مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۱-۳۷، شماره‌ی ۱، ص. ۹۳-۱۰۱، (پژوهشی)

Original Article

# مدل‌سازی عامل بنیان و برنامه‌ریزی منابع واحد خدمات در نیروگاه انرژی تجدیدپذیر مطالعه‌ی موردی: نیروگاه بادی بینالود

**نجمه نشاط** * **(استادیار)**
**گروه مهندسی صنایع (سیستم‌ها)، دانشگاه میبد**
**نگار برادران‌فر (دانشجو)**
**گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد**

توربین‌های بادی یکی از منابع در حال رشد تولید انرژی تجدیدپذیر در جهان امروز هستند که پیوسته به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری نیاز دارند. در این نوشتار از رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر عامل برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی پتانسیل (ظرفیت) ارائه‌ی خدمات تعمیر و نگه‌داری در یک نیروگاه تجدیدپذیر بادی استفاده شده است. نتایج صحه‌گذاری مدل پیشنهادی حاکی از آن است که رویکرد عامل‌بنیان بستر مناسبی برای مواجهه با پیچیدگی‌های مسئله از جمله مدل‌سازی دینامیک‌های سیستم، عدم قطعیت‌های موجود در سیستم از قبیل زمان خرابی و تعداد توربین‌های فعال، فراهم کرده است. توسعه‌ی سناریوهای مختلف و تحلیل حساسیت هزینه برحسب تعداد منبع (ارائه‌ی خدمات) تخصیص داده شده بیان‌گر آن است که افزایش ۳ واحدی در ظرفیت ارائه‌ی خدمات تعمیر و نگه‌داری، موجب مقدار حداقلی در هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم خواهد شد.

**واژگان کلیدی:** مدل‌سازی عامل‌بنیان، نیروگاه تجدیدپذیر بادی، برنامه‌ریزی منابع، نگه‌داری و تعمیرات.

neshat@meybod.ac.ir
9628953@stu.yazd.ac.ir

## ۱. مقدمه

نیروگاه‌های بادی از جمله مراکز پاک تولید انرژی برق هستند که به دلیل جایگزینی باد با سوخت‌های فسیلی برای تولید برق از برتری خاصی نسبت به نیروگاه‌های فسیلی برخوردارند. از آن‌جا که در یک نیروگاه بادی ۲۵ الی ۳۰ درصد از کل هزینه‌ها مربوط به هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات است، استقبال از فنّاوری توربین بادی صرفاً با مدیریت هزینه‌ها امکان‌پذیر خواهد بود به طوری که با کاهش این هزینه‌ها استقبال روزافزون از این فنّاوری رقم خواهد خورد. میزان خرابی در توربین‌های بزرگ نسبت به توربین‌های رده متوسط و کوچک بسیار بیشتر است و در نتیجه هزینه‌ی نگه‌داری و تعمیرات آنها با افزایش ظرفیت نیروگاه‌ها به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات در این نیروگاه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است.

برنامه‌ریزی دقیق برای اجرای فرایند نگه‌داری و تعمیرات (نت) توربین‌های بادی، مستلزم تعیین و پیش‌بینی احتمال وقوع یک خرابی و تخصیص منابع کافی برای رفع آن است. عمده فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیش‌بینانه بر پایش وضعیت[1] متمرکز است تکنیک‌های آنالیز روغن، ترموگرافی، ارتعاش‌سنجی، صداسنجی، ضخامت‌سنجی و تحلیل جریان الکتریکی تجهیز مجموعه‌یی از متداول‌ترین فعالیت‌های واحد خدمات در حوزه‌ی نت پیش‌بینانه است. هدف از نت پیش‌بینانه افزایش قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و قابلیت نگه‌داری و ایمنی[2] تجهیزات است که بهبود این شاخص منجر به بهبود مدیریت و بهره‌وری نیروگاه خواهد شد.

در سال‌های اخیر شاهد پیشرفت و توسعه‌ی سریع نوآوری در تکنولوژی، مانند سنسورهای بی‌سیم و شبکه‌های تک‌کاره،[3] اینترنت اشیاء و «سیستم‌های عامل‌بنیان» بوده‌ایم.[1] این تکنولوژی‌های روندهای جدیدی مانند تولید فراگیر،[2] نگه‌داری هوشمند[3] و طراحی ساختارهای پایش وضعیت را بر پایه‌ی رویکردهای عامل‌بنیان ترویج می‌دهند.[4] مسئله‌ی اصلی توزیع و فراگیر شدن فرایند پردازش و مدل‌سازی داده‌ها و متمرکز نکردن تصمیم‌گیری، در مورد چند مقدار خاص با هدف دست‌یابی به انعطاف، استقلال و خاصیت ارتجاعی و تطابق بیشتر برای تغییر انجام می‌گیرد.[5] تمرکز توسعه و رشد تحقیقات مبتنی است بر ایجاد و استقرار تجهیزات تولید (ماشین‌ها، ربات‌ها ...) به همراه انواعی از هوشمندسازی برای اجرای برنامه‌ریزی تولید، کنترل و انجام وظایف مهندسی نگه‌داری.[6]

علی‌رغم افزایش و رشد اقدامات انجام شده در زمینه‌ی نگه‌داری، نگه‌داری برمبنای موقعیت و شرایط برای مدیریت پیش‌آگاهی،[7] تعداد کمی از اقدامات برای استقرار و پیاده‌سازی سیستم‌ها با توانایی سازگاری و مواجهه با عدم قطعیت‌های

* نویسنده مسئول
*تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۱۶، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۹.*
*DOI:10.24200/J65.2021.56015.2132*

موجود و مشکلات مربوط به مهندسی نگه‌داری با خاصیت انعطاف‌پذیری بالا ایجاد شده است.[۸-۱۰] انقلاب صنعتی نسل چهارم،[۴] محرکی برای ایجاد تحقیقات بیشتر در زمینه‌ی مدل‌سازی عامل‌بنیان در حوزه‌ی خدمات تعمیر و نگه‌داری بود.[۱۱]

نگه‌داری تجهیزات فرایندها موجب می‌شود تا خدمات نت در زمان لازم در دسترس باشد و اطمینان حاصل شود که خدمات نگه‌داری، ارزش دارایی موجود را به‌عنوان سرمایه حفظ می‌کند. به‌طور سنتی فعالیت‌های نگه‌داری با روش‌ها و راه‌های مختلف و توسط افراد گوناگون انجام شده است.

با توجه به CIBSE،[۱۲] نت پیش‌بینانه شامل دو حوزه‌ی تکنیکی و کنترلی می‌شود. در حوزه‌ی تکنیکی تجهیزاتی که نیاز به تعمیر و نگه‌داری دارند تعیین می‌شود؛ همچنین مشخص کردن زمان و نحوه‌ی انجام نت، شناسایی مشکلات و تشخیص علت‌ها، نتایج و اثرات پایش و نظارت، و تهیه و تحلیل سوابق و اطلاعات فنی در این حوزه انجام می‌شود. در حوزه‌ی کنترلی، کمینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با عدم دسترسی به خدمات نت، تعیین و تخصیص منبع مورد نیاز (نیروی کار)، مشخص کردن زمان نیاز به این اقدامات، تشخیص اولویت‌ها و برنامه‌ریزی رفت و آمدها هدف‌گیری می‌شود.

