پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صص ۲۱۵-۱۷۸
نوع مقاله: پژوهشی

بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات Proactive و کنترل موجودی با استفاده از فرایند تصمیم مارکوف و شبیه‌سازی در محیط اینترنت اشیاء صنعتی

محمدصادق بهروز[۱]، محمدعلی افشار کاظمی*[۲]، عادل آذر[۳]، عزت اله اصغری زاده[۴]

۱. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
٤. دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰٤/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۸/۰۷

چکیده

اجرای برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در زمان مناسب و مدیریت و کنترل هم‌زمان موجودی با در نظر داشتن تغییرات و رشد تکنولوژی و همچنین بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، موضوعی است که می‌تواند علاوه بر تأثیر بر کیفیت تولید، به‌عنوان یک مزیت رقابتی محسوب شود. هدف از انجام این پژوهش بهینه‌سازی نرخ نقص مورد انتظار در دو مقوله "نگهداری و تعمیرات" و "برنامه‌ریزی و کنترل موجودی" بر اساس زمان و هزینه است. برای این منظور، سیاست بهینه با توجه به رویدادهای شناسایی‌شده بر اساس زمان و هزینه، با استفاده از فرایند تصمیم مارکوف، پیشنهاد و توصیه‌شده و مقادیر احتمالات در حالت‌های مختلف سیستم، محاسبه‌شده است. در ادامه برای تعیین زمان اثربخشی و تأثیرگذاری سیاست‌ها، از مفهوم اینترنت اشیاء صنعتی بهره‌گیری و مسئله در محیط شبیه‌ساز OPNET، مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌شده است و بر اساس زمان جدید، مقادیر بهینه محاسبه‌شده است. برای انجام پژوهش، داده‌های تاریخی مربوط به اجرای برنامه‌های نت و ارزیابی ریسک در شبکه انتقال گاز مورداستفاده قرارگرفته است و بر اساس تغییر در میانگین نرخ وقوع رویدادها، زمان انجام شبیه‌سازی و تغییر در مقادیر پارامترهای آماریِ شبکه، تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل انجام‌شده است. نتایج پژوهش، میزان بهبود و نرخ بهینگی در نرخ نقص مورد انتظار را مبتنی بر "زمان اجرای اقدام اصلاحی یا سیاست نت"، "زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت" و "زمان سفارش قطعات یدکی و اقدامات لجستیکی"، بر اساس هزینه نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نگهداری و تعمیرات Proactive، کنترل موجودی، فرایند تصمیم مارکوف، اینترنت اشیاء صنعتی، شبیه‌سازی شبکه‌های کامپیوتری.

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: dr.mafshar@gmail.com

۱- مقدمه و بیان مسئله

یکی از مسائلی که تولیدکنندگان همواره با آن روبرو هستند، سطح موجودی قطعات و کالاها در انبارها و تلاش برای کاهش آن به‌منظور کاستن از هزینه‌های نگهداری است. تصمیمات تاکتیکی برنامه‌ریزی تولید شامل مقدار تولید و سطح موجودی بر روی تصمیم عملیاتی زمان‌بندی که شامل چگونگی ترتیب پردازش کارها و عملیات نت است، تأثیرگذار است [۱]. در مدیریت و کنترل موجودی، باید بین سطح موجودی قطعات یدکی، هزینه ریسک ناشی از عدم وجود قطعه در زمان موردنیاز و هزینه‌های نگهداری آن توازن وجود داشته باشد. واضح است که میزان موجودی قطعات یدکی، از خصوصیات دستگاه‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها متأثر است [۲]. برای افزایش قابلیت اطمینان دستگاه‌ها و تجهیزات، پیاده‌سازی و اجرای سیاست‌ها و برنامه‌های نگهداری تعمیرات از اقدامات مهم و اساسی است. امروزه با توجه به توسعه فناوری‌های نوین درزمینه مدیریت داده‌ها و اطلاعات و افزایش نیاز به پیش‌بینی نقص‌ها و فرسودگی تجهیزات، نت مبتنی بر شرایط، نسبت به سایر رویکردهای نگهداری و تعمیرات، کارکردهای بیشتری را در بر گرفته و ازآنجاکه بر ضرورت پیش‌آگاهی‌ها و هشدارها تأکید دارد، دارای کاربرد وسیع و گسترده است [۳]. جمع‌آوری حجم زیاد داده‌ها (کلان‌داده‌ها) و استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل آن و همچنین طراحی سیستم‌های پشتیبان تصمیم، علاوه بر هوشمندسازی نت مبتنی بر شرایط، روند تکمیل و توسعه آن را به همراه داشته است. [٤]. مانیتورینگ، کنترل و نظارت مستمر، از مهم‌ترین ویژگی‌های نت مبتنی بر شرایط است که در صنایع پیشرفته با استفاده از حسگرها و طراحی سامانه‌های هوشمند نگهداری و تعمیرات صورت می‌گیرد و در برخی موارد از آن به‌عنوان نت مجازی[1] نیز نام برده می‌شود. با توجه به تشخیص خرابی‌ها توسط سنسورها یا حسگرها، این اجزاء نقش مهمی در جمع‌آوری داده‌ها (رویدادها) دارند. [٥]. در مطالعاتی که در سال‌های اخیر صورت گرفته است، علاوه بر پیش‌بینی خرابی‌ها، طراحی سیستم‌های تصمیم‌گیری نیز در مدل‌های توسعه‌یافته نت مبتنی بر شرایط مورد توجه بوده است. [٥, ٦]. معمولاً در نت مبتنی بر شرایط، مبنای طراحی سیستم‌های تصمیم‌گیری تحلیل رویدادها هستند و تجزیه و تحلیل مدل‌های جامع تصمیم‌گیری مبتنی بر رویداد، می‌تواند روشی برای پیش‌بینی هزینه‌های ناشی از خرابی‌ها در سیستم‌های چندمرحله‌ای باشد. [۷]. در توسعه CBM، چگونگی انتخاب تصمیمات، سیاست‌ها و اقدامات اصلاحی بهینه که بعد از پیش‌بینی و کشف رویدادها باید به کار گرفته شود و همچنین اقدامات لجستیکی و ارتباط آن با برنامه‌های نگهداری و تعمیرات، حائز اهمیت است[٥] . برای افزایش اثربخشی نت مبتنی بر شرایط، علاوه بر توجه به ویژگی‌های آن باید به

اقدامات لجستیکی و تأمین لوازم و قطعات موردنیاز نیز توجه داشت. به‌گونه‌ای که سفارش آن متناسب با حجم موجودی و در زمان نیاز باشد. برای این منظور تصمیمات باید به‌صورت صحیح و در زمان مناسب اتخاذ شود [۸]. اخیراً استفاده از تکنولوژی‌های مرتبط با سامانه‌های الکترونیکی پردازش داده و مدیریت اطلاعات، مدل‌های تصمیم‌گیری و متدهای پیش‌بینی برای بهینه‌سازی ترکیبی نگهداری و تعمیرات و کنترل موجودی بر اساس فاکتورهایی مانند توزیع زمان عمر مفید بر اساس زمان واقعی دریافت شده از حسگرها و سنسورها گسترش‌یافته است و به‌تبع آن از مفاهیمی مانند "محرک-پاسخ" یا "درک-عکس‌العمل"، استفاده می‌شود [٦]. اگرچه داده‌های زیادی از رویدادهای اتفاق افتاده در دسترس است، اما چگونگی پرداختن به آن‌ها برای تصمیم‌گیری، پیش‌بینی و طراحی‌های بر اساس رویداد (رویداد-محور) که بتواند کارایی و اثربخشی کافی را داشته باشد، کمتر مورد توجه قرارگرفته است. از طرفی ازآنجایی‌که مقوله نگهداری تعمیرات موضوعی فراگیر است، جامعیت و صحت این تصمیمات درگرو توجه به مباحث مرتبط با نت (مانند مدیریت موجودی‌ها و سفارش و خرید قطعات) می‌باشد. ازاین‌رو اقداماتی مانند بهینه‌سازی‌های ترکیبی می‌تواند دستیابی به تصمیمات صحیح را تحقق بخشد.

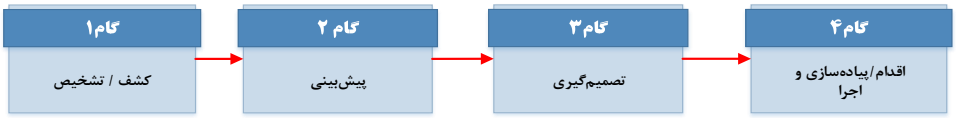
بر این اساس طراحی مدل برای تصمیم‌گیری مبتنی بر رویداد با رویکردی فعالانه و پیش نگر به همراه تعیین اقدامات اصلاحی پیشنهادی در حوزه نگهداری تعمیرات و بهینه‌سازی ترکیبی آن با مقوله مدیریت و کنترل موجودی، مسئله‌ای است که در این پژوهش موردبررسی قرارگرفته است. برای این منظور ابتدا با توجه به ویژگی فرایند تصمیم‌گیری مبتنی بر رویداد در شرایط تصادفی بر اساس جستجوی غیرقطعی، از فرایند تصمیم مارکوف با افق زمانی محدود مبتنی بر استقراء بازگشتی برنامه‌ریزی پویای احتمالی، بهره‌گیری شده است و سیاست و تصمیم بهینه متناسب با هر نقص، تعیین‌شده است. در ادامه برای تعیین کمترین میزان هزینه و زمان مناسب برای خرید قطعات یدکی، با توجه به ویژگی رویدادمحور بودنِ مدلِ تصمیم‌گیری و اهمیتی که برای حسگرها در نت مبتنی بر شرایط ذکر شد، از ابزار شبیه‌سازی شبکه‌های کامپیوتری در محیط اینترنت اشیاء صنعتی استفاده‌شده است. اطلاعات اولیه استفاده‌شده در این پژوهش، "رویدادها/ نقص‌ها" و "سیاست‌های نت" در شبکه انتقال گاز هستند که نتایج پیاده‌سازی برنامه‌های نت و ارزیابی ریسک توسط متخصصان در یک بازه زمانی سه‌ساله در صنعت موردمطالعه است. بهینه‌سازی با بهره‌گیری از ابزار شبکه‌های کامپیوتری و ویژگی‌های مدل تصمیم استفاده‌شده در این پژوهش که علاوه بر پیش‌بینی، عبارت است از ارائه پیشنهاد و توصیه سیاست یا برنامه مناسب نگهداری و تعمیرات، وجوه تمایز پژوهش با سایر موارد مشابه است. چگونگی بهینه‌سازی نت و کنترل موجودی با بهره‌گیری از فناوری اینترنت اشیاء صنعتی و نحوه تحقق رویکرد تصمیم‌گیری پیش نگر در سیستم‌های نت، سؤالات و مسائل اصلی پژوهش هستند. این مطالعه مشتمل بر بخش‌های مقدمه، مبانی

نظری و پیشینه پژوهش، روش‌شناسی و مدل ریاضی، تحلیل یافته‌ها و نتیجه‌گیری است و در پایان پیشنهادات توسعه پژوهش برای مطالعات آتی تنظیم‌شده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱- نگهداری و تعمیرات توسعه‌یافته

امروزه نت مبتنی بر شرایط در حال گسترش بوده و این موضوع با استفاده از فناوری‌های سنجش و نظارت و ابزار جمع‌آوری داده مانند حسگرها و الگوریتم‌های مرتبط، سرعت بیشتری گرفته است. اطلاعات و داده‌ها در مورد پاسخ‌های ساختاریافته و شرایط آسیب در طول عملیات جمع‌آوری‌شده 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 به‌صورت لحظه‌ای مورد ارزیابی قرارداد[۹]. CBM توسعه یافته، مبتنی بر تصمیم‌گیری برای انجام اقدامات و پیاده کردن توصیه‌ها بر اساس کنترل-ها و مانیتورینگ صورت گرفته و برای جلوگیری از وقوع نقص و صرفه‌جویی در هزینه‌ها است. این‌یک استراتژی فعالانه و پیش نگر 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 ۱ گام‌های اجرای نت مبتنی بر شرایط بر اساس اصول تصمیم‌گیری فعالانه و رویدادمحور نشان داده‌شده است [۵].



شکل۱. اصول "نت فعالانه مبتنی بر شرایط" رویدادمحور"[۵].

نت مبتنی بر شرایط یک نوع نگهداری تعمیرات پویا است که در آن شرایط دائماً بررسی و بازرسی‌شده و بر اساس کارکرد اجزاء سیستم در هرلحظه می‌تواند فعال شود. معماری سیستمی باز[1] یکی از استانداردهای طراحی سیستم نت مبتنی بر شرایط است که در هفت لایه قابل‌تقسیم 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 سیستم و اجزا و لایه‌های هشدار و پیش‌بینی خرابی‌ها است. در لایه شش و هفت پشتیبانی تصمیم و ارائه داده‌ها انجام می‌شود. نت مبتنی

بر شرایط مقایسه آنلاین و آفلاین داده‌ها را با اهداف و ارزش‌های مورد انتظار در برگرفته و اگر لازم باشد CBM باید بتواند راهکارهای از پیش تعیین‌شده را بر اساس محدودیت‌های شناسایی‌شده ارائه کند [۳،۹،۱۰]. 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 [۱۱]. در این راهبرد با پیش‌بینی این‌که چه وقت مقدار یک کمیت کنترلی از میزان آستانه و سر حد خود تجاوز خواهد کرد به اقدامات نگهداری لازم پرداخته می‌شود. [۱۲]. این راهبرد نه‌تنها بر کشف و تشخیص خرابی اجزا تمرکز دارد، بلکه همچنین کار پیش‌بینی خرابی و نظارت بر تنزل وضعیت‌ها را انجام می‌دهد. [۱۳]. **نگهداری و تعمیرات فعالانه**. نت فعالانه بجای بررسی فاکتورهای فرسودگی و کاهش کارایی، ارزیابی وسعت شرایط ازکارافتادگی و ازکارافتادگیِ در شرف وقوع را تشخیص و تصحیح علل ریشه‌ای غیرعادی ازکارافتادگی را نیز مورد توجه قرار می‌دهد [۱٤]. در رویکرد فعالانه توصیه‌ها، پیشنهادها و اقدامات اصلاحی پیش نگر، با توجه به رویدادها و نقص‌های احتمالی پیش‌بینی‌شده پیشنهاد می‌شود. رویکرد عملیاتی و فعالانه اشاره دارد به توانایی برای مدیریت یا حذف رویدادها و نقص‌های تصادفی ناخواسته با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی که با استفاده از سنسورها و حسگرها در زمان واقعی انجام می‌شود. تکنولوژی فرایندهای تصمیم‌گیری خودکار یک مفهوم مهم در شبکه پردازش رویدادهای فعال می‌باشد که شامل عناصر پردازش رویداد است و رویدادها نیز مجموعه سیگنال‌های دریافتی از شبکه حسگرها هستند. در نت فعالانه استفاده از مجموعه سنسورها و ایجاد شبکه حسگرها، جایگزین پایش‌های دوره‌ای دستی شده است؛ اگرچه در غالب پژوهش‌های صورت گرفته به هزینه‌های بالای نت فعالانه و CBM توسعه‌یافته اذعان شده است. تجزیه و تحلیل سیگنال‌های دریافتی از سنسورها، درواقع تجزیه و تحلیل رویدادها است که در بستر فناوری اینترنت اشیاء به‌کارگیری و استفاده از آن نیازمند شناخت ویژگی‌های حسگرها در شبکه است.

