

مدل‌سازی استوار امکانی برای قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چندکاناله با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی

مونا جمع‌دار^۱، محمد شیخ‌علیشاهی^{۲*}، عطااله طالعی‌زاده^۳

۱. گروه مهندسی صنایع، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه

پویایی شدید بازار، گسترش کانال‌های فروش و نقش پررنگ مشتریان استراتژیکی که رفتار آینده‌نگر دارند، قیمت‌گذاری پویا را به یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل تصمیم‌گیری در زنجیره‌های تأمین چندکاناله تبدیل کرده است. این پژوهش با هدف مواجهه با این پیچیدگی، چارچوبی جامع ارائه می‌دهد که در آن عدم قطعیت موجود در پارامترهای پایه مطلوبیت و هزینه‌های عملیاتی به‌صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای مدل‌سازی شده و با بهره‌گیری از رویکرد برنامه‌ریزی استوار امکانی، تصمیمات حاصل از مدل در برابر نوسانات شدید محیطی پایدار و قابل اتکا می‌شوند. در این مدل، تقاضای مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک به‌طور مجزا و براساس توابع مطلوبیت مبتنی بر رفتار آنان در کانال‌های مختلف فروش در نظر گرفته شده است، به‌گونه‌ای که اثر آینده‌نگری مشتریان استراتژیک و حساسیت متفاوت آن‌ها نسبت به قیمت‌گذاری در نتایج منعکس شود. برای حل مدل غیرخطی پیشنهادی، سه الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) و یک روش ترکیبی جدید (GWGO) طراحی و اجرا شدند. نتایج آزمایش‌های عددی در مقیاس‌های مختلف نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند قیمت‌های بهینه‌ای ارائه دهد که حتی در شرایط عدم قطعیت بالا نیز سودآور و پایدار باقی می‌مانند؛ همچنین الگوریتم ترکیبی GWGO بهترین تعادل میان کیفیت پاسخ و سرعت همگرایی را ارائه کرده است. تحلیل حساسیت نشان داد که مشتریان استراتژیک اثر قابل توجهی بر سودآوری دارند و افزایش عدم قطعیت مرتبط با این گروه، تأثیر بیشتری بر ساختار سود و رفتار قیمت‌گذاری می‌گذارد. این مطالعه یک چارچوب تحلیلی قدرتمند برای طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری انعطاف‌پذیر، مقاوم و سازگار با رفتار مشتریان در محیط‌های پرتلاطم فراهم می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

بازنگری ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

قیمت‌گذاری پویا،

برنامه‌ریزی استوار امکانی،

زنجیره تأمین چندکاناله،

الگوریتم‌های فراابتکاری

ترکیبی.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، بازارهای کسب‌وکار در اغلب صنایع با چنان میزان از پویایی، نوسان و پیچیدگی مواجه شده‌اند که رویکردهای سنتی قیمت‌گذاری دیگر پاسخگوی نیازهای کنونی سازمان‌ها نیست [۱].

تغییرات سریع ترجیحات مصرف‌کنندگان، افزایش تنوع محصولات، گسترش کانال‌های فروش و رشد رقابت، باعث شده است که تعیین قیمت فروش، نه یک تصمیم مقطعی و ساده، بلکه مسأله‌ای چندلایه، میان‌رشته‌ای و حساس نسبت به متغیرهای محیطی باشد [۲، ۳].

* نویسنده مسئول: محمد شیخ‌علیشاهی

تلفن: ۰۲۱-۸۴۱۶۲۰۸۲۰۲۱؛ پست الکترونیکی: m.alishahi@ut.ac.ir

توانایی جستجوی کارآمد در فضاهای تصمیم بزرگ و غیرخطی است؛ فضایی که معمولاً روش‌های کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی در حل آن با چالش‌های جدی روبرو می‌شوند.

مدل پیشنهادی این پژوهش، با در نظر گرفتن ویژگی‌های محصولات، ساختار هزینه‌ای کانال‌ها، محدودیت‌های ظرفیت عرضه، و رفتار آینده‌نگر مشتریان استراتژیک، قادر است قیمت بهینه فروش را در دوره‌های مختلف زمانی تعیین کند و اثرات آن بر تقاضا را مورد تحلیل قرار دهد [۷،۶]. افزون بر این، بررسی حساسیت مدل و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که مدیران می‌توانند با اتکا به چنین مدلی، سیاست‌های قیمتی خود را با دقتی بیشتر و اطمینان بالاتر تنظیم کنند؛ سیاست‌هایی که نه تنها سودآوری شرکت را بهبود می‌بخشد، بلکه در مواجهه با شرایط متغیر بازار نیز ثبات و پایداری بیشتری دارند.

به طور کلی، می‌توان گفت این پژوهش تلاش کرده است با ترکیب نگاه رفتاری، تحلیل مبتنی بر مطلوبیت، مدل‌سازی فازی، تصمیم‌گیری استوار و بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری، چارچوبی جامع برای مسأله دشوار و پویای قیمت‌گذاری در بازارهای چندکاناله ارائه دهد [۸،۵]. چنین چارچوبی می‌تواند پایه‌ای مستحکم برای تصمیم‌گیری مدیریتی در محیط‌های پرتلاطم کنونی فراهم آورد و ابزار مناسبی برای طراحی سیاست‌های قیمتی انعطاف‌پذیر، مقاوم و همسو با رفتار مشتریان استراتژیک باشد.

ساختار مقاله بدین صورت است. در بخش دوم به ارائه مرور ادبیات تحقیق پرداخته شده و مهمترین مقالات در این حوزه مطالعه شده است. در انتها در یک جدول خلاصه نتایج ارائه و شکاف تحقیقاتی مشخص شده است. در بخش سوم به ارائه مدل ریاضی قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چند کاناله تحت عدم قطعیت و استفاده از روش برنامه‌ریزی استوار امکانی برای کنترل مدل پرداخته شده است. در بخش چهارم به معرفی الگوریتم‌های فراابتکاری و طراحی راه‌حل اولیه پرداخته شده است. در بخش پنجم به اعتبارسنجی، تحلیل حساسیت و تجزیه و تحلیل مسائل نمونه مختلف با نرم‌افزار GAMS و الگوریتم‌های GA، GWO و GWGO پرداخته شده است. در نهایت در بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد‌های آتی تحقیق پرداخته شده است.

۲. مرور ادبیات

فنگ [۹] یک مدل یکپارچه برای تصمیم‌گیری همزمان درباره قیمت‌گذاری و تأمین در شرایط تقاضا و عرضه نامطمئن ارائه می‌کند و نشان می‌دهد سیاست موجودی پایه حتی در حالت قطعی نیز بهینه نیست. در این مدل، سیاست بهینه بر دو مقدار کلیدی یعنی نقطه سفارش و سطح هدف موجودی ایمنی استوار است که با هماهنگی قیمت و مقدار سفارش حفظ می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که محدودیت یا عدم قطعیت عرضه می‌تواند ارزش قیمت‌گذاری پویا را به طور چشم‌گیری افزایش دهد و ترکیب این دو عامل اثر قوی‌تری

کوچک‌ترین انحراف در قیمت می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر رفتار مشتریان، ساختار تقاضا، و حتی جایگاه رقابتی شرکت بر جای بگذارد [۴].

یکی از ابعاد مهم این پیچیدگی، تنوع کانال‌های فروش است که امروز دیگر تنها محدود به شبکه‌های سنتی نیستند. شرکت‌ها محصولات خود را در بسترهای متعددی از جمله وب‌سایت رسمی، پلتفرم‌های دیجیتال، شبکه‌های اجتماعی، نمایندگان فروش و واسطه‌های تجاری عرضه می‌کنند [۷،۶،۵]. هر کانال نه تنها هزینه‌های عملیاتی مختص به خود را دارد، بلکه بر ادراک مشتریان از ارزش و مطلوبیت محصول نیز تأثیرگذار است [۹،۸]. بدیهی است که مشتریانی که در یک کانال به دنبال قیمت پایین‌تر هستند، ممکن است در کانالی دیگر کیفیت خدمات یا سهولت فرایند خرید را در اولویت قرار دهند. افزون بر این، حضور مشتریان استراتژیک لایه دیگری از پیچیدگی را ایجاد می‌کند. این دسته از مشتریان، تصمیم‌های خرید خود را تنها براساس شرایط جاری اتخاذ نمی‌کنند؛ بلکه با تحلیل روندهای گذشته، بررسی سیگنال‌های بازار، و پیش‌بینی سیاست‌های قیمتی آینده، رفتار خرید خود را تنظیم می‌کنند [۱۰]. این رفتار آینده‌نگر سبب می‌شود که شرکت‌ها هنگام تعیین قیمت، ناگزیر باشند پیامدهای میان مدت و بلند مدت تصمیمات امروز را نیز لحاظ کنند؛ زیرا یک تغییر قیمت ممکن است واکنش‌های تأخیری اما تأثیرگذار در دوره‌های آتی ایجاد نماید [۱۱،۶].

در چنین چارچوبی، مدل‌سازی رفتار مشتریان و برآورد تقاضا بدون بهره‌گیری از ابزارهای کمی پیشرفته امکان‌پذیر نیست. یکی از روش‌های متداول در این حوزه، بهره‌گیری از توابع مطلوبیت است که نشان می‌دهند مشتری چگونه ارزش ادراک شده خود را براساس متغیرهایی چون قیمت، کیفیت، ویژگی‌های خدماتی و شرایط کانال‌های فروش شکل می‌دهد [۱۲،۲]. با این حال، واقعیت بازار نشان می‌دهد که بسیاری از پارامترهای این توابع، از جمله پارامترهای پایه مطلوبیت و هزینه‌های عملیاتی کانال‌ها، قطعی و ایستا نیستند؛ بلکه ماهیتی مبهم، متغیر و همراه با عدم قطعیت دارند [۱۳]. برای نزدیک‌تر شدن مدل به شرایط واقعی، در این پژوهش پارامترهای مذکور به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده‌اند تا دامنه تغییرات احتمالی و ابهام موجود در آن‌ها به درستی نمایان شود.

به منظور مدیریت این عدم قطعیت و ارائه تصمیمات پایدار، از رویکرد برنامه‌ریزی استوار امکانی استفاده شده است [۱۶،۱۵،۱۴]. این رویکرد که در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای در حوزه مدل‌سازی تصمیمات تحت عدم قطعیت یافته است، امکان ارائه راه‌حل‌هایی را فراهم می‌سازد که حتی در صورت تغییر یا نوسان پارامترهای فازی، همچنان قابل اعتماد و کارآمد باقی بمانند.

در راستای حل مسأله چندهدفه و پیچیده قیمت‌گذاری، از سه الگوریتم فراابتکاری قدرتمند، یعنی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ترکیبی ژنتیک و بهینه‌سازی گرگ خاکستری استفاده شده است [۱۹،۱۸،۱۷]. مزیت اصلی این الگوریتم‌ها در