بر اساس مطالعات انجام شده،[۱۳] چهارچوب‌های مدل‌سازی و کنترل سیستم به دو دسته‌ی متمرکز و غیرمتمرکز دسته‌بندی می‌شود. دسته‌ی غیرمتمرکز شامل سه چهارچوب طراحی: کاملاً سلسله‌مراتبی، کاملاً شبکه‌یی و نیمه‌شبکه‌یی است. در چهارچوب شبکه‌یی هیچ سلسله‌مراتبی در سیستم دیده نمی‌شود و هر نهاد تصمیم‌گیری (عامل) می‌تواند به‌عنوان بخشی از سیستم، با عنایت به رفتار دیگر عامل‌ها و به‌صورت کاملاً خودمختار عمل کند. مدل‌سازی عامل‌بنیان پارادایمی است که برای پیاده‌سازی کنترل کاملاً شبکه‌یی استفاده می‌شود.[۱۴و۱۵]

«سیستم چندعاملی» یک سیستم خودسازمان یافته‌ی رایانه‌یی است که از چندین عامل هوشمند متقابل تشکیل شده است. هوشمندی ممکن است رویکردهای دارای روش، عملکردی و فرایندی، جست‌وجوی الگوریتم یا یادگیری ماشینی را شامل شود. گلاب و همکارانش[۱۶] در سال ۲۰۱۷ یک مرور کلی از تحقیقات موجود در زمینه‌ی به‌کارگیری رویکرد سیستم چندعاملی در زمینه‌ی تعمیر و نگه‌داری انجام دادند. مفهوم هولونیک[۵] برگرفته از اثر نویسنده و فیلسوف مجارستانی آرتور کوستلر است که سعی داشت رفتار سیستم‌های پیچیده را با در نظر گرفتن نهادهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها که به‌صورت همزمان کلی و جزئی هستند شناسایی و تحلیل کند.[۱۷]

هدف از هولونیک، ادغام بهترین خصوصیات سیستم‌های سلسله‌مراتبی و شبکه‌یی، یعنی عملکردی عالی و قابل پیش‌بینی با استحکام بالا در برابر اختلالات و تغییرات پیش‌بینی نشده است. هولونیک با استفاده از سیستم چندعاملی پیاده‌سازی می‌شود؛ بنابراین پیشرفت در نظریه و برنامه‌های کاربردی سیستم‌های عامل‌بنیان برای توسعه‌ی آینده و تقویت سیستم‌های هولونیک مفید است.

لیتوا و همکارانش[۱۸] در سال ۲۰۱۲ مروری بر برخی از اصول موجود در طبیعت و زیست‌شناسی ارائه دادند و اثر بخشی آنها را بر بهبود سیستم‌های چندعاملی برای حل مشکلات پیچیده تجزیه و تحلیل کردند. با این حال، آنها از ایمنی زیست‌شناختی به‌عنوان یک منبع الهام‌بخش مرسوم استفاده نکردند. بایار و همکارانش[۱۹] نگه‌داری و تعمیرات پیش‌بینانه با رویکرد عامل‌بنیان را بررسی کردند. پس از مدتی فسانوتی و همکارانش[۲۰] معماری ایمنی عامل‌بنیان ترکیبی را توصیف کردند که هدف آن غلبه بر محدودیت‌های سیستم‌های پیش‌بینی کننده و پیشگیرانه‌ی فعلی، هنگام به‌کارگیری در سیستم‌های گسترده‌ی جغرافیایی، مانند سیستم‌های انتقال روغن از طریق خطوط لوله و سیستم‌های تصفیه فاضلاب است.

تعاریف و کلاس‌بندی‌های مختلفی از هوشمندی عامل‌ها در مطالعات انجام شده در حوزه‌ی نت ارائه شده و جزئیات آن در چندین سطح مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.[۲۱و۲۲] با توجه به گفته‌های پورتر و هیلمن[۲۳] قابلیت‌های عامل‌های هوشمند در رابطه با مهندسی تعمیر و نگه‌داری عبارت است از: نظارت، بهینه‌سازی و استقلال. نظارت کردن به استفاده از سنسورها و منابع داده‌ی خارجی برای فعال کردن هشدارها و اعلان‌های تغییر اشاره دارد. قابلیت‌های نظارت، امکان بهینه‌سازی عملکرد و استفاده از تجهیزات را به منظور امکان تشخیص پیش‌بینی‌کننده، سرویس و تعمیر فراهم می‌کند. پروژه سافر[۲۴] پروژه‌یی با رویکرد هولونیک برای مدل‌سازی و اجرای نت پیش‌بینانه در سیستم حمل‌ونقل ریلی بود. در این پروژه، تشخیصِ هولونِ قطار به مرکز نگه‌داری فرستاده می‌شود و از این طریق مداخلات در نگه‌داری برنامه‌ریزی می‌شود.

مسئله‌ی تحقیق در مطالعه‌ی حاضر، در واحد خدمات نت نیروگاه تجدیدپذیر بادی بینالود در نزدیکی شهر نیشابور واقع در مسیر جاده ۴۴ تعریف می‌شود. این نیروگاه در حال حاضر دارای ۳۵ توربین فعال است که دو نوع خدمت نگه‌داری و تعمیر برنامه‌ریزی شده[۶] و خدمات تعمیر و تعویض اضطراری[۷] در مورد آنها انجام می‌گیرد. آمارها حاکی از آن است که زمان انتظار برای خرابی و مدت زمان انجام خدمات نگه‌داری ثابت نیست و توزیعی احتمالی دارد. نظر به غیر قطعی بودن این اطلاعات و همچنین امکان خروج طولانی‌مدت تعداد معدود توربین‌ها از حالت فعال، برآورد تعداد نیروی بهینه مورد نیاز در واحد خدمات نگه‌داری و واحد خدمات تعمیر و تعویض را با پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌هایی روبرو می‌کند که راه را برای به‌کارگیری مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی در شرایط وجود عدم قطعیت نامطمئن می‌سازد.