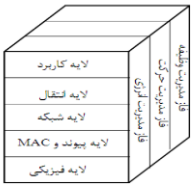
۲-۲- اینترنت اشیاء صنعتی[1]

اینترنت اشیا در بستر شبکهٔ جهانی پویا که دارای قابلیت‌های پیکربندی بر اساس پروتکل‌های ارتباطی استاندارد و کنش پذیر است، شکل می‌گیرد و در آن اشیای فیزیکی و مجازی، دارای هویت، مشخصه فیزیکی و شخصیت مجازی هستند و از واسطه‌های هوشمند استفاده می‌کنند و به‌طور بی‌نقص با شبکهٔ اطلاعات ادغام می‌شوند. در فناوری اینترنت اشیا اطلاعات از طریق حسگرهای متعددی که بر روی اشیا تعبیه‌شده، جمع‌آوری می‌شود و اگر حسگرها یا ارتباطات در یک برنامهٔ کاربردی اینترنت اشیا

خوب عمل نکند، آسیب‌های جانی یا مالی به دنبال خواهد داشت [۱۵]. توانایی شرکت‌ها در تهیه بانک اطلاعاتی و ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرها و سنسورها (که قابلیت نظارت را افزایش داده) و تلفیق آن‌ها و همچنین استفاده از سیستم‌های بی‌سیم و پیش‌بینی زمان واقعی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، سبب ایجاد ارزش‌افزوده می‌شود و ازاین‌رو استفاده از اینترنت اشیاء گسترش‌یافته است. این عامل باعث ایجاد نسل جدیدی از این تکنولوژی با عنوان اینترنت اشیاء صنعتی شده است. در این فناوری هوشمندسازی، تعامل و پیوستگی دستگاه‌ها، تجهیزات و قطعات برای استفاده از تصمیم-گیری‌ها و اقدامات مبتنی بر داده ارزش استراتژیک تجزیه و تحلیل داده‌ها را افزایش می‌دهد[٤]. جنبه حیاتی هر پلتفرم اینترنت اشیا، به‌طورکلی، توانایی آن در مدیریت داده‌های حجیم تولیدشده و فراهم آوردن توانایی ادغام نتایج هر پلتفرم است. در این زمینه، استفاده از پلتفرم کلان‌داده‌ها که می‌توانند داده‌ها را از منابع مختلف تولید داده استخراج و روند ادغام داده‌ها را تسریع بخشند، حیاتی است[١٦] . اینترنت اشیاء صنعتی به طراحی زیرساخت‌های مناسب در محیط صنعت و فضای تولید در بستر فناوری اطلاعات می‌پردازد تا پردازش داده در مقیاس زمان واقعی و ذخیره داده‌های ناهمگن و مختلف از منابع را انجام دهد. حسگرها می‌توانند تغییر حالت‌ها را در قطعات، تجهیزات و فرایند تولید (با توجه به مکان نصب سنسورها) تشخیص دهند. به‌عنوان‌مثال می‌توان به تخریب و خرابی تجهیزات تولیدی اشاره کرد. به‌عبارت‌دیگر رویدادها و اتفاقات ناخواسته در جریان تولید می‌تواند به‌وسیله حسگرها شناسایی و گزارش شود. این رویدادها برای ایجاد اطلاعات مفید پردازش می‌شود [۵،۱۷].

شبکه‌های حسگر. شبکه‌های سنسوری یکی از پرکاربردترین مباحث روز در بحث جمع‌آوری اطلاعات از محیط پیرامون زندگی انسان است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند به‌آسانی در محیط‌های مختلف مستقر شوند و به جمع‌آوری اطلاعات به شیوه‌های مختلف بپردازند و درنتیجه می‌توانند پشتیبانی برنامه‌های کاربردی فراوانی را شامل شوند. شبکه‌های حسگرِ سیستم‌های مبتنی بر رویداد، شامل یک یا چند گره مرکزی هستند که مسئول جمع‌آوری اطلاعات خاص می‌باشند[۱۸] . تحمل‌پذیری خطا، مقیاس‌پذیری، هزینه تولید، محدودیت سخت‌افزاری، توپولوژی شبکه حسگر و مصرف انرژی، عوامل مهم تأثیرگذار در طراحی شبکه هستند. در شکل۲ پشته پروتکلی شبکه‌های حسگر نشان داده‌شده است که ازیک‌طرف دارای پنج لایه شامل لایه‌های فیزیکی، پیوند، کنترل، شبکه و انتقال است و از طرفی دارای سه فاز مدیریت انرژی، مدیریت حرکت و مدیریت وظیفه است. وظیفه لایه فیزیکی عملیات مدولاسیون و ارسال و دریافت در سطح پایین می‌باشد. لایه کنترل باید قادر باشد با گره همسایه ارتباط برقرار کند. لایه شبکه وظیفه مسیریابی را بر عهده دارد. لایه انتقال وظیفهٔ مدیریت جریان انتقال بسته‌ها را در صورت نیاز کاربرد بر عهده دارد. بسته به کاری که شبکه برای آن طراحی شده انواع مختلف

نرم‌افزارهای کاربردی می‌تواند روی لایه کاربرد استفاده شود و خدمات مختلفی را ارائه نماید. فاز مدیریت انرژی با دخالت در کلیه لایه‌ها، چگونگی مصرف انرژی برای گره را تعیین می‌کند. فاز مدیریت وظیفه وظایف گره‌ها را زمان‌بندی کرده و متعادل می‌سازد. باوجود موارد فوق گره‌ها در شبکه حسگر می‌توانند باهم کارکرده و داده‌ها را در یک شبکه حسگر متحرک مسیردهی کنند و منابع را بین گره‌ها به اشتراک‌گذارند. [۱۷, ۱۹, ۲۰].



شکل۲. پشته پروتکل شبکه‌های حسگر[۲۰].

مقوله نگهداری و تعمیرات و بهینه‌سازی ترکیبی آن با سایر مباحث مانند کنترل موجودی در پژوهش‌های مختلف مورد توجه قرارگرفته است. در این میان نگهداری و تعمیرات فعالانه کمتر مورد واکاوی، تحلیل و ارزیابی قرارگرفته است. همچنین ابزارهای متنوعی از سوی محققان مورداستفاده قرارگرفته و دیدگاه-های کمی و کیفی در این پژوهش‌ها لحاظ شده است. بهینه‌سازی سیستم‌های نت و کنترل موجودی در محیط اینترنت اشیاء صنعتی، وجه دیگری از مطالعات مرتبط در این زمینه است که در سال‌های اخیر با گسترش زمینه‌های تحقیقاتی در حوزه فناوری اطلاعات، به آن پرداخته‌شده است. بر این اساس در ادامه به چند نمونه از پژوهش‌های مرتبط قبلی اشاره‌شده 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 جبران‌ناپذیری در برداشته باشد. ارائه مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر زنجیره مارکوف برای انتخاب سیاست بهینه نگهداری تعمیرات و مقایسه ارزش هر یک از اجزاء سیستم با اطلاعات به‌دست‌آمده 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 انجام‌گرفته و با تجزیه‌وتحلیل‌های به‌عمل‌آمده استراتژی بهینه بر اساس شاخص‌های حداکثر قابلیت اطمینان چرخه عمر و ارزیابی هزینه‌های چرخه عمر تعیین‌شده 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. این مطالعه درواقع توسعه پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۸ است که پژوهشگر در آن فعال‌سازی تصمیمات در نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط را بر اساس پردازش‌ها و محاسبات فعالانه رویدادمحور موردبررسی قرار می‌دهد. 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 اطمینان محور موردبحث قرارداده و مدل توسعه‌یافته نگهداری تعمیرات مبتنی بر شرایط را ارائه کرده‌اند. در این مدل تلفیق داده‌ها در سطح سیگنال‌ها و تصمیمات صورت گرفته و انجام نگهداری تعمیرات قابلیت اطمینان محور به‌عنوان اقدامی مقدماتی برای دستیابی به تجزیه‌وتحلیل‌های دقیق و واقعی بر اساس تئوری قابلیت اطمینان، جهت طراحی مدل توسعه‌یافته 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 چندمرحله‌ای صورت گرفته است. بر این اساس، توسعه یک روش سیستماتیک برای پیش‌بینی تأثیرات نامطلوب رویدادهای متوقف کننده خط تولید در سیستم‌های تولیدی چندمرحله‌ای از اهداف این پژوهش است که پژوهشگران آن را 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 محاسبه‌احتمالات مورداستفاده قرارگرفته است. در پژوهش انجام‌شده در سال ۲۰۲۰ توسط ژان و همکاران، مزایا، معایب، توانمندی‌ها، چالش‌ها و تکنولوژی‌های مرتبط با دانش اینترنت اشیاء صنعتی بررسی‌شده است. با استناد به این مطالعه، اینترنت اشیاء صنعتی نسل جدیدی از دانش IOT است که مبتنی بر تجزیه و تحلیل رویدادها و داده‌های به‌دست‌آمده در زمان واقعی از تجهیزات، سیستم‌ها و دستگاه‌ها در محیط صنعت است که هدف اصلی آن افزایش کارایی و اثربخشی عملیات و اقدامات است. در این پژوهش معماری کلی سیستم‌های مبتنی بر IIOT و جدیدترین مفاهیم و تکنولوژی‌های کامپیوتری مرتبط با اینترنت اشیاء صنعتی معرفی‌شده است. مشابه این پژوهش در سال ۲۰۱۹ توسط اصغری و همکاران انجام‌شده است که در این پژوهش کاربردهای اینترنت اشیاء به‌صورت کلی در شش دسته کلی جنبه‌های عمومی، صنعتی، تجاری، شهر هوشمند، محیط‌زیست و بهداشت و درمان معرفی‌شده 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 بررسی‌شده و به مقوله کارخانه‌های هوشمند پرداخته‌شده است. در این پژوهش مواردی مانند ارتباط و وابستگی نت با نقص‌ها، اهمیت مباحث تجاری

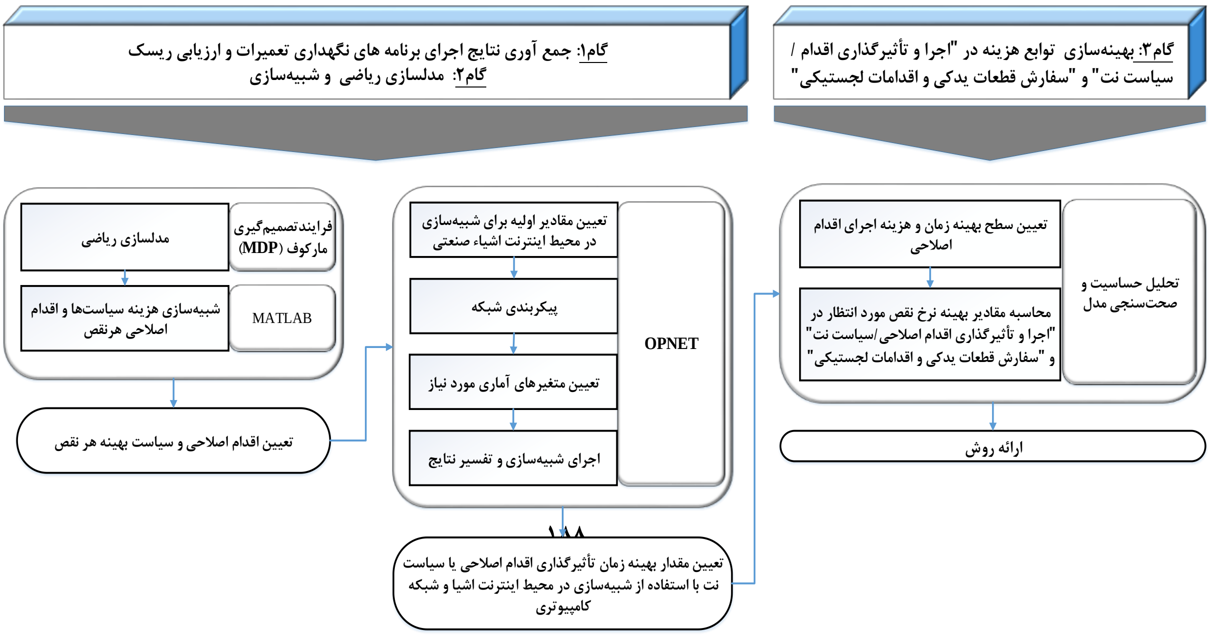
در سرویس‌های نت، نت مبتنی بر زمان، نت مبتنی بر شرایط، مراحل نگهداری تعمیرات پیش‌بینانه، عملیات مرتبط با داده‌کاوی و یادگیری ماشین، تجزیه‌وتحلیل‌های آماری و رگرسیون و آنالیز رویدادها ارائه و ارتباط اینترنت اشیاء با این موضوعات در قالب اینترنت اشیاء صنعتی ذکرشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات و پژوهش‌های زیادی در رابطه با بهینه‌سازی ترکیبی نت و موضوعات مرتبط دیگر مانند کنترل موجودی انجام‌شده است اما پرداختن به سیاست‌ها و رویکردهای نت بخصوص نت فعالانه و تمرکز بر اصل تصمیم‌گیری، ارائه توصیه‌ها و راهکارهای مؤثر بعد از پیش‌بینی خرابی‌ها و ازکارافتادگی‌ها، کمتر مورد توجه قرارگرفته است. این مهم جنبه فعالانه بودن و پیش‌نگری یک سیستم نت را پررنگ نموده و بیانگر اهمیت آن است. این موضوع در این تحقیق با استفاده از مدل‌های تصمیم-گیری آماری و تصادفی مبتنی بر تحلیل رویدادهای گسسته (فرایند تصمیم مارکوف) در محیط اینترنت اشیاء صنعتی مورد توجه قرارگرفته است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش بر اساس هدف یک پژوهش توسعه‌ای و ازنظر ماهیت پژوهشی کمی است که برای بیان رفتار بهینه مقوله‌های موردمطالعه، از ابزار شبیه‌سازی در آن استفاده‌شده است. در گام اول پژوهش داده‌های تاریخی مربوط به پیاده‌سازی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در بازه زمانی سه‌ساله در صنعت موردمطالعه جمع‌آوری‌شده است. این داده‌ها مربوط به ۲۵۰ کیلومتر از خط لوله گاز اهواز به سنندج است که از اجرای برنامه نت و ارزیابی ریسک به‌دست‌آمده است. در این پژوهش داده‌ها و اطلاعات، درواقع اطلاعات مربوط به رویدادها و نقص‌هایی هستند که در جریان فرایند تولید در مطالعه موردی صورت گرفته ثبت می‌شود. اطلاعات مربوط به برنامه‌های نگهداری و تعمیرات، با استفاده از اصول مبتنی بر علم داده و داده‌های مربوط به تحلیل و ارزیابی ریسک، با استفاده از تلفیق منطقی برخی از ویژگی‌ها و ثبت نتایج جدید مبتنی بر دانش ارزیابی ریسک، توسط متخصصان مربوطه ثبت‌شده و برای این پژوهش مورداستفاده قرارگرفته است. در گام بعدی پژوهش، برای هر یک از نقص‌ها و ریسک‌های شناسایی‌شده باید یک سیاست و اقدام بهینه در نظر گرفته شود. به‌عبارت‌دیگر سیاست‌ها و اقدامات مربوط به مدیریت ریسک‌ها و کنترل خطرات و نقایص، باید به‌صورت بهینه به هر یک از ریسک‌های بحرانی شناسایی‌شده تخصیص یابد. برای مدل‌سازی ریاضی مسئله از "فرایند تصمیم مارکوف" استفاده‌شده و پس از مشخص شدن پارامترها، مسئله فرموله شده است. برای این منظور هزینه نقص و هزینه اجرای هر یک از اقدامات اصلاحی در بازه زمانی محدود با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی‌شده و مطلوبیت مورد انتظار برای هریک از نقص‌ها و اقدام اصلاحی مربوطه، به شکلی که