نسبت به حالت‌های منفرد دارد. گائو و همکاران [۲۰] به بررسی تصمیمات قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین حلقه بسته دوکاناله شامل یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش تحت تقاضای نامطمئن کانال غیرمستقیم پرداختند. آن‌ها سه مدل قیمت‌گذاری با تصمیم‌گیری غیرمتمرکز شامل بازی نش، استکلبرگ تولیدکننده و استکلبرگ خرده‌فروش را ارائه کردند و تأثیر پذیرش مشتری از کانال مستقیم بر قیمت‌ها و سود مورد انتظار را تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش پذیرش کانال مستقیم، قیمت عمده‌فروشی، قیمت خرده‌فروشی و سود مورد انتظار خرده‌فروش کاهش می‌یابد، در حالی که قیمت فروش آنلاین مستقیم و سود تولیدکننده در بازی استکلبرگ خرده‌فروش افزایش می‌یابد، اما قیمت انتقال باز یافت و قیمت خرید محصول استفاده‌شده تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. ستونه و همکاران [۲۱] به ارائه مدلی غیر خطی برای قیمت‌گذاری دو دوره‌ای محصول شرایطی که تولیدکننده با دو گروه مشتریان استراتژیک و نزدیک بین روبرو می‌باشد، پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آن بود که رفتار استراتژیک مشتری، نقشی کلیدی در سودآوری شرکت دارد. فتوحی قزوینی و همکاران [۲۲] به تعیین قیمت خرده‌فروشی پویا توسط تأمین‌کنندگان انرژی پرداختند و از بهینه‌سازی مقاوم برای مقابله با نوسانات قیمت بازار عمده‌فروشی استفاده کردند. این رویکرد امکان تصمیم‌گیری درباره قراردادهای آتی، گزینه‌های خرید و عملکرد واحدهای تولید پراکنده را فراهم می‌کند و سود مورد انتظار را افزایش می‌دهد. ما و همکاران [۲۳] به بررسی سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا غیرهمکاری در یک زنجیره تأمین حلقه بسته دوکاناله شامل تولیدکننده و خرده‌فروش پرداختند و تأثیر ساختار قدرت کانال‌ها و قیمت مرجع بازار بر تصمیمات دینامیک را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که تولیدکننده‌ای که کانال مستقیم باز می‌کند، سود بالایی کسب می‌کند و در مناطق پایدار بازی، رهبر بازی موقعیت برتری دارد. با افزایش حساسیت تقاضای بازار به اختلاف بین قیمت مرجع و قیمت واقعی، منطقه پایدار سیستم کوچک‌تر می‌شود و در شرایط ناپایدار، دنبال‌کننده باید قیمت خود را مطابق تصمیم رهبر تنظیم کند. وانگ و همکاران [۲۴] به ارائه روشی برای ساخت بازه‌های اطمینان دقیق برای تابع تقاضا در قیمت‌گذاری پویا پرداختند و نشان دادند که داده‌های متوالی باعث سوگیری در برآوردهای کلاسیک می‌شوند. آن‌ها با توسعه برآوردهای بدون سوگیری، بازه‌های اطمینان نقطه‌ای و یکنواخت تابع تقاضا را فراهم کردند. پی و همکاران [۱۳] به بررسی تصمیمات قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین سبز دوکاناله با عدم قطعیت فازی در تقاضا پرداختند. آن‌ها با استفاده از نظریه فازی نوع دوم، مجموعه‌ای جدید برای نمایش عدم قطعیت توزیع تقاضا ارائه کردند و چارچوب بازی قیمت‌گذاری مقاوم برای زنجیره تأمین توسعه دادند. این مطالعه روش جدیدی برای یافتن تعادل مقاوم اعضای زنجیره پیشنهاد کرد و نشان داد که عدم قطعیت تقاضا بر انتخاب کانال بهینه تولیدکننده تأثیر می‌گذارد و نتایج ارائه شده در شرایطی که قیمت محصولات سبز در کانال‌های خرده‌فروشی و مستقیم برابر نباشد نیز

پایدار است. پاکزاد و همکاران [۲۵] با در نظر گرفتن کالاهای فسادپذیر به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با دو تابع هدف، همراه با عدم قطعیت پرداختند. در زنجیره تأمین مورد بررسی آن‌ها، چند محصول، چند تأمین‌کننده، انبارهای متقاطع و مشتریان مفروض بودند. آن‌ها جهت مدیریت بر عدم قطعیت موجود، از روش بهینه‌سازی استوار مولوی استفاده کردند. لی و میزونو [۳] مسأله قیمت‌گذاری پویا و مدیریت موجودی در زنجیره تأمین دوکاناله را با ساختارهای قدرت مختلف بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که سیاست بهینه مبتنی بر موجودی و قیمت پایه است و تصمیمات بهینه تحت تأثیر ساختار قدرت و موجودی اولیه قرار دارند. نتایج عددی نشان می‌دهد که انتخاب ساختار قدرت به سطح قیمت عمده‌فروشی وابسته است. لی و همکاران [۱۱] سیاست‌های قیمت‌گذاری و تبلیغات کوپنی در زنجیره دوکاناله را تحلیل کردند و نشان دادند که کوپن‌پروموشن موجب افزایش سود و قیمت، و بهره‌برداری تولیدکننده از تبلیغات خرده‌فروش می‌شود و پس از چند دوره به تعادل بهینه می‌رسد.

داس و همکاران [۸] به بررسی هماهنگی زنجیره تأمین دوکاناله با توجه به سطح سبب‌سازی محصولات پرداختند. در این مدل، تولیدکننده از طریق کانال آنلاین مستقیم و کانال خرده‌فروشی سنتی محصولات خود را عرضه می‌کند و تقاضا به قیمت و سطح سبب‌سازی بستگی دارد. نتایج نشان داد که در سناریوی غیرمتمرکز، قیمت خرده‌فروشی بالاتر و سطح سبب‌سازی پایین‌تر است و سود کل زنجیره کاهش می‌یابد. برای بهبود سود، دو مکانیزم هماهنگی شامل قراردادهای تقسیم هزینه و تقسیم سود پیشنهاد شد که تنها قرارداد تقسیم سود موفق به ایجاد هماهنگی شد. هی و همکاران [۴] به بررسی زنجیره تأمین دوکاناله شامل یک تولیدکننده با کانال آنلاین مستقیم و یک خرده‌فروش آنلاین پرداختند و استراتژی‌های قیمت‌گذاری دو دوره‌ای یکسان یا متفاوت را تحلیل کردند. آن‌ها چهار مدل بازی را برای مقایسه نتایج تعادل ارائه دادند و نشان دادند که نرخ تغییر بازار و ترجیح کانال مصرف‌کنندگان بر انتخاب استراتژی و قیمت‌ها تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که استراتژی قیمت متفاوت معمولاً به نفع تولیدکننده است، اما ممکن است برای خرده‌فروش ضرر داشته باشد. فنگ و همکاران [۲۶] مسأله دشوار طراحی همزمان سیاست موجودی و قیمت‌گذاری را در شرایط عدم قطعیت عرضه بررسی کردند و با محدود کردن آن به مجموعه‌ای از سیاست‌های منطقی، مدل را به یک مسأله کوژ و قابل حل تبدیل کردند. نتایج نشان داد سیاست‌های پالایش‌شده به‌سادگی محاسبه می‌شوند و سودی نزدیک به مقدار بهینه فراهم می‌کنند. باقر زاده رحمانی و همکاران [۲۷] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط غیر خطی چند هدفه پرداختند و برای حل مسأله مورد نظر، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه بر مبنای مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) بهره گرفتند. لیو و همکاران [۶] به توسعه مدلی برای قیمت‌گذاری پویا، تأمین مجدد و تخصیص موجودی در خرده‌فروشی‌های همه‌کاناله پرداختند و از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف دوسطحی برای شبیه‌سازی فرآیند دینامیک استفاده کردند.

و عمدتاً فرض بر قطعی بودن تقاضا یا استفاده از روش‌های ساده برای کنترل عدم قطعیت است. برخی مطالعات نیز به مدل‌های پویا و قراردادهای مشارکتی پرداخته‌اند. در شرایط مطرح شده، هیچ تحقیقی رفتار استراتژیک مصرف‌کنندگان را مورد بررسی قرار نداده است. در صورتی که توجه به این امر، سبب اتخاذ تصمیمات قیمت‌گذاری درست و کاراتری می‌گردد. همچنین زنجیره‌های تأمین به واسطه طبیعت پیچیده شان، با عدم قطعیت بالایی روبرو می‌باشند که در صورت نادیده گرفتن، عملکرد آن‌ها را به‌طور نامطلوب تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین به کنترل عدم قطعیت پیشرفته نیاز دارد که در اکثر مطالعات موجود، یافت نمی‌شود. هیچ مطالعه‌ای، مسأله مطرح شده را با استفاده از چندین الگوریتم فراابتکاری، مورد بررسی و مقایسه قرار نداده است. در حالی که چنین مقایسه‌ای موجب ارائه بهترین روش به مدیران زنجیره‌تأمین جهت افزایش بهره‌وری آن‌ها می‌باشد. بنابراین تحقیقات هنوز در سه زمینه قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر تمایلات مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک، تقاضای غیرقطعی و کنترل عدم قطعیت پیشرفته و همچنین مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری قدرتمند تحت شرایط مطرح شده، مشاهده نمی‌شود. مقاله حاضر با توجه به این شکاف‌های تحقیقاتی، بر قیمت‌گذاری پویای مبتنی بر مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک در زنجیره‌تأمین چند کاناله تمرکز دارد و در شرایط غیر قطعی، از روش برنامه‌ریزی استوار امکانی برای کنترل عدم قطعیت استفاده می‌کند. همچنین، ترکیبی از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی گرگ خاکستری و الگوریتم ترکیبی ژنتیک-گرگ خاکستری برای حل مسأله ارائه و مقایسه شده است. مجموعه ویژگی‌های ذکر شده، در کنار یکدیگر، تمایز مقاله حاضر نسبت به مطالعات پیشین و قابلیت کاربرد آن در زنجیره‌های تأمین چندکاناله را نشان می‌دهد و خلأ موجود در ادبیات را پر می‌کند.

۳. ارائه مدل ریاضی

هدف این بخش ارائه یک مدل ریاضی پویا برای قیمت‌گذاری در یک زنجیره‌تأمین چندکاناله تحت شرایط عدم قطعیت است. در این مدل، تعیین قیمت‌های بهینه و مقادیر فروش در زنجیره‌ای که عبارت است از انواع وسایل حمل‌ونقل ($V \in \{1, 2, \dots, V\}$)، طبقات مشتریان ($C \in \{1, 2\}$)، که شامل سطوح مختلف رفتار استراتژیک استراتژیک مشتریان ($C_1 \in \{1, 2, \dots, C_1\}$ و مشتریان غیر استراتژیک C_2 ، و کانال‌های متعدد فروش ($S \in \{1, 2, \dots, S\}$)، طی یک دوره چند روزه ($t \in \{1, 2, \dots, T\}$) انجام می‌شود. این مدل، تغییرات تقاضا، محدودیت ظرفیت و الزامات مربوط به سهم بازار را در نظر گرفته و همزمان از حدود قیمتی و دامنه مجاز تغییرات روزانه تبعیت می‌کند. همچنین در این مدل، پارامترهای پایه مطلوبیت و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با فروش محصولات در دوره‌های مختلف به‌صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده است.

آن‌ها الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق (ML-PPO) را معرفی کردند که مشاهدات کنونی و پیش‌بینی‌های آینده را ترکیب کرده و اقدامات غیرمجاز را حذف می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این الگوریتم می‌تواند سود و سطح خدمت خرده‌فروش را بهینه کند و قابلیت تعمیم بالایی در حل مسائل قیمت‌گذاری و مدیریت موجودی پویا دارد. اکبرزاده سربابی و همکاران [۲۸] به ارائه مدل قیمت‌گذاری یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته که در آن مشتریان به قیمت و سبز بودن محصول حساس هستند، پرداختند. بارمن و همکاران [۲] به بررسی تعامل بین تعهدات زیست‌محیطی و انعطاف‌پذیری شاخص‌های ریسک در زنجیره‌تأمین دوکاناله شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده سبز و خرده‌فروش پایدار پرداختند. آن‌ها تصمیمات قیمت‌گذاری و سبزسازی را با در نظر گرفتن اثرات اجتناب از ریسک بهینه‌سازی کردند و تأثیر قراردادهای زنجیره‌تأمین و مشوق‌های خرده‌فروش بر ابتکارات سبز تولیدکننده را تحلیل نمودند.

ون و همکاران [۲۹] به تحلیل زنجیره‌تأمین دارویی چندکاناله با توجه به باز کردن همزمان کانال‌های آنلاین توسط تولیدکنندگان و خرده‌فروشان پرداختند و سه مدل بازی چندکاناله با در نظر گرفتن قدرت کانال، رقابت سه‌جانبه قیمت و سیاست‌های بازپرداخت بیمه سلامت ارائه کردند. نتایج نشان داد که رقابت بین کانال‌ها همواره منجر به کاهش قیمت داروهای خرده‌فروش نمی‌شود و رقابت بین کانال‌های فیزیکی و آنلاین می‌تواند قیمت‌ها را افزایش دهد، در حالی که کانال فروش مستقیم قیمت‌ها را کاهش می‌دهد. چن و همکاران [۳۰] به بررسی استراتژی‌های قیمت‌گذاری در زنجیره‌تأمین دوکاناله با اثر «شورومینگ» پرداختند و تأثیر ساختار قدرت کانال‌ها شامل استکلبرگ تولیدکننده، استکلبرگ خرده‌فروش و نش عمودی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که شدت رقابت کانالی و ضریب اثر شورومینگ بر تقاضای آنلاین و قیمت عمده‌فروشی هنگامی که تولیدکننده غالب است، مؤثر است، در حالی که قیمت خرده‌فروشی و تقاضای آفلاین تنها تحت تأثیر ضریب شورومینگ قرار دارد. کاووسی و همکاران [۱۸] یک چارچوب یادگیری تقویتی عمیق یکپارچه برای قیمت‌گذاری پویا و کنترل موجودی محصولات فاسدشدنی در محیط مدیریت شده توسط فروشنده ارائه کردند. در این چارچوب، درآمد فروش به همراه جریمه‌های فساد، بازگشت کالا و هزینه حمل‌ونقل در یک تابع پاداش چندجزئی ترکیب شده است تا سود واقعی منعکس شود. استفاده از یک مؤلفه شکل‌دهی مبتنی بر موجودی باعث هدایت اکتشاف و کاهش زمان آموزش بدون تغییر بهینگی سیاست شد. نتایج تجربی نشان داد که عامل مبتنی بر بهینه‌سازی سیاست مجاور (PPO) نسبت به سایر الگوریتم‌های یادگیری تقویتی عمیق (DRL) و معیارهای کلاسیک، پاداش تجمعی و سطح خدمت بهتری ارائه می‌دهد.

