



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، صص ۴۷-۷۰

نوع مقاله: پژوهشی

## مدلسازی استراتژی تأمین قطعات توربین گازی با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

عبدالکریم محمدی بالانی<sup>۱</sup>، محمود دهقان نیری<sup>۲\*</sup>، محمدرضا تقی زاده یزدانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

### چکیده

زنجیره‌های تأمین، یکی از مهم‌ترین زیربناهای اقتصاد پیچیده حال حاضر دنیا هستند. مدیریت بهینه موجودی و عملیات در سطح زنجیره تأمین مسئله‌ای پیچیده است که حل آن نیازمند توسعه روش‌های مناسب است. هدف این پژوهش، ارائه یک روش شناسی برای حل مسئله انتخاب تأمین‌کننده، تعیین سیاست کنترل موجودی، تعیین پارامترهای سیاست کنترل موجودی در زنجیره تأمین توربین گازی به صورت توأم است. بدین منظور از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده شده است. در ابتدا یک مدل ریاضی برای این مسئله با این فرض که در مرحله بعدی، بسیاری از محاسبات معادلات جبری، جای خود را به مدل شبیه‌سازی می‌دهند، ساخته شد. در ادامه مدل شبیه‌سازی برای زنجیره تأمین توربین گازی شرکت توربو کمپرسور نفت ساخته و اعتبارسنجی شد. در ادامه با پیوستن مدل شبیه‌سازی و مدل ریاضی به یکدیگر، مدل ترکیبی به دست آمد. نوآوری این مدل از این جهت است که برای اولین بار، سیاست‌های کنترل موجودی مختلف در مدل شبیه‌سازی تعبیه شده و به صورت متغیر تصمیم در دسترس است و الگوریتم بهینه‌سازی می‌تواند سیاست‌های مختلف را برگزیند. همچنین پارامترهای سیاست‌ها نیز در کنار خود سیاست‌ها به عنوان متغیر تصمیم ارائه شده‌اند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی پیشنهاد شده است. نتایج نشان دهنده آن است که سیاست کنترل موجودی بهینه برای تمام قطعات، مرور دائم است. همچنین در جواب بهینه به دست آمده، سفارشات تأمین قطعات تنها برای دو تأمین‌کننده از پنج تأمین‌کننده در دسترس صادر می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، زنجیره تأمین، الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی، کنترل موجودی، انتخاب تأمین‌کننده



## ۱- مقدمه و بیان مسئله

در دهه‌های اخیر، رویکرد طراحی یک سازمان و تصمیم‌گیری در درون آن سازمان به چالش کشیده شده و تفکر در قالب مجموعه‌ای از سازمان‌ها جایگزین شده است. سازمان‌های تولیدی و خدماتی امروزی درون سازمان‌هایی بزرگتر با نام زنجیره تأمین فعالیت می‌کنند که هدف غایی آن، ارزش آفرینی برای مشتری از طریق همکاری با یکدیگر است. امروزه طراحی سازمان‌ها در قالب پروژه‌هایی بزرگتر و پیچیده‌تر به نام طراحی زنجیره تأمین و مدیریت آنها در سطح کلان‌تر و با نگاه به زنجیره تأمین انجام می‌شود و رضایت مشتری در گرو موفقیت کل زنجیره و نه یک یا چند سازمان عضو آن است.

تلاطم و رقابت در محیط‌های کسب و کار نیز فشار مضاعف در جهت هرچه کارا و مؤثرتر شدن زنجیره تأمین به مدیران می‌آورد. مدیریت زنجیره تأمین زمانی می‌تواند شرکت را به اهداف خود برساند که در شرایط بهینه کار کند. همکاری و یکپارچگی به عنوان اساسی‌ترین مفاهیمی که می‌توانند مدیریت زنجیره‌ها را بهتر محقق کنند شناخته می‌شوند.

در صورتی که کل زنجیره به شکل متناسب با یکدیگر فعالیت نکنند، به مشتریان و سازمان‌ها زیان وارد می‌شود و در درازمدت نیز آثار اجتماعی و اقتصادی خود را به جای می‌گذارد. بنابراین صرف نگاه کردن به چند سازمان به شکل زنجیره کفایت نمی‌کند بلکه فعالیت آن در مقیاس بهینه نیز بسیار مهم است. برای کاهش هزینه‌ها و ایجاد مزیت رقابتی در محیط‌های کسب و کار به شدت متلاطم کنونی، تدوین استراتژی‌های زنجیره تأمین موفق ضروری است [۱]، [۲].

مسئله اصلی مورد بررسی در این پژوهش، تعیین سیاست بهینه کنترل موجودی، پارامترهای بهینه سیاست کنترل موجودی بهینه و انتخاب تأمین کننده است. طراحی یک زنجیره تأمین یک مسئله پیچیده است که همانند سایر مسئله‌های صنعتی نیاز به در نظر گرفتن همزمان مسائلی چون «عملکرد» و «هزینه» دارد. عملکرد زنجیره وابسته به خروجی آن است که می‌تواند تعداد محصولات که در یک واحد زمانی مشخص تولید می‌کند باشد یا ترکیب توأمان هزینه و کیفیت. هزینه‌ها عبارت‌اند از میزان منابع مورد نیاز (نیروی کار یا تجهیزات) جهت تکمیل تمامی فعالیت‌ها. مسئله طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین اساساً یک مسئله تبادل بین این دو عامل است [۲]. پیچیدگی زنجیره‌های تأمین چند سطحی در دنیای واقعی با توجه به عدم اطمینان‌های



موجود منتج به ایجاد مسائل بهینه‌سازی بسیار چالش برانگیزی می‌شود که با روش‌های مرسوم برنامه ریزی ریاضی نمی‌توان آن را حل و بهینه‌سازی نمود [۴]. بدین منظور نیازمند توسعه مدل‌های ترکیبی هستیم تا بتوانیم مسئله مورد بررسی را هرچه بهتر حل کرده و جواب‌های کاربردی تری به دست آوریم.

در جهت ایجاد روش‌هایی جهت بهبود و بهینه‌سازی زنجیره تأمین تلاش‌های زیادی شده است. عمده تلاش‌ها از طریق برنامه ریزی ریاضی بوده است. همچنین رویکرد دیگری که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است، شبیه‌سازی است.

بهینه‌سازی و شبیه‌سازی ابزارهای مؤثری هستند که کاربردهای فراوانی نیز دارند و موفقیت خود را در دنیای واقعی نیز اثبات کرده‌اند. هر کدام از این ابزارها دارای نقاط قوت و ضعف هستند. رویکردهای بهینه‌سازی تنها به بهبود عملکرد سیستم توجه می‌کنند و از این جهت دارای قوت می‌باشند اما در بررسی سیستم در طول زمان ضعف دارند. به بیان دیگر، روش‌های بهینه‌سازی، به دنبال بهترین تصویر از سیستم هستند و در خروجی خود، یک عکس لحظه‌ای از سیستم در بهترین و بهینه‌ترین لحظه ارائه می‌کنند در حالی که شرایط محیطی و درونی سازمان‌ها در هر لحظه تغییر می‌کند و اساساً هیچ سازمانی نمی‌تواند در حالت بهینه خود برای مدت طولانی فعالیت کند.

ضعف دیگر در بیان واقعیات سیستم صرفاً بر اساس روابط خوش‌تعریف ریاضی<sup>۱</sup> است در حالی که بسیاری از روابط میان اجزای زنجیره تأمین الزاماً از روابط خطی و غیرخطی ریاضی تبعیت نمی‌کند. البته برخی محققان با استفاده از متغیرهای صفر-یک و سایر روش‌های ریاضی، توانسته‌اند که عامل زمان را نیز تا حدودی دخیل کنند اما همچنان این روش‌ها در هر دوره به دنبال بهینه‌سازی صرف هستند.