کمترین هزینه را در پی داشته باشد مشخص‌شده است. برای آنالیز هر نقص که درواقع همان ریسک‌های اولویت‌دار هستند، حالت‌های مختلف سیستم در نظر گرفته‌شده است که عبارت‌اند از : ۱. وضعیت سیستم در حالت خطر ۲. وضعیت سیستم در حالتی که یک رویداد تصادفی یا نقص اتفاق بیفتد ۳. وضعیت سیستم در حالت اجرای اقدام ٤. وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام ٥. وضعیت سیستم در حالت اجرای اقدام و وقوع رویداد تصادفی. با توجه به ویژگی رویدادمحور بودن فرایند تصمیم‌گیری و شاخص‌های موردنظر مانند تعیین کمترین میزان هزینه، انتخاب سیاست بهینه و تصمیم‌گیری در شرایط تصادفی بر اساس جستجوی غیرقطعی، از فرایند تصمیم مارکوف با افق زمانی محدود مبتنی بر استقراء بازگشتی در برنامه‌ریزی پویای احتمالی، برا ساس معادله بلمن[1] بهره‌گیری شده است. در ادامه برای تعیین سطح بهینه نرخ هزینه نقص مورد انتظار در سه مقطع زمانی "اجرای اقدام اصلاحی"، "سفارش قطعات یدکی" و "تأثیرگذاری اقدام اصلاحی"، محیط صنعت موردمطالعه، در قالب شبکه‌های کامپیوتری مطابق با مفاهیم اینترنت اشیاء صنعتی شبیه‌سازی‌شده است. به‌عبارت‌دیگر محل جانمایی سنسورها و حسگرها و هریک از تجهیزاتی که در خط لوله گاز در شناسایی و تشخیص نقص‌های بحرانی نقش دارند، در یک شبکه کامپیوتری طراحی و پس از تعیین متغیرها و پارامترهای مربوطه، شبیه‌سازی انجام‌شده است. در فرایند شبیه‌سازی با استفاده از شبکه‌های کامپیوتری، نرخ وقوع رویدادها λ و توزیع آماری ثابت و منطبق بر محاسبات قبلی انجام‌شده در برنامه نت، در نظر گرفته‌شده است. برای شبیه-سازی شبکه، از شبیه‌سازی مبتنی بر رویداد گسسته در محیط نرم‌افزار OPNET استفاده‌شده است و مقادیر اولیه در قالب متغیرهای مربوط به شبکه‌های کامپیوتری تنظیم‌شده است. در این نرم‌افزار نرخ وقوع رویدادها، ترافیک ورودی به هر نود است که در حسگرها برحسب Packets/sec و Bytes/sec و با پارامتر میانگین نرخ ترافیک ورودی محاسبه می‌شود. این آمارها برای ترافیک تولیدشده یا دریافت شده توسط یک گره یا نود محاسبه می‌گردد که بر اساس هر برنامه کاربردی جمع‌آوری می‌شود. در برنامه‌های کاربردی توزیع‌های آماری و پارامترهای مربوطه به شکلی تنظیم‌شده است که با مقادیر شبیه‌سازی که در گام‌های قبلی خارج از محیط شبکه انجام‌شده است، تطابق داشته باشد. برای تعیین نحوه پیکربندی شبکه و تکنولوژی مورداستفاده برای شبیه‌سازی، نقشه‌های مربوط به محیط واقعی مطالعه موردی، تا حد امکان مورداستفاده قرارگرفته و نتایج در تعیین فاصله‌ها (نودها تا سوییچ مرکزی و سرور) و نیز در استفاده از ابزار و سخت‌افزار شبکه، لحاظ شده است. صحت مدل پیکربندی‌شده با استفاده از ابزار موجود در نرم‌افزار تست و نتایج اجرای شبیه‌سازی بر اساس تعداد لاگ‌ها، تعداد رویدادهای ورودی به نرم‌افزار، زمان و سرعت انجام شبیه‌سازی و پارامترهای آماری مشخص‌شده

(مانند میانگین نرخ ترافیک ورودی به هر نود) مورد ارزیابی قرارگرفته است. برای ارزیابی میزان مطلوبیت و کارایی در لایه انتقال داده، متغیرهای Throughput و Utilization که متغیرهای Point to Point مربوط به لینک‌ها در لایه انتقال شبکه هستند بررسی‌شده است. ترافیک بار ورودی به هر یک از نودها، درواقع تعداد رویدادها و نقص‌هایی هستند که شبیه‌سازی‌شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده مدت‌زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت است. این مدت‌زمان برابر است با مقداری که نرخ وقوع نقص یا رویداد در آن ثابت می‌شود. به‌عبارت‌دیگر تجهیز یا دستگاه در این مدت‌زمان پس از انجام اقدامات اصلاحی، به روال عادی برمی‌گردد و از حالت خرابی خارج می‌شود. روند فوق درواقع همان تغییرات نرخ نقص یا شکست در سیستم‌های نت است که با منحنی وانی شکل شناخته می‌شوند [۲۱]. پس از مشخص شدن مدت‌زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت و با تعیین اقدام اصلاحی مربوط به هر ریسک و سطح بهینه هزینه و زمان متناظر با اجرای هر اقدام یا سیاست، در ادامه، با توجه به مقادیر "هزینه " و "زمان" اصلاح‌شده، نرخ هزینه نقص مورد انتظار بر اساس "زمان اجرای اقدام اصلاحی یا سیاست نت"، "زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت" و "زمان سفارش قطعات یدکی و اقدامات لجستیکی"، محاسبه و میزان بهینگی مشخص‌شده است. تحلیل حساسیت مدل و صحت سنجی نتایج بر اساس تغییر در میانگین نرخ وقوع نقص و مقادیر پارامترهای آماری، تعداد رویدادها و زمان انجام شبیه‌سازی صورت گرفته است. در شکل ۳ مراحل انجام پژوهش ارائه‌شده است.



شکل۳. مراحل انجام پژوهش

استفاده از اصول تصمیم‌گیری رویدادمحور و توصیه اقدامات جایگزین بهینه بعد از پیش‌بینی خرابی‌ها و ازکارافتادگی‌ها با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری تصادفی رویدادهای گسسته (فرایند تصمیم‌گیری مارکوف) و شبیه‌سازی مدل مسئله با شبکه‌های کامپیوتری در محیط اینترنت اشیاء صنعتی باهدف تحلیل و پردازش رویدادها، می‌تواند به‌عنوان وجوه تمایز این تحقیق با سایر پژوهش‌های صورت گرفته باشد.

۴- مدل ریاضی مسئله و متغیرهای پژوهش

در بیشتر موارد در نت مبتنی بر شرایط فرض بر این است که سنسورهایی روی سیستم‌ها نصب‌شده است که اطلاعات مربوط به شرایط را گزارش می‌دهند؛ اما همیشه ممکن است این امکان وجود نداشته باشد و شرایط دقیق هر جزء سیستم به‌صورت لحظه‌ای قابل گزارش نباشد و سفارش قطعات، لوازم و تجهیزات موردنیاز مرتبط با شرایط نقص یا ازکارافتادگی و خرابی نیز به‌راحتی امکان‌پذیر نباشد؛ در این حالت مدل تصمیم‌گیری موردنیاز 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. برای این منظور مدل تصمیم‌گیری رویدادمحور بر اساس فرایند تصمیم‌گیری مارکوف برای بهینه‌سازی ترکیبی سفارش قطعات یدکی و هزینه نگهداری تعمیرات ارائه‌شده است [۸].

فرایند تصمیم‌گیری تصادفی در برنامه‌ریزی پویای احتمالی. برنامه‌ریزی پویا تکنیکی عمومی برای استفاده درجایی 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 [۲۲]. برنامه‌ریزی پویا روشی سودمند جهت اتخاذ یک‌رشته تصمیم‌های مرتبط با یکدیگر است. برای فرموله کردن هر مسئله لازم است که رابطه بازگشتی مناسبی مخصوص همان مسئله نوشته شود [۲۳].

مدل تصمیم‌گیری رویدادمحور مبتنی بر فرایند تصمیم مارکوف. فرایند تصمیم 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 است که در این حالت وجود داشته باشد. پس از انجام یک عمل، عامل یک پاداش فوری را دریافت می‌کند و سیستم با توجه به یک احتمال انتقالی به وضعیتی جدید منتقل می‌شود [۲٤] . ماتریسی که احتمال‌های گذار از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهد ماتریس احتمال گذار نام دارد. مجموعه‌ای از حالت‌ها احتمال‌های انتقال، یک زنجیره مارکوف را مشخص

می‌کنند [۲۵]. در این مدل خروجی فرایند مارکوف از جنس یک اقدام نیست بلکه سیاستی است برای بهینه کردن زمان اقدام که به‌وسیله معادلات Bellman فرموله شده است. این سیاست بر اساس حداکثر مطلوبیت مورد انتظار یا حداقل شکست و خرابی مورد انتظار ارزیابی‌شده 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 پیش نگر 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. حالت‌های فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و انتقالات بر اساس مدل‌های محاسباتی پیش نگر فرموله می‌شود و مطلوبیت مورد انتظار هر اقدام با استفاده از الگوریتم بازگشتی استقرایی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالی تخمین زده می‌شود. در فرایند تصمیم‌گیری مارکوف با استفاده از الگوریتم بازگشتی استقرایی در افق زمانی محدود، مطلوبیت مورد انتظار برای هر اقدام را با رابطه زیر می‌توان نشان داد:

$$U^{a_i} = -C_{ue}(P^{\varepsilon}(t_{.}, t_{a_i}) + P^{\varepsilon}(t_{a_i}, \boldsymbol{t_{e_i}}) + (- P^{\varepsilon}(t_{a_i}, \boldsymbol{t_{e_i}}))P^{\varepsilon}_{a_i}(t_{a_i}, \acute{T})) - C_{a_i}(t_{a_i})(۱ - P^{\varepsilon}(t_{.}, t_{a_i}))$$

که در آن $t_{.}$ زمان تشخیص الگو، t_{a_i} زمان انجام اقدام t_{e_i} زمان تأثیرگذاری اقدام i است. $(t_{e_i} = t_{a_i} + \Delta t_{a_i})$.

T پایان زمان تصمیم‌گیری است. بدین معنی که بعدازاین 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 پیش نگر 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 به‌عنوان زمان اجرای اقدام داشته باشد چراکه 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 درگروه توابع نمایی قرار دارد [۵].

مدل تصمیم‌گیری استفاده‌شده تلفیقی است از متد تعیین میزان بهینه نقص مورد انتظار [۱] و فرایند تصمیم مارکوف[۲]. بهینه‌سازی نرخ نقص مورد انتظار مبتنی بر پیش‌بینی رویدادها است. پیش‌بینی رویدادها، شکست مورد انتظار در هر واحد زمانی یا نرخ شکست مورد انتظار از یک اقدام از پیش تعریف‌شده‌ی مشخص در هر واحد زمانی را شامل شده و یک پیش‌بینی برای فاز تصمیم است. الگوریتم مرتبط با این متد، زمان بهینه برای اجرای یک اقدام از پیش تعیین‌شده را تعیین می‌کند. این روش بر اساس آنالیز هزینه بوده و با آنالیز قابلیت اطمینان بر اساس به دست آوردن احتمال شکست، ترکیب‌شده است [۵].

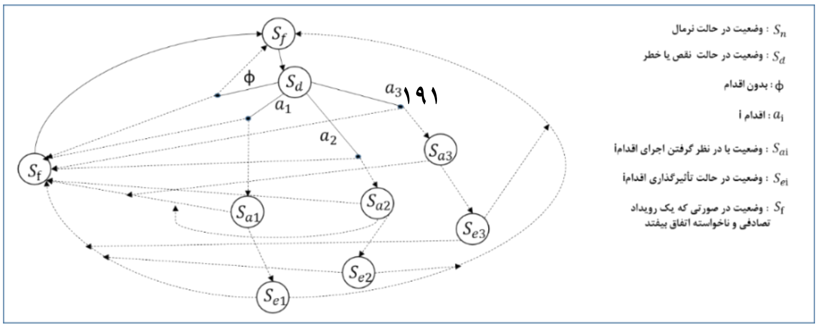
$$ELR = \frac{C_{ue}(t) * G^{\varepsilon}(t)}{t_{ue}} + \frac{C_{pa}(t) * \bar{G}^{\varepsilon}(t)}{t_{pa}}$$

در این معادله $C_{ue}(t)$ تابع هزینه یک رویداد ناخواسته است. $C_{pa}(t)$ تابع هزینه اجرای یک اقدام برنامه‌ریزی‌شده در یک‌زمان از پیش تعریف‌شده است. t_{pa} یک‌زمان از پیش تعریف‌شده است که یک اقدام برنامه‌ریزی‌شده در آن اجرا می‌شود. t_{ue} بیشترین احتمال زمانی تابع توزیع یک رویداد تصادفی و ناخواسته است. (زمانی که توزیع نمایی باشد این مقدار برابر $\frac{۱}{\lambda}$ است.) نرخ شکست، میزان شکست و نقص در یک واحد زمانی است. بنابراین نرخ شکست مورد انتظار مجموع نرخ‌های مورد انتظار توابع توزیع احتمال تجمعی است. در این مورد تابع توزیع وقوع رویداد ناخواسته می‌تواند توزیع تصادفی داشته باشد [٦]. مدل تصمیم‌گیری ترکیبی که با استفاده از نرخ شکست یا نقص مورد انتظار و فرایند تصمیم‌گیری مارکوف فرموله شده، بهینه‌سازی مشترک نقص‌های مورد انتظار و پیشنهاد زمان بهینه برای اجرای مجموعه اقدامات مناسب از پیش تعیین‌شده را به همراه دارد که در بستر نگهداری و تعمیرات و سفارش قطعات یدکی، کنترل موجودی و لجستیک پیاده‌سازی و به‌کارگیری می‌شود. این روش با در نظر گرفتن محاسبات رویدادمحور فعالانه توسعه داده‌شده و بر پایه نظریه قابلیت اطمینان است. بر اساس آنالیزهای صورت گرفته و تجزیه‌وتحلیل‌های انجام‌شده مبتنی بر قابلیت اطمینان، تابع، g_t^{ε} تابع چگالی رویداد ε است که نشان می‌دهد رویداد ε در زمان t رخ خواهد داد. تابع توزیع تجمعی g با $G^{\varepsilon}(t)$ نشان داده‌شده است و تابع توزیع طول عمر ε نامیده می‌شود. $G^{\varepsilon}(t)$ احتمال وقوع ε را بین زمان صفر و زمان t نشان می‌دهد. درحالی‌که $\bar{G}^{\varepsilon}(t) = ۱ - G^{\varepsilon}(t)$ نشان می‌دهد که تابع توزیع احتمال تجمعی یک رویداد تصادفی با چه احتمالی اتفاق نمی‌افتد. هنگامی‌که اقدام a برای کاهش احتمال وقوع رویداد ناخواسته بکار گرفته می‌شود، $g_a^{\varepsilon}(t)$ یک تابع چگالی جدید است که احتمال وقوع ε در زمان t را اگرچه قبل از زمان t بکار گرفته‌شده است، نشان می‌دهد. در واقع در این حالت اجرای اقدام a ممکن است از وقوع ε جلوگیری نکند. در این مدل بر اساس توزیع نمایی نرخ شکست ۱/λ در نظر گرفته می‌شود [٥].

$$P^{\varepsilon}(t_۱, t_۲) = \frac{G^{\varepsilon}(t_۲) - G^{\varepsilon}(t_۱)}{۱ - G^{\varepsilon}(t_۱)}$$

$$P_{a_i}^{\varepsilon}(t_۱, t_۲) = \frac{G_{a_i}^{\varepsilon}(t_۲) - G_{a_i}^{\varepsilon}(t_۱)}{۱ - G^{\varepsilon}(t_۱)}$$

شکل ٤ مدل تصمیم‌گیری مارکوف برای بهینه‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات و سفارش قطعات یدکی را نشان می‌دهد که شامل سه اقدام پیشنهادی جایگزین است.



شکل۴. فرایند تصمیم‌گیری مارکوف با رویکرد فعالانه با سه اقدام پیشنهادی

این مدل با تعریف اقدامات جایگزین بیشتر نیز کاربرد دارد. همه روابط تعریف‌شده در راستای پیش‌بینی نقص و ارائه اقدامات مناسب جایگزین است که در قالب توابع احتمال و توابع انتقال مشخص‌شده است. پارامترها و متغیرهای مربوط به هزینه نگهداری تعمیرات (هزینه نقص، هزینه اقدام اجرایی، هزینه اثربخشی اقدام)، هزینه‌برنامه‌ریزی و کنترل موجودی (هزینه ذخیره‌سازی و هزینه کمبود)، تابع توزیع مرتبط و توابع احتمال، در جدول ۱ با عنوان متغیرهای مدل تصمیم‌گیری ارائه شده است.

