

ارتقای مدل سازی و شبیه سازی پویای فرایند نگهداری و تعمیرات نیروگاه با هدف ایمنی

پریسا شایگان نیک^۱، معصومه زینال نژاد^{۲*} و طاهره علی حیدری بیوکی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹	وجود متغیرها و زیرسیستم‌های متعدد، پیچیدگی‌های مدل سازی نگهداری و تعمیرات ایمنی محور را در سیستم‌های بزرگ از جمله نیروگاه‌ها افزایش می‌دهد. هدف این مقاله، مدل سازی پویای سیستم نگهداری و تعمیرات نیروگاه با در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی و سپس شبیه سازی و تحلیل رفتار مدل طراحی شده برای یک نمونه عددی است. بدین منظور، از طریق مروری بر مطالعات پیشین، مدل علی حلقوی سیستم نگهداری تعمیرات یک نیروگاه، طراحی گردیده، براساس نظر خبرگان، زیرسیستم ایمنی به مدل اضافه و در نهایت، نمودار جریان از طریق نرم افزار انی لاجیک فرمول بندی شد. مدل در سه سناریو شامل سناریوی یک، آموزش، سناریوی دو، افزودن تجهیزات جدید در سال هفتم و سناریوی سه، ترکیبی از افزودن تجهیزات جدید و آموزش، شبیه سازی گردید. نتایج سناریوی یک نشان داد افزایش نرخ آموزش سبب کاهش نرخ خرابی و افزایش نرخ از کار انداختن تجهیزات تا ششمین سال و همچنین کاهش نرخ و هزینه حوادث و افزایش ایمنی تا پنجمین سال شد و آموزش بعد از این سال‌ها دیگر اثرگذار نبوده، فقط هزینه آموزش سبب افزایش هزینه‌های جاری گردید. نتایج سناریوی دو بیانگر آن است که افزودن هشت تجهیز جدید در سال هفتم سبب بهبود مدل تا ۱۵ سال بعد می‌شود و مقدار سود از سال دوم تا سال پانزدهم بیشتر از سناریوی یک و سه است. ترکیب سناریوهای یک و دو، سناریوی بهینه، موجب می‌گردد مقدار ایمنی بیشتر، نرخ خرابی از سال ششم به بعد کمتر، نرخ و هزینه حوادث و هزینه جاری از سال پنجم به بعد کمتر شود.
واژگان کلیدی: نگهداری و تعمیرات، ایمنی، نیروگاه، پویایی‌های سیستم، مدل سازی، شبیه سازی.	

۱- مقدمه

هم‌زمان با توسعه فناوری و پیشرفت انسان در طراحی و ساخت تجهیزات و ابزار پیشرفته‌ای که سیستم‌ها را پیچیده تر می‌کند، نقش نگهداری و تعمیرات (نت) مبتنی بر اصول علمی، بررسی احتیاجات نگهداری و تعمیرات و شرایط رفع سریع عیوب، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۱]. نگهداری و تعمیرات، به‌ویژه در صنعت برق، اهمیت بسزایی دارد و بی‌توجهی به آن، سبب زیان‌های جانی و مالی می‌شود. برای توسعه و تجهیز نیروگاه‌های تولید برق، به سرمایه‌گذاری‌های هنگفت نیاز است؛ بنابراین در چنین

شرایطی نگهداری نیروگاه‌های موجود و افزایش طول عمر آن‌ها حائز اهمیت است و از این طریق می‌توان تا حدود زیادی از سرمایه‌گذاری‌های جدید اجتناب کرد و از سرمایه‌های موجود، بهره لازم و کافی را برد [۲]. همچنین بحث ایمنی و کاهش حوادث در تعمیرات و نگهداری نیروگاه‌ها بسیار اهمیت دارد. یکی از علل اصلی وقوع حوادث، عدم یکپارچگی واحدهای نگهداری و تعمیرات با ایمنی است. ادغام دو فرایند نگهداری تعمیرات و ایمنی توسط یک سیستم می‌تواند منجر به کاهش حوادث و بهبود عملکرد سازمان شود [۳]. با توجه به اینکه یک

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zeinalnezhad.m@wtiau.ac.ir

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی

۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی

۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی

کاربرد پویایی‌های سیستم در طراحی و سناریوسازی‌های متنوع برای طراحی سیستم نگهداری تعمیرات ایمنی محور است، به طوری که با استفاده از شبیه‌سازی بتوان بهترین سناریو را برای یک دوره بلندمدت پیشنهاد کرد.

۲- مرور ادبیات تحقیق

با توجه به پیش‌بینی رشد قابل توجه مصرف برق و بالا بودن شدت مصرف انرژی، افزایش بازده نیروگاه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این زمینه تحقیقات مختلفی صورت گرفته و این مسئله از جنبه‌های گوناگون تحلیل شده است [۵]. نگهداری و تعمیرات، یکی از وظایف اصلی پشتیبان کسب و کار در هر سازمان به شمار می‌رود و اثربخشی مدیریت آن، زمانی مشخص می‌شود که سازمان قادر به ارزیابی یک استراتژی نگهداری و تعمیرات معین باشد [۶]. یک روش کلی برای انتخاب بهترین استراتژی نگهداری و تعمیرات در سازمان‌های تولیدی توسط آقاسی‌زاده [۷] ارائه شده است. از مهم‌ترین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات می‌توان به نگهداری و تعمیرات اصلاحی، پیشگیرانه، فرصتی، موقعیتی و پیشگویانه اشاره کرد که با توجه به موقعیت و شرایط محیطی، به‌کارگیری هر یک، مزایا و معایبی دارد. در این زمینه، این پژوهش با در نظر گرفتن شاخص‌هایی مانند هزینه، قابلیت اجرا، ایمنی و ارزش افزوده، پنج استراتژی فوق را ارزیابی کرد. برای این منظور، پرسش‌نامه‌ای تنظیم شد و با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ بهترین استراتژی نت برای کارخانه تبرک مشهد انتخاب شد. به طور مشابه، جگتاپ و همکاران [۸] با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به تجزیه و تحلیل استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات نیروگاه و تعیین مهم‌ترین تجهیزات جهت جلوگیری از افزایش هزینه‌های ناشی از توقف در نیروگاه پرداخته‌اند. پژوهش لی و همکارانش [۹] نشان می‌دهد که انتخاب یک استراتژی مناسب با هر صنعت می‌تواند عامل مهمی در موفقیت به‌کارگیری مدیریت نگهداری و تعمیرات به شمار آید، به طوری که در صنایعی که نیاز به ایمنی بالا دارند، موضوع هزینه-فایده در انتخاب استراتژی نسبت به شاخص ایمنی در اولویت دوم قرار دارد. کریم‌آبادی و همکاران [۱۰] برای حفظ قابلیت اطمینان سیستم در حد قابل قبول و فرار از هزینه‌های سنگین مربوط به خرابی‌ها، اضافه کردن تعمیر و

پروژه نگهداری و تعمیرات ممکن است مدت‌ها پس از طراحی و پیاده‌سازی نیز ادامه داشته باشد، پویایی‌های سیستم به صورت یک سیستم کلی که دارای ساختار بازخوردی بوده، قابلیت اصلاح و تجدید نظر دارد، تعریف می‌شود و می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب در بهبود عملکرد مدیریت یک سیستم نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته شود. توانایی درک کل سیستم و همچنین تجزیه و تحلیل وابستگی‌های بین اجزای مختلف یک سیستم یکپارچه و در نهایت تأمین بازخورد بدون شکستن آن به اجزای سازنده، پویایی‌های سیستم را به یک روش ایدئال برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، شامل تعداد زیادی از متغیرهای کلیدی وابسته به یکدیگر، تبدیل کرده است [۴].

تجربیات سازمان‌های بزرگ با تولید پیوسته، الزام وجود یک سیستم یکپارچه نگهداری تعمیرات و ایمنی را تأیید می‌کند تا از بروز حوادث و آسیب‌های واردشده به انسان و ماشین‌آلات جلوگیری شود و در نتیجه، هزینه‌های سازمان کاهش و بازده آن افزایش یابد. طراحی چنین سیستم جامعی برای نیروگاه با روش‌های معدودی از جمله مدل‌سازی پویا ممکن است. از این رو مسئله اصلی تحقیق حاضر، بررسی کاربرد پویایی‌های سیستم برای توسعه مدل سیستم نگهداری و تعمیرات با استفاده از شاخص‌های ایمنی است. در این تحقیق به سؤالاتی مانند: چگونه می‌توان با در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی، مدلی پویا برای تعمیر و نگهداری نیروگاه‌ها ارائه داد؟ مدل طراحی شده با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌های پویایی‌های سیستم چگونه شبیه‌سازی می‌شود؟ متغیرها، سیستم‌ها و زیرسیستم‌های نگهداری تعمیرات و ایمنی نیروگاه کدام‌اند؟ نحوه استفاده از پویایی‌های سیستم در بحث نگهداری تعمیرات و ایمنی نیروگاه چگونه است؟ پاسخ داده می‌شود. برای این منظور مفروضات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- سیستم‌ها و زیرسیستم‌های مدل با هم روابط بازخوردی دارند.
 - متغیرها هم نقش اثرپذیر و هم نقش اثرگذار دارند.
 - روابط بین متغیرها به گونه‌ای است که مدل‌های ایستا به اندازه کافی پاسخگو نیستند.
- بنابراین نوآوری این مقاله به صورت مشخص، نشان دادن

^۱ AHP

ایمنی و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه را براساس متدولوژی تحلیل و طراحی سیستم ساختاریافته پیشنهاد کردند. یافته‌های این تحقیق نشان داد پیاده‌سازی این سیستم، به بهبود شاخص‌های ایمنی و نت منجر می‌شود. به‌طور مشابه، امجدی و انصاری [۱۹] با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی سیستم و مسئله پایداری ولتاژ، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدتی برای نیروگاه‌های آبی و حرارتی انجام دادند. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت نیروگاه‌ها یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده، غیرخطی و مقیاس بزرگ است که تابع هدف حداقل کردن هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی در افق برنامه‌ریزی یک هفته یا یک روز است. آن‌ها یک فرمول بندی جدید براساس روش تجزیه بندرز برای حل مسئله خود ارائه کردند.

در مطالعات مربوط به پویایی‌های سیستم، گرمی و همکاران [۲۰] به نشان دادن ارتباطات علی بین عوامل مؤثر در سیستم‌های ساخت با استفاده از شبکه عصبی فازی و پویایی‌های سیستم پرداختند. پورغریب شاهی [۲] به بررسی تعمیر و نگهداری نیروگاه‌ها و معادلات ریاضی مربوط به آن‌ها با روش پویایی‌های سیستم پرداخته است. در این پژوهش سه نوع روش تعمیر و نگهداری واکنشی، پیشگیرانه و پیشگویانه در چهار حالت مورد بررسی قرار گرفته و بهترین سیاست انتخاب شده است. گوپتو و همکاران [۲۱] نیز در مطالعه خود با استفاده از پویایی‌های سیستم، به شبیه‌سازی عملکرد سیستم نگهداری تعمیرات و هزینه‌های نگهداری در کارخانه در شرایط تحول دیجیتال پرداختند و آثار تحول دیجیتال و تأثیرات آن را در نحوه انتخاب استراتژی نگهداری تعمیرات یک کارخانه دیجیتال بررسی کردند. در پژوهشی دیگر، متیوس و همکاران [۲۲] با هدف کاهش هزینه‌ها، یک مدل شبیه‌سازی پویای یکپارچه برای نگهداری نیروگاه‌های زغال‌سنگی ارائه دادند. مدل آن‌ها برای اطمینان از دقت برنامه‌های نگهداری پیشگویانه، با اندازه‌گیری‌های واقعی تنظیم شد و سپس با مدل‌های اقتصادی تلفیق گردید. همچنین گری و همکاران [۲۳] به توسعه استراتژیک نگهداری و تعمیرات و آثار آن بر عملکرد تولید در صنعت خودرو با استفاده از پویایی‌های سیستم و نرم‌افزار و نسیم پرداختند، به‌طوری که زیرسیستم‌های تعمیرات، سلامت تجهیزات، پیاده‌سازی

نگهداری پیشگویانه^۱ را به تعمیر و نگهداری دوره‌ای تجهیز الزامی می‌دانند. همچنین الاسواد و ژیانگ [۱۱] به بررسی مدل‌های بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط^۲ با تأکید بر مدل‌سازی ریاضی و روش‌های بهینه‌سازی برای سیستم‌های غیرقابل پیش‌بینی پرداخته‌اند. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند نگهداری که هدف آن تعمیر و نگهداری در کوتاه‌ترین زمان ممکن است، از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. همچنین آن‌ها شبیه‌سازی رویداد گسسته را برای پیش‌بینی توزیع زمان انتظار به کار برده‌اند [۱۲].

در پژوهشی جدید، بولوت و ازکان [۱۳] به مدل‌سازی و تعیین زمان اجرای دوره‌های تعمیرات و نگهداری در نیروگاه برق آبی در ترکیه پرداخته‌اند. در این تحقیق با توجه به پیچیدگی‌های زیاد سیستم و بحرانی بودن و حساسیت بالای تجهیزات مورد بررسی، از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی^۳ استفاده شده است. در مطالعات مربوط به نگهداری و تعمیرات و ایمنی، وانگ و همکاران [۱۴] مطالعه‌ای روی استراتژی‌های نگهداری تعمیرات و ایمنی در نیروگاه هسته‌ای انجام داده‌اند. از آنجا که مسئله ایمنی در نیروگاه هسته‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است، انتخاب استراتژی‌های متعادل بین هزینه‌های نت و سطح ایمنی حائز اهمیت است. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ریاضی چندهدفه استراتژی بهینه انتخاب شده است. سنوزا و همکاران [۱۵] یک سیستم یکپارچه تعمیرات نگهداری و بازرسی را برای صنایع هوایی بررسی کرده‌اند که در آن، موضوع ایمنی از اهمیت زیادی برخوردار است. تا اوایل قرن بیستویکم ایمنی و نت به‌عنوان دو موضوع مستقل از هم مورد توجه قرار می‌گرفتند؛ اما از ابتدای قرن حاضر تعدادی از محققان با رویکردی تازه، سیستم‌های یکپارچه نت و ایمنی را به‌عنوان ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی ظرفیت سازمان‌ها پیشنهاد کرده‌اند [۱۶].