یکی از بهترین راه‌ها برای ارزیابی سیستم‌های پیچیده، شبیه‌سازی آنها است [۶]، [۵]. روش‌های شبیه‌سازی به رفتار سیستم در طول زمان توجه دارند و ماژول‌های مناسبی جهت ایجاد روابط غیرخطی بین اجزا دارند اما فاقد ابزاری جهت بررسی رفتار بهینه سیستم می‌باشند. البته در بسیاری از تحقیقات، از دستکاری پارامترهای سیستم جهت بهینه‌سازی و یافتن جوابی که پایدار باشد و از نظر عملکرد نیز نسبتاً مناسب بهینه استفاده می‌شود اما این

<sup>۱</sup> Well-defined mathematical relations



روش نیز نمی‌تواند منجر به رسیدن به کارکرد بهینه سیستم می‌شود. یکی دیگر از نقاط قوت روش‌های شبیه‌سازی، قابلیت ذاتی آنها برای لحاظ کردن رفتار تصادفی سیستم است در حالی که در ابزارهای بهینه‌سازی چنین قابلیتی به سادگی و به صورت پیش فرض موجود نیست. یکی از مشکلاتی که در مسیر فرموله سازی و حل ظاهر می‌شود این است که محاسبه کردن خروجی یک خط تولید پیچیده بسیار مشکل است. حتی محاسبه کردن مختصات برای یک خط تولید ساده تک محصولی با فعالیت‌ها و زمان‌های قطعی بسیار مشکل است و هنگامی که مدل‌های واقعی‌تر در زنجیره‌های تأمین چند سطحی و چند محصولی پا به میدان می‌گذارند، محاسبه دقیق و حتی تقریبی نیز نشدنی می‌شوند [۸], [۷].

در سال‌های اخیر جهت بهره‌مندی از مزایای این دو رویکرد مهم و پوشاندن نقاط ضعف هر روش به وسیله نقطه قوت دیگری، رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی ارائه شده است. به طور کلی این رویکرد به دنبال بهینه‌سازی سیستم در طول زمان و با در نظر گرفتن روابط غیرخطی بین اجزا است. بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی معمولاً هنگامی استفاده می‌شود که شکل بسته‌ای از تابع هدف یا محدودیت‌ها در دسترس نباشد [۹], [۱۰]. تفاوت انواع رویکردهای ارائه شده در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. مقایسه رویکردهای بهینه‌سازی زنجیره تأمین

رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به تازگی ارائه شده است و هنوز مقالات زیادی در این زمینه وجود ندارد. همچنین به علت پیچیدگی‌های پیاده‌سازی و عدم وجود بسته نرم‌افزاری مستقل برای این رویکرد نیز مانع از گستردگی تحقیقات شده است. پژوهش حاضر بر آن است تا با استفاده از این رویکرد و همچنین ایجاد تغییراتی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی



موجود جهت انطباق هرچه بیشتر با فضای تصادفی، به بهینه‌سازی سیستم‌های صنعتی کمک نماید.

ساختار مقاله پیش رو بدین شرح است. در بخش ۲ ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته و موارد اصلی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند مفهوم پردازی می شوند. در بخش ۳ مدل ریاضی - شبیه سازی پیشنهادی تشریح می‌شود. در این بخش، مدل شبیه‌سازی و مدل ریاضی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بخش ۴ به تجزیه و تحلیل نتایج پیاده‌سازی الگوریتم فراابتنکاری عقاب طلایی بر روی مدل ریاضی - شبیه‌سازی اختصاص یافته است. در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی مطرح گردیده است.

## ۲- ادبیات پژوهش

### ۲-۱- زنجیره تأمین

زنجیره تأمین عبارت است از شبکه‌ای از سازمان‌ها و فعالیت‌ها که در آن تعدادی شرکت در چند لایه شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده فروش در طول زنجیره ارزش فعالیت می‌کنند تا مواد خام را به دست آورده، تبدیل به محصولات مشخصی کرده و در نهایت این محصولات را به دست مصرف‌کننده نهایی برسانند [۱۱].

مدیریت زنجیره تأمین (SCM) عبارت است از یکپارچگی و همکاری میان‌سازمانی و میان‌واحدی در زمینه مواد اولیه و جریان‌های اطلاعاتی و مالی در راستای استفاده و تبدیل منابع زنجیره تأمین به منطقی‌ترین شکل ممکن در کل زنجیره [۱۲]. مدیریت زنجیره تأمین یکی از کلیدی‌ترین اجزاء هر سازمان است که مسئول ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا در طول کل زنجیره ایجاد ارزش است و اقدام به یکپارچه‌سازی فرآیندهای تولید و تدارکات می‌کند. در دنیای واقعی، مسائل تولیدی، تدارکاتی و زنجیره تأمین با یکدیگر تعامل می‌کنند و به شدت به یکدیگر مرتبط‌اند.

مدیریت زنجیره تأمین به طور ویژه به سطح فعالیت‌های میان‌سازمانی اختصاص دارد. پیاده‌سازی موفق مدیریت زنجیره تأمین تا حد زیادی به تغییرات بین‌سازمانی که ایجاد می‌شود بستگی دارد. حتی فرآیندهای مشترک دارای پایگاه داده مشترک نیز توسط واحدهایی



در سازمان‌های مختلف استفاده می‌شود که تضاد منافع دارند بنابراین مدیریت زنجیره تأمین نیاز به همگام سازی درون سازمانی و برون سازمانی توسط تمامی شرکت‌های حاضر در زنجیره دارد [۱۳].

**بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی.** بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی<sup>۱</sup> (SimOpt) یک حوزه تحقیقاتی نوظهور است که اولین مقالات آن به دهه اول هزاره سوم (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) باز می‌گردد که علت عمده آن پیشرفت‌های اخیر در صنعت رایانه بوده که منجر به تولید رایانه‌های قوی شده است زیرا این روش از نظر محاسباتی و فشار به پردازنده رایانه بسیار سنگین‌تر<sup>۲</sup> از روش‌های بهینه‌سازی و یا شبیه‌سازی به‌تنهایی است [۱۴]. این روش از خانواده روش‌های بهینه‌سازی عاری از مشتق<sup>۳</sup> (DFO) است [۱۵]. خواستگاه این روش، علم الکترونیک و مخابرات است که در سال‌های اخیر به حوزه‌های تولید و عملیات، شیمی و عمران نیز راه پیدا کرده است.

## ۲-۲- شبیه‌سازی گسسته - پیشامد<sup>۴</sup>

اغلب پیشرفت‌هایی که تا دو دهه پیش در مهندسی و کنترل سیستم‌ها به دست آمده بود، متکی به مدل‌های مبتنی بر معادلات دیفرانسیل<sup>۵</sup> بود. این سیستم‌ها دو ویژگی اساسی دارند:

- فضای نمونه‌ای (مجموعه حالات سیستم) یک مجموعه پیوسته<sup>۶</sup> است.
- مکانیسم انتقال حالت سیستم<sup>۷</sup>، زمان محور<sup>۸</sup> باشد. به بیان دیگر نیرو محرکه تغییر حالت سیستم، زمان است.