جدول۱. معرفی پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی

متغیرهای مدل	تعریف
$\boldsymbol{P^f(t_1,t_2)}$	تابع توزیع احتمال وقوع نقص f در بازه زمانی (t_1,t_2) در شرایطی که تا زمان t_1 نقصی اتفاق نیفتد.
$\boldsymbol{P^f_{a_i}(t_1,t_2)}$	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.
$\boldsymbol{P(S_d,S_f)}$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در حالت خطر و سیستم در حالتی که یک رویداد اتفاق افتاده است
$\boldsymbol{P(S_d,S_{a_i})}$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در حالت خطر و وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i
$\boldsymbol{P(S_{a_i},S_{e_i})}$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i و سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام i
$\boldsymbol{P(S_{e_i},S_f)}$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم در تأثیرگذاری اقدام i و سیستم در حالتی که یک رویداد اتفاق بیفتد
$\boldsymbol{P(S_{a_i},S_f)}$	تابع توزیع احتمال وضعیت سیستم با اجرای اقدام i و وضعیت در حالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق افتاده است
$\boldsymbol{EL^{a_i}(t)}$	تابع نقص مورد انتظار برای انجام نگهداری تعمیرات با اقدام i
$\boldsymbol{EL^{o_i}(t)}$	تابع نقص مورد انتظار برای سفارش قطعات یدکی i
$\boldsymbol{EL^{e_i}(t)}$	تابع نقص مورد انتظار در حالت تأثیرگذاری اقدام i
$\boldsymbol{EL(S_f)}$	تابع نقص مورد انتظار در حالتی که یک رویداد تصادفی اتفاق بیفتد
$\boldsymbol{C_{a_i}(t)}$	تابع هزینه اجرای اقدامi
$\boldsymbol{C_{e_i}(t)}$	تابع هزینه اثر و نتیجه اقدامi
$\boldsymbol{C_s(t)}$	تابع هزینه کمبود موجودی
$\boldsymbol{C_s(t_{a_i})}$	تابع هزینه کمبود موجودی در زمان اجرای اقدام i
$\boldsymbol{C_s(t_{e_i})}$	تابع هزینه کمبود موجودی در زمان تأثیرگذاری اقدام i
$\boldsymbol{C_s(t_d)}$	تابع هزینه کمبود موجودی در زمان وقوع خطر
$\boldsymbol{C_f}$	هزینه نقص
$\boldsymbol{C_{sp}}$	هزینه خرید قطعات یدکی
$\boldsymbol{S_{a_i}}$	وضعیت سیستم با در نظر گرفتن اجرای اقدام i
$\boldsymbol{S_{e_i}}$	وضعیت سیستم در حالت تأثیرگذاری اقدام i
$\boldsymbol{S_d}$	وضعیت سیستم در حالت خطر

S_f	وضعیت سیستم در حالتی 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

بر اساس مدل و متغیرهای معرفی‌شده روابط زیر جهت محاسبه توابع مربوط به‌احتمال وقوع نقص، هزینه انجام نگهداری تعمیرات و هزینه سفارش قطعات یدکی و کنترل موجودی، تعریف‌شده است که برای رسیدن به سیاست و تصمیم بهینه در زمان مناسب و با هزینه مینیمم، استفاده می‌شوند.

رابطه (۱)

$$ELe_i = C_e(t_{e_i}) + P(S_{e_i}, S_f) * EL\,(S_f) = C_e(t_{e_i}) + P(S_{e_i}, S_f) * C_f$$

رابطه (۲)

$$EL^{a_i} = P(S_d, S_{a_i}) * \{C_{a_i}(t_{a_i}) + P(S_{a_i}, S_f) * C_f + P(S_{a_i}, S_f)[C_e(t_{e_i})] + P(S_{e_i}, S_f) * C_f\} + P(S_d, S_f) * C_f$$

رابطه (۳)

$$EL^{a_i}(t) = [1 - P^f(0, t)] * \{C_{a_i} + P^f(t, t + \Delta t) * C_f + [1 - P^f(t, t + \Delta t)] * [C_{e_i}(T - t - \Delta t) + P^f_{a_i}(t + \Delta t, T) * C_f]\} + P^f(0, t) * C_f$$

رابطه (۴)

$$EL^{o_i} = P(S_d, S_{a_i}) * [C_{sp} + P(S_{a_i}, S_f) * C_s(t_{a_i}) + P(S_{a_i}, S_{e_i}) * P(S_{e_i}, S_f) * C_s(t_{e_i})] + P(S_d, S_f) * C_s(t_d)$$

رابطه (۵)

$$EL^{o_i}(t) = [1 - P^f(0, t + L)] * \{C_{sp} + P^f(t + L, t + L + \Delta t) * C_s(T - t - L)[1 - P^f(t + L, t + L + \Delta t)] * P^f_{a_i}(t + L + \Delta t, T) * C_s(T - t - L - \Delta t)\} + P^f(0, t + L) * C_s(T)$$

رابطه (۶)

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

رابطه (۷)

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

رابطه (۸)

$$P(S_d, S_f) = P^f(0, t_{a_i})$$

رابطه (۹)

$$P(S_d, S_{a_i}) = 1 - P^f(0, t_{a_i})$$

رابطه (۱۰)

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

رابطه (۱۱)

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

رابطه (۱۲)

$$P(S_{e_i}, S_f) = P^f_{e_i}(t_{e_i}, T)$$

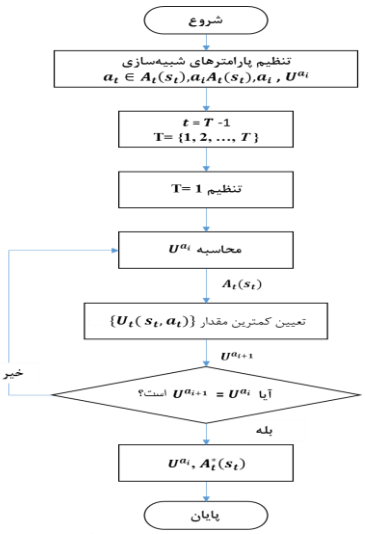
رابطه (۱۳)

$$P^{\cdot}(S_d, S_f) = P^f(0, T)$$

مبتنی بر مدل ریاضی و متغیرهای تعریف‌شده، برای تخصیص سیاست بهینه به هر رویداد یا نقص در زمان مناسب و با کمترین هزینه‌بر اساس الگوریتم و فلوچارت زیر، مدل در نرم‌افزار MATLAB اجرا و شبیه‌سازی‌شده و تصمیم و سیاست بهینه برای هر رویداد یا نقص تعیین‌شده است.

جدول ۲. شبه کد الگوریتم فرایند تصمیم مارکوف بازه زمانی محدود بر اساس استقراء بازگشتی در برنامه‌ریزی پویای احتمالی

Initialize the MDP model components: T= {1, 2, ..., T }, S, $\boldsymbol{A_t(s_t)}$, $\boldsymbol{U^{a_i}}$, $\boldsymbol{C_f}$, $\boldsymbol{P^{\varepsilon}}$.
For $\boldsymbol{s_t} \in \boldsymbol{S}$ do
  $\boldsymbol{Z_t(s_t)}$
End
For $\boldsymbol{t} = \boldsymbol{T}$ -1→ $\boldsymbol{0}$ do
  For $\boldsymbol{a_t} \in \boldsymbol{A_t(s_t)}$ do
    Calculate $\boldsymbol{U^{a_i} = -C_f(P^{\varepsilon}(t_0, t_{a_i}) + P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}) + (1 - P^{\varepsilon}(t_{a_i}, t_{e_i}))P^{\varepsilon}_{a_i}(t_{a_i}, T) - C_{a_i}(t_{a_i})(1 - P^{\varepsilon}(t_0, t_{a_i}))}$
  End
    Calculate $\boldsymbol{Z_t^*(s_t) \leftarrow \min\{U_t(s_t, a_t)\}}$
    Calculate $\boldsymbol{A_t^*(s_t) \leftarrow \operatorname{argmin}\{U_t(s_t, a_t)\}}$
End
Return $\boldsymbol{Z^*, A^*}$



شکل۵. فلوچارت فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

۵- شبیه‌سازی شبکه‌های کامپیوتری

با توجه به ماهیت پدیده‌ها و نوع مسئله، روش‌ها، تکنیک‌ها و ابزار مورداستفاده برای انجام شبیه‌سازی متفاوت خواهند بود. شبیه‌سازی یکی از راه‌های ارزیابی سیستم واقعی باگذشت زمان است که می‌تواند بهترین راهکارها را در راستای تصمیم‌گیری مدیران ارشد جهت اصلاح فرایند انجام کار ارائه نماید. در شبیه‌سازی به‌جای ایجاد فرمولی ثابت برای به دست آوردن راه‌حل نتایج، مسئله چندین بار اجراشده و هر بار نتایج یادداشت می‌شود که درنهایت این دستاوردها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد؛ بنابراین شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات سیستم‌های موجود و نیز به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی عملکرد سیستم جدید در مجموعه‌ای از شرایط مختلف کاربرد دارد [۲۶]. با توجه به ماهیتِ مسئله ریاضی این پژوهش و مدل تصادفی رویدادمحور، از شبیه‌ساز OPNET (پیوست ۱) برای انجام شبیه-سازی رویدادهای گسسته در این پژوهش استفاده‌شده است.

۶- متغیرها و پارامترهای شبیه‌سازی

پروتکل TCP ازجمله مهم‌ترین و پرکاربردترین پروتکل‌های لایه انتقال است و بیشتر کاربردهای اینترنت مبتنی بر این پروتکل هستند. در این پژوهش نیز این پروتکل انتخاب و با توجه به گستردگی کاربرد، تکنولوژی Sm_Int_Model_List مورداستفاده قرارگرفته است. این پروتکل که از نوع اتصال گرا بوده یک مکانیزم مطمئن انتقال بسته‌ها بر روی یک بستر مخابراتی غیرقابل اطمینان فراهم می‌کند. قابلیت اطمینان بالای TCP در تحویل بسته‌ها و استفاده از مکانیزم‌های کنترل جریان از ویژگی‌های اصلی این پروتکل است. در TCP به دلیل استفاده از مکانیزم تصدیق داده‌های دریافتی و مکانیزم ارسال مجدد، انتقال اطلاعات به‌صورت کاملاً اطمینان‌بخش صورت می‌گیرد. همچنین برای امکان دریافت صحیح بسته-ها توسط گیرنده از مکانیزم‌های خاصی جهت انجام عملیات کنترل جریان استفاده می‌شود. کاربرد این امر در مواردی است که به دلیل پر شدن بافر گیرنده و یا کند بودن گیرنده دریافت اطلاعات نسبت به فرستنده، اطلاعات در بافر گیرنده سرریز شده و از بین می‌رود. در این صورت با ارسال مجدد بسته‌ها از سوی فرستنده، هدر رفتن منابع شبکه و همچنین ایجاد تأخیر بیشتر دریافت کامل اطلاعات به وجود می‌آید. در TCP گیرنده میزان توانایی خود دریافت اطلاعات را در قالب پیام‌های تصدیقی که ارسال می کند، به اطلاع فرستنده می‌رساند. در OPNET برای هر گره که ساختار لایه‌ای آن شامل لایه انتقال بوده و به‌نوعی پروتکل TCP را پشتیبانی می‌کند، مجموعه پارامترهایی تعریف می‌شود که برای پیکربندی لایه انتقال آن گره، این پارامترها تنظیم شوند [۲۷،۲۹]. همچنین در تنظیمات صورت گرفته، برای لایه پیوند داده و لایه فیزیکی، پروتکل Ethernet در نظر گرفته‌شده است. آمارهای جمع‌آوری‌شده برای

تحلیل و ارزیابی نتایج، در دودسته "آمار عمومی" و "آمار اختصاصی" قرار گرفته است که عبارت‌اند از: "زمان تأخیر انتها به انتهای تجربه‌شده در کل شبکه"، "نرخ ترافیک تولیدشده یا دریافت توسط یک گره"، "میزان یا بار دریافت پیام‌های تقاضا یا ترافیک در یک گره"، "تعداد بسته‌هایی که در واحد زمان با موفقیت منتقل یا دریافت شده‌اند" و"ظرفیت مسیرها یا لینک‌های انتقال". جدول ۳ پارامترها و مقادیر تنظیم‌شده برای اجرای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول۳. متغیرهای شبیه‌سازی در OPNET

نام متغیر	جزئیات
Network Scale	Office 150*150m^2
Technology	Sm_Int_Model_List
Topology	Star
Duration	2 Hours
Seed	150
Update Interval	2000 Events
Server	Sm_Int_Server
Switch	3C_SSll_1100_3300_4s_ae52_e48_ge3
Router	CS2514_1S_e2_sl2
Application	Sm_Application_Config
Profile	Sm_Profile_Config
Link Model	Ethernet 10 BaseT
Center Node Model	3C_ SSll_1100_3300_4s_ae52_e48_ge3
Periphery Node Model	Sm_Int_wkstn
Protocol	TCP/IP
Packet Formats	Ethernet_v2
Bit Capacity	Infinity
Start Time Offset (sec)	Exponential (0.045), Exponential (0.025)
Inter Repetition Time (sec)	Constant (300)
Global Statistic	Delay
	Load(packets/sec)
	Traffic Received(packets/sec)
	Traffic Receive(bits/sec)
	Throughput(packets/sec)
	Utilization

پس از مشخص شدن سیاست بهینه برای هر رویداد یا نقص (که از طریق فرایند تصمیم مارکوف صورت می‌گیرد)، برای تعیین سطح بهینه نرخ نقص مورد انتظار در "اجرای برنامه‌های نگهداری و تعمیرات" و "سفارش قطعات یدکی و اقدامات لجستیکی"، با توجه به پارامترهای تنظیم‌شده فوق، پیاده‌سازی مدل و اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار OPNET صورت گرفته است. برای تعیین سطح بهینه هزینه نقص مورد انتظار، مقادیر کمینه بار دریافتی در هر گره تعیین‌شده و زمان متناظر (که زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه است)، مشخص می‌شود. با توجه به مقادیر زمانی جدید و با استفاده از توابع

هزینه نقص مورد انتظار و روابط ریاضی که پیش‌تر در مدل ریاضی تعریف شد، مقادیر بهینه محاسبه می‌گردد.

۷- تجزیه و تحلیل یافته‌ها

۱۳ نقص مشخص‌شده، 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 تعیین‌شده برای اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات، به‌صورت از پیش تعیین‌شده و دریافت از متولیان و متخصصان صنعت موردمطالعه است. (پیوست ۲: جدول ٤).

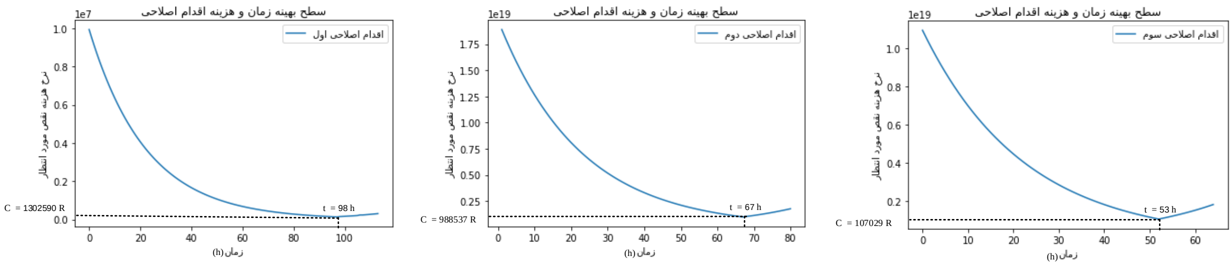
با توجه به‌کلی بودن و قابلیت تعمیم سیاست‌ها به همه نقص‌ها، برای اختصاص هر سیاست نت یا اقدام اصلاحی به هر ریسک یا نقص، از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف که یک مدل ریاضی تصمیم‌گیری تصادفی است، استفاده‌شده است. این مدل قابلیت تعیین سیاست بهینه برای هر نقص را با توجه به حداکثر میزان مطلوبیت در زمان و هزینه بهینه داراست. با توجه به پارامترهای شبیه‌سازی و روابط ریاضی تعریف-شده برای مدل ریاضی و الگوریتم فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در بازه زمانی محدود بر اساس استقراء بازگشتی، این مدل در نرم‌افزار MATLAB کد نویسی و اجراشده است. ماتریس اولیه ورودی منطبق بر جدول ٥ است (پیوست ٣). هزینه‌های مربوط به خرید قطعات یدکی و هزینه‌های کمبود موجودی منطبق بر داده‌های تاریخی موجود و نرخ نقص مورد انتظار در زمان اجرای اقدام، تأثیرگذاری اقدام و سفارش قطعات یدکی (اقدامات لجستیکی)، در جدول ٦ ارائه‌شده است (پیوست٤). همچنین ماتریس احتمال انتقال اولیه در جدول ٧ و در تمامی محاسبات توزیع مبنا، نمایی و نرخ وقوع نقص ۰/۰٤٥ در نظر گرفته‌شده است. (λ=۰/۰٤٥).