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد ارتباط نزدیکی بین نگهداری تعمیرات و بروز حوادث عمده و بزرگ وجود دارد [۱۷]. سینق و همکاران [۱۸] مدل مفهومی را برای ارزیابی تأثیر شیوه‌های مدیریت تعمیر و نگهداری بر عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی نیروگاه برق آبی ارائه دادند. مهاجری و هرسج [۳] پیاده‌سازی سیستم یکپارچه

³ MCDM

¹ Predictive Maintenance (PdM)

² Condition Based Maintenance (CBM)

برنامه‌ریزی و متدولوژی تعمیرات و فرایند توسعه تعمیرات مطالعه‌شده با توجه به روش حل، اهداف و مورد مطالعاتی، مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از مهم‌ترین مقالات در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - خلاصه مطالعات پیشین در حوزه مدل‌سازی فرایند نگهداری تعمیرات و ایمنی

مطالعه موردی	اهداف تحقیق	ویژگی‌های مسئله و روش حل				سیستم نگهداری و تعمیرات	نویسندگان (سال)
		سایر روش‌ها	روش پویایی‌های سیستم	شبیه‌سازی	در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی		
کارخانه تبرک مشهد	انتخاب بهترین استراتژی نت	✓				✓	آقاسی‌زاده (۱۳۹۵) [۷]
نیروگاه سبز بادی منجیل	پایاده‌سازی سیستم یکپارچه ایمنی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	✓			✓	✓	مهاجری و هرسج (۱۳۹۴) [۳]
-	انتخاب بهترین سیاست تعمیر و نگهداری		✓	✓		✓	پورغریب شاهی (۱۳۹۰) [۲]
نیروگاه برق آبی در ترکیه	مدل‌سازی و تعیین زمان اجرای دوره‌های تعمیرات	✓				✓	بولوت و ازکان (۲۰۲۱) [۱۳]
نیروگاه هسته‌ای	انتخاب استراتژی‌های متعادل بین هزینه‌های نت و سطح ایمنی	✓			✓	✓	وانگ و همکارانش (۲۰۲۱) [۱۴]
نیروگاه‌های زغال‌سنگی	کاهش هزینه‌ها		✓	✓		✓	متیوس و همکاران (۲۰۲۰) [۲۲]
کارخانه دیجیتال	آثار تحوّل دیجیتال و تأثیرات آن در نحوه انتخاب استراتژی		✓	✓		✓	گویژو و همکارانش (۲۰۱۹) [۲۱]
صنعت خودرو	توسعه استراتژیک نگهداری و تعمیرات و آثار آن بر عملکرد تولید		✓	✓		✓	گری و همکاران (۲۰۱۸) [۲۳]
نیروگاه	تعیین مهم‌ترین تجهیزات جهت جلوگیری از افزایش هزینه‌های ناشی از توقف در نیروگاه	✓				✓	جگتاپ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۷]
-	انتخاب استراتژی نگهداری تعمیرات بهینه	✓				✓	وانگا و همکاران (۲۰۰۷) [۲۷]
-	تعیین چارچوبی برای ارزیابی و اثربخشی استراتژی نگهداری و	✓				✓	پینتلون و همکاران (۲۰۰۶) [۲۸]
نیروگاه شاهرود	کاربرد پویایی‌های سیستم در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم نگهداری تعمیرات و		✓	✓	✓	✓	تحقیق حاضر (۱۴۰۰)

- تعیین روابط اثرگذار و اثرپذیر متغیرهای نت و ایمنی
- ترسیم نمودار جریان
- تبدیل نمودار جریان به معادلات ریاضی (معادلات داینامو)

• شبیه‌سازی، سناریوسازی و تحلیل
در این تحقیق، ابتدا با بررسی مطالعات پیشین، مدل علی حلقوی اولیه ساخته شد و در مرحله بعد، با استفاده از نظر کارشناسان و خبرگان تعمیرات نگهداری و ایمنی نیروگاه، زیرسیستم ایمنی به مدل اضافه گردید و روابط اثرگذاری و اثرپذیری بین متغیرها شناسایی و نمودار جریان مدل ترسیم شد. همچنین فرمول‌های متغیرها و مقادیر پارامترها به مدل وارد گردید. برای گردآوری داده‌های مورد نیاز، مقادیر پارامترهای مدل و فرمول‌های متغیرها، مطالعات کتابخانه‌ای و مطالعات میدانی شامل نظرسنجی از کارشناسان و خبرگان نیروگاه‌ها، به‌ویژه نیروگاه سیکل ترکیبی شاهرود، صورت گرفت. سپس با در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی، مدل پایه نت نیروگاه گسترش داده شد. از روش پویایی‌های سیستم به منظور بررسی روابط متقابل بین ایمنی، تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و تعمیرات و نگهداری برنامه‌ریزی نشده استفاده شد. در پایان، مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار انی‌لاجیک^۲ با سه سناریو شبیه‌سازی و مناسب‌ترین سیاست انتخاب گردید.

یکی از مهم‌ترین ابزارهای بصری روش پویایی‌های سیستم، نمودار جریان است. نمودار جریان نشان‌دهنده کلیه روابط بین متغیرها و همچنین جریانات دینامیکی بین آنهاست که پس از وارد کردن فرمول‌ها و پارامترهای هر متغیر می‌توان مدل را شبیه‌سازی و سناریوهای متنوعی را روی آن اجرا و تحلیل کرد. نمودار جریان، یک ابزار بصری کامل‌تری نسبت به نمودارهای علی حلقوی است. در نمودار علی حلقوی هرچند بازخوردهای بین متغیرها نشان داده می‌شود، این نمودار قادر به بررسی رفتار سیستم در طول زمان نیست. برای حل این نقص، نمودار جریان با کمک سه دسته متغیر حالت، نرخ و کمکی، نحوه انباشتگی و تجمع متغیرها و آثار متقابل هریک را در طول زمان نشان می‌دهد [۲۶].

نمودار جریان طراحی شده در این تحقیق دارای چهار زیرسیستم نگهداری و تعمیرات، تجهیزات در معرض خطر،

همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، مطالعه منابع مربوط به مباحث نگهداری و تعمیرات، ایمنی و پویایی‌های سیستم نشان می‌دهد علی‌رغم وجود تحقیقات متنوع در خصوص نگهداری تعمیرات نیروگاه‌ها و همچنین مدل‌سازی‌های ایستا، تاکنون تحقیقی که به تحلیل پویایی مدل نگهداری تعمیرات ایمنی محور به صورت یکپارچه پرداخته باشد، انجام نشده است؛ بنابراین لزوم به‌کارگیری مدل پویایی‌های سیستم برای نگهداری و تعمیرات نیروگاه با در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی محرز گردید.

۳- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، به دلیل ماهیت پویایی سیستم نگهداری و تعمیرات، از متدولوژی پویایی‌های سیستم^۱ برای مدل‌سازی پویا و تجزیه و تحلیل انواع عناصر حیاتی، ویژگی‌های ساختاری، ارتباطات و بازخوردهای مرتبط با تعمیرات نگهداری و ایمنی استفاده شده است. پویایی‌های سیستم روشی است که اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط فارستر در دانشگاه MIT ارائه شد که غالباً برای حل مسائلی با پیچیدگی‌های سیستمی دارای متغیرهایی با آثار متقابل به کار می‌رود و رفتار متقابل متغیرهای هر زیرسیستم در یک نگاه کلی و جامع‌نگر در افق‌های زمانی طولانی، شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار می‌گیرد [۲۴]. متدولوژی پویایی‌های سیستم، اجزای سیستم‌ها را در یک الگوی پیچیده با یکدیگر مرتبط می‌کند و روابط متغیرهای شناسایی شده را از طریق حلقه‌های بازخوردی نشان می‌دهد. جریان اطلاعات و مواد با استفاده از نمودار جریان به تصویر کشیده می‌شود [۲۵]. مدل‌های پویایی‌های سیستم، ابزارهای بصری هستند که براساس نمادسازی‌های استاندارد در قالب نمودارهای علی حلقوی و نمودارهای جریان ارائه می‌شوند. این ابزار بصری نوعی نقشه مفهومی است که تفکر مدل‌ساز را به نمایش می‌گذارد. این روش، فراخور میزان پیچیدگی یا نوع روابط زیرسیستم‌ها، مراحل مختلفی دارد. در این تحقیق هفت مرحله اصلی به شرح زیر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار مدل به کار رفته است:

- تعریف مسئله به صورت کامل و واضح
- شناسایی متغیرها، سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها
- تعیین روابط بین متغیرها از طریق نمودار حلقه علی (علی حلقوی)

² AnyLogic

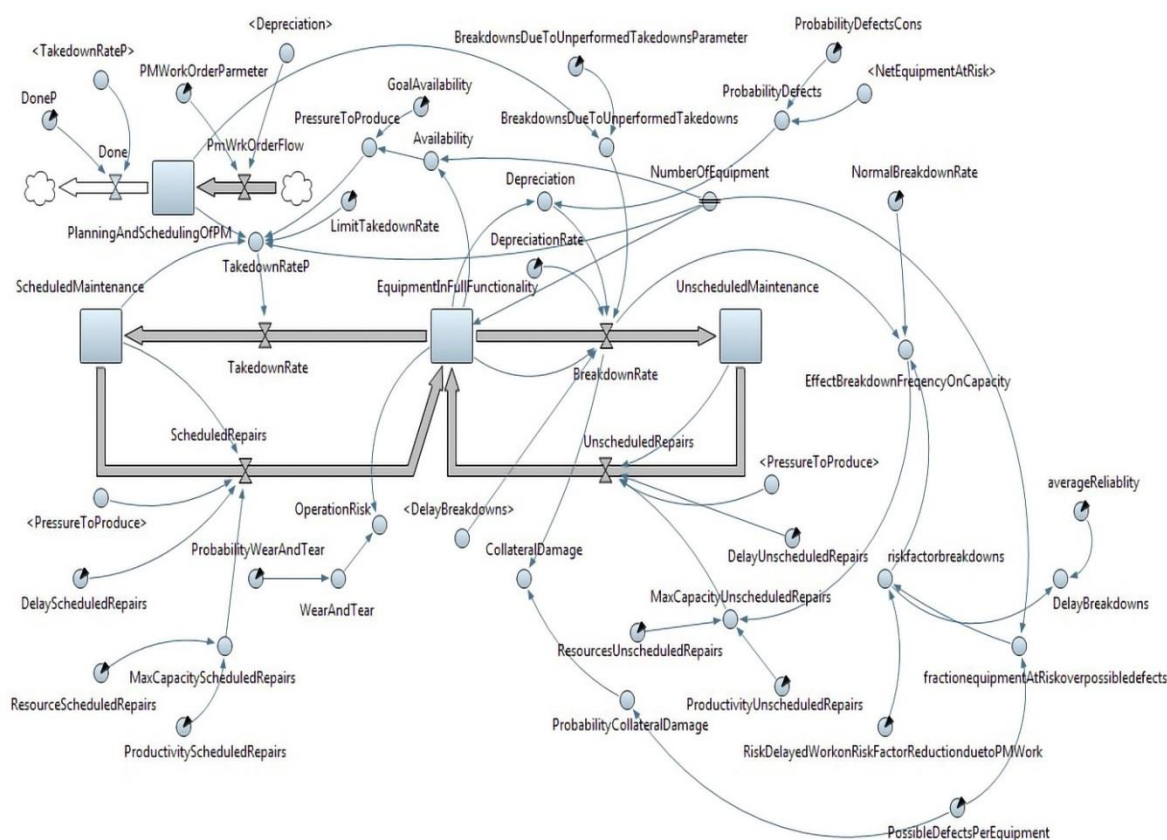
¹ System Dynamics

شکل (۱) مشاهده می شود، تجهیزات در اثر گذر زمان و عیوب احتمالی دچار فرسودگی شده، فرسودگی بر نرخ خرابی اثر می گذارد. در این مدل، تعمیرات برنامه ریزی شده طبق برنامه تعمیرات پیشگیرانه است و همان طور که در این زیرسیستم مشخص است، مواردی که به تعمیرات برنامه ریزی شده می روند، برنامه تعمیرات پیشگیرانه روی آن ها انجام شده، از سیستم خارج می شوند؛ اما درصدی از خرابی هایی که در تعمیرات برنامه ریزی شده تعمیر نشده اند، به قسمت تعمیرات برنامه ریزی نشده منتقل می گردند و بر نرخ خرابی اثر می گذارند. تأخیر در خرابی ها در کاهش نرخ خرابی مؤثرند. از حاصل ضرب نرخ خرابی و احتمال آسیب جانبی، متغیر آسیب جانبی به دست می آید. متغیر احتمال آسیب جانبی از مقدار پارامتر عیوب احتمالی هر تجهیز حاصل می شود. همچنین از تقسیم متغیر تجهیزات در معرض خطر که در زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر قرار دارد بر حاصل ضرب عیوب احتمالی هر تجهیز و تعداد تجهیزات، متغیر نسبت تجهیزات در معرض خطر بر عیوب احتمالی به دست می آید که این متغیر بر عامل خطر

هزینه و ایمنی است که به ترتیب سه زیرسیستم اول از مقاله مرجع و مقاله گری و همکاران (۲۰۱۸) [۲۳] برگرفته شده و طراحی زیرسیستم ایمنی جهت توسعه مدل توسط نویسندگان مقاله حاضر صورت گرفته است. نوآوری این مقاله، گسترش مدل تعمیر و نگهداری نیروگاه با در نظر گرفتن شاخص های ایمنی و همچنین شبیه سازی مدل ارائه شده با نرم افزار انی لاجیک است. جزئیات هر یک از این زیرسیستم ها در ادامه تشریح شده است.