ویژگی پیشامد محور بودن سیستم‌های DES بیانگر این واقعیت است که این سیستم‌ها تنها در نقاط گسسته‌ای از زمان تغییر حالت می‌دهند که این نقاط متناظر با رخ دادن پیشامدها هستند. از نگاه مدل‌سازی، این نکته را می‌توان بدین صورت بیان کرد که اگر بتوان مجموعه‌ای از پیشامدها را شناسایی کرد که هر کدام از آنها منجر به انتقال حالت سیستم می‌شوند، در این صورت دیگر زمان نمی‌تواند به عنوان موتور محرکه و متغیر مستقل چنین سیستمی در نظر گرفته شود.

<sup>۱</sup> SIMulation-based OPTimization

<sup>۲</sup> CPU-intensive

<sup>۳</sup> Derivative-Free Optimization

<sup>۴</sup> Discrete-event simulation

<sup>۵</sup> Differential equation based models

<sup>۶</sup> Continuous-state

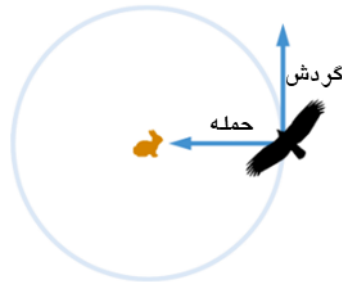
<sup>۷</sup> State transition mechanism

<sup>۸</sup> Time-driven



### ۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی

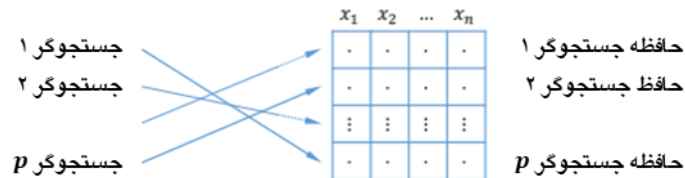
الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی<sup>۱</sup> (GEO) یک الگوریتم فراابتکاری است که در رساله دکتری نویسنده این پژوهش ارائه شده است [۱۶]. برای توسعه عملگرهای این الگوریتم، از مراحل شکار مارپیچ عقاب طلایی الگوگیری شده است که در شکل ۲ قابل ملاحظه است.



شکل ۲. حرکت مارپیچی عقاب طلایی هنگام شکار

مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است.

مرحله ۱. انتخاب طعمه در هر تکرار، هر عقاب طلایی باید یک طعمه را برای انجام عملیات گردش و حمله انتخاب کند. در GEO، طعمه به عنوان بهترین جوابی که تاکنون توسط گله عقاب‌های طلایی پیدا شده است، مدل‌سازی شده است.



شکل ۳. نگاشت یک به یک در انتخاب طعمه در GEO

مرحله ۲. تشکیل بردار حمله. حمله را می‌توان از طریق یک بردار مدل‌سازی کرد که از موقعیت فعلی عقاب طلایی شروع می‌شود و به محل شکار در حافظه عقاب ختم می‌شود. بردار حمله برای عقاب طلایی را می‌توان از طریق رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$\vec{A}_i = \vec{X}_f^* - \vec{X}_i \quad (1)$$

<sup>۱</sup> Golden Eagle Optimizer



که بردار حمله عقاب  $\vec{A}_i$  است،  $\vec{X}_f^*$  بهترین مکان (طعمه) است که تاکنون توسط عقاب  $f$  بازدید شده است و  $\vec{X}_i$  موقعیت فعلی عقاب است.

مرحله ۳. تشکیل بردار گردش. بردار گردش بر اساس بردار حمله محاسبه می شود. بردار گردش بردار مماس بر دایره فرضی و عمود بر بردار حمله است. بردار گردش را می توان به عنوان سرعت خطی عقاب طلایی نسبت به طعمه نیز در نظر گرفت.

$$h_1x_1 + h_2x_2 + \dots + h_nx_n = d \Rightarrow \sum_{j=1}^n h_jx_j = d \quad (2)$$

که در آن  $\vec{H} = [h_1, h_2, \dots, h_n]$  بردار نرمال،  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  بردار متغیرهای تصمیم،  $\vec{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]$  نقطه ای دلخواه روی ابرصفحه است. همچنین  $d = \vec{H} \cdot \vec{P} = \sum_{j=1}^n h_j p_j$  که نقطه نماد ضرب داخلی است. اگر بردار  $\vec{X}$  (موقعیت عقاب  $i$ ) را به عنوان نقطه دلخواه در ابر صفحه و بردار  $\vec{A}_i$  (بردار حمله) را به عنوان بردار نرمال ابرصفحه در نظر بگیریم، با توجه به رابطه زیر می توان نشان داد که بردار  $\vec{C}_i^t$  متعلق به این ابرصفحه است.

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j = \sum_{j=1}^n a_j^t x_j^* \quad (3)$$

که در آن بردار حمله  $\vec{A}_i = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  بردار حمله،  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  بردار متغیرهای تصمیم و  $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$  محل طعمه انتخاب شده است.

در ادامه برای تشکیل بردار گردش، به طور تصادفی یک متغیر از  $n$  متغیر را به عنوان متغیر ثابت فرض کنید. به تمام متغیرهای غیر از متغیر  $k$  مقادیر تصادفی اختصاص دهید. مقدار متغیر  $k$  را از رابطه (۴) بیابید.

$$c_k = \frac{d - \sum_{j, j \neq k} a_j}{a_k} \quad (4)$$

که در آن عنصر  $k$  ام مقصد مقصد  $C$  است، عنصر  $j$  ام بردار حمله  $\vec{A}_i$  است،  $d$  مقدار سمت راست رابطه است، عنصر  $k$  ام بردار حمله  $\vec{A}_i$  است و  $k$  اندیس متغیر ثابت است. نقطه مقصد تصادفی در ابرصفحه گردش پیدا شده است. رابطه (۵) نمایش کلی نقطه مقصد را در ابرصفحه گردش نشان می دهد.

$$\vec{C}_i = \left[ c_1 = \text{random}, c_2 = \text{random}, c_k = \frac{d - \sum_{j, j \neq k} a_j}{a_k}, \dots, c_n = \text{random} \right] \quad (5)$$





اکنون که نقطه مقصد مشخص شده است، می‌توان بردار گردش را برای عقاب طلایی  $i$  در تکرار  $t$  محاسبه کرد. عناصر نقطه مقصد به دست آمده اعداد تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند. قابل توجه است که بردار گردش جمعیت عقاب‌های طلایی را به سمت مناطقی غیر از مناطقی که در حافظه هستند جذب می‌کند. بنابراین، بر مرحله اکتشاف GEO تأکید دارد. مرحله ۴. حرکت به سمت نقاط جدید. جابجایی عقاب‌های طلایی از بردار حمله و گردش تشکیل می‌شود. ما بردار گام را برای عقاب طلایی در تکرار به صورت رابطه (۶) تعریف می‌کنیم.