جدول ۷ . ماتریس احتمال انتقال اولیه

اقدام/سیاست	P(Sd,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sa,Sf)	P(Sa,Se)	P(Se,Sf)
Pln1	٠.٩٩٩٧٧٦	٠.٠٠٠٢٢٤٢١٤	٠.٢٣٥٢٢٨	٠.٧٦٤٧٧٢	٠.٩٩٩٩٩٨
Pln2	١	٦.٧٢٦٨٨□-٠٩	٠.٣٣١١٩٨	٠.٦٦٨٨٠٢	٠.٩٢٨٤٣
Pln3	٠.٩٩٩٨٤٣	٠.٠٠٠١٥٦٨٠٩	٠.١٢٥٤٨٨	٠.٨٧٤٥١٢	٠.٩٩٩٩٩٧
Pln4	٠.٩٩٩٩٩٩	٨□-٠٧	٠.١٨٢١٩٧	٠.٨١٧٨٠٣	٠.٩٩٩٣٧٣
Pln5	١	٧□-٠٨	٠.٣٧٤٥٦٧	٠.٦٢٥٤٣٣	٠.٩٩٢٦٧٦
Pln6	٠.٩٩٧٨٠٩	٠.٠٠٢١٩١	٠.٢٣٥٢٢٨	٠.٧٦٤٧٧٢	١
Pln7	١	١.٥٣٦٧٧□-٠٧	٠.٣٠٠٦٢٧	٠.٦٩٩٣٧٣	٠.٩٩٦٨٦٧
Pln8	١	١.٧٥٧٢٩□-٠٧	٠.٣٤٥٩٧٩	٠.٦٥٤٠٢١	٠.٩٩٧٢٦
Pln9	٠.٩٩٩٩٨٢	١.٨٣٤٩٦□-٠٥	٠.١٦٣٧١٥	٠.٨٣٦٢٨٥	٠.٩٩٩٩٧٤

اقدام/سیاست	P(Sd,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sa,Sf)	P(Sa,Se)	P(Se,Sf)
Pln10	٠.٩٩٩٩١٦	٨.٣٨٧١١□-٠٥	٠.٢٧٨٣٩٩	٠.٧٢١٦٠١	٠.٩٩٩٩٩٤
Pln11	٠.٩٩٩٩٩٣	٧.١٧٧٧٣□-٠٦	٠.٠٩٧٦٩٤	٠.٩٠٢٣٠٦	٠.٩٩٩٩٣٣
Pln12	٠.٩٩٩٩٦٩	٣.١٣٧٣٥□-٠٥	٠.٠٨٥٥١٤	٠.٩١٤٤٨٦	٠.٩٩٩٩٨٥
Pln13	١	٣.٦٧٦٥٩□-٠٨	٠.٠٦٤٨٤٦	٠.٩٣٥١٥٤	٠.٩٨٦٩٠٥

در شکل۷ برای رعایت اختصار و به‌عنوان نمونه، نمودار ۳ اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه ارائه‌شده است که مبتنی بر آن برای هر نقص، اقدام اصلاحی یا سیاست نت بر اساس زمان و کمترین میزان هزینه نقص، انتخاب‌شده است. با توجه به اینکه هر چه ریسک هزینه کمتری داشته باشد اقدام اصلاحی نیز کم‌هزینه‌تر خواهد بود، زمان اجرای یک سیاست نت زمانی است که ریسک یا نقص موردنظر کمترین میزان هزینه را به همراه داشته باشد. جدول ۸ زمان اجرا و عنوان سیاست بهینه یا اقدام موردنظر برای هر نقص را به همراه هزینه کمینه نقص نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودارهای اقدام اصلاحی یا سیاست بهینه مرتبط با Pln۱،Pln۲، Pln۳

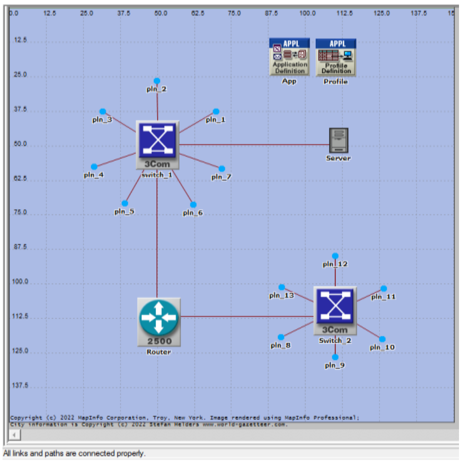
جدول ۸. نتایج شبیه‌سازی فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

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	۰۰۱.۳۰۲۵۹
ناکارآمدی تجهیزات کنترل فشار و نرخ جریان	ایجاد مرکز پایش خطرات و کنترل بحران	٦٧	۰۰۹.۸۸۵۳۷
انتشار گازهای آلاینده و مواد سمی شیمیایی(مرکاپتان، روغن، گریس، دوده و مواد سمی	آموزش کارگران و پیمانکاران در راستای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و خطرات و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی	۵۳	۱.۰۷۰۲۹۰۰
عدم آموزش مناسب و توجیه نبودن پیمانکاران نسبت به موقعیت محیطی خط لوله	بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت	٤٦	۰۰۱.۲۲۳۲۹

عنوان نقص	اقدام اصلاحی/ سیاست بهینه	زمان اجرا (ساعت)	هزینه(ریال)
نشت میعانات گازی	ارزیابی ریسک دوره‌ای و به‌روزرسانی، بازنگری و بهبود دستورالعمل‌ها، روش‌های اجرایی و سایر مستندات	۵۷	٦.۳۰۰۳۲۰۰
آسیب مکانیکی (برخورد ماشین‌آلات مانند اسکریپر، پیکور، بلدوزر و ...) با خط لوله	نصب علائم، نشانگرها و تابلوهای ایمنی	٦۳	۰۰٤.٥۳۸٤٥
عدم وجود فشارسنج حساس در طول خط لوله	بازطراحی و ایمن‌سازی اتصالات و تجهیزات	۵۱	۷.۰۲۰۹۵۰۰
نقص در حفاری‌های ضروری	اخذ مجوزهای کاری یا گواهی‌نامه‌های فنی	۸۲	۲.٦٦۰۲۷۰۰
استفاده از مواد اولیه بی‌کیفیت در تجهیزات و قطعات	بازبینی و به‌روزرسانی تولیدکنندگان و عرضه‌کنندگان قطعات و لوازم‌یدکی	۵٤	۱.۱٤۲٤۷۰۰
انبارش و نگهداری بیش‌ازحد موردنیاز تجهیزات و مواد اولیه قابل اشتعال و کپسول گازهای قابل‌انفجار و جابجایی و انتقال ناایمن	بازطراحی سیستم برنامه‌ریزی و کنترل موجودی قطعات و لوازم‌یدکی	۷۲	۸.۰۸۷٤۷۰۰
کیفیت پایین و نقص شیرهای اتوماتیک قطع جریان	بازطراحی سیستم هزینه‌یابی و محاسبه قیمت تمام‌شده امور نت	٦۵	۰۰٦.۹۸۲٤۲
نقص در عایق‌کاری شبکه انتقال	تغییر در روش‌های تجزیه و تحلیل و دوره‌های زمانی آنالیز اطلاعات نت	۷۲	۵.٤۲۹۷۱۰۰
خوردگی لوله	بازرسی‌های دوره‌ای و انجام تست‌های کنترلی	۷۷	٤.۹۳۹٤۳۰۰

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 عبارت است از "آموزش کارگران و پیمانکاران در راستای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و خطرات و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی" که در زمان $t = 53\ h$ انجام می‌شود. همچنین اقدام اصلاحی/ سیاست بهینه "بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت" به‌عنوان 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 $t = 67\ h$ در نظر گرفته‌شده 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 $t = 98\ h$ ساعت است.
نکته مهم در اجرای اقدامات اصلاحی و اتخاذ سیاست‌ها، بازه زمانی بعد از اجرای اقدام اصلاحی یا

سیاست نت است که شامل تأخیر دریافت سفارشات نیز می‌شود و اگر زمان اجرای اقدام به آن اضافه شود، برابر زمان تأثیرگذاری اقدام مربوطه است. برای تعیین "کمترین نرخ نقص مورد انتظار در اجرای اقدامات اصلاحی و پیاده‌سازی برنامه‌های نت" و "کمترین نرخ نقص مورد انتظار در سفارش قطعات یدکی و اقدامات لجستیکی"، تعیین زمان تأثیرگذاری اقدام از اهمیت بالایی برخوردار است. برای به دست آوردن این متغیر، مسئله در محیط اینترنت اشیاء صنعتی با استفاده از شبکه‌های کامپیوتری شبیه‌سازی‌شده است. مبتنی بر ارزیابی ریسک اولیه صورت گرفته، برای هر یک از ناحیه‌هایی[1] که احتمال وقوع خطر و میزان ریسک بالا در آن وجود دارد، حسگرها و سنسورهایی در محیط شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده است. با استفاده از پارامترهای موردنظر برای شبیه‌سازی در شبکه، بر اساس نرخ وقوع نقص و توزیع آماری مشخص (نمایی)، شبیه‌سازی انجام‌شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار OPNET Modeler ۱۴،۵ صورت گرفته و برای اجرای آن از تکنولوژیSm_Int_Model_List استفاده‌شده است. پروتکل لایه انتقال TCP و در لایه فیزیکی پیوند داده Ethernet در نظر گرفته‌شده است. همچنین مدت شبیه‌سازی ۲ ساعت و تعداد رویدادها در هر به‌روزرسانی ۲۰۰۰ رویداد لحاظ شده است. شکل ۸ پیکربندی شبکه را در سطح ویرایشگر شبکه[2] نشان می‌دهد. شبکه موردنظر متشکل از ۱۳ نود است که با استفاده از توپولوژی Star در دو ناحیه از فضای موردنظر برای شبیه‌سازی تشکیل‌شده است. نود مرکزی در هر دو ناحیه ۳c_SSII_۱۱۰۰_۳۳۰۰_٤s_ae٥۲_e٤۸_ge۳ است و نودهای هفت‌گانه و شش‌گانه با استفاده از روتر CS2514_1S_e2_sl2 از طریق سوییچ‌ها ارتباط یافته و به Server متصل هستند. در تنظیمات مربوط به برنامه‌های کاربردی نرخ وقوع نقص (رویداد) و پارامترهای آماری مانند نوع توزیع آماری، نرخ وقوع در زمان شروع انتقال داده[3]، زمان بین هر تکرار[4] و ظرفیت ارسال و دریافت داده برحسب[5] bit تنظیم‌شده است.



شکل۸. توپولوژی شبکه در سطح ویرایشگر شبکه

در این شبکه منظور از pln۱ تا pln۱۳ حسگرهایی هستند که با توجه به هر یک از نواحی وقوع نقص‌های بحرانی برای دریافت بار ترافیک شبکه (رویدادها) جانمایی شده‌اند. در ویرایشگر نود[1]، ساختار لایه‌ای تک‌تک عناصر شبکه و نحوه ارتباط لایه‌ها با یکدیگر تعیین و تعریف می‌شود. در این سطح، جریان داخلی بسته‌ها درون یک عنصر شبکه مورد توجه است. به‌طورکلی هر عنصر شبکه که دارای تمامی یا برخی از قابلیت‌های ایجاد بسته‌های اطلاعاتی، ذخیره آن‌ها، ارسال و دریافت آن‌ها و درنهایت مسیریابی داخلی و انجام پردازش‌های لازم نظیر آنالیز محتویات بسته‌ها، کشف و تصحیح خطاهای احتمالی بسته باشد، به‌عنوان یک گره شناخته می‌شود.

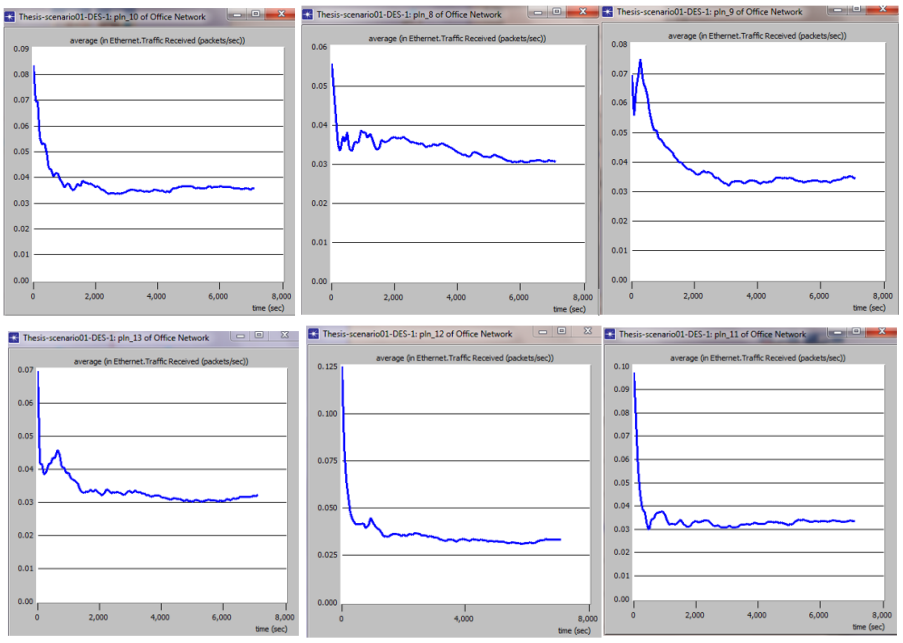
در لایه‌های بعدی ساختار سلسله‌مراتبی شبکه کامپیوتری در OPNET و در لایه ویرایشگر Process، شبیه‌سازی ماژول‌ها بر مبنای دیاگرام‌های تغییر وضعیت(STD) صورت گرفته است. STD از تعدادی حالات تشکیل‌شده است که هر حالت با یک دایره مشخص می‌شود و با رخداد شرایطی خاص، گذار از حالتی به حالت دیگر صورت می‌گیرد. عملکرد هر حالت توسط زبان Porto-c بیان می‌شود. این زبان برنامه‌نویسی برمبنای زبان C استوار بوده و توابع خاص که به آن‌ها Kernel Procedures گفته می‌شود و برای شبیه‌سازی الگوریتم‌ها و پروتکل‌ها طراحی‌شده است، به آن افزوده می‌شود. در این پژوهش برای رعایت اختصار، از ارائه دیاگرام گره‌ها در سطح ویرایشگر Node و Process خودداری و به ارائه مدل در سطح شبکه اکتفا شده است.

برای شبیه‌سازی مدل طراحی‌شده، ۲ سناریو موردنظر قرارگرفته و شبیه‌سازی انجام‌شده است. برای تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی، در سناریوی اول نرخ وقوع رویداد $\lambda = ۰/۰۴۵$ و در سناریوی دوم این مقدار برابر ۰/۰۲۵ لحاظ شده است. جدول ۹ اطلاعات کلی شبیه‌سازی دو سناریو به‌صورت همزمان را نشان می‌دهد که شامل سرعت پردازش رویدادها، مدت‌زمان اجرای شبیه‌سازی، حافظه استفاده‌شده برای پردازش، تعداد لاگ‌های ثبت‌شده و تعداد رویدادهای (نقص‌ها) پردازش‌شده است.

