نت مبتنی بر شرایط یک نوع نگهداری تعمیرات پویا است که در آن شرایط دائماً بررسی و بازرسی شده و بر اساس کارکرد اجزاء سیستم در هر لحظه می‌تواند فعال شود. معماری سیستمی باز[۱] یکی از استانداردهای طراحی سیستم نت مبتنی بر شرایط است که در ۷ لایه قابل تقسیم است. در لایه‌های یک و دو حسگرها عمل کرده و پردازش سیگنال صورت می‌گیرد. عملکرد اصلی طرح شامل بخش‌هایی است که تصمیمات را شامل می‌شود. این موضوع در لایه‌های سه تا پنج صورت می‌گیرد که لایه‌های نظارت بر شرایط و مانیتورینگ، لایه ارزیابی صحت و سلامت اجزای سیستم و لایه‌های هشدار و پیش‌بینی خرابی‌ها می‌باشد. در لایه شش و هفت پشتیبانی تصمیم و ارائه داده‌ها انجام می‌شود. یکی از چالش‌های CBM هزینه زیاد آن می‌باشد. به خصوص اگر هدف این باشد که تجهیزاتی که قبلاً نصب شده‌اند، نظارت و کنترل شوند. بنابراین تصمیم‌گیری در مورد اینکه چگونه این ابزار بکارگیری و حفظ و نگهداری شوند مهم است. در این رابطه نحوه هرینه برای نت مبتنی بر شرایط بایستی به شکلی باشد که مقرون به صرفه باشد. (Niu et al, ۲۰۱۰) (Kim et al, ۲۰۱۶) (Zou et al, ۲۰۱۹).

نگهداری تعمیرات Proactive، فعالانه یا کنش‌گر. تعمیر و نگهداری فعالانه عمدتاً در صنایع توسعه یافته و سازمان‌های ممتازی که مدیریت کلان آن‌ها درک درستی از اهمیت قابلیت اطمینان تجهیزات و تأثیر آن بر تولید دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعمیر و نگهداری فعالانه فعالیتی است که برای شناسایی و تصحیح علل ریشه‌ای از کارافتادگی انجام می‌گیرد. این روش تعمیر و نگهداری برای تصحیح شرایطی که می‌توانند منجر به فرسودگی تجهیزات شوند اتخاذ می‌شود. نت فعالانه بجای بررسی فاکتورهای فرسودگی و کاهش کارایی، ارزیابی وسعت شرایط از کارافتادگی و ازکارافتادگی در شرف وقوع را تشخیص و تصحیح علل ریشه‌ای غیرعادی ازکارافتادگی را نیز مورد توجه قرار می‌دهد (کریم‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۷). رویکرد عملیاتی و فعالانه اشاره دارد به توانایی برای مدیریت یا حذف رویدادها و نقص‌های تصادفی ناخواسته با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی که با استفاده از سنسورها و حسگرها در در زمان واقعی انجام می‌شود. تکنولوژی فرایندهای تصمیم‌گیری خودکار یک مفهوم مهم در شبکه پردازش رویدادهای فعال است که شامل عناصر پردازش رویداد است. در رویکرد فعالانه توصیه‌ها، پیشنهادات و اقدامات اصلاحی پیش‌نگر، با توجه به رویدادها و نقص‌های احتمالی پیش‌بینی شده پیشنهاد می‌شود.

[۱] Open System Architecture for Condition Based Maintenance (OSA-CBM)

۲,۲. تصمیم گیری و حل مسئله

هربرت سایمون[۱] تصمیم‌گیری را با مدیریت یکی می‌داند. علاوه بر سایمون گروه دیگری از صاحب‌نظران نیز مدیریت و تصمیم‌گیری را یکی دانسته و هم‌معنی تعریف کرده‌اند. این افراد مدیریت را چیزی جز تصمیم‌گیری نمی‌دانند و معتقدند کانون اصلی مدیریت را تصمیم‌گیری تشکیل می‌دهد. در واقع آن‌ها، انجام وظایفی مانند سازماندهی، برنامه‌ریزی و کنترل را چیزی جز تصمیم‌گیری نمی‌دانند. (اصغری‌زاده و محمدی بالانی، ۱۳۹۷). "تصمیم‌گیری" را می‌توان طریقه عمل و یا حرکت در مسیر خاصی تعریف کرد که با تأمل و به صورت آگاهانه از بین روش‌های مختلف برای نیل به یک هدف مطلوب انتخاب شده است. بنابراین تصمیم‌گیری مستلزم یک راهکار از بین راه حل‌های موجود است و اگر فقط یک راهکار وجود داشته باشد تصمیم‌گیری معنی ندارد. به طور کلی "تصمیم‌گیری" عبارتست از انتخاب یک راه حل از بین راه حل‌های مختلف. برای انتخاب راه حل بهینه و اتخاذ تصمیم، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که همگی در قالب مباحث مختلف تحقیق در عملیات، مبتنی بر مدلسازی‌های ریاضی و فرموله نمودن متغیرهای تأثیرگذار در فضای مسئله هستند. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر انتخاب یک سیاست بهینه مبتنی بر رویدادها بر اساس جستجوی تصادفی مورد توجه است، در ادامه مدل تصمیم‌گیری رویداد محور تشریح شده است.

تصمیم‌گیری رویدادمحور. وجود سامانه‌های اطلاعاتی هوشمند و مکانیزم‌های جمع‌آوری و پردازش داده، مانیتورینگ و کنترل فرایندهای کاری را امکان‌پذیر و تسهیل نموده است. به این شکل که حجم زیادی از داده‌های مربوط به رویدادها با استفاده از تجهیزات هوشمند، تغییرات و انحرافات فرایند تولید را شناسایی کرده و گزارش می‌کند و بر اساس طرح‌های عملکردی از پیش طراحی شده، اقدامات جایگزین مناسب توصیه می‌شود. واژه "فعالانه" در سیستم‌ها و سامانه‌های اطلاعاتی داده‌محور، اشاره به کشف و تشخیص شرایط بالقوه‌ای که می‌تواند منجر به بروز رویداد تصادفی و ناخواسته شود داشته و باید جلوگیری از گرفتار شدن سیستم تولید در این شرایط را به همراه داشته باشد. آنچه که به یک تصمیم رویدادمحور فعالانه در نهایت باید منجر گردد، تغییر شرایط بروز یک رویداد تصادفی و ناخواسته، به شرایطی است که حداکثر سود را در بر داشته باشد. به عبارت دیگر پیش‌بینی‌های مبتنی بر رویداد با استفاده از سامانه‌های الکترونیک و سیستم‌های اطلاعاتی و به تبع آن اتخاذ تصمیمات پیش از موعد مقرر باید بتواند شرایط بروز رویداد ناخواسته را به وضعیت مناسب دلخواه تغییر دهد. (Bousdekis et al, 2017) رویکرد تصمیم‌گیری فعالانه پیش‌نگر یا کنش‌گر بر می‌گردد به ادبیات موضوع "درک و عکس‌العمل" یا "کشف و اقدام" در یک شرایط آگاهانه که مبتنی بر مدل "کشف- پیش‌بینی-تصمیم‌گیری-اقدام" است. رویکرد کنش‌گرایانه و فعالانه اشاره دارد به توانایی برای مدیریت یا حذف رویدادهای تصادفی ناخواسته با بهره‌برداری از فرصت‌های آینده با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی همراه با داده‌های سنسورها در زمان واقعی. محاسبات مبتنی بر رویداد۲ ، (محاسبات رویدادمحور فعالانه یا کنش‌گرایانه)، نشان می‌دهد که استفاده از برنامه‌های کاربردی رویدادمحور، برای پیش‌بینی زمان واقعی و تصمیم‌گیری قبل از وقوع رویداد (تصمیم‌گیری پیش‌نگر یا آینده‌نگر)، مطابقت دارد با اصول "کشف- پیش‌بینی-تصمیم‌گیری-اقدام". (Bousdekis and Mentzas, 2019). هر یک از این مراحل به عنوان یک عامل پردازش رویداد

[۱] Herbert Simon
[۲] Event-Driven Architecture Computations

پیاده‌سازی و اجرا می‌شوند و برای توسعه یک سامانه اطلاعاتی یکپارچه که ویژگی‌های محاسبات رویدادمحور فعالانه و عملیاتی را نشان می‌دهد، بکار می‌روند.

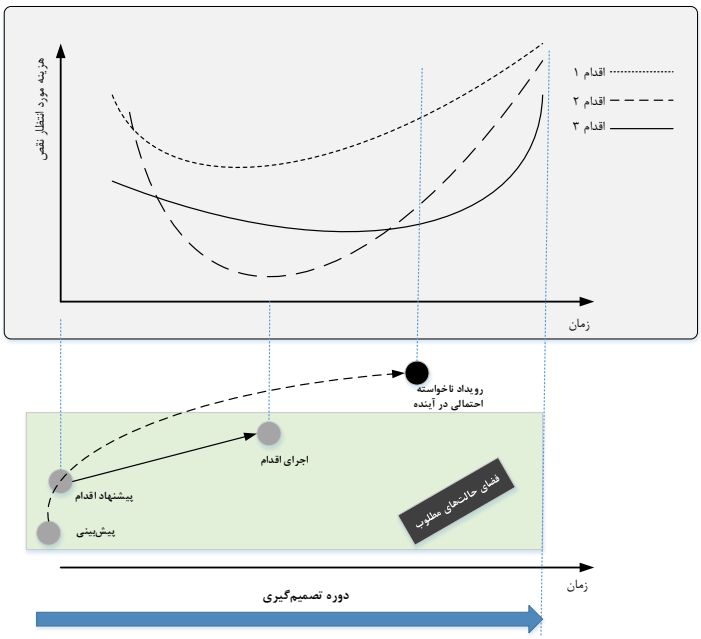
کشف. این فاز در واقع فاز تشخیص است که با پردازش سیگنال‌ها در ارتباط است. این سیگنال‌ها بر اساس کنترل و مانیتورینگ شرایط و ارزیابی صحت و سلامت تجهیزات تولید می‌شود و اجرای فاز کشف در محیط پردازش رویداد با استفاده از موتورهای پردازش رویدادهای پیچیده[1] صورت می‌گیرد.

پیش‌بینی. فاز پیش‌بینی شامل خدمات و فعالیت‌های مرتبط با آنالیز و تحلیل برای پیش‌بینی رویدادهای ناخواسته و تصادفی بر اساس محاسبات رویدادمحور در زمان واقعی می‌باشد. وقتی یک رویداد ناخواسته مانند خرابی و نقص پیش‌بینی می‌شود، تابع توزیع احتمال آن و پارامترهای مرتبط با آن به عنوان ورودی‌های فاز تصمیم، در این فاز پیش‌بینی می‌شود.

تصمیم‌گیری. تصمیمات و توصیه‌هایی که بر اساس پیش‌بینی یک رویداد صورت می‌گیرد، اگر به صورت بهینه و در زمان مناسب اجرا شود، باعث می‌شود تأثیر یک رویداد ناخواسته به کلی حذف شده یا کاهش پیدا کند. توصیه‌ها و پیشنهادات پیش‌نگر، ورودی‌هایی هستند برای فاز اجرا.