۳-۱- زیرسیستم تعمیرات

یکی از مهم ترین زیرسیستم های مدل تحقیق، زیرسیستم تعمیرات است که شامل تعمیرات برنامه ریزی شده و تعمیرات برنامه ریزی نشده است (شکل ۱). در این زیرسیستم، تجهیزات یا به طور ناگهانی و در حین کار خراب می شوند و ناگزیر تعمیرات برنامه ریزی نشده روی تجهیزات صورت می گیرد و تجهیزات به عملکرد کامل برمی گردند یا تجهیزات در بازه های زمانی مشخص به منظور انجام تعمیرات برنامه ریزی شده متوقف می شوند و دوباره تجهیزات به عملکرد کامل بازمی گردند. همان طور که در



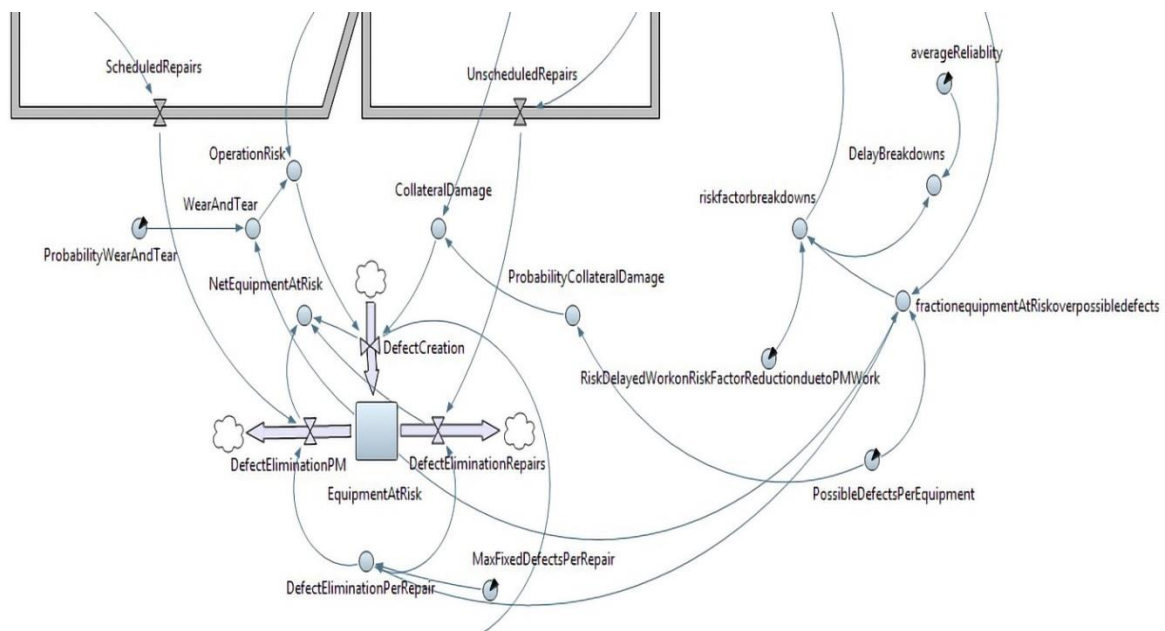
شکل ۱- نمودار جریان زیرسیستم تعمیرات

خرابی‌ها اثرگذار است. متغیر عامل خطر خرابی‌ها و مقدار پارامتر متوسط قابلیت اطمینان بر تأخیر خرابی‌ها مؤثرند. همچنین عواملی چون فشار تولید، تأخیر تعمیرات برنامه ریزی نشده و حداکثر ظرفیت تعمیرات برنامه ریزی نشده خود تحت تأثیر منابع و بهره‌وری است، بر تعمیرات برنامه ریزی نشده اثرگذار هستند. از سوی دیگر، فشار تولید، تأخیر تعمیرات برنامه ریزی شده و حداکثر ظرفیت تعمیرات برنامه ریزی شده، از عوامل اثرگذار بر تعمیرات برنامه ریزی شده هستند. در شکل (۱) نمودار جریان زیرسیستم تعمیرات با تمامی جزئیات نمایش داده شده است.

خرابی‌ها اثرگذار است. متغیر عامل خطر خرابی‌ها و مقدار پارامتر متوسط قابلیت اطمینان بر تأخیر خرابی‌ها مؤثرند. همچنین عواملی چون فشار تولید، تأخیر تعمیرات برنامه ریزی نشده و حداکثر ظرفیت تعمیرات برنامه ریزی نشده خود تحت تأثیر منابع و بهره‌وری است، بر تعمیرات برنامه ریزی نشده اثرگذار هستند. از سوی دیگر، فشار تولید، تأخیر تعمیرات برنامه ریزی شده و حداکثر ظرفیت تعمیرات برنامه ریزی شده، از عوامل اثرگذار بر تعمیرات برنامه ریزی شده هستند. در شکل (۱) نمودار جریان زیرسیستم تعمیرات با تمامی جزئیات نمایش داده شده است.

۳-۲- زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر

از دیگر زیرسیستم‌های مدل، زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر است (شکل ۲). تعداد تجهیزات در معرض خطر با افزایش تعداد عیوب، افزایش و از طریق تعمیرات برنامه ریزی شده و برنامه ریزی نشده کاهش می‌یابد (متغیر مربوطه به صورت متغیر حالت در شکل ۲) قابل مشاهده



شکل ۲ - نمودار جریان زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر

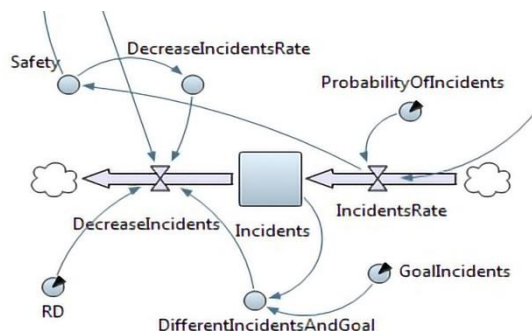
می‌شود. همچنین در این زیرسیستم، تعداد حادثه‌ها به عنوان هدف در نظر گرفته شده که با توجه به ماهیت آن، به صورت حلقه هدف جو طراحی شده است، به گونه‌ای که درصد تلاش جهت کاهش حوادث، متأثر از فاصله بین وضعیت حوادث موجود و تعداد حوادث مورد هدف است. از طرفی، افزایش ایمنی در این زیرسیستم باعث کاهش نرخ خرابی در زیرسیستم تعمیرات می‌شود.

۳-۳- زیرسیستم ایمنی

در زیرسیستم ایمنی، حوادث از طریق نرخ حوادث انباشت می‌شوند و از طریق نرخ کاهش حوادث و افزایش ایمنی کاهش می‌یابند (شکل ۳).

در شکل (۳) نمودار جریان زیرسیستم ایمنی نشان داده شده است. نرخ حوادث، درصدی از عیوب است که از زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر به این زیرسیستم وارد

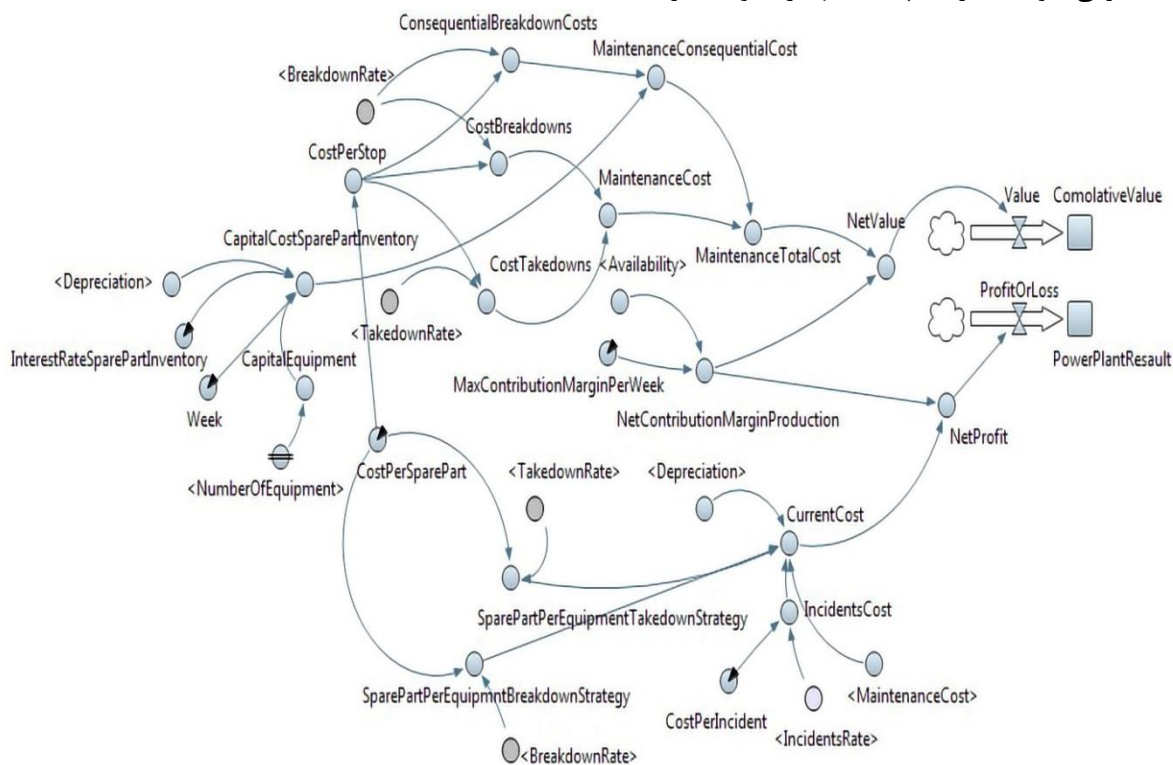
خواهد شد. در نهایت هزینه کل نگهداری و تعمیرات از مجموع هزینه پیامد نگهداری و تعمیرات و هزینه نگهداری و تعمیرات تشکیل شده است. از طرف دیگر، حاشیه سود خالص تولید از حاصل ضرب حداکثر حاشیه سود هر هفته، در دسترس بودن تجهیزات و عدد ۵۲ که تعداد هفته در سال است، به دست می آید. شایان ذکر است واحد زمان در نرم افزار برحسب سال است. از اختلاف حاشیه سود خالص تولید و هزینه کل نگهداری و تعمیرات، ارزش خالص حاصل می شود. از سوی دیگر، هزینه های جاری شامل هزینه تعمیرات، هزینه حوادث، هزینه قطعات یدکی تعمیرات برنامه ریزی نشده و برنامه ریزی شده و استهلاک است. از اختلاف حاشیه سود خالص تولید و هزینه های جاری، سود خالص به دست می آید. متغیرهای مورد استفاده در نمودارهای مرتبط با زیرسیستم های نگهداری و تعمیرات، تجهیزات در معرض خطر، ایمنی و هزینه، در جدول ۲ معرفی و تشریح شده اند. به علت وجود تعداد زیادی متغیر در مدل، تنها برخی از مهم ترین متغیرهای به کاررفته در هر زیرسیستم در این جدول آورده شده است.



شکل ۳- نمودار جریان زیرسیستم ایمنی

۳-۴- زیرسیستم هزینه

همان طور که در شکل (۴) مشخص است، در زیرسیستم هزینه، ارزش خالص و سود خالص لحاظ شده است. در این زیرسیستم، هزینه تعمیرات از مجموع هزینه های توقف حین تعمیرات برنامه ریزی نشده و تعمیرات برنامه ریزی شده حاصل می شود. همچنین هر بار توقف در تعمیرات برنامه ریزی نشده سبب آسیب به تجهیزات دیگر و خسارات جانبی دیگر می شود که در نمودار، هزینه پیامد خرابی است. از سوی، هزینه سرمایه، از سرمایه تجهیزات، بهره سرمایه و استهلاک به وجود می آید. هزینه سرمایه و هزینه های پیامد خرابی موجب هزینه پیامد نگهداری و تعمیرات



شکل ۴- نمودار جریان زیرسیستم هزینه

جدول ۲- مهم‌ترین متغیرهای زیرسیستم‌ها

ردیف	تشریح متغیر	نام متغیر	علامت اختصاری
زیرسیستم نگهداری و تعمیرات			
۱	نرخ خرابی یا از کار افتادن تجهیزات	BreakdownRate	BR
۲	تجهیزات در بالاترین عملکرد	EquipmentInFullFunctionality	EIFF
۳	در دسترس بودن تجهیزات	Availability	A
۴	نرخ از کار انداختن تجهیزات	TakedownRate	TR
۵	عملکرد از کار انداختن برنامه‌ریزی شده تجهیزات و تأخیرات برنامه	TakedownRateP	TRP
۶	نرخ استهلاک	DepreciationRate	DR
زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر			
۱	تجهیزات در معرض خطر	EquipmentAtRisk	EAR
۲	ایجاد عیب	DefectCreation	DC
۳	آسیب جانبی	CollateralDamage	CD
۴	خطرات عملیاتی	OperationRisk	OR
زیرسیستم ایمنی			
۱	نرخ حوادث	IncidentsRate	IR
۲	ایمنی	Safety	S
۳	کاهش حوادث	DecreaseIncidents	DI
۴	حوادث	Incidents	I
زیرسیستم هزینه			
۱	هزینه از کار انداختن تجهیزات	CostTakedowns	CT
۲	هزینه نگهداری و تعمیرات	MaintenanceCost	MC
۳	هزینه کل نگهداری و تعمیرات	MaintenanceTotalCost	MTC
۴	هزینه‌های متعاقب خرابی	ConsequentialBreakdownCosts	CBC
۵	هزینه جاری	CurrentCost	CC
۶	سرمایه تجهیزات	CapitalEquipment	CE
۷	حداکثر حاشیه سود هر هفته	MaxContributionMarginPerWeek	MCMPW
۸	حاشیه سود خالص تولید	NetContributionMarginProduction	NCMP
۹	سود خالص	NetProfit	NP
۱۰	ارزش خالص	NetValue	NV

۳-۵- معادلات داینامو و مقادیر عددی

همان طور که پیش‌تر بیان شد، بین متغیرهای مهم و کلیدی مدل، روابط علی و معلولی معینی برقرار است و به دفعات بین متغیرها ارتباط رفت و برگشتی صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، هریک از آن‌ها در کاهش یا افزایش دیگری به‌صورت پویا و در قالب روابط علی و معلولی مؤثر هستند. به‌منظور طراحی مدل، ابتدا کلیه عوامل تأثیرگذار بر هر زیرسیستم نگهداری تعمیرات و ایمنی، بررسی و استخراج شد. مهم‌ترین هدف این پژوهش نشان دادن کاربرد پویایی‌های سیستم در موضوع نگهداری و تعمیرات نیروگاه است و در پویایی‌های سیستم برای نشان دادن کاربرد آن، از اطلاعات مقاله مرجع استفاده می‌شود و چون هدف توسعه مدل برپایه مقاله بوده، داده‌ها براساس تجربه، شرایط بومی، آموزش، ایمنی و مقاله مرجع جمع‌آوری گردیده است. سپس با استفاده از نظر ۱۰ نفر از متخصصان و خبرگان، نمودار جریان طراحی شد. مشخصات متخصصان و خبرگان در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات افراد خبره نیروگاه

ردیف	سمت	تخصص	سابقه کار (سال)	تجربه (سال)
۱	فنی مهندسی	مدیر	۴۲	کارشناسی ارشد
۲	تعمیرات	رئیس	۴۸	دکتری
۳	مکانیک	رئیس	۴۰	کارشناسی ارشد
۴	مکانیک	کارشناس	۳۶	کارشناسی
۵	الکترونیک	رئیس	۴۵	کارشناسی ارشد
۶	الکترونیک	کارشناس	۳۴	کارشناسی
۷	ابزار دقیق	رئیس	۵۲	کارشناسی ارشد
۸	ابزار دقیق	کارشناس	۳۸	کارشناسی
۹	آموزش	مدیر	۴۰	کارشناسی ارشد
۱۰	ایمنی	مدیر	۳۹	کارشناسی ارشد

به علت حجم زیاد فرمول‌ها، روابط بین متغیرها و مقادیر پارامترها، تنها برخی از فرمول‌های مهم متغیرهای هر زیرسیستم آورده شده است. به‌عنوان مثال، همان طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، متغیر نرخ خرابی از جمع

عوامل اثرگذار آن به دست می‌آید. این عوامل شامل تجهیزات با بالاترین عملکرد تقسیم بر تأخیر خرابی‌ها (DB)، خرابی‌هایی که با تعمیرات برنامه‌ریزی شده رفع نشده و به متغیر تعمیرات برنامه‌ریزی نشده برگشته (BDUT) و متغیر ایمنی از آن کاسته شده و همچنین حاصل ضرب نرخ استهلاک در استهلاک (D) است.

