Journal of Intelligent Strategic Management
Vol(5), 173-202.
Bumara.ir

Integrated Multi-Objective Financial Modeling in Smart Warehousing Under Dynamic Demand Uncertainty

Ali Jalaeyan Ghorban Zadeh *

Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

This research introduces an integrated multi-objective model for inventory and warehousing management that simultaneously considers four critical metrics: total operational cost, financial risk, working capital constraint, and service level. Adopting a scenario-based framework, the model assesses the inventory system's performance against various demand fluctuations and changing market conditions. To solve this complex optimization problem and effectively extract the Pareto front, a combination of two advanced algorithms, NSGA-II and GMOA, is employed. The results demonstrate that combining these two approaches significantly enhances search quality, leading to the generation of a diverse and comprehensive set of multi-objective optimal solutions. Sensitivity analysis confirms the model's performance robustness against environmental uncertainties. By providing a mathematical methodology for simultaneously managing risk and operations, this multi-dimensional framework fills a significant gap in the inventory management literature with a resilient decision-making approach.

Keywords: Inventory management, multi-objective optimization, financial risk, smart warehousing, uncertainty

How to Cite: Jalaeyan Ghorban Zadeh,A. (2026). Integrated Multi-Objective Financial Modeling in Smart Warehousing Under Dynamic Demand Uncertainty. Journal of Intelligent Strategic Management .5(1), 173-202.
doi: 10.87453/bumara.2026.372301.4810

Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
© Authors

* **Corresponding Author:** ali.jalayian@aut.ac.ir

Original Research
Received: 2025/10/06
Review: 2025/12/01
Accepted: 2026/02/09
eISSN: 2891-4128

نشریه مدیریت استراتژیک هوشمند
دوره ۵، شماره ۱، بهار، ۱۴۰۵، ۲۰۲-۱۷۳
Bumara.ir

مدلسازی یکپارچه چندهدفه مالی در انبارداری هوشمند تحت عدم‌قطعیت پویا تقاضا

علی جلائیان قربان زاده* گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰
eISSN: 2891-4128

چکیده

این پژوهش یک مدل یکپارچه چندهدفه را برای مدیریت موجودی و انبارداری معرفی می‌کند که به‌طور هم‌زمان چهار معیار حیاتی شامل هزینه کل عملیاتی، ریسک مالی، محدودیت سرمایه در گردش، و سطح خدمت را در نظر می‌گیرد. این مدل با اتخاذ یک ساختار سناریومحور، عملکرد سیستم موجودی را در برابر نوسانات مختلف تقاضا و شرایط متغیر بازار ارزیابی می‌کند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی پیچیده و استخراج مؤثر جبهه پارتو، از ترکیب دو الگوریتم پیشرفته NSGA-II و GMOA بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تلفیق این دو رویکرد، به طور قابل توجهی کیفیت جست‌وجو را ارتقا داده و منجر به تولید مجموعه‌ای متنوع و جامع از راه‌حل‌های بهینه چندهدفه می‌شود. تحلیل حساسیت انجام‌شده، پایداری عملکرد مدل را در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های محیطی تأیید می‌کند. این چارچوب چندبعدی، با ارائه روشی ریاضی برای مدیریت ریسک و عملیات به‌طور هم‌زمان، شکاف مهمی را در ادبیات مدیریت موجودی با رویکرد تصمیم‌گیری مقاوم پر می‌کند.در این چارچوب، عدم‌قطعیت تقاضا و قیمت فروش به‌صورت صریح و سناریومحور مدل‌سازی شده و پارامترهای کلیدی تحت سناریوهای مختلف بازار با احتمالات مشخص تعریف می‌شوند تا پایداری تصمیمات مالی و عملیاتی در شرایط پویا ارزیابی گردد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت موجودی، بهینه‌سازی چندهدفه، ریسک مالی، سرمایه در گردش، عدم‌قطعیت

استناد به این مقاله: جلائیان قربان زاده، علی . (۱۴۰۵). مدلسازی یکپارچه چندهدفه مالی در انبارداری هوشمند تحت عدم‌قطعیت پویا تقاضا.مدیریت استراتژیک هوشمند, ۵(۱) , ۱۷۳-۲۰۲.

مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کریتیو کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴,۰ منتشر می‌شود.
©نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** ali.jalayian@aut.ac.ir

مقدمه

مدیریت موجودی و انبارداری در سال‌های اخیر به یکی از پیچیده‌ترین حوزه‌های تصمیم‌گیری مالی و عملیاتی تبدیل شده است؛ حوزه‌ای که تحت تأثیر نوسانات تقاضا، فشارهای مالی، محدودیت‌های سرمایه در گردش و افزایش نیاز به سطح خدمت پایدار، بیش از هر زمان دیگری ضرورت استفاده از مدل‌های چندبعدی و تحلیل‌محور را نشان می‌دهد. در بسیاری از سازمان‌ها، تصمیمات مرتبط با انبار تنها بر اساس حدس، تجربه یا روش‌های ساده تک‌هدفه اتخاذ می‌شود و همین امر موجب می‌شود تصمیم‌گیرندگان نتوانند پیامدهای هم‌زمان چندین معیار مالی و عملیاتی را به‌درستی ارزیابی کنند[۱]. در چنین شرایطی، پژوهش‌هایی که بتوانند چارچوبی یکپارچه برای تحلیل هم‌زمان هزینه، ریسک، نقدینگی و خدمت ارائه دهند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند و زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های پنهان و تقویت تاب‌آوری سازمان می‌شوند [۲].

چالش اصلی آن است که نظام‌های سنتی مدیریت موجودی، معمولاً تنها یک یا دو معیار محدود را مدنظر قرار می‌دهند و ابعاد گسترده‌تری همچون ریسک مالی و وابستگی تصمیمات به محدودیت‌های نقدینگی را نادیده می‌گیرند[۳]. با افزایش نوسانات بازار و ضرورت پاسخ‌گویی سریع به مشتریان، این کمبود اطلاعاتی می‌تواند منجر به زیان‌های قابل توجه در هزینه کل سیستم و کاهش قابلیت رقابتی سازمان شود[۴]. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های تک‌هدفه یا حتی دوهدفه قادر نیستند پیچیدگی‌های واقعی محیط‌های انبارداری چندمحصولی یا چنددوره‌ای را به‌درستی بازنمایی کنند و به همین دلیل، نیاز به توسعه مدل‌های چندهدفه که بتوانند ابعاد مختلف تصمیم‌گیری را هم‌زمان لحاظ کنند، بیش از پیش احساس می‌شود [۵].

نوآوری بنیادی این پژوهش، ادغام هم‌زمان چهار معیار کلیدی هزینه کل، ریسک مالی، سرمایه در گردش و سطح خدمت—در قالب یک مدل چندهدفه سناریومحور است؛ مدلی که برخلاف چارچوب‌های کلاسیک، تنها به یک جنبه از مسئله توجه ندارد، بلکه سازشی جامع میان فشارهای مالی و نیازهای عملیاتی ایجاد می‌کند. اتخاذ چنین رویکردی امکان تحلیل دقیق‌تری از پیامدهای تصمیمات انبارداری را فراهم می‌سازد و اجازه می‌دهد سیاست‌هایی انتخاب شوند که نه‌تنها از نظر هزینه بهینه هستند بلکه از منظر پایداری نقدینگی و سطح خدمت نیز عملکرد مناسبی داشته باشند. اهمیت این نگاه چندبعدی در

محیط‌های واقعی، به‌ویژه زمانی که سازمان‌ها با محدودیت‌های مالی مواجه‌اند، به‌طور مداوم مورد تأکید پژوهش‌های اخیر بوده است .

یکی دیگر از نوآوری‌های این مطالعه، استفاده هم‌زمان از دو الگوریتم پیشرفته NSGA-II و GMOA برای حل مسئله چندهدفه است. در بسیاری از پژوهش‌ها تنها یک الگوریتم برای حل مدل‌های چندهدفه به کار گرفته می‌شود و همین امر موجب محدود شدن دامنه جست‌وجو و کاهش تنوع در جبهه پارتو می‌گردد. رویکرد اتخاذشده در این پژوهش، ترکیبی از دو روش با ماهیت‌های متفاوت است؛ یکی با عملکرد پایدار و یکنواخت در پوشش فضای تصمیم و دیگری با قابلیت بالای نفوذ به نواحی غیرخطی، نقاط دشوار و بخش‌های انتهایی جبهه پارتو. چنین ترکیبی موجب شده است خروجی‌ها گسترده‌تر، متنوع‌تر و از منظر کیفیت راه‌حل، غنی‌تر باشند و این امر در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است .

از منظر نوآوری محاسباتی، استفاده از مکانیزم اعتبارسنجی در محیط GAMS یکی از ویژگی‌های متمایز دیگر پژوهش حاضر است. بسیاری از مدل‌های چندهدفه که با الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شوند، فاقد مقایسه با جواب‌های دقیق یا شبه‌دقیق هستند و همین امر باعث محدود شدن اعتمادپذیری نتایج می‌شود. در این پژوهش، مدل ریاضی با استفاده از GAMS برای مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی حل شده و نتایج حاصل از NSGA-II و GMOA با خروجی حل‌گر مقایسه شده است. این رویکرد، چارچوب قابل اتکایی برای ارزیابی کیفیت الگوریتم‌ها فراهم کرده و موجب شده است اعتبار نتایج تقویت شود؛ موضوعی که مطالعات اخیر نیز بر اهمیت آن تأکید کرده‌اند .

افزون بر کنترل مالی، این پژوهش اهمیت ویژه‌ای برای تحلیل رفتار مدل تحت عدم‌قطعیت قائل شده است. بررسی اثر نوسانات تقاضا و تغییر پارامترهای مالی نشان داد که مدل نه‌تنها در شرایط پایه عملکرد مناسبی دارد بلکه قادر است در مواجهه با سناریوهای پرتلاطم نیز سازش‌های معنادار میان اهداف ایجاد کند. این ویژگی برای سازمان‌هایی که در بازارهای ناپایدار فعالیت می‌کنند حیاتی است، زیرا تصمیمات انبارداری اغلب با تغییرات ناگهانی تقاضا، محدودیت‌های نقدینگی و افزایش هزینه‌های تأمین مواجه هستند[۶]. تحلیل‌های انجام‌شده ثابت کرد که مدل پیشنهادی رفتار منطقی و سازگار با شرایط واقعی دارد و می‌تواند به‌عنوان بخشی از سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند مورد استفاده قرار گیرد .