اجرا و اقدام. این فاز شامل اجرای دقیق توصیه‌های عملیاتی است و به عبارت دیگر عملیات سیستم، مانیتورینگ و کنترل پیوسته را هماهنگ می‌نماید. مفهوم تصمیم‌گیری رویداد محور در شکل ۳ نشان داده شده است. این رویکرد عملیاتی، بر ارائه پیشنهادات و توصیه‌ها برای انجام اقدام بهینه در زمان واقعی مورد نیاز متمرکز است. در این مدل نقص مورد انتظار به صورت تابعی از زمان نشان داده شده است. در زمان $t = ۰$ پیش‌بینی صورت گرفته و پیشنهاد ارائه می‌شود. تابع نقص مورد انتظار در بازه زمانی بین $t = ۰$ و پایان زمان تصمیم‌گیری بهینه می‌شود. (پایان زمان تصمیم‌گیری زمانی است که برنامه بعدی نت تدوین می‌شود). به عنوان مثال برای سه اقدام پیشنهادی مشخص شده روی شکل، اقدام بهینه اقدام ۲ است و زمان بهینه برای پیاده‌سازی و اجرای اقدام زمانی است که تابع هزینه نقص مینیمم است. در این روش کاربر توصیه‌ها و اقدامات پیشنهادی را به کار می‌گیرد تا هزینه مورد انتظار نقص مینیمم شده و در یک بازه زمانی مناسب اقدامات مورد نیاز مقابله با نقص یا از کار افتادگی دستگاه تدارک دیده شود. در این روش، تصمیم‌گیری بجای اینکه بلافاصله بعد از وقوع نقص باشد، بر اساس هشدارها در یک بازه زمانی بهینه و مطمئن صورت می‌گیرد. (Bousdekis et al, 2018)

[1] Complex Event Processing Engine



شکل(۳). مفهوم تصمیم‌گیری رویداد محور فعالانه (Bousdekis et al, ۲۰۱۸)

در بیشتر موارد نت مبتنی بر شرایط فرض بر این است که سنسورهایی روی سیستم‌ها نصب شده است که اطلاعات مربوط به شرایط را گزارش می‌دهند اما همیشه ممکن است این امکان وجود نداشته باشد و شرایط دقیق هر جزء سیستم به صورت لحظه‌ای قابل گزارش نباشد در این حالت مدل تصمیم‌گیری مورد نیاز است که بتواند با مداخلاتی که در جریان نت مبتنی بر شرایط انجام می‌دهد افق تصمیمات و اتخاذ آلترناتیوهای مناسب برای نت مبتنی بر شرایط را فراهم سازد. (Karabag et al.۲۰۲۰).

۲. پیشینهٔ پژوهش

در اغلب مطالعات مشابه صورت‌گرفته تمرکز پژوهشگران بر توسعه سیستم‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط و مبتنی بر زمان بوده و تلاش انجام شده در راستای بالا بردن دقت، در مدل‌های پیش‌بینی و پیش‌گیری است. تعدادی از پژوهش‌ها نیز با اشاره به تغییرات پیرامونی و پیشرفت تکنولوژی، به‌کارگیری رویکرد فعالانه و کنش‌گر را در محیط صنعت توصیه کرده‌اند. جنگ نیو و همکاران در سال ۲۰۱۰ توسعه و بهینه‌سازی سیستم نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط را با استفاده از تلفیق داده‌ها و نگهداری تعمیرات قابلیت اطمینان‌محور مورد بحث قرار داده و مدل توسعه یافته نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط را ارائه کرده‌اند. در این مدل تلفیق داده‌ها در سطح سیگنال‌ها و تصمیمات صورت‌گرفته و انجام نگهداری تعمیرات قابلیت اطمینان محور به عنوان اقدامی مقدماتی برای دستیابی به تجزیه و تحلیل‌های دقیق و واقعی بر اساس تئوری قابلیت اطمینان، جهت طراحی مدل توسعه یافته نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط لحاظ شده است. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۷ لی یانگ و همکاران انجام داده‌اند، یک آنالیز رویداد محور برای تصمیمات در

نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط در سیستم‌های تولیدی چند مرحله‌ای صورت گرفته است. بر این اساس، توسعه یک روش سیستماتیک برای پیش‌بینی تأثیرات نامطلوب رویدادهای متوقف‌کننده خط تولید در سیستم‌های تولیدی چندمرحله‌ای از اهداف این پژوهش است که پژوهشگران آنرا مقدمه ارائه مدل‌های تصمیم‌گیری مناسب در نت مبتنی بر شرایط با رویکرد افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها در نظر گرفته‌اند. در این مطالعه استفاده از ابزار شبیه‌سازی و تئوری زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی‌ها و محاسبه احتمالات مورد استفاده قرار گرفته است.

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ توسط یِکسن و همکاران انجام شده است، مدلی برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان طراحی سیستم و نگهداری تعمیرات با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف طراحی شده که برای این منظور از برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی عدد صحیح بهره‌گیری شده است. در این مدل هدف کاهش میزان اقدامات و بازرسی‌های نت و بیشینه نمودن سود بر مبنای یک فرایند آماری در یک زمان پیوسته است. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ توسط چری و جیون صورت گرفته است، زمینه‌های توسعه و بهبود نگهداری تعمیرات پیش‌بینانه در محیط اینترنت اشیاء صنعتی بررسی شده و به مقوله کارخانه-های هوشمند پرداخته شده است. در این پژوهش مواردی مانند ارتباط و وابستگی نت با نقص‌ها، اهمیت مباحث تجاری در سرویس‌های نت، نت مبتنی بر زمان، نت مبتنی بر شرایط، مراحل نگهداری تعمیرات پیش‌بینانه، عملیات مرتبط با داده‌کاوی و یادگیری ماشین، تجزیه و تحلیل‌های آماری و رگرسیون و آنالیز رویدادها ارائه و ارتباط اینترنت اشیاء با این موضوعات در قالب اینترنت اشیاء صنعتی ذکر شده است. اکتای کارباگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به موضوع بهینه‌سازی یکپارچه نگهداری تعمیرات و سفارش قطعات یدکی در سیستم‌های چندبخشی پرداخته‌اند. در این مطالعه تمرکز پژوهشگران بر خرابی‌ها و نقص‌های جزئی بوده که در برخی اوقات ممکن است امکان پایش مؤثر آن با سنسورها در اجزاء کوچک داخلی تجهیزات و دستگاه‌ها وجود نداشته باشد اما خسارات و خرابی‌های ناشی از آن می‌تواند تبعات جبران ناپذیری در بر داشته باشد. ارائه مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر زنجیره مارکوف برای انتخاب سیاست بهینه نگهداری تعمیرات و مقایسه ارزش هر یک از اجزاء سیستم با اطلاعات بدست آمده از سنسورها، از اقداماتی است که در این تحقیق صورت گرفته است. در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۱۹ توسط گوانگ جو و همکاران صورت گرفته است، مقایسه آماری بین نگهداری تعمیرات مبتنی بر زمان و نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط انجام گرفته و با تجزیه و تحلیل‌های به‌عمل آمده استراتژی بهینه بر اساس شاخص‌های حداکثر قابلیت اطمینان چرخه عمر و ارزیابی هرینه‌های چرخه عمر تعیین شده است.

در سال ۲۰۱۹ الکساندر بوسدکیس و منتزاس مدل فعالانه بهینه‌سازی نگهداری تعمیرات و لجستیک را در محیط اینترنت اشیاء صنعتی ارائه کرده و مدل تصمیم‌گیری بر اساس زنجیره مارکوف را مبتنی بر پردازش رویدادها ارائه کرده‌اند. هدف از انجام این مطالعه محاسبه احتمالات حالات مختلف سیستم برای بدست‌آوردن سطح بهینه نرخ نقص مورد انتظار و سفارش قطعات یدکی در سیستم‌های کنترل موجودی است. این مطالعه در واقع توسعه پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۸ می‌باشد که پژوهشگر در آن فعال‌سازی تصمیمات در نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط را بر اساس پردازش‌ها و محاسبات فعالانه‌ی رویدادمحور مورد بررسی قرار می‌دهد. نقیب‌هاشمی و همکاران در سال ۱۴۰۰ در مطالعه‌ای با عنوان تصمیم‌گیری منفعلانه هوشمند برای حسگرهای بیدارشونده در پایش سازه‌ای، برای کاهش هزینه و خطا در پایش سازه های پایا و نیمه پایا نسبت به روش های فعلی از فرایند تصمیم گیری مارکوف استفاده نموده و راه‌کارهای پیشنهادی را برای کاهش مصرف انرژی و افزایش تحمل‌پذیری شبکه در انتقال پیام‌ها ارائه کرده‌اند. اقبالی زارچ و همکاران در سال ۱۳۹۶ پژوهشی را با هدف بهینه‌سازی درمان دارویی دیابت نوع ۲ انجام داده‌اند که در آن زمانبندی و توالی درمان‌های دارویی کنترل قندخون با رویکرد فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مدل می‌شود و در پایان، مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی و کارآیی سیاست بهینه حاصل، با گایدلاین‌های

بالینی، نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل بوده است. همچنین خواجه زاده و همکاران نیز از تلفیق فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و الگوریتم‌های فراابتکاری برای ایجاد سبد بهینه سهام با استفاده از داده‌های پیش‌بینی‌شده در سال ۱۳۹۹ استفاده کرده‌اند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم رگرسیون لبه، اقدام به پیش‌بینی بازده سهام شده است و درنهایت با استفاده از روش مارکوف و الگوریتم خوشه‌بندی طیفی، فیلتر لازم جهت انتخاب داده‌های اولیه مناسب انجام شده و روش فراابتکاری فرهنگی با داده‌های پیش‌بینی، سبد بهینه سهام را برای گروه سرمایه‌گذار با تمایلات ریسک‌پذیر و همچنین ریسک گریز ارائه کرده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در مطالعات پیشین برای انتخاب سیاست بهینه در زمینه‌های مختلف کاربردی گسترده داشته و همچنین در رابطه با موضوع بهینه‌سازی سیستم‌های نت نیز پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. در این پژوهش برخلاف سایر تحقیقات انجام شده، از قواعد برنامه‌ریزی پویای احتمالی برای تصمیم‌گیری رویدادمحور و انتخاب سیاست و اقدام مناسب، بر اساس حداکثر مقدار تابع مطلوبیت با توجه به زمان و هزینه بهینه، استفاده شده است و رویکرد فعالانه و کنش‌گرایانه در سیستم‌های نگهداری و تعمیرات، مورد توجه قرار گرفته است.

۳. روش شناسی

این پژوهش بر اساس هدف یک پژوهش توسعه‌ای و از نظر ماهیت پژوهشی کمی است که برای بیان رفتار بهینه مقوله‌ی مورد مطالعه، از ابزار شبیه‌سازی در آن استفاده شده است. در شبیه‌سازی برای دستیابی به نتایج مورد انتظار، وضعیت سیستم بر اساس قواعد عملیاتی تعریف و برای ارزیابی عددی یک مدل از رایانه استفاده می‌شود. متناسب با مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی، شرایط و ویژگی داده‌ها برای تخمین مدل، در مقیاسی کوچکتر در محیط نرم‌افزار تعریف و یا از داده‌های مطالعات قبلی استفاده می‌گردد. همچنین در بسیاری از موارد کتابخانه نرم‌افزار، نمونه‌هایی از پایگاه داده را با توجه به مدلِ پژوهشگر در اختیار قرار می‌دهد. شبیه‌سازی رایانه‌ای در عام‌ترین معنای آن، فرایند طراحی مدل منطقی ریاضی از سیستم واقعی و آزمایش این مدل با رایانه است (علینقیان و همکاران، ۱۳۹۵). در این پژوهش نیز ابتدا پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی شناسایی و تعریف و سپس روابط متغیرها تعیین گردیده و مدل ریاضی مورد نظر طراحی شده است. در این پژوهش هدف از مدلسازی دستیابی به مقادیر بهینه‌ی زمان و هزینه برای انتخاب و اجرای سیاست‌های بهینه نگهداری و تعمیرات است. به عبارت دیگر مدل ارائه شده اقدامات جایگزین، چگونگی و زمان بهینه اجرای اقدامات را با در نظر گرفتن روند تغییر هزینه‌ی انجام اقدام یا هزینه نتیجه اقدام، تعیین می‌کند.