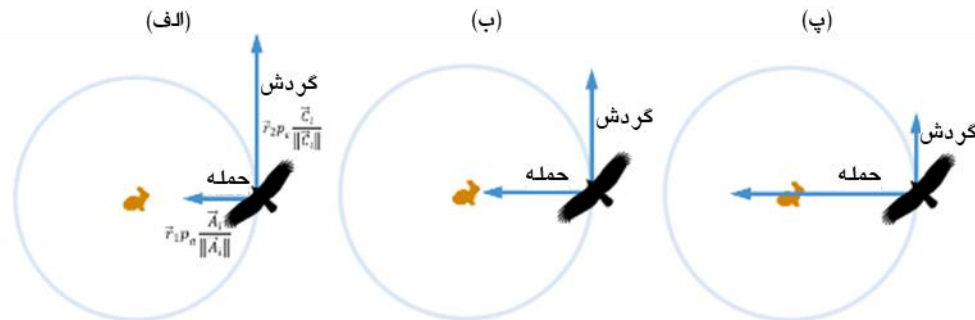
$$\Delta x_i = \vec{r}_1 p_a \frac{\vec{A}_i}{\|\vec{A}_i\|} + \vec{r}_2 p_c \frac{\vec{C}_i}{\|\vec{C}_i\|} \quad (6)$$

که در آن  $p_c$  و  $p_a$  به ترتیب برابر با ضریب حمله و ضریب گردش هستند و چگونگی تحت تأثیر حمله و گردش قرار گرفتن عقاب‌های طلایی را تنظیم می‌کنند.  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بردارهای تصادفی هستند که عناصر آنها در بازه  $[0,1]$  قرار دارند. و بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.  $\|\vec{A}_i\|$  و  $\|\vec{C}_i\|$  نرم اقلیدسی بردارهای حمله و گردش هستند و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} \|\vec{A}_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j^2} \\ \|\vec{C}_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n c_j^2} \end{cases} \quad (7)$$

موقعیت عقاب طلایی  $i$  در تکرار  $t+1$  به سادگی با افزودن بردار گام در تکرار  $t$  به موقعیت عقاب‌ها در تکرار  $t$  محاسبه می‌شود.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \Delta x_i^t \quad (8)$$



مرحله ۵. انتقال از گردش به حمله. شکل ۴ نحوه تغییر حمله و گردش را نشان می‌دهد.  
 شکل ۴. گذار عقاب طلایی از رفتار جستجو گرانه (گردش شدید) به رفتار بهره بردارانه (حمله شدید).

GEO از  $p_c$  و  $p_a$  برای تغییر از اکتشاف به بهره برداری استفاده می‌کند. الگوریتم با  $p_a$  کم و  $p_c$  زیاد شروع می‌شود با ادامه تکرارها،  $p_a$  به تدریج افزایش و  $p_c$  به تدریج کاهش می‌یابد. مقادیر اولیه و نهایی هر دو پارامتر توسط کاربر تعریف می‌شود. مقادیر میانی را می‌توان با استفاده از انتقال خطی نشان داده شده در رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\begin{cases} p_a = p_a^T + \frac{t}{T} |p_a^T - p_a| \\ p_c = p_c^T + \frac{t}{T} |p_c^T - p_c| \end{cases} \quad (9)$$

که  $t$  نشان‌دهنده تکرار فعلی،  $T$  نشان‌دهنده حداکثر تکرارها و  $p_a^T$  و  $p_c^T$  به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی برای تمایل به حمله ( $p_a$ ) و  $p_c$  و  $p_c^T$  مقادیر اولیه و نهایی برای تمایل به گردش ( $p_c$ ) هستند. آزمایش‌های نشان می‌دهد که  $[p_a^T, p_a^T] = [0.5, 2]$  و  $[p_c^T, p_c^T] = [1, 0.5]$  پارامترهای مناسبی هستند.

### ۳- مدل ترکیبی ریاضی - شبیه‌سازی زنجیره تأمین شرکت توروبو

#### کمپرسور نفت

در این بخش مدل پیشنهادی، مفاهیم مرتبط با آن و نحوه حل مدل تشریح می‌شوند. در ابتدا مدل ریاضی برنامه ریزی ریاضی و اجزای آن (متغیر تصمیم، تابع هدف، محدودیت‌ها) تشریح می‌شود، سپس نحوه تشکیل مدل شبیه سازی بیان خواهد شد. در نهایت در مورد نحوه حل مسئله بحث خواهد شد.



## ۳-۱- مجموعه‌ها

جدول ۱. مجموعه‌ها

مجموعه	تعریف	شمارنده	مقدار در پژوهش حاضر
$SP$	تأمین‌کننده‌ها	$sp$	$SP: \begin{cases} sp = ۱ & \text{Siemens} \\ sp = ۲ & \text{OTEC} \\ sp = ۳ & \text{MIGT} \\ sp = ۴ & \text{Italian supplier} \end{cases}$
$MF$	تولیدکننده‌ها	$mf$	$MF: \{mf = ۱ \text{ OTC}\}$
$CS$	مصرف‌کننده‌ها	$cs$	$CS: \{cs = ۱ \text{ NIGC}\}$
$IP$	سیاست‌های موجودی	$ip$	$IP: \begin{cases} ip = ۱ & (s, S) \text{ دائم مرور سیاست} \\ ip = ۲ & (r, Q) \text{ سیاست مرور دوره‌ای} \end{cases}$
$G$	گروه‌های قطعات (headgroup)	$g$	$G: \begin{cases} g = ۱ & \text{HG}^{\circ}۳۰۰ \\ g = ۲ & \text{HG}^{\circ}۹۰۰ \\ g = ۳ & \text{HG}^{\circ}۶۰۱۰ \\ g = ۴ & \text{HG}^{\circ}۷۱۳۰ \\ g = ۵ & \text{HG}^{\circ}۷۱۷۰ \end{cases}$
$P$	محصولات	$p$	$P: \{p = ۱ \text{ SGT}^{\circ}۱۰۰\}$

## ۳-۲- پارامترهای مدل ریاضی

جدول ۲. پارامترهای مدل ریاضی

پارامتر مدل ریاضی	تعریف
$mf.ss_{mf,g}^{s,low}$	حد پایین $s$ در سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.ss_{mf,g}^{s,up}$	حد بالای $s$ سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.ss_{mf,g}^{s,low}$	حد پایین $S$ در سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.ss_{mf,g}^{s,up}$	حد بالای $S$ در سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{r,low}$	حد پایین $r$ در سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{r,up}$	حد بالای $r$ سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{Q,low}$	حد پایین $Q$ سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{Q,up}$	حد بالای $Q$ سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{p,low}$	حد پایین $p$ (تعداد دوره‌ها) در سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$
$mf.rq_{mf,g}^{p,up}$	حد بالای $p$ (تعداد دوره‌ها) سیاست مرور دائم $(s, S)$ در گروه قطعه $g$ برای تولیدکننده $mf$



### ۳-۳- پارامترهای مدل شبیه سازی

جدول ۳. پارامترهای مدل شبیه سازی

پارامتر مدل شبیه سازی	تعریف
$sp.at_{sp,g}$	توزیع آماری و پارامترهای زمان ساخت گروه قطعه $g$ تأمین کننده $sp$ (assembly time)
$mf.at_{mf,g}$	توزیع آماری و پارامترهای زمان مونتاژ گروه قطعه $g$ محصول $p$ تولید کننده $mf$ تأمین کننده $sp$ (assembly time)
$cs.po.igt_{cs}$	توزیع آماری و پارامترهای زمان بین ایجاد سفارش ها از مصرف کننده $cs$ (product order inter-generation time)
$t$	طول دوره گرم سازی مدل (warm-up period) یا همان ابتدای دوره اصلی شبیه سازی
$t_{\infty}$	طول شبیه سازی