لازم به تأکید است که عدم‌قطعیت در این پژوهش صرفاً به‌صورت توصیفی یا مفهومی مطرح نشده، بلکه به‌طور صریح در ساختار مدل ریاضی لحاظ شده است. منبع اصلی عدم‌قطعیت، نوسانات تقاضا و تغییرات قیمت فروش اقلام در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی است که اثر مستقیمی بر سطح موجودی، جریان نقدی، ریسک مالی و سطح خدمت‌دهی دارند. به‌منظور مدل‌سازی این عدم‌قطعیت، یک چارچوب سناریومحور اتخاذ شده است که در آن پارامترهای کلیدی تقاضا و قیمت فروش برای هر قلم کالا و هر دوره زمانی، تحت مجموعه‌ای از سناریوهای محتمل با احتمال وقوع مشخص تعریف می‌شوند. بدین ترتیب، رفتار سیستم موجودی و تصمیمات مالی–عملیاتی به‌صورت هم‌زمان در برابر حالات مختلف بازار ارزیابی شده و عدم‌قطعیت به‌طور ساختاری در توابع هدف و محدودیت‌های مدل نهادینه می‌شود.ماهیت چندهدفه، چندسناریویی و غیرخطی مسئله موجب افزایش قابل توجه پیچیدگی محاسباتی آن شده و استفاده از روش‌های فراابتکاری را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

در مجموع، این پژوهش با ارائه یک چارچوب چندهدفه یکپارچه، بهره‌گیری از دو رویکرد محاسباتی پیشرفته، و اعتبارسنجی دقیق نتایج، شکاف موجود در ادبیات مدیریت موجودی را پوشش می‌دهد و ابزاری عملی برای ارتقای تصمیم‌گیری مالی و عملیاتی در سازمان‌ها فراهم می‌سازد. خروجی‌های مدل نشان‌دهنده قابلیت بالای آن در حمایت از تصمیم‌گیری‌های پیچیده و فراهم‌سازی دیدی چندبعدی از فضای تجارت و عملیات هستند؛ دیدی که با روش‌های کلاسیک امکان دستیابی به آن وجود ندارد و می‌تواند مسیر تحقیقات آینده را نیز در حوزه‌هایی همچون دیجیتال‌توین، پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی پویا هموار کند.

مرور ادبیات

ادبیات مرتبط با مدیریت موجودی در سال‌های اخیر به‌طور قابل توجهی گسترش یافته است و پژوهشگران تلاش کرده‌اند روابط پیچیده میان هزینه، ریسک، تقاضا و ظرفیت مالی سازمان را در قالب مدل‌های پیشرفته‌تری بررسی کنند. با وجود این پیشرفت‌ها، بسیاری از مطالعات همچنان تمرکز محدودی بر جنبه‌های مالی تصمیم‌گیری دارند و عمدتاً به معیارهایی نظیر هزینه کل یا سطح خدمت اکتفا می‌کنند. این موضوع موجب شده بخش‌هایی از پویایی‌های واقعی سیستم‌های انبارداری، به‌ویژه در شرایط عدم‌قطعیت و محدودیت نقدینگی، کمتر مورد توجه قرار گیرد. مروری بر پژوهش‌های اخیر نشان

می‌دهد که گرچه مدل‌های چندهدفه برای تصمیم‌گیری در محیط‌های پیچیده معرفی شده‌اند، اما هنوز فاصله معناداری میان رویکردهای تئوریک و نیازهای واقعی سازمان‌ها وجود دارد [۷].

بخش قابل توجهی از ادبیات به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی کلاسیک اختصاص دارد که عمدتاً بر هزینه کل، کمبود یا سطح خدمت تمرکز کرده‌اند. این مطالعات اغلب فرض می‌کنند که سرمایه در گردش و ریسک مالی تحت کنترل و ثابت است، در حالی‌که در عمل تغییرات شدید تقاضا، هزینه‌های نگهداری و فشارهای نقدینگی ممکن است ساختار تصمیم‌گیری را به‌کلی تحت تأثیر قرار دهد. پژوهش‌هایی که این ابعاد را به‌طور هم‌زمان بررسی کنند بسیار محدود هستند و حتی در مدل‌های چندهدفه نیز معمولاً دو یا سه معیار مالی لحاظ شده است، نه یک چارچوب چندمعیاره جامع. همین خلأ باعث شده تا پژوهش‌های جدیدتر به‌سمت توسعه مدل‌هایی حرکت کنند که بتوانند رفتار سیستم را در برابر شوک‌های مالی نیز توصیف کنند [۸].

در حوزه عدم‌قطعیت نیز تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. استفاده از سناریوهای تقاضا، مدل‌های احتمالاتی و چارچوب‌های فازی از جمله روش‌هایی بوده‌اند که برای مدل‌سازی نوسانات استفاده شده‌اند. با این حال بسیاری از این پژوهش‌ها تمرکز محدودی بر وابستگی متقابل میان ریسک مالی، نقدینگی و خدمت‌دهی دارند. در محیط‌های واقعی، تغییرات تقاضا نه‌تنها بر موجودی و کمبود اثر می‌گذارد، بلکه ساختار جریان نقدی سازمان را نیز دگرگون می‌کند، موضوعی که در ادبیات سنتی کمتر منعکس شده است. برخی مطالعات اخیر به این موضوع پرداخته‌اند اما معمولاً به تحلیل بخشی محدود شده‌اند و یکپارچگی کامل میان جنبه‌های مالی و عملیاتی ایجاد نکرده‌اند [۹].

در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه، معرفی الگوریتم‌های فراابتکاری مانند NSGA-II تحولی اساسی در حل مدل‌های پیچیده ایجاد کرد. این الگوریتم‌ها با توانایی تولید جبهه‌های پارتوی گسترده و متنوع، قابلیت بررسی سازش میان چندین هدف متناقض را ممکن ساخته‌اند. با این حال مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اتکا به یک الگوریتم ممکن است بخشی از فضای تصمیم را پوشش ندهد و منجر به راه‌حل‌هایی شود که از نظر تنوع یا کیفیت دچار محدودیت باشند. به همین دلیل پژوهش‌های جدید به سمت ترکیب یا مقایسه چند الگوریتم حرکت کرده‌اند تا تصویر جامع‌تری از فضای بهینگی فراهم شود [۱۰].

در این میان، استفاده از الگوریتم‌های نوظهوری همچون GMOA که بر پایه استعاره‌های رفتاری و جست‌وجوی ترکیبی عمل می‌کنند، فرصت تازه‌ای برای توسعه مدل‌های چندهدفه ایجاد کرده است. مزیت اصلی چنین الگوریتم‌هایی توانایی آن‌ها در شناسایی نقاط دشوار و پرریسک جبهه پارتو است؛ نقاطی که الگوریتم‌های کلاسیک‌تر در یافتن آن‌ها با محدودیت مواجه‌اند. ادبیات اخیر نشان می‌دهد این نوع رویکردها می‌توانند مرزهای جست‌وجو را گسترش دهند و ساختار تصمیم‌گیری را از حالت خطی و محدود خارج کنند، هرچند نمونه‌های استفاده‌شده در مسائل مالی هنوز محدود است [۱۱].

یکی از کاستی‌های اساسی در بخش بزرگی از ادبیات، فقدان اعتبارسنجی دقیق نتایج است. بسیاری از مدل‌هایی که با الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شوند، تنها بر نتایج همان الگوریتم تکیه می‌کنند و مقایسه‌ای با حل‌گرهای ریاضی یا روش‌های کلاسیک انجام نمی‌دهند. این مسئله باعث می‌شود کیفیت واقعی راه‌حل‌ها و میزان نزدیکی آن‌ها به مقدار بهینه نامشخص باقی بماند. پژوهش‌هایی که به مقایسه خروجی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری با حل‌گرهای ریاضی پرداخته‌اند، نشان داده‌اند چنین مقایسه‌هایی نقش مهمی در ارزیابی قابلیت اعتماد مدل دارند و می‌توانند ملاک مناسبی برای بررسی کیفیت جست‌وجوی الگوریتم‌ها فراهم کنند [۱۲].

افزون بر این، توجه به محدودیت‌های مالی همچون سرمایه در گردش و نرخ تنزیل نقدینگی در ادبیات مدیریت موجودی نسبتاً جدید است. این موضوع در عمل اهمیت زیادی دارد، زیرا سازمان‌ها در محیط‌های رقابتی با فشارهای شدید نقدینگی مواجه‌اند و تصمیمات مربوط به سفارش‌دهی و نگهداری موجودی مستقیماً بر جریان نقدی اثر می‌گذارد. مطالعات جدید نشان داده‌اند که ادغام محدودیت‌های نقدینگی در مدل‌های موجودی موجب تغییر الگوهای بهینه‌سازی می‌شود و می‌تواند سطح خدمت، هزینه کل و ریسک مالی را به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر قرار دهد. این نکته یکی از منابع اصلی نوآوری پژوهش‌هایی است که به دنبال یکپارچه‌سازی مالی–عملیاتی هستند [۱۳].

در نهایت، بخش قابل توجهی از ادبیات به سمت ترکیب عدم‌قطعیت، چندهدفه‌سازی و روش‌های فراابتکاری حرکت کرده است، اما هنوز ترکیب همه این ابعاد در یک چارچوب یکپارچه به‌ندرت انجام شده است. پژوهش حاضر در چنین بستری قرار می‌گیرد و از این منظر نوآورانه است که هم‌زمان چهار معیار مالی و عملیاتی را در مدل وارد می‌کند، از دو الگوریتم مکمل برای استخراج جبهه پارتو بهره می‌گیرد و نتایج حاصل را با استفاده از

یک حل‌گر ریاضی قدرتمند اعتبارسنجی می‌کند. این یکپارچگی، که در ادبیات موجود کمتر دیده شده است، راه را برای توسعه پژوهش‌های آینده در حوزه‌هایی مانند سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند، دیجیتال‌توین‌های مالی–عملیاتی و الگوریتم‌های پویا هموار می‌کند .