داده‌ها که در واقع نقائص و رویدادها هستند، برگرفته‌شده از نتایج پیاده‌سازی نت قابلیت اطمینان‌محور مبتنی بر تئوری قابلیت اطمینان، ارزیابی ریسک با استفاده از تجزیه و تحلیل حالت‌های نقص و اثرات آن (FMEA) و تحلیل درخت رویداد (ETA) توسط متخصصان صنعت مورد مطالعه در یک بازه زمانی سه ساله است. در این تحقیق برای هر یک از نقص‌ها یا رویدادها، اقدام اصلاحی و سیاست بهینه مرتبط براساس زمان و کمترین میزان نرخ هزینه‌ی نقص، مشخص‌شده است. به عبارت دیگر سیاست‌ها و اقداماتِ مربوط به مدیریت ریسک‌ها و کنترل خطرات و نقائص، به صورت بهینه به هر یک از ریسک‌های بحرانی شناسایی شده تخصیص یافته است. با توجه به ویژگی رویدادمحور بودن فرایند تصمیم‌گیری و شاخص‌های مورد نظر مانند تعیین

کمترین میزان هزینه و انتخاب سیاست بهینه و همچنین تصمیم‌گیری در شرایط تصادفی بر اساس جستجوی غیرقطعی، از فرایند تصمیم مارکوف در زمان محدود مبتنی بر استقراء بازگشتی برنامه‌ریزی پویای احتمالی، برا ساس معادله بلمن [1] بهره‌گیری شده است.

پس از تعیین پارامترها و مدلسازی ریاضی مسئله، با استفاده از شبیه‌سازی رویدادهای گسسته [2]، مدل ریاضی، شبیه‌سازی شده و تابع مطلوبیت بر اساس هزینه نقص (هزینه اجرای هر یک از اقدامات اصلاحی) و مقادیر احتمالات در حالات مختلف سیستم، در بازه زمانی محدود محاسبه و مطلوبیت مورد انتظار برای هریک از نقص‌ها و اقدام اصلاحی مربوطه، به شکلی که کمترین هزینه را در پی داشته باشد مشخص شده است. برای آنالیز هر نقص (رویداد)، حالت‌های مختلف سیستم در نظر گرفته شده است که عبارتند از : ۱. وضعیت سیستم درحالت خطر ۲. وضعیت سیستم درحالتی که یک رویداد تصادفی یا نقص اتفاق بیفتد ۳. وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام ۴. وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام.

مدل ریاضی مسئله و متغیرهای پژوهش. یک مدل عبارتست از بازنمایی یا توصیف ساده یک سیستم یا موجودیت پیچیده که به منظور تسهیل محاسبات و پیش‌بینی‌ها طراحی می‌شود. بر اساس این تعریف مدل یک واقعیت را توصیف یا بازنمایی می‌کند و موجودیتی واقعی را ساده می‌کند. ایجاد یک مدل با قصد و هدفی صورت می‌گیرد که معمولاً عبارتست از انجام گونه‌ای از محاسبات یا پیش‌بینی نحوه رفتار یک موجودیت واقعی. (تری ویلیامز، ۲۰۱۲) مدلسازی ریاضی مستلزم تعیین روابط متقابل بین متغیرها، تعیین هدف یا اهداف و مشخص کردن محدودیت‌های موجود در مسئله است. فرایند مدلسازی شامل هفت مرحله است. تعریف مسئله، جمع‌آوری داده‌ها، ساخت مدل، بررس صحت عملکرد مدل، حل مدل، ارائه نتایج و اجرا و بکارگیری مدل. (مهرگان، ۱۳۸۸).

مدل استفاده شده در این پژوهش با توجه به ماهیت مسئله و اهداف مورد نظر، فرایند تصمیم‌گیری مارکوف است که بر مبنای برنامه‌ریزی پویای احتمالی به‌کارگیری شده و در گروه روش‌های بهینه‌سازی با فرایندهای تصادفی قرار می‌گیرد.

فرایند تصمیم‌گیری مارکوف مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالی. برنامه‌ریزی پویا تکنیکی عمومی برای استفاده در جایی است که باید مجموعه‌ای از تصمیمات اتخاذ شوند. یکی از مواردی که این تکنیک کاربرد دارد هنگامی است که تصمیم بهینه برای تصمیمات مراحل بعدی فقط باید به حالت فعلی وابسته باشد و مستقل از نحوه رسیدن به حالت فعلی است و به تصمیمات قبلی بستگی ندارد. (آذر و جهانیان، ۱۳۹۲). برنامه‌ریزی پویا روشی سودمند جهت اتخاذ یک رشته تصمیم‌های مرتبط با یکدیگر است. برای فرموله کردن هر مسئله لازم است که رابطه بازگشتی مناسبی مخصوص همان مسئله نوشته شود. (مدرس و آصف‌وزیری، ۱۳۸۸). فرایند تصمیم‌گیری مارکوف یک مدل بهینه‌سازی برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است و یک فرایند تصمیم‌گیری تصادفی از یک عامل در تعامل با یک محیط یا سیستم را توصیف می‌کند. در هر زمان تصمیم‌گیری، سیستم در یک حالت خاص باقی می‌ماند و عامل، تصمیم گرفته که در این حالت وجود داشته باشد .پس از انجام یک عمل، عامل یک پاداش فوری را دریافت می‌کند و سیستم با توجه به مقدار احتمال انتقالی، به وضعیتی جدید منتقل می شود (نقیب‌هاشمی و همکاران، ۱۴۰۰). در این مدل خروجی فرایند مارکوف از جنس سیاستی است برای بهینه کردن زمان اقدام که بوسیله معادلات Bellman فرموله شده است. این سیاست بر اساس حداکثر مطلوبیت مورد انتظار یا حداقل شکست و خرابی مورد انتظار ارزیابی شده است. در این زمینه، زمان تصمیم‌گیری برای اقدام بخش مهمی از فرایند تصمیم‌گیری است. بنابراین الگوریتم تصمیم‌گیری که برای فرایند تصمیم‌گیری مارکوف استفاده می‌شود، می‌تواند توصیه‌های پیش‌نگر و فعالانه ارائه کرده و تصمیمات

[1] Bellman
[2] Discrete Events Simulation

را در این رابطه که چه زمانی و کدام اقدام با توجه به شرایط تابع توزیع احتمال تغییر و انتقال حالت گرفته شود، پشتیبانی نماید. حالت‌های فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و انتقالات بر اساس مدل‌های محاسباتی پیش‌نگر فرموله می‌شود و مطلوبیت مورد انتظار هر اقدام با استفاده از الگوریتم بازگشتی استقرایی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالی تخمین زده می‌شود.

مدل مارکوف با رویکرد فعالانه و پیش‌نگر درسامانه‌های اطلاعاتی بکار گرفته می‌شود و هدف اصلی آن ارائه اقدامات بهینه‌ی جایگزین و پیشنهادات و توصیه‌های عملیاتی در زمان مناسب و بهینه است. بر اساس حالت‌های انتقال و تغییر در مراحل زمانی ثابت، مدل کلاسیک فرایند تصمیم‌گیری مارکوف، یک مدل زمانی گسسته فرض شده است. خاصیت مارکوفی یک فرایند را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد. اگر $\{X_{(t)}, t > ۰\}$ در نظر بگیریم اگر $X_{(t)}$ طبق فرایند مارکوف عمل کند به ازای تمام مقادیر t رابطه زیر برقرار است. (مدرس و تیموری، ۱۳۹۱).

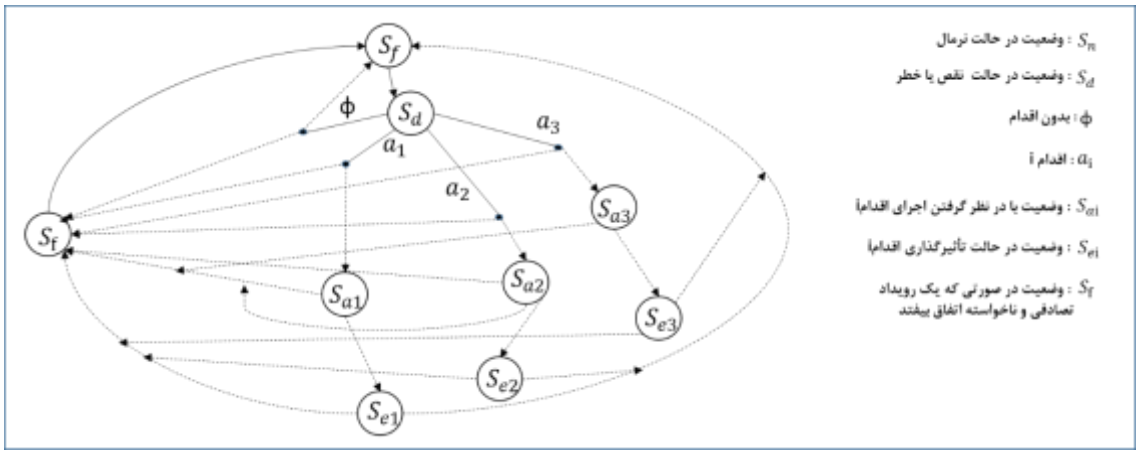
$$P[(X(t_{n+۱}) \leq x|X(t_۱) = x_۱ , X(t_۲) = x_۲, \dots, X(t_n) = x_n)] = P[(X(t_{n+۱}) \leq x|X(t_n) = x_n)]$$

زنجیره‌های مارکوف حالت خاصی از فرایند مارکوف است که در آن هم پارامتر t و هم حالت سیستم فقط مقادیر گسسته را انتخاب می‌کند. در یک زنجیره مارکوف بر اساس رشته متغیرهای تصادفی $X_۱$ تا X_n به ازای تمام مقادیر n و تمام حالت‌های i و j رابطه زیر برقرار است. (فقیه و همکاران، ۱۳۹۱).

$$P[(X_{n+۱} = j|X_۱ = i_۱, X_۲ = i_۲, \dots, X_n = i)] = P[(X_{n+۱} = j|X_n = i)]$$

در مدل ریاضی مورد نظر خروجی فرایند مارکوف از جنس سیاستی است برای بهینه کردن زمان اقدام. این سیاست بر اساس حداکثر مطلوبیت مورد انتظار یا حداقل شکست و خرابی مورد انتظار ارزیابی شده است. در این زمینه، زمان تصمیم‌گیری برای اقدام بخش مهمی از فرایند تصمیم‌گیری است. بنابراین الگوریتم تصمیم‌گیری که برای فرایند تصمیم‌گیری مارکوف استفاده می‌شود، می‌تواند توصیه‌های پیش‌نگر و فعالانه ارائه کرده و تصمیمات را در این رابطه که چه زمانی و کدام اقدام با توجه به شرایط تابع توزیع احتمال تغییر و انتقال حالت گرفته شود، پشتیبانی نماید.