جدول ۹ . اطلاعات کلی شبیه‌سازی سناریوی ۱و۲

سناریو	نرخ وقوع رویداد	زمان اجرا در نرم‌افزار	تعداد رویدادهای پردازش‌شده	مدت‌زمان پردازش	تعداد لاگ‌ها	میانگین سرعت شبیه‌سازی برحسب رویداد بر ثانیه
۱	۰/۰۴۵	۳ ثانیه	۴۷۴۰۷۲	۲ ساعت	۵	۱۸۱/۹۸۵
۲	۰/۰۲۵	۲ ثانیه	۴۶۵۱۸۰	۲ ساعت	۵	۲۴۴/۴۴۵

حافظه استفاده‌شده برای انجام شبیه‌سازی برحسب زمان انجام شبیه‌سازی، زمان واقعی انجام شبیه-سازی و تعداد رویدادهای پردازش‌شده، به ترتیب از ثانیه ۲۰۰، ثانیه ۱ و تعداد ۲۰۰۰۰ به بعد دارای مقدار ثابت حدود ۳۰ MB است. در اجرای شبیه‌سازی سناریوی ۱ با نرخ وقوع ۰/۰٤٥ مقادیر و آمارهایی که برای تحلیل و ارزیابی نتایج جمع‌آوری‌شده، در دودسته "آمار عمومی" و "آمار اختصاصی" عبارت‌اند از: "زمان تأخیر انتها به انتهای تجربه‌شده در کل شبکه" به‌عنوان آمار عمومی، و "نرخ ترافیک تولیدشده یا دریافت توسط یک گره"، "میزان یا بار دریافت پیام‌های تقاضا یا ترافیک در یک گره"، "تعداد بسته‌هایی که در واحد زمان با موفقیت منتقل یا دریافت شده‌اند" و "ظرفیت مسیرها یا لینک‌های انتقال"، به‌عنوان آمار اختصاصی. برای رعایت اختصار گراف مربوط به میانگین ترافیک دریافت شده در گره‌های سوییچ۲ که نود ۸ تا ۱۳ را شامل می‌شود، در شکل ۹ نشان داده‌شده است. نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده مدت‌زمان تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت است. این مدت‌زمان برابر است با مقداری که نرخ وقوع نقص یا رویداد در آن ثابت می‌شود. به‌عبارت‌دیگر تجهیز یا دستگاه در این مدت‌زمان پس از انجام اقدامات اصلاحی، به روال عادی برمی‌گردد و از حالت خرابی خارج می‌شود. روند فوق درواقع همان تغییرات نرخ نقص یا شکست در سیستم‌های نت است که با منحنی وانی شکل شناخته می‌شوند [۲]. زمان شروع پردازش رویدادها یا نقص‌ها تا زمان ثابت شدن نرخ ترافیک دریافتی در هر گراف، (بر اساس منحنی وانی شکل نت) مدت‌زمانی است که نرخ شکست یا نرخ وقوع رویداد (نقص) به حداقل رسیده و مرحله رفع نقص و تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا سیاست نت است و نرخ وقوع نقص و میزان شکست در این مرحله ثابت است و دوره‌ی عملکرد تجهیزات و دستگاه‌ها به‌صورت نرمال است. زمان و مقادیر دقیق بار و ترافیک دریافت شده در هر نود برحسب packets/sec مطابق جدول ۱۰ است.



شکل۹. گراف شبیه‌سازی میانگین ترافیک دریافت شده در گره‌های سوییچ ۲

جدول۱۰. زمان بهینه و نرخ ترافیک در هر گره

نماد	عنوان سیاست/ اقدام نت	زمان	نرخ ترافیک دریافت شده
Pln1	اخذ مجوزهای کاری یا گواهی‌نامه‌های فنی	٦٦٢٠	٠,٠٤٦٨٨
Pln2	ایجاد مرکز پایش خطرات و کنترل بحران	٦٦٩٠	٠,٠٤٤٩٩٤
Pln3	آموزش کارگران و پیمانکاران در راستای شناسایی و پیشگیری از ریسک‌ها و خطرات و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی	٤٦٨٠	٠,٠٤٤٧٢٢
Pln4	بازرسی‌های دوره‌ای و انجام تست‌های کنترلی فنی مهندسی	٥٩٧٠	٠,٠٤٢٠٧٧
Pln5	ارزیابی ریسک دوره‌ای و به‌روزرسانی، بازنگری و بهبود دستورالعمل‌ها، روش‌های اجرایی و سایر مستندات	٥٠٤٠	٠,٠٤٧٥٥٩
Pln6	نصب علائم، نشانگرها و تابلوهای ایمنی	٥٤٠٠	٠,٠٤٤٧٢٢
Pln7	بازطراحی و ایمن‌سازی لوله‌ها، اتصالات و تجهیزات	٦١٢٠	٠,٠٤٣١٠٧
Pln8	استفاده از سامانه‌ها و نصب حسگرهای هشداردهنده در همه	٦٢٦٠	٠,٠٤٢٤٦١
Pln9	بازطراحی سیستم برنامه‌ریزی و کنترل موجودی قطعات و	٥٤٧٠	٠,٠٤٣٠٠٩
Pln10	بازنگری ضوابط و الزامات برون‌سپاری امور نت	٥٤٠٠	٠,٠٤٥٨١٩
Pln11	بازبینی و به‌روزرسانی تولیدکنندگان و عرضه‌کنندگان قطعات و	٥٧٦٠	٠,٠٤٣٠٩٣
Pln12	تغییر در روش‌های تجزیه و تحلیل و دوره‌های زمانی آنالیز	٥٩٠٠	٠,٠٤١١٢٤
Pln13	بازطراحی سیستم هزینه‌یابی و محاسبه قیمت تمام‌شده امور نت	٤٦٨٠	٠,٠٤٠٥١٣

زمان مشخص‌شده در جدول فوق، بازه زمانی بعد از اجرای اقدام اصلاحی یا سیاست نت است که شامل تأخیر دریافت سفارشات نیز می‌شود و اگر زمان اجرای اقدام نیز به آن اضافه شود، برابر زمان تأثیرگذاری اقدام مربوطه است. بر این اساس با تعیین زمان تأثیرگذاری و با فرض ثابت بودن هزینه‌های خرید قطعات یدکی، کمبود موجودی و اجرای اقدام، با در نظر گرفتن هزینه نقص بهینه و زمان بهینه اجرای اقدام حاصل از شبیه‌سازی فرایند تصمیم مارکوف، مقادیر جدید مطابق جدول ۱۱ است.

جدول ۱۱. زمان‌های جدید بر اساس نتایج شبیه‌سازی

عنوان	L(h)	T(h)	λ	ta(h)	Δt(h)	te(h)
Pln1	4	480	0.045	98.0	1.8	103.8
Pln2	6	480	0.045	67.0	1.9	74.9
Pln3	2	480	0.045	53.0	1.3	56.3
Pln4	3	480	0.045	46.0	1.7	50.7
Pln5	8	480	0.045	57.0	1.4	66.4
Pln6	5	480	0.045	63.0	1.5	69.5
Pln7	5	480	0.045	51.0	1.7	57.7
Pln8	7	480	0.045	82.0	1.7	90.7

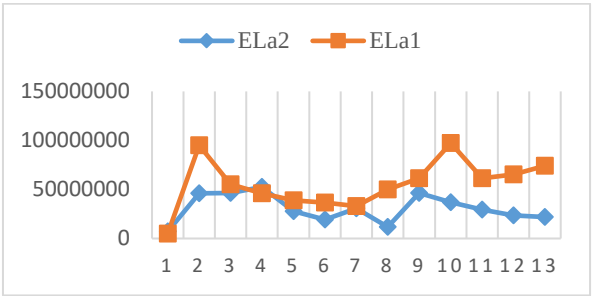
te(h)	Δt(h)	ta(h)	λ	T(h)	L(h)	عنوان
58.5	1.5	54.0	0.045	480	3	Pln9
79.5	1.5	72.0	0.045	480	6	Pln10
68.6	1.6	65.0	0.045	480	2	Pln11
78.6	1.6	72.0	0.045	480	5	Pln12
82.3	1.3	77.0	0.045	480	4	Pln13

با توجه به زمان‌های جدید، مقادیر احتمالات در هر حالت محاسبه‌شده است که نتایج در جدول ۱۲ ارائه‌شده است. همچنین بر اساس احتمالات محاسبه‌شده، مقادیر بهینه "نرخ نقص مورد انتظار برای اجرای اقدام اصلاحی یا سیاست نت"، "نرخ نقص مورد انتظار در هنگام تأثیرگذاری اقدام" و "نرخ نقص مورد انتظار در انجام اقدامات لجستیکی و سفارش قطعات یدکی" بر اساس هزینه در این جدول قابل‌مشاهده است.

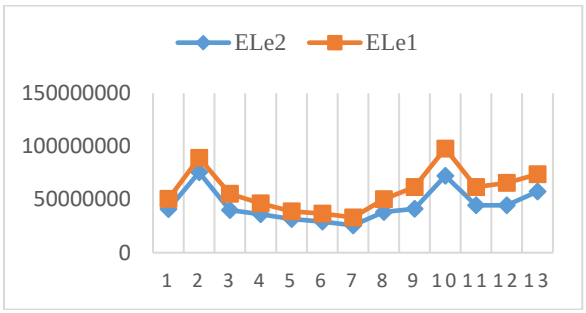
جدول۱۲. مقادیر احتمالات در هر یک از حالات سیستم و نرخ نقص بر اساس هزینه (ریال)

ELo	ELe	ELa	P(Se,Sf)	P(Sa,Se)	P(Sa,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sd,Sf)	عنوان
٦٦٢٨٤٦٠١.٣	٤٠٨٥٣٧٩٩.٩	٧١٣١٠٥٤.٩٧	١	٠.٧٧١٦٣٩	٠.٢٢٨٣٦١	٠.٠١٢٥٢٢٣٤٩	٠.٩٨٧٤٧٨	Pln1
١٧٢٤٣٢١٥٢	٧٥٥٤٥٠٩٧	٤٥٩٧١٦٧٣.٥	١	٠.٧٠٢٥٠٦	٠.٢٩٧٤٩٤	٠.٠٥٠٠٥٣٩٣٨	٠.٩٤٩٩٤٦	Pln2
٦٩٤٩٢٥٨٣.٤	٤٠١١٠٤٢٩	٤٦٢٤٩٣٥٠.٧	١	٠.٨٦٢٨٦٤	٠.١٣٧١٣٦	٠.٠٩٣٥٨٣٠٩٩	٠.٩٠٦٤١٧	Pln3
٦٢٢٢٢٢٩٣.٦	٣٦٠٠٧٦٦٩	٥٢٥٣٤٣٦٠.١	١	٠.٨١٠٥٢٥	٠.١٨٩٤٧٥	٠.١٢٧٩٦٠٨١٨	٠.٨٧٢٠٣٩	Pln4
٤٧٨٢٢٤٥٦.٦	٣١٦٣٦٦١٢	٢٧٧٤٠٦٠٧.١	١	٠.٦٥٦٩٥١	٠.٣٤٣٠٤٩	٠.٠٧٨٢٦٢١٨١	٠.٩٢١٧٣٨	Pln5
٤٧٢٤٦٣٥٠.١	٢٩١٢٣١٦٥	١٩٤٢٦٣٦٨.١	١	٠.٧٤٧٨٧	٠.٢٥٢١٣	٠.٠٥٩٨٥٢٦٩٨	٠.٩٤٠١٤٧	Pln6
٤١٥٦١٤٨٤.٤	٢٥٧٠٥٩٧٥	٣٠٨٥٤٢٣١	١	٠.٧٤١٢١٤	٠.٢٥٨٧٨٦	٠.١٠٢٣٣٤٠٥	٠.٨٩٧٦٦٦	Pln7
٦٧٠٠١٩١٣.١	٣٨٣٤١٣٦٧	١١٧٤٧٤٥٨.٣	١	٠.٦٧٧٨٣	٠.٣٢٢١٧	٠.٠٢٥٦٠١٦٣٦	٠.٩٧٤٣٩٨	Pln8
٧٥٦٥٥٢٣٥.١	٤١١٩٠٧٨٧	٤٦٣٠٧٣٥٦.٢	١	٠.٨١٧٨٠٣	٠.١٨٢١٩٧	٠.٠٨٩٤٩٢٣٧٩	٠.٩١٠٥٠٨	Pln9
١٦١٣٤٢٠٨٢	٧٢٢٦٧٩٧٧	٣٦٩٨٦٤٦٧.١	١	٠.٧١٥١٧٩	٠.٢٨٤٨٢١	٠.٠٤٠٠٢٩٦١٤	٠.٩٥٩٩٧	Pln10
٧٢٣٣٢٣٣٧.٢	٤٤٧٠٠٥٥٢	٢٩٤٦٣٩٤٨	١	٠.٨٥١٣٧١	٠.١٤٨٦٢٩	٠.٠٥٤٧٣٤٤٧٩	٠.٩٤٥٢٦٦	Pln11
٨٣٤٣٨١٤٢.٤	٤٤٥٨٠٤٩١	٢٣٤٠٠٢٧٦.١	١	٠.٧٤٤٥٣٥	٠.٢٥٥٤٦٥	٠.٠٤٠٠٢٩٦١٤	٠.٩٥٩٩٧	Pln12
٩١٢٥٣١٢٧.٨	٥٧٦١٦٧٩٣	٢١٨٠٣٠٤٨	١	٠.٧٨٩٠٧٨	٠.٢١٠٩٢٢	٠.٠٣٢٠١٢٨٦٦	٠.٩٦٧٩٨٧	Pln13

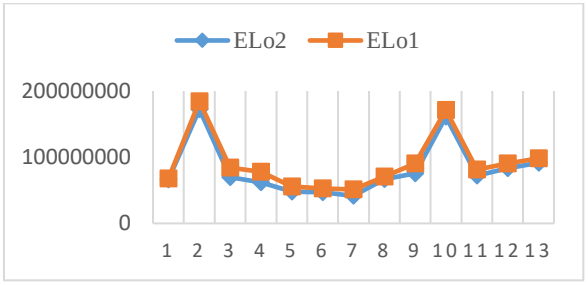
نمودار ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ مقایسه بین مقادیر اولیه قبل از انجام اقدامات اصلاحی و سیاست‌های نت (Ela۱) و بعد از اجرای آن(Ela۲) را بر حسب هزینه نشان می‌دهد.



شکل۱۰. گراف مقایسه نرخ نقص مورد انتظار در"اجرای سیاست‌های نت و اقدامات اصلاحی" قبل و بعد از بهینه‌سازی بر اساس هزینه

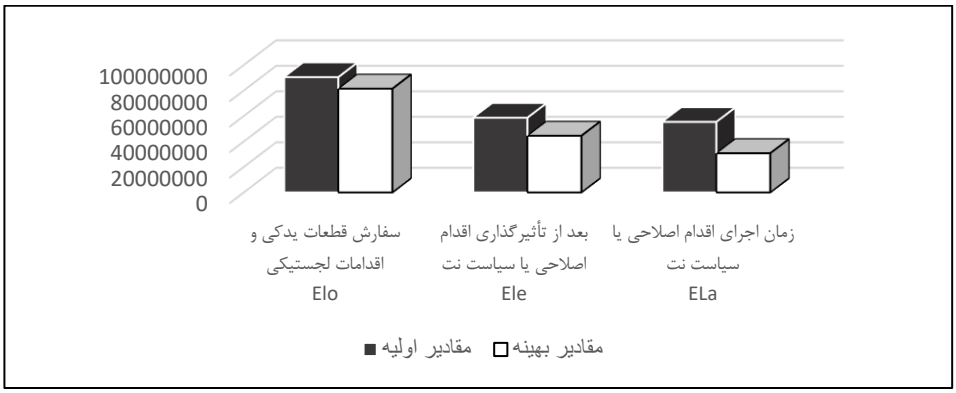


شکل۱۱. گراف مقایسه نرخ نقص مورد انتظار در "تأثیرگذاری سیاست‌های نت و اقدامات اصلاحی " قبل و بعد از بهینه‌سازی بر اساس هزینه



شکل۱۲. گراف مقایسه نرخ نقص مورد انتظار در "سفارش قطعات یدکی و اقدامات لجستیکی" قبل و بعد از بهینه‌سازی بر اساس هزینه

در شکل ۱۳ میانگین مقادیر اولیه و مقادیر بهینه در سه تابع نقص مورد انتظار نمایش داده‌شده است. جدول ۱۳ نیز میزان بهینگی برحسب درصد در سه تابع را نشان می‌دهد.