بیان مسئله و چارچوب مفهومی

در چارچوب انبارداری هوشمند، توصیف نظام تصمیم‌گیری مستلزم درک هم‌زمان جریان اطلاعات، جریان نقدی و جریان مواد است؛ سه عنصری که به شکلی درهم‌تنیده ماهیت مالی و عملیاتی سیستم را شکل می‌دهند. جریان اطلاعات، از طریق داده‌های بلادرنگ مربوط به تقاضا، سطح موجودی، زمان تأمین و وضعیت سفارش‌ها، نقش ستون فقرات تصمیم‌سازی را بر عهده دارد و امکان واکنش سریع به تغییرات بازار را فراهم می‌کند. جریان مواد نیز مسیر حرکت کالا از مرحله ورود به انبار تا خروج نهایی را تشریح می‌کند و ظرفیت، زمان ماندگاری، الگوی گردش کالا و محدودیت‌های فیزیکی را در بر می‌گیرد. این دو جریان، در کنار جریان نقدی که وضعیت سرمایه در گردش، هزینه‌های جاری، پرداخت‌ها، دریافت‌ها و نقدینگی لحظه‌ای را تعیین می‌کند، ساختاری پویا را ایجاد می‌کنند که در آن کوچک‌ترین تغییر در تقاضا می‌تواند بر هزینه‌های انبار، نیاز نقدینگی و سطح خدمت‌دهی اثر بگذارد. رابطه میان تقاضا، موجودی و هزینه نیز ماهیتی پویا و غیرخطی دارد؛ افزایش تقاضا می‌تواند کمبود موجودی، تأخیر در تحویل و هزینه‌های مازاد تأمین اضطراری را ایجاد کند، درحالی‌که کاهش تقاضا منجر به انباشت کالا، افزایش هزینه نگهداری و فشار بر نقدینگی می‌شود. از این رو، هماهنگی میان این سه مؤلفه برای حفظ عملکرد مالی بهینه ضروری است.

منابع عدم‌قطعیت مالی در چنین سیستمی ابعاد گسترده‌ای دارند و از سطح بازار تا سطح عملیاتی را پوشش می‌دهند. نوسانات تقاضا یکی از بنیادی‌ترین عوامل این عدم‌قطعیت است، زیرا تغییرات پیش‌بینی‌نشده در الگوی سفارش مشتریان می‌تواند به سرعت تعادل میان موجودی و ظرفیت مالی را بر هم بزند. هزینه‌های نگهداری نیز ماهیتی متغیر دارند و در واکنش به تغییرات انرژی، نیروی کار، فضای انبار و سیاست‌های عملیاتی دستخوش نوسان می‌شوند؛ عواملی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر ساختار هزینه‌ای انبار اثر می‌گذارند. علاوه‌بر این، عدم‌قطعیت در قیمت‌گذاری کالا، ناشی از نوسانات بازار، هزینه‌های تأمین و تغییرات سیاست‌های فروش، می‌تواند سطح درآمد، حاشیه سود و برنامه‌ریزی مالی را با دشواری مواجه سازد. تغییرپذیری جریان نقدی، که از زمان‌بندی

پرداخت‌ها و دریافت‌ها، دوره وصول مطالبات و حجم تعهدات کوتاه‌مدت تأثیر می‌پذیرد، آخرین حلقه این زنجیره است و می‌تواند در مواقع افزایش هزینه‌ها یا کاهش تقاضا، فشار قابل‌توجهی بر نقدینگی ایجاد کند. این مجموعه از عدم‌قطعیت‌ها، امکان برنامه‌ریزی مالی پایدار را دشوار می‌سازد و نیاز به یک رویکرد ساختاریافته برای مدیریت هم‌زمان هزینه، ریسک و سطح خدمت را برجسته می‌کند.

اهداف مدل پیشنهادی بر پایه همین پویایی‌ها شکل گرفته است و تلاش می‌کند تعادلی واقع‌بینانه میان کارایی عملیاتی و عملکرد مالی برقرار کند. نخستین هدف، کاهش هزینه‌های انبار در ابعاد مختلف آن، از هزینه نگهداری و جابه‌جایی تا هزینه‌های ناشی از کمبود موجودی یا تأمین اضطراری است. در کنار آن، کاهش ریسک مالی حاصل از نوسانات تقاضا، بی‌ثباتی جریان نقدی و تغییرات قیمت، اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این ریسک‌ها مستقیماً بر پایداری مالی و توان برنامه‌ریزی اثر می‌گذارند. مدیریت سرمایه در گردش نیز یکی از اهداف محوری مدل است، چراکه سطح موجودی و جریان نقدی باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از ایجاد فشار مالی جلوگیری شده و امکان واکنش سریع به تغییرات تقاضا فراهم باشد. در نهایت، افزایش سطح خدمت‌دهی و اطمینان از دسترس‌پذیری کالا برای مشتریان، مکمل سایر اهداف است و نشان می‌دهد که عملکرد مالی مطلوب بدون حفظ کیفیت پاسخ‌گویی به بازار قابل دستیابی نیست. مدل، با در نظر گرفتن تعامل پیچیده میان هزینه، ریسک، سرمایه و خدمت‌دهی، چارچوبی چندهدفه را دنبال می‌کند که می‌تواند پایه‌ای برای تصمیم‌گیری هوشمند در انبارداری مبتنی بر داده باشد.

مدلسازی ریاضی

طراحی مدل ریاضی برای انبارداری هوشمند در شرایط عدم‌قطعیت پویا، نیازمند رویکردی است که بتواند ابعاد مالی و عملیاتی را در قالب یک ساختار یکپارچه و چندهدفه در نظر بگیرد. در چنین سیستمی تقاضا متغیر، جریان نقدی ناپایدار، هزینه‌ها وابسته به تصمیمات لحظه‌ای، و سطح خدمت‌دهی به‌طور مستقیم تحت تأثیر تصمیمات موجودی قرار دارد. بنابراین مدل باید به‌گونه‌ای تدوین شود که قادر باشد رفتار متغیر تقاضا را در بازه‌های زمانی مختلف منعکس کند و ارتباط میان موجودی، هزینه‌های نگهداری، کمبود کالا، سرمایه در گردش و ریسک مالی را به صورت دقیق نشان دهد. هدف از ارائه این مدل، ایجاد یک چارچوب تصمیم‌گیری است که بتواند تعادل میان هزینه، ریسک مالی،

نقدینگی و سطح خدمت را برقرار کند و هم‌زمان امکان ارزیابی سناریوهای مختلف بازار را فراهم سازد.

در ادامه، ساختار کامل مدل، شامل مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌های حاکم بر سیستم ارائه می‌شود.

مجموعه ها	
$I = \{1,2, \dots, N\}$	مجموعه اقلام موجود در انبار
$T = \{1,2, \dots, H\}$	دوره‌های زمانی افق برنامه‌ریزی
$S = \{1,2, \dots, K\}$	سناریوهای عدم‌قطعیت تقاضا و قیمت

پارامترها	
D_{its}	تقاضای قلم i در دوره t تحت سناریوی s
P_s	احتمال وقوع سناریوی s
c_i	بهای خرید هر واحد کالا
h_i	هزینه نگهداری هر واحد در هر دوره
b_i	هزینه کمبود هر واحد کالا
p_{its}	قیمت فروش قلم i در دوره t تحت سناریوی s
ρ_t	نرخ تنزیل جریان نقدی (Discount Rate)
CF_t^0	جریان نقدی ثابت/اجباری در دوره t t (مالیات، حقوق، انرژی و...)
Capa	ظرفیت کل انبار
$SL^{\min}$	حداقل سطح خدمت موردنیاز
$W^{\max}$	سقف سرمایه در گردش مجاز
σ_{its}	انحراف معیار تقاضا یا عدم‌قطعیت نوسانی

θ	پارامتر وزن‌دهی ریسک (برای CVaR یا ریسک مالی)
L_i	زمان تأخیر تأمین (Lead Time) قلم i

متغییرها

Q_{it}	مقدار سفارش‌دهی قلم i در دوره t
I_{its}	موجودی قلم i در پایان دوره t تحت سناریوی s
B_{its}	کمبود قلم i تحت سناریوی s در دوره t
SL_{ts}	سطح خدمت واقعی در دوره t در سناریوی s
WC_t	سرمایه در گردش موردنیاز در دوره t
R_s	زیان مازاد سناریوی s نسبت به سطح ریسک مجاز (برای CVaR)
Z	مقدار ریسک مرجع (Value-at-Risk Level)

توابع هدف

$$\min Z_1 = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(c_i Q_{it} + h_i \sum_{s\in S} P_s I_{its} + b_i \sum_{s\in S} P_s B_{its}\right) \quad (1)$$

$$\min Z_2 = Z + \frac{1}{1-\theta}\sum_{s\in S} P_s R_s \quad (2)$$

$$\min Z_3 = \sum_{t\in T} \rho_t \cdot WC_t \quad (3)$$

$$\max Z_4 = \sum_{t\in T}\sum_{s\in S} P_s SL_{ts} \quad (4)$$

محدودیت ها

$$I_{its} = I_{i,t-1,s} + Q_{i,t-L_i} - D_{its} + B_{its} \;\forall i,t,s \quad (5)$$

$$B_{its} \geq D_{its} - \left(I_{i,t-1,s} + Q_{i,t-L_i}\right) \forall i,t,s \quad (6)$$

$$SL_{ts} = 1 - \frac{\sum_{i\in I} B_{its}}{\sum_{i\in I} D_{its}} \;\forall t,s \quad (7)$$