شکل ۴ مدل تصمیم‌گیری مارکوف برای انتخاب سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات را نشان می‌دهد که شامل سه اقدام پیشنهادی جایگزین است.



شکل(۴). فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

این مدل با تعریف اقدامات جایگزین بیشتر نیز قابل کاربرد می‌باشد. همه روابط تعریف شده در راستای پیش‌بینی نقص و ارائه اقدامات مناسب جایگزین است که در قالب توابع احتمال و توابع انتقال مشخص شده است. جدول۱ متغیرهای مدل تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول(۱). معرفی پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی

متغیرهای مدل	تعریف
$P^f(t_1, t_2)$	تابع توزیع احتمال وقوع نقص f در بازه زمانی (t_1, t_2) در شرایطی که تا زمان t_1 نقصی اتفاق نیفتد.
$P^f_{a_i}(t_1, t_2)$	تابع توزیع احتمال وقوع نقص f در بازه زمانی (t_1, t_2) در شرایطی که تا زمان t_1 نقصی اتفاق نیفتد و فرض می‌شود اقدام i دقیقا در زمان t_1 اجرا شود.
$P(S_d, S_f)$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در حالت خطر و وضعیت سیستم در حالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق افتاده است
$P(S_d, S_{a_i})$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در حالت خطر و وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i
$P(S_{a_i}, S_{e_i})$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i و وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام i
$P(S_{e_i}, S_f)$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام i و وضعیت سیستم درحالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق بیفتد
$P(S_{a_i}, S_f)$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i و وضعیت سیستم در حالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق افتاده است
C_{a_i}	هزینه اجرای اقدام i
C_f	هزینه نقص
S_{a_i}	وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i
S_{e_i}	وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام i
S_d	وضعیت سیستم در حالت خطر
S_f	وضعیت سیستم درحالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق بیفتد
t_d	زمان وقوع خطر
t_{e_i}	زمان تأثیرگذاری اقدام i
t_{a_i}	زمان اجرای اقدام i
L	زمان بین سفارش قطعه و دریافت قطعه
T	بازه زمانی تصمیم
U^{a_i}	تابع مطلوبیت اقدام i

در فرایند تصمیم گیری مارکوف با استفاده از الگوریتم بازگشتی استقرایی در افق زمانی محدود، مطلوبیت مورد انتظار برای هر اقدام را با رابطه زیر می‌توان نشان داد:

$$U^{a_i} = -C_{ue}(P^{\varepsilon}(t_{\cdot}, t_{a_i}) + P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}) + (1 - P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}))P^{\varepsilon}_{a_i}(t_{a_i}, \acute{T})) - C_{a_i}(t_{a_i})(1 - P^{\varepsilon}(t_{\cdot}, t_{a_i}))$$

که در آن $t_{\cdot}$ زمان تشخیص الگو، t_{a_i} زمان انجام اقدام t_{e_i} زمان تأثیرگذاری اقدام i است.

$(\boldsymbol{t_{e_i}} = t_{a_i} + \Delta t_{a_i})$.

T پایان زمان تصمیم‌گیری است. بدین معنی که بعد از این زمان دلیلی برای تصمیم‌گیری وجود ندارد. C_{ue} هزینه یک رویداد ناخواسته و $C_{a_i}(t_{a_i})$ تابع هزینه اقدام یا عملکرد a_i است. هر یک از حالات فرایند پیش‌نگر تصمیم‌گیری مارکوف متناسب با خروجی است که از هزینه یک رویداد ناخواسته و هزینه‌های اقدام ناشی می‌شود. هزینه اقدامات می‌تواند یک مقدار ثابت و یک مقدار به عنوان زمان اجرای اقدام داشته باشد چرا که هزینه انجام اقدام در طول یک بازه زمانی بر اساس زمان انجام آن تغییر می‌کند. در این مدل تابع توزیع احتمال وقوع یک رویداد ناخواسته، بر اساس ویژگی‌ها و خصوصیت‌های مارکوفی در گروه توابع نمایی قرار دارد. (Bousdekis et al, ۲۰۱۸).

بر اساس مدل و متغیرهای معرفی شده روابط زیر جهت محاسبه توابع مربوط به احتمال وقوع نقص و هزینه انجام نگهداری تعمیرات تعریف شده است که برای رسیدن به سیاست و تصمیم بهینه در زمان مناسب و با هزینه مینیمم، استفاده می‌شوند.

رابطه(۱)

$$U^{a_i} = -C_{ue}(P^{\varepsilon}(t_{\cdot}, t_{a_i}) + P^{\varepsilon}(t_{a_i}, \boldsymbol{t_{e_i}}) + (1 - P^{\varepsilon}(t_{a_i}, \boldsymbol{t_{e_i}}))P^{\varepsilon}_{a_i}(t_{a_i}, \acute{T})) - C_{a_i}(t_{a_i})(1 - P^{\varepsilon}(t_{\cdot}, t_{a_i}))$$

رابطه (۲) $P^{f}(t_1, t_2) = \frac{G^{f}(t_2) - G^{f}(t_1)}{1 - G^{\varepsilon}(t_1)}$

رابطه (۳) $P^{f}_{a_i}(t_1, t_2) = \frac{G^{f}_{a_i}(t_2) - G^{f}_{a_i}(t_1)}{1 - G^{f}(t_1)}$

رابطه (۴) $P(S_d, S_f) = P^{f}(t_{\cdot}, t_{a_i})$

رابطه (۵) $P(S_d, S_{a_i}) = 1 - P^{f}(t_{\cdot}, t_{a_i})$

رابطه (۶) $P(S_{a_i}, S_f) = P^{f}(t_{a_i}, t_{e_i})$

رابطه (۷) $P(S_{a_i}, S_{e_i}) = 1 - P^{f}(t_{a_i}, t_{e_i})$

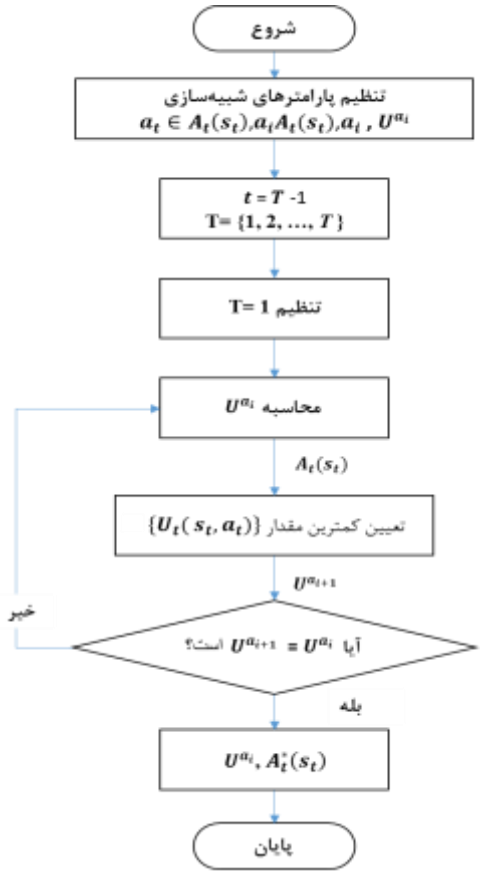
رابطه (۸) $P(S_{e_i}, S_f) = P^{f}_{e_i}(t_{e_i}, T)$

رابطه (۹) $P^{\cdot}(S_d, S_f) = P^{f}(t_{\cdot}, T)$

مبتنی بر مدل ریاضی و متغیرهای تعریف شده، برای تخصیص سیاست بهینه به هر رویداد در زمان مناسب و با کمترین هزینه بر اساس الگوریتم (جدول۲) و فلوچارت (شکل۵) زیر، مدل در نرم‌افزار MATLAB مدلسازی و اجرا شده و تصمیم و سیاست بهینه برای هر رویداد یا نقص تعیین شده است.

جدول (۲). شبه کد الگوریتم فرایند تصمیم‌گیری مارکوف بازه زمانی محدود براساس استقراء بازگشتی دربرنامه‌ریزی پویا

Initialize the MDP model components: T= {۱, ۲, …, T }, S, $A_t(s_t)$, U^{a_i}, C_f, P^{ε}.
For $s_t \in S$ **do**
  $Z_t(s_t)$
End
For $t = T$ -۱ → 0 **do**
  For $a_t \in A_t(s_t)$ **do**
    Calculate $U^{a_i} = -C_f(P^{\varepsilon}(t_0, t_{a_i}) + P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}) + (1\ P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}))P^{\varepsilon}_{a_i}(t_{a_i}, T) - C_{a_i}(t_{a_i})(1 - P^{\varepsilon}(t_0, t_{a_i}))$
  End
    Calculate $Z_t^*(s_t) \leftarrow \min\{U_t(s_t, a_t)\}$
    Calculate $A_t^*(s_t) \leftarrow \text{argmin}\{U_t(s_t, a_t)\}$
End
Return Z^*, A^*



شکل(۵). فلوچارت فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

٤. تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

۱۳ نقص مشخص شده، ریسک‌هایی هستند که درجه اهمیت بالا داشته و مدل ریاضی پژوهش برای تعیین اقدام اصلاحی یا سیاست نگهداری و تعمیرات در مورد آن‌ها پیاده‌سازی و اجرا می‌شود. عناوین اقدامات اصلاحی یا سیاست‌های تعیین شده برای اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات، به صورت از پیش تعیین شده و دریافت‌شده از متولیان و متخصصان صنعت مورد مطالعه است. جدول ۳.

جدول(۳). اقدامات اصلاحی/ سیاست‌های نگهداری و تعمیرات

ردیف	نقص‌ها	ردیف	سیاست/ اقدام اصلاحی
۱	ناکارآمدی سامانه حفاظت کاتدیک خطوط	۱	اخذ مجوزهای کاری یا گواهی‌نامه‌های فنی
۲	ناکارآمدی تجهیزات کنترل فشار و جریان	۲	ایجاد مرکز پایش خطرات و کنترل بحران
۳	انتشار گازهای آلاینده و مواد سمی شیمیایی	۳	استفاده از سامانه‌ها و نصب حسگرهای هشداردهنده در همه قسمت‌های شبکه انتقال
۴	نقص در حفاری‌های ضروری	۴	بازرسی‌های دوره‌ای و انجام تست‌های کنترلی فنی مهندسی
۵	آسیب مکانیکی (برخورد ماشین آلات مانند اسکریپر، پیکور، بلدوزر و ...) با خط لوله	۵	ارزیابی ریسک دوره‌ای و به‌روز رسانی، بازنگری و بهبود دستورالعمل-ها، روش‌های اجرایی و سایر مستندات
۶	نشت میعانات گازی	۶	بازطراحی سیستم هزینه‌یابی و محاسبه قیمت تمام شده امور نت
۷	عدم وجود فشارسنج حساس در طول خط لوله	۷	بازطراحی و ایمن‌سازی لوله‌ها، اتصالات و تجهیزات
۸	عدم آموزش مناسب و توجیه نبودن پیمانکاران نسبت به موقعیت محیطی خط لوله	۸	بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت
۹	استفاده از مواد اولیه بی‌کیفیت در تجهیزات و قطعات	۹	بازطراحی سیستم برنامه‌ریزی و کنترل موجودی قطعات و لوازم یدکی
۱۰	انبارش و نگهداری بیش از حد مورد نیاز تجهیزات، قطعات، مواد اولیه قابل اشتعال و کپسول گازهای قابل انفجار و جابجایی و انتقال ناایمن	۱۰	آموزش کارگزان و پیمانکاران در راستای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و خطرات و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی
۱۱	کیفیت پایین و نقص شیرهای اتوماتیک قطع جریان	۱۱	بازبینی و به‌روزرسانی تولیدکنندگان و عرضه‌کنندگان لوازم یدکی
۱۲	نقص در عایق‌کاری شبکه انتقال	۱۲	تغییر در روش‌های تجزیه و تحلیل و دوره‌های زمانی آنالیز اطلاعات نت
۱۳	خوردگی لوله	۱۳	نصب علائم، نشانگرها و تابلوهای ایمنی