### ۳-۴- متغیرهای تصمیم

جدول ۴. متغیرهای تصمیم

متغیر تصمیم	تعریف	نوع	مقادیر
$MF.G.SP_{mf,g}$	تأمین کننده گروه قطعه $g$ برای تولید کننده $mf$	اسمی	$MFGSP_{mf,g} \in SP$
$MF.IP_{mf,g}$	سیاست موجودی تولید کننده $mf$	اسمی	$MFIP_{mf,g} \in IP$
$MF.SS_{mf,g}^s$	حد پایین ( $s$ ) در سیاست مرور دائم ( $s, S$ ) گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	عدد صحیح	$MFSS_{mf,g}^s = \{1, 2, 3, \dots\} \subset \mathbb{N}$
$MF.SS_{mf,g}^S$	حد بالا ( $S$ ) در سیاست مرور دائم ( $s, S$ ) گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	عدد صحیح	$MFSS_{mf,g}^S = \{1, 2, 3, \dots\} \subset \mathbb{N}$
$MF.RQ_{mf,g}^r$	نقطه سفارش مجدد ( $r$ ) در سیاست مرور دوره ای ( $r, Q$ ) برای گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	عدد صحیح	$MFRQ_{mf,g}^r = \{1, 2, 3, \dots\} \subset \mathbb{N}$
$MF.RQ_{mf,g}^Q$	حجم سفارش ثابت ( $Q$ ) در سیاست مرور دوره ای ( $r, Q$ ) برای گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	عدد صحیح	$MFRQ_{mf,g}^Q = \{1, 2, 3, \dots\} \subset \mathbb{N}$
$MF.RQ_{mf,g}^p$	دوره سفارش ( $p$ ) در سیاست مرور دوره ای ( $r, Q$ ) برای گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	عدد صحیح	$MFRQ_{mf,g}^p = \{1, 2, 3, \dots\} \subset \mathbb{N}$



### ۳-۵- متغیرهای خروجی شبیه‌سازی

متغیرهای که مقدار آنها از طریق شبیه‌سازی به دست می‌آید مطابق با جدول زیر تشریح می‌شوند.

جدول ۵. متغیرهای خروجی شبیه‌سازی

نوع	تعریف	متغیر خروجی شبیه‌سازی
اسکالر	تعداد کل سفارش‌های گروه قطعه $g$ تأمین‌کننده $sp$ ارسال شده به تولید کننده $mf$	$SO.SP.G.SO_{sp,mf,g}$
اسکالر	تعداد کل سفارش‌های گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$ ارسال شده به تأمین‌کننده $sp$	$SO.MF.G.SO_{mf,sp,g}$
اسکالر	حجم کل سفارش‌های گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$ ارسال شده به تأمین‌کننده $sp$	$SO.MF.G.SO.V_{mf,sp,g}$
بردار	سطح موجودی در طول زمان گروه قطعه $g$ تولید کننده $mf$	$SO.MF.G.I_{mf,g}$
بردار	سطح موجودی در طول زمان محصول $p$ تولید کننده $mf$	$SO.MF.P.I_{mf,p}$
اسکالر	تعداد کل سفارش‌های محصول $p$ تولید کننده $mf$ ارسال شده به مصرف کننده $CS$	$SO.MF.P.SO_{mf,p}$
اسکالر	تعداد کل سفارش‌های محصول $p$ مصرف کننده $CS$ ارسال شده به تولید کننده $mf$	$SO.CS.P.SO_{cs,mf,p}$

### ۳-۶- تابع هدف

Minimize  $TC$  (۱۰)

$$TC = TOC + TPC + TSC + THC + TMC \quad (۱۱)$$

$$TOC = \sum_{mf \in MF} \sum_{g \in G} mfoc_{mf,g} \times SOMFGSO_{mf,sp,g} \quad (۱۲)$$

$$TPC = \sum_{mf \in MF} \sum_{sp \in SP} \sum_{g \in G} mfpuc_{mf,sp,g} \times SOMFGSOV_{mf,sp,g} \quad (۱۳)$$

$$THC = \sum_{mf \in MF} \sum_{g \in G} mfghc_{mf,g} \times \int_{t_0}^{t_\infty} SOMFGI_{mf,g} \quad (۱۴)$$

$$+ \sum_{mf \in MF} \sum_{g \in G} mfprhc_{sp,p} \times \int_{t_0}^{t_\infty} SOMFPI_{mf,p}$$



### ۷-۳- محدودیتها

$$\left\{ \begin{array}{l} MFGSP_{mf,g} : \text{Integer} \\ MFGSP_{mf,g} \in SP \end{array} \right\}; \forall mf \in MF; \forall g \in G \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} SPIP_{sp} : \text{Integer} \\ SPIP_{sp} \in IP \end{array} \right\}; \forall sp \in SP \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} MFIP_{mf} = \text{Integer} \\ MFIP_{mf} \in IP \end{array} \right\}; \forall mf \in MF \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} MFSS_{mf,g}^S = \text{Integer} \\ mfs_{mf,g}^{S,low} \leq MFSS_{mf,g}^S \leq mfs_{mf,g}^{S,up} \\ MFSS_{mf,g}^S = \text{Integer} \\ mfs_{mf,g}^{S,low} \leq MFSS_{mf,g}^S \leq mfs_{mf,g}^{S,up} \\ MFSS_{mf,g}^S \leq MFSS_{mf,g}^S - 1 \end{array} \right\}; \forall mf \in MF; \forall g \in G \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} MFRQ_{mf,g}^r = \text{Integer} \\ mfrq_{mf,g}^{r,low} \leq MFRQ_{mf,g}^r \leq mfrq_{mf,g}^{r,up} \\ MFRQ_{mf,g}^Q = \text{Integer} \\ mfrq_{mf,g}^{Q,low} \leq MFRQ_{mf,g}^Q \leq mfrq_{mf,g}^{Q,up} \\ MFRQ_{mf,g}^r \leq mfix_{mf} - 1 \end{array} \right\}; \forall mf \in MF; \forall g \in G \quad (19)$$

### ۸-۳- نهادهای سیستم

نهادهای سیستم مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۶. نهادهای سیستم

توضیحات	سطح زنجیره تأمین	نهاد
این نهاد در سطح مصرف کننده و به صورت دوره‌ای و با توجه به پارامترهای آماری ایجاد می‌شود و به سطح تولید کننده ارسال می‌گردد. تولید کننده از این نهاد به همان شکل استفاده می‌کند و پس از تولید توربین، آن را به عنوان سفارش تولید شده به سطح مصرف کننده باز می‌گرداند.	مصرف کننده تولید کننده	سفارش محصول از مشتری به تولید کننده
این نهاد در سطح تولید کننده ایجاد می‌شود و به سطح تأمین کننده ارسال می‌گردد. تأمین کننده از این نهاد به همان شکل استفاده می‌کند و پس از تولید قطعه، آن را به عنوان سفارش تأمین شده به سطح تولید کننده باز می‌گرداند.	تولید کننده تأمین کننده	سفارش قطعه از تولید کننده به تأمین کننده



توضیحات	سطح زنجیره تأمین	نهاد
این نهاد در سطح تولید کننده و پس از پایین آمدن سطح موجودی از نقطه سفارش ایجاد می‌گردد. به جهت حفظ وحدت رویه، این نهاد پس از تبدیل به نهاد OrderToSupplier به تأمین‌کننده ارسال می‌گردد.	تولید کننده	مرور دائم
این نهاد در سطح تولید کننده و به صورت دوره‌ای ایجاد می‌گردد. به جهت حفظ وحدت رویه، این نهاد پس از تبدیل به نهاد OrderToSupplier به تأمین‌کننده ارسال می‌گردد.	تولید کننده	مرور دوره‌ای
این نهاد هنگام دریافت سفارش محصول توسط تولید کننده ایجاد می‌شود. کاربرد این نهاد برای آگاه‌سازی ایستگاه بلوک‌های منابع و ایستگاه‌های کاری است. این نهاد به تعداد محصولات موجود در مدل مورد نیاز است.	تولید کننده	دریافت محصول تولید شده
این نهاد هنگام دریافت سفارش قطعه توسط تولید کننده ایجاد می‌شود. کاربرد این نهاد برای آگاه‌سازی ایستگاه بلوک‌های منابع و ایستگاه‌های کاری است. این نهاد به تعداد قطعات موجود در مدل مورد نیاز است.	تولید کننده	دریافت قطعه تأمین شده

### ۳-۹- خصیصه‌های سیستم

خصیصه‌های موجود در سیستم مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۷ آورده شده‌اند.