در جدول (۱) به مقایسه مقالات حوزه قیمت‌گذاری در زنجیره‌تأمین پرداخته شده است.

با مرور ادبیات موجود، مشخص شد که بیشتر پژوهش‌ها بر قیمت‌گذاری در زنجیره‌های تأمین دوکاناله یا چندکاناله تمرکز دارند

جدول (۱). مقایسه ویژگی‌های تحقیقات مرتبط با موضوع قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین

منبع	نوع استراتژی قیمت‌گذاری	عدم قطعیت	روش کنترل عدم قطعیت	روش حل	ساختار زنجیره تأمین
[۲۰]	قیمت‌گذاری زنجیره تأمین حلقه بسته با کانال مستقیم	—	—	مدل بازی سه سناریو	دو کاناله
[۲۱]	قیمت‌گذاری پویا در بازار انرژی	—	—	بهینه‌سازی استوار	دو کاناله
[۲۲]	قیمت‌گذاری غیرهمکاری	—	—	مدل بازی دینامیک	دو کاناله
[۲۳]	ساخت بازه اطمینان برای تابع تقاضا	✓	برآوردگر بدون سوگیری	روش آماری پیشرفته	—
[۱]	بهینه قیمت‌گذاری و سطح خدمت	—	—	تحلیل سناریو، بازی استکلبرگ	چندکاناله
[۳۱]	بهینه قیمت‌گذاری محدود به سرمایه	—	—	مدل چندسطحی	چندکاناله
[۳۲]	قیمت‌گذاری محصولات ارگانیک و معمولی	—	—	مدل رقابتی دوکاناله	دو کاناله
[۵]	قیمت‌گذاری با قرارداد مشارکت درآمد	—	—	تحلیل قرارداد، شبیه‌سازی	چندکاناله
[۱۳]	قیمت‌گذاری مقاوم در زنجیره سبز	✓	مجموعه عدم قطعیت فازی نوع دوم	مدل بازی مقاوم	دو کاناله
[۱۱]	قیمت‌گذاری و تبلیغات کوپنی	—	—	مدل بازی دیفرانسیلی	دو کاناله
[۳]	قیمت‌گذاری پویا و مدیریت موجودی	—	—	برنامه‌ریزی پویا تصادفی	دو کاناله
[۳۳]	قیمت‌گذاری پویا و تلاش فروش	—	—	مدل متمرکز و غیرمتمرکز، قرارداد مشارکت	دو کاناله
[۴]	قیمت‌گذاری یکسان یا متفاوت در دو دوره	—	—	مدل بازی چهار سناریو	دو کاناله
[۶]	قیمت‌گذاری، تأمین موجودی و تخصیص کالا	✓	پیش‌بینی دینامیک موجودی	یادگیری تقویتی عمیق (ML-PPO)	همه کاناله
[۷]	استراتژی چندکاناله	—	—	مدل تحلیلی چهار سناریو	چندکاناله
[۱۰]	قیمت‌گذاری پویا و محصولات بازسازی‌شده	✓	دو هدفه: کاهش هزینه و افزایش جنبه اجتماعی	الگوریتم فراابتکاری	دو کاناله
[۲]	قیمت‌گذاری و سب‌سازی	✓	اجتناب از ریسک	بازی استکلبرگ	دو کاناله
[۳۴]	قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر یادگیری ماشین	✓	پیش‌بینی تقاضا و حساسیت قیمتی	یادگیری ماشین	چندکاناله
[۲۵]	مدل بازی چندکاناله دارو	—	—	مدل بازی چندکاناله	چندکاناله
[۱۹]	قیمت‌گذاری چنددوره‌ای با قرارداد منعطف	✓	قرارداد مشارکت درآمد منعطف	مدل تحلیلی و شبیه‌سازی	دو کاناله
[۲۶]	قیمت‌گذاری با اثر شورومینگ	—	—	مدل بازی، تحلیل سناریو	دو کاناله
[۱۸]	قیمت‌گذاری و کنترل موجودی فاسدشدنی	✓	—	یادگیری تقویتی عمیق (PPO)	دو کاناله
مقاله حاضر	قیمت‌گذاری مبتنی بر مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک	✓	برنامه‌ریزی استوار امکانی	الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی گرگ خاکستری و الگوریتم ترکیبی ژنتیک و بهینه‌سازی گرگ خاکستری)	چند کاناله

شده‌اند تا حداقل سهم بازار در میان انواع وسیله حمل‌ونقل و گروه‌های مشتری حفظ شود و جایگاه رقابتی شرکت آسیب نبیند. فرض بر این است که تقاضا تابع قطعی قیمت و زمان بوده و میان وسایل، طبقات خدماتی و کانال‌ها استقلال برقرار است. همچنین رفتار خرید مشتریان با استفاده از تابع مطلوبیت آستانه‌ای که تحت تأثیر قیمت و ویژگی‌های کانال فروش است مدل‌سازی می‌شود.

برای مدل‌سازی مسأله فوق، مجموعه‌ای از مفروضات به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- انواع وسیله نقلیه و طبقات مشتری (استراتژیک و غیر استراتژیک) هر کدام دارای کشش قیمتی و تابع مطلوبیت جداگانه‌اند.

نظر به عدم دسترسی کامل به داده‌های تاریخی، این پارامترهای به‌صورت اعداد فازی دوزنقه ای در مدل ریاضی لحاظ شده و برای کنترل مدل غیر قطعی، از روش استوار امکانی بهره گرفته شده است. از سوی دیگر، ترجیحات مشتریان و حساسیت قیمتی مختص هر کانال فروش برآورد شده و امکان تنظیم پویای قیمت بر مبنای فصل، تعطیلات و نوسانات ناشی از رویدادها نیز فراهم است.

براساس ویژگی‌های مدل فوق، مدل ریاضی در نظر گرفته شده با هدف بیشینه‌سازی کل در آمد (تفاضل سود ناشی از فروش محصولات و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با آن) در نظر گرفته شده است. در کنار تابع هدف در نظر گرفته شده، مجموعه‌ای از محدودیت‌ها طراحی

متغیرهای تصمیم

قیمت فروش محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C در دوره t $P_{v,c,t}$

میزان حجم فروخته شده محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t $B_{v,c,s,t}$

تقاضای بالفعل محصول برای وسیله نقلیه v با طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t $D_{v,c,s,t}$

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیر خطی برای مسأله قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چندکاناله تحت عدم قطعیت به شرح زیر می‌باشد.

$$\text{Max Profit} = \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t P_{v,c,t} B_{v,c,s,t} - \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t \tilde{p}_{v,c,s,t} B_{v,c,s,t} \quad (1)$$

s. t.:

$$\sum_c B_{v,c,s,t} \leq k_v, \quad \forall v, t, s \quad (2)$$

$$B_{v,c,s,t} \leq D_{v,c,s,t}, \quad \forall v, c, s, t \quad (3)$$

$$p_{v,c,t}^{\min} \leq P_{v,c,t} \leq p_{v,c,t}^{\max}, \quad \forall c, v, t \quad (4)$$

$$\sum_s \sum_t B_{v,c,s,t} \geq M_{v,c}, \quad \forall c, v \quad (5)$$

$$U_{v,c_1,s,t}(p) = \tilde{\alpha}_{s,t} - \beta_{c_1} \cdot P_{v,c,t}, \quad \forall v, c_1, s, t \quad (6)$$

$$U_{v,c_2,s,t}(p) = \tilde{\gamma}_{s,t} - \delta_{c_2} \cdot P_{v,c,t}, \quad \forall v, c_2, s, t \quad (7)$$

$$D_{v,c_1,s,t}(p) = \max(0, U_{v,c_1,s,t}(p) - \varepsilon_{c_1,s,t}), \quad \forall v, c_1, s, t \quad (8)$$

$$D_{v,c_2,s,t}(p) = \max(0, U_{v,c_2,s,t}(p) - \varepsilon_{c_2,s,t}), \quad \forall v, c_2, s, t \quad (9)$$

$$B_{v,c,s,t}, D_{v,c,s,t}, P_{v,c,t} \geq 0, \quad (10)$$

رابطه (۱) تابع هدف مدل را بیان می‌کند و به حداکثرسازی مجموع درآمد حاصل از فروش در تمام حالت‌های حمل‌ونقل، رده‌های خدمات مشتری، کانال‌های فروش و دوره‌های زمانی می‌پردازد. رابطه (۲) اطمینان می‌دهد که میزان فروش انجام شده برای هر شیوه حمل‌ونقل از ظرفیت موجود آن فراتر نرود. رابطه (۳) تضمین می‌کند که مقدار فروش از سطح تقاضای بالقوه مربوط به هر ترکیب از روش حمل‌ونقل، طبقه خدمات مشتری، کانال فروش و بازه زمانی تجاوز نکنند. رابطه (۴) قیمت هر واحد را در بازه از پیش تعیین شده محدود می‌سازد. رابطه (۵) بیانگر آن است که هر روش حمل‌ونقل و هر طبقه خدمات مشتری باید حداقل سهم بازار مورد انتظار خود را پوشش دهند. رابطه‌های (۶) و (۷) مطلوبیت مشتری را به عنوان تابعی از قیمت و ویژگی‌های کانال فروش مدل‌سازی می‌کنند و ارتباط میان قیمت، رضایت مشتری و احتمال خرید در رده‌های مختلف خدمات را نشان می‌دهند. رابطه‌های (۸) و (۹) با بهره‌گیری از توابع مطلوبیت، تقاضای بالقوه را برآورد کرده و تضمین می‌کنند که تغییرات قیمت

- افق تصمیم‌گیری در چندین روز متوالی تعریف شده است.
- کانال‌های فروش مختلف با پارامترهای مطلوبیت مختص به خود در نظر گرفته شده است.
- پارامترهای پایه مطلوبیت و هزینه‌های عملیاتی به صورت غیر قطعی و اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است.
- تقاضا به صورت تابع خطی و قطعی از قیمت مدل شده و پارامترهای آن در طول زمان تغییر می‌کنند؛ همچنین کشش قیمتی میان مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک متفاوت است.
- ظرفیت هر وسیله نقلیه ثابت فرض شده است.
- قیمت در هر روز تنها می‌تواند تا ده درصد نوسان کند و برای هر ترکیب وسیله و طبقه، محدوده مجاز قیمتی تعریف شده است.
- هر وسیله و طبقه مشتری باید مقدار حداقلی از سهم بازار را پوشش دهد تا اهداف رقابتی شرکت برآورده شود.
- براساس این فرضیات و در راستای تدوین مدل ریاضی، نمادهای زیر تعریف می‌شوند.