با توجه به کلی بودن و قابلیت تعمیم سیاست‌ها به همه نقص‌ها، برای اختصاص هر سیاست نت یا اقدام اصلاحی به هر ریسک یا نقص، از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف که یک مدل ریاضی تصمیم‌گیری تصادفی است، استفاده شده است. این مدل قابلیت تعیین سیاست بهینه برای هر نقص را با توجه به حداکثر

میزان مطلوبیت در زمان و هزینه بهینه داراست. با توجه به پارامترهای شبیه‌سازی و روابط ریاضی تعریف‌شده برای مدل ریاضی و الگوریتم فرایند تصمیم-گیری مارکوف در بازه زمانی محدود بر اساس استقراء بازگشتی در برنامه‌ریزی پویای احتمالی مبتنی بر معادله Bellman، این مدل در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شده است. ماتریس اولیه ورودی منطبق بر جدول ۴ است. همچنین ماتریس احتمال انتقال اولیه در جدول ۵ و در تمامی محاسبات توزیع مبنا، نمایی و نرخ وقوع نقص ۰/۰۴۵ در نظر گرفته شده است. (λ=۰/۰۴۵).

جدول (۴) . ماتریس اولیه ورودی متلب

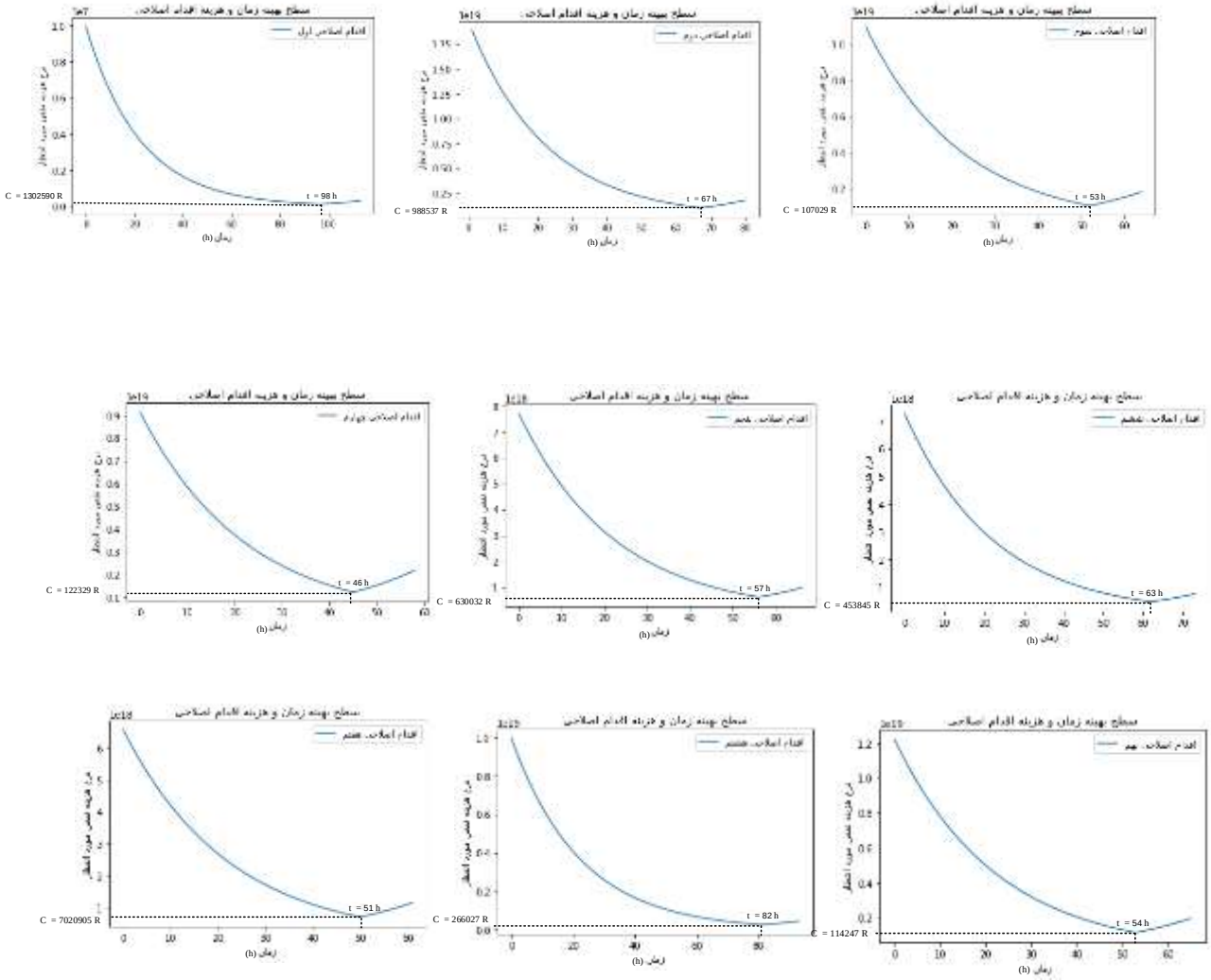
اقدام/سیاست	T(h)	L(h)	λ	t_a(h)	Δt(h)	t_e(h)	C_fریال	C_aریال	U^a
۱	۴۸۰	۴	۰,۰۴۵	۱۸۸	۲,۰	۱۹۴,۰	۵۰۰۸۰۰۴۹۶۰	۴۵۶۱۱۵۶۰۰	۲,۳۳۰۲۶
۲	۴۸۰	۶	۰,۰۴۵	۴۲۱	۳,۰	۴۳۰,۰	۹۵۰۸۱۷۶۵۰۰	۸۷۶۲۱۹۰۶۰	-۱,۳۰۲۵۶
۳	۴۸۰	۲	۰,۰۴۵	۱۹۶	۱,۰	۱۹۹,۰	۵۵۰۶۱۳۱۲۸۰	۴۸۷۵۶۱۹۸۰	۱,۷۹۰۲۷
۴	۴۸۰	۳	۰,۰۴۵	۳۱۵	۱,۵	۳۱۹,۵	۴۶۰۲۵۰۸۴۰۰	۴۰۲۷۷۱۸۳۰	-۵,۱۷۰۳۹
۵	۴۸۰	۸	۰,۰۴۵	۳۷۰	۲,۵	۳۸۰,۵	۳۸۷۵۷۳۰۴۲۰	۳۳۵۵۵۴۲۰۰	-۵,۱۰۴۱۷
۶	۴۸۰	۵	۰,۰۴۵	۱۳۷	۱,۰	۱۴۳,۰	۳۶۵۰۶۲۰۷۳۰	۳۰۹۶۴۴۱۱۰	۱,۶۶۱۳۶
۷	۴۸۰	۵	۰,۰۴۵	۳۵۱	۳,۰	۳۵۹,۰	۳۳۰۳۰۷۶۸۳۰	۲۸۷۹۹۱۸۸۰	-۱,۸۷۲۹۶
۸	۴۸۰	۷	۰,۰۴۵	۳۴۸	۲,۵	۳۵۷,۵	۵۰۰۲۶۶۵۵۳۰	۴۳۶۱۱۲۳۴۰	-۲,۴۷۹۹۲
۹	۴۸۰	۳	۰,۰۴۵	۲۴۴	۱,۰	۲۴۸,۰	۶۱۴۶۱۴۰۷۶۰	۵۰۸۶۶۳۲۵۰	۲,۰۶۵۲۰
۱۰	۴۸۰	۶	۰,۰۴۵	۲۱۰	۱,۳	۲۱۷,۳	۹۷۲۶۸۸۶۲۰۰	۸۸۳۱۹۰۴۵۰	۱,۶۸۳۹۶
۱۱	۴۸۰	۲	۰,۰۴۵	۲۶۵	۲,۳	۲۶۹,۳	۶۱۴۱۶۸۵۱۸۰	۵۱۸۹۰۶۲۳۰	۱,۹۲۵۹۳
۱۲	۴۸۰	۵	۰,۰۴۵	۲۳۲	۲,۰	۲۳۹,۰	۶۵۳۰۳۷۱۹۸۰	۵۵۹۶۲۱۱۱۰	۴,۰۷۷۰۶
۱۳	۴۸۰	۴	۰,۰۴۵	۳۸۳	۱,۵	۳۸۸,۵	۷۴۲۸۳۹۶۴۲۰	۶۵۳۴۸۹۲۳۰	-۱,۷۷۷۳۸