برنامه‌ریزی نگه‌داری تعمیرات در شبکه‌های برق محلی که مبتنی بر منابع بادی هستند به دلیل عوامل متعددی که می‌تواند مربوط به شرایط آب و هوایی یا پارامترهای کارکردی توربین‌ها باشد ـ مثل عدم قطعیت موجود در مقدار توان بادی در دسترس، زمان انتظار تا خرابی متغیر، تغییرات نامنظم بار مصرفی شبکه و ثابت نبودن تعداد توربین‌های فعال در هر لحظه ـ با پیچیدگی‌ها و چالش‌های زیادی روبه‌روست. در مطالعات قبلی رویکردهای متفاوتی، شامل بهینه‌سازی استوار[۸] و بهینه‌سازی احتمالی،[۹] برای مواجهه با این عدم قطعیت اتخاذ شده است. رویکرد بهینه‌سازی استوار رویکردی محافظه کارانه است که راه حل بدبینانه‌ترین سناریو (که غالباً محتمل‌ترین حالت نیست) را به‌عنوان راه حل پیشنهادی ارائه می‌دهد. رویکرد بهینه‌سازی احتمالی از جمله رویکردهای حل موفق و کارا در مدیریت عدم قطعیت به روش نمونه‌گیری تصادفی در مسائل مختلف است. در این رویکرد متغیرهای غیرثابت مسئله الزاماً به یکی از توزیع‌های احتمالی تخمین زده می‌شود، اگرچه فازی بودن یا غیراحتمالی نبودن این متغیرها اثبات شده باشد. در مواردی که متغیرهای مسئله از توزیع‌های احتمالی و غیر فازی فاصله داشته باشد، نتایج حل مسئله به روش بهینه‌سازی احتمالی نمی‌تواند رضایت‌بخش و قابل استفاده باشد. این شرایط، طالب رویکردی است که دست‌یابی به جواب‌های واقع‌بینانه و نزدیک به بهینه را، که فارغ از فرض‌های مذکور باشد، ممکن می‌سازد؛ رویکردی که قادر باشد درک روابط، الگوها یا اتفاقاتی را که در سطح کلان یک سیستم پیچیده غیرممکن بنظر می‌رسد، از طریق تعریف رفتار تک‌تک عامل‌ها امکان‌پذیر سازد. استواری در مقابل عدم قطعیت‌ها از جمله قابلیت‌هایی است که مدل‌های مبتنی بر عامل را قادر می‌سازد تا در تغییرات ناگهانی[۱۰] عملکردی مشابه سیستم واقعی از خود نشان دهند. باتوجه به شرایط حاکم بر مسئله در این مطالعه، به‌عنوان اولین مطالعه (بر اساس دانش ما) یک چهارچوب مدل‌سازی عامل‌بنیان برای شبیه‌سازی سیستم خدمات نگه‌داری و تعمیرات در یک نیروگاه انرژی بادی پیشنهاد می‌شود تا از طریق تحلیل سناریو، سیاست‌های نت پیش‌بینانه به‌گونه‌یی تعیین شود که بهره‌وری کل سیستم بیشینه شود.

## ۲. مدل‌سازی عامل‌بنیان

یک مدل عامل‌بنیان را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌یی از قوانین در نظر گرفت که تغییر وضعیت فعلی سیستم به وضعیت و حالت‌های دیگر به کمک آنها تعریف می‌شود. این همان مفهوم خط سیر تغییرات وضعیت یک سیستم است. این قوانین و قواعد، اشکال مختلفی ـ از جمله معادلات دیفرانسیل، نمودارهای حالت، نمودارهای جریان فرایند و برنامه‌ها ـ به خود می‌گیرند. از آن‌جا که مدل‌سازی مبتنی بر عامل یک مدل‌سازی پایین به بالا[11] است، قادر است درک روابط، الگوها یا اتفاقاتی را که در سطح کلان یک سیستم پیچیده غیرممکن به نظر می‌رسد، از طریق تعریف رفتار تک‌تک عامل‌ها امکان‌پذیر سازد. استواری در مقابل عدم قطعیت‌ها از جمله قابلیت‌هایی است که مدل‌های مبتنی بر عامل را قادر می‌سازد تا در تغییرات ناگهانی بتوانند عملکردی مشابه با سیستم واقعی از خود نشان دهند. مدل‌سازی عامل‌بنیان از دو جزء تشکیل می‌شود: عامل‌ها و محیط پیرامون عامل‌ها.

عامل‌ها آیتم‌های نرم‌افزاری هستند که مشخصات[12] و ویژگی[13] خود را دارند و قوانین[14] مشخصی را دنبال می‌کنند؛ آنها در اصل تصمیم‌گیران خودمختار[15] هستند. به‌عبارت دیگر آنها قدرت و توانایی تصمیم بر اساس آموخته‌ها در چهارچوب دیسپلین‌های تعبیه شده را دارند و در هر لحظه دارای حالت[16] هستند. منظور از حالت مقداری است که ویژگی هر عامل به خود می‌گیرد. برای مثال در مورد ویژگی «جنسیت»، مقدار «مؤنث» نشان‌دهنده‌ی حالت یک عامل است. عامل‌ها با محیط[17] پیرامون خود و نیز با دیگر عامل‌های موجود در محیط در تعامل و تراکنش‌اند. عامل‌ها در هر سیستم غیریکنواخت[18] هستند؛ مثلاً ممکن است یک عامل مؤنث و نوجوان باشد و یک عامل مذکر و کودک. هر کدام از عامل‌ها دارای هدف بوده و از خود، رفتار تطبیقی[19] و یادگیری[20] نشان می‌دهند. این یادگیری می‌تواند کاملاً پیچیده با کمک الگوریتم‌های یادگیری باشد یا بسیار ساده در حد تبعیت و تقلید از رفتار دیگر عامل‌ها باشد.

در مدل‌های مبتنی بر عامل، عامل‌ها دارای ماهیتی خودمختارند به این ترتیب که می‌توانند کاملاً به‌صورت مستقل و طبق قوانین تعریف شده یا فراگرفته شده تصمیم‌گیری کنند. آنها از خود رفتار تطبیقی برحسب: ۱. شرایطی که در آن قرار گرفته‌اند؛[21] ۲. یادگیری از شرایط و تجربیات قبلی؛[22] ۳. تقلید از عامل‌های دیگر؛[23] ۴. گرایش به تکامل[24] نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که گرایش به تکامل می‌تواند به‌صورت گروهی یا انفرادی اتفاق بیفتد که منجر به تغییر در قوانین حاکم بر آنها و لزوم به‌روزرسانی آن می‌شود. در یک ساختار عامل‌بنیان یک عامل به طور تصادفی انتخاب می‌شود، رفتار خود را به اجرا می‌گذارد و سپس مطابق همان رفتار بر سایر عوامل و محیط پیرامون خود تأثیر می‌گذارد. با این تأثیرگذاری، وضعیت عامل‌ها و همچنین وضعیت محیط پیرامون به‌روز می‌شود. به بیان ساده هنگامی که رفتار عامل به‌روز و اجرا شد آنگاه بر دیگر عامل‌ها و محیط تأثیر می‌گذارد و این تأثیر موجب می‌شود وضعیت و حالت عامل‌ها و محیط تغییر یابد و طبق شرایط جدید به‌روز شود. این فرایند تا پایان افق زمانی که برای شبیه‌سازی تعریف شده، ادامه پیدا می‌کند و تکرار می‌شود. سرانجام این روند پایان می‌پذیرد و در نهایت گزارشی از فرایند سپری شده ارائه می‌شود.