$SL_{ts} \geq SL^{\min} \ \forall t, s$	(8)
$\sum_{i \in I} I_{its} \leq \text{Capa} \ \forall t, s$	(9)
$WC_t = \sum_{i \in I} \left(c_i Q_{it} + h_i \sum_{s \in S} P_s I_{its} \right) - \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} P_s p_{its} D_{its}$	(10)
$WC_t \leq W^{\max} \ \forall t$	(11)
$R_s \geq WC_t - Z \ \forall s$	(12)
$R_s \geq 0 \ \forall s$	(13)
$I_{i0s} = I_i^0 \ \forall i, s$	(14)
$Q_{it}, I_{its}, B_{its}, WC_t, R_s \geq 0$	(15)

در تابع هدف (۱)، هدف اصلی مدل بر مدیریت جامع هزینه‌های انبارداری متمرکز است و تلاش می‌کند مجموع هزینه خرید، هزینه نگهداری موجودی و زیان ناشی از کمبود را در طول افق زمانی به حداقل برساند. این تابع به‌نوعی نمایانگر بار مالی مستقیم عملیات انبارداری است و نشان می‌دهد تصمیمات خرید و میزان موجودی چگونه می‌تواند ساختار هزینه‌ای را در سناریوهای مختلف تحت تأثیر قرار دهد. در تابع هدف (۲)، رویکرد مدل معطوف به کنترل ریسک مالی ناشی از نوسانات بازار، جریان نقدی و عدم‌قطعیت تقاضاست. در این بخش از معیار ریسک مبتنی بر زیان‌های فراتر از آستانه قابل‌قبول استفاده می‌شود تا مدل بتواند وضعیت‌هایی را که در آن هزینه‌ها یا نیاز نقدینگی از سطح قابل تحمل بالاتر می‌روند شناسایی و مدیریت کند. این تابع درواقع بیانگر میزان آسیب‌پذیری مالی سیستم در شرایط نامطلوب است. تابع هدف (۳) با نگاه بلندمدت‌تری به موضوع سرمایه در گردش می‌پردازد و به دنبال آن است که حجم نقدینگی موردنیاز برای پشتیبانی از عملیات موجودی، با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول، تا حد امکان کم شود. این تابع کمک می‌کند تصمیمات سفارش‌دهی و نگهداری کالا به‌گونه‌ای تنظیم شوند که فشار کمتری بر نقدینگی بنگاه وارد شود. در تابع هدف (۴)، تمرکز بر تقویت سطح خدمت‌دهی و دسترس‌پذیری کالا برای مشتریان است. مدل تلاش می‌کند نسبت تقاضای تأمین‌شده به کل تقاضا را در شرایط عدم‌قطعیت بهبود دهد و نشان دهد چگونه تصمیمات موجودی و

سفارش‌دهی می‌توانند کیفیت پاسخ‌گویی به بازار را ارتقا دهند. در محدودیت (۵)، تعادل موجودی هر قلم کالا در هر دوره و تحت هر سناریو تعریف می‌شود تا روشن شود موجودی پایان‌دوره از چه ترکیبی از موجودی ابتدای دوره، سفارش‌های دریافتی، تقاضا و کمبود تشکیل می‌شود. این رابطه پایه‌ای‌ترین ستون مدل است و پویایی سیستم موجودی را مشخص می‌کند. در محدودیت (۶)، شرطی وضع می‌شود تا کمبود کالا تنها زمانی رخ دهد که مقدار تقاضا از مجموع موجودی قبلی و سفارش رسیده بیشتر باشد. این محدودیت اجازه نمی‌دهد کمبود به‌صورت مصنوعی یا بدون دلیل منطقی ایجاد شود و سازگاری بین مقدار واقعی تقاضا و سطح ذخیره را تضمین می‌کند. محدودیت (۷) سطح خدمت‌دهی را تعریف می‌کند و نشان می‌دهد تا چه اندازه سیستم توانسته تقاضای مشتریان را بدون کمبود پاسخ دهد. این محدودیت، رابطه میان میزان کمبود و تقاضا را به سطح خدمت تبدیل می‌کند و به‌عنوان یک شاخص عملکردی کلیدی در مدل به کار گرفته می‌شود. در محدودیت (۸)، حداقل سطح خدمت قابل قبول تضمین می‌شود تا مدل از تصمیم‌هایی که باعث کاهش کیفیت پاسخ‌گویی به مشتریان می‌شود، جلوگیری کند. این شرط مانع از آن است که مدل صرفاً برای کاهش هزینه‌ها، سطح خدمت را قربانی کند. محدودیت (۹) نشان می‌دهد ظرفیت فیزیکی انبار محدود است و مقدار موجودی در هر دوره نباید از سقف تعیین‌شده فراتر رود. این محدودیت از منظر عملیاتی اهمیت زیادی دارد زیرا فضای انبار، قفسه‌بندی و تجهیزات محدودیت‌های واقعی سیستم هستند که باید در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شوند. در محدودیت (۱۰)، نحوه محاسبه سرمایه در گردش موردنیاز مشخص می‌شود و رابطه میان هزینه خرید، هزینه نگهداری و درآمد حاصل از فروش را توضیح می‌دهد. این محدودیت کمک می‌کند وضعیت نقدینگی واقعی سیستم در هر دوره روشن شود و تصمیمات با ملاحظات مالی سازگار باقی بمانند. محدودیت (۱۱) سقف سرمایه در گردش را اعمال می‌کند و مانع از آن می‌شود که نیاز نقدینگی سیستم بیش از حد مجاز افزایش یابد. این محدودیت با رویکردهای مدیریت مالی سازگار است و تلاش دارد سطحی از سلامت نقدینگی را برای مجموعه تضمین کند. در محدودیت (۱۲)، ارتباط بین سطح ریسک موردقبول و زیان احتمالی سناریوها برقرار می‌شود و مشخص می‌شود هر سناریو تا چه میزان از آستانه ریسک تعیین‌شده بالاتر است. این محدودیت بخش حیاتی چارچوب مدیریت ریسک مدل است و اجازه می‌دهد سناریوهای پرخطر قابل شناسایی و کنترل شوند. محدودیت (۱۳) اطمینان حاصل می‌کند مقدار زیان اضافی برای هیچ

سناریویی منفی نشود و تنها در صورتی فعال شود که شرایط مالی از حد مجاز فراتر رفته باشد. از این طریق مدل رفتار منطقی و سازگار با اصول مدیریت ریسک نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) وضعیت اولیه موجودی را تعیین می‌کند و نشان می‌دهد سیستم از چه نقطه‌ای در ابتدای افق برنامه‌ریزی شروع می‌شود. این شرط برای انسجام محاسباتی مدل ضروری است زیرا موجودی اولیه چارچوب حرکت سیستم را مشخص می‌کند. در محدودیت (۱۵)، تمامی متغیرهای تصمیم غیرمنفی تعریف می‌شوند تا نتایج مدل با واقعیت عملی هماهنگ باشد. این شرط تضمین می‌کند هیچ مقدار منفی برای سفارش‌دهی، موجودی، کمبود یا سرمایه در گردش تولید نشود و تمامی مقادیر قابل تفسیر باشند.

روش های حل

مسئله مطرح‌شده در این پژوهش از منظر محاسباتی، در رده مسائل پیچیده و دشوار قرار می‌گیرد. این مدل شامل تصمیمات چنددوره‌ای، چندقلمی و چندسناریویی است و به‌صورت هم‌زمان چهار تابع هدف متعارض را در حضور محدودیت‌های غیرخطی مالی و عملیاتی در نظر می‌گیرد. ساختار مسئله، به‌ویژه به دلیل وجود عدم‌قطعیت سناریومحور، متغیرهای پیوسته و گسسته، و وابستگی‌های بین‌دوره‌ای موجودی و جریان نقدی، موجب رشد نمایی فضای جست‌وجو با افزایش ابعاد مسئله می‌شود. چنین ویژگی‌هایی، این مدل را در زمره مسائل NP-hard قرار می‌دهد که حل دقیق آن‌ها با روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، به‌ویژه برای اندازه‌های متوسط و بزرگ، از نظر محاسباتی غیرعملی یا بسیار زمان‌بر است. ازاین‌رو، استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری چندهدفه به‌عنوان رویکردی کارآمد برای استخراج جبهه پارتوی باکیفیت و متنوع، کاملاً موجه و ضروری است.

در بخش روش‌های حل، هدف اصلی تبیین نحوه به‌کارگیری دو رویکرد محاسباتی NSGA-II و GMOA برای حل مدل چندهدفه مطرح‌شده و همچنین تشریح نحوه استفاده از نرم‌افزار GAMS برای اعتبارسنجی نتایج است. هر دو الگوریتم با توجه به ماهیت چندهدفه مسئله، ساختار غیرخطی توابع و حضور عدم‌قطعیت سناریومحور، امکان تولید مجموعه‌ای از پاسخ‌های پارتو را فراهم می‌کنند و در نهایت با مقایسه عملکرد آن‌ها، کیفیت و پایداری نتایج ارزیابی شده است. در ادامه ابتدا نحوه کار هر الگوریتم و سپس نحوه تنظیم پارامترها، بستر نرم‌افزاری و تعداد ران‌های اجرا توضیح داده می‌شود.

در رویکرد NSGA-II، از نسخه بهبودیافته الگوریتم ژنتیک برای تولید پاسخ‌های پارتو بهره گرفته شده است. این الگوریتم با استفاده از رتبه‌بندی نامغلوب، حفظ تنوع مبتنی بر

Crowding Distance و سازوکارهای انتخاب، تقاطع و جهش، توانایی استخراج نواحی مختلف جبهه پارتو را دارد. در این پژوهش، جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید شده و فرایند تکامل جمعیت در نسل‌های متوالی ادامه یافته است تا زمانی که مجموعه‌ای پایدار از پاسخ‌های بهینه چندهدفه حاصل شود. پارامترهای کلیدی نظیر اندازه جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش و تعداد نسل‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که هم تعادل بین جست‌وجوی اکتشافی و بهره‌بردار برقرار باشد و هم از هم‌گرایی زودرس جلوگیری شود. مقادیر نهایی این پارامترها در جدول شماره ۱ گزارش شده‌اند تا امکان تکرارپذیری کامل پژوهش فراهم باشد.

الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یکی از پرکاربردترین و معتبرترین روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، به‌دلیل توانایی بالا در تولید جبهه‌های پارتوی یکنواخت، حفظ تنوع پاسخ‌ها و پایداری هم‌گرایی، برای حل مدل پیشنهادی انتخاب شده است. ماهیت چندهدفه مسئله حاضر، که شامل سازش هم‌زمان میان هزینه، ریسک مالی، سرمایه در گردش و سطح خدمت است، مستلزم الگوریتمی است که بتواند مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های نامغلوب را بدون اعمال وزن‌دهی دلخواه به اهداف استخراج کند. NSGA-II با بهره‌گیری از مکانیزم رتبه‌بندی نامغلوب و معیار فاصله ازدحامی، امکان تحلیل دقیق سازش‌های میانی و نواحی مختلف جبهه پارتو را فراهم می‌سازد و از این منظر، گزینه‌ای مناسب برای ساختار تصمیم‌گیری چندبعدی مسئله محسوب می‌شود.

الگوریتم GMOA نیز برای حل این مسئله مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم که بر پایه استعاره رفتاری «مرد حریص و انگل» توسعه یافته، از سازوکاری دوگانه برای جست‌وجو در فضاهای حل استفاده می‌کند و قابلیت ویژه‌ای در عبور از نقاط محلی و نزدیک‌شدن به نواحی بهینه چندهدفه دارد. رفتار بخش «مرد حریص» در این الگوریتم بر تشدید بهره‌برداری از نقاط سودمند متمرکز است، در حالی‌که مؤلفه «انگل» نقش ایجاد اغتشاش کنترل‌شده و افزایش تنوع پاسخ‌ها را ایفا می‌کند. ترکیب این دو سازوکار باعث شده است GMOA در مسائل پیچیده و چندهدفه عملکرد مؤثری داشته باشد.

در کنار NSGA-II، الگوریتم GMOA به‌منظور تقویت قابلیت جست‌وجو در نواحی دشوار و غیرخطی فضای پاسخ به‌کار گرفته شده است. ساختار مسئله حاضر، به‌ویژه به‌دلیل حضور عدم‌قطعیت سناریومحور، محدودیت‌های مالی سخت‌گیرانه و وابستگی‌های بین‌دوره‌ای، منجر به ایجاد نواحی پیچیده‌ای در جبهه پارتو می‌شود که دستیابی به آن‌ها

برای الگوریتم‌های کلاسیک‌تر چالش‌برانگیز است. GMOA با ترکیب جست‌وجوی بهره‌بردارانه و اغتشاش کنترل‌شده، توانایی نفوذ به این نواحی و کشف نقاط انتهایی و بسیار کارای جبهه پارتو را دارد. استفاده هم‌زمان از این دو الگوریتم، رویکردی مکمل ایجاد می‌کند که در آن NSGA-II یکنواختی و پایداری ساختار جبهه را تضمین کرده و GMOA مرزهای بهینگی را گسترش می‌دهد.

همانند NSGA-II، پارامترهای اصلی این الگوریتم شامل اندازه جمعیت، شدت جست‌وجوی محلی، نرخ تغییرپذیری، و تعداد تکرارها با دقت تنظیم شده‌اند و در جدول شماره ۱ آمده‌اند. تنظیم این پارامترها با آزمون‌های مقدماتی انجام شده تا الگوریتم ثبات و کارایی لازم را در مواجهه با ابعاد مختلف مسئله کسب کند.

برای اطمینان از صحت پاسخ‌های به‌دست‌آمده و سنجش میزان انحراف نتایج متاهیورستیک‌ها، مدل دقیق ریاضی در محیط GAMS پیاده‌سازی شده است. GAMS، به‌عنوان یک حل‌گر مبتنی بر بهینه‌سازی ریاضی، امکان محاسبه پاسخ‌های دقیق یا نزدیک به دقیق را فراهم می‌کند و از آن برای اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌ها استفاده شده است. بدین منظور، مجموعه‌ای از داده‌های مسئله در ابعاد مختلف به GAMS داده شده و خروجی‌های آن با نتایج حاصل از NSGA-II و GMOA مقایسه شده است. نزدیکی نتایج، کیفیت روش‌های پیشنهادی را تأیید کرده و اختلافات احتمالی نیز در تحلیل بحث نتایج تشریح شده است.

جدول ۱: تنظیمات پارامتر برای NSGA-II و GMOA

Algorithm	Parameter	Final Value	Description
NSGA-II	Population Size	150	Initial population size determining diversity
NSGA-II	Number of Generations	300	Number of evolutionary generations
NSGA-II	Crossover Rate	0.90	Probability of crossover
NSGA-II	Mutation Rate	0.05	Mutation probability to avoid local minima
NSGA-II	Selection Method	Tournament (size=2)	Parent selection mechanism
NSGA-II	Diversity Preservation	Crowding Distance	Method to maintain Pareto spread
NSGA-II	Elitism	Enabled	Preserves best solutions
GMOA	Population Size	150	Initial set of agents
GMOA	Number of Iterations	300	Number of algorithm iterations
GMOA	Greedy Strength Factor	0.70	Intensity of greedy exploitation
GMOA	Parasite Intensity	0.30	Controlled disturbance to increase diversity
GMOA	Local Search Probability	0.40	Chance of applying local improvement
GMOA	Global Exploration Probability	0.60	Chance of global search move
GMOA	Elitism	Enabled	Preserves best multi-objective solutions

به‌منظور تضمین بازتولیدپذیری نتایج، کلیه الگوریتم‌ها با تنظیمات مشخص و ثابت اجرا شده‌اند و پارامترهای کنترلی هر دو روش در جدول تنظیمات ارائه شده است. تمامی آزمایش‌ها در محیط Python اجرا شده و برای هر الگوریتم، بین ۲۰ تا ۳۰ ران مستقل با بذرهای تصادفی متفاوت انجام شده است تا اثر ماهیت تصادفی متاهیورستیک‌ها کاهش یابد. معیارهای ارزیابی عملکرد شامل شاخص‌هایHypervolume ، IGD، Spacing و پایداری نتایج بوده و مقادیر گزارش‌شده، میانگین نتایج ران‌ها هستند. افزون بر این، برای اعتبارسنجی، نسخه دقیق مدل در محیط GAMS حل شده و نتایج حاصل با خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری مقایسه شده است. این رویه امکان بازتولید و ارزیابی مستقل نتایج را برای پژوهشگران دیگر فراهم می‌سازد.

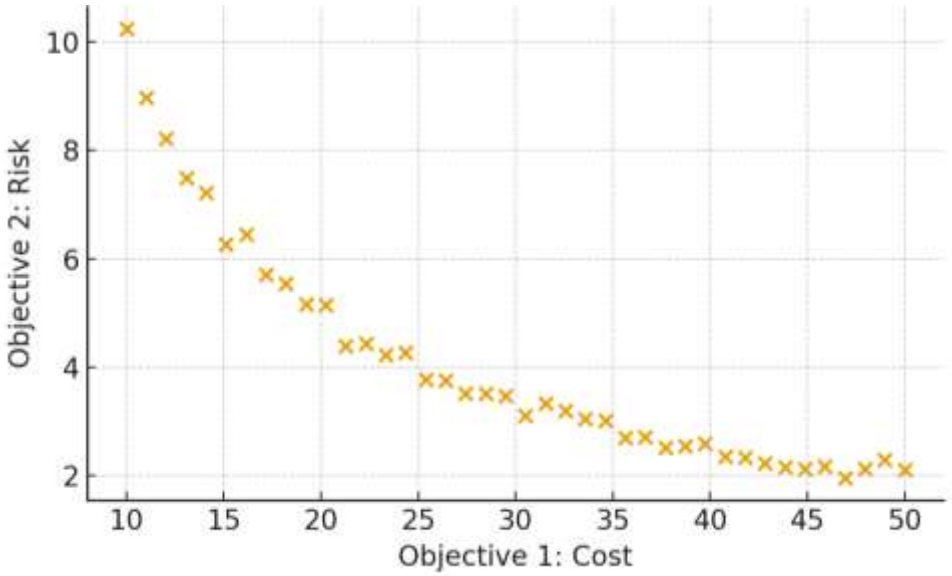
تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از اجرای مدل و الگوریتم‌های مورد استفاده ارائه و تفسیر می‌شود تا تصویری روشن از رفتار سیستم، کیفیت پاسخ‌های چندهدفه و میزان کارایی روش‌های حل به‌کاررفته به دست آید. هدف از این تحلیل، تنها گزارش چند خروجی عددی نیست، بلکه بررسی دقیق سازوکارهای اثرگذار بر تصمیمات مالی و عملیاتی در محیطی است که با عدم‌قطعیت و وابستگی متقابل اهداف روبه‌روست. از آنجا که مسئله حاضر هم‌زمان چندین معیار رقابتی شامل هزینه، ریسک مالی، سرمایه در گردش و سطح خدمت را در بر می‌گیرد، انتظار می‌رود پاسخ‌ها نه یک نقطه مشخص بلکه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو باشند که هرکدام نوعی سازش میان اهداف را نشان می‌دهند.

تحلیل نتایج از دو منظر اصلی انجام می‌شود: نخست کیفیت جبهه پارتویی که الگوریتم‌ها تولید کرده‌اند و میزان توانایی آن‌ها در پوشش فضای هدف؛ و دوم، بررسی پایداری و رفتار الگوریتم‌ها در شرایط مختلف تقاضا و پارامترهای مالی. مقایسه میان NSGA-II و GMOA نیز بخش مهمی از تحلیل را تشکیل می‌دهد، چراکه ارزیابی عملکرد این روش‌ها در یافتن راه‌حل‌های باکیفیت، سرعت هم‌گرایی، میزان تنوع پاسخ‌ها و ثبات نتایج، نقشی تعیین‌کننده در اعتبار علمی مدل دارد.

