



DOI: <https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5566>

ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای تخصیص مکان‌های انبارش در سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و حل آن با یک روش بهینه‌سازی استوار؛ (مطالعه موردی: انبار شرکت ایران خودرو)

امیرعباس شجاعی^{۱*}، کیوان روشن^۲، مهرداد جوادی^۳، رضا توکلی‌مقدم^۴، محمدرضا خلیج^۵

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. دکترای مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران
۴. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۵. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، رباط کریم، ایران

خلاصه

در این تحقیق، براساس شرایط و محدودیت‌های انبار اتوماتیک شرکت ایران خودرو یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سه‌هدفه غیرخطی پیشنهاد شده که هدف این مدل، تخصیص بهینه پالت‌ها به مکان‌های انبارش از پیش تعیین شده، با یک شاخص جدید می‌باشد. از آنجا که تقاضای پالت‌های انبار به دلیل نوسان تقاضای مشتریان از عدم قطعیت بالایی برخوردار می‌باشد، به استوار نمودن مدل ریاضی به روش P-Robustness جهت مقابله با تأثیر تغییر تقاضا بر حل بهینه پرداخته شده است و پس از آن مسأله به یک مدل ریاضی تک‌هدفه تبدیل می‌شود که برای حل آن در ابعاد بزرگ از دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. جهت بررسی عملکرد دو الگوریتم از آزمون تی در نرم‌افزار مینی‌تب به منظور مقایسه میانگین مقادیر تابع هدف از ۱۵ بار حل مسائل عددی در ابعاد مختلف بهره گرفته شده است. معرفی یک شاخص جدید برای تخصیص بهتر پالت‌ها به محل‌های ذخیره‌سازی در انبار اتوماتیک ایران خودرو موجب کاهش مسافت، زمان، انرژی و هزینه‌های ذخیره و بازیابی و جابجایی شده که با توجه به حجم بالای گردش قطعات در انبار، می‌توان نتیجه گرفت که صرفه‌جویی قابل‌توجهی حاصل شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۲/۹/۵

پذیرش ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

ذخیره و بازیابی اتوماتیک

تخصیص مکان انبارش

شاخص فضای مورد استفاده

(مترمکعب)

عدم قطعیت

بهینه‌سازی استوار

۱. مقدمه

وسیع‌تری از صنایع و بخش‌های گوناگون از قبیل صنعت خودروسازی، صنایع غذایی، گمرک، کتابخانه‌ها و صنایع نظامی به‌کار برده شد (آراسته، ۱۳۸۹). سیستم ذخیره و بازیابی خودکار توسط انستیتو حمل‌ونقل مواد بدین صورت تعریف می‌گردد: "ترکیبی از تجهیزات و کنترل آن‌ها که مواد را با دقت و سرعت و تحت درجه تعریف شده از اتوماسیون، حمل، ذخیره‌سازی و بازیابی می‌کنند."

یکی از سیستم‌های کاملاً پیشرفته، سیستم ذخیره و بازیابی خودکار^۲ (AS/RS) است. در سیستم انبارداری ذخیره و بازیابی خودکار، کالاها و یا مواد به‌صورت خودکار و بدون نیاز به نیروی انسانی در انبار ذخیره و از آن خارج می‌شوند. این سیستم انبارداری پیشرفته به‌صورت گسترده از سال ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم در سطح

که فضای ذخیره مورد نیاز آن را ایجاد می‌کند COI می‌باشد که این شاخص به‌عنوان نسبت فضای مورد نیاز ذخیره عنصر به‌میزان درخواست بازیابی برای عنصر تعریف می‌شود. کالینا و لین (۱۹۷۶) به بررسی کاربرد قاعده شاخص مکعب-به‌ازای هر-سفرارش برای مکان‌یابی موجودی در یک انبار توزیع پرداختند. در این مقاله گام‌های محاسباتی پیاده‌سازی قاعده CPO تشریح گردیده و برخی نتایج عملی گردآوری شده از تجربه در واقعیت با به‌کارگیری قاعده به‌منظور کمک به چیدمان انبار بحث شده است.

از طرف دیگر نشان داده شده است که تحت سیاست انبار اختصاصی، عناصر تخصیص مبتنی بر مقادیر COI در رابطه با زمان بازیابی سفارش برای معامله تک‌دستوری، تخصیص بهینه می‌دهد. در یک انبار طبقه‌بندی شده، یک راه کلاسیک جهت تخصیص محصولات به طبقات، روش پارتو بوده که مبتنی بر محبوبیت محصولات مثل COI می‌باشد (گوتس چالکس و راتلیف، ۱۹۹۰).

هاریکا و جکسن (۱۹۹۶) مقاله‌ای در رابطه با طرح‌ریزی موجودی توام با اندازه‌گیری انبار ارائه کردند. طی سیاستی چون سیاست انبارهای متقاطع^۸ به‌کارگیری فضای ذخیره بهتری ارائه خواهد شد. کولچرل و همکاران (۱۹۹۹) مطالعه‌ای در زمینه تحقیق تجربی سیاست‌های تخصیص انبار اشتراکی در سیستم‌های ذخیره/بازیابی اتوماتیک انجام داد. رودبرگن و ویس (۲۰۰۹) مروری از ادبیات سی سال گذشته (از سال ۱۹۸۳ تا سال ۲۰۰۵) سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. چن، لانگوین و ریوپل (۲۰۱۰) تخصیص مکان انبارش در یک سیستم ذخیره/بازیابی اتوماتیک با ذخیره‌ساز اشتراکی را بررسی نمودند. اِکرن، ساری و لهر (۲۰۱۵) هدفشان یافتن بهترین طراحی قفسه برای سیستم ذخیره و بازیابی مبتنی بر شاتل^۹ تحت سیاست انبار طبقه‌بندی بوده است. پان و همکاران (۲۰۱۵) یک روش ابتکاری تخصیص انبارش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای یک سیاست انبارداری برداشت و گذار ارائه کردند.

اگرچه سیستم‌های ذخیره و بازیابی خودکار موضوع تحقیقات گسترده‌ای بوده است، عملکرد آن‌ها تحت شرایط تقاضای تصادفی نسبتاً ناشناخته باقیمانده است. در واقع، با درخواست‌های ذخیره و بازیابی تصادفی، ابزار اصلی برای تجزیه و تحلیل سیستم ذخیره و بازیابی خودکار شبیه‌سازی بوده است.

ئونمن و برندئو (۱۹۹۸) به سیاست‌های بهینه تخصیص انبارش برای سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک با تقاضاهای احتمالی پرداختند. هار و همکاران (۲۰۰۴) مدل برآورد عملکرد برای سیستم ذخیره و بازیابی خودکار توسط سیستم صف M/G/1 را ارائه کردند. در این مقاله، با استفاده از یک مدل صف M/G/1 با یک سرویس‌دهنده

سیستم ذخیره و بازیابی خودکار برحسب کاربردهای گوناگون و برطبق نیاز مشتری طراحی می‌شود و از سیستم‌های مکانیکی کوچک با کنترل دستی تا سیستم‌های خیلی پیشرفته کامپیوتری که کاملاً با عملیات انبار و کارخانه، یکپارچه و هماهنگ هستند را شامل می‌شود. هر سیستم ذخیره و بازیابی خودکار شامل یک سری راهروهای ذخیره‌سازی می‌باشد که به‌وسیله یک یا چند ماشین ذخیره و بازیابی^۱ سرویس‌دهی می‌شوند (معمولاً یک ماشین ذخیره و بازیابی در هر راهرو می‌باشد). راهروها شامل قفسه‌بندی‌هایی برای نگهداری مواد می‌باشند. ماشین ذخیره و بازیابی برای قرار دادن اقلام در داخل قفسه‌ها یا برداشتن آن‌ها از قفسه‌ها به‌کار می‌رود. سیستم ذخیره و بازیابی خودکار یک یا چند ایستگاه ورودی/خروجی دارد که به‌نام ایستگاه برداشت و تحویل^۲ یا ایستگاه ورودی/خروجی^۳ شناخته می‌شوند. ایستگاه‌های برداشت و تحویل می‌توانند به‌صورت دستی کار کرده یا با یک سیستم خودکار حمل‌ونقل مواد از جمله نقاله یا وسایل هدایت شونده خودکار^۴ در ارتباط باشند. مزایای اصلی سیستم ذخیره و بازیابی خودکار شامل خروجی بالا، استفاده کارآمد از فضا، قابلیت اطمینان بالا و بهبود امنیت می‌باشد.

برنامه‌ریزی و کنترل بهینه سیستم ذخیره و بازیابی خودکار عمدتاً به روش‌های استفاده شده جهت برنامه‌ریزی آن‌ها بستگی دارد. یکی از روش‌هایی که برای برنامه‌ریزی یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار مورد توجه محققان قرار گرفته و مطالعات و تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است، "سیاست‌های تعیین محل ذخیره‌سازی"^۵ می‌باشد. به‌طوری‌که جهت حل این مسأله راه‌حل‌های مختلفی با استفاده از روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی ریاضی، شبیه‌سازی و یا الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری ارائه شده است (فیروزی، ۱۳۸۳).

سیاست تعیین محل ذخیره‌سازی سعی بر آن دارد که اقلام طوری در انبار قرار گیرند که زمان مورد نیاز برای برداشت سفارش، تحت شرایطی که فضای اختصاص یافته به اقلام ثابت است، به حداقل برسد. یکی از سیاست‌های تعیین محل ذخیره‌سازی، "سیاست ذخیره‌سازی طبقه‌بندی‌شده"^۶ می‌باشد. با این سیاست، اقلام به‌ترتیب نرخ گردش^۷ و سلول‌های ذخیره‌سازی به‌ترتیب فاصله آن‌ها از ایستگاه برداشت و تحویل مرتب می‌شوند. سپس این لیست‌های مرتب شده به‌دسته‌های کوچکتری (۲، ۳ یا n کلاس) تقسیم‌بندی شده و دسته‌ای از اقلام که بالاترین نرخ گردش را دارند براساس سیاست ذخیره‌سازی تصادفی به‌دسته‌ای از سلول‌ها که کمترین فاصله را از ایستگاه برداشت و تحویل دارند، تخصیص داده می‌شوند و عمل تخصیص مطابق این روال ادامه خواهد یافت.

هسکت (۱۹۶۳) در مقاله خود اعلام داشته است که یک معیار مورد استفاده جهت تخصیص طبقه‌های محصول به مکان‌های ذخیره

6. Class-based Storage Policy

7. Turn Over Rate

8. Cross Ducking

9. Shatel-based Storage/ Retrieval System

1. Storage and Retrieval Machine

2. Pickup & Deposit Station

3. Input / Output Station

4. Automated Guided Vehicle

5. Storage Location Assignment Policies

انحراف تقاضا ارائه نمودند. ماریسواران و همکاران (۲۰۱۹) یک سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک مبتنی بر PLC با یک ربات پایان‌دهنده ارائه نموده‌اند. هدف مقاله آن‌ها توسعه یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار است که رباتی دارد که سه بازو به آن متصل شده است. حمید، امری و رشید (۲۰۱۹) در مقاله خود مروری بر سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک ارائه داده‌اند. بوریسوگلبسکایا و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک برای مفهوم صنعت نسل ۴.۰ پرداختند. مقاله آن‌ها نتایج تحقیقاتی که بر پیاده‌سازی طراحی هوشمند و توسعه زیرسیستم‌هایی جهت برآوردن الزامات مفهوم صنعت نسل ۴.۰ تمرکز کرده‌اند را ارائه می‌دهند. تیان و وو (۲۰۱۹) مدل طراحی انبار برای سیستم ذخیره و بازیابی مبتنی بر شاتل را ارائه نمودند. مقاله آن‌ها یک مدل ریاضی برای زمان سفر و هزینه برای سیستم‌های ذخیره و بازیابی مبتنی بر شاتل ارائه می‌دهد که از طریق آن می‌توانیم درخصوص پیکربندی بهینه و کارایی برداشت یک انبار تصمیم‌گیری کنیم.

هدف مقاله حاضر بررسی امکان بهبود کارایی انبار و کاهش زمان‌های سفر (ذخیره و بازیابی) از طریق تغییر در سیاست طراحی و نحوه قرار گرفتن پالت‌ها در مکان‌های در نظر گرفته شده در قفسه‌ها برای ذخیره‌سازی است. با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار در شرایط مورد مطالعه بر شاخص COI و در نتیجه هوشمندتر کردن نحوه تشکیل کلاس‌ها، نحوه قرار گرفتن قطعات در هر کلاس و تخصیص مناسب تر قطعات موجود در کلاس‌ها به فضاهای ممکن و در دسترس انبارش به دنبال دستیابی به یک سیاست بهینه برای ذخیره‌سازی اقلام در انبار شرکت ایران خودرو می‌باشیم تا به واسطه کاهش مسافت و زمان جابجایی برای هر قطعه در فرآیندهای ذخیره و بازیابی موجب کاهش هزینه‌های فضای ذخیره‌سازی و هزینه‌های جابجایی قطعات گردد.

لازم به ذکر است که پس از پیاده‌سازی سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک در شرکت ایران خودرو تاکنون هیچ تلاش تحقیقاتی برای بررسی امکان‌های بهبود در تخصیص مکان‌های ذخیره‌سازی این انبار صورت نگرفته و به بیان دیگر از بررسی میزان و نحوه اثرگذاری عوامل مؤثر در سیستم ذخیره و بازیابی خودکار در این انبار غفلت گردیده است. از این رو توسعه مدل‌های جدید و همگام با پیشرفت‌های حاضر در این زمینه و بررسی میزان اثرگذاری آن‌ها بر بهبود شاخص‌های عملکردی سیستم، امری ضروری به نظر می‌رسد.

لذا مسأله اصلی این تحقیق توسعه مدل ریاضی تخصیص مکان‌های انبارش به‌عنوان معیاری جهت مقایسه نحوه تخصیص کنونی اقلام به مکان‌های ذخیره‌سازی در شرکت ایران خودرو با روش پیشنهادی محقق می‌باشد. این مهم به‌وسیله مقایسه مدل ریاضی پیشنهادی با شیوه تجربی حال حاضر ایران خودرو انجام خواهد شد.