## ۳. مراحل شبیه‌سازی مبتنی بر عامل

مراحل شبیه‌سازی با رویکرد عامل‌بنیان را می‌توان به سه مرحله‌ی کلی تعریف اجزای مدل، مرحله مدل‌سازی و مرحله اجرای مدل تقسیم کرد:

۱. تعریف اجزای مدل: در این مرحله لازم است با توجه به مأموریت سیستم، عامل‌ها را تعریف و محدوده‌ی محیط عامل‌ها یا به‌عبارت دیگر مرز سیستم مشخص کرد؛

۲. مدل‌سازی: در این مرحله دو فعالیت اصلی وجود دارد: الف) تعریف عامل و تعریف قوانینی که رفتار آنها را شکل می‌دهد؛ در هر دو مورد لازم است شناخت دقیق و عمیقی نسبت به سیستم وجود داشته باشد. ب) مشخص کردن محدوده‌ی سیستم؛ به‌عبارت دیگر تصمیم‌گیری در مورد آن که چه چیزهایی در مدل لحاظ شوند و چه چیزهایی استثناء شوند؛

۳. اجرای مدل: مقداردهی به مشخصات و ویژگی‌های عامل (حالات) و تنظیم قوانین حاکم بر آن در این مرحله انجام می‌گیرد (برای مثال مقداردهی دقیق جنسیت، محل سکونت و غیره برای هر عامل). اقدام بعدی آن است که مدل بارها و بارها اجرا شود. در هر بار تکرار سه عمل اصلی به‌روزرسانی،[25] تعامل[26] و ثبت اطلاعات و آمار[27] انجام می‌گیرد.

## ۴. معرفی واحد خدمات نت نیروگاه

روال کار سرویس‌دهی در این سیستم چنان است که تعمیرکاران تخصصی موظف به سرویس توربین‌های فعال موجود در سایت را دارند که زمان‌بندی سرویس و تخصیص منبع از طریق یک سیستم مرکزی کنترل می‌شود. هنگامی که درخواست تعمیر توسط سیستم مرکزی دریافت می‌شود، منبع ارائه‌ی خدمات تعمیر به سمت توربین درخواست‌کننده حرکت می‌کند و اقدامات لازم را انجام می‌دهد. در طول بررسی مشکل ممکن است خرابی غیرقابل تعمیر گزارش شود، به طوری که توربین را نمی‌توان تعمیر کرد که درآن صورت تعویض می‌شود. ممکن است عملیات تعویض توربین‌ها از قبل برنامه‌ریزی شده باشد و منبع ارائه‌ی خدمات تعمیر، تجهیزات قدیمی توربین را تعویض کند، حتی اگر همچنان فعال باشد. بعد از اتمام کار تعمیرکاران، به سایر درخواست‌ها در صورت وجود پاسخ می‌دهند در غیر این‌صورت به مرکز بازمی‌گردند. یک تعمیرکار هزینه‌ی روزانه‌ی ثابتی دارد و هریک از عملیات‌های تعمیر برنامه‌ریزی شده، تعمیر برنامه‌ریزی نشده یا تعویض و سرویس، مدت زمان و هزینه‌یی مشخص مطابق جدول ۱ دارند.

جدول ۱. پارامترهای مدت زمان و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات توربین‌ها.

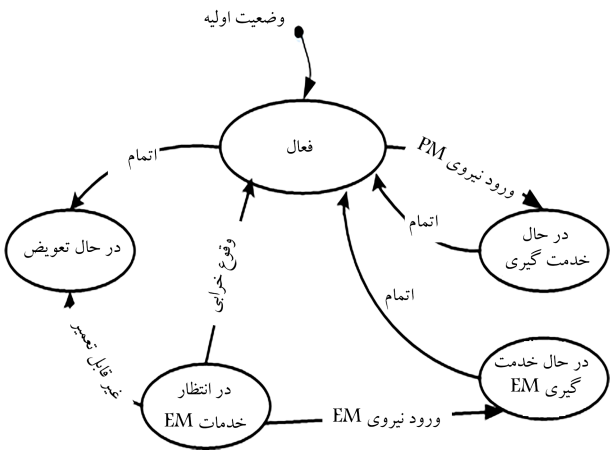
| نام پارامتر | مقدار | علامت اختصاری |
|---|---|---|
| هزینه‌ی تعمیر/بازدید | ۱۰۰۰ دلار در روز | $v_c$ |
| هزینه‌ی تعمیر اضطراری | ۱۵۰۰ دلار | $c_p$ |
| هزینه‌ی تعویض | ۱۵۰۰ دلار | $C_r$ |
| متوسط زمان استاندارد تعمیر | ۵ ساعت | $t_p$ |
| متوسط زمان استاندارد تعویض | ۱۲ ساعت | $t_r$ |
| متوسط زمان استاندارد نگه‌داری | ۳ ساعت | $t_m$ |
| متوسط زمان تا خرابی | ۵۰ روز | MTTF |
| متوسط فاصله‌ی زمانی دو نگه‌داری | ۱۴ روز | $S_t$ |
| هزینه‌ی ثابت خدمات تعمیر/تعویض | ۴۸۰۰۰ دلار در سال | $FC_{(t)}$ |
| زیان ناشی از توقف | ۱۲۸ دلار در ساعت | $l_{(t)}$ |

## ۵. ساختار مدل پیشنهادی مسئله

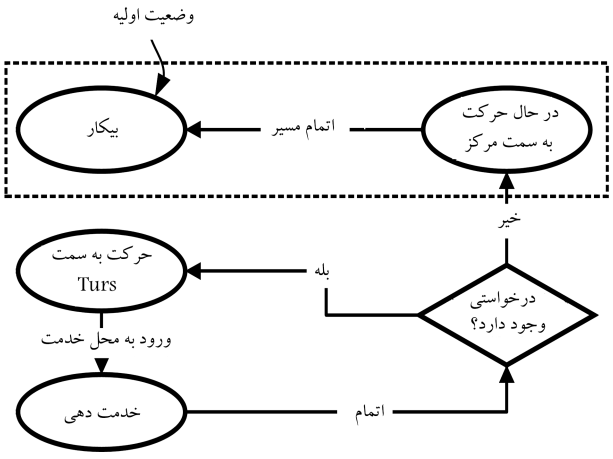
در رویکرد مدل‌سازی پیشنهادی عامل‌های تعریف شده عبارت‌اند از: توربین‌ها (turs)، مرکز کنترل (MC)، نیروی خدمات اضطراری (EM) و نیروی خدمات برنامه‌ریزی شده (PM).

عامل turs: این عامل‌ها که نقش نهاده را در سیستم ایفا می‌کنند در دو وضعیت فعال یا غیر فعال حضور دارند. حالت غیر فعال بیان‌گر وضعیتی است که عامل در انتظار تعمیر برنامه‌ریزی شده یا تعویض است. همچنین تشخیص و تعیین نوع تعمیر یا نگه‌داری بدون صرف زمان انجام می‌گیرد و تغییر وضعیت عامل در لحظه‌ی رسیدن نیروی خدماتی به وضعیت فعلی عامل بستگی دارد. بنابراین می‌توان نمودار تغییر وضعیت عامل turs را مطابق نمودار ۱ به تصویر کشید.

عامل Ems و PMs: این عامل‌ها رفتار ساده‌یی دارند. پس از دریافت درخواست (پیام) از مرکز به سمت عامل turs مورد نظر حرکت می‌کنند و پس از انجام سرویس با صرف زمان تعریف شده، پیام اتمام را مخابره می‌کنند. سپس به مرکز یا عامل بعدی (در صورت وجود درخواست) حرکت می‌کنند. این عامل‌ها همواره در یکی از سه وضعیت بیکار، در حال حرکت و در حال خدمات‌دهی وجود دارند. نمودار تغییر وضعیت این عامل‌ها مطابق نمودار ۲ است.




نمودار ۱. نمودار تغییر وضعیت عامل turs.