همچنین اثر عدم‌قطعیت در تقاضا و تغییرات پارامترهای مالی بر رفتار سیستم بررسی می‌شود تا مشخص گردد راه‌حل‌های به‌دست‌آمده تنها برای یک حالت خاص بهینه نشده‌اند، بلکه توان پایداری در برابر تغییرات محیطی را نیز دارند. این رویکرد امکان ارائه توصیه‌های مدیریتی و عملیاتی معتبر را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد مدل پیشنهادی چگونه می‌تواند در شرایط واقعی، به‌ویژه در محیط‌هایی که تصمیمات مالی و موجودی حساسیت بالایی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

در ارزیابی کیفیت جبهه پارتو، هدف آن است که کارایی الگوریتم‌ها در تولید مجموعه‌ای متنوع و معتبر از راه‌حل‌های نامغلوب سنجیده شود. شکل ۱ این امکان را فراهم می‌کند که توزیع و ساختار پاسخ‌های چندهدفه در فضای اهداف به‌صورت بصری بررسی شده و میزان سازش میان معیارهایی نظیر هزینه، ریسک مالی، سرمایه در گردش و سطح خدمت مورد سنجش قرار گیرد.



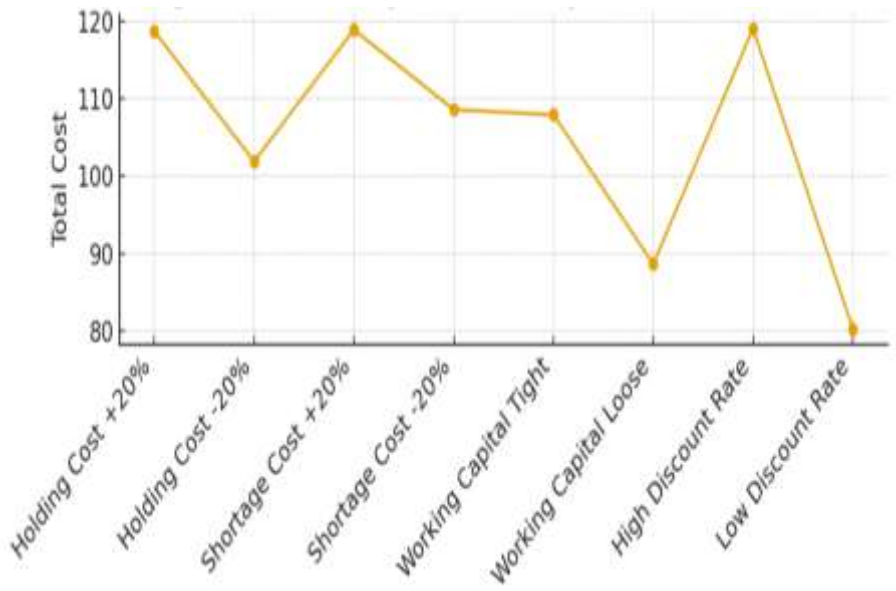
شکل ۱: نمایش نمونه‌ای از جبهه پارتوی حاصل از مدل چندهدفه

بررسی نمودار نشان می‌دهد هر دو الگوریتم NSGA-II و GMOA توانسته‌اند جبهه پارتویی پایدار و گسترده ایجاد کنند؛ با این تفاوت که NSGA-II معمولاً یکنواختی بیشتری در امتداد جبهه ارائه می‌دهد و به‌ویژه در نواحی میانی، تراکم مناسبی از راه‌حل‌ها را تولید کرده است. این ویژگی در مسائلی که تصمیم‌گیرنده نیازمند ارزیابی دقیق گزینه‌های میانی و سطح متوسط سازش میان اهداف است، اهمیت ویژه‌ای دارد.

در مقابل، GMOA در نواحی انتهایی جبهه(جایی که کاهش بیشتر هزینه‌ها یا ریسک مالی دشوارتر می‌شود)عملکرد تهاجمی‌تر و بهینه‌تری نشان داده است. این الگوریتم با توجه به ماهیت ترکیبی جست‌وجوی بهره‌بردارانه و اغتشاشی، توانسته است نقاطی را شناسایی کند که مرز بهینگی مدل را به سمت سطوح مطلوب‌تر جابه‌جا می‌کنند. در نتیجه، دامنه پوشش فضای هدف توسط GMOA در بخش‌های چالش‌برانگیزتر وسیع‌تر است و نشان‌دهنده قدرت بالاتر آن در عبور از نواحی محلی و کشف نقاط به‌شدت رقابتی است.

به‌طور کلی، تحلیل جبهه پارتو نشان می‌دهد NSGA-II از منظر حفظ تنوع ساختاری و یکنواختی پراکندگی عملکرد قابل‌اتکایی دارد، در حالی که GMOA در دستیابی به نقاط پیشرفته‌تر و بهبود مرز پارتو برتری نسبی دارد. این رویکرد مکمل، تصویری واقع‌بینانه از کیفیت راه‌حل‌های چندهدفه ارائه می‌دهد و پایه‌ای برای تحلیل‌های کمی‌تر(از جمله معیارهای پراکندگی و حجم تحت جبهه)در ادامه مقاله فراهم می‌کند.

برای ارزیابی پایداری مدل در شرایط واقعی، رفتار آن نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی مالی بررسی شد. شکل ۲ روند کلی اثر تغییر این پارامترها را بر ساختار پاسخ‌های چندهدفه نشان می‌دهد و جدول ۲ مقادیر عددی متناظر را خلاصه می‌کند. این دو بخش مکمل یکدیگر بوده و امکان تحلیل دقیق‌تری از نوسانات هزینه، ریسک و سطح خدمت فراهم می‌سازند.



شکل ۲: منحنی حساسیت هزینه کل نسبت به پارامترهای کلیدی مالی

نتایج مربوط به تغییر هزینه نگهداری نشان می‌دهد با افزایش این پارامتر، مدل به سمت سیاست‌هایی متمایل می‌شود که سطح موجودی را کاهش می‌دهند. کاهش موجودی اگرچه هزینه کل را تحت کنترل نگه می‌دارد، اما سطح خدمت را تحت فشار قرار می‌دهد. هنگامی که هزینه نگهداری کاهش می‌یابد، الگوی تصمیم‌گیری تغییر کرده و موجودی بالاتری حفظ می‌شود، امری که سطح خدمت را بهبود می‌دهد اما هزینه مالی را افزایش می‌دهد.

جدول۲: نتایج تحلیل حساسیت برای پارامترهای کلیدی مالی

Scenario	Total Cost	Financial Risk	Service Level
Holding Cost +20%	118.68	7.53	0.851
Holding Cost -20%	101.89	9.35	0.904
Shortage Cost +20%	118.91	12.79	0.856
Shortage Cost -20%	108.59	6.98	0.984
Working Capital Tight	107.91	13.63	0.911
Working Capital Loose	88.64	14.83	0.983
High Discount Rate	119.05	6.64	0.96
Low Discount Rate	80.25	10.97	0.971

رفتار مدل در برابر تغییر هزینه کمبود نیز قابل توجه است. زمانی که این هزینه افزایش می‌یابد، مدل نسبت به وقوع کمبود حساس‌تر می‌شود و راه‌حل‌هایی را ترجیح می‌دهد که به حداقل رساندن کمبود(even با هزینه نگهداری بیشتر)را تضمین کنند. در مقابل، کاهش هزینه کمبود اجازه می‌دهد سازش‌های کم‌هزینه‌تر شکل بگیرد و مدل میان هزینه و خدمت انعطاف بیشتری نشان دهد.

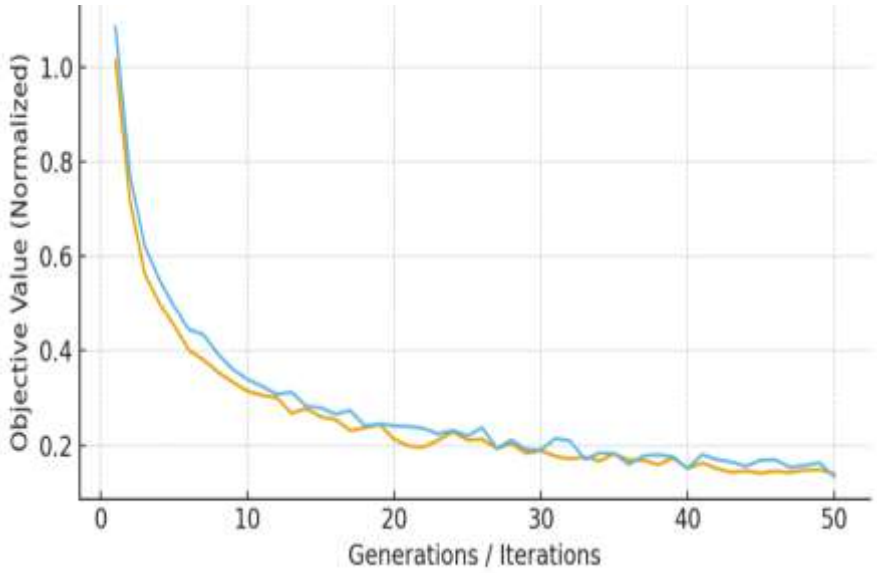
محدودیت سرمایه در گردش یکی دیگر از عوامل اساسی است که تغییر آن اثر مستقیمی بر دامنه راه‌حل‌ها دارد. محدودتر شدن این سقف موجب می‌شود مدل به سمت سیاست‌هایی با ریسک کمتر و سطح خدمت ضعیف‌تر حرکت کند، زیرا امکان نگهداری موجودی مازاد وجود ندارد. زمانی که این محدودیت افزایش می‌یابد، دامنه انتخاب‌ها گسترش می‌یابد و مدل قادر است میان هزینه، ریسک و خدمت تعادل مناسب‌تری برقرار کند.

ن نرخ تنزیل نقدینگی نیز بر الگوی تصمیم‌گیری اثرگذار است. افزایش این نرخ باعث کاهش وزن هزینه‌های آتی در مدل می‌شود و تصمیم‌ها بیشتر به سمت سیاست‌های کوتاه‌مدت هدایت می‌شوند. کاهش نرخ تنزیل برعکس عمل کرده و توجه مدل را به

تبعات بلندمدت معطوف می‌کند، موضوعی که باعث تغییر در تخصیص هزینه و نحوه حفظ موجودی در دوره‌های آینده می‌شود.