برخی از فرمول‌ها از مقاله مرجع [۲۳] بوده، برخی براساس روابط منطقی بین متغیرها هستند. در این خصوص، جدول پیوست، روابط بین برخی از متغیرها و مراجعی که این روابط را تأیید می‌کنند ارائه می‌نماید؛ به این صورت که در جدول پیوست، متغیرهایی که بر نرخ خرابی اثر می‌گذارند آورده شده‌اند. سپس مرجعی که در آن از این متغیر استفاده شده و همچنین تأثیر و نوع اثر آن متغیر بر متغیر نرخ خرابی ذکر شده است. اگر متغیر ذکر شده در جدول بر نرخ خرابی اثر مستقیم نداشته باشد و به‌واسطه یک متغیر دیگر بر متغیر نرخ خرابی تأثیر بگذارد، نام آن متغیر در ستون «متغیر تأثیر مستقیم» ذکر می‌شود. همچنین آثار نرخ خرابی یا به‌عبارت دیگر، متغیر نرخ خرابی باعث به وجود آمدن متغیرهای دیگری شده که در جدول ذکر گردیده و مراجعی که این روابط را تأیید می‌کنند نیز آورده شده است.

$$BR = \frac{EIFF}{DB} + (BDUT - S) + (DR * D) \quad (1)$$

برای شبیه‌سازی مدل، نیاز به مقادیر عددی بود که براساس نظر خبرگان لحاظ گردید.

چون در اینجا هدف مقاله، بیشتر نشان دادن نحوه به‌کارگیری ابزارهای پویایی‌های سیستم است و هدف اصلی نتایج کاربردی نیست، می‌توان از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده کرد. همچنین درباره مقدار پارامترها، تنها خبرگان نیروگاه هستند که می‌توانند به سؤالاتی چون چند درصد خرابی در این سال‌ها وجود داشته و... پاسخ دهند. از طرفی، نوآوری اصلی مقاله، ارائه مدل‌های توسعه داده شده است و برای اینکه نتایج صرفاً قابل مقایسه باشند، از داده‌های مشترک استفاده گردیده است. در واقع داده‌ها مبتنی بر نظر خبرگان و مقاله مرجع است و همچنین داده‌ها پارامتریک هستند؛ یعنی قابلیت تغییر دارند. تحلیل روی پارامترها براساس نرم‌افزار می‌تواند به‌صورت پارامتریک تغییر کند که این قابلیت در نرم‌افزارهایی چون ونسیم و انی‌لاجیک وجود دارد که به‌صورت پارامتریک شبیه‌سازی انجام شود. بنابراین

نیروگاه‌های ایران از نوع سیکل ترکیبی با ظرفیت تولید ۴۸۴ مگاوات است که شامل دو واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی و یک واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی است. ظرفیت فعلی این نیروگاه ۳۲۴ مگاوات بوده، بخش بخار و سیکل ترکیبی آن هنوز به بهره‌برداری نرسیده است. با توجه به تعداد کل تجهیزات که ۵۰ و مقدار اولیه متغیر تجهیزات با بالاترین عملکرد که ۴۰ است، مقدار اولیه متغیر تجهیزات در معرض خطر، مقدار ۱۰ فرض گردید. این فرض که به‌طور متوسط ۲۰ درصد تجهیزات در معرض خطر هستند، با توجه به نظر خبرگان نیروگاه در نظر گرفته شده است.

$$EAR = DC - DER - DEPM \quad (۶)$$

مطابق روابط (۷)، (۸) و (۹)، متغیر ایجاد عیب از جمع آسیب جانبی و خطرهای عملیاتی به دست می‌آید. متغیر آسیب جانبی، نتیجه حاصل ضرب نرخ خرابی در احتمال آسیب جانبی (PCD) است. خطرهای عملیاتی از حاصل ضرب فرسودگی تجهیزات (WT) و تجهیزات با بالاترین عملکرد به دست می‌آید.

$$DC = CD + OR \quad (۷)$$

$$CD = BR * PCD \quad (۸)$$

$$OR = WT * EIFF \quad (۹)$$

در زیرسیستم ایمنی، طبق روابط (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، متغیر نرخ حوادث از حاصل ضرب ایجاد عیب در احتمال حوادث (PI) به دست می‌آید. متغیر ایمنی با نرخ حوادث ارتباط دارد و دارای تابع نمایی است. در زیرسیستم ایمنی، مقدار صفر برای تعداد حادثه هدف در نظر گرفته شده است که فرمول آن براساس حلقه هدف‌جو بوده، به اندازه درصدی (RD) از اختلاف تعداد حوادث موجود و تعداد حادثه هدف، تلاش لازم است تا حوادث را کاهش دهد که این مقدار RD در فرمول متغیر کاهش حوادث، در تعمیرات برنامه‌ریزی شده و نرخ کاهش حوادث (DIR)، ضرب می‌شود و با مقدار اختلاف تعداد حوادث موجود و تعداد حادثه هدف (DG) جمع می‌گردد. از اختلاف نرخ حوادث و کاهش حوادث، متغیر حوادث به دست می‌آید.

$$IR = DC * PI \quad (۱۰)$$

$$S = exp(-IR) \quad (۱۱)$$

استفاده از داده‌ها به‌صورت پارامتریک، امری بدیهی است. استفاده از داده‌های واقعی نیاز به تحقیقات میدانی دارد که برای این کار زمان زیادی لازم است؛ اما به‌عنوان پیشنهادها، تحقیقات آتی در قسمت نتیجه‌گیری اضافه گردید.

در رابطه (۲)، مقدار اولیه متغیر تجهیزات با بالاترین عملکرد در دوره اول شبیه‌سازی ۴۰ در نظر گرفته شد. این رابطه بیان می‌کند اگر تجهیزات با بالاترین عملکرد، بیشتر از تعداد تجهیزات (NE) باشد، مقدار ۵۰ برای EIFF در نظر گرفته شود؛ زیرا حداکثر تعداد تجهیزات ۵۰ فرض شده بود. در غیر این صورت، طبق رابطه (۲)، برای محاسبه EIFF، نرخ خرابی (BR) و نرخ از کار انداختن تجهیزات (TR)، از جمع تعمیرات برنامه‌ریزی شده (SR) و تعمیرات برنامه‌ریزی نشده (UR)، کم می‌شود.

$$EIFF > NE? 50: (SR + UR - BR - TR) \quad (۲)$$

در رابطه (۳)، متغیر در دسترس بودن تجهیزات از تقسیم تعداد تجهیزات با بالاترین عملکرد بر تعداد تجهیزات به‌دست‌آمده و طبق روابط (۴) و (۵)، متغیر نرخ از کار انداختن تجهیزات برابر با متغیر TRP است. متغیر TRP از رابطه‌ای شرطی، رابطه (۵)، به دست می‌آید، به این صورت که اگر مقدار تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده (SM)، بزرگ‌تر از حاصل ضرب مقدار عددی حد نرخ از کار انداختن تجهیزات (LTR) در تعداد تجهیزات تقسیم بر فشار تولید (PP) شود، مقدار متغیر TRP صفر می‌شود و اگر این شرط برقرار نبود، مقدار آن برابر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده (PSM) تقسیم بر فشار تولید خواهد بود. در واقع با این فرمول، این اطمینان حاصل می‌شود که بیش از ظرفیت، تجهیزات برای نگهداری و تعمیرات ارسال نشود.

$$A = \frac{EIFF}{NE} \quad (۳)$$

$$TR = TRP \quad (۴)$$

$$SM > \left[\frac{LTR * NE}{PP} \right] ? 0: \left(\frac{PSM}{PP} \right) \quad (۵)$$

از دیگر متغیرها، تجهیزات در معرض خطر است که طبق رابطه (۶) متغیرهای حذف عیوب از طریق تعمیرات پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده (DEPM) و حذف عیوب از طریق تعمیرات برنامه‌ریزی نشده (DER) از متغیر ایجاد عیب کم می‌شود. نیروگاه شهید بسطامی شاهرود یکی از

و از طریق تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده و تعمیرات برنامه‌ریزی نشده در زیرسیستم تعمیرات صورت می‌گیرد. همچنین حوادث در زیرسیستم ایمنی از درصدی از ایجاد عیوب در زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر به وجود می‌آید و از طرفی، متغیر ایمنی در زیرسیستم ایمنی بر نرخ خرابی در زیرسیستم نگهداری و تعمیرات اثرگذار است، به این صورت که افزایش ایمنی، نرخ خرابی را کاهش می‌دهد. در زیرسیستم هزینه، هزینه‌های مربوط به استهلاک، نرخ خرابی، تعمیرات و نرخ از کار انداختن تجهیزات، از زیرسیستم تعمیرات و هزینه حوادث از زیرسیستم ایمنی اثر می‌پذیرد.

طبق نمودار جریان مدل نگهداری تعمیرات و ایمنی ارائه شده در این پژوهش، زمانی که نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده باشد، برخی از ماشین‌آلات به صورت برنامه‌ریزی‌شده از کار انداخته شده، پس از انجام تعمیرات، تجهیزات به عملکرد کامل بازمی‌گردند. در غیر این صورت، تجهیزات به دلیل نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی‌نشده به طور ناگهانی از کار می‌افتند که باعث اتلاف وقت، توقفات اضطراری حین کار، افزایش حوادث، کاهش ایمنی و افزایش هزینه می‌شود. همچنین زمان توقف جهت تعمیرات برنامه‌ریزی‌نشده بیشتر از تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده است؛ زیرا در تعمیرات برنامه‌ریزی‌نشده زمان زیادی صرف تشخیص خرابی، یافتن دستورالعمل‌ها و تهیه قطعات یدکی و ابزار می‌شود. تعداد تجهیزات، فشار تولید و برنامه تعمیرات پیشگیرانه بر نرخ از کار انداختن تجهیزات اثرگذار است. استهلاک ناشی از خرابی‌های احتمالی در طول زمان، تأخیر خرابی‌ها، ایمنی و بخشی از خرابی‌ها که با تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده انجام نشده‌اند، بر نرخ خرابی مؤثر هستند. هر خرابی باعث خسارات جانبی می‌شود.

از سوی دیگر، خسارات جانبی و فرسودگی تجهیزات به دلیل عملیات، باعث ایجاد عیوب و به دنبال آن باعث در معرض خطر قرار گرفتن تجهیزات می‌شود. تجهیزات در معرض خطر از طریق تعمیرات برنامه‌ریزی‌نشده یا تعمیرات پیشگیرانه رفع عیب می‌شوند. همچنین بخشی از عیوب باعث ایجاد حوادث شده، افزایش حوادث باعث کاهش ایمنی می‌گردد. کاهش ایمنی باعث افزایش نرخ خرابی خواهد شد. هرچه تعمیرات و نگهداری به صورت برنامه‌ریزی شده انجام شود، موجب کاهش تجهیزات در معرض خطر، کاهش حوادث و افزایش ایمنی می‌گردد و

$$DI = (RD * SR * DIR + DG) \quad (12)$$

$$I = (IR - DI) \quad (13)$$

در زیرسیستم هزینه، طبق روابط (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷)، متغیر هزینه از کار انداختن تجهیزات، از حاصل ضرب نرخ از کار انداختن تجهیزات و هزینه هر بار توقف (CS) حاصل می‌شود. متغیر هزینه تعمیرات، حاصل جمع هزینه خرابی‌ها (CB) و هزینه از کار انداختن تجهیزات است. هزینه کل تعمیرات از جمع هزینه متعاقب تعمیرات (MCC) و هزینه تعمیرات به دست آمده است. هزینه‌های متعاقب خرابی، از ضرب نرخ خرابی در هزینه هر بار توقف حاصل می‌شود.