پارامترها

- k_v ظرفیت حمل‌ونقل وسیله نقلیه v
- $p_{v,c,t}^{\min}$ حد پایین قیمت فروش محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C در دوره t
- $p_{v,c,t}^{\max}$ حد بالای قیمت فروش محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C در دوره t
- $Q_{v,c,s,t}^{\min}$ حد پایین حجم فروش محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t
- $Q_{v,c,s,t}^{\max}$ حد بالای حجم فروش محصول توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t
- $\tilde{\alpha}_{s,t}, \tilde{\gamma}_{s,t}$ پارامترهای غیر قطعی پایه مطلوبیت برای کانال فروش S در دوره t
- $\beta_{c_1}, \delta_{c_2}$ ضریب حساسیت قیمتی برای طبقات مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک
- $\varepsilon_{c,s,t}$ آستانه مطلوبیت لازم برای خرید توسط طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t
- $M_{v,c}$ حداقل سهم بازار مورد نیاز توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C
- $\tilde{p}_{v,c,s,t}$ هزینه عملیاتی فروش توسط وسیله نقلیه v برای طبقه خدماتی مشتری C از طریق کانال فروش S در دوره t
- $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ نرخ‌های عدم قطعیت برای پارامترهای پایه مطلوبیت
- ξ وزن اهمیت تابع هدف
- η_1, η_2 هزینه جریمه عدم برآورد صحیح پارامتر پایه مطلوبیت

مدل مرتبط با رویکرد فازی بدبینانه با استفاده از مقدار انتظاری تابع هدف و نرخ عدم قطعیت (α) برای روابط فوق به شرح زیر است:

$$Max Z = E[Z] = pX - E[\tilde{\rho}]X \quad (15)$$

s. t.:

$$NEC\{aX = \tilde{d}\} \geq \alpha \quad (16)$$

$$bX \leq s \quad (17)$$

$$X \geq 0 \quad (18)$$

با توجه به توزیع احتمال فازی دوزنقه‌ای برای پارامترهای غیر قطعی، مدل کنترل شده روابط فوق، به شرح زیر است:

$$Max Z = pY - \left(\frac{\rho^1 + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{4} \right) X \quad (19)$$

s. t.:

$$aX = (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \quad (20)$$

$$bX \leq s \quad (21)$$

$$X \geq 0 \quad (22)$$

نرخ عدم قطعیت برای محدودیت‌های غیرقطعی باید متناسب با ترجیحات تصمیم‌گیرنده تعیین شود. از آنجا که تابع هدف مدل نسبت به انحراف از مقدار مورد انتظار حساسیت ندارد، راه‌حل‌های حاصل الزاماً استوار نیستند و این موضوع می‌تواند در مسائل واقعی، به‌ویژه تصمیم‌های استراتژیک، ریسک قابل توجهی ایجاد کند. برای غلبه بر این مشکل، از رویکرد برنامه‌ریزی استوار امکانی (RPP-I) استفاده می‌شود. این روش ترکیبی از مزایای برنامه‌ریزی استوار و فازی است و توانایی بالایی در مدیریت عدم قطعیت دارد. روابط زیر ساختار این مدل را نشان می‌دهند.

$$Max Z = E[Z] - \xi(Z_{(max)} - Z_{(min)}) - \eta[d^4 - (1 - \alpha)d^3 - \alpha d^4] \quad (23)$$

s. t.:

$$aX = (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \quad (24)$$

$$bX \leq s \quad (25)$$

$$Z_{(max)} = pX - \rho^1 X \quad (26)$$

$$Z_{(min)} = pX - \rho^4 X \quad (27)$$

$$E[Z] = pX - \left[\left(\frac{\rho^1 + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{4} \right) \right] X \quad (28)$$

$$X \geq 0 \quad (29)$$

به‌درستی در برآوردهای تقاضای پیش‌بینی شده لحاظ شود. رابطه (۱۰) نیز نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌نماید.

به‌طور کلی رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی برای مدیریت عدم قطعیت مرتبط با فقدان دانش کافی در رابطه با مقدار دقیق پارامترهای ورودی مسأله، ارائه می‌شوند [۳۵]. به‌دلیل عدم دسترسی و حتی عدم دستیابی به داده‌های تاریخی مورد نیاز در مرحله طراحی، داده‌ها با درنظر گرفتن داده‌های ناکافی و تجربه و دانش کارشناسان مدل می‌شوند. با توجه به ماهیت پویا و نوسانی برخی از پارامترهای مهم از جمله هزینه‌های عملیاتی و و پایه مطلوبیت در کانال‌های فروش در هر دوره، که فراتر از برنامه‌ریزی مشخص می‌شوند، پارامترهای فازی ذکر شده به عنوان داده‌های حاوی عدم قطعیت در قالب اعداد فازی دوزنقه‌ای فرموله می‌شوند [۱۵]. توجه به این نکته ضروری است که ارزیابی تقاضای دقیق برای تصمیمات بلند مدت دشوار و گاهی غیر ممکن می‌باشد، زیرا ممکن است پارامترهایی که برای آن‌ها تابع توزیع احتمال درنظر گرفته شده است، مثل داده‌های گذشته رفتار نکنند.

به‌دلیل مدیریت محدودیت‌هایی که در آن‌ها پارامترها غیرقطعی‌اند، از برنامه‌ریزی استوار امکانی استفاده شده است. این روش امکان تعیین درجه اعتماد موردنیاز برای اطمینان از برقراری محدودیت‌ها را فراهم می‌کند. در این مقاله، رویکرد فازی بدبینانه به جهت اهمیت قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چند کاناله به‌کار رفته است. شکل (۱) ساختار اعداد فازی دوزنقه‌ای را برای پارامترهای غیر قطعی مدل نشان می‌دهد.

برای بررسی مدل غیر قطعی ابتدا یک مدل پایه مطابق با روابط (۱۱) تا (۱۴) درنظر گرفته شده است که در آن p قیمت فروش، $\tilde{\rho}$ هزینه‌های عملیاتی غیر قطعی فروش، $\tilde{d}$ پارامتر پایه مطلوبیت غیر قطعی و s ظرفیت وسیله نقلیه است. همچنین a و b به عنوان ماتریس ضرایب و X به عنوان متغیر پیوسته و معادل میزان حجم فروش می‌باشند.

$$Max Z = pX - \tilde{\rho}X \quad (11)$$

s. t.:

$$aX = \tilde{d} \quad (12)$$

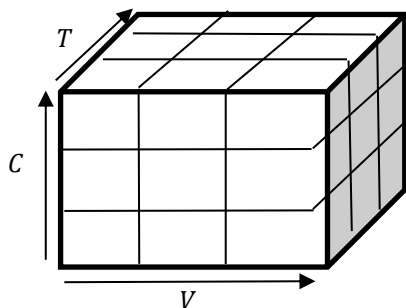
$$bX \leq s \quad (13)$$

$$X \geq 0 \quad (14)$$

مورد بررسی قرار گرفته و NP-Hard بودن آن اثبات شده است که می‌توان به تحقیقات کسوانی [۱۷]، رحمانی و پاشاپور [۱۰] و یه و همکاران [۳۱] اشاره کرد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که حداقل درجه سختی مسأله مورد بررسی در این مقاله به اندازه حداقل درجه سختی مدل‌های قیمت‌گذاری در مسائل دو/چند کاناله است. از این رو برای حل مدل ریاضی غیر قطعی بررسی شده، باید از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود. در این مقاله به جهت ارائه روش‌های حل مختلف از سه الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) و یک الگوریتم ترکیبی جدید از ژنتیک و بهینه‌سازی گرگ خاکستری به نام (GWGA) استفاده شده است. در ادامه به تشریح راه‌حل اولیه مسأله و همچنین بررسی عملکردهای الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی در این مقاله پرداخته شده است.

۴-۱. طراحی راه‌حل اولیه

یکی از مهمترین مراحل پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل بهینه‌سازی، دستیابی به یک راه‌حل اولیه مطلوب است. هرچه راه‌حل اولیه بتواند دستیابی به متغیرهای تصمیم‌گیری را تسهیل کند، می‌تواند عملکرد الگوریتم‌ها را نیز افزایش دهد. از این رو در این بخش به طراحی راه‌حل اولیه مسأله قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چند کاناله پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، راه‌حل اولیه مسأله یک ماتریس به اندازه $V \times C \times T$ می‌باشد که قیمت فروش محصول توسط وسایل نقلیه مختلف برای طبقه مشتریان مختلف در دوره‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. این مقدار به صورت تصادفی در بازه بین $[p_{v,c,t}^{min}, p_{v,c,t}^{max}]$ به دست می‌آید. ابتدا مقدار $U_{v,c_1,s,t}(p)$ با استفاده از محدودیت‌های (۳۵) و (۳۶) محاسبه می‌شود. پس از آن، مقدار $D_{v,c,s,t}(p)$ با استفاده از محدودیت‌های (۳۷) و (۳۸) محاسبه می‌شود. بخش دوم شامل اعداد تصادفی به اندازه $V \times C \times S \times T$ می‌باشد که نشان‌دهنده حجم فروش محصولات می‌باشد. داده‌ها باید به صورتی باشند که محدودیت‌های (۳۱)، (۳۲) و (۳۴) برقرار باشند. حال که مقادیر $B_{v,c,s,t}$ و $P_{v,c,t}$ به دست آمده است، تابع هدف مسأله محاسبه می‌شود.



شکل (۲). راه‌حل اولیه مسأله در بخش تعیین قیمت

برای رمزگشایی راه‌حل ارائه شده در این بخش می‌توان از الگوریتم زیر استفاده کرد:

در رابطه (۲۳)، بخش نخست بیانگر مقدار مورد انتظار تابع هدف است، بخش دوم جریمه انحراف از مقدار مورد انتظار (استواری بهینگی) و بخش سوم جریمه انحراف از پارامتر پایه مطلوبیت را نمایش می‌دهد. همچنین در روابط فوق ξ و η به ترتیب پارامترهای وزن اهمیت تابع هدف و هزینه جریمه عدم برآورد صحیح پارامتر پایه مطلوبیت می‌باشد. براساس رویکرد ذکر شده، مدل قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چند کاناله با روش برنامه‌ریزی استوار امکانی به شرح زیر است.

$$\begin{aligned} \text{Max Profit} = E[\text{Profit}] & - \xi(\text{Profit}_{(max)} - \text{Profit}_{(min)}) \\ & - \eta_1 \sum_s \sum_t [\alpha_{s,t}^4 - (1 - \bar{\alpha})\alpha_{s,t}^3] \\ & - \bar{\alpha}\alpha_{s,t}^4 \\ & - \eta_2 \sum_s \sum_t [\gamma_{s,t}^4 - (1 - \bar{\beta})\gamma_{s,t}^3] \\ & - \bar{\beta}\gamma_{s,t}^4 \end{aligned} \quad (30)$$

s. t.:

$$\sum_c B_{v,c,s,t} \leq k_v, \quad \forall v, t, s \quad (31)$$

$$B_{v,c,s,t} \leq D_{v,c,s,t}, \quad \forall v, c, s, t \quad (32)$$

$$p_{v,c,t}^{min} \leq P_{v,c,t} \leq p_{v,c,t}^{max}, \quad \forall c, v, t \quad (33)$$

$$\sum_s \sum_t B_{v,c,s,t} \geq M_{v,c}, \quad \forall c, v \quad (34)$$

$$U_{v,c_1,s,t}(p) = [(1 - \bar{\alpha})\alpha_{s,t}^3 + \bar{\alpha}\alpha_{s,t}^4] - \beta_{c_1} \cdot P_{v,c,t}, \quad \forall v, c_1, s, t \quad (35)$$

$$U_{v,c_2,s,t}(p) = [(1 - \bar{\beta})\gamma_{s,t}^3 + \bar{\beta}\gamma_{s,t}^4] - \delta_{c_2} \cdot P_{v,c,t}, \quad \forall v, c_2, s, t \quad (36)$$

$$D_{v,c_1,s,t}(p) = \max(0, U_{v,c_1,s,t}(p) - \varepsilon_{c_1,s,t}), \quad \forall v, c_1, s, t \quad (37)$$

$$D_{v,c_2,s,t}(p) = \max(0, U_{v,c_2,s,t}(p) - \varepsilon_{c_2,s,t}), \quad \forall v, c_2, s, t \quad (38)$$

$$\begin{aligned} E[\text{Profit}] & = \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t P_{v,c,t} B_{v,c,s,t} \\ & - \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t \left(\frac{\rho_{v,c,s,t}^1 + \rho_{v,c,s,t}^2 + \rho_{v,c,s,t}^3 + \rho_{v,c,s,t}^4}{4} \right) B_{v,c,s,t} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \text{Profit}_{(max)} & = \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t P_{v,c,t} B_{v,c,s,t} \\ & - \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t \rho_{v,c,s,t}^1 B_{v,c,s,t} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \text{Profit}_{(min)} & = \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t P_{v,c,t} B_{v,c,s,t} \\ & - \sum_v \sum_c \sum_s \sum_t \rho_{v,c,s,t}^4 B_{v,c,s,t} \end{aligned} \quad (41)$$

$$B_{v,c,s,t}, D_{v,c,s,t}, P_{v,c,t} \geq 0 \quad (42)$$

۴. الگوریتم‌های فراابتکاری

مسأله قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین دو/چند کاناله در مقالات مختلفی

Input Sets, Parameters

Output Decision Variables

Create Initial Solution $P_{v,c,t} = \{V * C * T\}$

for c, v, t, s

Calculate $U_{v,c_1,s,t}(p) = [(1 - \bar{\alpha})\alpha_{s,t}^3 + \bar{\alpha}\alpha_{s,t}^4] - \beta_{c_1} \cdot P_{v,c,t}$ and $U_{v,c_2,s,t}(p) = [(1 - \bar{\beta})\gamma_{s,t}^3 + \bar{\beta}\gamma_{s,t}^4] - \delta_{c_2} \cdot P_{v,c,t}$

Calculate $D_{v,c,s,t}(p) = \max(0, U_{v,c,s,t}(p) - \varepsilon_{c,s,t})$

Calculate $\max_{v,c,s,t} B_{v,c,s,t} \mid \sum_c B_{v,c,s,t} \leq k_v, B_{v,c,s,t} \leq D_{v,c,s,t}, \text{ and } \sum_s \sum_t B_{v,c,s,t} \geq M_{v,c}$

End for

Calculate $E[\text{Profit}], \text{Profit}_{(\max)}, \text{Profit}_{(\min)}$ by Eqs. (39) – (41)

Calculate objective function

Display Profit and Decision variables

شکل (۳). الگوریتم رمزگشایی راه‌حل اولیه مسأله

جهش با اعمال تغییرات کوچک و تصادفی نقش حیاتی در جلوگیری از هم‌گرایی زودرس و حفظ تنوع ژنتیکی دارد. شکل (۴) شبه‌کد الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

عملگر ترکیب به‌کار رفته در الگوریتم در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بخشی از ژن‌های کروموزوم والد ۱ و والد ۲ انتخاب شده و با یکدیگر مبادله می‌شوند تا دو کروموزوم فرزند ایجاد گردد. شکل (۶) نیز عملگر جهش مورد استفاده در الگوریتم را نشان می‌دهد. براساس این شکل، در بخش مربوط به عملگر جهش، قسمتی از کروموزوم والد انتخاب شده و ژن‌های متناظر آن به‌طور کامل دچار جهش می‌شوند؛ به این ترتیب ژن‌های جدید تولید شده و کروموزوم فرزند شکل می‌گیرد.