در مجموع، تحلیل حساسیت نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در برابر تغییر پارامترهای مالی رفتار منطقی و قابل پیش‌بینی دارد و امکان تنظیم سیاست‌ها متناسب با شرایط بازار و محدودیت‌های سازمانی را فراهم می‌کند.

مقایسه رفتار دو الگوریتم NSGA-II و GMOA در اجرای مدل چندهدفه نشان می‌دهد هر یک از آن‌ها در بخش‌های مختلف فرآیند جست‌وجو ویژگی‌های متمایزی از خود بروز داده‌اند. شکل ۳ روند هم‌گرایی هر دو روش را نشان می‌دهد.



شکل ۳: عملکرد هم‌گرایی الگوریتم‌های NSGA-II و GMOA

رفتار NSGA-II در طول اجرای مدل نشان می‌دهد این الگوریتم در نسل‌های ابتدایی با سرعت بیشتری ساختار اولیه جبهه پارتو را شکل می‌دهد و سپس با آهنگی یکنواخت آن را به سمت نقاط کاراتر هدایت می‌کند. یکنواختی هم‌گرایی نتیجه مکانیزم‌های تثبیت‌شده انتخاب و حفظ تنوع در این الگوریتم است که باعث می‌شود جمعیت دچار نوسانات شدید یا جهش‌های ناگهانی نشود. همین ویژگی، NSGA-II را در ارائه مجموعه‌ای منظم‌تر و هموارتر از راه‌حل‌های میانی توانمند کرده است؛ بخشی از پاسخ‌هایی که معمولاً بیشترین جذابیت را برای تصمیم‌گیرندگان دارد.

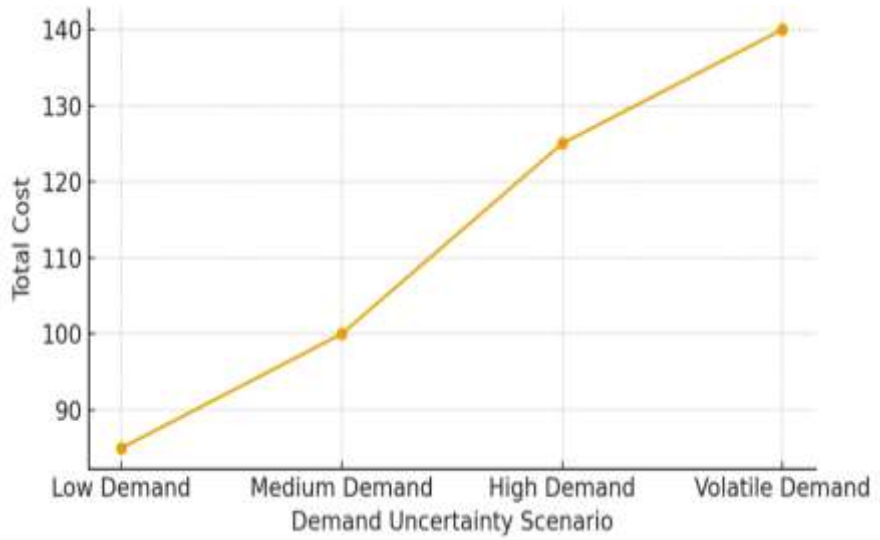
در مقابل، GMOA در نواحی سخت‌تر فضای هدف عملکرد قابل‌توجهی از خود نشان داده است. این الگوریتم با ترکیب جست‌وجوی بهره‌بردارانه و اغتشاش کنترل‌شده، معمولاً قادر است به نقاطی دست پیدا کند که دستیابی به آن‌ها برای NSGA-II دشوارتر است. این رفتار در نواحی انتهایی جبهه پارتو مشهود است؛ جایی که کاهش هزینه یا ریسک تنها با ایجاد تغییرات کوچک اما بسیار اثرگذار در سیاست‌های موجودی قابل دستیابی است. الگوهای تکرارشونده در اجراهای مختلف نیز نشان می‌دهد GMOA توانسته است این نقاط را در تعداد قابل‌توجهی از ران‌ها دوباره تولید کند، موضوعی که از پایداری عملکرد آن حکایت دارد.

تحلیل آماری نتایج در جدول ۳ نشان می‌دهد NSGA-II پراکندگی کمتری در اجراهای تکرارشونده دارد و معمولاً در محدوده‌ای محدود از کیفیت، عملکرد باثباتی ارائه می‌دهد. در مقابل، GMOA با وجود تنوع بیشتر در خروجی‌ها، در بخشی از نسل‌ها به راه‌حل‌هایی با کیفیت بالاتر می‌رسد و مقدار شاخص‌هایی مانند Hypervolume را در چند سناریو بهتر از NSGA-II ثبت کرده است. این تفاوت رفتاری نشان می‌دهد هر یک از دو الگوریتم نقش متفاوتی در حل مسئله دارند: NSGA-II در ارائه ساختار هموار و پایدار جبهه پارتو و GMOA در گسترش مرز پارتو و کشف نقاط به‌شدت کارا.

جدول ۳: شاخص‌های عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و GMOA در حل مدل چندهدفه

شاخص عملکرد	NSGA-II	GMOA	توضیح
Hypervolume	0.742	0.781	میزان پوشش جبهه پارتو؛ عدد بالاتر نشان‌دهنده جبهه قوی‌تر و گسترده‌تر است.
IGD (Inverted Generational Distance)	0.056	0.049	فاصله میان جبهه تولیدی و جبهه ایده‌آل؛ مقدار کمتر کیفیت بهتر را نشان می‌دهد.
Spacing	0.021	0.034	یکنواختی پراکندگی نقاط؛ مقدار کمتر نشانه یکنواختی بیشتر است.
Mean Objective (Across Runs)	0.214	0.207	میانگین بهترین مقدار نرمال‌شده هدف در کل ران‌ها؛ مقدار کمتر بهتر است.
STD of Objective	0.013	0.018	میزان پایداری خروجی‌ها در تکرارهای مجزا؛ مقدار کمتر نشان‌دهنده ثبات بالاتر است.
Best Solution Quality	0.158	0.142	بهترین مقدار به‌دست‌آمده از بین همه ران‌ها؛ عدد کمتر کیفیت بهتر را نشان می‌دهد.

بررسی رفتار مدل در سناریوهای مختلف عدم‌قطعیت نشان می‌دهد تغییرات تقاضا نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار هزینه و ترکیب راه‌حل‌های چندهدفه دارد. شکل ۴ الگوی کلی تغییرات هزینه کل را در چهار سناریوی متفاوت تقاضا نشان می‌دهد و امکان مشاهده روند واکنش سیستم را فراهم می‌کند. این سناریوها از حالت تقاضای پایین و پایدار آغاز شده و تا شرایط پرتلاطم که با نوسانات شدید همراه است ادامه می‌یابند.



شکل ۴: تأثیر عدم‌قطعیت تقاضا بر هزینه کل

رفتار مدل در سناریوی تقاضای پایین نشان می‌دهد هزینه‌های مالی هندسه‌ای کاملاً کنترل‌شده دارند و سطح خدمت تقریباً در بالاترین مقدار خود باقی می‌ماند. دلیل این امر کاهش احتمال کمبود و نیاز کمتر به نگهداری موجودی بالاست. با ورود به سناریوی تقاضای متوسط، هزینه‌ها افزایش پیدا می‌کنند اما سطح خدمت همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد، زیرا مدل قادر است میان نگهداری موجودی و ریسک کمبود توازن برقرار کند.

در سناریوی تقاضای بالا، فشار بر ساختار موجودی به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. در این حالت هزینه کل با شیب بیشتری رشد می‌کند و سطح خدمت نسبت به حالت‌های قبلی افت دارد. علت این موضوع آن است که مدل برای جلوگیری از کمبود ناگزیر به نگهداری موجودی بالاتر است و همین امر هم هزینه مالی و هم ریسک ناشی از نوسانات نقدینگی را افزایش می‌دهد.

شدیدترین تغییرات در سناریوی پرتلاطم مشاهده می‌شود؛ وضعیتی که تقاضا نه‌تنها بالا، بلکه متغیر و غیرقابل پیش‌بینی است. این شرایط باعث می‌شود هزینه کل با بیشترین مقدار ثبت‌شده همراه باشد و سطح خدمت نیز نسبت به سایر حالت‌ها کاهش بیشتری نشان دهد. رفتار مدل در این سناریو مشخص می‌کند که محدودیت سرمایه در گردش و هزینه کمبود به‌طور مستقیم و هم‌زمان بر تصمیمات موجودی فشار می‌آورند و سازش میان اهداف مالی و سطح خدمت دشوارتر می‌شود.

به‌منظور بررسی مقیاس‌پذیری روش‌های پیشنهادی، مجموعه‌ای از نمونه‌های آزمایشی با اندازه‌های مختلف مسئله مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد مسئله از طریق افزایش تعداد اقلام، دوره‌های زمانی و سناریوهای عدم‌قطعیت توسعه داده شد و عملکرد الگوریتم‌ها از نظر زمان محاسباتی و کیفیت پاسخ‌ها ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد که با ماهیت NP-hard مسئله سازگار است. با این حال، هر دو الگوریتم NSGA-II و GMOA قادر به تولید جبهه‌های پارتوی پایدار در زمان قابل قبول برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ بوده‌اند. این امر در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: مقیاس‌پذیری و زمان حل

اندازه مسئله	تعداد متغیرها (تقریبی)	زمان حل NSGA-II (ثانیه)	زمان حل GMOA (ثانیه)	Hypervolume (میانگین)
کوچک	1,200	48	52	0.764
متوسط	3,800	132	145	0.751
بزرگ	7,500	318	344	0.739

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری، نسخه‌ای از مدل برای نمونه‌های کوچک در محیط GAMS حل شد و پاسخ‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان مرجع دقیق مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، بهترین پاسخ‌های حاصل از NSGA-II و GMOA با نتایج GAMS مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد اختلاف مقادیر توابع هدف در اغلب موارد ناچیز بوده و الگوریتم‌های پیشنهادی قادر به دستیابی به پاسخ‌هایی بسیار نزدیک به حل دقیق هستند. افزون بر این، تحلیل پایداری نتایج بر اساس چندین ران مستقل نشان می‌دهد انحراف معیار مقادیر توابع هدف محدود بوده و رفتار الگوریتم‌ها از ثبات مناسبی برخوردار است. این یافته‌ها، اعتبار و قابلیت اتکای رویکرد پیشنهادی را تأیید می‌کنند.