$$CT = CS * TR \quad (14)$$

$$MC = CB + CT \quad (15)$$

$$MTC = MCC + MC \quad (16)$$

$$CBC = BR * CS \quad (17)$$

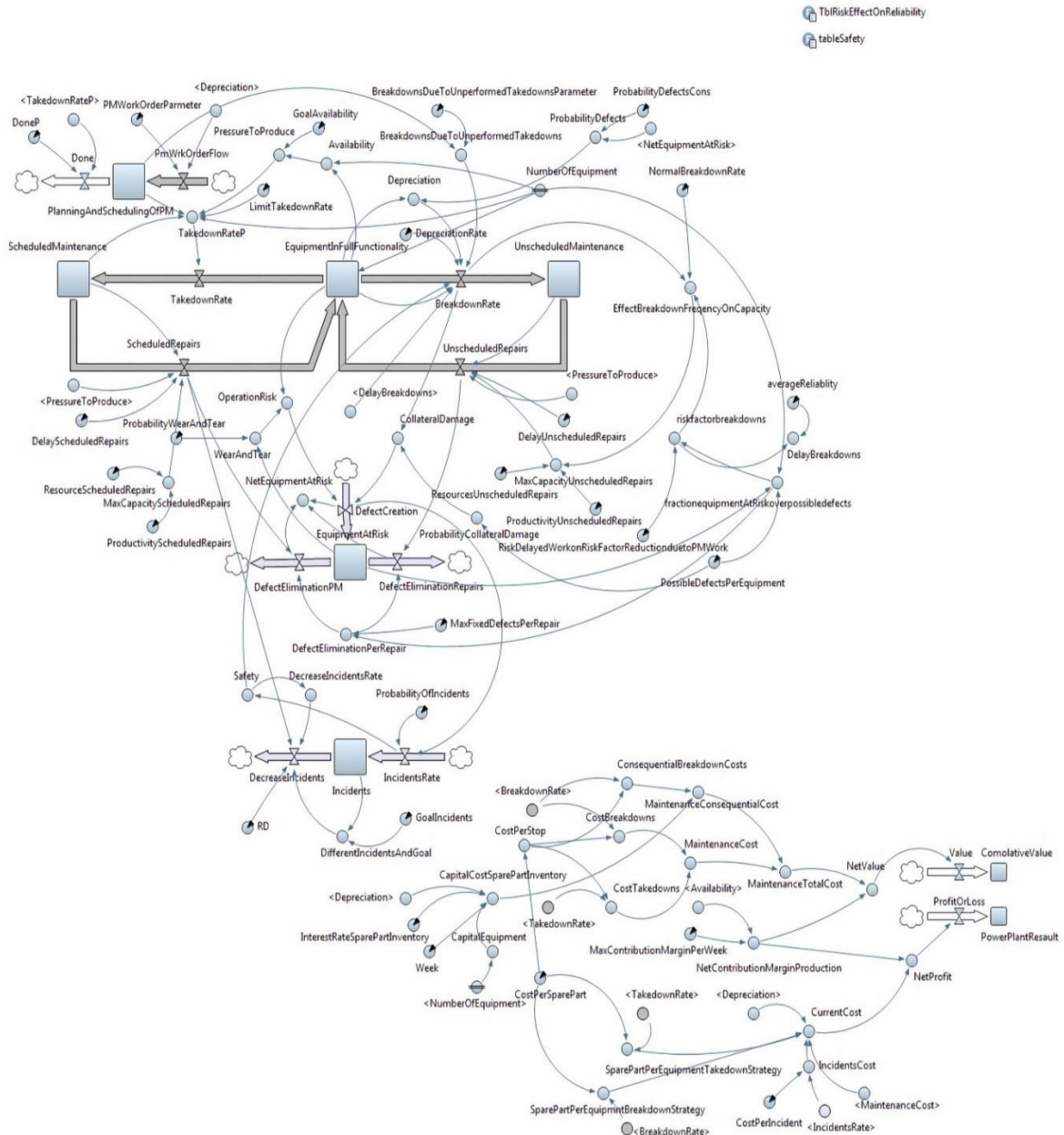
مطابق روابط (۱۸) و (۱۹)، هزینه جاری حاصل جمع هزینه‌های استهلاک (که در هزینه مربوط به استهلاک ضرب شده است)، هزینه قطعات یدکی تجهیزات در حین تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده (SETS) و تعمیرات برنامه‌ریزی‌نشده (SEBS)، هزینه حوادث (IC) و هزینه تعمیرات است. سرمایه تجهیزات برابر با تعداد تجهیزات ضرب در قیمت هر یک از تجهیزات است. قیمت هر تجهیز ۳۵۰۰ واحد فرض شد.

$$CC = (D * 2000) + SETS + SEBS + IC + MC \quad (18)$$

$$CE = (NE * 3500) \quad (19)$$

۳-۶- نمودار جریان مدل پژوهش

با توجه به توضیحات مربوط به هر یک از زیرسیستم‌های طراحی‌شده، نمودار جریان مدل پژوهش در شکل (۵) به نمایش درآمده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، چهار زیرسیستم نگهداری و تعمیرات، تجهیزات در معرض خطر، ایمنی و هزینه‌ها به هم مرتبط شده است. ایجاد عیوب در زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر، از نرخ خرابی و فرسودگی تجهیزات در زیرسیستم تعمیرات به وجود می‌آید. علاوه بر این، حذف عیوب در زیرسیستم تجهیزات در معرض خطر توسط حذف خرابی در هر تعمیر



شکل ۵- نمودار جریان مدل نگهداری تعمیرات و ایمنی نیروگاه

۴- یافته‌های تحقیق

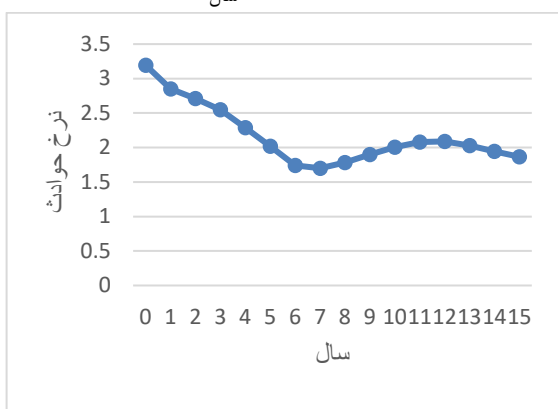
مدل شبیه‌سازی شده، پس از طراحی اجرا گردید. برای این منظور، با کمک نرم‌افزار انی‌لاجیک، مدل برای مدت ۱۵ سال شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفت. سپس سه سناریوی بهبود برای سیستم جاری پیشنهاد گردید و نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با یکدیگر مقایسه و تحلیل شد.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی سیستم جاری

در اینجا نرخ خرابی، نرخ از کار انداختن تجهیزات، قابلیت دسترسی، ایمنی، نرخ حوادث، هزینه حوادث، سود یا ضرر و هزینه جاری مدل شبیه‌سازی شده مورد تحلیل قرار

منجر به کاهش تعمیرات و نگهداری برنامه‌ریزی نشده خواهد شد. هزینه کل نگهداری و تعمیرات، از مجموع هزینه پیامد نگهداری و تعمیرات که شامل هزینه سرمایه ماشین‌آلات و هزینه هر بار توقف در اثر تعمیرات برنامه‌ریزی نشده است و هزینه نگهداری و تعمیرات تشکیل شده است. ارزش خالص از اختلاف حاشیه سود خالص تولید و هزینه کل نگهداری و تعمیرات به دست می‌آید. همچنین هزینه‌های جاری، شامل هزینه‌های قطعات یدکی تعمیرات، استهلاک، هزینه حوادث، هزینه آموزش و هزینه تعمیرات است که از اختلاف حاشیه سود خالص تولید و هزینه‌های جاری، سود خالص مشخص می‌شود.

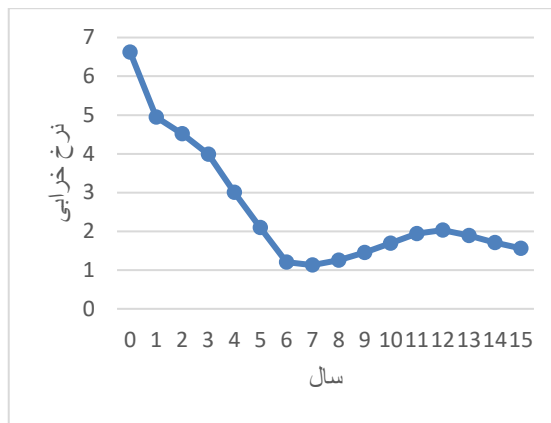
آتی در حال افزایش خواهد بود و مقدار آن از ۰ در سال صفر به ۳/۵۰۵ در سال پانزدهم می رسد. واحد نرخ از کار انداختن تجهیزات، $\frac{1}{سال}$ است. نمودار ارائه شده در شکل (۸) نشان می دهد به دلیل کاهش نرخ خرابی و در نتیجه کاهش ایجاد عیوب، نرخ حوادث تا سال هفتم از مقدار ۳/۱۹۵ به مقدار ۱/۷۰ کاهش یافته، از سال هشتم تا سال دوازدهم به دلیل افزایش نرخ خرابی، خطرها و به دنبال آن، افزایش حوادث، از مقدار ۱/۷۸۳ به مقدار ۲/۰۹ افزایش خواهد یافت. سپس از سال سیزدهم تا سال پانزدهم، نرخ حوادث به دلیل کاهش نرخ خرابی، از مقدار ۲/۰۲۸ به مقدار ۱/۸۶۸ کاهش می یابد. واحد نرخ حوادث، $\frac{1}{سال}$ است.



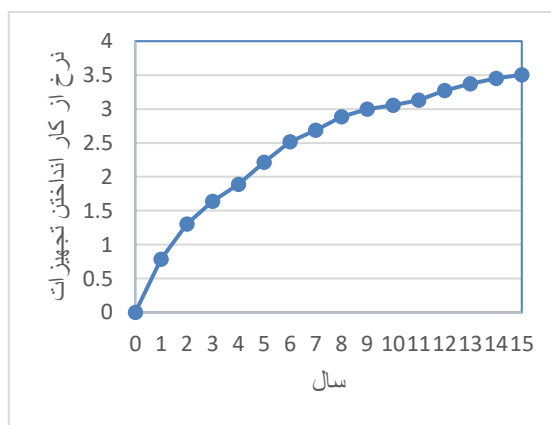
شکل ۸- نمودار تغییرات نرخ حوادث

از سال صفر تا سال هفتم به دلیل کاهش نرخ خرابی، خطرها و به دنبال آن، کاهش حوادث، ایمنی از مقدار ۰/۰۴۱ در سال صفر به مقدار ۰/۱۸۳ در سال هفتم افزایش می یابد (شکل ۹)؛ ولی از سال هشتم تا سال دوازدهم به دلیل افزایش نرخ خرابی، ایجاد عیوب و تجهیزات در معرض خطر، مقدار ایمنی از مقدار ۰/۱۶۸ در سال هشتم به مقدار ۰/۱۲۴ در سال دوازدهم کاهش خواهد یافت. سپس مجدداً از سال سیزدهم تا سال پانزدهم به دلیل کاهش نرخ خرابی و ایجاد عیوب، مقدار ایمنی از ۰/۱۳۲ در سال سیزدهم به ۰/۱۵۴ در سال پانزدهم افزایش می یابد. واحد ایمنی، درصد است. مطابق شکل (۱۰) قابلیت دسترسی طی سه سال اول به دلیل مقدار زیاد کاهش تعمیرات برنامه ریزی نشده کاهش می یابد. به عبارت دیگر، تعمیرات برنامه ریزی شده به مقدار کم در حال افزایش خواهد بود و از مقدار صفر به ۱/۰۳۹ می رسد؛ در نتیجه تعداد تجهیزات با عملکرد بالا کاهش یافته، مقدار قابلیت دسترسی نیز از ۰/۸ در سال صفر به ۰/۷۷۵ در سال سوم می رسد.

می گیرد. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، طی ۱۵ سال آتی در سیستم فعلی، نرخ خرابی تا سال هفتم کاهش می یابد؛ زیرا نرخ از کار انداختن تجهیزات برای تعمیرات برنامه ریزی شده و ایمنی در حال افزایش است و همین سبب کاهش نرخ خرابی می شود. نرخ خرابی در سال صفر، برابر با ۶/۶۲۶ و در سال هفتم ۱/۱۲۸ است. سپس از سال هشتم تا سال دوازدهم به دلیل افزایش تجهیزات در معرض خطر و افزایش خطرها، تأخیر در خرابی کاهش می یابد و سبب افزایش نرخ خرابی می شود. مقدار نرخ خرابی در سال هشتم، ۱/۲۵۳ و در سال دوازدهم ۲/۰۳۱ خواهد بود و مجدداً از سال دوازدهم تا سال پانزدهم به دلیل کاهش خطرها و افزایش تأخیر در خرابی ها، نمودار روند کاهشی پیدا می کند و نرخ خرابی در سال پانزدهم، ۱/۵۶۲ می باشد. واحد نرخ خرابی، $\frac{1}{سال}$ است.

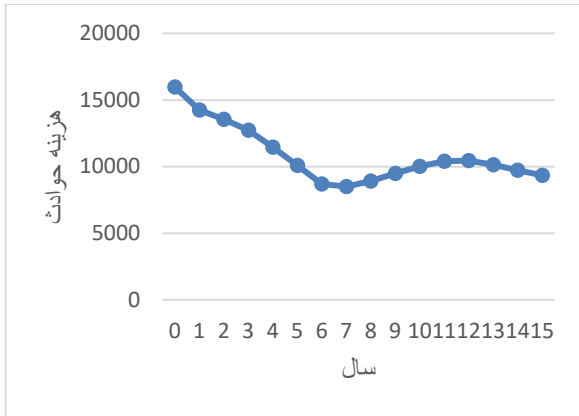


شکل ۶- نمودار تغییرات نرخ خرابی



شکل ۷- نمودار تغییرات نرخ از کار انداختن تجهیزات

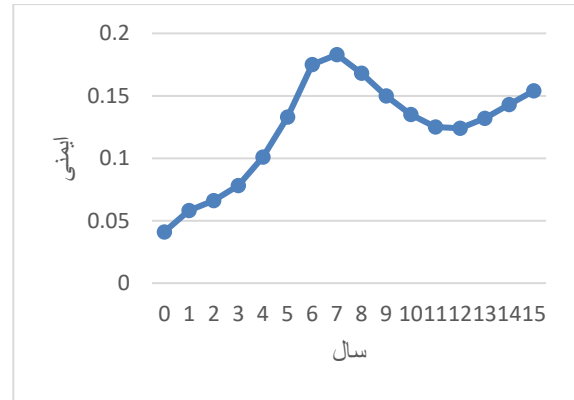
در شکل (۷)، نمودار نرخ از کار انداختن تجهیزات برای تعمیرات برنامه ریزی شده نشان داده شده است. نرخ از کار انداختن تجهیزات و تعمیرات برنامه ریزی شده طی ۱۵ سال



شکل ۱۱- نمودار تغییرات هزینه واحد حوادث

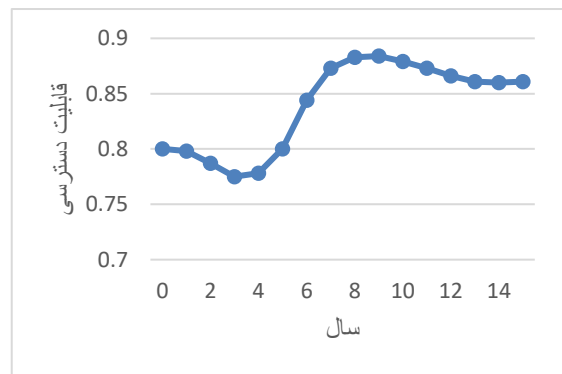
واحد هزینه حوادث، واحد پولی است که دلار در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱۲)، هزینه جاری در سال اول افزایشی است؛ زیرا همه هزینه‌ها شامل هزینه قطعات یدکی تعمیرات برنامه‌ریزی شده، هزینه تعمیرات و استهلاک در سال اول افزایشی است و فقط هزینه‌های قطعات یدکی تعمیرات برنامه‌ریزی نشده و حوادث به مقدار کمی نزولی است. هزینه جاری از سال دوم تا سال چهارم از مقدار $۱۶۱۲۳/۸۱$ به مقدار $۱۳۹۹۳/۷$ کاهش می‌یابد؛ زیرا کاهش نرخ خرابی سبب کاهش هزینه قطعات یدکی هر تجهیز در اثر خرابی می‌گردد و از طرفی، هزینه حوادث نیز کاهش یافته است. از سال چهارم تا سال پنجم هزینه جاری از مقدار $۱۳۹۹۳/۷$ به مقدار $۱۴۶۰۹/۱$ افزایش می‌یابد؛ زیرا نرخ از کار انداختن تجهیزات و در نتیجه هزینه تعمیرات و قطعات یدکی تعمیرات برنامه‌ریزی شده در حال افزایش است. از سال پنجم تا سال هفتم، نمودار از مقدار $۱۴۶۰۹/۱$ به مقدار $۱۳۰۱۹/۵۲$ کاهش می‌یابد؛ زیرا در این سال‌ها نرخ خرابی و نرخ حوادث کاهش می‌یابد که سبب کاهش هزینه قطعات یدکی، هزینه تعمیرات برنامه‌ریزی نشده و هزینه حوادث و در نتیجه کاهش هزینه جاری می‌شود. سپس از مقدار ۱۵۴۷۵ در سال هشتم به مقدار $۱۹۱۳۴/۲$ در سال دوازدهم افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش نرخ خرابی، نرخ حوادث و در نتیجه افزایش تعمیرات، همه هزینه‌های مذکور افزایش می‌یابد. هزینه جاری دوباره از سال دوازدهم از مقدار $۱۸۰۲۷/۳۹$ تا سال پانزدهم به مقدار $۱۸۰۲۷/۳۹$ کاهش می‌یابد؛ زیرا نرخ خرابی و نرخ حوادث در حال کاهش است و در نتیجه هزینه تعمیرات، قطعات یدکی و هزینه حوادث کاهش می‌یابد. واحد هزینه جاری، واحد پولی است که دلار در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- نمودار تغییرات ایمنی