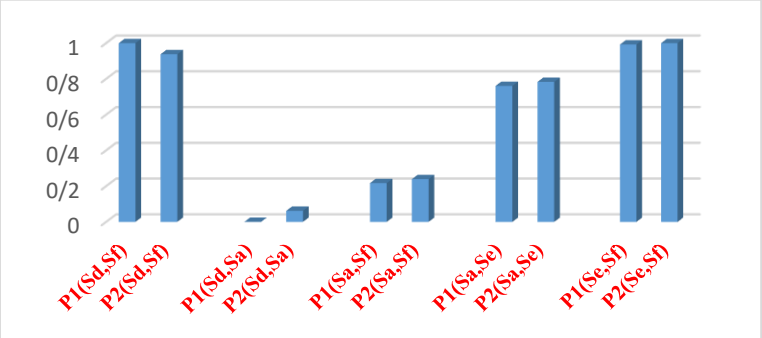


شکل۱۳. مقایسه نرخ نقص بر اساس هزینه، قبل و بعد از بهینه‌سازی

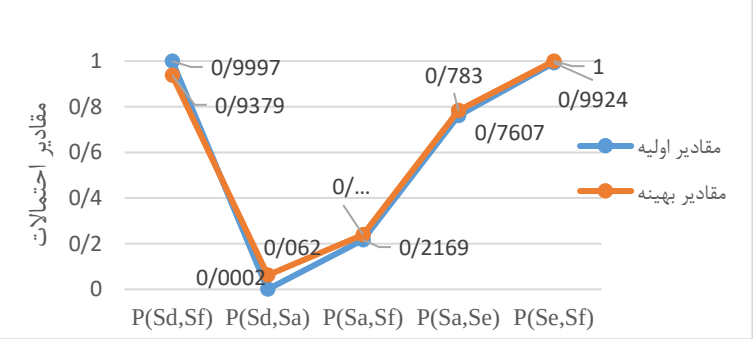
جدول۱۳. میزان بهبود در سه تابع

سفارش قطعات یدکی و اقدامات	تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا	زمان اجرای اقدام اصلاحی یا
%۱۰	% ۲٤	% ٤٤/٤۳

مقادیر احتمالات در هر یک از حالات سیستم، قبل و بعد از بهینه‌سازی بررسی‌شده است که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در وضعیتی که " سیستم در حالت خطر باشد و یک رویداد تصادفی اتفاق بیفتد"، " سیستم در حالت خطر باشد و اقدام اصلاحی یا سیاست نت انجام شود"، "سیستم در وضعیتی که نقص اتفاق بیفتد و اقدام اصلاحی انجام شود، " سیستم در وضعیتی که اقدام اصلاحی انجام‌شده تأثیرگذاری داشته باشد" و " سیستم در حالتی که مجدداً نقص اتفاق بیفتد و سیاست نت یا اقدام اصلاحی تأثیرگذار باشد " به ترتیب مقادیر احتمالات قبل و بعد از بهینه‌سازی عبارت است از:"۰/۹۹ و ۰/۹۳"، "۰/۰۰۰۲ و ۰/۰٦۲۰"، "۰/۰۲۱٦ و۰/۰۲۳۰"، "۰/۷٦و ۰/۷۸"و"۰/۹۹ و ۱". در نمودار ۱٤ میانگین مقادیر در هریک از حالات قبل و بعد از بهینه‌سازی و در نمودار ۱۵ روند تغییر احتمالات نشان داده‌شده است.

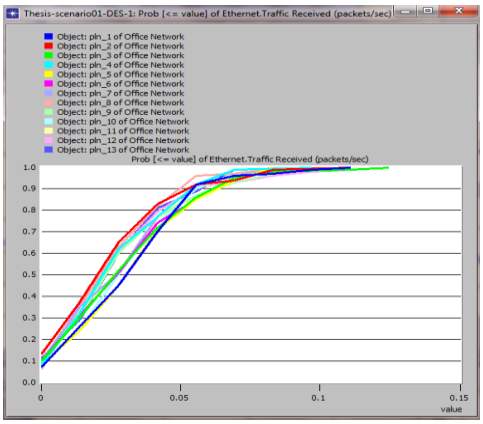


شکل۱۴. نمودار میانگین مقادیر اولیه و بهینه احتمالات انتقال وضعیت سیستم



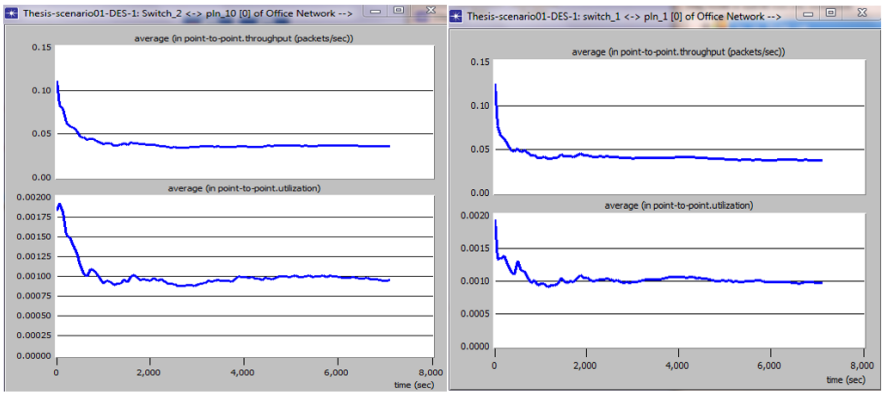
شکل۱۵. روند بهینه‌سازی احتمالات در هر یک از وضعیت‌ها

با توجه به حالت‌هایی که برای سیستم تعریف‌شده است، مقادیر و روند تغییر احتمالات باید افزایشی باشد به‌جز حالت اول که در آن احتمال قرار گرفتن سیستم در شرایط خطر و وقوع نقص باید کاهش پیدا کند که نتایج به‌دست‌آمده مؤید این مطلب است. نمودار ۱۶ احتمال تجمعی ترافیک دریافتی بسته‌های انتقالی در شبکه را نشان می‌دهد که برابر ارزش ۱ یا ۱۰۰ درصد است و بیانگر صحت ترافیک دریافتی بسته‌های انتقالی است.



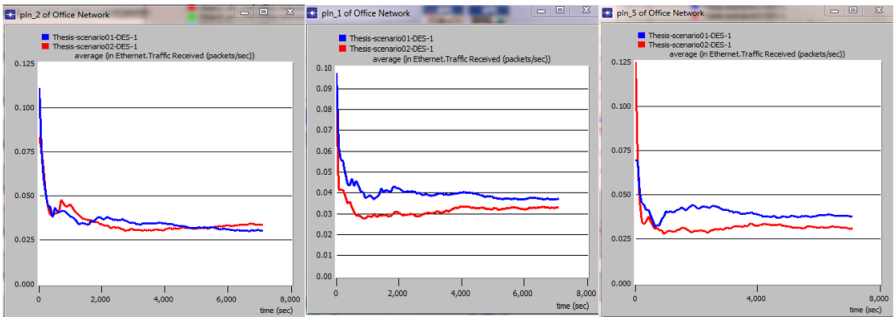
شکل۱۶. گراف احتمال تجمعی ترافیک دریافتی در شبکه

Throughput میانگین توان عملیاتی و کارایی هر لینک را نشان می‌دهد. توان عملیاتی برابر تعداد بیت‌ها یا بسته‌هایی است که بر روی لینک در هر ثانیه با موفقیت دریافت شده و یا منتقل می‌شود. Utilization نیز به‌عنوان یک ارزش بین صفر تا ۱۰۰ درصد به این معنی است که ظرفیت لینک به‌طور کامل مصرف‌شده است. مصرف لینک به‌عنوان نسبت بین مقدار داده‌هایی که بر روی لینک بوده به‌عنوان ظرفیت لینک تعریف می‌شود. نمودار شکل ۱۷ میانگین این مقادیر را برای مثال در انتقال بین "سوییچ ۱ – نود ۱" و "سوییچ ۲–نود ۱۰ " نشان می‌دهد.



شکل۱۷. میانگین کارایی و مطلوبیت Point-to-Point لینک‌های "سوییچ ۱ – نود ۱" و "سوییچ ۲–نود ۱۰ "

در شکل ۱۷ که به‌عنوان نمونه ارائه‌شده است، در هر دو مورد خروجی Throughput نرخ ۰/۰٤٥ و در مطلوبیت Utilization مقدار به‌دست‌آمده استفاده کامل هر لینک را نشان می‌دهد. میانگین کارایی و توان عملیاتی در لینک‌های مختلف شبکه و انتقال نقطه‌به‌نقطه بسته‌ها نیز محاسبه‌شده است که مبتنی بر نتایج، بیشترین مقدار میانگین، مربوط به انتقال بین سرور و سوییچ ۱ باارزش ۰/٤۳۸۷٥ و کمترین مقدار میانگین بین سوییچ ۱ و نود ۲ باارزش ۰/۰۳۰٥٦است. برای اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت، مدل پژوهش با نرخ وقوع ۰،۰۲٥ نیز مورداستفاده قرارگرفته است. با ثابت فرض کردن مقادیر مربوط به هزینه‌های کمبود موجودی، هزینه خرید قطعات یدکی و هزینه اجرای اقدام، برحسب نرخ وقوع ۰/۰۲٥= λ ماتریس اولیه ورودی تشکیل و مقادیر مطلوبیت جدید محاسبه‌شده است. در ادامه برای تعیین زمان تأثیرگذاری اقدام، از نتایج فرایند شبیه‌سازی سناریو ۲ در OPNET استفاده‌شده است. در نمودارهای شکل ۱۸ نتایج مقایسه هم‌زمان شبیه‌سازی هر دو سناریو با دو نرخ وقوع به‌عنوان نمونه در نودهای ٥ ، ۲، ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱۸ . نمودار نتایج هم‌زمان سناریوی ۱ و۲ برای نودهای ۱ ، ۲، ۵ و ۱۳

جدول ۱۴ ، زمان تأثیرگذاری اقدام را با فرض ثابت بودن هزینه‌های خرید قطعات یدکی، کمبود موجودی و اجرای اقدام، نشان می‌دهد.

جدول ۱۴ . مقادیر زمان تأثیرگذاری اقدام با λ =۰/۰۲۵

عنوان	Pln1	Pln2	Pln3	Pln4	Pln5	Pln6	Pln7	Pln8	Pln9	Pln10	Pln11	Pln12	Pln13
Δt(h)	۱.۵	۰.۷	۱.٤	۱.۵	۱.٦	۰.۷	۱.۰	۱.۷	۱.٤	۱.۱	۱.۰	۱.۲	۱.۳
te	۱۰۳.۸	۷٤.۹	٥٦.۳	۵۰.۷	٦٦.٤	٦۹.۵	۵۷.۷	۹۰.۷	۵۸.۵	۷۹.۵	٦۸.٦	۷۸.٦	۸۲.۳

مبتنی بر مقادیر زمانی محاسبه‌شده، احتمالات و نرخ وقوع نقص مورد انتظار در وضعیت بهینه با λ =۰/۰۲۵ به‌صورت زیر خواهد بود.

جدول ۱۵. مقادیر احتمالات در هر یک از حالات سیستم و نرخ نقص بر اساس هزینه با λ =۰/۰۲۵

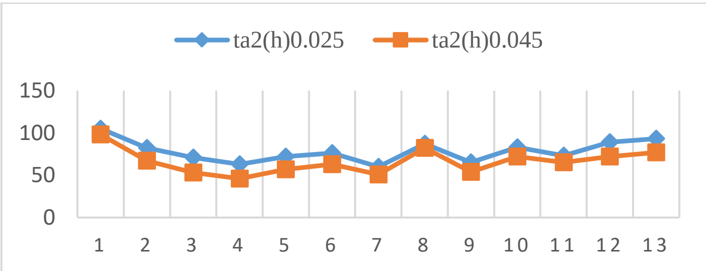
عنوان	P(Sd,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sa,Sf)	P(Sa,Se)	P(Se,Sf)	ELa	ELe	ELo
Pln1	۰.۹۲٦۲٦٦	۰.۰۷۳۷۳٤۳۹۵	۰.۱۲۷٦۵۷	۰.۸۷۲۳٤۳	۰.۹۹۹۹۹۱	۳۹۵۹٦٦۵۱.۹	٤۵۰۹۱۵۵۳.۳	۷۲۵٤٦۹۱۳
Pln2	۰.۸٦۹٤۷۲	۰.۱۳۰۵۲۸۱۸	۰.۱۵۳۲٦۷	۰.۸٤٦۷۳۳	۰.۹۹۹۹٤۹	۱۱٦۰۵۲۸۱۲	۷٤۷٤۲۸۰٦.۵	۱۹۲٤۳۸۳۳۳
Pln3	۰.۸۲۸٤۷٤	۰.۱۷۱۵۲۵۷٤۷	۰.۰۸۰۹٦۱	۰.۹۱۹۰۳۹	۰.۹۹۹۹٦۱	۸٤۳۲۸٦٦٤.۱	٤۰۱٤۵۱۳۷.۵	۹۳٦٦۳۹٤۸
Pln4	۰.۷۹۰۷۸۱	۰.۲۰۹۲۱۹٤۵۷	۰.۱۰۵۷۲٤	۰.۸۹٤۲۷٦	۰.۹۹۹۹٦۸	۸۵۲۰۹۱۸٦.۹	۳٦۰۲۹۸۵٦.٤	۸۰۲۷۰٦۵۰
Pln5	۰.۸۳۲٦۸۱	۰.۱٦۷۳۱۸۹۸٦	۰.۲۱۲۰۹۷	۰.۷۸۷۹۰۳	۰.۹۹۹۹٦	۵۸۲۵۲۷۲٦.۱	۳۱۹۷۹۷۸۹.۲	۵۸۸۳۲۳۸۸
Pln6	۰.۸٤۸۵۰۱	۰.۱۵۱٤۹۸٦۸	۰.۱۳۱۹۷۸	۰.۸٦۸۰۲۲	۰.۹۹۹۹۵٦	٤۸۳۳۰۵۲۵.۵	۲۹٤۹۹۳۱۵.۵	۵۸۲۲۸۷۸٦
Pln7	۰.۷۷٤٦	۰.۲۲۵٤۰۰۲۲۹	۰.۱۳۸٤۲	۰.۸٦۱۵۸	۰.۹۹۹۹۷	٦۵۷۰۵۰۷۸.۹	۲۵۰۱۵۰۵۳.۷	۵۷۵۷٦٦۷٦
Pln8	۰.۸۸٤۷۱۲	۰.۱۱۵۲۸۷۹۲۲	۰.۱۹٤۲۹۱	۰.۸۰۵۷۰۹	۰.۹۹۹۹٤۲	۵۲۰۱٦۲٦٤.۹	۳۸۹٤۰۸۲٤	۷۵۰۲٦۷۳۹
Pln9	۰.۸۰۰۹۱۷	۰.۱۹۹۰۸۲۸٦٦	۰.۱۰۳۵۰۱	۰.۸۹٦٤۹۹	۰.۹۹۹۹٦۷	۱۰۲۲۹۹۹۵۲	٤۱۲٦۰۱۷٤.۹	۹۵۰۳۵۲٦۳
Pln10	۰.۸۷۲٦۷۳	۰.۱۲۷۳۲٦۹۰۷	۰.۱٦۱٦۳۵	۰.۸۳۸۳٦۵	۰.۹۹۹۹٤۸	۱۱٤۱۱٤۲٦۷	۷۱٦٤۵۰۸٦.۳	۱۸۲٦۳۷۱٦٦

عنوان	P(Sd,Sf)	P(Sd,Sa)	P(Sa,Sf)	P(Sa,Se)	P(Se,Sf)	ELa	ELe	ELo
Pln11	۰.۸۳٦۷۸٥	۰.۱٦۳۲۱٥۳۹۹	۰.۰۷۱۷۸۷	۰.۹۲۸۲۱۳	۰.۹۹۹۹٥۹	۸٥۳٦۱۲٥٤.٦	٤٤۱٥۲۷٤٦.۹	۸٤٥٦۱٥٦۱
Pln12	۰.۸۹۰۲۹۸	۰.۱۰۹۷۰۲۲۷۳	۰.۱٤۲٦۸۹	۰.۸٥۷۳۱۱	۰.۹۹۹۹۳۹	٦۲۰۹۱۹٥۷.٦	٤٤۰٤۸۲۷۰.۳	۹۱۹۹٤۹۲۷
Pln13	۰.۹۰۰٦۷	۰.۰۹۹۳۲۹۷۲۸	۰.۱۲۳۳۱٤	۰.۸۷٦٦۸٦	۰.۹۹۹۹۳۳	٦٥۷۲۲٦۷۲	٥۷۲۳۳٥۷۰.٦	۱۰۰۲٦۸۲۸٤

جدول ۱۶. میزان بهبود در سه تابع با λ=۰٫۰۲۵

سفارش قطعات یدکی و اقدامات	تأثیرگذاری اقدام اصلاحی یا	زمان اجرای اقدام اصلاحی یا
%۷	% ۲۱	% ۱۱/۱۲

با افزایش نرخ وقوع نقص اهمیت تصمیم‌گیری در زمان کوتاه‌تر بیشتر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر هر چه نرخ وقوع نقص بیشتر باشد به‌طور طبیعی تصمیمات سریع‌تر و در بازه زمانی کوتاه‌تر اتخاذ می‌شود. این مطلب در نمودار ۱۹ بر اساس دو سناریوی شبیه‌سازی‌شده نشان داده‌شده است. به عبارت دیگر تغییر مقدار λ، تغییرات منطقی نتایج را به دنبال داشته است.