جدول ۷. خصیصه‌های نهادهای سیستم

توضیحات	خصیصه
هر مصرف کننده دارای یک کد شمارنده است که از ۱ شروع می‌شود. این خصیصه برای شناسایی مصرف کننده هنگامی که سفارش محصول تأمین شده است استفاده می‌گردد.	کد مصرف کننده
حجم سفارش ارسال شده به تولید کننده.	حجم سفارش
این خصیصه جهت حفظ زمان شروع کار در ایستگاه‌های کاری و برای محاسبه زمان انتظار هر سفارش در هر ایستگاه کاری استفاده می‌گردد.	زمان شروع کار در هر ایستگاه کاری
این خصیصه برای محاسبه زمان انتظار هر سفارش در هر ایستگاه کاری استفاده می‌گردد.	زمان انتظار در هر ایستگاه کاری
حجم سفارش ارسال شده به تأمین‌کننده.	حجم سفارش
کد قطعه مورد نظر.	کد قطعه
کد تأمین‌کننده جهت ارسال سفارش.	کد تأمین‌کننده



توضیحات	خصیصه
این خصیصه مشخص می‌کند که سطح موجودی در چه جهتی از نقطه سفارش عبور کرده است. ۶ حالت موجود است که تنها ۲ حالت آن قابل قبول هستند: (۱) عبور از بالای نقطه سفارش به پایین نقطه سفارش و (۲) عبور از نقطه سفارش به پایین نقطه سفارش.	جهت عبور سطح موجودی از نقطه سفارش
از آنجایی که این نهاد صرفاً جهت راه اندازی رویدادهای دیگر ایجاد می‌شود، هیچ خصیصه ای ندارد.	-
حجم سفارش ارسال شده به تولید کننده.	حجم سفارش
حجم سفارش ارسال شده به تأمین کننده.	حجم سفارش

### ۳-۱۰- پیشامدهای سیستم

پیشامدها به دو دسته پیشامدهای برون زا و پیشامدهای درون زا تقسیم می‌شوند که در جدول زیر آورده شده اند.

جدول ۸. پیشامدهای سیستم

تعریف	سطح زنجیره تأمین	نوع	پیشامد
تولید هر سفارش در سطح مصرف کننده	مصرف کننده	برون‌زا	تولید سفارش
ارسال سفارش headgroup از تولید کننده به تأمین کننده	تولید کننده تأمین کننده	درون‌زا	ارسال سفارش به تأمین کننده
دریافت سفارش headgroup از تأمین کننده	تولید کننده	درون‌زا	دریافت سفارش از تأمین کننده
ارسال سفارش محصول از تولید کننده به مصرف کننده	مصرف کننده تولید کننده	درون‌زا	دریافت سفارش از تولید کننده
بازپرسازی headgroup	تولید کننده	درون‌زا	بازپرسازی قطعه
بازپرسازی محصول	تولید کننده	درون‌زا	بازپرسازی محصول
عبور سطح موجودی قطعه از نقطه سفارش	تولید کننده	درون‌زا	عبور سطح موجودی قطعه از نقطه سفارش
مرور دوره‌ای موجودی قطعات	تولید کننده	درون‌زا	مرور دوره‌ای

### ۳-۱۱- فعالیت‌های سیستم

فعالیت‌های سیستم مورد بررسی در این پژوهش در جدول زیر آورده شده‌اند.





## جدول ۹. فعالیت‌های سیستم

فعالیت	سطح زنجیره تأمین
نصب قطعه در هر ایستگاه کاری	تولید کننده
تولید قطعه	تأمین‌کننده

## ۳-۱۲- منابع سیستم

منابع سیستم مورد بررسی در این پژوهش در جدول زیر آورده شده‌اند.

## جدول ۱۰. فعالیت‌های سیستم

منبع	سطح زنجیره تأمین
قطعه	تولید کننده
محصول	تولید کننده

## ۳-۱۳- متغیرهای سیستم

متغیرهای سیستم مورد بررسی در این پژوهش در جدول زیر آورده شده‌اند.

## جدول ۱۱. متغیرهای سیستم

متغیر
حد پایین سیاست مرور دائم
حد بالای سیاست مرور دائم
موجودی اولیه
سیاست کنترل موجودی
فاصله بین سفارشات در سیاست مرور دوره‌ای
مقدار سفارش در سیاست مرور دوره‌ای
پارامترهای زمان تصادفی بین ایجاد سفارش در سطح مصرف کننده
تأمین‌کننده هر قطعه
فاصله زمانی تأمین توسط تأمین‌کننده
پارامترهای زمان تصادفی نصب قطعه در هر ایستگاه کاری



#### ۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

تمامی مراحل مدل سازی ریاضی، شبیه سازی و بهینه سازی مدل ترکیبی ریاضی - شبیه سازی در نرم افزار MATLAB صورت پذیرفته است. در ادامه به نتایج بهینه سازی مدل ترکیبی ریاضی - شبیه سازی پرداخته خواهد شد.

##### ۴-۱- نمایش جواب<sup>۱</sup>

مدل بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی پژوهش حاضر شامل ۶ دسته متغیر تصمیم می شود که هر دسته شامل ۵ متغیر تصمیم به تعداد قطعات (Headgroup ها) می شود. در نتیجه تعداد کل متغیرهای تصمیم مدل این پژوهش ۳۰ عدد است. شیوه نمایش جواب برای این مدل به صورت شکل ۵ در نظر گرفته شده است.

$x_1$ تا $x_5$	$x_6$ تا $x_{10}$	$x_{11}$ تا $x_{15}$	$x_{16}$ تا $x_{20}$	$x_{21}$ تا $x_{25}$	$x_{26}$ تا $x_{30}$
تأمین کننده	حجم سفارش در سیاست مرور دوره ای (Q)	دوره سفارش در سیاست مرور دوره ای (R)	سیاست کنترل موجودی	حد بالا در سیاست مرور دائم (S)	حد پایین در سیاست مرور دائم (s)

شکل ۵. نمایش جواب

#### ۴-۲- پارامترهای الگوریتم فراابتکاری عقاب طلایی

پارامترهای الگوریتم فراابتکاری عقاب طلایی جهت حل این مسئله به شرح است.

جدول ۱۲. پارامترهای الگوریتم فراابتکاری عقاب طلایی

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۳۰
تعداد تکرارها	۳۰۰
تمایل به حمله اولیه	۰.۵
تمایل به حمله نهایی	۱
تمایل به گردش اولیه	۲
تمایل به گردش نهایی	۰.۵