با در نظر گرفتن هدف کمینه نمودن انرژی الکتریکی مصرف شده در جابجایی‌های ماشین ذخیره و بازیابی، رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی نیز در مدل توسعه داده شده، در نظر گرفته شده است. برای انبار

و دو صف، رویکردی احتمالی برای برآورد عملکرد یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار بار واحد پیشنهاد شده است. بوزر و چو (۲۰۰۵) عملکرد خروجی سیستم‌های ذخیره/بازیابی اتوماتیک تحت تقاضای احتمالی را بررسی کردند. این مقاله در ارتباط با عملکرد خروجی یک سیستم ذخیره/بازیابی اتوماتیک تحت تقاضای تصادفی می‌باشد که به‌طور مثال حالتی در نظر گرفته می‌شود که درخواست‌های ذخیره و بازیابی به‌طور تصادفی می‌رسند. فانگ، یوتینگ و شوها (۲۰۰۸) به بررسی کاربرد کنترل فازی در جرثقیل یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار پرداختند. اکتان و توسان (۲۰۱۳) به ارائه یک رویکرد یکپارچه AHP فازی و تاپسیس فازی برای انتخاب سیستم ذخیره و بازیابی خودکار پرداختند. فنگ، دی و دینگ (۲۰۱۵) تحقیقی بر روی بهینه‌سازی مسیر برداشت برای یک جرثقیل در چندین راهروی سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک انجام دادند. کوسرا، نیزاناسکا و کوزاک (۲۰۱۵) تکنیک‌های پیشرفته برای مدل‌سازی سیستم‌های ذخیره و بازیابی خودکار در صنعت خودرو با به‌کارگیری شبکه‌های پتری^۱ ارائه نمودند. لیو و ژو (۲۰۱۵) استراتژی ذخیره‌سازی آنلاین برای سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک با تنها گسترش در یک بعد را بررسی نمودند. توسان و اکتان (۲۰۱۶) یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت ارزیابی سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک ارائه نمودند. بویسن و استفان (۲۰۱۶) مساله زمان‌بندی یک ماشین ذخیره/بازیابی (یا جرثقیل) را در سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک بررسی کردند. بورتولینی و همکاران (۲۰۱۷) رویکردهای مرسوم در تخصیص ذخیره‌سازی را با معرفی یک مدل دوهدفه زمان و انرژی برای انبار اتوماتیک با قفسه تک‌عمقه ارتقاء بخشیدند که به‌وسیله راهروهای درگیر در سیستم‌های ذخیره و بازیابی اتوماتیک خدمت دهی می‌شوند. متاهری و هاچمی (۲۰۱۸) به ارائه مدل زمان سفر بازیابی برای سیستم ذخیره و بازیابی سقوط-آزاد-جریان-قفسه پرداختند. سهم اصلی مقاله آن‌ها توسعه مدل تحلیلی زمان انتظاری سفر بازیابی برای سقوط آزاد جریان-قفسه تحت سیاست تخصیص انبارش اختصاصی است. ژیا و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی پویای یک سیستم ذخیره و بازیابی وسیله اتوماتیک و تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی کارایی آن پرداختند. مستوفی و عرفانیان (۲۰۱۸) یک سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک چند شاتله را مطالعه نمودند. مقاله آن‌ها به بررسی بهینه‌سازی و زمان‌بندی در یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار چند شاتله تحت انبارش اشتراکی در یک محیط فازی و پویا می‌پردازد. مان و همکاران (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی دوهدفه برای سیستم ذخیره/بازیابی اتوماتیک دو انباره پرداختند. آن‌ها در مقاله خود، یک مسأله جدید دوهدفه تعیین توالی ماشین ذخیره و بازیابی را همراه با زمان رهایی کار و موعد تحویل در یک سیستم ذخیره و بازیابی خودکار دو انباره مطالعه نموده‌اند. سینگبال و آدیل (۲۰۱۹) یک رویکرد منعطف برای طراحی سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک تک جرثقیله با چند راهرو با در نظر گرفتن سیاست‌های ذخیره‌سازی، تجهیزات حمل‌ونقل و

۲. تشریح مسأله مورد بررسی

۲-۱. معرفی مورد مطالعه: انبار قطعات پرسی شرکت ایران‌خودرو

سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک انبار قطعات پرسی ایران‌خودرو از سال ۱۳۸۴ با طراحی شرکت زیمنس آلمان تأسیس گردیده است. در این انبار ۵۰ قطعه پرسی از نوع بسیار بزرگ (G1) (نظیر درب‌ها، رکاب، سپر، صندوق عقب، کاپوت جلو، ستون و...) در ۴۴ پالت متفاوت نگهداری می‌شود. هر پالت مخصوص نگهداری یک کالا بوده و تعداد مشخصی از آن کالا در آن ذخیره می‌گردد. این انبار شامل ۷ راهرو که در هر راهرو یک ردیف در سمت چپ و یک ردیف در سمت راست (جمعاً به تعداد ۱۴ ردیف) به‌همراه ۷ ماشین ذخیره/بازیابی^۲ تک‌شاتله و نیز ۷ محل گذاشت و برداشت^۳ می‌باشد. در هر یک از ردیف‌ها، ۱۶۸ محفظه وجود دارد که شامل ۱۴ محفظه در راستای محور طولی و ۱۲ محفظه در راستای محور عمودی (ارتفاع) انبار می‌باشد. شرکت زیمنس این تعداد طبقات و حجم انبار را براساس ظرفیت اسمی عنوان شده توسط ایران‌خودرو در سال ۱۳۸۴ طراحی نموده است. ظرفیت اسمی ورود پالت به انبار ۸۶ پالت در ساعت و ظرفیت اسمی خروج پالت از انبار ۹۶ پالت در ساعت است که این ظرفیت اسمی با هدف وجود گنجایش همیشگی برای همه قطعات در طول سال (علی‌رغم خالی ماندن فضاهای ذخیره‌سازی در برخی از مواقع سال) در نظر گرفته شده است.

هدف ایران‌خودرو از احداث انبار ذخیره و بازیابی اتوماتیک قطعات پرسی ارائه خدمات ذخیره‌سازی به واحد پرس و خدمات بازیابی به واحد بدنه‌سازی بوده است. حال ممکن است در مواقعی انبار خالی بوده و یا حتی در مواقعی نادر از قطعات سرریز گردد. فرآیند تولید شامل گام‌های ۱- پرس ۲- بدنه‌سازی ۳- رنگ ۴- مونتاژ و ۵- تکمیل‌کاری می‌باشد و سرویس‌دهی این انبار اتوماتیک براساس سیستم جامع تولید می‌باشد. به‌گونه‌ای که قطعات پرسی تولید شده را از واحد پرس به‌عنوان ورودی دریافت نموده و متناسب با تقاضای برنامه‌ریزی شده در سیستم جامع، قطعات به واحد بدنه‌سازی تحویل داده می‌شود.

شیوه کار سیستم مدیریت انبار ایران‌خودرو در حال حاضر بدین شرح می‌باشد. ذخیره‌سازی پالت‌ها در نزدیک‌ترین محلی که از نظر ابعاد فضا امکان قرار گرفتن پالت در آن باشد، صورت می‌گیرد. بازیابی پالت‌ها نیز باتوجه به ضریب مصرف قطعات در محصول نهایی و براساس سیاست FIFO^۴ می‌باشد. بدین معنا که نخستین پالت ذخیره شده در قفسه، نخستین پالتی خواهد بود که از انبار بازیابی می‌شود.

شایان ذکر است ذخیره‌سازی پالت‌هایی که هرکدام حاوی تعداد مشخصی از قطعات پرسی خودروهایی شرکت ایران‌خودرو می‌باشند، در محفظه‌ها^۵ یا محل‌های به یک اندازه که توسط شرکت زیمنس طراحی شده است، صورت می‌گیرد. از آنجایی که ظرفیت و تعداد پالت‌هایی که

ایران‌خودرو با حجمی گسترده از درخواست‌ها برای ذخیره‌سازی و بازیابی قطعات در طی زمان، بهبود حاصل شده در انرژی مصرفی بسیار قابل توجه خواهد بود. این بهبود قطعاً با کاهش مسافت‌های طی شده برای جابجایی اقلام و لحاظ نمودن پارامتر وزن در شاخص COI حاصل شده و بدیهی است که مسافت طی‌شده برای ذخیره و بازیابی قطعات نیز با محل قرار گرفتن آن‌ها در قفسه‌ها رابطه مستقیمی دارد. در راستای سوق دادن این پژوهش به‌سمت شرایط دنیای واقعی، از طریق یکی از روش‌های مقابله با عدم قطعیت (یعنی بهینه‌سازی استوار^۶)، مدل را از حالت ثابت و معین بودن خارج کرده‌ایم. به‌همین منظور یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار یعنی پارامتر تقاضا، برای بررسی شرایط عدم قطعیت انتخاب شده است.

نوآوری اصلی این مطالعه به‌کارگیری تمامی نوآوری‌های یاد شده در توسعه مدل ریاضی و حل آن برای بهبود یک راهکار تخصیص در دنیای واقعی از طریق استفاده از داده‌های واقعی و ارائه راه‌حل برای مطالعه موردی پژوهش حاضر بوده است. در این مطالعه تلاش شده مقایسه کاربردی مفیدی روی یک مطالعه موردی واقعی برای بررسی سیاست‌ها و شرایط تخصیص مکان‌های انبارش در نظر گرفته شود. به‌طور طبیعی این نوآوری‌ها می‌تواند مزایای قابل ملاحظه‌ای را برای این شرکت به‌همراه داشته باشد، چراکه هم به کاهش فضاهای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی و هم به کاهش هزینه‌های مربوط به آن کمک خواهد نمود و هم با کاهش میزان جابجایی‌های قطعات، سرعت فرآیند ذخیره‌سازی و بازیابی را افزایش داده و کارایی انبار در تحویل سریع‌تر و به‌موقع کالاها را ارتقاء می‌بخشد. این تحقیق موفق شده است با تخصیص بهتر پالت‌ها به محل‌های ذخیره‌سازی با به‌کارگیری یک مدل بومی توسعه داده شده برای انبار اتوماتیک ایران‌خودرو از طریق معرفی یک شاخص جدید دست یابد و کاهش مسافت، زمان، انرژی و هزینه‌های ذخیره و بازیابی و جابجایی را برای ایران‌خودرو به ارمغان آورد. با توجه به حجم بالای گردش قطعات در انبار ایران‌خودرو این صرفه‌جویی‌های در طول زمان بسیار قابل ملاحظه خواهد بود.

این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است. در بخش ۲ مسأله مورد بررسی در انبار قطعات پرسی شرکت ایران‌خودرو، که مورد مطالعه این مقاله است، تبیین می‌شود و پیشنهادهایی برای تغییر شاخص COI باتوجه به ویژگی‌ها و شرایط این انبار ارائه می‌شود. بخش ۳ به ارائه مدل ریاضی پیشنهادی این مقاله می‌پردازد که مدل نهایی به‌صورت یک مدل تک‌هدفه خطی استوار ارائه می‌گردد. بخش ۴ به معرفی روش‌های حل پیشنهادی برای حل مدل ریاضی می‌پردازد که شامل الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید است. بخش ۵ به ارائه نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل با روش‌های حل پیشنهادی برای مسائل نمونه منتخب اختصاص دارد و مقایسه‌ای میان راه‌حل‌های به‌دست آمده صورت می‌گیرد. همچنین تحلیل حساسیت روی نتایج در این بخش انجام شده است. در نهایت مقاله با نتیجه‌گیری در بخش ۶ خاتمه می‌یابد.

4. First in First Out
5. Compartments

1. Robust Optimization
2. S/R Machines
3. P/D Station

هزینه جابجایی و حمل‌ونقل مواد در یک انبار اثر قابل توجهی دارد که از جمله آن اثر کاهش فضای انبار روی هزینه بازاریابی سفارش و هزینه فضای انبار می‌باشد.

بنابراین شاخص COI یک معیار مورد استفاده جهت تخصیص طبقه محصولات به مکان‌های انبارش با در نظر گرفتن تعداد درخواست ذخیره و بازاریابی و فضای مورد نظر برای ذخیره‌سازی می‌باشد. این شاخص که به صورت رابطه (۱) نشان داده شده است از حاصل تقسیم کل مقدار فضایی که محصول p اشغال می‌کند بر کل تقاضای محصول در کل دوره تشکیل شده است. در این رابطه I_p به معنی تعداد مورد نیاز از محصول p و همچنین f_p به معنی فضای هر واحد محصول p و D_p به معنی کل تقاضا از محصول p می‌باشد.

$$COI_p = \frac{f_p \max_t \{I_p^t\}}{D_p / T} \quad (پ)$$

حداکثر سطح ذخیره شده برای واحدهای بار
برنامه‌ریزی شده برای محصول p در دوره t

میانگین تعداد سفارش و تقاضای بار واحد
برای محصول p در طول دوره t

مساحت کف برای واحد بار محصول p

اگر مقدار تقاضای محصول p افزایش یابد و/یا اگر فضای محصول p کاهش یابد، مقدار پارامتر COI کاهش خواهد یافت. محصول با COI کمتر در طبقات پایین تر تخصیص می‌یابد.

۲-۳. تعریف یک شاخص COI جدید

تلاش‌های تحقیقاتی صورت گرفته برای لحاظ نمودن تأثیر شاخص COI بر نحوه تخصیص مکان‌های انبارش و افزایش دقت تخصیص به کمک آن به سال‌های دور برمی‌گردد و اخیراً تحقیقات اندکی در این زمینه شده است. حال آنکه در نظر گرفتن عوامل اثرگذار بر نحوه چیدن اقلام در قفسه‌های ذخیره‌سازی نقش بسیار مهمی در صحت مدل ریاضی تخصیص و افزایش دقت آن دارد. لذا یکی از نوآوری‌های تحقیق حاضر توسعه و بومی‌سازی شاخص COI متناسب با شرایط و عوامل تأثیرگذار مورد مطالعه بوده است.

در ادامه طی تحقیقات و بررسی‌های میدانی انبار شرکت ایران خودرو به این نتیجه رسیدیم که عوامل دیگری از جمله وزن قطعه، حجم قطعه، آسیب‌پذیری و گران قیمتی قطعه و همچنین حساسیت قطعه به درجه هوا، به گرد و خاک، به زنگ‌زدگی علاوه بر عوامل اثرگذار بر رابطه مرسوم COI در نحوه چیدمان و جانمایی قطعات تأثیرگذار می‌باشد که در نظر گرفته نشده است. این عوامل به صورت زیر می‌باشد:

$$(۱) \text{ تقاضا و شدت بازاریابی/مساحت و فضای مورد نیاز قطعات: } \frac{f_p \times I_p}{D_p}$$

$$(۲) \text{ وزن قطعات: } W_p$$

$$(۳) \text{ حجم قطعات: } V_p$$

در هر یک از این محل‌ها می‌توانند ذخیره گردند محدود می‌باشد، پس بدیهی است این تعداد برحسب طول پالت‌ها و طول محفظه‌ها و محل‌های ذخیره‌سازی آن‌ها تعیین می‌گردد. سیاست فعلی ایران خودرو هم در ذخیره‌سازی و هم به تبع آن در بازاریابی دارای ایرادات اساسی می‌باشد. چراکه ذخیره‌سازی پالت‌ها در قفسه‌ها بدون توجه به میزان مصرف آن پالت در طول زمان و صرفاً براساس تخصیص به نزدیک‌ترین فضای خالی موجب می‌شود بازاریابی پالت‌هایی که مصرف بیشتری داشته ولی عدم توجه به توأثرشان موجب ذخیره‌سازی آن‌ها در فاصله دوری از نقطه گذاشت و برداشت شده، با پیمودن مسافت بیشتر و در نتیجه صرف زمان و انرژی بیشتری همراه می‌باشد. موضوعی که در سیاست ذخیره‌سازی این پژوهش در قالب توجه به آن از طریق شاخص COI از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی بازاریابی پالتی که زودتر از همه ذخیره شده نیز خالی از اشکال نمی‌باشد. زیرا اگر پالت مشابه دیگری (که همان قطعات را در خود جای داده) با فاصله کمتری از نقطه برداشت و تحویل وجود داشته باشد، بازاریابی پالت دورتر به دلیل طی کردن مسافت و صرف زمان و انرژی بیشتر منطقی به نظر نمی‌رسد. از این رو به منظور رفع ایرادات ذکر شده، تحقیق حاضر، سیاست ذخیره‌سازی مبتنی بر طبقه‌بندی و تشکیل طبقه‌ها براساس شاخص COI پیشنهادی محقق را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این سیاست در ذخیره‌سازی پالت‌ها معیارهای تأثیرگذار در کاهش زمان بازاریابی نظیر توأثر، حجم، قیمت، وزن و... در قالب شاخص COI پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود و تخصیص پالت‌ها به طبقه‌ها به گونه‌ای صورت می‌گیرد که مجموع مسافت‌های طی شده برای بازاریابی آن‌ها (و به همین نسب انرژی الکتریکی مصرف شده) در راستای برآورده نمودن تابع هدف اول مدل ریاضی حداقل گردد. از سویی دیگر سیاست بازاریابی پالت‌ها براساس بازاریابی نزدیک‌ترین پالت به نقطه گذاشت و برداشت، در راستای همین حداقل پیمودن مسافت‌ها بوده و هدف کاهش زمان بازاریابی و افزایش سرعت سرویس‌دهی و کاهش انرژی مصرف شده را دنبال می‌کند.