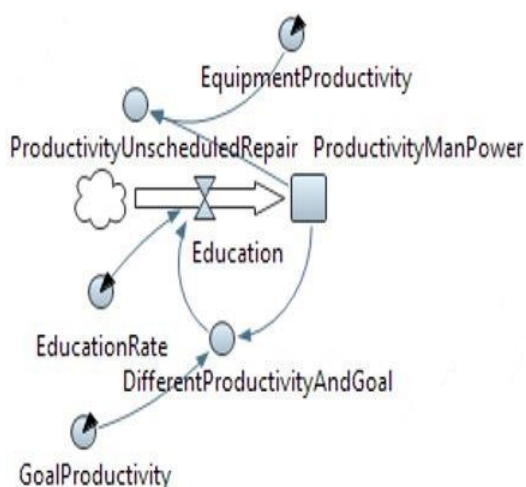
از سال چهارم تا سال نهم نمودار قابلیت دسترسی روند افزایشی دارد؛ زیرا نرخ از کار انداختن تجهیزات و تعمیرات برنامه‌ریزی شده در حال افزایش است. از طرفی، نرخ خرابی و تعمیرات برنامه‌ریزی نشده در حال کاهش است. قابلیت دسترسی در سال چهارم $۰/۷۷۸$ است که در سال نهم به مقدار $۰/۸۸۴$ افزایش می‌یابد. از سال دهم تا سال چهاردهم کاهش تجهیزات با عملکرد کامل به دلیل افزایش نرخ خرابی و افزایش از کار انداختن تجهیزات، سبب کاهش قابلیت دسترسی از $۰/۸۷۹$ در سال دهم به مقدار $۰/۸۶$ در سال چهاردهم می‌شود. مقدار قابلیت دسترسی در سال پانزدهم، $۰/۸۶۱$ می‌باشد. واحد قابلیت دسترسی به تجهیزات، درصد است.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات قابلیت دسترسی

هزینه حوادث تا سال هفتم به دلیل کاهش حوادث و افزایش ایمنی، روند کاهشی دارد و از مقدار $۱۵۹۷۵/۴۲$ به مقدار $۸۴۹۹/۴۸۸$ در سال هفتم می‌رسد؛ ولی از سال هشتم تا سال دوازدهم به دلیل افزایش حوادث، هزینه حوادث از مقدار $۸۹۱۳/۴۹۵$ به مقدار $۱۰۴۴۸/۲۱$ افزایش می‌یابد و از سال سیزدهم تا سال پانزدهم مجدداً هزینه حوادث از مقدار $۱۰۱۴۱/۹۹$ به مقدار $۹۳۴۱,۶۶۸$ می‌رسد. این تغییرات در نمودار ارائه شده در شکل (۱۱) دیده می‌شود.

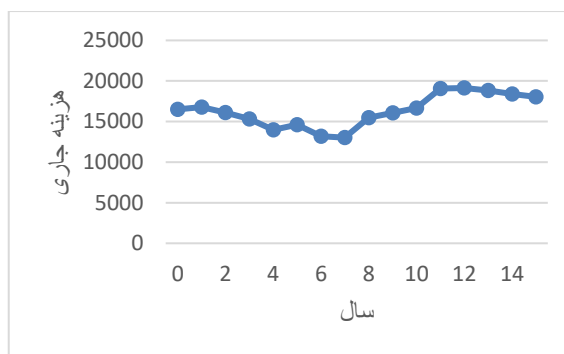
گردید. نمودار جریان آموزش در حالت سناریوی یک در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴- نمودار جریان آموزش

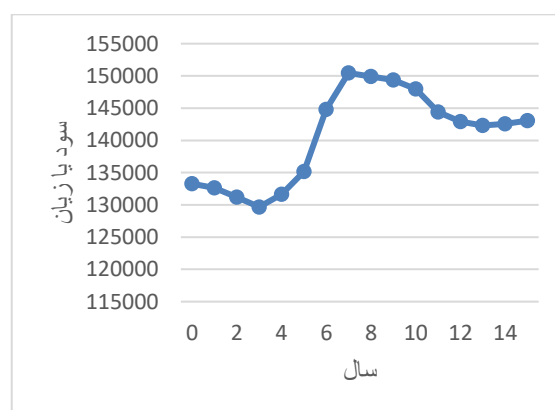
برخی از سیستم‌ها با رفتارشان به دنبال نیل به هدفی هستند که پس از رسیدن به آن، دیگر تمایلی برای ادامه بروز رفتار در سیستم مشاهده نمی‌شود. همان طور که در شکل (۱۴) مشخص است، در نمودار جریان آموزش از لوپ هدف‌جو استفاده شده است. در اینجا سیستم هدف‌جو به این صورت است که متغیر اختلاف مقدار بهره‌وری هدف و مقدار بهره‌وری نیروی انسانی موجود در یک مقدار نرخ ثابت آموزش ضرب شده، مقدار آموزش را محاسبه می‌کند؛ یعنی در هر دوره به اندازه این مقدار به آموزش اضافه می‌شود. به عنوان مثال، مفهوم نرخ آموزش ۰٫۱ به این صورت است که در هر دوره به اندازه ۰٫۱ مقدار اختلاف، به آموزش فعلی اضافه می‌شود. مقادیر نرخ آموزش در این پژوهش به صورت پارامتریک در بازه‌ای که از کارشناسان پرسیده شده، چهار مقدار نرخ آموزش در چهار اجرا در خوش‌بینانه‌ترین و سخت‌گیرانه‌ترین حالت در نظر گرفته شده است.

در این سناریو برای بررسی اثر نرخ آموزش بر مدل و متغیرها، مدل چهار بار اجرا شد. نرخ آموزش در اجرای اول، مقدار صفر، در اجرای دوم مقدار ۰٫۱، در اجرای سوم مقدار ۰٫۲ و در اجرای چهارم مقدار ۰٫۳ لحاظ شده است. در واقع مقدار نرخ آموزش در بازه ۰ تا ۱، در هر اجرا افزایش یافته است تا تأثیر آن بر متغیرهای مورد نظر بررسی گردد. همان طور که مشاهده می‌کنید، در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر نرخ خرابی تا سال دوازدهم با افزایش مقدار نرخ آموزش از صفر تا ۰٫۳ طی چهار اجرا، نرخ خرابی کاهش یافته است. بعد از دوازده سال، افزایش نرخ آموزش بر کاهش نرخ خرابی



شکل ۱۲- نمودار تغییرات هزینه‌های جاری

در شکل (۱۳)، نمودار سود یا زیان نیروگاه نشان داده شده است. مقدار سود در ابتدا ۱۳۳۲۵۵ است و سه سال اول مقدار سود کاهشی است و در سال سوم به عدد ۱۲۹۶۷۷/۱ می‌رسد؛ زیرا قابلیت دسترسی سه سال اول کاهش می‌یابد. سود با قابلیت دسترسی تجهیزات رابطه مستقیم دارد. از سال سوم تا سال هفتم، سود افزایش می‌یابد و به مقدار ۱۵۰۴۴۷/۳ در سال هفتم می‌رسد؛ زیرا هزینه خرابی و هزینه حوادث در حال کاهش و قابلیت دسترسی تجهیزات افزایشی است. از سال هفتم تا سال سیزدهم، نمودار مجدداً نزولی است و به مقدار ۱۴۲۳۱۷/۳ در سال سیزدهم می‌رسد؛ زیرا در این بازه هزینه جاری در حال افزایش و قابلیت دسترسی تجهیزات در حال کاهش است. مقدار سود نیروگاه از سال سیزدهم تا سال پانزدهم به دلیل کاهش هزینه جاری به عدد ۱۴۳۰۷۶/۶ افزایش می‌یابد. واحد سود یا زیان، واحد پولی است که دلار در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات سود یا زیان

۴-۲- نتایج شبیه سازی سناریوهای بهبود

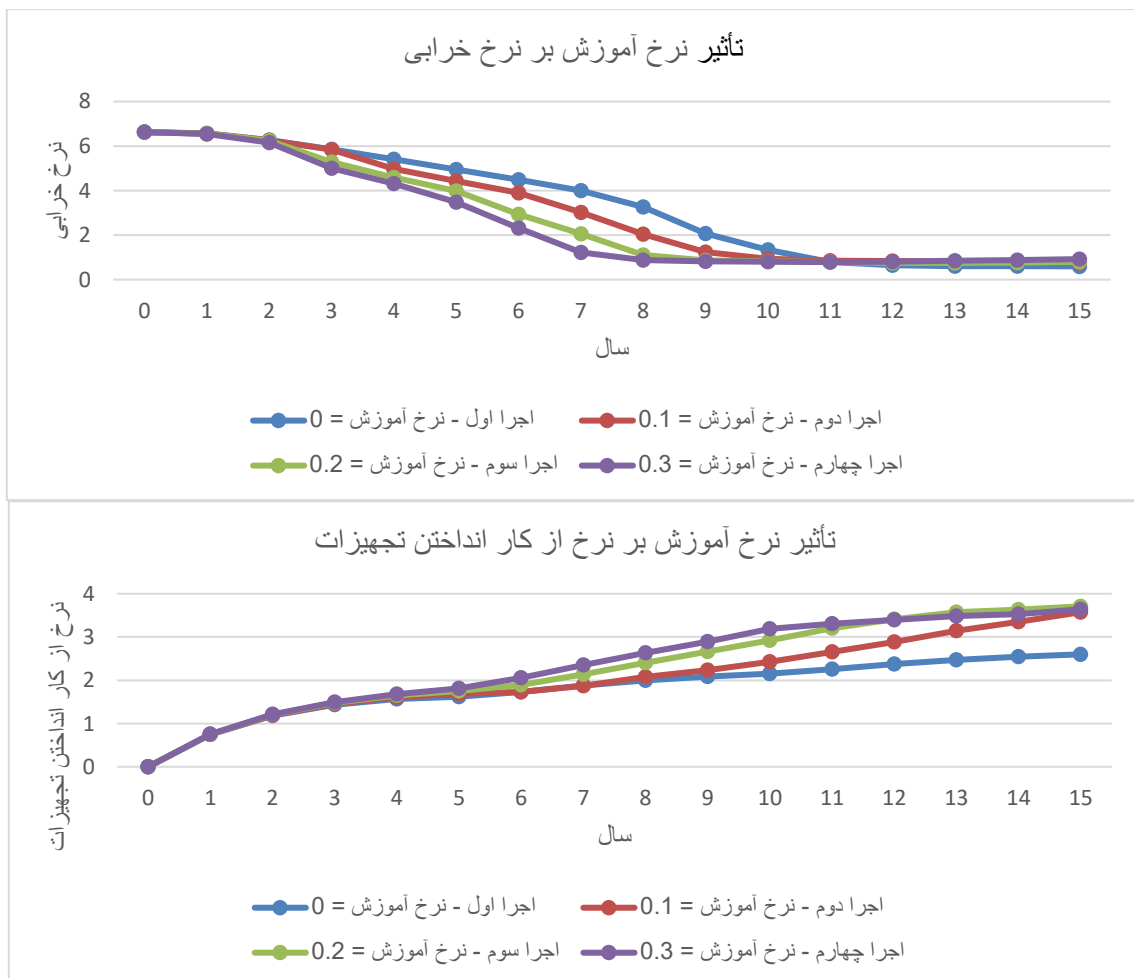
در این تحقیق سه سناریو برای بررسی نحوه دسترسی به اهداف در مدت زمان پانزده سال طراحی شد.