۳-۴. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری یک الگوریتم فراابتکاری جمعیت‌محور است که بر پایه بازآفرینی رفتار گروهی و ساختار سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری طراحی شده است. در این الگوریتم، مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها در قالب چهار سطح آلفا، بتا، دلتا و امگا سازمان‌دهی می‌شوند و سه سطح بالاتر به عنوان برترین راه‌حل‌های فعلی، روند حرکت سایر اعضای جمعیت را هدایت می‌کنند.

پس از طراحی راه‌حل اولیه مسأله، در ادامه به تشریح الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته شده است.

۲-۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، بر مبنای اصول زیست‌شناسی تکاملی و نظریه انتخاب طبیعی توسعه یافته است. این الگوریتم که ریشه در کارهای کلاسیک جان هالند دارد، با ایجاد یک چارچوب جستجوی تصادفی - سیستماتیک، قادر است در فضاهاى جستجوی بسیار بزرگ، نامنظم و غیرمشتق‌پذیر، به راه‌حل‌های باکیفیت نزدیک به بهینه جهانی دست یابد. در این رویکرد، هر راه‌حل بالقوه به‌صورت یک بردار کدگذاری شده (کروموزوم) نمایش داده می‌شود و مجموعه‌ای از این بردارها جمعیت ابتدایی الگوریتم را شکل می‌دهد. تکامل این جمعیت در طی نسل‌های متوالی از طریق مکانیسم‌های کلیدی شامل انتخاب مبتنی بر برازندگی، ترکیب ژنتیکی و جهش صورت می‌گیرد. اپراتور انتخاب، احتمال بقا و تکثیر راه‌حل‌های مؤثرتر را افزایش داده و در نتیجه فشار انتخابی لازم برای حرکت جمعیت به سمت نواحی مطلوب فضای جستجو را فراهم می‌کند. عملیات تقاطع با ترکیب ساختار ژنتیکی والدین، موجب ایجاد تنوع مؤثر و کاوش عمیق‌تر در فضای جستجو می‌شود. همچنین اپراتور

Initialize population $P(0)$ with N randomly generated chromosomes

Evaluate fitness $F(x)$ for each chromosome in $P(0)$

$t \leftarrow 0$

for $t = 1: \max$ it do

Select parent chromosomes from $P(t)$ based on fitness

Apply crossover operator to selected parents with probability pc (Fig. 5)

Generate intermediate offspring set $C(t)$

Apply mutation operator to chromosomes in $C(t)$ with probability pm (Fig. 6)

Produce mutated offspring $M(t)$

Form next generation

$P(t + 1) \leftarrow M(t)$

Evaluate fitness of new population

Evaluate fitness $F(x)$ for each chromosome in $P(t + 1)$

$t \leftarrow t + 1$

end for

Return the chromosome with the highest fitness in $P(t)$

شکل (۴). شبه‌کد الگوریتم ژنتیک

ژن ۶	ژن ۵	ژن ۴	ژن ۳	ژن ۲	ژن ۱	
۰.۱۹	۰.۳۵	۰.۳۰	۰.۷۷	۰.۲۷	۰.۳۶	والد ۱
۰.۶۵	۰.۹۲	۰.۸۵	۰.۲۳	۰.۱۷	۰.۸۳	والد ۲

ژن ۶	ژن ۵	ژن ۴	ژن ۳	ژن ۲	ژن ۱	
۰.۱۹	۰.۹۲	۰.۸۵	۰.۷۷	۰.۲۷	۰.۳۶	فرزند ۱
۰.۶۵	۰.۳۵	۰.۳۰	۰.۲۳	۰.۱۷	۰.۸۳	فرزند ۲

شکل (۵). عملگر ترکیب دو نقطه‌ای

ژن ۶	ژن ۵	ژن ۴	ژن ۳	ژن ۲	ژن ۱	
۰.۱۹	۰.۳۵	۰.۳۰	۰.۷۷	۰.۲۷	۰.۳۶	والد

ژن ۶	ژن ۵	ژن ۴	ژن ۳	ژن ۲	ژن ۱	
۰.۱۹	۰.۹۲	۰.۸۵	۰.۷۷	۰.۲۷	۰.۳۶	فرزند

شکل (۶). عملگر جهش دو نقطه‌ای

می‌گردد. ساختار ساده، تعداد محدود پارامترها و توانایی ایجاد تعادل میان جستجوی گسترده و تمرکز بر نواحی امیدبخش، از ویژگی‌های شاخص این الگوریتم به‌شمار می‌آید. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بدون نیاز به مشتق‌گیری از تابع هدف، روند جستجو را به‌صورت تطبیقی هدایت کرده و مسیر همگرایی به‌سمت پاسخ‌های باکیفیت‌تر را فراهم می‌کند. شکل (۷) شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری را نشان می‌دهد.

منطق عملکرد این الگوریتم از سه فرآیند اصلی الهام گرفته شده است: جستجوی طعمه، محاصره آن و اجرای حمله نهایی. این فرآیندها طی روابط ریاضی مشخصی مدل‌سازی می‌شوند و با کمک ضرایب کنترلی که در طول زمان کاهش می‌یابند، الگوریتم قادر است به‌طور تدریجی از مرحله اکتشاف فضای جستجو به مرحله بهره‌برداری نواحی مناسب حرکت کند. همچنین، موقعیت هر گرگ براساس ترکیبی از موقعیت‌های آلفا، بتا و دلتا به‌روزرسانی می‌شود؛ موضوعی که موجب همگرایی تدریجی جمعیت به‌سوی نقاط مطلوب در فضای جستجو

Initialize the population of grey wolves X_i ($i = 1, 2, \dots, N$)

Initialize maximum number of iterations $Max\ it$

Evaluate fitness of each search agent

Identify alpha (best), beta (second best), and delta (third best) wolves

for $t = 1: max\ it$ do

for each search agent i do

Update coefficient vectors A and C

Compute distances:

$$D_\alpha = |C_1 * X_\alpha - X_i|$$

$$D_\beta = |C_2 * X_\beta - X_i|$$

$$D_\delta = |C_3 * X_\delta - X_i|$$

Compute candidate positions:

$$X_1 = X_\alpha - A_1 * D_\alpha$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 * D_\beta$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 * D_\delta$$

Update wolf position:

$$X_i = (X_1 + X_2 + X_3) / 3$$

end for

Evaluate fitness of all wolves

Update $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ based on new fitness values

$t \leftarrow t + 1$

end for

Return X_α as the best found solution

شکل (۷). شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

توازن بهینه‌تری میان اکتشاف و بهره‌برداری شده و سرعت و کیفیت همگرایی را در فرآیند جستجو بهبود می‌بخشد. این تلفیق باعث می‌شود الگوریتم نهایی علاوه بر رفتار تطبیقی و ساده GWO، از قدرت جهش و بازترکیب ژنتیک نیز بهره‌مند شده و در نتیجه، توانایی بیشتری در پیمایش فضای جستجو و دستیابی به پاسخ‌های باکیفیت‌تر داشته باشد. در شکل (۸) شبه کد این الگوریتم نشان داده شده است.

۴-۵. تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری

روش تاگوچی یک رویکرد طراحی آزمایش‌ها است که با هدف بهینه‌سازی پارامترهای یک سیستم و کاهش تأثیر عوامل غیرقابل کنترل توسعه یافته است. این روش با بهره‌گیری از آرایه‌های متعامد، امکان بررسی سیستماتیک ترکیب‌های مختلف پارامترها را با تعداد آزمایش‌های بسیار کمتر نسبت به روش‌های سنتی فراهم می‌سازد [۳۶]. در چارچوب روش تاگوچی، کیفیت پاسخ یک سیستم از طریق نسبت سیگنال به نویز (S/N Ratio) سنجیده می‌شود؛ معیاری که میزان پایداری و عملکرد مطلوب پارامترها را در برابر تغییرات ناخواسته نشان می‌دهد.

۴-۴. الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی گرگ خاکستری و ژنتیک
الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی گرگ خاکستری و الگوریتم ژنتیک (GWGO) رویکردی فراابتکاری است که با هدف تقویت توان جستجو و بهبود همگرایی، ویژگی‌های کلیدی دو الگوریتم را در یک چارچوب مشترک ادغام می‌کند. در این ساختار، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به‌عنوان موتور اصلی جستجو عمل کرده و رفتار سلسله مراتبی و فرآیندهای محاصره و حمله آن، روند حرکت جمعیت را هدایت می‌کند. با این حال، برای افزایش تنوع جمعیت و جلوگیری از گیر افتادن در نقاط بهینه محلی، از سازوکارهای تکاملی الگوریتم ژنتیک مانند انتخاب، جهش و گاهی کراس‌اور استفاده می‌شود. در الگوریتم GWGO، ابتدا جمعیت اولیه توسط بهینه‌سازی گرگ خاکستری تکامل یافته و موقعیت افراد براساس سه گرگ برتر (آلفا، بتا و دلتا) به‌روزرسانی می‌شود. سپس در مرحله‌ای تکمیلی، عملگرهای ژنتیک بر روی بخشی از جمعیت یا کل آن اعمال می‌گردند تا تنوع ژنتیکی افزایش یابد و امکان کشف نواحی جدید در فضای جستجو فراهم شود. به‌کارگیری این دو سازوکار در کنار یکدیگر موجب ایجاد

Initialize population X_i ($i = 1, 2, \dots, N$)

Initialize MaxIter

Evaluate fitness of all individuals

Identify α, β, δ wolves

for $t = 1$: Max it do

for each individual i do

Update coefficient vectors A and C

Compute distances:

$$D_\alpha = |C_1 * X_\alpha - X_i|$$

$$D_\beta = |C_2 * X_\beta - X_i|$$

$$D_\delta = |C_3 * X_\delta - X_i|$$

Compute candidate positions:

$$X_1 = X_\alpha - A_1 * D_\alpha$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 * D_\beta$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 * D_\delta$$

Update wolf position:

$$X_i = (X_1 + X_2 + X_3) / 3$$

end for

Evaluate fitness of all individuals

Select a subset of population based on fitness

Apply crossover operator to selected parents with probability p_c (Fig. 5)

Apply mutation operator to chromosomes in $C(t)$ with probability p_m (Fig. 6)

Evaluate fitness after GA operators

Update $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ based on new fitness values

$t \leftarrow t + 1$

end for

Return X_α as best obtained solution

شکل (۸). شبه کد الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی گرگ خاکستری و ژنتیک

برای الگوریتم GA برابر با ۰/۰۱۶٪، برای الگوریتم GWO برابر با ۰/۰۰۹٪ و برای الگوریتم GWGO برابر با ۰/۰۰۲٪ است. در بین این الگوریتم‌ها نیز، GWGO عملکرد قابل قبولی ارائه داده است. شکل (۹) همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری را در دستیابی به سود کسب شده در مثال عددی سائز کوچک نشان می‌دهد.