نمودار ۲. نمودار تغییر وضعیت عامل EMs و PMs.

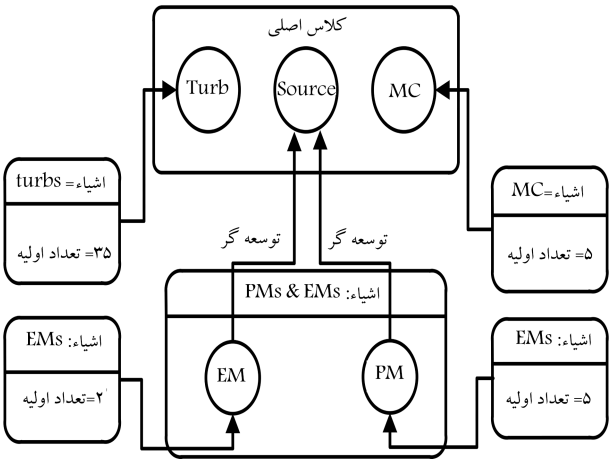
نمودار کلاس‌بندی انواع عامل‌ها با کمک محیط برنامه‌نویسی انی‌لاجیک[۲۸] مطابق نمودار ۳ به تصویر کشیده شده است. انی‌لاجیک یک زبان مدل‌سازی گرافیکی است که به کاربرانش اجازه‌ی گسترش مدل‌های شبیه‌سازی با کد جاوا را می‌دهد. ماهیت جاوا به سفارشی‌کردن برنامه‌ها از طریق برنامه‌نویسی و همچنین ایجاد اپلت‌های جاوا می‌پردازد که می‌تواند با هر مرورگر استانداردی باز شود. جاوا[۲۹] یک زبان برنامه‌نویسی شیء گراست بدین معنی که هر چیزی در سیستم بر اساس اشیاء ساخته می‌شود (که اشیاء همان عامل‌ها در روش عامل‌بنیان هستند).

چنان که در این نمودار مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی دارای کلاس شیء فعال اصلی[۳۰] است که در اصل دارای زیرکلاس‌های Turs، Source و MC برای اشیاء turs، EMs,PMs و MC به ترتیب است. لازم به ذکر است عامل‌های EMs,PMs کلاس Source را به ارث[۳۱] می‌برند.

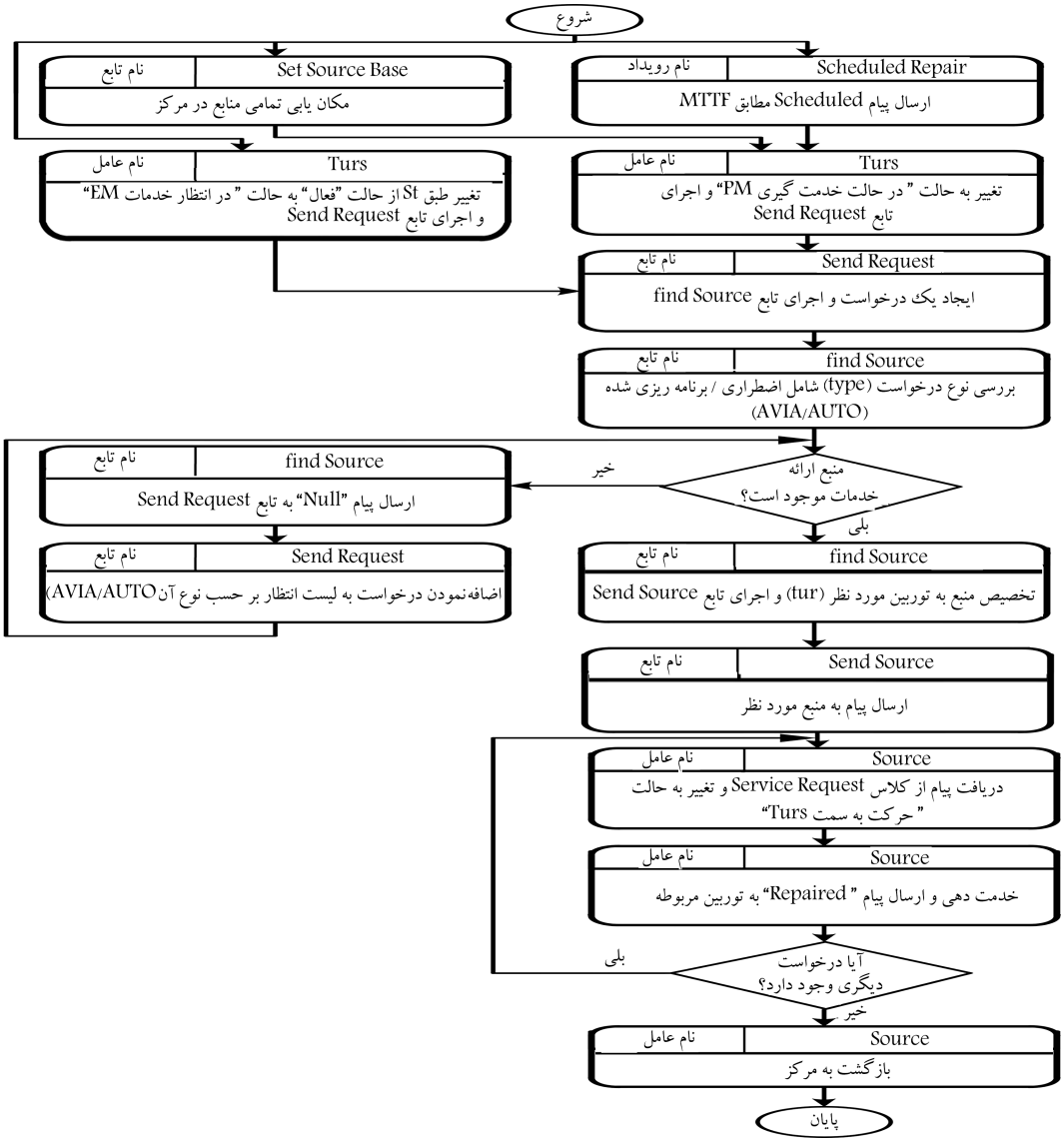
## ۶. متدولوژی حل مسئله

روش حل مسئله با رویکرد عامل‌بنیان، مبتنی بر متدلوژی شبیه‌سازی پایین به بالاست به طوری که با اجرای مدل، مطابق با کلاس‌های تعریف شده، اشیاء هر عامل ایجاد شده و پس از آن عامل (با رفتار خود) بر سایر عوامل و محیط پیرامون خود تأثیر می‌گذارد. با این تأثیرگذاری وضعیت عامل‌ها و همچنین وضعیت محیط پیرامون به‌روز می‌شود. به‌عبارت دیگر هنگامی که رفتار عامل بروز پیدا کرد و اجرا شد آن‌گاه با رفتارش بر دیگر عامل‌ها و محیط تأثیر می‌گذارد و این تأثیر موجب می‌شود وضعیت و حالت عامل‌ها و محیط تغییر یابد و طبق شرایط جدید به‌روز شود. این فرایند تا پایان افق زمانی که برای شبیه‌سازی تعریف شده، ادامه پیدا می‌کند و تکرار می‌شود. سرانجام با تحقق شرایط توقف ساعت شبیه‌سازی این روند به اتمام می‌رسد و در نهایت گزارش از فرایند صورت گرفته ارائه می‌شود. جزییات روال کار مدل پیشنهادی، برای درک بهتر به‌صورت شماتیک در قالب نمودار ۴ ارائه شده است.