۲-۲. تعریف شاخص COI

تخصیص مکان در انبار طبقه‌بندی شده شامل تعیین تعداد طبقه‌ها، تخصیص محصولات به طبقه‌ها و مکان‌های ذخیره در هر طبقه می‌باشد. یک معیار مورد استفاده جهت تخصیص گروه‌های محصول به مکان‌های ذخیره که عواملی چون شدت تقاضای کالا و فضای لازم برای انبارش کالا را در نظر می‌گیرد، شاخص متر مکعب-به‌ازای هر-سفارش (COI^۱) می‌باشد که این شاخص به عنوان نسبت فضای مورد نیاز ذخیره هر کالا به میزان درخواست بازاریابی و تقاضای آن تعریف می‌شود. ثابت شده است تخصیص n طبقه که در آن محصولات با پایین‌ترین COI در اغلب مکان‌های مطلوب (یعنی نزدیک به درب ورودی/خروجی) ذخیره شده‌اند، تخصیص بهینه را در دوره‌های زمانی ذخیره‌سازی و بازاریابی سفارش ارائه می‌دهد. تصمیمات پیاده‌سازی و اجرای انبار طبقه‌بندی شده روی مواردی چون فضای مورد نیاز انبار و

p برای پالت‌ها ($p = 1, 2, 3, \dots, P$)

۳-۲. پارامترها

COI'_p	شاخص جدید فضا به‌ازای هر سفارش برای پالت p
d_l	مسافت مکان l از نقاط ورود و خروج
D_p	تعداد کل تقاضا برای پالت p
f	هزینه فضا به تومان به‌ازای هر متر
f_p	مقدار فضای مساحت کف که یک واحد پالت p نیاز دارد با در نظر گرفتن ارتفاع قفسه
h	هزینه بازیابی و جابجایی به تومان به‌ازای هر متر
E	هزینه انرژی به‌ازای هر کیلووات مصرف برق برحسب واحد پولی (تومان)
I_p	سطح موجودی پالت p
e_l	میزان مصرف انرژی توسط دستگاه AS/RS تا مکان l از نقطه ورودی خروجی برحسب کیلووات
PL_p	طول هریک از پالت‌ها
CL_l	طول محل ذخیره‌سازی پالت برای هریک از مکان‌ها

۳-۳. متغیرهای تصمیم

$$X_{pc} = \begin{cases} 1 & \text{اگر محصول } p \text{ به طبقه } c \text{ تخصیص پیدا کند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$y_{lc} = \begin{cases} 1 & \text{اگر مکان } l \text{ به طبقه } c \text{ تخصیص پیدا کند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

باتوجه به اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف شده، مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق که یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سه‌هدفه غیرخطی صفر و یک می‌باشد، به شرح زیر ارائه می‌گردد:

$$\text{Min } Z_1 = f \cdot \sum_l \sum_c CL_l y_{lc} + 2 \cdot h \cdot \sum_p \sum_l \sum_c d_l y_{lc} D_p X_{pc} + \quad (۴)$$

$$2 \cdot E \cdot \sum_p \sum_l \sum_c e_l y_{lc} D_p X_{pc}$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_p \sum_l \sum_c \frac{y_{lc}}{d_l} COI'_p X_{pc} \quad (۵)$$

$$\text{Min } Z_3 = \left\{ \text{Max}_c \left(\sum_p X_{pc} \right) + \text{Max}_c \left(\sum_l y_{lc} \right) \right\} \quad (۶)$$

Subject to:

$$\sum_c X_{pc} = 1 \quad \forall p, p = 1, \dots, P, c = 1, \dots, C \quad (۷)$$

$$\sum_c y_{lc} \leq 1 \quad \forall l, l = 1, \dots, L, c = 1, \dots, C \quad (۸)$$

$$\sum_p I_p PL_p X_{pc} \leq \sum_l CL_l y_{lc} \quad \forall c \quad (۹)$$

$$p = 1, \dots, P, l = 1, \dots, L, c = 1, \dots, C$$

$$X_{pc} \in \{0, 1\} \quad \forall p, c \quad (۱۰)$$

$$p = 1, \dots, P, c = 1, \dots, C$$

$$y_{lc} \in \{0, 1\} \quad \forall l, c \quad (۱۱)$$

$$l = 1, \dots, L, c = 1, \dots, C$$

(۴) قیمت و یا آسیب‌پذیری قطعات: A_p

(۵) حساسیت (دما، گرد و خاک، زنگ‌زدگی): S_p

باتوجه به اینکه موارد ۲ و ۳ عوامل مثبت تأثیرگذار و موارد ۱، ۴ و ۵ عوامل منفی تأثیرگذار در شاخص جدید (COI'_p) می‌باشد، در نتیجه این شاخص به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$COI'_p = \frac{\left(\frac{f_p \times I_p}{D_p} \right)^\alpha \times (A_p)^\delta \times (S_p)^\lambda}{(W_p)^\beta \times (V_p)^\gamma} \quad (۲)$$

توان‌های وزنی شاخص جدید COI'_p به کمک روش AHP محاسبه شده و به صورت رابطه (۳) ارائه می‌گردد. خواننده را برای آشنایی با نحوه انجام این محاسبات به مقاله روشن و همکاران (۲۰۰۸) ارجاع می‌دهیم.

$$COI'_p = \frac{\left(\frac{f_p \times I_p}{\sum_t D_p} \right)^{0.531} \times (A_p)^{0.116} \times (S_p)^{0.036}}{(W_p)^{0.239} \times (V_p)^{0.077}} \quad (۳)$$

۳. مدل ریاضی پیشنهادی

مسئله اصلی این تحقیق توسعه مدل ریاضی تخصیص مکان‌های انبارش جهت تغییر نحوه تخصیص کنونی اقلام به مکان‌های ذخیره‌سازی در شرکت ایران خودرو با روش پیشنهادی محقق می‌باشد. در این بخش مدل ریاضی سه‌هدفه پیشنهادی محققین ارائه می‌گردد. توسعه مدل باتوجه به شرایط ذخیره‌سازی انبار شرکت ایران خودرو صورت گرفته است.

هدف اول مدل ریاضی شامل حداقل کردن هزینه‌های فضای ذخیره‌سازی، بازیابی، جابجایی و انرژی می‌باشد. بهینه‌سازی این هدف منجر به استفاده بهتر و کارآمدتر از فضاهای ذخیره‌سازی، کاهش هزینه‌های بازیابی و کاهش مسافت‌های طی شده توسط ماشین‌های ذخیره و بازیابی در انبار می‌شود. کاهش مسافت‌ها در نتیجه منجر به کاهش زمان‌های ذخیره و بازیابی و همچنین صرفه‌جویی در انرژی الکتریکی مصرف شده توسط دستگاه‌های ذخیره و بازیابی می‌شود. از آنجا که در انبار طبقه‌بندی شده قطعات براساس شاخص COI به طبقات اختصاص می‌یابند، پالت‌هایی که شاخص COI کمتری دارند می‌بایستی به طبقات پایین‌تر تخصیص یابند که به نقطه ورودی/خروجی انبار نزدیک‌تر هستند که این امر از طریق تابع هدف دوم مدل ریاضی دنبال می‌شود. تابع هدف سوم مدل ریاضی نیز به دنبال ایجاد تعادل از طریق توزیع بار کاری بین طبقات مختلف انبار است که این کار از طریق حداقل کردن ماکزیمم حجم پالت‌ها و محل‌های ذخیره‌سازی اختصاص یافته به هر طبقه انجام می‌گیرد

باتوجه به تعریف و ارائه شاخص COI جدید و با در نظر گرفتن شرایط یاد شده برای انبار شرکت ایران خودرو، مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود.

۳-۱. اندیس‌ها

c برای طبقات ($c = 1, \dots, C$)

l برای محل‌های ذخیره‌سازی پالت‌ها ($l = 1, 2, 3, \dots, L$)

فرض‌های زیر در فرآیند فرموله کردن مدل در نظر گرفته شده است:

- به منظور ایجاد امکان برقراری رابطه متناظر میان پارامتر مسافت و زمان، فرض می‌شود سرعت حرکت ماشین ذخیره و بازیابی ثابت است.
- میزان راندمان و قابلیت اطمینان استفاده از قطعات، ۱۰۰٪ می‌باشد.
- از آنجا که میزان انرژی الکتریکی مصرفی متناسب با میزان مسافت طی شده می‌باشد، جهت ساده‌سازی نحوه محاسبه انرژی مصرفی، رابطه میان آن‌ها به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک انبار مورد مطالعه، قابلیت محاسبه و ارائه مسافت‌های طی شده در بازه‌های زمانی متفاوت را دارد.

۳-۵. استوار نمودن مدل ریاضی در شرایط وجود عدم قطعیت در پارامتر تقاضا

همان‌گونه که در مطالعاتی که به منظور بررسی و لحاظ نمودن عدم قطعیت در پارامترهای مدل ریاضی انجام شده مشاهده می‌گردد، جهت مواجهه با عدم قطعیت از رویکردهای بهینه‌سازی تصادفی و فازی استفاده شده و براساس دانش محقق تا کنون از بهینه‌سازی استوار که رویکردی نوین و نیرومند می‌باشد بهره‌گیری نشده است.

به‌طور کلی سه رویکرد برای برخورد با عدم قطعیت در بهینه‌سازی ریاضی توسعه داده شده است: ۱- بهینه‌سازی تصادفی ۲- بهینه‌سازی فازی ۳- بهینه‌سازی استوار.

رویکرد استوار برای حل مسائل بهینه‌سازی با عدم قطعیت داده‌ها در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ پیشنهاد شد و اخیراً به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفت و توسعه یافت. تحت این رویکرد تمایل به پذیرش یک جواب زیربهینه برای ارزش‌های اسمی داده‌ها برای تضمین اینکه جواب موجه و بهینه وقتی که داده‌ها تغییر می‌کند؛ تضمین شود.

نخستین گام در توسعه تئوری بهینه‌سازی استوار توسط سویستر (۱۹۷۳) برداشته شد. هرچند که این کار با نام بهینه‌سازی استوار انجام نگرفت. دو دهه بعد بن تال و نمیروفسکی (۱۹۹۸ و ۲۰۰۰) و ال قانوی، اوستری و لبرت (۱۹۹۸) به‌طور موازی تحقیقات مؤثری را در معرفی و توسعه تئوری بهینه‌سازی استوار انجام دادند.

پایدار و سعیدی مهرآباد (۱۳۹۳) یک مدل یکپارچه استوار دوهدفه زنجیره تأمین و آرایش سلولی مجازی پویا طراحی نمودند. آن‌ها در مطالعه خود یک مدل ریاضی دوهدفه استوار جهت یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تدارکات، تولید و توزیع در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند.

رفیعی و محمدی‌طلب (۱۳۹۵) یک مدل ریاضی با رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی سیستم تولید سلولی پویا با در نظرگیری ماشین‌آلات چندکاره ارائه کردند. آن‌ها یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌سازی عدم قطعیت در سیستم تولید سلولی ارائه نمودند. استواری مدل ارائه شده باعث شده است تا جواب به‌دست آمده به‌ازای تمامی مقادیر پارامترهای غیرقطعی، شدنی بودن

$$COI'_p = \frac{\left(\frac{f_p \times I_p}{D_p}\right)^{0.531} \times (A_p)^{0.116} \times (S_p)^{0.036}}{(W_p)^{0.239} \times (V_p)^{0.077}} \quad (12)$$

تابع هدف اول شامل متغیرهای باینری بوده که به دنبال به حداقل رساندن جمع هزینه فضای ذخیره‌سازی، هزینه بازیابی، جابجایی و انرژی مصرفی می‌باشد. عبارت اول تابع هدف اول مجموع فضاهای اشغال شده توسط محفظه‌ها را حداقل می‌کند. عبارت دوم تابع هدف اول مجموع هزینه‌های بازیابی پالت‌ها را حداقل می‌کند. عبارت سوم تابع هدف اول هزینه انرژی مصرفی را حداقل می‌کند. هزینه مصرف انرژی یک‌طرفه برای طبقه c از حاصل ضرب واحد هزینه انرژی E، تعداد کل بازیابی‌ها و برداشت‌ها $\sum_p \sum_l \sum_c y_{lc} D_{pc} X_{pc}$ و میزان انرژی مصرفی تا فضای تخصیص یافته از نقطه ورودی/خروجی (e) (در صورتی که مکان مورد نظر برای تخصیص در طبقه c انتخاب گردد)، به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است در هر ذخیره و بازیابی دو بار جابجایی صورت می‌گیرد.

تابع هدف دوم به دنبال حداقل نمودن مجموع حاصل ضرب شاخص COI پالت‌ها در معکوس مسافت‌های طی شده برای مکان‌های تخصیص یافته به طبقات، برای همه پالت‌های تخصیص یافته به طبقات است که موجب تخصیص پالت‌های با شاخص COI کمتر به طبقات پایین‌تر می‌شود که فاصله کمتری از نقطه ورودی/خروجی دارد.

تابع هدف سوم به دنبال کاهش ماکزیمم حجم پالت‌ها و محل‌های ذخیره‌سازی تخصیص یافته به هر طبقه می‌باشد. این مهم سبب می‌گردد که تجمع پالت‌ها و محل‌های انبارش در یک قسمت خاص انبار که هدف تابع اول می‌باشد تعدیل گردد. در نتیجه آن نقاطی از فضای انبار که در توابع هدف کلاسیک ادبیات لزوماً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند براساس این تابع امکان تخصیص می‌یابند. در نتیجه مواردی مانند سطح خرابی یا پایایی تجهیزات حمل‌ونقل و سرویس‌دهی در انبار (ماشین‌های گذاشت و برداشت پالت‌ها) با استفاده از تابع پیشنهادی بین همه طبقات به‌صورت یکسان و یکنواخت مورد توجه قرار گرفته و توزیع می‌گردد. در نتیجه این تابع هدف بار کاری طبقه بحرانی را بین کل طبقه‌ها توزیع (پخش) می‌کند تا موجب گردد به تجهیزات (ماشین‌های ذخیره و بازیابی) یک طبقه بیش از حد متوسط فشار نیاید.

پیرو محدودیت (۷) نشان داده می‌شود که یک پالت می‌تواند به یک و فقط یک طبقه تخصیص یابد. با توجه به اینکه ضروری است که یک مکان ذخیره l حداکثر به یک طبقه تخصیص یابد از محدودیت (۸) استفاده می‌شود. محدودیت (۹) جهت اطمینان حاصل نمودن از وجود فضای ذخیره‌سازی کافی (از لحاظ طول محفظه‌ها) جهت نگهداری پالت‌های تخصیص یافته به مکان‌های ذخیره‌سازی هر طبقه می‌باشد. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۴. فرض‌های مدل

به‌منظور ساده‌سازی نحوه مدل‌سازی مدل ریاضی پیشنهادی،

تعداد برقرار شود. روش به‌کار گرفته شده در ادامه در سال ۲۰۰۶ توسط اسنایدر و دسکین در مورد مسائل مکان‌یابی استفاده شده است. برای حل مسأله در حالت غیرقطعی ابتدا مدل ریاضی سه‌هدفه را مطابق معادله زیر با وزن‌دهی ساده به‌مدل یک‌هدفه تبدیل می‌کنیم.

$$\text{Min } Z = w_1 Z_1 + w_2 Z_2 + w_3 Z_3 \quad (13)$$

با بهره‌گیری از نظرات خبرگان $W_1=0.4$ ، $W_2=0.3$ و $W_3=0.3$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه مقیاس توابع هدف متفاوت می‌باشد، به‌منظور ایجاد قابلیت جمع‌پذیری آن‌ها در یک تابع هدف مشترک، هر یک توابع هدف بر مقدار بهینه انفرادی خود تقسیم شدند تا بی‌مقیاس (نرمالایز) گردند.