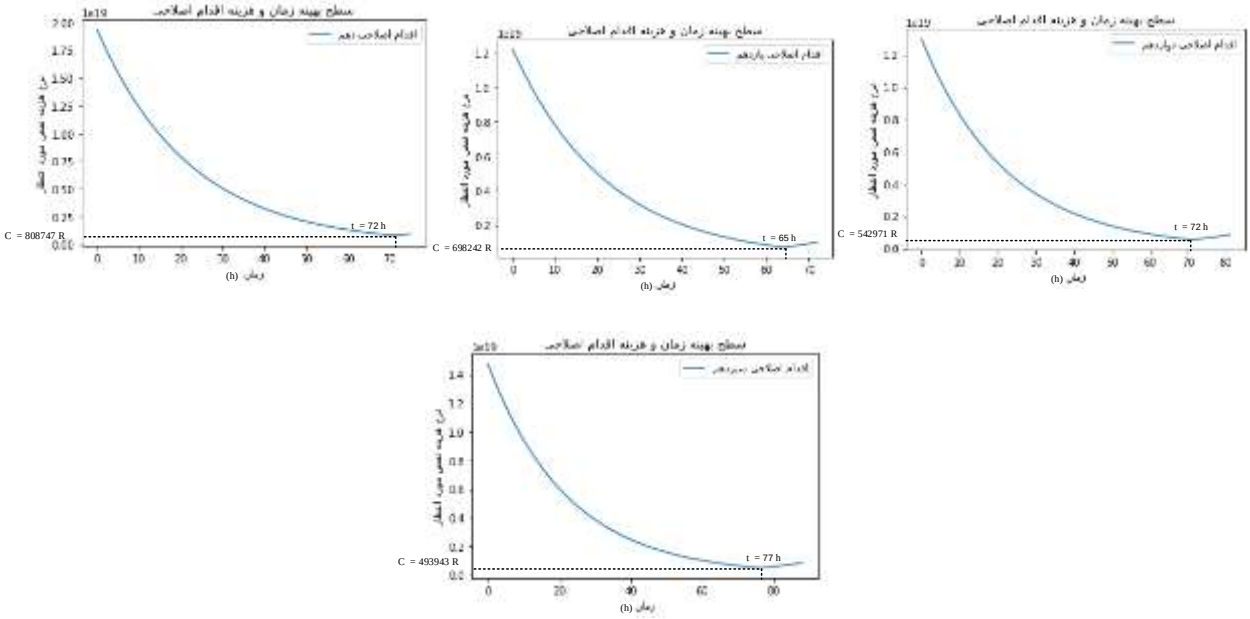
جدول (۵) . ماتریس احتمال انتقال اولیه

اقدام/سیاست	P(Sd,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sa,Sf)	P(Sa,Se)	P(Se,Sf)
۱	۰,۹۹۹۷۷۶	۰,۰۰۰۲۲۴۲۱۴	۰,۲۳۵۲۲۸	۰,۷۶۴۷۷۲	۰,۹۹۹۹۹۸
۲	۱	۶,۷۲۶۸۸□-۰۹	۰,۳۳۱۱۹۸	۰,۶۶۸۸۰۲	۰,۹۲۸۴۳
۳	۰,۹۹۹۸۴۳	۰,۰۰۰۱۵۶۸۰۹	۰,۱۲۵۴۸۸	۰,۸۷۴۵۱۲	۰,۹۹۹۹۹۷
۴	۰,۹۹۹۹۹۹	۸□-۰۷	۰,۱۸۲۱۹۷	۰,۸۱۷۸۰۳	۰,۹۹۹۳۷۳
۵	۱	۷□-۰۸	۰,۳۷۴۵۶۷	۰,۶۲۵۴۳۳	۰,۹۹۲۶۷۶
۶	۰,۹۹۷۸۰۹	۰,۰۰۲۱۹۱	۰,۲۳۵۲۲۸	۰,۷۶۴۷۷۲	۱
۷	۱	۱,۵۳۶۷۷□-۰۷	۰,۳۰۰۶۲۷	۰,۶۹۹۳۷۳	۰,۹۹۶۸۶۷

۸	۱	۱,۷۵۷۲۹□-۰۷	۰,۳۴۵۹۷۹	۰,۶۵۴۰۲۱	۰,۹۹۷۲۶
۹	۰,۹۹۹۹۸۲	۱,۸۳۴۹۶□-۰۵	۰,۱۶۳۷۱۵	۰,۸۳۶۲۸۵	۰,۹۹۹۹۷۴
۱۰	۰,۹۹۹۹۱۶	۸,۳۸۷۱۱□-۰۵	۰,۲۷۸۳۹۹	۰,۷۲۱۶۰۱	۰,۹۹۹۹۹۴
۱۱	۰,۹۹۹۹۹۳	۷,۱۷۷۷۳□-۰۶	۰,۰۹۷۶۹۴	۰,۹۰۲۳۰۶	۰,۹۹۹۹۳۳
۱۲	۰,۹۹۹۹۶۹	۳,۱۳۷۳۵□-۰۵	۰,۰۸۵۵۱۴	۰,۹۱۴۴۸۶	۰,۹۹۹۹۸۵
۱۳	۱	۳,۶۷۶۵۹□-۰۸	۰,۰۶۴۸۴۶	۰,۹۳۵۱۵۴	۰,۹۸۶۹۰۵

در شکل ۶ (نمودارهای ۱۳ گانه)، اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه برای هر نقص بر اساس زمان انجام اقدام اصلاحی یا اجرای سیاست نت که کمترین میزان هزینه نقص در آن به وقوع می‌پیوندد، انتخاب شده است. با توجه به اینکه هر چه ریسک هزینه کمتری داشته باشد اقدام اصلاحی نیز کم‌هزینه‌تر خواهد بود، در نمودارهای ۱ تا ۱۳ زمان اجرای یک سیاست نت زمانی است که ریسک یا نقص مورد نظر کمترین میزان هزینه را به همراه داشته باشد.





شکل(۶). نمودارهای ۱۳ گانه اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه مرتبط با هر نقص

جدول ۷ زمان اجرا و عنوان سیاست بهینه یا اقدام مورد نظر برای هر نقص را به همراه هزینه کمینه نقص نشان می‌دهد.

جدول (۷) . نتایج شبیه‌سازی فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

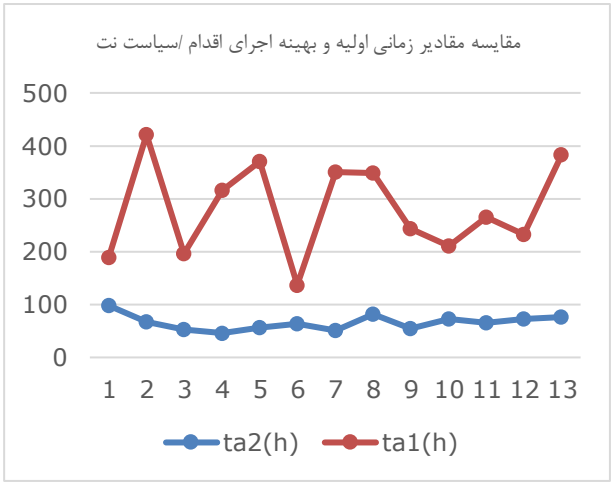
عنوان نقص	اقدام اصلاحی/ سیاست بهینه	زمان اجرا (ساعت)	هزینه(ریال)
ناکارآمدی سامانه حفاظت کاتدیک خطوط	استفاده از سامانه‌ها و نصب حسگرهای هشداردهنده در همه قسمت‌های شبکه انتقال	۹۸	۰۱۳۰۲۵۹۰
ناکارآمدی تجهیزات کنترل فشار و نرخ جریان در شبکه انتقال	ایجاد مرکز پایش خطرات و کنترل بحران	۶۷	۰۰۹۸۸۵۳۷
انتشار گازهای آلاینده و مواد سمی شیمیایی(مرکاپتان، روغن، گریس و مواد سمی	آموزش کارگران و پیمانکاران برای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و استفاده از تجهیزات حفاظتی	۵۳	۰۰۱۰۷۰۲۹
عدم آموزش مناسب و توجیه نبودن پیمانکاران نسبت به موقعیت محیطی خط لوله	بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت	۴۶	۰۰۱۲۲۳۲۹
نشت میعانات گازی	ارزیابی ریسک دوره‌ای و به‌روز رسانی، بازنگری و بهبود دستورالعمل‌ها، روش‌های اجرایی و مستندات	۵۷	۰۰۶۳۰۰۳۲

آسیب مکانیکی (برخورد ماشین آلات مانند اسکریپر، پیکور، بلدوزر و ...) با خط لوله	نصب علائم، نشانگرها و تابلوهای ایمنی	۶۳	۰۰۴۵۳۸۴۵
عدم وجود فشارسنج حساس در طول خط لوله	بازطراحی و ایمن‌سازی لوله‌ها، اتصالات و تجهیزات	۵۱	۰۰۷۰۲۰۹۵
نقص در حفاری‌های ضروری	اخذ مجوزهای کاری یا گواهی‌نامه‌های فنی	۸۲	۰۰۲۶۶۰۲۷
استفاده از مواد اولیه بی‌کیفیت در تجهیزات و قطعات	بازبینی و به‌روزرسانی تولیدکنندگان و عرضه‌کنندگان قطعات و لوازم یدکی	۵۴	۰۰۱۱۴۲۴۷
انبارش و نگهداری بیش از حد مورد نیاز تجهیزات، قطعات، مواد اولیه قابل اشتعال و کپسول گازهای قابل انفجار و جابجایی و انتقال ناایمن	بازطراحی سیستم برنامه‌ریزی و کنترل موجودی قطعات و لوازم یدکی	۷۲	۰۰۸۰۸۷۴۷
کیفیت پایین و نقص شیرهای اتوماتیک قطع جریان	بازطراحی سیستم هزینه‌یابی و محاسبه قیمت نهایی نت	۶۵	۰۰۶۹۸۲۴۲
نقص در عایق‌کاری شبکه انتقال	تغییر در روش‌های تجزیه و تحلیل و دوره‌های زمانی آنالیز اطلاعات نت	۷۲	۰۰۵۴۲۹۷۱
خوردگی لوله	بازرسی‌های دوره‌ای و انجام تست‌های کنترلی مهندسی	۷۷	۰۰۴۹۳۹۴۳

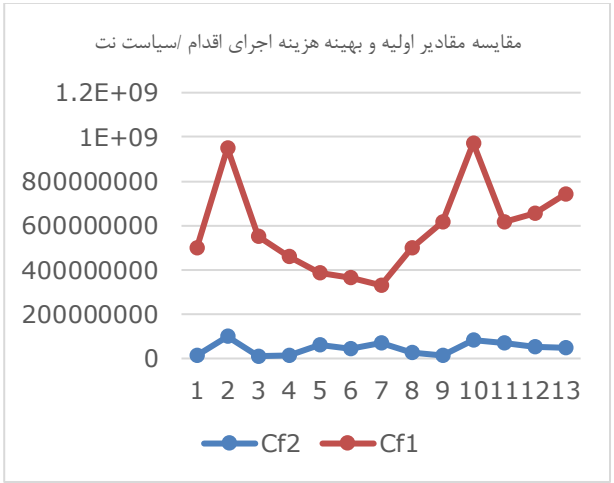
با توجه به نتایج شبیه‌سازی، کمترین میزان هزینه نقص مربوط به "انتشار گازهای آلاینده و مواد سمی شیمیایی(مرکاپتان، روغن، گریس، دوده و مواد سمی)" و سیاست/ اقدام اصلاحی مرتبط آن عبارتست از "آموزش کارگران و پیمانکاران در راستای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و خطرات و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی" که در زمان $t = ٥٣\ h$ انجام می‌شود. همچنین اقدام اصلاحی/ سیاست بهینه "بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت" به عنوان سیاستی است که زودتر از سایر اقدامات برای نقص یا ریسک "عدم آموزش مناسب و توجیه نبودن پیمانکاران نسبت به موقعیت محیطی خط لوله" قابلیت انجام دارد. بیشترین میزان هزینه نقص مربوط به "ناکارآمدی تجهیزات کنترل فشار و نرخ جریان در شبکه انتقال" است که سیاست/ اقدام اصلاحی "ایجاد مرکز پایش خطرات و کنترل بحران" در مورد آن در زمان $t = ٦٧\ h$ در نظر گرفته شده است و سیاست/ اقدام اصلاحی "استفاده از سامانه‌ها و نصب حسگرهای هشداردهنده در همه قسمت‌های شبکه انتقال" دیرتر از سایر موارد به کار گرفته می‌شود و مربوط به نقص "ناکارآمدی سامانه حفاظت کاتدیک خطوط" در زمان $t = ٩٨\ h$ ساعت است. در جدول ۸ مقادیر اولیه و مقادیر بهینه به‌دست‌آمده از اجرای شبیه‌سازی در مورد "هزینه اجرای اقدام یا سیاست نت" و "زمان اجرای اقدام یا سیاست نت" ارائه شده است. همچنین روند مقایسه این مقادیر در هر سیزده مورد، در نمودارهای شکل ۷ و ۸ بررسی شده است.