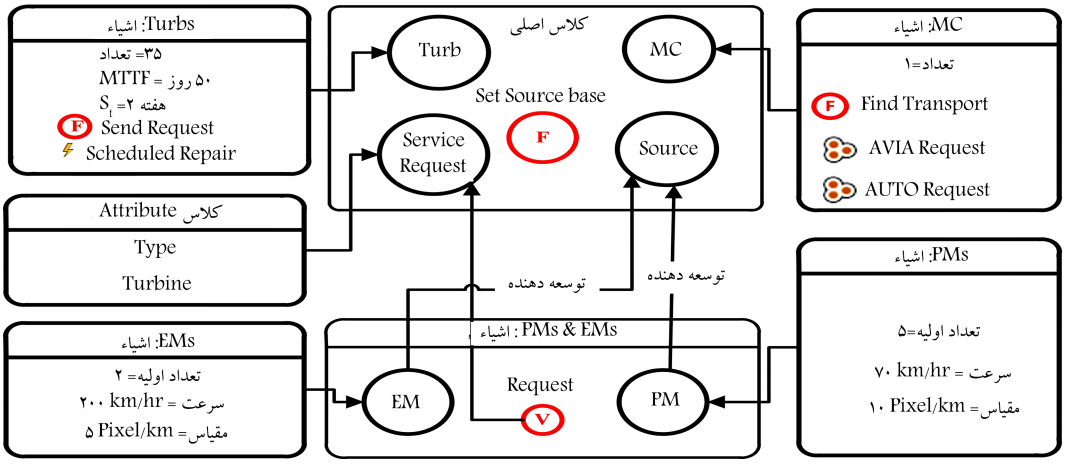
بنابراین مطابق روال تشریح شده در این نمودار می‌توان آنتولوژی تکمیلی مدل پیشنهادی را مشاهده کرد. لازم به ذکر است که کلاس Service Request یک نوع یا کلاس عامل است نه خود عامل که دارای دو پارامتر type و turbine است که در اصل از طریق این دو پارامتر مشخص می‌شود که کدام turb کدام نوع از درخواست‌ها (درخواست اضطراری[۳۲] یا درخواست برنامه‌ریزی شده[۳۳]) را دارد. آنتولوژی تکمیل شده برای مدل پیشنهادی مطابق نمودار ۵ قابل مشاهده است.




نمودار ۳. آنتولوژی ساختار کلاس‌ها در مدل پیشنهادی.

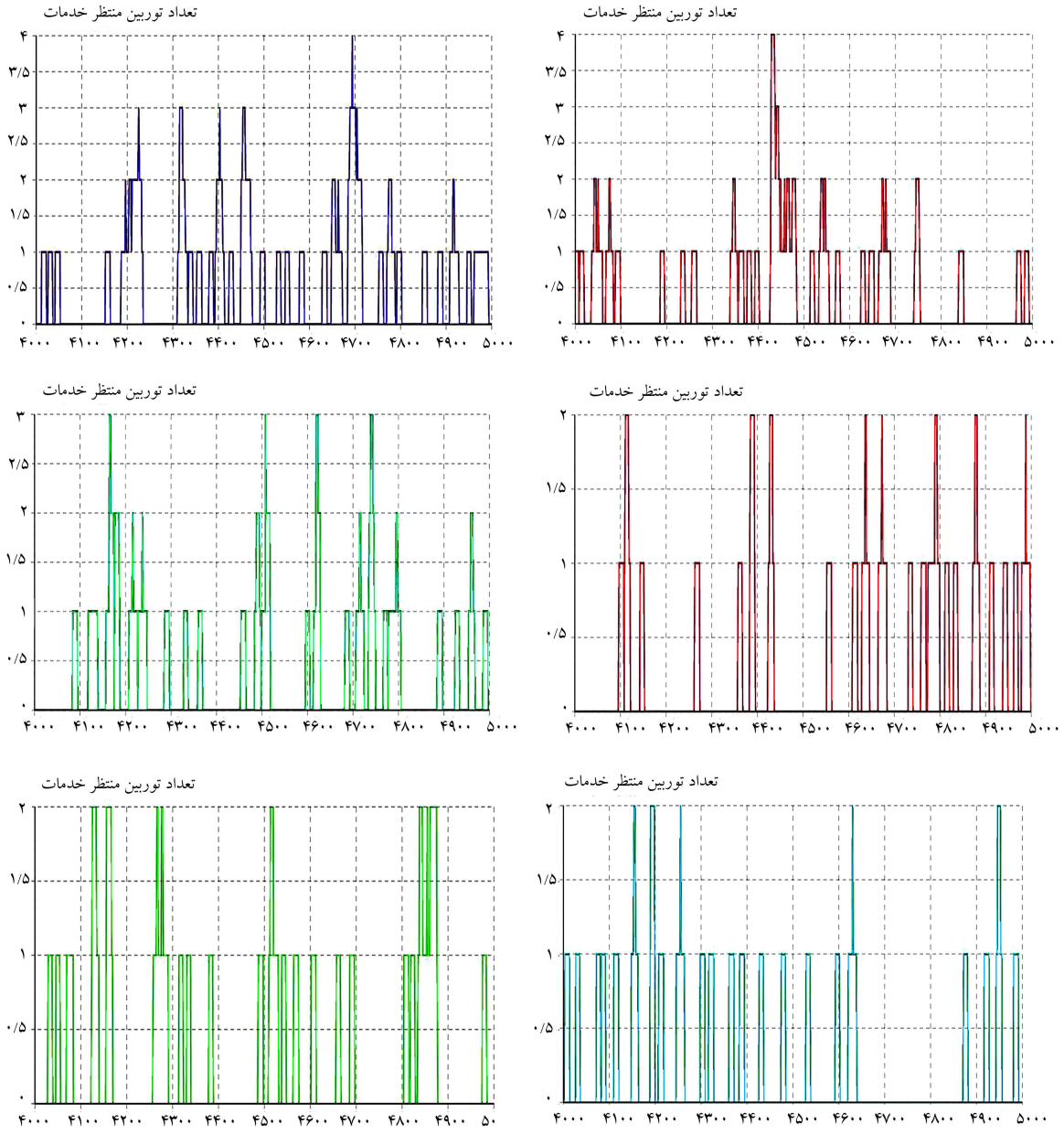



نمودار ۴. نمودار گردش کار در مدل پیشنهادی.

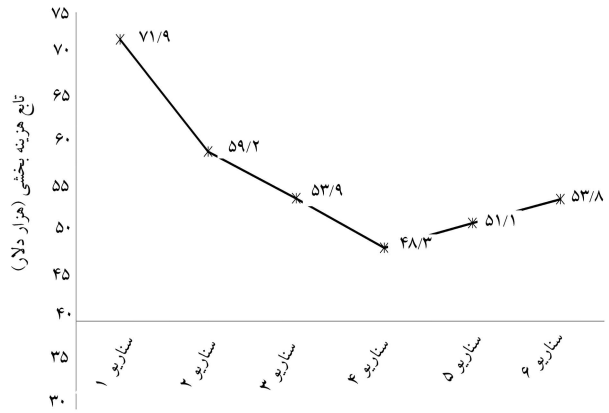



نمودار ۵. آنتولوژی تکمیلی ساختار کلاس‌ها و اشیاء.