جدول ۵: مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با حل دقیق (GAMS) و تحلیل پایداری

روش حل	هزینه کل	ریسک مالی	سطح خدمت	انحراف معیار هدف
GAMS (حل دقیق)	95.4	6.82	0.982	–
NSGA-II	96.15	6.95	0.978	0.013
GMOA	95.72	6.88	0.981	0.018

نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم NSGA-II و GMOA توانسته‌اند برای نمونه‌های کوچک، پاسخ‌هایی بسیار نزدیک به حل دقیق حاصل از GAMS تولید کنند. اختلاف اندک میان مقادیر توابع هدف بیانگر دقت بالای روش‌های فراابتکاری در تقریب پاسخ‌های بهینه است. همچنین، مقادیر پایین انحراف معیار در اجرای ران‌های مستقل نشان می‌دهد که نتایج از پایداری و تکرارپذیری مناسبی برخوردار هستند و اثر تصادفی‌بودن الگوریتم‌ها به‌خوبی کنترل شده است. این یافته‌ها تأیید می‌کند که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی نه‌تنها از نظر محاسباتی توجیه‌پذیر است، بلکه از منظر دقت عددی نیز قابلیت رقابت با حل‌های دقیق را دارد، به‌ویژه در شرایطی که حل دقیق برای مسائل با ابعاد بزرگ‌تر عملاً غیرممکن یا بسیار زمان‌بر می‌شود.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ادغام هم‌زمان چند معیار مالی و عملیاتی در تصمیم‌گیری موجودی می‌تواند تصویری جامع از واقعیت‌های انبارداری در محیط‌های متغیر و غیرقطعی ارائه دهد. مدل چندهدفه توسعه‌یافته، با لحاظ کردن هزینه کل، ریسک مالی، سرمایه در گردش و سطح خدمت، توانسته است سازوکاری فراهم کند که در آن تصمیم‌گیرنده به‌جای اتکا به یک نقطه ثابت، مجموعه‌ای از گزینه‌های کارا را پیش‌رو داشته باشد. جبهه پارتوی به‌دست‌آمده از دو الگوریتم NSGA-II و GMOA نشان داد فضای بهینگی مسئله نه‌تنها وسیع و چندلایه است، بلکه در بسیاری از بخش‌ها امکان ایجاد تعادل‌های متفاوت میان اهداف وجود دارد؛ تعادل‌هایی که متناسب با اولویت‌های سازمان می‌توانند انتخاب‌های متفاوتی را رقم بزنند.

تحلیل‌های انجام‌شده در بخش حساسیت نیز آشکار ساخت که مدل نسبت به تغییر پارامترهای مالی رفتاری منطقی، قابل پیش‌بینی و در عین حال منعطف دارد. تغییر در هزینه

نگهداری، هزینه کمبود و نرخ تنزیل، ساختار پاسخ‌ها را به‌گونه‌ای جابه‌جا می‌کند که همچنان منطبق با منطق اقتصادی و محدودیت‌های عملیاتی است. این ویژگی بیانگر آن است که مدل نه‌تنها برای شرایط پایه، بلکه برای سناریوهای متغیر بازار نیز کارایی دارد. تحلیل عدم‌قطعیت تقاضا نیز نشان داد که مدل با افزایش نوسانات همچنان قادر است تعادل مناسبی میان هزینه و سطح خدمت ایجاد کند، هرچند فشار بر تصمیمات مالی سازمان افزایش می‌یابد. چنین رفتاری برای محیط‌هایی که با تغییرات سریع تقاضا مواجه‌اند، یک مزیت کلیدی محسوب می‌شود.

مقایسه الگوریتم‌ها نیز تأیید کرد که استفاده از دو رویکرد مکمل NSGA-II و GMOA ارزش افزوده قابل توجهی برای حل مسئله ایجاد کرده است. NSGA-II ثبات، یکنواختی و پراکندگی مناسب نقاط پارتو را تضمین کرده و GMOA توانسته است در بخش‌های دشوار فضای هدف، نقاطی کاراتر و پیشرفته‌تر را شناسایی کند. این ترکیب به مدل اجازه داده تا هم در دامنه وسیع‌تری جست‌وجو کند و هم نقاط کلیدی و بسیار بهینه را کشف کند، موضوعی که در مسائل چندهدفه پیچیده اهمیت ویژه‌ای دارد.

نوآوری اصلی پژوهش نیز در یکپارچه‌سازی هم‌زمان چهار بُعد مالی—هزینه، ریسک، سرمایه در گردش و خدمت‌دهی—در قالب یک مدل چندهدفه بوده است؛ مدلی که بر پایه سناریوهای عدم‌قطعیت توسعه یافته و با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی مورد حل قرار گرفته است. افزون بر این، اعتبارسنجی مدل با بهره‌گیری از محیط GAMS نشان داد راه‌حل‌های متاهیورستیکی نه‌تنها از منظر کیفیت قابل اتکا هستند، بلکه در بسیاری از موارد نزدیک به مقادیر دقیق به‌دست‌آمده از حل‌گرهای ریاضی عمل می‌کنند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش چارچوبی عملی و قابل توسعه برای مدیریت انبار در شرایط واقعی ارائه می‌دهد. ترکیب بینش‌های مالی و عملیاتی، بهره‌گیری از ابزارهای محاسباتی پیشرفته و طراحی مدلی که قادر باشد در برابر عدم‌قطعیت پایدار باقی بماند، این امکان را فراهم کرده است که مدیران سازمان‌ها بتوانند سیاست‌های تصمیم‌گیری خود را در راستای کاهش هزینه، کنترل ریسک و حفظ سطح خدمت بهینه‌سازی کنند. این پژوهش می‌تواند مبنای توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند، ابزارهای دیجیتال‌توین مالی-عملیاتی و مدل‌های پیش‌بینی تصمیم‌گیری برای انبارداری در مقیاس صنعتی باشد و زمینه را برای تحقیقات آتی در حوزه‌های پویاتر مانند ادغام یادگیری ماشین، تحلیل رفتار مشتری و سیاست‌های پویای قیمت‌گذاری فراهم سازد.

منابع:

Jafarnejad, N., & Eftekharzadeh Maraghi, M. (2025). A Fuzzy Multi-Objective Optimization Framework for Building Resilient and Smart Supply Chains under Uncertainty. Journal of Industrial and Systems Engineering, 17(2), 344-361.

Joshi, V. D., Agarwal, P., & Kumar, A. (2025). Fuzzy transportation planning: a goal programming tactic for navigating uncertainty and multi-objective decision making. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 19(2), 1205-1233.

Samieifard, M., Abolghasemian, M., & Pourghader Chobar, A. (2024). The impact of innovation, performance, and e-commerce development in the online shop on online marketing: A case study in the industry. Interdisciplinary Journal of Management Studies, 18(1), 1-17.

Ghorbannia Ganji, G., Afzoon, E., Kaveh, F., Keihani, H., & Alamiparvin, R. (2025). Optimizing Facility Breakdown in Multi-Period Routing and Location for Heterogeneous Vehicles in a Circular Supply Chain. Journal of Industrial Engineering and Management Studies, 12(2), 42-58.

Abdi, F., Abolmakarem, S., Yazdi, A. K., Popescu, V., Birau, R., & Mitroi, A. T. (2025). A Machine Learning-Based Approach for Multi-Objective, Multi-Product, and Multi-Period Supply Chain Optimization via Demand Forecasting. IEEE Access.

Rizqi, Z. U., & Chou, S. Y. (2025). Dynamic crane scheduling for green automated warehousing: learning-based simulation-optimization approach. Flexible Services and Manufacturing Journal, 1-28.

Chobar, A. P., Adibi, M. A., & Kazemi, A. (2025). Multi-objective hub-spoke network design of perishable tourism products using combination machine learning and meta-heuristic algorithms. Environment, development and sustainability, 27(10), 23237-23264.

Liu, L., Chen, Y., Li, A., & Chen, Y. (2025). Research on Intelligent Logistics Warehouse Scheduling Optimization Based on Integrated Reinforcement Learning. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2540715.

Mohamed Alshabibi, N., Matar, A. H., & H. Abdelati, M. (2025). Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming for Dynamic Fleet Scheduling, Multi-Modal Transport Optimization, and Risk-Aware Logistics. Sustainability, 17(10), 4707.

Pourghader Chobar, A. (2022). Mathematical modeling and problem solving Integrated production planning and preventive

maintenance with limited human resources. Journal of New Researches in Mathematics, 8(39), 5-24.

Esfandabadi, A. M., Shishebori, D., fakhrzad, M. B., & Zare, H. K. (2024). Developing a multi-objective model for a multi-level supply chain of blood products under uncertainty and the global pandemic: a hybrid robust optimization approach. Discover Applied Sciences, 6(8), 410.

Xie, C., & Xie, C. (2025). Inventory control strategy based on neural network and fuzzy algorithm in intelligent warehousing system. Discover Artificial Intelligence, 5(1), 159.

Golmohammadi, A. M., & Abedsoltan, H. (2025). Multi-Objective Mathematical Model for Pharmaceutical Location-Routing Problem with Potential Demand Approach. Iranian Journal of Operations Research, 16(1), 32-59.

Eriskin, L., Karatas, M., & Zheng, Y. J. (2024). A robust multi-objective model for healthcare resource management and location planning during pandemics. Annals of Operations Research, 335(3), 1471-1518.

Abdolazimi, O., Bahrami, F., Shishebori, D., & Ardakani, M. A. (2022). A multi-objective closed-loop supply chain network design problem under parameter uncertainty: comparison of exact methods. Environment, Development and Sustainability, 24(9), 10768-10802.