در این مسأله پارامتر تقاضا به‌عنوان پارامتر تصادفی در نظر گرفته شده و برای آن سناریوسازی می‌کنیم. بنابراین پارامتر تقاضا به D_{ps} یعنی مقادیر مختلف تقاضای پالت p در سناریوی s تغییر می‌یابد. با توجه به اینکه انبار مورد مطالعه این تحقیق پالت‌ها را از واحد قطعات پرسی تحویل گرفته و به واحد مونتاژ و بدنه‌سازی ارسال می‌کند، از این‌رو مقدار پارامتر تقاضا براساس مقدار مورد نیاز واحد بدنه‌سازی (منطبق با برنامه تولید) که مشتری انبار محسوب می‌شود تعیین می‌گردد. از طرفی تقاضای واحد بدنه‌سازی برای هر هفته با مقدار قطعی برآورد شده ولی در هفته‌های متفاوت مقدار مختلفی تعیین می‌شود که این تغییر همراه با عدم قطعیت می‌باشد. از آنجا که هدف این مطالعه بررسی رفتار یک ماهه انبار ایران خودرو و مقایسه شاخص کارایی این انبار (مسافت طی شده) برای سیاست فعلی ایران خودرو و سیاست پیشنهادی این تحقیق طی یک ماه می‌باشد و با توجه به عدم قطعیت موجود در تقاضا در چهار هفته گوناگون در یک ماه، چهار سناریوی مختلف براساس داده‌های تاریخی گذشته از تقاضای هر یک از پالت‌ها در این چهار هفته تعیین و سناریوسازی شده است. به‌عبارتی دیگر $s=4$ انتخاب شده است. سپس مدل ریاضی یک‌هدفه زیر را به‌همراه محدودیت‌های مدل ریاضی در حالت قطعی به‌ازای مقادیر تقاضای مربوط به هر سناریو حل کرده و برای هر سناریو یک مقدار بهینه Z^*_s به‌دست می‌آوریم.

$$\text{Min } \sum_s q_s Z'_s = \quad (14)$$

$$\text{Min } \sum_s q_s (w_1 Z_{1s} + w_2 Z_{2s} + w_3 Z_{3s})$$

$$Z_{1s} = f \cdot \sum_l \sum_c CL_l y_{lc} + 2 \cdot h \cdot \sum_p \sum_l \sum_c d_l y_{lc} D_{ps} X_{pcs} \quad (15)$$

$$+ 2 \cdot E \cdot \sum_p \sum_l \sum_c e_l y_{lc} D_{pcs} X_{pcs}$$

$$Z_{2s} = \sum_p \sum_l \sum_c \frac{y_{lc}}{d_l} COI'_{ps} X_{pcs} \quad (16)$$

$$Z_{3s} = \left\{ \text{Max}_c \left(\sum_p \sum_s X_{pcs} \right) + \text{Max}_c \left(\sum_l y_{lc} \right) \right\} \quad (17)$$

در گام بعد بایستی مقدار p' را مشخص نماییم. p' حداکثر مقدار

خود را حفظ نماید و در این محیط غیرقطعی به‌دنبال یافتن جواب بهینه باشد.

۳-۵-۱. بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو (گسسته)

از جمله مدل‌هایی که در برنامه‌ریزی استوار مورد توجه قرار می‌گیرد، در نظر گرفتن پارامترها به‌صورت احتمالی در قالب سناریوهای مختلف است. هدف از ایجاد سناریو کشف محتمل‌ترین یا ممکن‌ترین حالات برای پارامترها و جمع‌بندی آن در قالب تصویرهای (سناریوهای) محتمل‌تر یا ممکن‌تر می‌باشد. سپس این امکان برای تصمیم‌گیران وجود دارد که تصمیمات را با توجه به سناریوهای طراحی و تدوین کنند. در این مدل پارامترها در سناریوهای مختلف مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرند و هدف، به‌حداقل رساندن هزینه‌های انتظاری، یا بدترین حالت ممکن و یا مقدار تأسف است. مقدار تأسف نسبی در برخی از مسائل نباید از مقدار p در هر سناریو تجاوز نماید که این رویکرد به بهینه‌سازی p -robust معروف است. کمترین میزان هزینه انتظاری با تنظیم مقدار p بر روی بی‌نهایت می‌تواند به‌دست آید. این جواب می‌تواند در بهینه‌سازی تصادفی مطلوب به‌شمار آید اما در برخی سناریوهای ضعیف عمل می‌کند.

مفهوم p -robustness نخستین‌بار توسط کوولیس، کوراوارالا و گوتیرز (۱۹۹۲)، در زمینه چیدمان تسهیلات معرفی گردید و پس از آن توسط گوتیرز و کوولیس (۱۹۹۲) در زمینه مسأله منع‌یابی بین‌المللی و توسط گوتیرز، کوولیس و کوراوارالا (۱۹۹۶) در مسأله طراحی شبکه به‌کار گرفته شد. هر سه این مسائل نیز در کتاب بهینه‌سازی استوار کوولیس و یو (۱۹۹۷) بحث شده است.

۳-۵-۲. استوار نمودن مدل ریاضی در حالت غیرقطعی به‌کمک روش (Stochastic P-Robustness)

کوتاه شدن عمر محصولات، تنوع تقاضای مشتریان و عدم آگاهی از شرایط آینده بازار، محققان را به‌سمت بررسی رفتار سیستم‌ها به‌صورت تصادفی سوق داده است (ایگناتیوس و همکاران، ۲۰۱۱). مدل‌سازی ریاضی در اکثر مسائل معمولاً با صرف نظر کردن از برخی شرایط موجود در واقعیت صورت می‌پذیرد، به‌صورتی که در بیشتر مدل‌های ریاضی پارامترهای مسأله قطعی و از پیش تعیین شده هستند. یکی از مهم‌ترین این پارامترها، تقاضای مشتریان است.

با نگاهی واقع‌بینانه و اهمیت دادن به جنبه کاربردی مدل پیشنهادی می‌توان عدم قطعیت موجود در ماهیت برخی پارامترهای ورودی مدل را در نظر گرفت. پارامتر دارای شرایط عدم قطعیت در مدل پیشنهادی تقاضای محصول (D_p) می‌باشد که از رویکرد بهینه‌سازی استوار به‌منظور مقابله با عدم قطعیت موجود در آن استفاده می‌شود.

در این بخش از روش Stochastic P-Robustness برای استوار نمودن مدل ریاضی در حالت غیرقطعی استفاده می‌کنیم که میان هزینه‌های تابع هدف یعنی متوسط یا امید ریاضی کل هزینه‌ها و میزان پشیمانی حاصل از انحراف از جواب بهینه تعادل برقرار می‌کند. یعنی میان استواری و اینکه چقدر هزینه بیشتری بایستی پرداخت شود،

$$Z_{plc} \geq X_{pcs} + y_{lc} - 1 \quad (21)$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4$$

برای خطی‌سازی تابع Z_{3s} عبارت دوم آن را با متغیر M و عبارت سوم آن را با متغیر N جایگزین می‌کنیم که به صورت $M+N$ تبدیل می‌شود. بنابراین دو محدودیت زیر نیز به محدودیت‌های مدل افزوده می‌گردد:

$$M \geq \sum_p X_{pcs} \quad \forall c \quad (22)$$

$$p = 1, \dots, P, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (23)$$

$$N \geq \sum_l y_{lc} \quad \forall c \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C$$

۳-۸. مدل ریاضی استوار خطی

در نهایت مدل ریاضی استوار خطی شده مطابق زیر خواهد بود:

$$\text{Min} \sum_s q_s Z'_s = \text{Min} \sum_s q_s (w_1 Z_{1s} + w_2 Z_{2s} + w_3 Z_{3s}) \quad (24)$$

Subject to:

$$\sum_c X_{pcs} = 1 \quad \forall p, s \quad (25)$$

$$p = 1, \dots, P, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (26)$$

$$\sum_c y_{lc} \leq 1 \quad \forall l$$

$$l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C \quad (27)$$

$$\sum_p I_p P L_p X_{pcs} \leq \sum_l C L_l y_{lc} \quad \forall c, s$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (28)$$

$$(w_1 Z_{1s} + w_2 Z_{2s} + w_3 Z_{3s}) \leq (1 + p') Z'_s \quad \forall s \quad s = 1, \dots, 4$$

$$Z_{plc} \leq X_{pcs} \quad \forall p, l, c, s \quad (29)$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (30)$$

$$Z_{plc} \leq y_{lc} \quad \forall p, l, c$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C \quad (31)$$

$$Z_{plc} \geq X_{pcs} + y_{lc} - 1 \quad \forall p, l, c, s$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (32)$$

$$M \geq \sum_p X_{pcs} \quad \forall c, s$$

$$p = 1, \dots, P, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (33)$$

$$N \geq \sum_l y_{lc} \quad \forall c$$

$$l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C \quad (34)$$

$$X_{pcs} \in \{0, 1\} \quad \forall p, c, s$$

$$p = 1, \dots, P, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (35)$$

$$y_{lc} \in \{0, 1\} \quad \forall l, c$$

$$l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C \quad (36)$$

$$COI'_{ps} = \frac{(f_p \times I_p / D_{ps})^{0.531} \times (A_p)^{0.116} \times (S_p)^{0.036}}{(W_p)^{0.239} \times (V_p)^{0.077}}$$

$$p = 1, \dots, P, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (37)$$

$$Z_{1s} = f \cdot \sum_l \sum_c C L_l y_{lc} + 2 \cdot h \cdot \sum_p \sum_l \sum_c d_l D_{ps} Z_{plc}$$

$$+ 2 \cdot E \cdot \sum_p \sum_l \sum_c e_l D_{pcs} Z_{plc}$$

مجاز پشیمانی برای انحراف از جواب بهینه بوده و مقادیر آن از صفر تا بی‌نهایت می‌تواند تغییر کند که معمولاً مقادیر مختلفی از آن را از صفر تا یک به عنوان تحلیل حساسیت جواب انتخاب می‌کنند. شایان ذکر است تصمیم‌گیری برای انتخاب مقدار p' می‌تواند یک تصمیم مدیریتی نیز باشد تا حد مجاز پشیمانی از بهینه را تعیین کند که در این تحقیق پس از اخذ نظر نمایندگان خبره مدیریت تا ۰.۱ انحراف از مقدار بهینه را مجاز دانستند.

$$(w_1 Z_{1s} + w_2 Z_{2s} + w_3 Z_{3s}) \leq (1 + p') Z'_s \quad \forall s \quad (18)$$

۳-۶. پارامترها و متغیرهای تصمیم جدید در شرایط عدم قطعیت

از میان دو متغیر تصمیم مدل ریاضی تنها متغیر X_{pc} اندیس s می‌گیرد، زیرا این متغیر تخصیص پالت‌ها به کلاس‌ها را نشان می‌دهد و از آنجا که تعداد پالت‌ها به تقاضای پالت وابسته است و سناریوسازی مسأله بر روی پارامتر تقاضای پالت‌ها صورت گرفته است، لذا مقداری که این متغیر می‌گیرد با تغییر تقاضا تغییر می‌کند و به مقدار آن وابسته است. اما متغیر تصمیم y_{lc} تخصیص مکان‌های ذخیره‌سازی در کلاس‌ها نشان می‌دهد و هیچ‌کدام از اندیس‌های آن به تقاضای پالت‌ها وابسته نیست و با تغییر مقدار پالت‌های درخواستی تغییر نمی‌کند. لذا این متغیر تصمیم اندیس s نمی‌گیرد و در مدل ریاضی جدید بدون تغییر می‌ماند. در نتیجه اندیس، پارامترها و متغیر تصمیم زیر به مدل اولیه اضافه می‌شود.

s : تعداد سناریوها ($s=4$)

Z'_s : مقدار تابع هدف بهینه پس از حل مدل ریاضی با مقادیر

تقاضای مربوط به سناریوی s

q_s : احتمال وقوع سناریوی s

$$q_s = \frac{1}{s} = \frac{1}{4} = 0.25$$

p' : حداکثر پشیمانی مجاز برای انحراف از جواب بهینه ($p'=0.1$)

D_{ps} : تعداد کل تقاضا برای محصول p در هر یک از سناریوها

COI'_{ps} : شاخص جدید فضا به‌ازای هر سفارش برای پالت p در هر یک از سناریوها

سناریوی s اگر محصول p به طبقه c تخصیص پیدا کند در غیر این صورت

$$X_{pcs} = \begin{cases} 1 & \text{کند} \\ 0 & \text{تخصیص پیدا کند} \end{cases}$$

۳-۷. خطی‌سازی مدل استوار

ابتدا با جایگزینی حاصل ضرب دو متغیر صفر و یک X_{pcs} و y_{lc} با متغیر صفر و یک Z_{plc} به خطی‌سازی عبارت دوم و سوم تابع Z_{1s} و نیز تابع Z_{2s} می‌پردازیم. این کار با افزودن سه محدودیت زیر انجام می‌گیرد:

$$Z_{plc} \leq X_{pcs} \quad p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \quad s = 1, \dots, 4 \quad (19)$$

$$Z_{plc} \leq y_{lc} \quad p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C \quad (20)$$

این زمان، در جدول مربوطه، گزارش شده است.

همان‌طور که در مثال عددی دوم در مقایسه با مثال اول فهمیده شده، با افزایش ابعاد مسئله، زمان محاسباتی^۱ مورد نیاز برای حل مسئله، به‌مقدار زیادی افزایش یافته است. به‌طوری‌که در مثال دوم، که مسئله‌ای با ابعاد نه‌چندان بزرگ تلقی می‌شود، پس از گذشت مدت‌زمانی طولانی، نرم‌افزار لینگو موفق به دستیابی به راه‌حل بهینه نشده است. از طرفی به‌دلیل ماهیت NP-Hard مسئله تخصیص ارائه شده، در مورد مسائل با ابعاد بالا نمی‌توان در یک زمان منطقی از روش‌های قطعی بهینه‌سازی، برای حل آن استفاده کرد. از این‌رو به‌کارگیری انواع روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مدل پیشنهادی، در مورد مسائل با اندازه بزرگ دنیای واقعی، امری ضروری به‌نظر می‌رسد. با توجه به اینکه امروزه قدرت ارائه راه‌حل‌های کارا توسط الگوریتم‌های فراابتکاری بر کسی پوشیده نیست و حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه با پیچیدگی NP-hard توسط این الگوریتم‌ها به‌سادگی میسر می‌باشد، در این تحقیق از این روش‌های حل نوین بهره گرفته شده است. این‌گونه رویکردها به‌ندرت در ادبیات مورد توجه واقع شده و تنها اخیراً توجه شمار اندکی از محققین در این زمینه را به‌خود جلب نموده است. حال آنکه شرایط و پیچیدگی‌های دنیای واقعی امروز بر لزوم بهره‌گیری از این تکنیک‌ها از منظر کاربردی‌تر نمودن پژوهش تأکید دارد. در ادامه دو الگوریتم فراابتکاری قدرتمند و شناخته شده برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده معرفی می‌شوند.

۴-۲. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک (GA) گروهی از روش‌های جستجوی تصادفی می‌باشند که برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. الگوریتم ژنتیک در واقع یکی از کلاس‌های محاسبات تکاملی^۲ می‌باشد (بک و شیفل، ۱۹۹۶). اصول اولیه و پایه الگوریتم ژنتیک توسط هلند در سال ۱۹۷۵ ایجاد شد که در آن برای اولین بار عملکرد الگوریتم ژنتیک به‌صورت دقیق شرح داده شد. به‌دنبال تحقیق وی، اصول پایه‌ای الگوریتم ژنتیک در مراجع استاندارد با جزئیات بهتر و بیشتر ارائه گردید (گلدبرگ، ۱۹۸۹)، (دیویس، ۱۹۹۱) و (میچالویس، ۱۹۹۲). در حال حاضر تعداد مراجع الگوریتم ژنتیک بسیار زیاد بوده و هنوز نیز در حال رشد می‌باشد (جن و چنگ، ۲۰۰۰). الگوریتم ژنتیک از کروموزوم‌ها برای کدگذاری متغیرهای تصمیم استفاده می‌نماید. کروموزوم‌ها یک بردار از اعداد صحیح یا حقیقی می‌باشند که نشان‌دهنده یک ترکیب خاص از متغیرهای تصمیم می‌باشند. الگوریتم ژنتیک جستجوی خود را با یک نسل اولیه که به‌صورت تصادفی ایجاد شده است، آغاز می‌نماید. سپس کروموزوم‌های موجود، به‌تدریج در طی نسل‌های بعدی با به‌کارگیری عملگرهای ژنتیکی تکامل پیدا می‌کنند. عملگرهایی که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شوند عبارتند از: عملگر انتخاب، تزویج (جابجایی) و جهش. همچنین از عملگر نخبه‌گرا برای

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \\ s = 1, \dots, 4$$

$$Z_{2s} = \sum_p \sum_l \sum_c \frac{Z_{plc}}{d_l} COI'_{ps} \quad (38)$$

$$p = 1, \dots, P, \quad l = 1, \dots, L, \quad c = 1, \dots, C, \\ s = 1, \dots, 4 \quad (39)$$

$$Z_{3s} = M + N \quad s = 1, \dots, 4$$

۴. روش‌های حل مدل پیشنهادی

۴-۱. حل مدل استوار خطی با استفاده از نرم‌افزار لینگو

در این بخش، نتایج حل مدل پیشنهادی با اطلاعات مربوط به داده‌های مثال اول و دوم آورده شده است. خروجی نرم‌افزار لینگو حاصل از حل مدل برای نمونه مسائل تولید شده (۱) و (۲) در جدول (۱) آمده است. از آنجایی که تابع هدف مدل پیشنهادی از نظر عبارت‌های هزینه‌ای که دربر دارد، با توابع هدف بررسی شده در تحقیقات قبلی متفاوت است، مقدار تابع هدف به‌دست آمده در این تحقیق را نمی‌توان با مثال‌های حل شده در ادبیات مقایسه کرد.