نمودار ۶. شبیه سازی مدل پیشنهادی در محیط انی لاجیک.




نمودار ۷. سناریوهای مختلف برای تحلیل حساسیت هزینه‌های بخشی نسبت به تعداد منبع تخصیصی برحسب ساعت شبیه‌سازی: در هرکدام از نمودار الف در وضعیت فعلی به‌ترتیب تا نمودار ج، یک واحد افزایش نسبت به سناریو قبلی در تعداد منبع تخصیصی فرض شده است.




نمودار ۸. تحلیل حساسیت تابع هزینه بخشی در سناریوهای مختلف.

## ۷. اجرای مدل و تحلیل سناریو

مدل پیشنهادی در محیط برنامه‌نویسی انی‌لاجیک مبتنی بر جاوا و با استفاده از رایانه‌ی شخصی با مشخصات کارت‌گرافیک GTX ۱۰۶۰، پردازنده‌ی i۳ – ۶۱۰۰، حافظه‌ی ۱۲ گیگابایت و سیستم عامل لینوکس صورت‌پذیرفته است. در نمودار ۶ مدل طراحی شماتیک در محیط انی‌لاجیک نشان داده شده است.

«متوسط تعداد توربین منتظر برای دریافت خدمات» مطابق رابطه‌ی ۱ با استفاده از اطلاعات نمودار ۷ محاسبه شده است. مدل برای ۵۰۰۰ ساعت شبیه‌سازی شده و هربار شبیه‌سازی ۳ بار تکرار شده است تا نتایج دقیق و قابل استناد باشد.

$$C(q) = \int_{t=۰}^{T} q(t) \Big/ T \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی ۱، $q(t)$ بیان‌گر تعداد توربین منتظر خدمات در لحظه‌ی $t$، و $T$ کل بازه زمانی شبیه‌سازی است. هدف برقراری موازنه‌یی است بین هزینه‌های به‌کارگیری منابع ارائه‌ی خدمات و هزینه‌های ناشی از فرصت از دست رفته (توقف توربین) به طوری که مجموع هزینه‌های بخشی کمینه شود:

$$MinCost_{Partial} = \sum_{i=۱}^{T} l_{(t)} \cdot C(q) + (FC_{(t)} \cdot x) \cdot {}^{۱}\!/_{(۱+i)}{}^{T} \qquad (۲)$$

که در آن $i$ بیان‌گر نرخ تورم برای محاسبه‌ی ارزش زمانی پول است.

صحه‌گذاری مدل پیشنهادی از طریق مقایسه‌ی مجموع ساعات توقف توربین‌ها در ۵۰۰۰ ساعت اخیرکار نیروگاه با نتایج مدل انجام شد و با هدف تحلیل حساسیت تابع هزینه‌ی بخشی[۳۴] برحسب تعداد منبع ارائه‌ی خدمات، شش سناریو مطابق نمودار ۷ پیشنهاد شد. چنان که مشاهده می‌شود نمودار ۷ الف وضعیت تعداد توربین‌های منتظر خدمات را در وضعیت فعلی (BAU) با ۷ منبع فعال برای ارائه‌ی خدمات (شامل ۲ واحد برای EM و ۵ واحد برای PM) را نشان می‌دهد. در سناریوهای بعدی (از چپ به راست) هرکدام به ترتیب نسبت به سناریو قبلی افزایش یک واحدی در تعداد منابع فعال خدماتی تعریف شده است تا میزان حساسیت تابع هزینه بخشی نسبت به افزایش تعداد واحدهای خدماتی را مورد بررسی قرار دهد.

مطابق نمودار ۸، مقدار مطلوب تابع هزینه‌ی بخشی در سناریو چهارم با ۱۰ واحد خدماتی شکل می‌گیرد. زیرا با افزایش تا ۱۰ منبع، کاهش هزینه‌های فرصت از دست رفته (زیان ناشی از توقف) در مقایسه با هزینه‌های ثابت افزایش‌یافته برآیندی مثبت دارند. بنابراین کم‌ترین مقدار هزینه‌های بخشی در سناریو چهارم شکل می‌گیرد.

## ۸. نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی ظرفیت خدمات نگه‌داری و تعمیرات از جمله مسائلی است که مستقیماً با پارامترهای تولید در ارتباط است. در آن دسته از سیستم‌های تولیدی که پارامترهای تولیدی قطعیت ندارند یا متغیرهای دخیل در برنامه‌ریزی نگه‌داری و تعمیرات (از قبیل متوسط زمان انتظار تا خرابی) دارای مقدار ثابتی نیستند و از توزیع مشخصی پیرو نمی‌کنند، مدیران این حوزه را با چالش جدیدی مواجه می‌سازد که ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای جدید و کارآمدی را اجتناب ناپذیر می‌کند. تاکنون رویکردهای بهینه‌سازی استوار و بهینه‌سازی احتمالی برای مواجهه با این چالش پیشنهاد شده است که هر کدام دارای فرض‌های محدودکننده‌یی هستند. این فرض‌ها موجب ناکارآمدی غالب سیستم‌های تولیدی از جمله شبکه‌های محلی تولید برق مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود. با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی در سیاست‌گذاری‌های بلندمدت اقتصادی و اجتماعی ایران و همچنین اهمیت کاهش هزینه‌های تولید انرژی به‌عنوان یکی از عوامل حیاتی توسعه، مأموریت این تحقیق شناسایی و معرفی رویکرد برتر در حل مسئله‌ی بهینه‌یابی پتانسیل (ظرفیت) ارائه‌ی خدمات تعمیر و نگه‌داری در یک نیروگاه تجدیدپذیر بادی تعریف شد.

در این مسئله تعداد توربین‌ها در طی زمان متغیر بوده و هر واحد خدماتی در هر لحظه تنها می‌تواند به یک توربین خدمات ارائه دهد. عدم قطعیت پارامترهای سیستم و نیز مشخص نبودن الگو و زمان وزش باد در منطقه سبب شده بود تا برآورد بهینه‌ی پتانسیل خدمات و زمان دقیق تعمیر یا نگه‌داری برای توربین‌ها را با مشکل مواجه سازد. ارائه‌ی یک مدل عامل‌بنیان، بستری برای غلبه بر پیچیدگی‌های مسئله ایجاد کرد به طوری که در مدل پیشنهادی از طریق تعریف توابع، رویدادها، پارامترها و متغیرها، رفتار عامل‌های سیستم و روابط حاکم بین آنها و دینامیک‌های موجود در سیستم شبیه‌سازی شد. پس از صحه‌گذاری مدل، به منظور یافتن بهترین سناریو تخصیص منبع ارائه‌ی خدمات نگه‌داری و تعمیر به توربین‌ها، سناریوهای مختلف با تعداد واحد خدماتی متفاوت پیشنهاد و با سناریو فعلی مقایسه شد. تحلیل حساسیت هزینه‌ی سناریوهای مختلف برحسب تعداد منبع خدماتی تخصیص داده شده حاکی از آن است که افزایش تعداد واحدهای خدماتی نیروگاه از ۷ به ۱۰ موجب مقدار حداقلی در هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم خواهد شد.