جدول (۳). حدود بازه‌ای پارامترهای مسأله براساس تابع توزیع یکنواخت

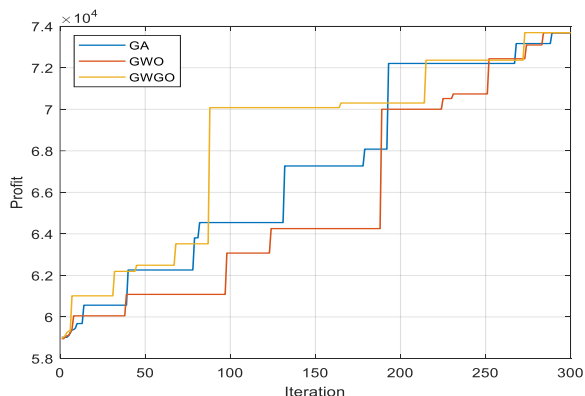
پارامتر	حدود بازه ای	پارامتر	حدود بازه ای	
k_v	$\sim U[40,150]$	β_{c_1}	0.670	
$p_{v,c,t}^{min}$	$\sim U[20,100]$	δ_{c_2}	0.380	
$p_{v,c,t}^{max}$	$1.1 * p_{v,c,t}^{min}$	$M_{v,c}$	$\sim U[0.1,0.3]$	
$Q_{v,c,s,t}^{min}$	$\sim U[10,50]$	$\varepsilon_{c,s,t}$	$\sim U[5,10]$	
$Q_{v,c,s,t}^{max}$	$1.1 * Q_{v,c,s,t}^{min}$	$\bar{\alpha}, \bar{\beta}$	0.5	
η_1, η_2	2	ξ	3	
پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
$\tilde{\alpha}_{s,t}, \tilde{\gamma}_{s,t}$	$\sim U[50,60]$	$\sim U[60,80]$	$\sim U[80,90]$	$\sim U[90,100]$
$\tilde{\rho}_{v,c,s,t}$	$\sim U[1,2]$	$\sim U[2,3]$	$\sim U[3,4]$	$\sim U[4,5]$

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول فوق، مقدار بهینه تابع هدف به‌دست آمده در نرخ‌های عدم قطعیت برای پارامترهای پایه مطلوبیت که برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است، مطابق با جدول (۴) می‌باشد.

در ادامه به ارائه خروجی‌های حاصل از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS پرداخته شده است. تقاضای بالقول، قیمت به‌دست آمده و حجم فروش به‌دست آمده به ترتیب در جداول (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

جدول (۴). سود کسب شده و زمان حل روش‌های حل مختلف برای

روش حل	مقدار سود کسب شده	زمان حل (ثانیه)
GAMS	۷۳۶۹۲/۴۶۵	۵۹/۱۲
GA	۷۳۶۸۰/۴۱۵	۱۴/۱۵
GWO	۷۳۶۸۵/۴۹۱	۱۵/۱۸
GWGO	۷۳۶۹۰/۳۴۵	۱۶/۲۰



شکل (۹). همگرایی الگوریتم‌ها فراابتکاری در دستیابی به جواب نزدیک به بهینه

در حوزه الگوریتم‌های فراابتکاری، تنظیم مناسب پارامترهای اولیه نقش مهمی در سرعت همگرایی، کیفیت راه‌حل و پایداری جستجو دارد. از آنجا که این الگوریتم‌ها اغلب دارای پارامترهای متعدد بوده و آزمون دستی همه حالات ممکن بسیار زمان‌بر است، روش تاگوجی می‌تواند رویکردی ساختارمند و کارآمد برای تعیین ترکیب بهینه پارامترها ارائه دهد. با استفاده از آرایه‌های متعامد، می‌توان تأثیر هر پارامتر را بر عملکرد الگوریتم ارزیابی و بهترین سطح هر پارامتر را انتخاب کرد، بدون آنکه نیاز به جستجوی کامل در فضای بزرگ تنظیمات وجود داشته باشد. جدول (۲) سطوح عامل بهینه پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی در این مقاله را برای مسأله قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چندکاناله تحت عدم قطعیت نشان می‌دهد.

جدول (۲). سطوح عامل بهینه برای الگوریتم‌های فراابتکاری

پارامترها	GA	GWO	GWGO
$Max\ it$	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
$N\ pop$	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
p_m	۰/۸	-	۰/۹
p_c	۰/۰۶	-	۰/۰۵
A	-	۰/۶	۰/۴
C	-	۰/۹	۰/۹

۵. تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی

در بخش حاضر از مقاله به تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی مختلف در اندازه‌های مختلف پرداخته شده است. برای این امر ابتدا یک مثال عددی در سائز کوچک طراحی و خروجی‌های مسأله با استفاده از نرم‌افزار GAMS و سولور Baron و همچنین سه الگوریتم GA، GWO و GWGO تحلیل شده است. در ادامه به تحلیل حساسیت مثال عددی در سائز کوچک پرداخته شده و در انتهای این بخش، ۱۵ مثال عددی در اندازه‌های مختلف طراحی و مقایسات آماری بین سه الگوریتم پیشنهادی جهت انتخاب کاراترین الگوریتم صورت گرفته است.

۵-۱. اعتبارسنجی مدل ریاضی

در بخش حاضر از تحقیق به‌منظور اعتبار سنجی مدل ریاضی و همچنین بررسی خروجی‌های مسأله، یک مثال عددی شامل سه وسیله نقلیه (تریلی، هواپیما، کشتی)، دو نوع طبقه خدمات مشتریان (مشتریان استراتژیکی و غیر استراتژیکی)، دو نوع کانال فروش (آنلاین و آفلاین) و سه دوره زمانی (۳ روز) در نظر گرفته شده است. حدود بازه‌ای پارامترهای مسأله طبق تابع توزیع یکنواخت به‌صورت تصادفی در جدول (۳) نشان داده شده است.

مطابق با جدول (۴) مشاهده می‌گردد که مقدار بهینه تابع هدف که از طریق نرم‌افزار GAMS به‌دست آمده است برابر با ۷۳۶۹۲/۴۶۵ واحد در مدت زمان ۵۹/۱۲ ثانیه است. در حالی که الگوریتم‌های فراابتکاری در مدت زمان بسیار کوتاه‌تر به جواب نزدیک به بهینه دست یافته‌اند. با بررسی درصد اختلاف نسبی مشاهده می‌گردد که این مقدار

جدول (۵). تقاضای بالفعل به‌دست آمده از حل مثال عددی سایز کوچک

روش حمل‌ونقل	طبقه خدمات مشتریان	نوع کانال فروش	روز ۱	روز ۲	روز ۳
تریلی	غیر استراتژیک	آنلاین	۴۸.۸۹۴	۴۴.۴۷۱	۵۹.۲۵۲
		آفلاین	۴۹.۶۳۲	۵۳.۸۰۵	۵۸.۶۹۴
	استراتژیک	آنلاین	۶۵.۸۰۸	۴۸.۶۹۰	۷۵.۸۱۸
		آفلاین	۵۹.۸۴۳	۴۵.۲۹۳	۷۳.۰۷۷
کشتی	غیر استراتژیک	آنلاین	۳۷.۳۲۳	۹.۴۳۶	۳۹.۱۶۵
		آفلاین	۳۸.۰۶۰	۱۸.۷۷۱	۳۸.۶۰۷
	استراتژیک	آنلاین	۴۴.۳۶۳	۵۱.۸۳۴	۷۳.۶۹۲
		آفلاین	۳۸.۳۹۸	۴۸.۴۳۷	۷۰.۹۵۱
هواپیما	غیر استراتژیک	آنلاین	۳۳.۶۵۵	۵۲.۳۱۸	۵۷.۷۱۳
		آفلاین	۳۴.۳۹۲	۶۱.۶۵۲	۵۷.۱۵۵
	استراتژیک	آنلاین	۵۵.۱۳۷	۶۲.۷۶۵	۶۶.۰۳۴
		آفلاین	۴۹.۱۷۳	۵۹.۳۶۸	۶۳.۲۹۳

جدول (۶). قیمت فروش به‌دست آمده از حل مثال عددی سایز کوچک

طبقه خدمات مشتریان	تریلی	کشتی	هواپیما
غیر استراتژیکی	روز ۱ = ۴۸.۵۰۰	روز ۱ = ۶۵.۷۱۹	روز ۱ = ۷۱.۱۷۸
	روز ۲ = ۴۷.۷۱۵	روز ۲ = ۹۹.۸۴۹	روز ۲ = ۳۶.۰۳۸
	روز ۳ = ۴۱.۷۱۷	روز ۳ = ۷۱.۶۰۸	روز ۳ = ۴۴.۰۰۷
	روز ۱ = ۵۲.۷۸۵	روز ۱ = ۱۰۹.۲۲۰	روز ۱ = ۸۰.۸۶۶
استراتژیکی	روز ۲ = ۹۷.۳۵۲	روز ۲ = ۸۹.۰۷۸	روز ۲ = ۶۰.۳۱۱
	روز ۳ = ۲۷.۹۰۶	روز ۳ = ۳۳.۵۰۱	روز ۳ = ۵۳.۶۵۴

جدول (۷). حجم فروش به‌دست آمده از حل مثال عددی سایز کوچک

روش حمل‌ونقل	طبقه خدمات مشتریان	نوع کانال فروش	روز ۱	روز ۲	روز ۳
تریلی	غیر استراتژیک	آنلاین	-	۱۰.۳۱۰	۵۹.۰۰۰
		آفلاین	-	۱۳.۷۰۷	۵۸.۶۹۴
	استراتژیک	آنلاین	۵۹.۰۰۰	۴۸.۶۹۰	-
		آفلاین	۵۹.۰۰۰	۴۵.۲۹۳	۰.۳۰۶
کشتی	غیر استراتژیک	آنلاین	۳۷.۳۲۳	۹.۴۳۶	۳۹.۱۶۵
		آفلاین	۳۸.۰۶۰	۱۸.۷۷۱	۳۸.۶۰۷
	استراتژیک	آنلاین	۴۴.۳۶۳	۵۱.۸۳۴	۷۳.۶۹۲
		آفلاین	۳۸.۳۹۸	۴۸.۴۳۷	۷۰.۹۵۱
هواپیما	غیر استراتژیک	آنلاین	۳۳.۶۵۵	۳۸.۲۳۵	۳۴.۹۶۶
		آفلاین	۳۴.۳۹۲	۴۱.۶۳۲	۳۷.۷۰۷
	استراتژیک	آنلاین	۵۵.۱۳۷	۶۲.۷۶۵	۶۶.۰۳۴
		آفلاین	۴۹.۱۷۳	۵۹.۳۶۸	۶۳.۲۹۳

براساس داده‌های جداول (۵) تا (۷)، می‌توان جمع‌بندی جامعی از رفتار تقاضا، قیمت و حجم فروش ارائه کرد. ابتدا، تقاضای بالفعل نشان می‌دهد که مشتریان استراتژیک همواره تمایل بیشتری به استفاده از روش‌های حمل‌ونقل تریلی و هواپیما دارند و تقاضای آن‌ها نسبت به روزهای مختلف نوسانات قابل توجهی دارد؛ به ویژه روز دوم که اغلب کاهش و روز سوم که افزایش تقاضا مشاهده می‌شود. در مقابل، مشتریان غیر استراتژیک و به‌ویژه استفاده از کشتی در روز دوم تقاضای

بسیار پایینی دارند، که احتمالاً ناشی از محدودیت کارایی یا جذابیت کمتر این روش در آن روز است. همچنین، کانال‌های فروش آنلاین و آفلاین در روش‌های حمل تریلی و هواپیما تقریباً یکسان عمل می‌کنند، اما در کشتی تفاوت چشم‌گیر وجود دارد و مشتریان غیر استراتژیک ترجیح می‌دهند آفلاین خرید کنند. در تحلیل قیمت فروش، بالاترین قیمت‌ها مربوط به حمل دریایی و مشتریان استراتژیک است که نشان‌دهنده ارزش بالای این خدمات برای مشتریان مهم است. قیمت‌ها

به‌طوری که برای مشتریان غیر استراتژیک از ۷۲۱۷۳.۹۴۲ به ۷۵۱۵۷.۰۶۹ و برای مشتریان استراتژیک از ۷۱۲۰۷.۵۳۶ به ۷۶۱۷۷.۳۹۴ افزایش یافته است. از این رو مشتریان استراتژیک نقش بیشتری در افزایش سود ایفا می‌کنند. این روند نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری سیستم در مدیریت تقاضا و قیمت‌گذاری و اهمیت تمرکز بر مشتریان استراتژیک در شرایط عدم قطعیت بالاست.