البته همان‌گونه که در توضیحات روش استوارسازی مدل ریاضی اشاره شده، استوار نمودن مدل موجب فاصله گرفتن از بهینگی به‌زای دست یافتن به موجه بودن جواب‌ها در شرایط عدم قطعیت پارامترهای مدل (سناریوهای مختلف) می‌شود. به این امید که با تغییر پارامتر تقاضای پالت‌ها (در ۴ سناریوی مطرح شده) این راه‌حل (جواب خروجی) همچنان برای مسئله شدنی باقی بماند.

جدول (۱). نتایج حاصل از حل مدل استوار برای نمونه مسائل تولید

شده در مقیاس کوچک با استفاده از نرم‌افزار لینگو

نمونه ۱	نمونه ۲	
۱/۰۲۶۳۶	۱/۰۸۴۹۶	مقدار تابع هدف
۳۴۸	۱۰۲۶	تعداد متغیرها
۶۱۶	۱۸۷۹	تعداد محدودیت‌ها
۲۵۳۸	۷۷۰۰	تعداد غیرصفرها
۵۱۶۴	۸۶۴۱۷	زمان محاسباتی (ثانیه)
۲۸۰۸۲۰۴۱	۳۰۱۴۶۸۳۴۲	تعداد تکرارها
۵۵۸۶۹۹۴	۲۹۰۷۴۷۶۲	تعداد گام‌ها
۱۴۱	۳۷۴	حافظه (k)

از خروجی‌های حاصله از نرم‌افزار لینگو و بررسی مقادیر متغیرهای تصمیم و شدنی بودن جواب‌ها می‌توان این نتیجه را گرفت که مدل توسعه داده شده دارای صحت و عملکرد مناسب می‌باشد. برای پرهیز از طولانی شدن مقاله، این خروجی‌ها در اینجا ارائه نشده است. در هنگام حل مدل استوار برای نمونه مسئله دوم پس از گذشت ۲۴ ساعت نرم‌افزار لینگو به مقدار بهینه مدل نرسید و اجرای نرم‌افزار پس از گذشت ۲۴ ساعت متوقف شده و بهترین جواب به‌دست آمده تا

شود. گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در قدم‌های ذیل تشریح می‌گردد:

الف) مقداردهی اولیه: اطلاعات اولیه برای شروع کار الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی به‌قرار زیر است:

- دمای اولیه (T_0) که الگوریتم شروع به کار می‌کند.
- دمای نهایی (T_f) که الگوریتم تا رسیدن به این دما در هر مرحله تکرار کار می‌کند.
- تعداد تکرار الگوریتم (nIt) در هر دما
- نرخ کاهش دما (β) که در رابطه ۴۱ مدنظر قرار می‌گیرد.

$$T_h = \beta \times T_{h-1} ; h > 2, 0 < \beta < 1 \quad (41)$$

که T_h و β به ترتیب بیانگر دما در تکرار h و نرخ کاهش دما می‌باشد.

ب) ساختار کروموزوم و فرآیند رمزگشایی

ج) ارزیابی جواب‌ها، یکپارچه‌سازی توابع هدف و بررسی محدودیت‌ها: در این مرحله با معرفی معیارهای مختلف به ارزیابی جواب‌های موجود در جمعیت می‌پردازیم. ارزیابی برازندگی^۳، بررسی مقدار تابع هدف با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسأله است. در الگوریتم‌های فراابتکاری بعد از تولید کردن جواب (یا جواب‌ها) به هریک از آن‌ها یک مقدار برازندگی اختصاص می‌یابد.

د) ساختار همسایگی: کارایی الگوریتم SA به مقدار زیادی به تابع همسایگی استفاده شده در آن بستگی دارد. در مقالات بسیاری نشان داده شده است که همگرایی یکنواخت به سمت مجموعه‌ای از بهینه‌های کلی به ژرفای مینیمم محلی بستگی دارد (لارهوون و آرتس، ۱۹۸۷). همسایگی مورد استفاده در این روش مشابه عملگر جهش جابجایی عمل می‌کند.

ه) شرط توقف: معیار توقف در این الگوریتم رسیدن به یک حداکثر تکرار^۳ از پیش تعیین شده (تعداد نسل‌ها) می‌باشد.

۴-۴. استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل ریاضی پیشنهادی

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استاندارد برای حل مسأله بهره گرفته شده است و تغییری در پارامترها و فرآیند حل استاندارد این روش‌ها داده نشده است.

الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله دارای ۴ پارامتر ورودی شامل تعداد اعضای جمعیت ($nPop$)، تعداد تکرارها (nIt)، درصد فرزندان تولید شده از طریق تقاطع (Pc) و درصد فرزندان تولید شده از طریق جهش (Pm) می‌باشد.

جهت انجام اپراتور تقاطع بر روی والدین، از عملگر تقاطع دو نقطه‌ای^۴ و به‌منظور پیاده‌سازی اپراتور جهش بر روی یک کروموزوم، از عملگرهای $Swap$ ، $Reversion$ و $Insertion$ با احتمال‌های یکسان، استفاده شده است. البته در نظر گرفتن این نکته مهم است که بعد از به‌کارگیری این اپراتورها، شدنی بودن یک راه‌حل حتماً می‌بایستی بررسی و اقدامات اصلاحی متعاقباً باید اتخاذ گردد تا موجه بودن جواب

حفظ بهترین جواب تولیدی یک نسل، در طی نسل‌های آینده استفاده می‌شود. در هر نسلی نیز عملکرد کروموزوم‌ها با استفاده از تابع برازندگی هر کروموزوم، ارزیابی می‌شود. تولید نسل در الگوریتم ژنتیک تا جایی که یکی از معیارهای انتهایی فرا رسد، ادامه پیدا می‌کند.

۳-۴. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)

این الگوریتم اولین بار توسط کرکپاتریک، گلت و وسچی (۱۹۸۳) ارائه شد. شبیه‌سازی تبرید یک الگوریتم جستجوی محلی است که می‌تواند از بهینه محلی عبور کند. کاربرد آسان و راحت، ویژگی‌های همگرایی و استفاده از حرکت تپه‌نوردی^۱ برای عبور از بهینه محلی دلایلی هستند که باعث شده است از این روش ابتکاری در سال‌های اخیر بیشتر استفاده شود و برای بیشتر مسائل گسسته و تعداد کمتری از مسائل پیوسته به‌کار برده می‌شود. بیشتر کارها و کاربردهایی که در SA صورت گرفته است در زمینه بهینه‌سازی مسائل گسسته بوده است، در صورتی که SA می‌تواند در دامنه مسائل پیوسته نیز به‌کار برده شود و از آن برای بهینه‌سازی کلی روی مناطقی که دارای چندین بهینه کلی و محلی (به‌دلیل ماهیت غیرخطی بودن توابع هدف) هستند، استفاده کرد. بهینه‌سازی توابع پیوسته شامل پیدا کردن مکان کاندید به‌وسیله حرکت از حل کنونی و انتخاب اندازه گام حرکت در جهت این مسیر و ارزیابی تابع در مکان جدید (کاندید) می‌باشد. اگر مقدار تابع این مکان جدید بهبودی را در مقایسه با مقدار تابع مکان کنونی حاصل کند در این صورت این مکان جدید به‌عنوان مکان کنونی انتخاب می‌شود. این نقل مکان به مینیمم محلی در طول جستجوی مینیمم کلی ادامه می‌یابد تا اینکه مینیمم کلی پیدا شود یا اینکه معیارهای توقف برقرار شوند. پس در الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی جواب جدید تنها در صورت بهبود تابع هدف پذیرفته می‌شود. این درحالی است که در الگوریتم SA نه‌تنها جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود، پذیرفته می‌گردد بلکه جواب‌های نامناسب نیز به‌طور احتمالی پذیرفته خواهند شد که در رابطه (۴-۱) این تابع احتمال مشاهده می‌شود.

$$\text{Probability}_{MOSA} = e^{-\frac{\Delta}{T}} ; \Delta = \frac{f(\omega_n) - f(\omega)}{f(\omega_n)} \times 100 \quad (40)$$

که در آن Δ میزان تغییرات در تابع هدف و T نشان‌دهنده درجه حرارت است. اگر این احتمال از یک عدد تصادفی بین صفر و یک بیشتر باشد جواب نامناسب نیز پذیرفته می‌شود. روش کلی کار الگوریتم بدین صورت است که در هر تکرار، الگوریتم SA حالت همسایه‌ای مانند s' ایجاد می‌کند و براساس یک احتمال، مسأله از حالت s به حالت s' می‌رود و یا اینکه در همان حالت s باقی می‌ماند. این روند تا زمانی تکرار می‌شود که به یک جواب نسبتاً بهینه برسیم یا اینکه ماکزیمم تعداد تکرارها را انجام داده باشیم. نحوه تولید حالت همسایه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از طرفی مقدار پارامتر T به‌نحوی باید انتخاب شود که اکثر حالت‌های همسایگی را مورد پذیرش قرار داده و در نهایت با کاهش تدریجی پارامتر T جواب‌های مناسبی توسط الگوریتم گزارش

چندین نقطه به‌طور همزمان به جستجوی جواب‌ها در فضای مسأله می‌پردازند، مجموعه‌ای از داده‌ها که حاوی مقادیر مربوط به متغیرهای تصادفی بوده و معمولاً به‌صورت یک رشته تک‌ردیفه یا چندردیفه نمایش داده می‌شود، به‌عنوان یک راه‌حل شدنی (کروموزوم) در مسأله مربوطه در نظر گرفته می‌شود. باتوجه به مدل ارائه شده، یک حل شدنی باید نشان‌دهنده چند مورد زیر باشد:

- (۱) هر پالت باید تنها به یک طبقه تخصیص یابد و هر محل ذخیره‌سازی نیز حداکثر می‌بایستی به یک طبقه اختصاص یابد. بنابراین یک راه‌حل شدنی باید تخصیص پالت به طبقه و تخصیص محل ذخیره‌سازی به طبقه را به‌طور همزمان نشان دهد.
- (۲) در هر دوره باید نحوه تخصیص پالت‌ها و محل‌های ذخیره‌سازی به طبقات تعیین گردد. محدودیت فضای ذخیره‌سازی بایستی رعایت گردد به‌طوری‌که مجموع طول پالت‌هایی که به هر محل ذخیره‌سازی (محفظه) تخصیص می‌یابد نباید از طول آن محفظه بزرگتر باشد.

با توجه به مطالب فوق، نحوه نمایش جواب در این تحقیق به‌صورت یک ماتریس 1×2 بعدی است و هر کدام از درایه‌های ماتریس، یک ماتریس دوبعدی دیگر است. شکل (۱) نحوه نمایش این ماتریس را نشان می‌دهد.

$X_{p \times c}$	$Y_{l \times c}$
------------------	------------------

شکل (۱). نحوه نمایش جواب

- (۱) ماتریس $X_{p \times c}$ شامل ذراتی است که بر تخصیص پالت‌ها به طبقات دلالت دارد.
- (۲) ماتریس $Y_{l \times c}$ شامل ذراتی است که بر تخصیص محل‌های ذخیره‌سازی به طبقات دلالت دارد.

۵-۲. تحلیل نتایج حل مدل استوار به‌کمک الگوریتم‌های تک‌هدفه ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

از آنجا که پس‌از استوار نمودن مدل ریاضی به روش P-Robustness، مدل سه‌هدفه به مدل یک‌هدفه تبدیل خواهد شد، لذا برای حل مدل استوار به الگوریتم‌های فراابتکاری تک‌هدفه نیاز داریم که از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید در حالت یک‌هدفه استفاده گردیده است. در بخش بعدی به تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم می‌پردازیم.

۵-۲-۱. تنظیم پارامتر الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل هریک از چهار سناریوی مدل استوار

برای هر دو روش حل فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید تعداد فاکتورهایی که نیاز به تنظیم شدن دارند برابر ۴ بوده که هر فاکتور در ۳ سطح بررسی خواهد شد. دامنه جستجو و سطح پارامترها در جدول (۲) آورده شده است.

باتوجه به اینکه یکی از پارامترهای ورودی مدل Robust نتیجه حل مدل برای هریک از سناریوهای ایجاد شده است، ابتدا مقدار بهینه هریک از سناریوها به‌کمک الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید و با به‌کارگیری طرح اول تاگوچی به‌دست آمده که این مقدار برای

را تضمین کند. این اقدام اصلاحی از طریق افزودن یک جریمه به تابع هدف مینیمم‌سازی جهت تضمین عدم نقض محدودیت‌ها و ناموجه شدن راه‌حل مربوطه زمانی که آن راه‌حل به‌دست آمده از همسایگی در محدودیت‌ها صدق نمی‌کند، برقرار می‌گردد. معیار انتهایی (توقف) الگوریتم ژنتیک در این مقاله عبارت است از تولید تعداد مشخصی از نسل‌های الگوریتم ژنتیک که در آن‌ها بهترین جواب همگرا می‌شود.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده در این مقاله دارای ۴ پارامتر ورودی شامل دمای اولیه (T_0)، دمای نهایی (T_f)، تعداد تکرار الگوریتم (nIt) و نرخ کاهش دما (β) می‌باشد. معیار انتهایی (توقف) الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در این مقاله عبارت است از رسیدن به یک حداکثر تکرار از پیش تعیین شده.

جهت افزایش کارایی این الگوریتم‌ها، پارامترهای ورودی آن‌ها با استفاده از روش تاگوچی در بهترین مقدار خود تنظیم می‌شوند.

۵. نتایج محاسباتی

به‌منظور تجزیه و تحلیل روش‌های حل ارائه شده، این روش‌ها برای هریک از مسائل تولید شده، اجرا شده و نتایج آن‌ها مبنی بر انتخاب کاراترین روش جهت حل مدل مربوطه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به‌کمک روش تاگوچی آزمایشاتی به‌منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های مورد نظر طراحی شده و برآوردی از این پارامترها آورده شده است.

کلیه الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی با نرم‌افزار *MATLAB* نسخه 7.10.0.499, R2010a، برنامه‌نویسی شده که بر روی یک کامپیوتر شخصی (PC) با چهار گیگابایت *RAM* و پردازنده ۱۸۶۰ اجرا شده است.

۵-۱. طراحی مسائل نمونه

در این تحقیق، جهت حل مدل پیشنهادی، ۱۵ مسأله نمونه با ابعاد مختلف، تهیه گردیده است. برای این کار نخست مقادیر پارامترهای مدل را از اطلاعات و داده‌های به‌دست آمده از انبار قطعات پرسر شرکت ایران خودرو گردآوری کردیم.