جدول(۸). مقادیر اولیه و بهینه هزینه و زمان اقدام یا سیاست نت

ta_1(h)	ta_2(h)	Cf_1	Cf_2
۱۸۸	۹۸	۰۵۰۰۸۰۰۴۹	۰۱۳۰۲۵۹۰
۴۲۱	۶۷	۹۵۰۸۱۷۶۵۰	۰۰۹۸۸۵۳۷
۱۹۶	۵۳	۰۵۵۰۶۱۳۱۲	۰۰۱۰۷۰۲۹
۳۱۵	۴۶	۴۶۰۲۵۰۸۴۰	۰۰۱۲۲۳۲۹
۳۷۰	۵۷	۰۳۸۷۵۷۳۰۴	۰۰۶۳۰۰۳۲
۱۳۷	۶۳	۰۳۶۵۰۶۲۰۷	۰۰۴۵۳۸۴۵
۳۵۱	۵۱	۰۳۳۰۳۰۷۶۸	۰۰۷۰۲۰۹۵
۳۴۸	۸۲	۰۵۰۰۲۶۶۵۵	۰۰۲۶۶۰۲۷
۲۴۴	۵۴	۰۶۱۴۶۱۴۰۷	۰۰۱۱۴۲۴۷
۲۱۰	۷۲	۰۹۷۲۶۸۸۶۲	۰۰۸۰۸۷۴۷
۲۶۵	۶۵	۰۶۱۴۱۶۸۵۱	۰۰۶۹۸۲۴۲
۲۳۲	۷۲	۰۶۵۳۰۳۷۱۹	۰۰۵۴۲۹۷۱
۳۸۳	۷۷	۰۷۴۲۸۳۹۶۴	۰۰۴۹۳۹۴۳



شکل(۷). نمودار مقایسه مقادیر زمانی اولیه و بهینه اجرای اقدام /سیاست نت



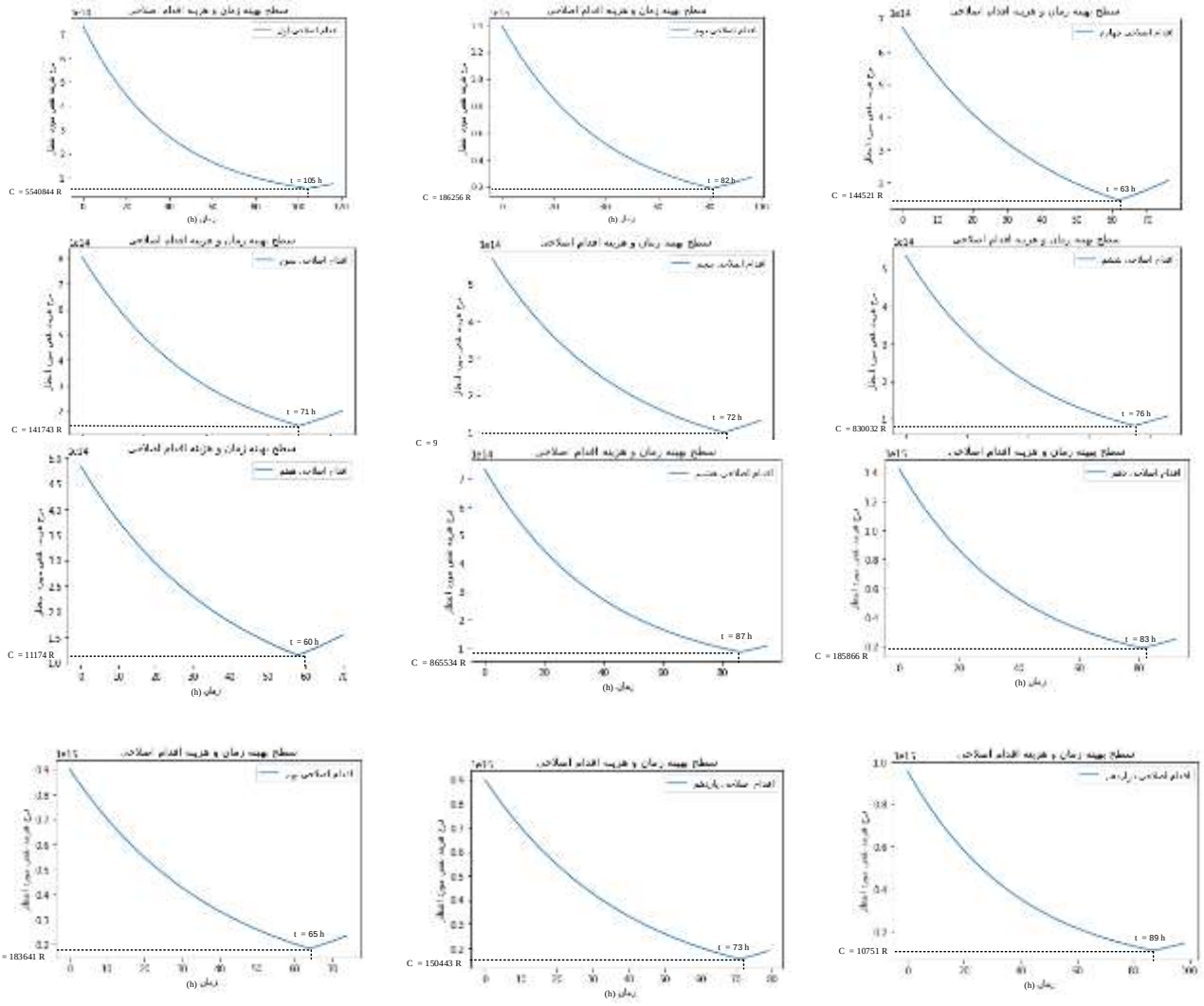
شکل(۸). مقایسه مقادیر اولیه و بهینه هزینه اجرای اقدام /سیاست نت

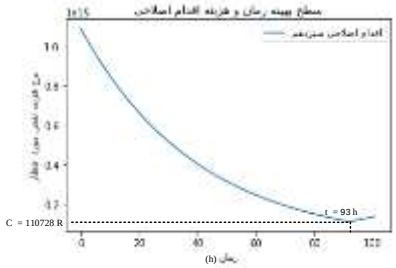
با توجه به نتایج فوق، در جدول ۹ درصد بهینگی حاصل شده از اجرای مدل با توجه به میانگین مقادیر ارائه شده است.

جدول (۹). میزان بهبود بر اساس میانگین زمان و هزینه اقدام/ سیاست نت

Cf۲ میانگین	Cf۱ میانگین	میزان بهبود	ta۲(h) میانگین	ta۱(h)میانگین	میزان بهبود
۴۶۶۰۲۳۳۰	۵۸۷۹۲۶۱۱۶	٪ ۹۲	۶۵	۲۸۱	٪ ۷۷

اجرای اقدام یا سیاست اثربخش نت، به صورتی که از یک طرف در بازه زمانی کوتاه‌تر پس از وقوع نقص باشد و از طرف دیگر با کمترین میزان هزینه همراه باشد، از موارد مهم و اجتناب‌ناپذیر است؛ از این‌رو نرخ بهبود در زمان و هزینه حائز اهمیت است. برای این منظور بکارگیری ابزار مؤثر برای بهینه‌سازی این مؤلفه‌ها نقش تعیین‌کننده و بسزایی را ایفا می‌نماید. با توجه به جدول ۹، نرخ بالای بهینگی حاصل‌شده در میانگین زمان و هزینه اجرای اقدام یا سیاست نت، مؤید کارایی و مطلوبیت مدل تصمیم‌گیری استفاده شده در این پژوهش است. برای سنجش اعتبار و تحلیل حساسیت، مدل پژوهش با نرخ وقوع ۰,۰۲۵ نیز مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج در شکل ۹ (نمودارهای ۱۳ گانه) و جدول ۱۰ ارائه شده است.



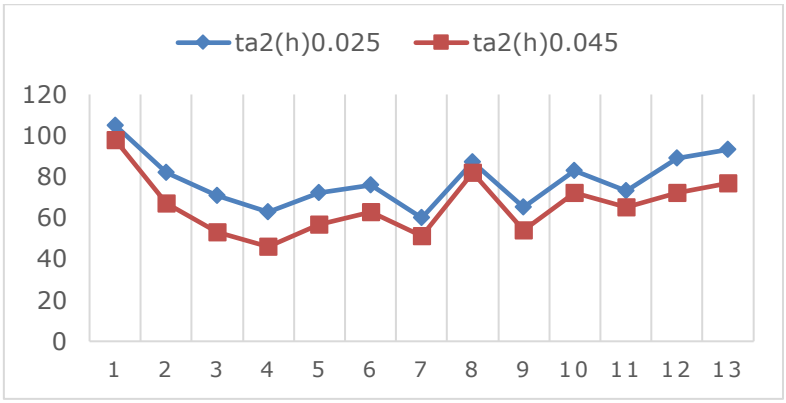


شکل(۹). نمودارهای ۱۳ گانه اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه مرتبط با هر نقص با λ=۰/۰۲۵

جدول(۱۰). مقادیر اولیه و بهینه هزینه و زمان اقدام یا سیاست نت

ta_1(h)	ta_2(h)	Cf_1	Cf_2
۱۸۸	۱۰۵	۰۵۰۰۸۰۰۴۹	۵۵۴۰۸۴۴۰
۴۲۱	۸۲	۹۵۰۸۱۷۶۵۰	۱۸۶۲۵۶۰۰
۱۹۶	۷۱	۰۵۵۰۶۱۳۱۲	۱۴۱۷۴۳۰۰
۳۱۵	۶۳	۴۶۰۲۵۰۸۴۰	۱۴۴۵۲۱۰۰
۳۷۰	۷۲	۰۳۸۷۵۷۳۰۴	۹۷۳۲۴۸۰۰
۱۳۷	۷۶	۰۳۶۵۰۶۲۰۷	۸۳۰۰۳۲۰۰
۳۵۱	۶۰	۰۳۳۰۳۰۷۶۸	۱۱۱۷۴۰۰۰
۳۴۸	۸۷	۰۵۰۰۲۶۶۵۵	۸۶۵۵۳۴۰۰
۲۴۴	۶۵	۰۶۱۴۶۱۴۰۷	۱۸۳۶۴۱۰۰
۲۱۰	۸۳	۰۹۷۲۶۸۸۶۲	۱۸۵۸۶۶۰۰
۲۶۵	۷۳	۰۶۱۴۱۶۸۵۱	۱۵۰۴۴۳۰۰
۲۳۲	۸۹	۰۶۵۳۰۳۷۱۹	۱۰۷۵۱۰۰۰
۳۸۳	۹۳	۰۷۴۲۸۳۹۶۴	۱۱۰۷۲۸۰۰

بر اساس نتایج به‌دست آمده از اجرای شبیه‌سازی با نرخ وقوع نقص ۰/۰۲۵ و با توجه به مقادیر جدول فوق، میزان بهبود، در میانگین هر دو شاخص زمان و هزینه بالای ۹۰ ٪ برآورد شده است. با افزایش نرخ وقوع نقص اهمیت تصمیم‌گیری در زمان کوتاه‌تر بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر هر چه نرخ وقوع نقص بیشتر باشد به طور طبیعی تصمیمات سریع‌تر و در بازه زمانی کوتاه‌تر اتخاذ می‌شود. این مطلب در نمودار زیر بر اساس دو سناریوی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل(۱۰). نمودار تحلیل حساسیت بر اساس زمان

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه مربوط به میانگین نرخ وقوع ۰,۰۴۵ در تمامی سیاست‌های نت، دارای مقادیر کمتر هستند که با توجه به نرخ وقوع نقص بیشتر، تصمیم‌گیری و انتخاب سیاست بهینه بایستی در بازه زمانی کوتاه‌تر صورت پذیرد و بر این اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیانگر صحت مدل می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