شکل ۱۹. نمودار تحلیل حساسیت بر اساس زمان

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه مربوط به میانگین نرخ وقوع ۰٫۰٤٥ 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. در جدول ۱۷ میانگین نرخ نقص مورد انتظار بر اساس هزینه و درصد بهبود در سه تابع بر اساس دو سناریوی اجراشده نشان شده است.

جدول ۱۷. میانگین نرخ وقوع نقص و میزان بهینگی در توابع سه‌گانه در دو سناریو

نرخ وقوع نقص	ELa1	ELa2	درصد بهینگی	ELe1	ELe2	درصد بهینگی	ELo1	ELo2	درصد بهینگی
λ=0.025	۵۸۸۴۵۱۹۹	۵۲۲۹۷۰۵۳	٪۱۱/۱۲	۵۶۴۶۳۱۷۸	۴۴۵۹۸۷۸۳	٪۲۱	۱۰۳۸۷۷۷۳۹	۹۵۶۲۱۶۶۴	٪۷/۹
λ=0.045	۵۵۳۲۶۵۶۵	۳۰۷۳۹۷۰۸	٪۴۴/۴۳	۵۸۵۸۹۹۹۴	۴۴۴۳۶۹۷۷	٪۲۴/۱۵	۹۰۴۶۸۱۶۳	۸۱۳۹۱۱۳۵	٪۱۰

با توجه به جداول مقادیر احتمالات، با افزایش نرخ وقوع نقص، قابلیت اطمینان کاهش‌یافته و میزان احتمال P(Sd,Sf) در نرخ وقوع ۰/۰۴۵ نسبت به ۰/۰۲۵ افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش نرخ وقوع نقص، قابلیت اطمینان افزایش‌یافته احتمال اثرگذاری اقدام اصلاحی در وضعیت P(Sa,Se) افزایش می‌یابد. بر اساس تغییر نرخ وقوع نقص، در هریک از حالات سیستم میزان احتمالات نیز متغیر بوده و مقادیر مربوط به توابع نقص مورد انتظار متفاوت خواهد بود. بر این اساس درصد بهبود در دو سناریو تفاوت داشته و با افزایش λ بازه‌های زمانی تصمیم‌گیری کوتاه‌تر و درصد بهبود در میانگین مقادیر هر سه تابع بیش‌تر خواهد بود. در اعتبارسنجی صحت بین اجزای مدل و صحت ماهیت مدل مدنظر است و اعتبارسنجی تلاشی است برای تأیید رسیدن به اینکه مدل بیان درستی از رفتار سیستم در واقعیت داشته باشد. اعتبارسنجی فرایند تکرار مقایسه مدل با رفتار واقعی سیستم است تا زمانی که صحت و میزان بهبود مدل به حد قابل‌قبول برسد [۳۰]. اعتبارسنجی بین "روابط عناصر و اجزاء مدل" و "ماهیت مدل" (اعتبارسنجی درونی و بیرونی) [۲۲] در ۲ بخش مدل ریاضی و مدل شبکه موردبررسی قرارگرفته است. در بخش مدل ریاضی مسئله، روابط بر اساس اطلاعات واقعی گذشته در صنعت نفت و گاز و در مطالعه‌ای که مبنای انجام این پژوهش بوده است مورداستفاده قرارگرفته و عملکرد مدل ارزیابی‌شده است. این روش اعتبارسنجی معمولاً در مدل‌های پیش‌بینی مورداستفاده است. در بخش مدل شبکه برای ارزیابی صحت روابط مدل از ابزار اعتبارسنجی نرم‌افزار OPNET استفاده‌شده است که عبارت All link and paths are connected properly در توپولوژی شبکه (شکل ۸) بیانگر صحت آن است. همچنین میانگین توان عملیاتی و کارایی هر لینک و میزان مطلوبیت Point-to-Point بیانگر صحت مدل شبکه است. تغییر پارامترهای حساس به‌صورت سیستماتیک و پاسخ به این سؤال که آیا مدل می‌تواند تغییرات را به‌صورت موفقیت‌آمیز دنبال نماید، از روش‌های دیگر اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل-های پیش‌بینی است که با تغییر نرخ وقوع رویداد λ در مورد مدل پژوهش انجام‌شده است و نتایج با تغییرات مورد انتظار مطابقت داشته است. تغییر نرخ λ و تغییر نتایج در رفتار مدل بر اساس انتظار، مبنای اعتبار صوری مدل نیز می‌باشد [۳۰].

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از تکنیک‌ها و ابزارهای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی رویداد محور، بهینه‌سازی هم‌زمان در دو مقوله "نگهداری و تعمیرات" و "برنامه‌ریزی و کنترل موجودی" انجام شود. برای این منظور توابع نرخ نقص مورد انتظار بر اساس زمان و هزینه مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفته است. مقادیر مربوط به توابع نرخ نقص، در سه حالت "نرخ نقص مورد انتظار در زمان اجرای

اقدام اصلاحی یا سیاست نت"، "نرخ نقص مورد انتظار در هنگام تأثیرگذاری اقدام" و "نرخ نقص مورد انتظار در زمان انجام اقدامات لجستیکی و سفارش قطعات یدکی" بر اساس هزینه محاسبه‌شده است. برای محاسبه مقدار احتمالات در هریک از حالات سیستم و تعیین سیاست بهینه در قبال هر یک از رویدادها (نقص‌ها)، از فرایند تصمیم مارکوف استفاده‌شده است. همچنین برای تعیین زمان اثربخشی و تأثیرگذاری سیاست‌ها، از مفهوم اینترنت اشیاء صنعتی بهره‌گیری و مسئله در محیط شبیه‌ساز OPNET، مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌شده است و بر اساس مقادیر زمانی جدید، مقادیر بهینه محاسبه‌شده است. در این پژوهش تمرکز بر بهینه‌سازی نت فعالانه و کنترل موجودی بر پایه رویدادهای گسسته است. استفاده از اصول تصمیم‌گیری رویدادمحور و توصیه اقدامات جایگزین بهینه بعد از پیش‌بینی خرابی‌ها و ازکارافتادگی‌ها با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری تصادفی رویدادهای گسسته (فرایند تصمیم‌گیری مارکوف) و شبیه‌سازی مدل مسئله در شبکه‌های کامپیوتری در محیط اینترنت اشیاء صنعتی، رویکردهای نوین پژوهشگران به موضوع است. به‌عبارت‌دیگر تمرکز بر موضوع تصمیم‌گیری و ارائه راهکار و اقدام اصلاحی جایگزین که در اکثر سیستم‌های نت، نادیده گرفته می‌شود و پردازش و تحلیل رویدادها با بهره‌گیری از قابلیت‌های مفهوم اینترنت اشیاء صنعتی برای طراحی یک سیستم نگهداری تعمیرات فعالانه و کنشگر، وجوه تمایز این تحقیق با سایر پژوهش‌های صورت گرفته است. برای انجام پژوهش، داده‌های تاریخی مربوط به اجرای برنامه‌های نت و ارزیابی ریسک در شبکه انتقال گاز مورداستفاده قرارگرفته است و بر اساس تغییر در میانگین نرخ وقوع رویدادها، زمان انجام شبیه‌سازی و تغییر در مقادیر پارامترهای آماریِ شبکه، تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل انجام‌شده است. نتایج پژوهش حاکی از آن است که میزان بهینگی در سه تابع "نرخ نقص مورد انتظار برای اجرای اقدام اصلاحی یا سیاست نت"، "نرخ نقص مورد انتظار در هنگام تأثیرگذاری اقدام" و "نرخ نقص مورد انتظار در انجام اقدامات لجستیکی و سفارش قطعات یدکی" با نرخ وقوع نقص ۰/۰۴۵ ، به ترتیب برابر است با ۴۳/۴۴٪، ۱۵/۲۴٪ و ۱۰٪. برای تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی، مدل موردنظر با میانگین نرخ وقوع نقص ۰/۰۲۵ نیز موردسنجش قرارگرفته 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 بهره‌گیری از انواع مدل‌های تئوری زنجیره مارکوف (مانند زنجیره مارکوف مخفی) و سیستم‌های صف، مسائل مشابه با مسئله این پژوهش، مدل‌سازی و با استفاده از قابلیت‌های اینترنت اشیاء و ایجاد بهبود در عناصر مدل در لایه‌های نود و فرایند، مدل نت پیش نگر، توسعه داده شود. جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های نت و ارزیابی ریسک در سطح گسترده با استفاده از تکنولوژی سنسورها و

آموزش داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌تواند باعث افزایش پایایی و اعتبار مدل‌های تصمیم-گیری داده محور (رویدادمحور) شده و در قالب پژوهش‌های مستقل انجام پذیرد و طراحی سیستم‌های پشتیبان تصمیم با استفاده از قابلیت‌های IOT و توسعه آن در حوزه هوش مصنوعی را منجر گردد. همچنین با توجه به چندمرحله‌ای بودن سیستم موردبحث در این پژوهش و مشخص بودن روابط ریاضی مربوط به عناصر در هر حالت، مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم در حالت‌های مختلف و در ادامه بهینه‌سازی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی گسسته، به‌عنوان اقدامات پژوهشی آتی پیشنهاد می‌شود. اضافه نمودن شاخص‌های دیگر به دو شاخص زمان و هزینه که در این پژوهش موردبررسی قرار گرفت و انجام بهینه‌سازی‌های ترکیبی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (روش‌های غیرقطعی) و یا روش‌های قطعی بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی ریاضی مانند برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی آرمانی و تئوری بازی‌ها، سبب جامعیت و تکامل فرایند پژوهش می‌گردد.

۹- پی‌نوشت‌ها

[۱] E-maintenance
[۲] Open System Architecture for Condition Based Maintenance
[۳] IIOT
[۴] Bellman
[۵] ELR
[۶] Markov Decision Process
[۷] Project,Network
[۸] Node
[۹] Process
[۱۰] Finite State Machine
[۱۱] Global Statistic
[۱۲] Zone
[۱۳] Network Editor
[۱۴] Start Time Offset
[۱۵] Inter Repetition Time
[۱۶] Bit Capacity
[۱۷] Node Editor

۱۰- منابع

[۱] Rastegar, I., Rezaian, J., Mahdavi, I., & Fatahi, P. (2021). "Modeling the planning and scheduling of production and repair maintenance in a combined workshop flow environment". *Modern Researches in Decision Making*. 7, 2, 1-27.

[۲] SaeediSough, Y., Ahmadi, A., & Ramezani, S. (2014). "Combined optimization of spare parts inventory and maintenance activities". *Supply Chain Management*, 49, 36-53.

[۳] Niu, G., Yang, B., & Pecht, M. (2010). "Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance". *Reliability Engineering and System Safety*, 95, 786–796.

[٤] Bumblauskas, D., Douglas, G., Igou, A., & Anzengruber, J. (2017). "Smart Maintenance Decision Support Systems (SMDSS) based on corporate big data analytics". *Expert Systems with Applications, 90, 303-317.*

[٥] Bousdekis, A., Papageorgiou, N., Magoutas, B., & Apostolou, D. (2018). "Enabling condition-based maintenance decisions with proactive eventdriven computing". *Computers in Industry*, 100, 173–183.

[٦] Bousdekis, A., & Mentzas, G. (2019). "A Proactive Model for Joint Maintenance and Logistics Optimization in the Frame of Industrial Internet of Things". *Springer Proceedings in Business and Economics*, 21-45.

[٧] Li, Y., Tang, Q., Chang, Q., & Brundage, P. (2017). "An event-based analysis of condition-based maintenance decision-making in multistage production systems". *International Journal of Production Research*. DOI: 10.1080/00207543.2017.1292063.

[٨] Karabağ, O., Eruguz, A., & Basten, R. (2020). "Integrated optimization of maintenance interventions and spare part selection for a partially observable multi-component system". *Reliability Engineering and System Safety*, 200, 106-955.

[٩] Zou, G., Banisoleiman, K., Gonzalez, A., & Faber, M. (2019). "Probabilistic investigations into the value of information: A comparison of condition-based and time-based maintenance strategies". *Ocean Engineering*, 188, 106-181.

[١٠] Kim, J., Ahn, Y., & Yeo, H. (2016). "A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy". *Structure and Infrastructure Engineering*, 1744-8980.

[١١] Rabbani, A., Zare, H., & Behnia, f. (2012). "Provide a suitable model for the implementation of maintenance system in factories of continuous production lines with the approach of decision-making models and ideal fuzzy planning*". Journal of Industrial Management Studies*, 31, 85-100.

[١٢] Ravanbakhsh, S. (2017). "Improving the efficiency of strategic equipment by maintenance, failure analysis and simulation methods". *Journal of Maritime Transport Industry*, 13-26.

[١٣] Nosratpanah, S., & Asadi, A. (2017). "Maintenance and repair policies based on the situation". *Andisheh Amad Quarterly*, 61, 141-163.

[١٤] Karimabadi, A., Hajiabadi, M., & Kamyab, E. (2015). "An overview of repairs and breakdowns of transmission and substation equipment". *Journal of New Electrical Research*, 2.

[١٥] Zargar, M. (2018). "Assessment of Barriers to Establishing the Internetof Things in Libraries in Iranbased on a Combined Approach*". Iranian Journal of Information Processing and Technology*, 34, 3, 1371-1398.

[١٦] Yazdani, H., Sohrabi, B., & Jalilian Attar, M. (2020). "Identifying effective qualitative indicators on the evaluation of Internet of Things business models

based on big data analysis in the smart city". *Modern Researches in Decision Making*, 6, 2, 125-154.

[۱۷] Khan, W., Rehman, M., Zangoti, H., Afzal, M., Armi, N., & Salah, K. (2020). "Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges". *Computers and Electrical Engineering*, 81, 106-522.

[۱۸] Shojaei, Q. (2010). "Conscious aggregation of information by the potential of dynamic routing in wireless sensor networks". *Master Thesis of Islamic Azad University*, Rafsanjan, Iran.

[۱۹] Kumar, A., & Nath, V. (2019). "Study and Design of Smart Embedded System for Smart City Using Internet of Things". *Springer Nature*, Singapore Pte.

[۲۰] Haji Shah Karam, M., & Mohammadi, S. (2015). "Proposed architecture based on the Internet of Things and recommending systems for smartening the city of Tehran". *Journal of Information Processing and Management*. 1, 275-295.

[۲۱] Faqih, N., Baqerpour, M., & Hasanli, S. (2011). "Maintenance and repair planning". *Samt Publishing*, Tehran, Iran.

[۲۲] Azar, A., & Jahanian, S. (2012). "Management science methodology". *University Publishing*, 1, Tehran, Iran.

[۲۳] Modarres, M., & Asefvaziri, A. (2008). "Mathematical programming". *Javan Publishing*, 6, Tehran, Iran.

[۲۴] Naqib Hashemi, S., & Asghari Tochai, A., Binesh Marvasti, M. (2020). "Intelligent passive decision making for sensors in structural monitoring". *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 19, 170-182.

[۲۵] Shekhari Ashkazari, M., & Al-Badawi, A. (2017). "Calculating the lifetime value of customers by considering the dynamics of their behavior using the Markov chain". *Management Research in Iran*, 22, 4, 1-22.

[۲۶] Shakerin, R., Toloui Ashlaghi, A., & Radfar, R. (2019)." Analysis of the service process of the life insurance policy issuance system and future provisioning with the approach of discrete event simulation and scenario". *Management Research in Iran*, 24, 4, 19-47.

[۲۷] Kabiri, M., & Ramezani, M. (2016). "Practical guide to computer network simulation with OPNET". *Fnnavarie novin Publishing*, 1, Babol, Iran.

[۲۸] Farzin, M. (2010). "Simulation using OPNET software". *Sharif Noavaran Publishing*, 1, Tehran, Iran.

[۲۹] Chen, M., Miao, Y., & Humar, I. (2018). "OPNET IoT Simulation". *Springer*.

[۳۰] Alinaghian, M., Izadbakhsh, H., & ZarinBal, M. (2015). "Introduction to the simulation of discrete-event systems". *Mojak publication*, 4, Tehran, Iran.