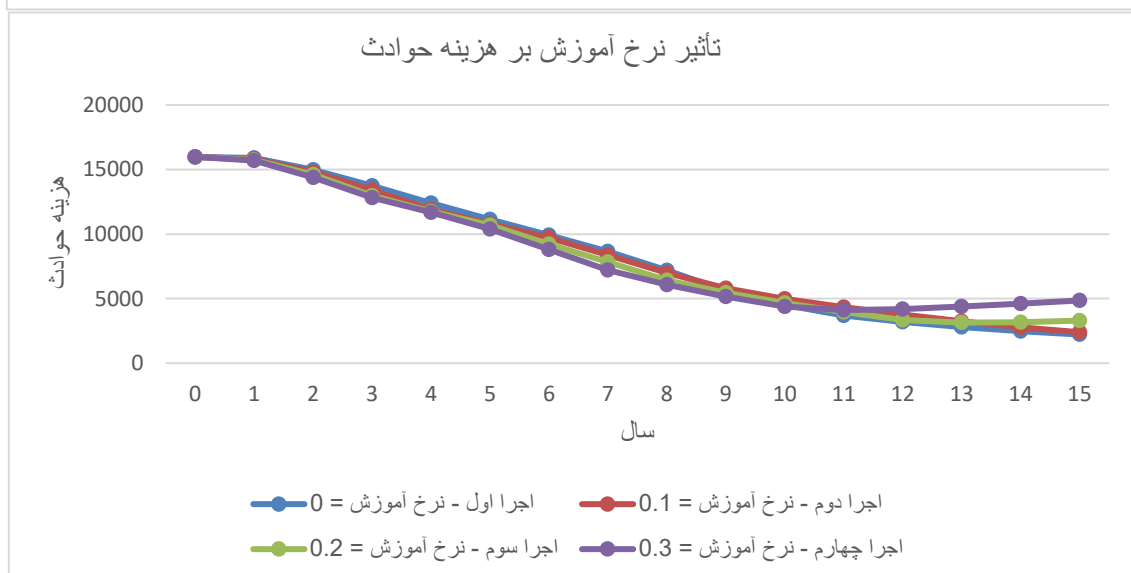
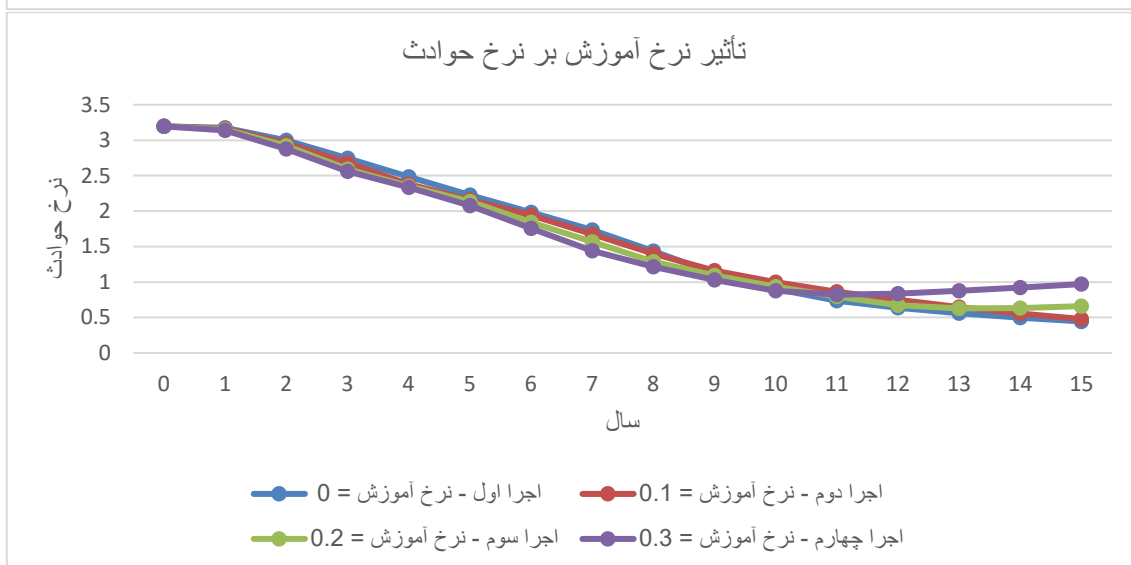
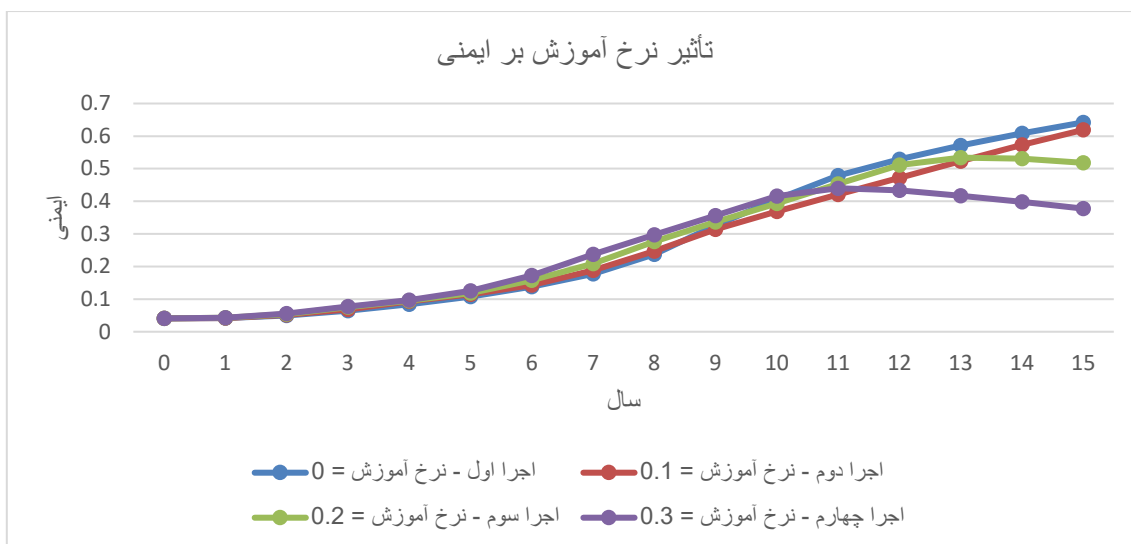
در سناریوی یک، آموزش به مدل اضافه شد و شبیه سازی با مقادیر مختلف آموزش تا ۱۵ سال برای این مدل انجام

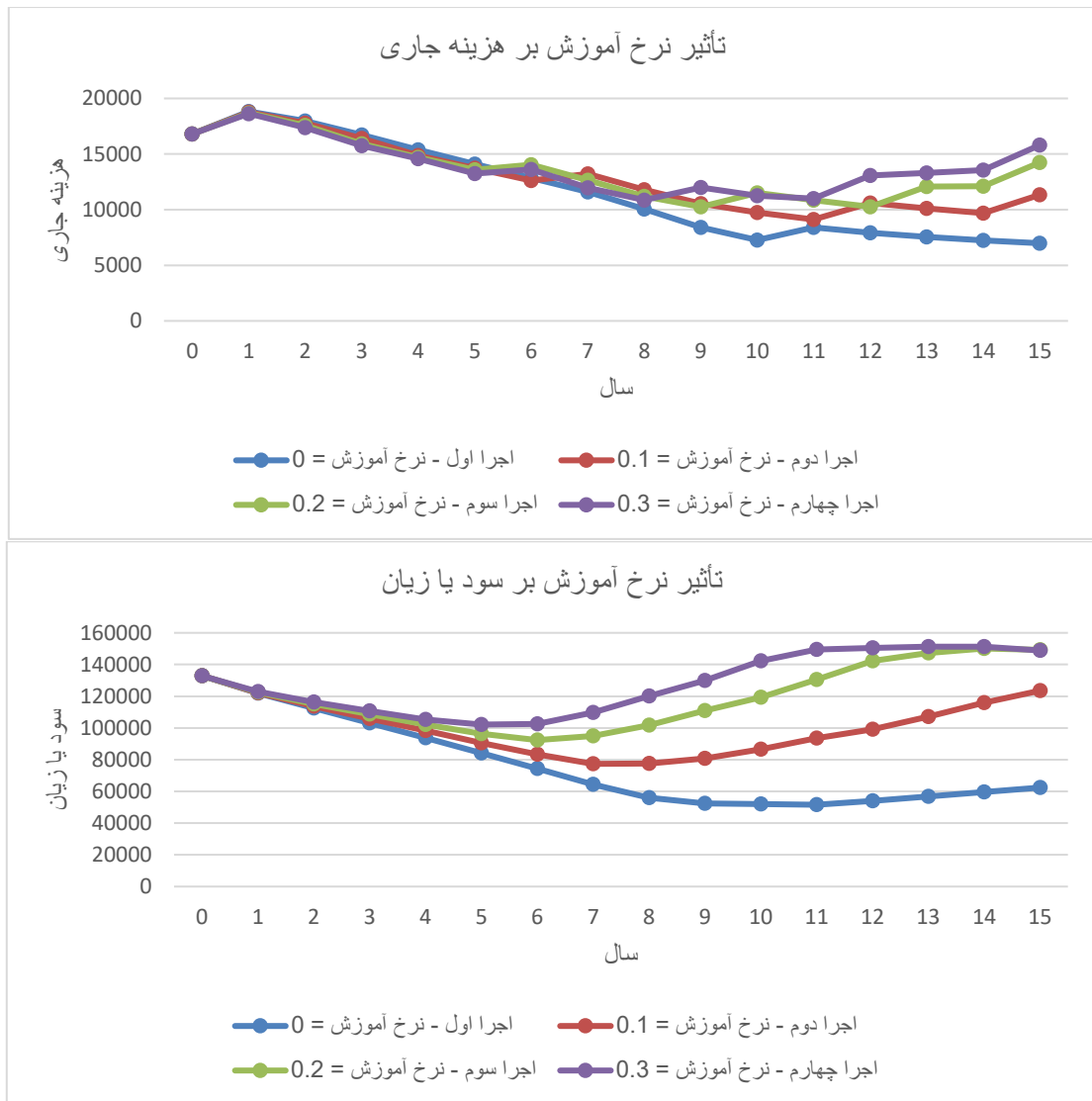
نرخ آموزش باعث افزایش ایمنی نمی‌شود. در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر هزینه جاری تا شش سال اول با افزایش نرخ آموزش، هزینه جاری کاهش یافته است؛ ولی بعد از شش سال افزایش نرخ آموزش سبب کاهش هزینه جاری نمی‌شود. در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر سود یا زیان، با افزایش نرخ آموزش، سود افزایش می‌یابد. بنابراین به‌طور متوسط آموزش تا یازده سال اثرگذار بوده، ولی بعد از آن دیگر اثری نخواهد داشت. با توجه به نمودارها این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که بعد از یازده سال اگر آموزش مداوم در سیستم نباشد بهتر است. در پژوهش حاضر، از آنجا که آموزش مداوم و پیوسته در سیستم وجود دارد، تا سال یازدهم بهره‌وری نیروی انسانی را به حداکثر می‌رساند و پس از آن دیگر عملاً آموزش تکراری است و تنها باعث اتلاف وقت و انرژی پرسنل و هزینه می‌شود و در نتیجه اثر منفی بر سیستم دارد. نمودارهای مربوط به نتایج شبیه‌سازی سناریوی آموزش در شکل (۱۵) ارائه شده‌اند.

اثرگذار نیست. در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر نرخ از کار انداختن تجهیزات نیز تا سال دوازدهم با افزایش نرخ آموزش طی چهار اجرا نرخ از کار انداختن تجهیزات افزایش می‌یابد؛ ولی بعد از دوازده سال، افزایش نرخ آموزش بر افزایش نرخ از کار انداختن تجهیزات جهت تعمیرات برنامه‌ریزی شده مؤثر نیست.

همان طور که مشاهده می‌شود، در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر نرخ حوادث با افزایش نرخ آموزش طی چهار اجرا نرخ حوادث تا سال یازدهم کاهش می‌یابد. بعد از یازده سال افزایش نرخ آموزش بر کاهش نرخ حوادث اثرگذار نیست. در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر هزینه حوادث با افزایش نرخ آموزش طی چهار اجرا هزینه حوادث تا سال یازدهم کاهش می‌یابد. بعد از یازده سال، افزایش نرخ آموزش بر کاهش هزینه حوادث اثرگذار نیست. در نمودار تأثیر نرخ آموزش بر ایمنی، افزایش نرخ آموزش طی چهار اجرا تا یازده سال اول سبب افزایش ایمنی می‌شود. بعد از یازده سال، افزایش



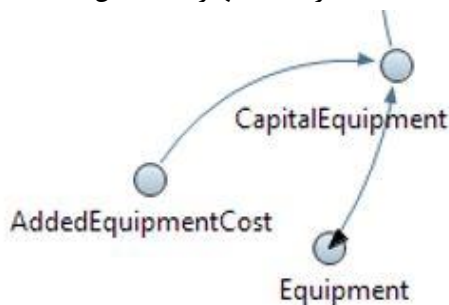




شکل ۱۵- نتایج شبیه‌سازی سناریوی آموزش

(۱۶) متغیر تجهیزات افزوده شده، به متغیر قابلیت دسترسی متصل گردیده است.

بدیهی است هزینه تجهیزات جدید به زیرسیستم هزینه اضافه می‌شود. در شکل (۱۷) متغیر هزینه تجهیزات جدید اضافه شده، به سرمایه تجهیزات متصل شده است.



شکل ۱۷- نمودار جریان متغیر هزینه تجهیزات افزوده شده (سناریوی ۲)



شکل ۱۶- نمودار جریان متغیر افزودن تجهیزات (سناریوی ۲)

در سناریوی دو، تعداد هشت تجهیز جدید در سال هفتم به مدل اضافه می‌شود و آموزش در این سناریو وجود ندارد. مدل با این سناریو تا ۱۵ سال شبیه‌سازی شد. در شکل



شکل ۱۸ - نتایج مقایسه‌ای شبیه‌سازی سناریوهای ۱، ۲ و ۳

کارکنان به تنهایی منجر به بهبود سیستم نشده، افزایش هزینه‌های نیروی انسانی را به دنبال خواهد داشت. سناریوی دو، بدون وجود آموزش و با افزودن تعداد هشت تجهیزات جدید در سال هفتم به ماشین‌آلات تعریف شد. نتایج سناریوی دو بیانگر آن است که افزودن هشت تجهیز جدید در سال هفتم سبب بهبود مدل تا ۱۵ سال بعد خواهد شد. سناریوی سه ترکیبی از سناریوی یک و دو است؛ بدین معنی که هم افزودن تعداد هشت تجهیزات جدید در سال هفتم و هم آموزش با نرخ ۰/۱ در مدل وجود دارد. نتایج مقایسه سه سناریو نشان می‌دهد از سال هفتم تا سال پانزدهم نرخ خرابی در سناریوی سه از دو سناریوی دیگر کمتر است؛ زیرا در سناریوی سه، وجود هم‌زمان آموزش و افزودن تجهیزات جدید سبب کاهش نرخ خرابی می‌شود. به دلیل اینکه نرخ آموزش با توجه به واقعیت نیروگاه ۰/۱ در نظر گرفته شده است که مقدار نرخ آموزش بسیار کمی است، در سناریوی یک که فقط آموزش با نرخ ۰/۱ وجود دارد، در هشت سال اول، نرخ خرابی نسبت به دو سناریوی دیگر بیشتر است. شایان ذکر است همان طور که در نتایج سناریوی یک مشخص شد، اگر نرخ آموزش افزایش پیدا کند، شرایط بهبود می‌یابد. نمودار نرخ از کار انداختن تجهیزات در سه سناریو افزایشی است. مقدار ایمنی از سال ششم به بعد در سناریوی سه از دو سناریوی دیگر بیشتر است؛ زیرا وجود هم‌زمان آموزش و افزودن تجهیزات جدید، سبب افزایش ایمنی می‌شود. نرخ حوادث و هزینه حوادث از سال ششم تا سال پانزدهم در سناریوی سه از دو سناریوی دیگر کمتر است. در نمودار نرخ حوادث و هزینه حوادث از سال ششم به بعد، در سناریوی سه، وجود آموزش و افزودن تجهیزات جدید به طور هم‌زمان، اثر بسزایی در کاهش مقدار نرخ حوادث و به دنبال آن، هزینه حوادث ایجاد می‌شود. از طرفی، به دلیل کاهش نرخ حوادث و هزینه حوادث از سال ششم به بعد در سناریوی سه و در پی آن، کاهش هزینه‌های توقف خط تولید و قطعات یدکی، هزینه جاری نیز در این سال‌ها کاهش می‌یابد. هزینه جاری از سال پنجم تا سال نهم از دو سناریوی دیگر کمتر است. در نمودار سود یا زیان، در سناریوی یک که فقط آموزش وجود دارد، مقدار سود از دو سناریوی دیگر کمتر است؛ زیرا در دو سناریوی دیگر افزودن تجهیزات جدید وجود دارد و از آنجا که اضافه شدن تجهیزات جدید با قابلیت دسترسی به تجهیزات و میزان سود، رابطه مستقیم دارد،