اندازه هر مسأله به عوامل زیر بستگی دارد:

- تعداد پالت‌ها (p)
- تعداد محل‌های ذخیره‌سازی (l)
- تعداد طبقات (c)

مقادیر سایر پارامترهای ورودی مسأله شامل $d_l, d_p, f_p, f, h, E, CL_l, PL_p, e_l, d_p$ از روی داده‌های شرکت ایران خودرو و نظرات خبرگان این شرکت برای ۱۵ مسأله نمونه مختلف که از ترکیب قطعات مربوط به خودروهای تولید شده توسط این شرکت به‌دست آمده، استخراج می‌گردد.

۵-۲. نحوه نمایش جواب‌ها

ازجمله نکات مهم در حل مدل‌های ریاضی توسط روش‌های فراابتکاری، نحوه نمایش جواب‌های شدنی مسأله است که باید حاوی مقادیر مربوط به متغیرهای تصادفی مدل باشد. در رویه‌های مبتنی بر جمعیت که از

جدول (۲). دامنه جستجو و سطح پارامترهای الگوریتم‌های GA و

SA				
Solving methodologies	Parameter	Low	Medium	High
GA	P_c	۰/۶	۰/۸	۰/۹۹
	P_m	۰/۰۱	۰/۲	۰/۴
	$nIt_{NSGA-II}$	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰
	$nPop_{NSGA-II}$	۲۵	۱۰۰	۲۰۰
SA	T_f	۱۰	۵	۱
	T_0	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
	nIt_{SA}	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰
	α	۰/۹	۰/۸	۰/۷

جدول (۳). پارامترهای تنظیم شده جهت اجرا و پیاده‌سازی GA و

SA (برای مدل نهایی استوار)					
	Parameters	P_c	P_m	nIt_{GA}	$nPop_{GA}$
GA	Level	۱	۲	۳	۲
	Amount	۰/۶	۰/۲	۵۰۰	۱۰۰
	Parameters	T_f	T_0	nIt_{SA}	α
SA	Level	۲	۳	۲	۲
	Amount	۵	۳۰۰	۳۰۰	۰/۸

سناریوهای اول تا چهارم الگوریتم ژنتیک به ترتیب مقادیر ۱/۰۲۸، ۱/۰۹۶۱، ۱/۰۲ و ۱/۰۵۵ و برای سناریوهای اول تا چهارم الگوریتم شبیه‌سازی تیرید به ترتیب مقادیر ۱/۰۱۶، ۱/۰۲۲۹، ۱/۰۲۷۱ و ۱/۰۵۵۹ می‌باشد. برای مابقی ۸ طرح تاگوچی نیز همین مقادیر بهینه برای ۴ سناریو حاصل شده است. سپس مقادیر بهینه اشاره شده به عنوان ورودی به مدل Robust داده شده و مدل Robust برای هر یک از ۹ طرح تاگوچی حل گردیده است. پارامترهای تنظیم شده برای روش SA و GA طبق جدول (۳) ارائه شده‌اند.

۲-۲-۵. نتایج حل مدل استوار توسط الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تیرید

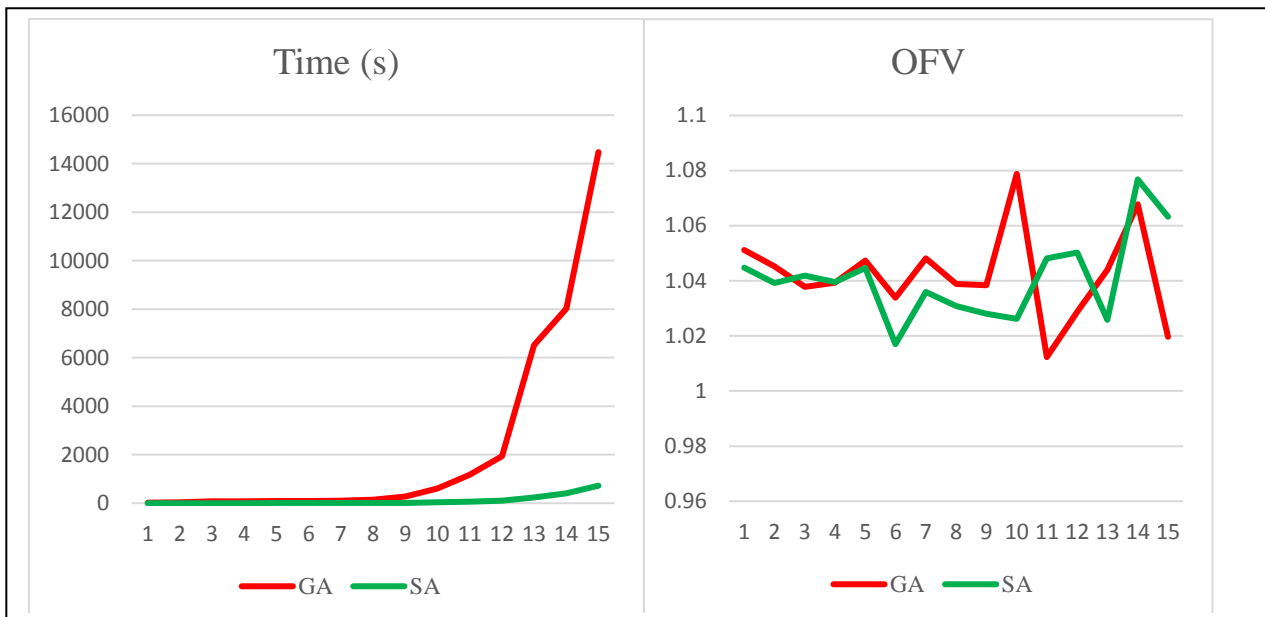
در ادامه نتایج به دست آمده از حل مدل استوار با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تیرید ارائه می‌شود. لازم به ذکر است باتوجه به اینکه مقیاس توابع هدف متفاوت می‌باشد، به منظور ایجاد قابلیت جمع‌پذیری آن‌ها در یک تابع هدف مشترک، هر یک توابع هدف بر مقدار بهینه انفرادی خود تقسیم شدند تا بی‌مقیاس (نرمالایز) گردند. در جداول (۴) و (۵) مقادیر تابع هدف حاصل از حل هر یک از سناریوهای مدل استوار و مدل نهایی استوار شده آمده است. شکل (۲) مقایسه گرافیکی این مقادیر را برای سناریوهای اول، دوم، سوم و چهارم هر یک از ۱۵ مسأله نمونه نشان می‌دهد.

جدول (۴). مقدار تابع هدف حاصل از حل مدل استوار با الگوریتم GA

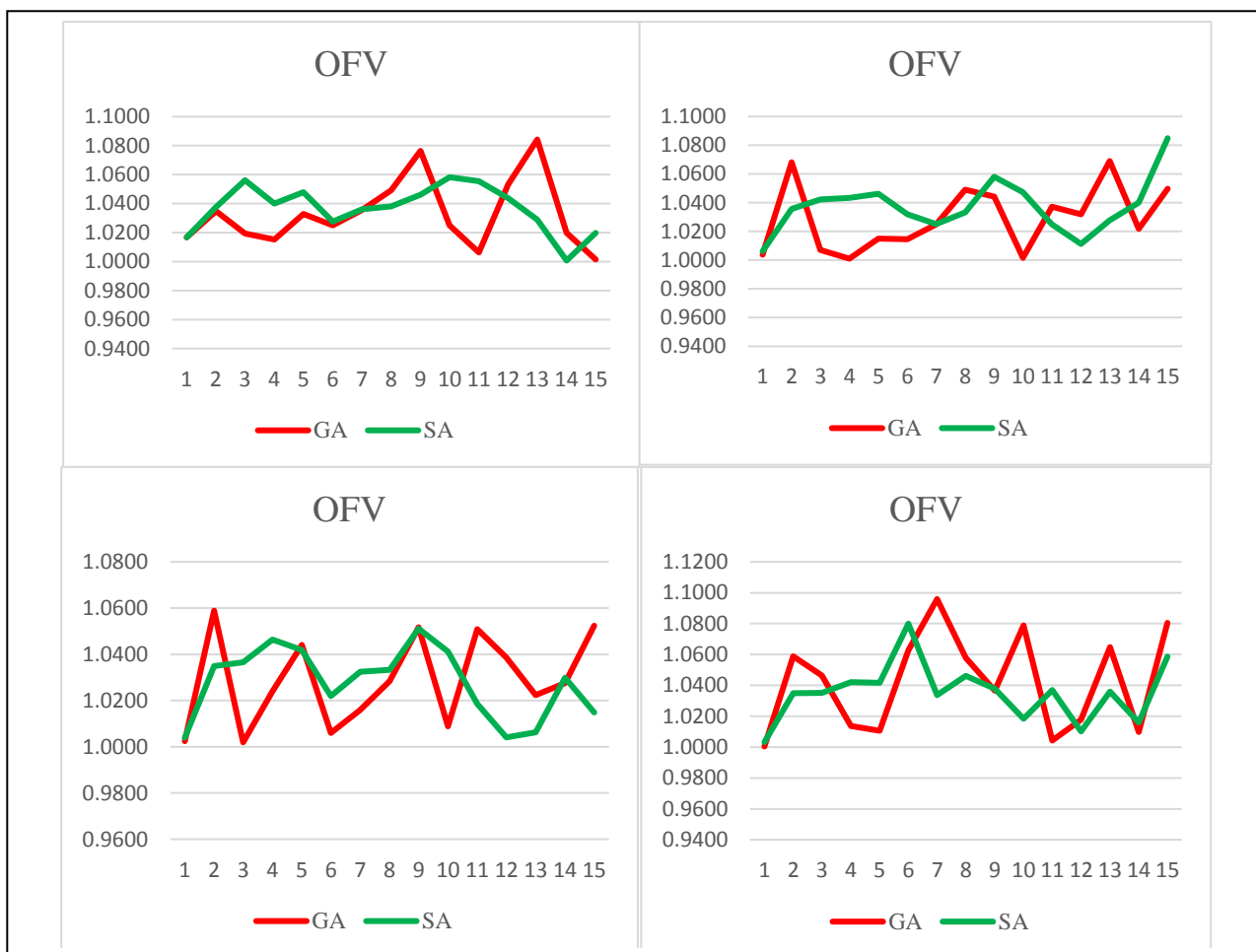
Run	P	L	C	Senario 1	Senario 2	Senario 3	Senario 4	Robust
۱	۷	۴	۲	۱/۰۱۶۸	۱/۰۰۳۸	۱/۰۰۲۴	۱/۰۰۰۴	۱/۰۵۱۲
۲	۱۴	۷	۲	۱/۰۳۴۹	۱/۰۳۸۲	۱/۰۳۸۹	۱/۰۳۸۹	۱/۰۴۵۲
۳	۱۸	۱۰	۳	۱/۰۱۹۴	۱/۰۰۷	۱/۰۰۱۹	۱/۰۳۶۴	۱/۰۳۷۸
۴	۲۰	۱۰	۳	۱/۰۱۵۳	۱/۰۰۱	۱/۰۲۴	۱/۰۱۳۷	۱/۰۳۹۳
۵	۲۱	۱۱	۳	۱/۰۳۲۸	۱/۰۱۵	۱/۰۴۴۱	۱/۰۱۰۷	۱/۰۴۷۳
۶	۲۲	۱۲	۳	۱/۰۲۵	۱/۰۱۴۶	۱/۰۰۶	۱/۰۳۳	۱/۰۳۳۹
۷	۲۳	۱۳	۳	۱/۰۳۶	۱/۰۲۵	۱/۰۱۶	۱/۰۴۶	۱/۰۴۸۲
۸	۲۷	۱۶	۳	۱/۰۲۹	۱/۰۲۹	۱/۰۲۸	۱/۰۳۸	۱/۰۳۸۸
۹	۴۱	۲۱	۳	۱/۰۳۶	۱/۰۳۴	۱/۰۳۲	۱/۰۳۷	۱/۰۳۸۴
۱۰	۵۴	۲۸	۴	۱/۰۲۵	۱/۰۰۲	۱/۰۰۹	۱/۰۶۹	۱/۰۷۸۸
۱۱	۷۰	۳۶	۵	۱/۰۰۶	۱/۰۰۷	۱/۰۱۱	۱/۰۰۴	۱/۰۱۲۳
۱۲	۸۵	۴۴	۶	۱/۰۲۳	۱/۰۲۲	۱/۰۱۹	۱/۰۱۸	۱/۰۲۸۷
۱۳	۱۱۲	۵۹	۸	۱/۰۳۴	۱/۰۳۹	۱/۰۲۲	۱/۰۳۵	۱/۰۴۴
۱۴	۱۳۹	۷۲	۱۰	۱/۰۲	۱/۰۲۲	۱/۰۲۸	۱/۰۱	۱/۰۶۷۸
۱۵	۱۷۰	۸۸	۱۲	۱/۰۰۱	۱/۰۱	۱/۰۱۲	۱/۰۱۱	۱/۰۱۹۷

جدول (۵). مقدار تابع هدف حاصل از حل مدل استوار با الگوریتم SA

Run	P	L	C	Senario 1	Senario 2	Senario 3	Senario 4	Robust
۱	۷	۴	۲	۱/۰۱۶۷	۱/۰۰۶۲	۱/۰۰۳۹	۱/۰۰۳۲	۱/۰۴۴۸
۲	۱۴	۷	۲	۱/۰۳۷۷	۱/۰۳۵۷	۱/۰۳۴۹	۱/۰۳۴۹	۱/۰۳۹۲
۳	۱۸	۱۰	۳	۱/۰۳۶۱	۱/۰۳۲۳	۱/۰۳۶۶	۱/۰۳۵۲	۱/۰۴۱۹
۴	۲۰	۱۰	۳	۱/۰۳۰۱	۱/۰۳۳۴	۱/۰۳۶۴	۱/۰۳۲۱	۱/۰۳۹۵
۵	۲۱	۱۱	۳	۱/۰۳۷۸	۱/۰۳۶۱	۱/۰۴۱۹	۱/۰۴۱۶	۱/۰۴۴۷
۶	۲۲	۱۲	۳	۱/۰۰۷۷	۱/۰۱۲	۱/۰۱۲	۱/۰۱	۱/۰۱۷
۷	۲۳	۱۳	۳	۱/۰۲۶	۱/۰۲۵۱	۱/۰۲۲۵	۱/۰۲۳۷	۱/۰۳۶
۸	۲۷	۱۶	۳	۱/۰۲۸	۱/۰۲۳۳	۱/۰۲۳۳	۱/۰۲۶۲	۱/۰۳۰۸
۹	۴۱	۲۱	۳	۱/۰۲۶۲	۱/۰۱۸	۱/۰۲۱۱	۱/۰۲۷۷	۱/۰۲۸
۱۰	۵۴	۲۸	۴	۱/۰۱۸۲	۱/۰۱۷۲	۱/۰۲۱۲	۱/۰۱۸۴	۱/۰۲۶۲
۱۱	۷۰	۳۶	۵	۱/۰۴۵۵	۱/۰۲۴۸	۱/۰۱۸۵	۱/۰۳۶۹	۱/۰۴۸۱
۱۲	۸۵	۴۴	۶	۱/۰۴۳۸	۱/۰۱۱۲	۱/۰۰۴۱	۱/۰۱۰۳	۱/۰۵۰۲
۱۳	۱۱۲	۵۹	۸	۱/۰۱۹	۱/۰۱۷۷	۱/۰۰۶۳	۱/۰۱۵۹	۱/۰۲۵۸
۱۴	۱۳۹	۷۲	۱۰	۱/۰۰۰۷	۱/۰۴	۱/۰۲۹۸	۱/۰۱۶	۱/۰۷۶۸
۱۵	۱۷۰	۸۸	۱۲	۱/۰۱۹۸	۱/۰۵۴۹	۱/۰۱۴۸	۱/۰۵۸۷	۱/۰۶۳۲