در تحلیل دیگر به بررسی تغییرات سود کسب شده به‌ازای ظرفیت‌های مختلف حمل‌ونقل پرداخته شده است. در این تحلیل ظرفیت حمل‌ونقل ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ کمتر و بیشتر از مقدار ظرفیت واقعی در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰) این تغییرات سود را با در نظر گرفتن نرخ عدم قطعیت برابر با ۰/۵ نشان می‌دهد.

با بررسی دقیق داده‌ها، می‌توان دریافت که ظرفیت حمل‌ونقل یکی از مؤثرترین عوامل تعیین‌کننده سود شرکت است و رابطه آن تقریباً خطی با سود برقرار است. کاهش ظرفیت باعث محدود شدن توانایی شرکت در پاسخ‌گویی به تقاضای بازار می‌شود و به همین دلیل سود به شکل محسوس کاهش می‌یابد؛ برای مثال کاهش ۳۰٪ ظرفیت، سود را به ۶۳۷۵۵.۵۶۲ کاهش می‌دهد که بیش از ۱۳٪ کمتر از سود بدون تغییر ظرفیت است. این کاهش نه تنها ناشی از کمبود عرضه نسبت به تقاضاست، بلکه نشان‌دهنده اثر غیرمستقیم بر قیمت‌گذاری و امکان از دست رفتن مشتریان بالقوه نیز هست. از سوی دیگر، افزایش ظرفیت حمل‌ونقل، علاوه بر پاسخ سریع‌تر به تقاضا، به شرکت اجازه می‌دهد از فرصت‌های بازار حداکثر بهره‌برداری را داشته باشد. افزایش ۳۰٪ ظرفیت، سود را به ۷۹۰۱۸.۵۷۱ می‌رساند که بیش از ۷٪ بالاتر از حالت بدون تغییر است، و این نشان می‌دهد که توان عملیاتی بیشتر می‌تواند اثر مستقیمی بر تحقق تقاضای بالقوه و افزایش درآمد داشته باشد. علاوه بر این، شیب تغییرات سود نسبت به ظرفیت نشان‌دهنده بازده افزایشی نسبی است: هر ۱۰٪ افزایش ظرفیت تقریباً ۲-۳٪ به سود اضافه می‌کند، که بیانگر ارزش راهبردی سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت و مدیریت زنجیره تأمین است. بنابراین، مدیریت بهینه ظرفیت حمل‌ونقل نه تنها برای پاسخ به تقاضای فعلی ضروری است، بلکه به عنوان یک اهرم کلیدی برای بهبود سودآوری و کاهش ریسک ناشی از محدودیت‌های عملیاتی در شرایط بازار غیرقطعی عمل می‌کند.

در روز دوم معمولاً افزایش چشم‌گیری دارند، به‌ویژه در تریلی و کشتی استراتژیک، که ممکن است ناشی از کمبود ظرفیت یا افزایش تقاضای پیش‌بینی نشده باشد. برای مشتریان غیر استراتژیک، قیمت‌ها معمولاً پایین‌تر و با نوسان کمتر هستند، اما استثنائاتی مانند کشتی در روز دوم وجود دارد که قیمت به شکل قابل توجهی بالا رفته و حجم فروش را کاهش داده است. تحلیل حجم فروش نشان می‌دهد که محدودیت ظرفیت یا تصمیمات استراتژیک باعث شده است برخی تقاضاها محقق نشوند؛ به عنوان مثال، تریلی استراتژیک آنلاین در روز سوم تنها ۰/۳۰۶ واحد فروش داشته است. به‌طور کلی، تریلی و هواپیما برای مشتریان استراتژیک بیشترین حجم فروش را دارند، در حالی که کشتی برای مشتریان غیر استراتژیک نوسانات بیشتری دارد. ارتباط بین تقاضا، قیمت و حجم فروش نیز مشهود است: افزایش قیمت معمولاً با کاهش حجم فروش همراه است، اما مشتریان استراتژیک نسبت به تغییرات قیمت انعطاف کمتری دارند و حجم فروش آن‌ها بالا باقی می‌ماند. این جمع‌بندی نشان می‌دهد که ترکیب روش حمل‌ونقل، نوع مشتری و کانال فروش تعیین‌کننده اصلی موفقیت فروش و تحقق تقاضا است.

در نهایت، میانگین حجم فروش در میان مشتریان استراتژیک برابر با ۵۲/۶۹۰ بوده، در حالی که این مقدار برای مشتریان غیراستراتژیک ۳۳.۹۷۸ است. همچنین میانگین قیمت فروش برای مشتریان استراتژیک ۶۶/۰۷۴ و برای مشتریان غیراستراتژیک ۵۸/۴۸۱ به‌دست آمده است. این نشان می‌دهد که اهمیت مشتریان استراتژیکی بیشتر از مشتریان غیر استراتژیکی است.

۵-۲. تحلیل حساسیت

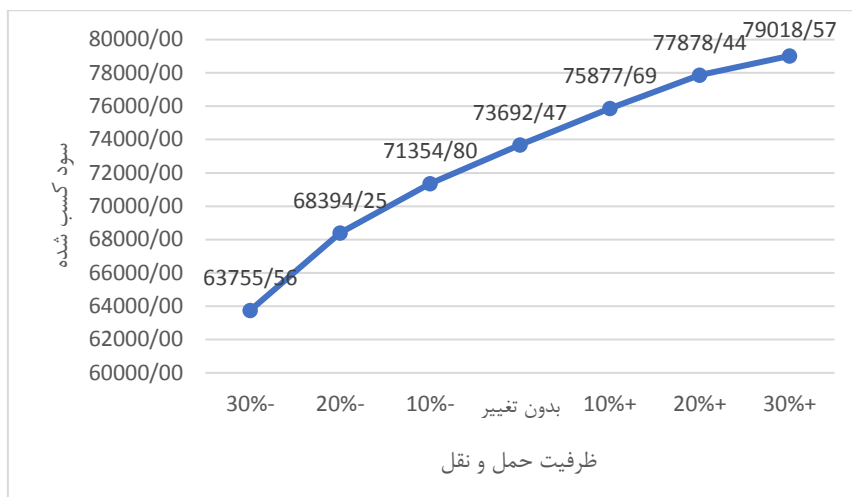
پس از اعتبارسنجی مدل ریاضی، در این بخش به تحلیل حساسیت مدل ریاضی تحت پارامترهای مختلف پرداخته شده است. از آنجایی که مدل در نظر گرفته شده به‌صورت غیر قطعی بوده و از روش برنامه‌ریزی استوار امکانی جهت کنترل مدل استفاده شده است، ابتدا به بررسی تغییرات سود کسب شده در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت پرداخته شده است.

جدول (۸) تغییرات سود کسب شده را در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت برای مشتریان استراتژیکی و غیر استراتژیکی نشان می‌دهد.

نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد که با افزایش نرخ عدم قطعیت برای هر دو گروه مشتریان، سود به‌طور یکنواخت و پیوسته افزایش می‌یابد.

جدول (۸). مقدار سود کسب شده در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت

α (نرخ عدم قطعیت برای مشتریان غیر استراتژیکی)	سود کسب شده	β (نرخ عدم قطعیت برای مشتریان استراتژیکی)	سود کسب شده
۰.۱	۷۲۱۷۳.۹۴۲	۰.۱	۷۱۲۰۷.۵۳۶
۰.۲	۷۲۵۵۱.۷۴۴	۰.۲	۷۱۸۲۸.۷۶۸
۰.۳	۷۲۹۳۱.۲۷۴	۰.۳	۷۲۴۵۰.۰۰۱
۰.۴	۷۳۳۱۲.۵۳۱	۰.۴	۷۳۰۷۱.۲۳۳
۰.۵	۷۳۶۹۲.۴۶۵	۰.۵	۷۳۶۹۲.۴۶۵
۰.۶	۷۴۰۶۰.۲۵۰	۰.۶	۷۴۳۱۳.۶۹۷
۰.۷	۷۴۴۲۵.۴۳۲	۰.۷	۷۴۹۳۴.۹۳۰
۰.۸	۷۴۷۹۱.۲۴۸	۰.۸	۷۵۵۵۶.۱۶۲
۰.۹	۷۵۱۵۷.۰۶۹	۰.۹	۷۶۱۷۷.۳۹۴



شکل (۱۰). تغییرات سود کسب شده در ظرفیت‌های مختلف حمل و نقل

۱۰۱.۷۴۳ کندترین الگوریتم است. به‌ویژه در مسائل بزرگ‌تر (نمونه‌های ۱۰ تا ۱۵)، اختلاف زمانی بین الگوریتم‌ها بیشتر می‌شود و نشان می‌دهد که پیچیدگی محاسباتی GWO با افزایش اندازه مسئله رشد بیشتری دارد. این دو روند متضاد بیانگر یک تجارت‌آف (Trade-off) روشن میان سرعت و کیفیت است: GA سریع‌تر ولی با دقت کمتر، و GWO کندتر ولی با کیفیت حل بالاتر عمل می‌کند. انتخاب الگوریتم به اولویت تصمیم‌گیرنده بستگی دارد؛ اگر سرعت مهم‌تر باشد GA مناسب‌تر است، اما اگر کیفیت و نزدیکی به بهترین پاسخ اهمیت بالاتری داشته باشد، GWO گزینه برتر است. PSO در هر دو بُعد در حد میانی قرار می‌گیرد و ترکیبی متعادل از زمان و کیفیت ارائه می‌دهد. در مجموع، تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که GWO بهترین انتخاب برای مسائل حساس به کیفیت پاسخ و GA مناسب‌ترین انتخاب برای کاربردهای حساس به زمان اجرا است، در حالی که PSO یک تعادل مناسب بین این دو فراهم می‌کند.

شکل (۱۱) مقایسه‌ای بین میانگین سود کسب شده و زمان حل بین الگوریتم‌های فراابتکاری را نشان می‌دهد.

جدول (۹). اندازه مسائل نمونه طراحی شده مختلف

مسئله نمونه	$(V * C * S * T)$
۱	3 * 2 * 2 * 3
۲	3 * 3 * 3 * 4
۳	3 * 3 * 3 * 5
۴	4 * 4 * 3 * 6
۵	4 * 4 * 4 * 8
۶	5 * 5 * 6 * 10
۷	5 * 5 * 6 * 12
۸	6 * 6 * 8 * 14
۹	6 * 6 * 8 * 16
۱۰	7 * 7 * 10 * 18
۱۱	8 * 8 * 10 * 20
۱۲	9 * 9 * 12 * 22
۱۳	10 * 10 * 15 * 24
۱۴	12 * 12 * 18 * 27
۱۵	15 * 15 * 20 * 30