از آن‌جا که مدل‌سازی مبتنی بر عامل یک مدل‌سازی پایین به بالا است قادر است تا درک روابط، الگوها یا اتفاقاتی را که در سطح کلان یک سیستم پیچیده غیر ممکن به نظر می‌رسد، از طریق تعریف رفتار تک‌تک عامل‌ها امکان‌پذیر سازد. استواری در مقابل عدم قطعیت‌ها از جمله قابلیت‌هایی است که مدل‌های مبتنی بر عامل را قادر می‌سازد تا در تغییرات ناگهانی بتوانند عملکردی مشابه سیستم واقعی از خود نشان دهند.

## پانوشت‌ها

1. monitoring condition
2. RAMS
3. Ad-hoc
4. industry 4.0
5. holonic
6. periodic maintenance
7. emergency failure repairs
8. robust optimization
9. stochastic optimization
10. emergence
11. bottom-up
12. property
13. attribute
14. rule
15. autonomous
16. state
17. environment
18. heterogeneous
19. adaptive
20. learning
21. conditional behavior changes
22. learning
23. imitation
24. revolution
25. update
26. interact
27. record
28. anylogic
29. Java
30. main
31. ارث بری به عنوان یک از ویژگی‌های برجسته‌ی برنامه‌نویسی شی‌ءگرا به معنای به ارث بردن ویژگی‌ها و خصوصیات است. چنانچه کلاسی به‌عنوان کلاس فرزند از کلاس والد تعریف شود تمامی خصوصیات و ویژگی‌های کلاس والد خود را به طور ضمنی دارد. تقریباً مشابه با مفهومی که زیرمجموعه‌های یک مجموعه‌ی مرجع تمامی ویژگی‌های آن مجموعه را دارند. این خاصیت لزوم تعریف مجدد ویژگی‌ها را برای یک کلاس از بین می‌برد.
32. AVIA
33. AUTO
34. CostPartial

## منابع (References)


1. Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E. and et al. "Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review", *Engineering*, **3**(5), pp. 616-630, Oct (2017). Doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
2. Wang, X., Ong, S.K. and Nee, A.Y.C. "A comprehensive survey of ubiquitous manufacturing research", *Int. J. Prod. Res*, **56**(1-2), pp. 604-628 Jan (2018). Doi: 10.1080/00207543.2017.1413259.
3. Kusiak, A. "Smart manufacturing", *Int. J. Prod. Res*, **56**(1-2), pp. 508-517 Jan (2018). Doi: 10.1080/00207543.2017.1351644.
4. Darmoul, S., Pierreval, H. and Hajri-Gabouj, S. "Handling disruptions in manufacturing systems: an immune perspective", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **26**(1), pp. 110-121 Jan (2013). Doi: 10.1016/j.engappai.2012.09.021.
5. Bayar, N., Hajri-Gabouj, S. and Darmoul, S. "Knowledge-based disturbance propagation in manufacturing systems: a case study", in 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET), pp. 467-427 Mar. (2018). Doi: 10.1109/ASET.2018.8379900.
6. Giret, A., Trentesaux, D., Salido, M.A. and et al. "A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems", *J. Clean. Prod*, **167**, pp. 1370-1386, Nov (2017). Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.079.
7. Atamuradov, V., Medjaher, K., Dersin, P. and et al. "Prognostics and health management for maintenance practitioners - Review, implementation and tools evaluation", *Int. J. Progn. Health Manag*, **8**(060), pp. 1-31, Dec (2017).
8. Andreadis, G., Klazoglou, P., Niotaki, K. and et al. "Classification and review of multi-agents systems in the manufacturing section", *Procedia Eng*, **69**, pp. 282-290 Jan (2014). Doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.233.
9. Andreadis, G., Bouzakis, K.-D. and Klazoglou, P. and et al. "Review of agent-based systems in the manufacturing section", *Univers. J. Mech. Eng*, **2**(2), pp. 55-59, Feb (2014). Doi: 10.13189/ujme.2014.020204.
10. Colledani, M. and et al. "Design and management of manufacturing systems for production quality", *CIRP Ann. - Manuf. Technol*, **63**(2), pp. 773-796 (2014). Doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.002.
11. Lu, Y. "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues", *J. Ind. Inf. Integr*, **6**, pp. 1-10, Jun (2017). Doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
12. Maintenance Engineering and Management. Venkataraman, V. Maintenance engineering and management. PHI Learning Pvt. Ltd. (2007).
13. Trentesaux, D. "Distributed control of production systems", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **22**(7), pp. 971-978 Oct (2009). Doi: 10.1016/j.engappai.2009.05.001.
14. Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J. and et al. "Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review", *Adv. Eng. Inform*, **20**(40), pp. 415-431 Oct (2006). Doi: 10.1016/j.aei.2006.05.004.
15. Leitão, P. "Agent-based distributed manufacturing control: a state-of-the-art survey", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **22**, pp. 979-991 Oct (2009). Doi: 10.1016/j.engappai.2008.09.005.
16. Gallab, M., Bouloiz, H., Alaoui, Y.L. and et al. "Risk assessment of maintenance activities using Fuzzy logic", *Procedia Comput. Sci*, **148**, pp. 226-235 Jan (2019). Doi: 10.1016/j.procs.2019.01.065.
17. Babiceanu, R.F. and Chen, F.F. "Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey", *J. Intell. Manuf*, **17**(1), pp. 111-131, Feb (2006). Doi: 10.1007/s10845-005-5516-y.
18. Leitão, P., Barbosa, J. and Trentesaux, D. "Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **25**(5), pp. 934-944, Aug (2012). Doi: 10.1016/j.engappai.2011.09.025.
19. Lee, J., Ghaffari, M. and Elmeligy, S. "Self-maintenance and engineering immune systems: towards smarter machines and manufacturing systems", *Annu. Rev. Control*, **1**(35), pp. 111-122 (2011). Doi: 10.1016/j.arcontrol.2011.03.007.

20. Fasanotti, L., Dovere, E., Cagnoni, E. and et al. "An application of artificial immune system in a wastewater treatment plant", *IFAC-Pap*, **49**(28), pp. 55-60, Jan (2016). Doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.010.

21. Meyer, G.G. Främling, K. and Holmström, J. "Intelligent products: a survey", *Comput. Ind*, **60**(3), pp. 137-148 Apr. (2009). Doi: 10.1016/j.compind.2008.12.005.

22. Främling, K., Loukkola, J., Nyman, J. and et al. "Intelligent products in real-life applications", *International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM11)*, I4E2 Metz. (2011).

23. Porter, M.E. and Heppelmann, J.E. "How smart, connected products are transforming competition", *Harv. Bus. Rev*, **92**(11), pp. 64-88 (2014).

24. Mortellec, A., Clarhaut, J., Sallez, Y. and et al. "Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **26**, pp. 227-240, Jan. (2013). Doi: 10.1016/j.engappai.2012.09.008.