مدل سناریوی دو، یک بار در نرم‌افزار انی‌لاجیک اجرا گردیده، نمودارهای نتایج آن حاصل شد. در نمودارهای مقایسه سه سناریو می‌توان نمودارهای سناریوی دو را نیز مشاهده کرد. برای بهبود وضعیت موجود، سناریوی سه، ترکیبی از سناریوی یک و سناریوی دو در نظر گرفته شده است. در سناریوی سه، علاوه بر اینکه آموزش با نرخ ۰/۱ وجود دارد، در سال هفتم نیز تعداد هشت تجهیز جدید مطابق با تکنولوژی روز به نیروگاه وارد شد. بدیهی است با اضافه شدن تجهیزات با تکنولوژی جدید، بهره‌وری کارکنان تحت تأثیر قرار می‌گیرد و نیاز به آموزش مجدد وجود دارد. مدل سناریوی سه، در نرم‌افزار انی‌لاجیک یک بار اجرا شد و نمودارهای نتایج آن حاصل گردید. برای مقایسه سه سناریو، به طور خلاصه لازم است بیان شود که در سناریوی یک آموزش با نرخ ۰/۱ در نظر گرفته شده است، در سناریوی دو آموزش وجود ندارد و فقط افزودن هشت تجهیزات جدید در سال هفتم موجود است. همچنین در سناریوی سه که ترکیبی از سناریوی یک و دو است، آموزش با نرخ ۰/۱ و افزودن هشت تجهیزات جدید در سال هفتم وجود دارد. شایان ذکر است نرخ آموزش با توجه به نیروگاه شاهرود ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در ادامه، به مقایسه نمودارهای شبیه‌سازی سه سناریو و تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از متدولوژی پویایی‌های سیستم به شبیه‌سازی آثار متقابل متغیرها در یک سیستم نگهداری تعمیرات نیروگاه برق پرداخته شد، به گونه‌ای که با توجه به اهمیت موضوع ایمنی، زیرسیستم ایمنی به عنوان یکی از اجزای اصلی مدل مدنظر قرار گرفت. در ابتدا با استفاده از مروری بر تحقیقات گذشته و نظر خبرگان، متغیرها و زیرسیستم‌های اصلی همراه با روابط علی بین آن‌ها شناسایی گردید و سپس نمودار علی حلقوی طراحی شد. در مرحله بعد با استفاده از مفاهیم اصلی و همچنین مطالعه مقالات مختلف، نمودار جریان با کمک اصول پایه‌ای متدولوژی پویایی‌های سیستم با استفاده از نرم‌افزار انی‌لاجیک به تفکیک زیرسیستم‌های مدل مورد تحقیق طراحی شد و با استفاده از مثال عددی، شبیه‌سازی برپایه سه سناریوی مشخص صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد سیاست آموزش تا شش سال اول می‌تواند پاسخگوی سیستم باشد؛ اما از سال ششم به بعد، آموزش

نتایج نشان داد بعد از یازده سال آموزش دیگر اثر مثبتی در سیستم ندارد؛ زیرا بهره‌وری پرسنل به حداکثر رسیده و هزینه صرف شده برای آموزش بیهوده است. همچنین وقت و انرژی پرسنل تلف شده، آموزش بعد از یازده سال نتیجه مطلوبی ندارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، آموزش به صورت پله‌ای به سیستم وارد گردد. به طور مثال، هر دو سال یک بار آموزش در سیستم باشد تا آثار آموزش به صورت پله‌ای بررسی شود. همچنین در تحقیقات آتی، پژوهشگران می‌توانند این امر را مدنظر قرار دهند که آثار کدام‌یک از بخش‌های مرتبط از جمله آموزش یا ایمن‌سازی خط تولید، تأثیر بیشتری در کاهش حوادث و در نتیجه هزینه تمام شده تعمیرات و نگهداری به جا خواهد گذاشت یا با سنجش میزان تأثیر پارامترهای نامعین روی مدل، توزیع‌های مربوط به شکست یا کارکرد ماشین‌آلات را از سوابق تعمیرات و نگهداری استخراج کرده، با تلفیق مدل پویایی‌های سیستم با شبیه‌سازی گسسته، مدل را در بستری عملی‌تر به کار گیرند. همچنین می‌توان با انجام تحقیقات میدانی و داده‌های واقعی از مدل و سناریوها استفاده کرد و نتایج کاربردی سناریوها را بررسی نمود. همچنین بحث ترکیب روش پویایی‌های سیستم با دیگر روش‌های ریاضی امکان‌پذیر است.

سبب افزایش سود در سناریوی دو و سه نسبت به سناریوی یک می‌شود. مقدار سود از سال دوم تا سال پانزدهم در سناریوی دو از سناریوی یک و سه بیشتر است. با توجه به تحلیل نمودارها و نتایج به دست آمده، سناریوی سه به عنوان مناسب‌ترین سیاست انتخاب شد.

با توجه به نتایج می‌توان دریافت که مدل طراحی شده می‌تواند ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف باشد و بدین ترتیب، کاربرد پویایی‌های سیستم در مقوله نگهداری و تعمیرات با رویکرد افزایش ایمنی طراحی شود. با توجه به این مقاله می‌توان پیشنهاد کرد که استفاده از یک سیستم آموزش مستمر برای کارکنان نیروگاه می‌تواند بسیار مفید باشد و حوادث و خرابی‌ها را کاهش داده، سبب افزایش ایمنی محیط کار و کارکنان نیروگاه شود. همچنین افزودن تجهیزات جدید در صورت لزوم و با توجه به شرایط نیروگاه می‌تواند در افزایش قابلیت دسترسی به تجهیزات در نتیجه افزایش بازده و سود نیروگاه بسیار اثرگذار باشد.

هرچند در این تحقیق سعی شد کلیه ابعاد و زیرسیستم‌های مربوط به نگهداری تعمیرات و ایمنی لحاظ شود، شکاف‌های تحقیقاتی در این رابطه می‌تواند راهنمای سایر محققان برای ادامه بحث به شمار آید.

در این پژوهش، آموزش به طور مداوم در نظر گرفته شد که

پیوست- متغیرهای اثرگذار بر نرخ خرابی و آثار نرخ خرابی

ردیف	متغیرهای اثرگذار بر نرخ خرابی	تشریح متغیر	مرجع	تأثیر	نوع اثر	متغیر مستقیم	تأثیر	تشریح متغیر تأثیر مستقیم
۱	Breakdown Due To Unperformed Takedowns	خرابی‌هایی که در تعمیرات برنامه‌ریزی شده رفع نشده است	[۲۳]	مستقیم	+			
۲	Depreciation	استهلاک	[۲۱] [۲۲]	مستقیم غیرمستقیم	+	Defect Creation	ایجاد عیب	
۳	Delay Breakdowns	تأخیر خرابی‌ها	[۲۳]	مستقیم	-			
۴	Safety	ایمنی	[۲۵]	مستقیم	-			
۵	Equipment in full functionality	تجهیزات در بالاترین عملکرد	[۲۳]	غیرمستقیم	+	Depreciation	استهلاک	
۶	Planning & Scheduling Of PM	تعمیرات برنامه‌ریزی شده پیشگیرانه	[۲۳]	غیرمستقیم	+	Breakdown Due To Unperformed Takedowns	خرابی‌هایی که در تعمیرات برنامه‌ریزی شده رفع نشده است	
۷	Incidents Rate	نرخ حوادث	[۲۵]	غیرمستقیم	+	Safety	ایمنی	
۸	Average Reliability	متوسط قابلیت اطمینان	[۲۳]	غیرمستقیم	-	Delay Breakdowns	تأخیر خرابی‌ها	

تأخیر خرابی‌ها	Delay Breakdowns	+	غیرمستقیم	[۲۳]	خطر عامل خرابی‌ها	Risk factor Breakdowns	۹
نوع اثر				مرجع	تشریح متغیر	آثار نرخ خرابی	ردیف
		+		[۲۳]	آسیب جانبی	Collateral damage	۱
		+		[۲۶]			
		+		[۲۳]	اثر فراوانی خرابی روی ظرفیت	Effect Breakdown Frequency On Capacity	۲

مراجع

- [۱] جان. د استرمن، پویایی‌شناسی سیستم، چاپ اول، انتشارات ترمه، ایران، ۱۳۸۶.
- [۲] محمدهادی پورغریب شاهی، «برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری نیروگاه‌ها با روش سیستم‌های دینامیکی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، تیر ۱۳۹۰.
- [۳] شراره مهاجری و فاطمه هرسج، «استراتژی نگهداری و تعمیر پیشگیرانه در نیروگاه سبز بادی منجیل و ارتقا شاخص‌های ایمنی»، چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی حسابداری و مدیریت با رویکردهای کاربردی و پژوهشی نوین، مرداد ۱۳۹۴.
- [۴] احسان محمودی، علی نعیمی صدیق، سید کمال چهارسوقی و حمیدرضا اسکندری، «بررسی تأثیر گردش اطلاعات بر مدل زنجیره تأمین ساخت طبق سفارش مبتنی بر رویکرد سیستم‌های پویا»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۲، پاییز ۱۳۸۹، صفحه ۳۵-۲۱.
- [۵] حمید فلقی، مریم رضانی و محمودرضا حقی فام، «تحلیل تأثیر نیروگاه‌های بادی بر قابلیت تبادل شبکه‌های انتقال در سیستم قدرت»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۶۱-۷۵.
- [۶] P.S. Carpitell, A. Mzougui, J. Benítez, F. Carpitella, A. Certa, J. Quierdo and M. Cascia, "A risk evaluation framework for the best maintenance strategy: The case of a marine salt manufacture firm", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 205, January 2021, 107265.
- [۷] زهرا آقاسی‌زاده، «انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات توسط تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) (مطالعه موردی: کارخانه تبرک مشهد)»، اولین همایش ملی فناوری در مهندسی کاربردی، تهران، ۱۳۹۵.
- [۸] H.P. Jagtap and A.K. Bewoor, "Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments", Materials today:proceedings, Vol. 4, Issue 2, Part A, 2017, pp. 1927-1936.
- [۹] J. Lee and M. Mitici, "An integrated assessment of safety and efficiency of aircraft maintenance strategies using agent-based modelling and stochastic Petri nets", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 202, October 2020, 107052.
- [۱۰] علی کریم‌آبادی، محمدابراهیم حاجی‌آبادی، عبدالله کامیاب و علی اصغر شجاعی، «مدل ترکیبی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و پیش‌بینانه ترانسفورماتور قدرت (مطالعه موردی: شرکت برق منطقه‌ای خراسان)»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۶، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۴۲۱-۴۳۹.
- [۱۱] S. Alaswad and Y. Xiang, "A Review on Condition-Based Maintenance Optimization Models for Stochastically Deteriorating System", Reliability Engineering & System Safety, 2016.
- [۱۲] Y. Zhang, J. Andrews, S. Reed and M. Karlberg, "Maintenance Processes Modelling and Optimisation", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 157, 2017, pp. 54-63.
- [۱۳] M. Bulute and E. Özcan, "A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 205, January 2021, 107238.
- [۱۴] J. Wang, D. Ge, S. Chen, Z. Wang, D. Guo, Z. Xu, J. Wang, and F. Wang, "Maintenance strategy design for nuclear reactors safety systems using a constraint particle swarm evolutionary methodology", Annals of Nuclear Energy, Vol. 150, January 2021, 107878.

- [۱۵] N.M. Souza and A.T.A. Filho, "A systematic airport runway maintenance and inspection policy based on a delay time modeling approach", *Automation in Construction*, Vol. 110, 2020, 103039.
- [۱۶] J.J. Jimenez, S. Schwartz, R. Vingerhoeds, B. Grabot and M. Salaün, "Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 56, July 2020, pp. 539-557.
- [۱۷] H.P. Jagtap, A.K. Bewoor, R. Kumar, M.H. Ahmadi and L. Chen, "Performance analysis and availability optimization to improve maintenance schedule for the turbo-generator subsystem of a thermal power plant using particle swarm optimization", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 204, December 2020, 107130.
- [۱۸] P. Singh, S. Singh, S. Vardhan and A. Patnaik, "Sustainability of maintenance management practices in hydropower plant: A conceptual framework", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 28, Part 3, 2020, pp. 1569-1574.
- [۱۹] نیما امجدی و محمدرضا انصاری، «برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت نیروگاه‌های آبی و حرارتی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی سیستم و مسئله پایداری ولتاژ»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۰، شماره ۲۸، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۵۳-۶۷.
- [۲۰] N. Gerami, S. Aminah and R. Fayek, "Neuro-fuzzy system dynamics technique for modeling construction systems", *Applied Soft Computing*, Vol. 93, August 2020, 106400.
- [۲۱] G. Guizz, D. Falcone and F. Felice, "An integrated and parametric simulation model to improve production and maintenance processes: Towards a digital factory performance", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 137, November 2019, 106052.
- [۲۲] E.H. Mathews, J.H. Mathews, J.H.V. Laar, W. Hamer and M. Kleingeld, "A simulation-based prediction model for coal-fired power plant condenser maintenance", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174, 25 June 2020, 115294.
- [۲۳] L. Gary, N.G.H.C. Amos and A. Tehseen, "Towards strategic development of maintenance and its effects on production performance by using system dynamics in the automotive industry", *International Journal of Production Economics*, Vol. 200, 2018, pp. 151-169.
- [۲۴] S.M. Hoseyni, F.D. Maio and E. Zio, "Condition-based probabilistic safety assessment for maintenance decision making regarding a nuclear power plant steam generator undergoing multiple degradation mechanisms", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 191, November 2019, 106583.
- [۲۵] D.C. Lane and R. Oliva, "The greater whole: Towards a synthesis of system dynamics and soft systems methodology", *European Journal of Operational Research*, 1998, Vol. 107, pp. 214-235.
- [۲۶] M.S. Alvarez-Alvarado and D. Jayaweera, "Operational risk assessment with smart maintenance of power generator", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 117, May 2020, 105671.
- [۲۷] L. Wanga, J. Chua and J. Wub, "Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process", *International journal of production economics*, Vol. 107, 2007, 151-163.
- [۲۸] L. Pintelon, S.K. Pinjala and A. Vereecke, "Evaluating the effectiveness of maintenance strategies", *Journal of quality in maintenance engineering*, 12 (1), 2006, 7 - 20.