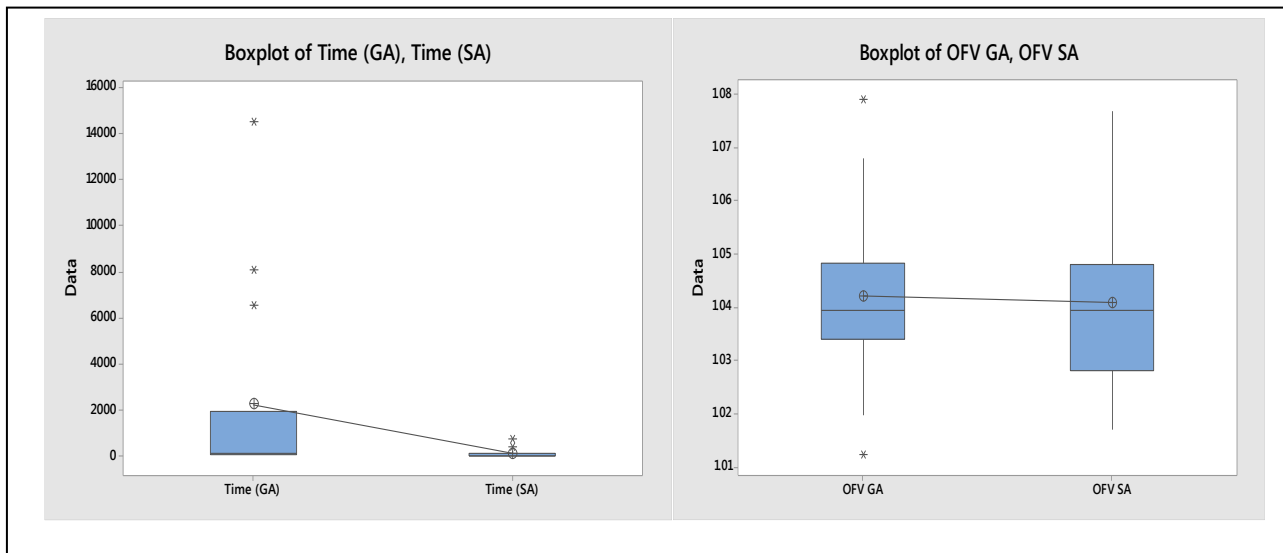
شکل (۲). نمودار گرافیکی مقایسه GA و SA براساس مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مدل استوار



شکل (۳). نمودار گرافیکی مقایسه GA و SA براساس مقدار تابع هدف به‌دست آمده از حل مدل برای سناریوهای تقاضا

هدف کمتری دارد. شکل (۲) مقایسه مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مدل استوار نهایی برای ۱۵ مسأله نمونه (پس از حل هریک از چهار سناریوی ایجاد شده و قرار دادن مقادیر آن در مدل استوار نهایی) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف الگوریتم GA برای سناریوی اول در ۹ مسأله، سناریوی دوم در ۱۰ مسأله، سناریوی سوم در ۸ مسأله و در سناریوی چهارم در ۷ مسأله از ۱۵ مسأله نمونه نسبت به الگوریتم SA برتری داشته و مقدار تابع



شکل (۴). نمودار گرافیکی مقایسه فواصل اطمینان GA و SA براساس مقادیر تابع هدف (چپ) و زمان محاسباتی حل (راست)

جدول (۷). خروجی آزمون T مقایسه SA و GA براساس زمان حل

Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
T-Value	DF	P-Value
۱/۹۷	۱۴	۰/۰۶۹

در این بخش به مقایسه مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی سپری شده برای حل مدل توسط دو الگوریتم اشاره شده پرداخته شد. جهت بررسی عملکرد دو الگوریتم یادشده، از آزمون تی در نرم‌افزار مینی‌تب به منظور مقایسه میانگین مقادیر تابع هدف به دست آمده از ۱۵ بار حل مسائل عددی در ابعاد مختلف بهره گرفته شد. با وجود اینکه هیچ‌یک از دو الگوریتم برتری قابل ملاحظه‌ای در دستیابی به جواب‌هایی با مقدار تابع هدف کمتر نداشته‌اند و تفاوت معناداری میان میانگین مقدار تابع هدف به دست آمده از دو الگوریتم مشاهده نشده، اما از لحاظ زمان محاسباتی و سرعت دستیابی به جواب بهینه، الگوریتم ژنتیک کاملاً توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مغلوب گردیده است که کارایی بالاتر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را نشان می‌دهد.

۳-۲-۵. تحلیل حساسیت p' (مقدار مجاز پشیمانی برای انحراف از جواب بهینه)

در این بخش بر روی پارامتر p' مدل استوار تحلیل حساسیت انجام می‌دهیم تا ببینیم تغییر درصد پشیمانی مجاز برای انحراف از مقدار بهینه تابع هدف استوار چه تأثیری بر مقدار تابع هدف به دست آمده حاصل از حل مدل استوار با استفاده از الگوریتم‌های GA و SA دارد. نتایج تحلیل حساسیت به‌ازای ۴ مقدار مختلف پارامتر p' برای مسأله شماره (۷) در جدول (۸) و (۹) آمده است.

جدول (۸). تحلیل حساسیت مقدار p' روی مقادیر تابع هدف مسأله

شماره ۷ الگوریتم GA				
مقدار p'	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
مقدار تابع هدف	۱/۰۲۴	۱/۰۱۱۳	۱/۰۰۳۹	۱/۰۰۲۴

۲-۲-۵. مقایسه جواب‌های حاصل از حل مدل استوار با

الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

پس از حل مدل استوار به کمک الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید به مقایسه جواب‌های به دست آمده از هر یک از این الگوریتم‌ها می‌پردازیم. برای این منظور از آزمون تی برای بررسی فرض برابری میانگین‌های مقادیر تابع هدف و زمان محاسباتی حل الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌کنیم. ابتدا فرض برابری میانگین مقادیر تابع هدف حاصل از حل هر الگوریتم را بررسی می‌کنیم.

مطابق جدول (۶) مقدار P -Value معادل ۰/۸۲۸ بوده که با توجه به مقدار سطح معنادار بودن در نظر گرفته شده ($\alpha=0/05$) فرض برابری میانگین‌ها رد نشده و تفاوت معناداری بین الگوریتم‌ها وجود ندارد، لذا طبق شکل (۴) هر دو الگوریتم می‌توانند انتخاب شوند و تفاوت معناداری میان میانگین مقادیر بهینه تابع هدف حاصل از حل مدل استوار توسط هر یک از این الگوریتم‌ها وجود ندارد.

جدول (۶). خروجی آزمون T مقایسه SA و GA براساس مقدار تابع هدف

Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
T-Value	DF	P-Value
۰/۲۲	۲۷	۰/۸۲۸

سپس فرض برابری میانگین زمان‌های محاسباتی به طول انجامیده برای حل هر الگوریتم را بررسی می‌کنیم.

براساس جدول (۷) مقدار P -Value معادل ۰/۰۶۹ بوده که با توجه به مقدار سطح معنادار بودن در نظر گرفته شده ($\alpha=0/05$) فرض برابری میانگین‌ها رد نشده و تفاوت معناداری بین الگوریتم‌ها وجود ندارد، لذا طبق شکل (۴) هر دو الگوریتم می‌توانند انتخاب شوند و تفاوت معناداری میان میانگین زمان محاسباتی حل مدل استوار توسط هر یک از این الگوریتم‌ها وجود ندارد.

شده است.

در ادامه جهت مواجهه با عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل ریاضی پیشنهادی به استوار نمودن مدل با روش p -Robustness پرداختیم. در این راستا مهمترین پارامتر مدل ریاضی که از داده‌های شرکت ایران خودرو دارای عدم قطعیت در مقدار بود، تقاضای پالت‌ها شناسایی شد که به دلیل تغییر تقاضای مشتریان در طی زمان دائماً در حال نوسان می‌باشد. پس از تبدیل مدل ریاضی سه‌هدفه به یک مدل ریاضی یک‌هدفه استوار به خطی نمودن عبارت‌های غیرخطی و حل مدل به کمک نرم‌افزار لینگو به منظور اعتبارسنجی آن پرداختیم.

همان‌گونه که در هنگام حل مدل ریاضی مشاهده شده، با افزایش ابعاد مثال‌های عددی و در واقع نزدیک شدن اندازه نمونه مسأله به مقیاس واقعی انبار این خودرو، نرم‌افزار لینگو و در واقع روش‌های حل دقیق توانایی حل مدل در یک زمان محاسباتی منطقی را نداشت و زمان حل مسأله با افزایش ابعاد به شدت و به‌طور نمایم افزایش یافت. البته باتوجه به پیچیدگی مدل ریاضی و ابعاد گسترده حجم داده‌های ایران خودرو عدم توانایی روش‌های حل دقیق در دستیابی به جواب بهینه مدل ریاضی پیشنهادی قابل انتظار بود. از این رو به منظور حل مدل ریاضی برای مسأله‌های با ابعاد بزرگتر و کاربردی کردن مدل از طریق انطباق آن با شرایط و داده‌هایی که شرکت ایران خودرو در حال حاضر با آن مواجه است از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل بهره گرفتیم.

جدول (۹). تحلیل حساسیت مقدار p' روی مقادیر تابع هدف مسأله

شماره (۷) الگوریتم SA				
مقدار p'	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
مقدار تابع هدف	۱/۰۳۵۳	۱/۰۲۳۷	۱/۰۲۲۳	۱/۰۱۹۵

جدول (۱۰). زمان محاسباتی حل مدل استوار با الگوریتم GA

Run	P	L	C	Senario 1	Senario 2	Senario 3	Senario 4	Robust
۱	۷	۴	۲	۹/۶۱۵۵۰۲	۹/۶۷۱۰۸۴	۱۰/۱۱۷۸۱	۹/۷۲۴۲۹۹	۲۲/۰۸۲۹۵۲
۲	۱۴	۷	۲	۱۱/۲۰۹۸۶۷	۱۱/۳۲۴۱۸۴	۱۱/۴۴۱۹۸۸	۱۲/۰۴۲۵۴۸	۳۶/۱۳۳۵۲۴
۳	۱۸	۱۰	۳	۱۳/۴۷۲۴۵	۱۳/۵۲۵۷۰۸	۱۳/۷۲۳۲۲۵	۱۴/۴۷۰۸۹۶	۷۸/۸۸۱۴۲۴
۴	۲۰	۱۰	۳	۱۴/۰۱۶۰۱۵	۱۴/۱۰۳۱۵۷	۱۴/۵۶۹۷۷۳	۱۴/۴۱۶۰۳۴	۷۷/۶۱۹۴۳۴
۵	۲۱	۱۱	۳	۱۴/۷۱۰۹۹۸	۱۴/۹۴۵۷۵۲	۱۶/۶۷۷۳۴۴	۱۷/۴۹۱۴۵۲	۸۷/۵۹۷۹۶۴
۶	۲۲	۱۲	۳	۱۵/۶۰۱۹۶۳	۱۵/۴۴۶۸۱۲	۱۵/۴۳۶۴۵۴	۱۵/۸۸	۹۱/۴۴۳۶۳۶
۷	۲۳	۱۳	۳	۱۶/۰۸۶۹۸۹	۱۶/۶۰۹۹۵۶	۱۶/۶۰۰۲۷۸	۱۷/۰۴۳۴۸۸	۹۹/۳۷۵۱۸۷
۸	۲۷	۱۶	۳	۱۹/۱۱۶۱۰۱	۱۹/۷۳۹۳۴۵	۱۹/۳۴۱۶۲	۱۹/۶۲۲۶۳	۱۴۱/۳۳۲۵۶
۹	۴۱	۲۱	۳	۲۸/۴۶۵۸۷۱	۲۷/۹۴۶۰۳۱	۲۹/۰۷۵۸۴۶	۲۹/۶۴۷۳۵	۲۷۰/۳۸۸۲۸
۱۰	۵۴	۲۸	۴	۴۵/۸۹۵۱۸۵	۴۷/۵۴۵۳۶۵	۴۷/۷۸۷۲۱	۴۹/۳۶۲۶۵۷	۶۰۳/۱۳۵۶۹
۱۱	۷۰	۳۶	۵	۷۷/۷۳۱۴۸۱	۷۹/۸۷۹۸۸۷	۸۰/۱۴۷۰۶۶	۸۵/۵۴۷۹۷	۱۱۶۷/۲۳۵۱
۱۲	۸۵	۴۴	۶	۱۲۴/۷۴۲۶۹	۱۳۵/۳۹۶۵۴	۱۵۵/۱۱۰۰۲۷	۱۶۳/۳۴۷۹۵۳	۱۹۴۴/۷۶۷۸
۱۳	۱۱۲	۵۹	۸	۲۹۰/۷۳۵۵۱	۲۷۵/۰۷۹۸۳۹	۲۷۰/۶۲۹۳۱۸	۳۰۸/۸۳۸۴۰۷	۶۵۱۴/۲۳۰۷
۱۴	۱۳۹	۷۲	۱۰	۴۹۵/۹۹۸۴۴	۵۲۳/۳۰۱۲۹۵	۵۰۱/۸۷۴۹۵	۵۰۹/۰۶۰۱۸۵	۸۰۳۰/۸۷۵۹
۱۵	۱۷۰	۸۸	۱۲	۸۳۵/۲۸۷۹۸	۹۱۴/۷۹۹۹۷۹	۹۴۷/۰۶۴۱۲۱	۹۷۰/۹۹۸۴۶۷	۱۴۴۷۹/۰۳۶

همان‌طور که انتظار هم می‌رفت هرچه تصمیم‌گیرنده درصد پشیمانی مجاز برای انحراف بیشتری از جواب بهینه را بپذیرد، به مقادیر تابع هدف بهتری می‌توان دست یافت (از دست دادن موجه بودن برای سناریوهای مختلف تقاضا جهت دستیابی به بهینگی بهتر به جای ازدست دادن بهینگی جهت دستیابی به موجه بودن بیشتر به‌ازای سناریوهای مختلف تقاضا). اما از طرفی پذیرش انحراف بیشتر از مقدار بهینه به معنای ازدست دادن استواری (نیرومندی) مدل است و رویکردی آسان‌گیرانه‌تر محسوب می‌شود. لذا در این تحقیق از نظر خبرگان انبار ایران خودرو به‌عنوان گیرنده بهره گرفته شده تا میان این دو هدف متناقض سبک سنگین کرده و تصمیم بگیرند که تا چه حدی از استواری مدل مدنظرشان می‌باشد و اولویت و اهمیت بیشتری نسبت به مجموع کل هزینه‌ها (تابع هدف مدل) دارد. از سویی دیگر همان‌گونه که در محدودیت شماره (۲۸) در مدل استوار می‌توان مشاهده نمود، پارامتر p' در سمت راست محدودیت قرار دارد که با افزایش مقدار آن مقدار سمت راست محدودیت افزایش یافته و باتوجه به نوع محدودیت که از نوع کوچکتر مساوی می‌باشد، فضای موجه جواب افزایش می‌یابد که احتمالاً موجب بهبود مقدار تابع به دلیل گسترش فضای حل موجه مسأله می‌باشد. مقادیر زمان محاسباتی حاصل از اجرای هر یک از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای هر یک از سناریوها و نیز برای مدل نهایی استوار شده در جداول (۱۰) و (۱۱) آورده شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تخصیص بهینه مکان‌های انبارش یک انبار با سیستم ذخیره و بازیابی اتوماتیک بهره گرفته شد. از یک معیار COI جدید برای تخصیص اقلام به طبقات استفاده شد که عوامل تأثیرگذار بر آن براساس ویژگی‌های مورد مطالعه این تحقیق، که انبار قطعات پرسی شرکت ایران خودرو می‌باشد، تعیین