<sup>۱</sup> Solution representation



#### ۳-۴- مشخصات رایانه مورد استفاده

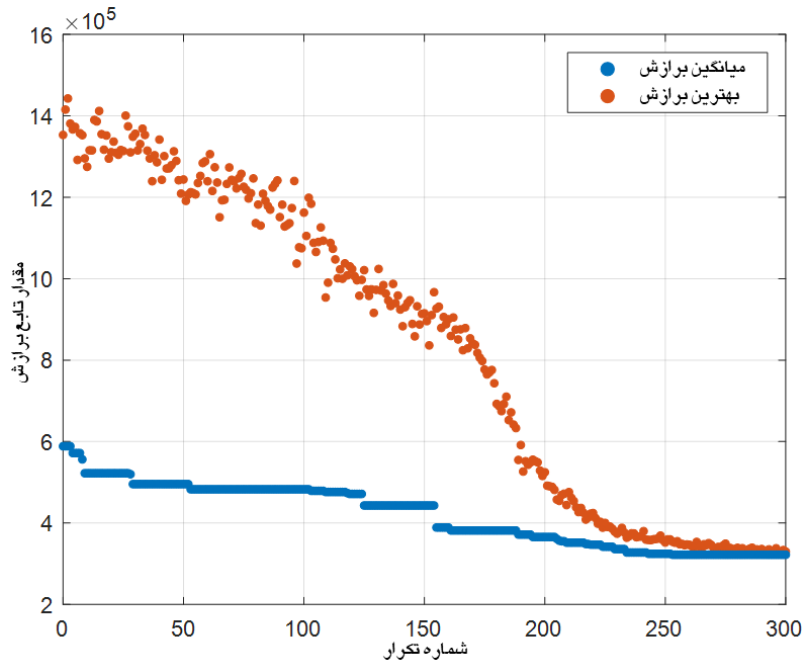
مشخصات رایانه مورد استفاده جهت حل مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به شرح جدول ۱۳ است. با توجه به اینکه نرم افزار MATLAB از تکنولوژی Hyperthreading استفاده نمی‌کند، بنابراین تنها از هسته‌های فیزیکی می‌تواند استفاده کند بنابراین در جدول ۱۳ تنها تعداد هسته‌های فیزیکی قابل استفاده توسط MATLAB ارائه شده است. همچنین حداکثر فرکانس گزارش شده برای ۴ هسته همزمان است. فرکانس پردازنده برای فقط یک هسته تا ۳,۶ GHz نیز قابل افزایش است.

جدول ۱۳. مشخصات رایانه مورد استفاده جهت حل مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

مشخصه	نام / مقدار
مدل پردازنده	Intel Core i5-3470
فرکانس پایه	۳.۲۰ GHz
حداکثر فرکانس	۳.۴۰ GHz
تعداد هسته فیزیکی	۴
توان پردازشی کل [۱۷]	۱۶.۴۳ GFLOPS
حافظه RAM	۱۶ GB

#### ۴-۴- حل مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی زنجیره تأمین توربین گازی

مدت زمان حل مدل ۷۰ ساعت و ۱۴ دقیقه و ۴ ثانیه است که تقریباً معادل ۳ شبانه روز است. با توجه به اینکه الگوریتم عقاب طلایی ۳۰۰ تکرار انجام داده و در هر تکرار ۳۰ عقاب وجود داشته و جواب مربوط به هر عقاب ۷ بار شبیه‌سازی می‌شود، بنابراین در طول حل این مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، مدل شبیه‌سازی در هر تکرار ۲۱۰ بار و در مجموع به تعداد ۶۳ هزار بار اجرا شده است تا جواب بهینه به دست آید. منحنی همگرایی حل مدل، به شرح شکل ۶ به دست آمده است. منحنی آبی رنگ نشان دهنده مقدار تابع هدف بهترین جواب هر تکرار و منحنی قرمز رنگ متوسط مقدار تابع هدف جمعیت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تکرارهای اولیه، منحنی قرمز رنگ فاصله زیادی با منحنی آبی رنگ دارد، بدین معنا که عقاب‌ها در منطقه موجه پخش شده‌اند. در طول بهینه‌سازی منحنی قرمز رنگ به منحنی آبی رنگ نزدیک شده و در انتهای حل، تقریباً با آن یکسان می‌شود. این نکته بدین معنی است که عقاب‌ها به یک جواب که همان جواب بهینه است همگرا شده‌اند.



شکل ۶. منحنی همگرایی

ملاحظه می‌گردد که مقدار تابع هدف در تکرار صفر (تکراری که جمعیت آن به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و هنوز هیچ عملگر الگوریتم فراابتکاری بر روی آن اجرا نشده است) ۵۸۸۵۲۶ است اما در آخرین تکرار به ۳۲۲۱۰۲ رسیده است که نشان دهنده این نکته است که الگوریتم عقاب طلایی قادر بوده تا جواب اولیه تصادفی را به مقدار ۴۵,۲۷٪ بهبود دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور تعیین استراتژی مدل کنترل موجودی و همچنین تعیین تعداد تأمین‌کننده از چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شد. سیستم مدیریت موجودی در مدیریت زنجیره تأمین نقش اساسی دارد. مدیریت موجودی بسیاری از مشکلات زنجیره تأمین را حل، نسبت گردش موجودی<sup>۱</sup> را متعادل و خواب سرمایه را حداقل می‌کند. کنترل صحیح موجودی کمک می‌کند KPIهای موجودی از نزدیک ردیابی شده و سازمان به اهداف خود

<sup>۱</sup> Inventory turnover ratio



برسد. سیاست‌های کنترل موجودی چارچوبی است که به سازمان اجازه می‌دهد تا به این اهداف دست یابد. این سیاست‌ها تعیین می‌کنند که سازمان شما چگونه حرکت موجودی تحت مالکیت خود را مدیریت می‌کند. این سیاست‌ها با قوانینی در مورد نحوه تهیه مواد خام شروع می‌شوند و به نحوه مدیریت کالاهای برگشتی و معیوب ختم می‌شوند.

سیاست کنترل موجودی نمی‌تواند برای تمام صنایع و تمام شرایط بهینه باشد. هر سیاست کنترل موجودی شامل پارامترهایی می‌شود که عملکرد آن را تنظیم می‌کنند. پارامترهایی که عملکرد سیاست کنترل موجودی را برای یک زنجیره تأمین بهینه می‌کنند، ممکن است برای یک زنجیره تأمین دیگر نتایج مناسبی حاصل نکنند. پس از تدوین سیاست کنترل موجودی در زنجیره تأمین، سؤالی که به ذهن خطور می‌کند این است که پارامترهای این سیاست کنترل موجودی چیست. مهم‌ترین وظیفه واحد برنامه ریزی زنجیره تأمین پس از تعیین سیاست کنترل موجودی، تعیین مقدار بهینه پارامترهای آن است. برخلاف تعیین سیاست کنترل موجودی که به عنوان متغیر تصمیم در پژوهش‌های قبلی مد نظر قرار نگرفته‌اند، پژوهش‌های زیادی به ارائه روش‌های مختلف برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای سیاست کنترل موجودی ارائه کرده‌اند.

برای انتخاب تأمین‌کننده روش‌های مختلفی در ادبیات پیشنهاد شده است که شامل مدل سازی ریاضی، تصمیم‌گیری چندشاخصه، شبیه‌سازی، مدل خاکستری و روش‌های آماری است [۱۸]. بهترین روش تأمین از تأمین‌کنندگان مطابق با ادبیات، چندمنبعی<sup>۱</sup> است. بدین معنا که هر تولیدکننده بهتر است با چندین تأمین‌کننده قرارداد ببندد و تنها بخشی از قطعات و مواد اولیه را از هر کدام از آنها بخرد. در پژوهش حاضر از این رویکرد استفاده نشد و رویکرد تک تأمین‌کننده اتخاذ شد. البته یکی از مفروضات مدل ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی این بود که هر چهار تأمین‌کننده توانایی تأمین تمامی قطعات را دارند؛ اما برای هر قطعه تنها یک تأمین‌کننده مفروض است. هر قطعه می‌تواند به هر کدام از تأمین‌کننده‌ها متصل باشد اما تنها فقط از همان تأمین‌کننده می‌تواند سفارش دریافت کند. جواب بهینه به دست آمده بیان می‌دارد که چهار قطعه به تأمین‌کننده اول و یک قطعه به تأمین‌کننده چهارم متصل باشد. لذا نهایتاً توسعه مدل ریاضی و اجرای شبیه‌سازی به منظور تعیین سیاست‌های بهینه و توسعه مدل

---

<sup>۱</sup> Multi-sourcing



مدیریت موجودی چنانکه در این پژوهش مد نظر قرار گرفت می تواند بسیار سودمند بوده و گره گشای مشکلات گسترده و مبتلابه صنایع گردد.