اجرای برنامه‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات به‌موقع و اثربخش از اقدامات اساسی در افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید، تجهیزات و ماشین-آلات است. تعیین برنامه نگهداری تعمیرات متناسب با هر خرابی و نقص، چگونگی اجرای این اقدامات با کمترین میزان هزینه و مشخص کردن بهترین زمان برای اجرا، مواردی هستند که از اهمیت بالایی برخوردارند. نگهداری و تعمیرات فعالانه و کنشگر، رویکردی نوین در سیستم‌های نت است که این ویژگی‌ها را دارا است. در نت فعالانه، بجای پرداختن مطلق به کشف یا پیش‌بینی نقص‌ها، خرابی‌ها و رویدادهای ناخواسته، تمرکز بر حوزه تصمیم‌گیری برای انتخاب اقدام نت متناسب با هر نقص است که غالباً در بستر نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط صورت می‌گیرد. در این پژوهش تلاش شده است با بهره‌گیری از این رویکرد و بر اساس مبانی تئوری قابلیت اطمینان، متناسب با نقص‌ها و رویدادهای شناسایی‌شده، سیاست‌های بهینه نت در سطح بهینه‌ای از زمان و هزینه نقص، تعیین و اجرا شود. برای این منظور با توجه به ماهیت مسئله و اهداف مورد نظر و همچنین ویژگی تصمیم‌گیری در شرایط تصادفی بر اساس جستجوی غیرقطعی، از فرایند تصمیم مارکوف در زمان محدود مبتنی بر استقراء بازگشتی برنامه‌ریزی پویای احتمالی، برا ساس معادله بلمن بهره‌گیری شده است. در این مطالعه، برای تعیین هزینه نقص و هزینه اجرای هر یک از سیاست‌های نت یا اقدامات اصلاحی و مطلوبیت مورد انتظار برای هریک از نقص‌ها و اقدام اصلاحی مربوطه، از شبیه‌سازی رویداد گسسته استفاده شده است. همچنین برای محاسبه کمترین هزینه و زمان بهینه، سیستم در حالت‌های مختلف تحلیل شده است که عبارتند از : ۱. وضعیت سیستم درحالت خطر ۲. وضعیت سیستم درحالتی که یک رویداد تصادفی یا نقص اتفاق بیفتد ۳. وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام ۴. وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام. پس از اجرای شبیه‌سازی، علاوه بر تخصیص سیاست بهینه به هر رویداد، میزان بهبود در هزینه نقص‌ها و زمان اجرای یک اقدام اصلاحی برآورد و با شرایط قبل از اجرای مدل مقایسه شده است. نتایج پژوهش

حاکی از آن است که نرخ بهینگی در میانگین هزینه اجرای سیاست نت ۹۲ ٪ و این میزان در میانگین زمان اجرا، ۷۷ ٪ است. برای تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی، مدل مورد نظر با میانگین نرخ وقوع نقص ۰/۰۲۵ نیز مورد سنجش قرار گرفته است.

به‌روز نبودن داده‌های مربوط به هزینه نقص‌ها و همچنین عدم امکان دسترسی به داده‌های جدید، از محدودیت‌های اصلی پژوهش است. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود با دسترسی به داده‌های هزینه‌های کنترل موجودی و لجستیک، مقادیر بهینگی در احتمالات در هر یک از حالات سیستم نیز محاسبه و با اضافه نمودن شاخص‌های دیگر به دو شاخص زمان و هزینه که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، شرایط انجام بهینه‌سازی‌های ترکیبی با سایر مباحث مانند سیستم‌های کنترل موجودی و برنامه‌ریزی سفارشات، ارزیابی ریسک، قابلیت اطمینان و ... با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری (روش‌های غیرقطعی) و یا روش‌های قطعی بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی ریاضی مانند برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی آرمانی، تئوری بازی‌ها و ... فراهم شود.

٦. منابع

۱. آذر، عادل. جهانیان، سعید. (۱۳۹۲). روش‌شناسی علم مدیریت. مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول، تهران، ایران.

۲. اصغری‌زاده، عزت‌اله. محمدی بالانی، عبدالکریم. (۱۳۹۷). تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، تهران، ایران.

۳. اقبالی زارچ، مریم. توکلی مقدم، رضا. سپهری، محمد مهدی. اصفهانیان، فاطمه. آذرون، امیر. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی و تحلیل هزینه‌ای درمان دارویی دیابت نوع ۲ برای پیشگیری از هایپوگلیسمی با رویکرد فرآیند تصمیم مارکوف، مجله انفورماتیک سلامت و زیست پزشکی، دوره چهارم، شماره دوم،۸۴-۹۷.

۴. خواجه زاده، سامیران. شاهوردیانی، شادی. دانشور، امیر. معدنچی زاج، مهدی. (۱۳۹۹).پیش‌بینی سبد بهینه سهام رویکرد الگوریتم فراابتکاری و فرآیند تصمیم مارکوف. تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره۵ ، شماره۴، ۴۲۶-۴۴۵.

۵. رامشخواه، فیروزه. فرزادپور، زیبا. ریاحی نیا، شاهین. (۱۳۹۶). ارائه روش بهینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه قابلیت اطمینان محور برای ترانسفورماتورهای شبکه توزیع تهران بزرگ. سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق تهران، ایران.

۶. ربانی، علی. زارع، حبیب. بهنیا، فروغ. (۱۳۹۲). ارائه الگوی مناسب جهت پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات درکارخانجات خطوط تولید پیوسته با رویکرد مدل های تصمیم گیری و برنامه‌ریزی آرمانی فازی. فصلنامه علمی – پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، سال یازدهم، شماره۳۱ ، ۱۰۰-۸۵.

۷. روان‌بخش، سودابه. (۱۳۹۷). بهبود بهره‌وری تجهیزات استراتژیک با روش نگهداری، تحلیل خرابی و شبیه‌سازی. نشریه صنعت حمل و نقل دریایی. ۱۳-۲۶.

۸. زارعی، محمد. عبدی، منصور. شبیهی، فرهاد. (۱۳۹۶). بررسی تحلیلی روشهای بهینه‌سازی بازه زمانی نگهداری و تعمیرات تجهیزات سیستمهای قدرت. سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق تهران، ایران.

۹. سعیدی سوق، یاسر. احمدی، اردشیر. رمضانی، سعید. (۱۳۹۴). بهینه سازی ترکیبی موجودی قطعات یدکی و فعالیتهای نگهداری و تعمیرات. مدیریت زنجیره تأمین. سال ۱۷، شماره ۴۹، ۳۶-۵۳

۱۰. علینقیان، مهدی. ایزدبخش، حمیدرضا. زرین‌بال، مرضیه. (۱۳۹۵). مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته-پیشامد. نشر موجک، سال چهارم، تهران، ایران.

۱۱. فقیه، نظام‌الدین. باقرپور، مرتضی. حسنلی، سمانه. (۱۳۹۱). برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات. انتشارات سمت، چاپ اول، تهران، ایران.

۱۲. کریم‌آبادی، علی. حاجی‌آبادی، محمد ابراهیم. کامیاب، عباداله. (۱۳۹۵). مروری بر تعمیرات و خرابی‌های تجهیزات پست‌های انتقال و فوق نوزیع. نشریه علمی تخصصی تحقیقات نوین در برق. سال پنجم، شماره ۲.

۱۳. مدرس، محمد. آصف‌وزیری، اردوان. (۱۳۸۸). برنامه‌ریزی ریاضی. نشر جوان، چاپ ششم، تهران، ایران.

۱۴. مدرس، محمد. تیموری، ابراهیم. (۱۳۹۱). نظریه صف. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، تهران، ایران.

۱۵. مهرگان، محمدرضا. (۱۳۸۸). مدلسازی ریاضی. انتشارت سمت، چاپ سوم، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۱۶. نصرت پناه، سیاوش. اسدی، علی. (۱۳۹۷). سیاست های نگهداری و تعمیرات(نت)مبتنی بر وضعیت. فصلنامه علمی -ترویجی اندیشه آماد، شماره ۶۱، سال هفدهم، ۱۶۳-۱۴۱.

۱۷. نقیب هاشمی، سیدسهند. اصغری توچائی، سیدامیر. بینش مروستی، محمدرضا. (۱۴۰۰). تصمیم‌گیری منفعلانه هوشمند برای حسگرهای بیدارشونده در پایش سازه‌ای. نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۹ ، شماره۳ ، ۱۸۲-۱۷۰.

۱۸. Abdel-aziz, I. H., Helal, M. (۲۰۱۲). "Application of FMEA- FTA in Reliability- Centered Maintenance Planning". *15th International conferance on Applied Mechanics and Mechanicals Engineering*. May ۲۹-۳۱. Egypt.

۱۹. Bousdekis, A., Mentzas, G. (۲۰۱۹). "A Proactive Model for Joint Maintenance and Logistics Optimization in the Frame of Industrial Internet of Things". *Operational Research in the Digital Era – ICT Challenges*, Springer Proceedings in Business and Economics.۲۱-٤٥.

۲۰. Bousdekis, A., Papageorgiou, N., Magoutas, B., Apostolou, D. (۲۰۱۸). "Enabling condition-based maintenance decisions with proactive eventdriven computing". *Computers in Industry*. Vol ۱۰۰. ۱۷۳–۱۸۳.

۲۱. Fang, F., Zhao, Z., Huang, C., Zhang, X., Wang, H., Yuan, Y. (۲۰۱۹). "Application of Reliability Centered Maintenance in Metro Door System".

۲۲. Jin, H., Han, F. Sang, Y. (۲۰۲۰). "An optimal maintenance strategy for multi-state deterioration systems based on a semi-Markov decision process coupled with simulation technique". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol ۱۳۹. ۱۰٦٥۷۰.

۲۳. Karabağ, O., Eruguz, A., Basten, R. (۲۰۲۰). "Integrated optimization of maintenance interventions and spare part selection for a partially observable multi-component system". *Reliability Engineering and System Safety*. April vol۲۰۰. ۱۰٦۹٥٥.

۲٤. Kim, J., Ahn, Y., Yeo, h. (۲۰۱٦). "A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy". *Structure and Infrastructure Engineering*. Feb ۱۷٤٤-۸۹۸۰.

۲٥. Li, Y., Tang, Q., Chang, Q., Brundage, P. (۲۰۱۷). "An event-based analysis of condition-based maintenance decision-making in multistage production systems". *International Journal of Production Research*. DOI: ۱۰,۱۰۸۰/۰۰۲۰۷٥٤۳,۲۰۱۷,۱۲۹۲۰٦۳.

۲٦. Niu, G., Yang, B., Pecht, M. (۲۰۱۰). "Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance". *Reliability Engineering and System Safety* vol ۹٥. ۷۸٦–۷۹٦.

۲۷. Souza, R., Alvares, A. (۲۰۰۷)."FMEA and FTA Analysis for Application of the Reliability Centered Maintenance Methodology". *19th International congress of Mechanical Engineering*. November ٥-۹. Brasilia.

۲۸. Ye, Y., Grossmann, I. Pinto, J., Ramaswamy, S. (۲۰۱۹). "Modeling for reliability optimization of system design and maintenance based on Markov chain theory".*Computers and Chemical Engineering*. Vol ۱۲٤. ۳۸۱-٤۰٤.

۲۹. Zou, G., Banisoleiman, K., Gonzalez, A., Faber, M. (۲۰۱۹). "Probabilistic investigations into the value of information: A comparison of condition-based and time-based maintenance strategies". *Ocean Engineering*. July vol ۱۸۸. ۱۰٦۱۸۱.