جدول (۱۱). زمان محاسباتی حل مدل استوار با الگوریتم SA

Run	P	L	C	Senario 1	Senario 2	Senario 3	Senario 4	Robust
۱	۷	۴	۲	۱/۵۳۶۲۲۷	۱/۵۶۴۷۹۷	۱/۵۶۶۳۶۷	۱/۵۸۱۳۹۶	۱/۸۹۶۱۰۳
۲	۱۴	۷	۲	۱/۶۸۹۱	۱/۷۴۵۳۹۵	۱/۸۷۷۹۴۷	۱/۸۵۱۷۱	۲/۷۶۹۲۶۷
۳	۱۸	۱۰	۳	۱/۹۲۳۹۵	۱/۹۲۵۲۲۳	۱/۹۳۰۴۴۸	۲/۰۳۸۶۳۲	۴/۴۰۶۳۲
۴	۲۰	۱۰	۳	۲/۰۱۴۱۸۴	۱/۹۸۹۲۸۵	۲/۳۱۱۳۷۶	۲/۰۳۳۷۱۶	۵/۰۴۲۱۱۶
۵	۲۱	۱۱	۳	۲/۰۵۲۱۳۲	۲/۰۶۱۳۹۳	۲/۰۹۲۲۶۶	۲/۲۹۰۲۶۹	۵/۵۱۱۴۹۹
۶	۲۲	۱۲	۳	۲/۰۴۵۲۶	۲/۱۹۷۵۲۸	۱/۶۵۷۲۱۴	۱/۷۶۰۴۸۴	۶/۲۳۶۱۴۱
۷	۲۳	۱۳	۳	۱/۸۹۴۴۷۹	۱/۸۵۲۳۶۳	۱/۹۱۹۲۰۹	۱/۸۲۳۴۵۹	۶/۶۴۱۸۲
۸	۲۷	۱۶	۳	۱/۸۹۹۷۰۴	۱/۹۵۰۴۲۵	۲/۲۰۴۸۴۱	۲/۱۶۶۱۴۷	۸/۷۴۴۸۵۲
۹	۴۱	۲۱	۳	۲/۷۹۱۷۲۸	۲/۸۰۰۰۵۱	۲/۸۴۷۵۴۳	۲/۹۸۷۷۳	۱۶/۱۷۸۸۳
۱۰	۵۴	۲۸	۴	۴/۴۶۳۸۲۶	۴/۴۲۴۸۶۵	۴/۵۲۴۴۳۱	۴/۷۴۵۲۸	۳۲/۷۵۹۹۱
۱۱	۷۰	۳۶	۵	۷/۳۱۹۸۲	۷/۳۴۹۱۶۲	۷/۴۷۰۳۷	۷/۸۰۵۶	۶۳/۹۶۳۰۱
۱۲	۸۵	۴۴	۶	۱۱/۵۶۸۰۲	۱۱/۶۱۱۱	۱۱/۹۵۲۸۵	۱۲/۲۲۹۴۵	۱۰۷/۱۴۰۹
۱۳	۱۱۲	۵۹	۸	۲۵/۴۷۳۳۵	۲۳/۹۲۹۱۹	۲۴/۶۳۷۳	۲۵/۳۱۹۹	۲۴۰/۵۵۱
۱۴	۱۳۹	۷۲	۱۰	۴۲/۱۲۱۴۷	۴۲/۰۲۲۲۲	۴۳/۱۸۲۰۹	۴۵/۰۷۲۹۷	۴۰۶/۰۳۴۷
۱۵	۱۷۰	۸۸	۱۲	۷۱/۸۸۵۱۷	۷۱/۹۸۳۹۴	۷۴/۸۵۶۴۶	۷۶/۹۰۱۸۳	۷۲۲/۴۸۲۳

- در نظر گرفتن اهداف و محدودیت‌های دیگری در مدل ریاضی پیشنهادی
- حل مدل ریاضی پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری
- در نظر گرفتن معیارهای دیگر در محاسبه شاخص COI
- در نظر گرفتن سایر شاخص‌ها برای مقایسه سیاست فعلی ذخیره و بازیابی انبار ایران خودرو با سیاست پیشنهادی محقق جهت تخصیص پالت‌ها به محل‌های ذخیره‌سازی
- مقایسه سایر سیاست‌های تخصیص اقلام به محل‌های ذخیره‌سازی انبار نظیر انبار تصادفی یا انبار اشتراکی با سیاست فعلی ذخیره‌سازی انبار ایران خودرو
- در نظر گرفتن سایر روش‌های مقابله با عدم قطعیت نظیر روش‌های احتمالی و تئوری فازی در رابطه با عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی مدل ریاضی به‌ویژه پارامتر تقاضای پالت‌ها
- به‌کارگیری مدل ریاضی پیشنهادی تحقیق در انبارهای اتوماتیک سایر شرکت‌ها و مقایسه آن با وضعیت فعلی این انبارها برای بررسی امکان بهبود در شاخص‌های عملکردی مدیریت انبار (بررسی میزان تأثیر سیاست پیشنهادی بر مسافت، زمان، هزینه، انرژی و...)

مراجع

- [۱] آراسته، م. (۱۳۸۹). طراحی و ساخت سیستم بازیابی خودکار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند.
- [۲] پایدار، محمد مهدی، سعیدی مهرآباد، محمد. (۱۳۹۳). طراحی یک مدل یکپارچه استوار دوهدفه زنجیره‌تأمین و آرایش سلولی مجازی پویا. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۲(۳)، ۳۳-۴۵.
- [۳] رفیعی، مجید، محمدی طلب، عطیه. (۱۳۹۶). ارائه یک مدل ریاضی با

از آنجایی که مدل نهایی تحقیق، مدل استوار می‌باشد که به‌دلیل انتخاب روش p-Robustness برای استوار نمودن آن به یک مدل یک‌هدفه تبدیل شده است، در گام بعدی به سراغ حل این مدل با الگوریتم‌های تک‌هدفه ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید رفتیم. پس از تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم به حل ۱۵ نمونه مسأله پرداختیم و سپس برای مقایسه کیفیت جواب‌های حاصله، از آزمون تی نرم‌افزار مینی‌تب استفاده نمودیم تا به بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین‌های جواب‌های این دو الگوریتم بپردازیم.

با وجود اینکه هیچ‌یک از دو الگوریتم برتری قابل ملاحظه‌ای در دستیابی به جواب‌هایی با مقدار تابع هدف کمتر نداشته‌اند و تفاوت معناداری میان میانگین مقدار تابع هدف به‌دست آمده از دو الگوریتم مشاهده نشده، از لحاظ زمان محاسباتی و سرعت دستیابی به جواب بهینه، الگوریتم ژنتیک کاملاً توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مغلوب گردیده است.

یکی از اهداف اصلی این تحقیق کاهش زمان‌های ذخیره و بازیابی انبار اتوماتیک ایران خودرو و در نتیجه آن کاهش انرژی مصرف شده توسط دستگاه‌های ذخیره و بازیابی بوده است. به‌منظور بررسی میزان صرفه‌جویی در مسافت طی شده (و در نتیجه آن صرفه‌جویی زمان و انرژی) در مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق نسبت به سیاست فعلی ذخیره و بازیابی انبار ایران خودرو، کل مسافت طی‌شده در یک مقیاس زمانی کوچک (یک روز) در انبار این شرکت با کل مسافت طی‌شده به‌دست آمده از مدل ریاضی پیشنهادی محقق مقایسه گردیده و مشاهده شده است که مدل ریاضی ارائه شده توانسته صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در مسافت طی شده توسط دستگاه‌های ذخیره و بازیابی ایجاد کند.

در پایان پیشنهادهای برای انجام تحقیقات آتی به شرح زیر بیان می‌گردد:

- [21] Gutiérrez G. J. & Kouvelis, P. (1992). A robust approach to international sourcing. *Annals of Operations Research* 59, 165-193.
- [22] Gutierrez, G. J., Kouvelis, P., and Kurawala A. A. (1996). A robustness approach to uncapacitated network design problems. *European Journal of Operations Research*, 94:362-376
- [23] Hameed, H. M., Al Amry, K. A., & Rashid, A. T. (2019). The Automatic Storage and Retrieval System: An Overview. *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.
- [24] Hariga, M.A., Jackson, P.L., (1996). The warehouse scheduling problem: Formulation and algorithms. *IIE Transactions* 28 (2), 115-127.
- [25] Heskett, J.L. (1963). Cube-Per-Order Index – A key to warehouse stock location. *Transportation and Distribution Management* 3, 27-31.
- [26] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- [27] Hur, S., Lee, Y. H., Lim, S. Y., and Lee, M. H. (2004). A performance estimation model for AS/RS by M/G/1 queuing system. *Computers & Industrial Engineering*, 46, 233-241.
- [28] Ignatius M. S., Chen E., Elpek N. M., Fuller A. Z., Tenente I. M., Clagg R., Liu S., Blackburn J. S., Linardic C. M., Rosenberg A. E., et al. (2012). In vivo imaging of tumor-propagating cells, regional tumor heterogeneity, and dynamic cell movements in embryonal rhabdomyosarcoma. *Cancer Cell* 21, 680-693.
- [29] Kallina, C., Lynn, J., (1976). Application of the cube-per-order index rule for stock location in a distribution warehouse. *Interfaces* 7(1), 37-46.
- [30] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr. C. D., and Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by Simulated Annealing". *Science*. 220 (4598): 671-680.
- [31] Kouvelis, P., Kurawarwala, A. A., and Gutiérrez G. J. (1992). Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*. Volume 63, Issue 2, Pages 287-303.
- [32] Kouvelis, P., Yu, G. (1997). "Robust Discrete Optimization and its Applications", Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- [33] Kulturel, S., Ozdemirel, N. E., Sepil, C., & Bozkurt, Z., (1999) Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems, *IIE Transactions*, 31:8, 739-749, DOI: 10.1080/07408179908969873.
- [34] Kucera, E., Niznanska, M., Kozak, S. (2015). Advanced Techniques for Modelling of AS/RS Systems in the Automotive Industry Using High-level Petri Nets. 16th International Carpathian Control Conference (ICCC).
- [35] Laarhoven, P.J., & Aarts, E.H. (1987). *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Springer Netherlands
- [36] Liu, H. and Xu, Y. (2015). *The Online Storage Strategy for Automated Storage and Retrieval System with Single Open in One Dimension*. Springer International Publishing Switzerland. FAW 2015, LNCS 9130, pp. 190-197. DOI: 10.1007/978-3-319-19647-3_18.
- [37] Man, X., Zheng, F., Chu, F., Liu, M., & Xu, Y. (2019). Bi-objective optimization for a two-depot automated storage/retrieval system. *Annals of Operations Research*, 1-20.
- [38] Mareeswaran, G. B., Kumar, K., Karthik, A. and Ram G. P. (2019). Plc-Based Automated Storage and Retrieval System with A Robotic End Effector. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Volume 67, Issue 7, p. 11-14.
- رویکرد بهینه‌سازی استوار برای طراحی سیستم تولید سلولی پویا با در نظرگیری ماشین‌آلات چندکاره. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۴(۹)، ۲۸۱-۲۹۵. doi: ۲۰۱۷.۱۸۲۷/ier.۱۰.۲۲۰۸۴
- [۴] فیروزی، ن؛ (۱۳۸۳). شبیه‌سازی یک سیستم ذخیره‌سازی و بازیابی اتوماتیک (AS/RS). سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [5] Aktan, H. E. and Tosun, Ö., (2013). An integrated fuzzy AHP – fuzzy TOPSIS approach for AS/RS selection. *Int. J. Productivity and Quality Management*, Vol. 11, No. 2.
- [6] Back, T., and Schwefel, H.P. (1996). "Evolutionary Computation: An Overview", *Proc. 3rd IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 20-29.
- [7] Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (1998). "Robust Convex Optimization", *Mathematical Operations Research*, 23, pp. 769-805.
- [8] Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2000). "Robust Solutions of Linear Programming Problems Contaminated with Uncertain Data", *Mathematical Programming*. 88, pp. 411-424.
- [9] Borisoglebskaya, L N., Provotorova, E N., Segeev, S M. And Khudyakov, A P. (2019). Automated storage and retrieval system for Industry 4.0 concept. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 537 032036
- [10] Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberim, M., and Pilati F. (2017). Time and energy optimal unit-load assignment for automatic S/R warehouses, *International Journal of Production Economics*, Volume 190, August 2017, Pages 133-145.
- [11] Boysen, N., & Stephan, K. (2016). A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 1-14.
- [12] Bozer, Y. A., & Cho, M. (2005) Throughput performance of automated storage/retrieval systems under stochastic demand, *IIE Transactions*, 37:4, 367-378, DOI: 10.1080/07408170590917002.
- [13] Chen, L., Langevin, A., & Riopel, D., (2010) The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage, *International Journal of Production Research*, 48:4, 991-
- [14] Davis, L. (1991). "Handbook of Genetic Algorithms", New York, Van Nostrand Reinhold.
- [15] Ekren, B. Y., Sari, Z., and Lerher, T. (2015). Warehouse Design under Class-Based Storage Policy of Shuttle-Based Storage and Retrieval System. *IFAC-PapersOnLine*, 48-3, 1152-1154.
- [16] El-Ghaoui, L., Oustry, F., Lebret, H. (1998). "Robust solutions to Uncertain Semidefinite Programs", *SIAM J. Optim.* 9, pp. 33-52.
- [17] Fang, H., Yueting, C., and Shouhua, Z. (2008). Application of Fuzzy Control in the Stacker Crane of an AS/RS. *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*.
- [18] Feng, A., Di, Z., and Ding, W. (2015). Research on Picking Route Optimization for One Stacker in Multiple Aisles Automated Storage and Retrieval System. *Proceedings of China Modern Logistics Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering* 286, DOI 10.1007/978-3-662-44674-4_25.
- [19] Goetschalckx, M., Ratliff, H.D., (1990). Shared storage policies based on the duration stay of unit loads. *Management Science* 34 (9), 1120-1132.
- [20] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass.

- storage/retrieval system considering storage policies, transport equipment and demand skew, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32:11, 1053-1066, DOI: 10.1080/0951192X.2019.1686169.
- [47] Snyder, L. V., & Daskin, M. S. (2005). Stochastic p-Robust Location Problems. *IIE Transactions* 38(11), 971-985.
- [48] Soyster, A.L., (1973). "Convex Programming with Set-Inclusive Constraints and Applications to Inexact Linear Programming", *Operation Researches* 21, pp.1154-1157.
- [49] Thonemann, U. W. and Brandeau, M. L. (1998). Note. Optimal Storage Assignment Policies for Automated Storage and Retrieval Systems with Stochastic Demands. *Management Science* 44(1):142-148. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.44.1.142>.
- [50] Tian, B. and Wu, Y. (2019). Warehouse Design Model for Shuttle-Based Storage and Retrieve System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1187 032001.
- [51] Tosun, Ö., and Aktan, H. E. (2016). A multi-criteria decision-making approach to evaluate automated storage and retrieval systems. *Int. J. Applied Decision Sciences*, Vol. 9, No. 2.
- [52] Xia, Z., Yaohua, W., Delong, X., and Yunxia C. (2018). Dynamic Modelling of an Automated Vehicle Storage and Retrieval System and a Simulation Analysis of its Efficiency. *ENGINEERING MODELLING* 31, 4, 29-42.
- [39] Metahri, D. & Hachemi K. (2018). Retrieval-travel-time model for free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system. *Journal of Industrial Engineering International*, Volume 14, Issue 4, pp 807-820.
- [40] Michalewicz, Z. (1992). "Genetic Algorithms + Data structures = Evolutionary Programs", New York, Springer-Verlag, p. 387.
- [41] Mostofi, A., & Erfanian, H. (2018). MULTI-SHUTTLE AUTOMATED STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM. *Review of Industrial Engineering Letters*, Vol. 4, No. 1, pp. 12-20
- [42] Pan, F., & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research* 37, 668 – 683.
- [43] Pan, J. C., Shih, P., Wu, M., Lin, J. (2015). Storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system. *Computers & Industrial Engineering*. 81, 1-13.
- [44] Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194, 343-362., 79, 164-177.
- [45] Roshan, K., Shojaie, A. B. and Javadi, M. (2018). Advanced allocation policy in class-based storage to improve AS/RS efficiency toward green manufacturing. *International Journal of Environmental Science and Technology* 15(9):1-12. DOI:10.1007/s13762-018-1921-6
- [46] Singbal, V. & Adil, G. K. (2019) A flexible approach to designing a single crane, multi-aisle automated