از پژوهش های مشابه می توان به کار گودیچاد<sup>۱</sup> و آمودئو<sup>۲</sup> [۱۹] اشاره کرد. این مقاله به سیاست های موجودی در زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته است. بدین منظور سفارشات مختلفی که در این زنجیره تأمین وجود دارد گنجانده شده است. ۳ نوع سیاست موجودی و سفارش در نظر گرفته شده است که قالب کلی آنها موجودی پایه است یعنی هنگامی که سطح موجودی به مقدار خاصی می رسد سفارش صادر می شود. در هر سیاست پیشنهادی انواع مختلفی از آستانه ها وجود دارند. مدل کلی چند هدفه است و توابع هدف شامل هزینه و خدمت می باشند. هر یک از سیاست ها به صورت جداگانه بهینه سازی شده است و مرز پارتو آنها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین ۹ سناریو در نظر گرفته شده است که این بهینه سازی جداگانه برای تمام آنها صورت پذیرفته است. در نهایت مشخص شد که کدام یک از سیاست ها بهتر است. نقطه مشترک پژوهش حاضر با این مقاله در این است که در هر دو کار اقدام به مدل سازی سیاست کنترل موجودی شده است. نقطه افتراق این است که در آن مقاله، سیاست های کنترل موجودی به صورت جداگانه مدل شده اند اما در این پژوهش به صورت یک پارچه و در قالب یک مدل شبیه سازی ارائه شده اند. در هر دو پژوهش، به این نتیجه رسیده شده است که سیاست بهینه، سیاست مرور دائم است.

در ادامه به منظور زمینه سازی و تکمیل پژوهش حاضر می توان موارد ذیل را برای سایر پژوهشگران ارائه نمود.

- توسعه الگوریتم عقاب طلایی به شکل های بسیار متفاوتی و در عملگرها و مراحل مختلف می تواند صورت پذیرد. طبق تجربه پژوهشگر، این الگوریتم بین دو خاصیت جستجو و همگرایی، جستجوی بسیار قوی دارد. بنابراین پیشنهاد می شود پژوهش های آتی در جهت تقویت همگرایی فعالیت نمایند و از روش هایی مانند Lévy flight و Chaotic maps استفاده نمایند.
- با توجه به اینکه این پژوهش، از اولین پژوهش های جامع است که از محیط یکپارچه MATLAB/Simulink/SimEvents استفاده کرده است، پیشنهاد می شود

<sup>۱</sup> Godichaud

<sup>۲</sup> Amodeo



پژوهش‌های آتی مدل این پژوهش در این محیط را توسعه دهند و از قابلیت‌های Toolbox های MATLAB در کنار شبیه‌سازی استفاده کنند.

- مدل حاضر قابل تعمیم به فضای چند تأمین‌کنندگی است. پیشنهاد دیگر پژوهشگر برای پژوهش‌های آتی، اضافه کردن این قابلیت به مدل است.

## ۶- منابع

- [1] T. L. Friesz, I. Lee, and C.-C. Lin, "Competition and disruption in a dynamic urban supply chain," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 8, pp. 1212–1231, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.trb.2011.05.005.
- [2] M. Sherafati and S. Najafi Ghobadi, "Provide a novel model for designing a sustainable supply chain network considering development and multi-level environmental decisions," 2021.
- [3] L. Tiacci, "Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times," *International Journal of Production Economics*, vol. 159, pp. 319–333, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.05.005.
- [4] N. Herazo-Padilla, J. R. Montoya-Torres, S. Nieto Isaza, and J. Alvarado-Valencia, "Simulation-optimization approach for the stochastic location-routing problem," *Journal of Simulation*, vol. 9, no. 4, pp. 296–311, Nov. 2015, doi: 10.1057/jos.2015.15.
- [5] M. Kouki, O. Cardin, P. Castagna, and C. Cornardeau, "Input data management for energy related discrete event simulation modelling," *Journal of Cleaner Production*, vol. 141, pp. 194–207, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.061.
- [6] M. Salehi, F. Atefi, and S. Ahmadiyan, "Capacity Planning For Production and Reproduction In A Closed Loop Supply Chain According to Customer Behavior Using A System Dynamics Approach," 2019.
- [7] T. C. Lopes, A. S. Michels, C. G. S. Sikora, R. G. Molina, and L. Magatão, "Balancing and cyclically sequencing synchronous, asynchronous, and hybrid un-paced assembly lines," *International Journal of Production Economics*, vol. 203, pp. 216–224, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.06.012.
- [8] R. Shakerin, A. Toloie Eshlaghy, and R. Radfar, "Analysis of the Service Process of Insurance Issuance System Life and Securing the Future with a Discrete Event Simulation Approach and Scenario Writing (Case study: Pasargad Insurance Company)," 2021.
- [9] A. Bhosekar and M. Ierapetritou, "Advances in surrogate based modeling, feasibility analysis, and optimization: A review," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 108, pp. 250–267, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.09.017.



- [10] P. Mehdipour, A. Safaei Ghadikolaee, H. Fallah Lajimi, and H. Aghajani, "To assess digital supply chain in manufacturing industries (Case study: Bedding industry)," 2021.
- [11] D. Ivanov, A. Tsipoulanidis, and J. Schönberger, "Basics of Supply Chain and Operations Management," in *Global Supply Chain and Operations Management: A Decision-Oriented Introduction to the Creation of Value*, D. Ivanov, A. Tsipoulanidis, and J. Schönberger, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 3–16. doi: 10.1007/978-3-319-94313-8\_1.
- [12] J. S. R. Daniel and C. Rajendran, "A simulation-based genetic algorithm for inventory optimization in a serial supply chain," *International Transactions in Operational Research*, vol. 12, no. 1, pp. 101–127, Jan. 2005, doi: 10.1111/j.1475-3995.2005.00492.x.
- [13] P. Ming-Bao and M. Ning, "Research into Merchant Logistics Center Scale Determining Based on Supply Chain Management," in *2006 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, Jun. 2006, pp. 886–890. doi: 10.1109/ICMIT.2006.262349.
- [14] H. Pierreval and L. Tatou, "Using evolutionary algorithms and simulation for the optimization of manufacturing systems," *IIE Transactions*, vol. 29, no. 3, pp. 181–189, Mar. 1997, doi: 10.1080/07408179708966325.
- [15] A. Bhosekar and M. Ierapetritou, "Space mapping based derivative-free optimization framework for supply chain optimization," in *Computer Aided Chemical Engineering*, M. R. Eden, M. G. Ierapetritou, and G. P. Towler, Eds., Elsevier, 2018, pp. 985–990. doi: 10.1016/B978-0-444-64241-7.50159-2.
- [16] A. Mohammadi-Balani, M. Dehghan Nayeri, A. Azar, and M. Taghizadeh-Yazdi, "Golden eagle optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 152, p. 107050, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2020.107050.
- [17] "CPU performance," 2022. [https://setiathome.berkeley.edu/cpu\\_list.php](https://setiathome.berkeley.edu/cpu_list.php) (accessed Oct. 11, 2022).
- [18] V. B. Schramm, L. P. B. Cabral, and F. Schramm, "Approaches for supporting sustainable supplier selection - A literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 123089, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123089.
- [19] M. Godichaud and L. Amodeo, "Efficient multi-objective optimization of supply chain with returned products," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 37, pp. 683–691, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmsy.2014.12.004.