۳-۵. تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی در اندازه‌های بزرگ

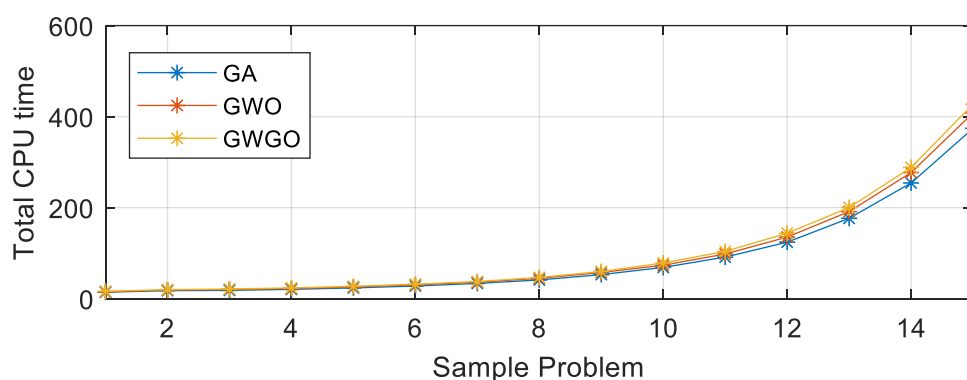
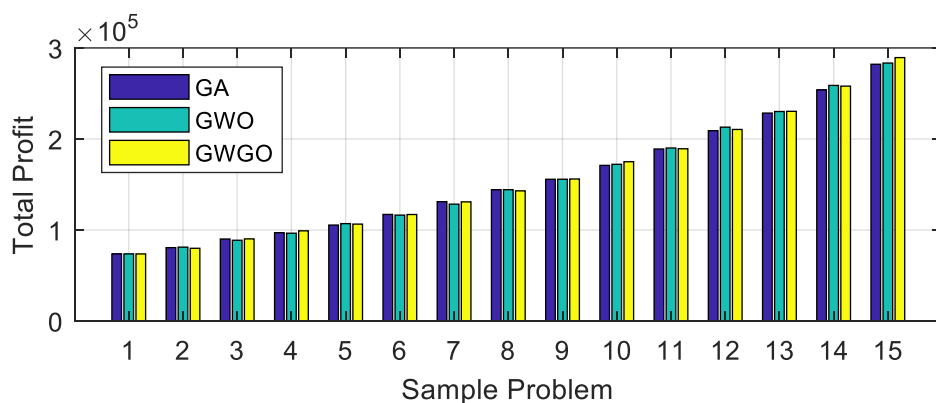
با توجه به NP-Hard بودن مدل ریاضی و همچنین عدم کارایی مطلوب نرم‌افزار GAMS در حل مسائل سایز بزرگ‌تر، از الگوریتم‌های GA، GWO و GWGO استفاده شده است. کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسئله نمونه در سایز کوچک بررسی شد و نتایج نشان داد که عملکرد این الگوریتم‌ها در مقایسه با نرم‌افزار GAMS بسیار بالا بوده به‌طوری که زمان حل بیش از ۴ برابر کاهش یافته است. از این رو در این بخش از این الگوریتم‌ها برای حل مثال‌های عددی در اندازه‌های بزرگ‌تر استفاده شده است. اندازه مسائل نمونه مختلف در جدول (۹) نشان داده شده است. همچنین مقدار پارامترهای به‌کار رفته در هر مسئله نمونه مطابق با حدود بازه‌ای ارائه شده در جدول (۳) می‌باشد. همچنین کلیه نتایج ارائه شده در این بخش، بهترین نتیجه کسب شده از اجرای سه دور الگوریتم‌های GA، GWO و GWGO می‌باشد.

با توجه به اندازه مسائل نمونه فوق، بهترین مقدار تابع هدف به‌دست آمده از حل مسائل نمونه با الگوریتم‌های فراابتکاری به همراه زمان حل کسب شده در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

با بررسی نتایج سود کسب‌شده در ۱۵ مسئله نمونه، الگوریتم GWGO در مجموع بهترین عملکرد را از نظر کیفیت پاسخ داشته است؛ میانگین سود آن برابر با ۱۵۶۵۸۴.۷۹۹ است که بالاتر از GWO (۱۵۵۹۵۳.۵۳۱) و GA (۱۵۵۲۱۵.۱۳۵) است. این نشان می‌دهد که GWO نسبت به دو الگوریتم دیگر توانایی بیشتری در جستجوی نواحی با سود بالاتر و خروج از بهینه‌های محلی دارد. هرچند PSO در برخی نمونه‌ها مانند مسئله ۵ و ۸ عملکرد نزدیک یا حتی بهتر از GWO داشته است، اما در روند کلی میانگین، GWO بالاترین خروجی را ارائه می‌دهد. الگوریتم GA در اکثر مسائل سود کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر کسب کرده و به لحاظ کیفیت حل در رده سوم قرار می‌گیرد. در مقابل، از نظر زمان حل، الگوی کاملاً معکوس مشاهده می‌شود: GA سریع‌ترین الگوریتم است (میانگین ۸۹.۲۵۱ ثانیه)، سپس PSO با میانگین ۹۶.۹۴۷ و در نهایت GWO با میانگین

جدول (۱۰). سود به‌دست آمده و زمان حل الگوریتم‌های فراابتکاری

مسأله نمونه	سود کسب شده			زمان حل		
	GA	GWO	GWGO	GA	GWO	GWGO
۱	۷۳۶۸۰.۴۱۵	۷۳۶۸۵.۴۹۱	۷۳۶۹۰.۳۴۵	۱۴.۱۵۰	۱۵.۱۸۰	۱۶.۲۰۰
۲	۸۰۶۱۵.۱۶۷	۸۱۱۵۹.۸۴۳	۷۹۹۰۰.۳۲۳	۱۷.۶۴۱	۱۸.۷۵۷	۱۹.۹۱۲
۳	۹۰۰۸۵.۹۸۱	۸۸۷۱۹.۶۹۲	۹۰۲۰۹.۳۱۴	۱۸.۲۳۰	۲۰.۲۵۶	۲۱.۰۴۵
۴	۹۷۰۰۵.۴۲۴	۹۶۴۵۵.۶۴۴	۹۹۰۸۴.۵۶۸	۲۰.۵۱۹	۲۲.۱۷۶	۲۳.۷۳۹
۵	۱۰۵۴۱۳.۲۸۳	۱۰۶۹۹۷.۳۳۷	۱۰۶۴۶۷.۴۵۰	۲۳.۶۷۰	۲۵.۶۲۳	۲۷.۱۸۱
۶	۱۱۷۰۸۳.۴۳۵	۱۱۶۳۳۷.۶۳۳	۱۱۷۰۱۳.۳۴۶	۲۷.۷۸۹	۳۰.۳۴۴	۳۱.۸۱۹
۷	۱۳۱۰۶۶.۶۳۸	۱۲۸۳۸۰.۳۸۱	۱۳۰۸۸۷.۷۴۰	۳۳.۶۱۵	۳۶.۱۹۴	۳۷.۶۷۴
۸	۱۴۴۱۷۴.۱۳۳	۱۴۴۲۵۱.۵۲۷	۱۴۲۹۹۹.۱۱۵	۴۱.۱۰۱	۴۴.۶۱۷	۴۶.۶۰۶
۹	۱۵۵۷۱۳.۱۶۹	۱۵۵۷۵۷.۲۹۱	۱۵۶۰۲۶.۵۹۱	۵۲.۸۸۹	۵۷.۵۲۷	۵۹.۷۸۳
۱۰	۱۷۱۰۰۰.۵۳۸	۱۷۲۱۷۳.۷۷۳	۱۷۵۰۱۰.۷۶۸	۶۸.۶۹۴	۷۳.۴۸۶	۷۸.۴۰۶
۱۱	۱۸۸۹۸۶.۹۵۱	۱۹۰۰۶۶.۰۷۴	۱۸۹۲۳۳.۶۰۸	۹۱.۳۲۸	۹۸.۱۱۲	۱۰۳.۹۷۳
۱۲	۲۰۹۰۴۱.۳۸۴	۲۱۲۹۶۸.۶۶۲	۲۱۰۴۵۰.۷۳۲	۱۲۴.۱۴۱	۱۳۵.۳۲۴	۱۴۳.۸۰۷
۱۳	۲۲۸۴۳۷.۳۵۴	۲۳۰۱۵۶.۳۸۵	۲۳۰۳۶۵.۸۲۷	۱۷۶.۵۷۱	۱۹۱.۳۲۱	۲۰۰.۳۲۵
۱۴	۲۵۳۸۵۰.۵۵۱	۲۵۸۸۱۲.۵۰۳	۲۵۸۰۴۹.۱۶۹	۲۵۴.۲۳۹	۲۷۷.۱۱۵	۲۸۸.۳۳۰
۱۵	۲۸۲۰۷۲.۴۹۸	۲۸۳۳۸۰.۷۲۸	۲۸۹۳۸۳.۰۸۳	۳۷۴.۱۸۷	۴۰۸.۱۸۱	۴۲۷.۳۴۳
میانگین	۱۵۵۲۱۵.۱۳۵	۱۵۵۹۵۳.۵۳۱	۱۵۶۵۸۴.۷۹۹	۸۹.۲۵۱	۹۶.۹۴۷	۱۰۱.۷۴۳



شکل (۱۱). مقایسه بین میانگین‌های سود کسب شده و زمان حل در بین الگوریتم‌های فراابتکاری

بررسی می‌شود. به جهت بررسی اختلاف معناداری سود به‌دست آمده و زمان حل، نتایج آزمون T-test در سطح اطمینان ۹۵٪ در جدول (۱۱) نشان داده شده است

با توجه به متفاوت بودن کارایی الگوریتم‌ها به جهت زمان حل و سود به‌دست آمده، آزمون آماری T-test می‌تواند مقایسه‌ای مناسب از کارایی الگوریتم‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ ارائه دهد. به این ترتیب، معناداری و عدم معناداری شاخص‌های مطرح شده، بین الگوریتم‌ها

جدول (۱۱). نتایج آزمون T-test در سطح اطمینان ۹۵٪

شاخص	الگوریتم‌ها	اختلاف میانگین	بازه اطمینان ۹۵٪	T-Value	P-Value
سود کسب شده	GA-GWO	۷۳۸	(-۵۰۱۵۹ ، ۴۸۶۸۳)	۰.۰۳	۰.۹۷۶
	GA-GWGO	۱۳۷۰	(-۵۰۹۴۸ ، ۴۸۲۰۹)	۰.۰۶	۰.۹۵۵
	GWO-GWGO	۶۳۱	(-۵۰۶۷۸ ، ۴۹۴۱۶)	۰.۰۳	۰.۹۷۹
زمان حل	GA-GWO	۷.۷	(-۷۴.۱۲ ، ۸۹.۵۲)	۰.۱۹	۰.۸۴۹
	GA-GWGO	۱۲.۵	(-۷۱۳۶ ، ۹۶.۳۴)	۰.۳۱	۰.۷۶۲
	GWO-GWGO	۴.۸	(-۸۲.۴۴ ، ۹۲.۰۳)	۰.۱۱	۰.۹۱۱

الگوریتم GWO نیز در بسیاری از مثال‌ها بالاترین سود را ارائه داد، هرچند با هزینه زمانی بیشتر. از سوی دیگر، GA با وجود دقت کمتر، سریع‌ترین روش بود و می‌تواند در سناریوهایی که زمان پردازش محدود است، انتخاب مناسب‌تری باشد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب نگاه ریاضیاتی، رویکردهای هوشمندانه فراابتکاری و درک دقیق رفتار مشتریان می‌تواند مسیر طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری را در بازارهای متلاطم روشن‌تر کند. مدل ارائه شده قابلیت پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی را دارد و می‌تواند به مدیران کمک کند تا در میان عدم قطعیت و تنوع کانال‌های فروش، تصمیماتی سودآور و پایدار اتخاذ کنند.

۶-۱. بینش مدیریتی

یافته‌های این پژوهش بینش ارزشمندی برای مدیران فراهم می‌کند که نشان می‌دهد قیمت‌گذاری مؤثر در بازارهای چندکاناله تنها زمانی موفق خواهد بود که تصمیمات بر پایه شناخت دقیق از رفتار مشتریان، عدم قطعیت‌های محیطی و محدودیت‌های زنجیره تأمین اتخاذ شود. مدیران باید بدانند که مشتریان استراتژیک به دلیل ارزش ادراک شده و حساسیت کمتر به تغییرات قیمت، نقش بزرگ‌تری در سودآوری دارند و توجه به آن‌ها در شرایط نوسانی بازار ضروری است. همچنین نتایج نشان داد ظرفیت حمل‌ونقل اهرمی کلیدی برای افزایش سود و جلوگیری از عدم تحقق تقاضا است؛ بنابراین سرمایه‌گذاری هوشمندانه در ظرفیت‌های عملیاتی می‌تواند مزیت رقابتی پایدار ایجاد کند. افزون بر این، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در تصمیم‌گیری‌های واقعی کاملاً عملیاتی است و می‌تواند پاسخ‌گوتر از روش‌های سنتی باشد، زیرا بازار کنونی با پیچیدگی‌هایی مواجه است که تنها روش‌های هوشمند و تطبیقی قادر به مدیریت آن هستند. در مجموع، مدیرانی که از مدل‌های استوار و تحلیل‌های رفتاری در سیاست‌گذاری قیمتی بهره می‌گیرند، می‌توانند در محیط‌های پرتلاطم عملکرد پایدارتر و سودآورتری داشته باشند.

۶-۲. پیشنهادهای آتی

با توجه به نتایج این تحقیق، مسیرهای توسعه‌ای مهمی برای پژوهش‌های آینده وجود دارد. نخست آنکه افزودن رفتار رقبا و مدل‌سازی تعاملی قیمت‌گذاری در بازارهای چندقطبی می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به شرایط واقعی ارائه دهد. همچنین بررسی ظرفیت

با توجه به مقدار P-Value در بین شاخص‌های به‌دست آمده که مقداری بزرگتر از ۰/۰۵ می‌باشد؛ عدم وجود اختلاف معناداری در بین میانگین شاخص‌ها در میان الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان مشاهده کرد. به این ترتیب نتایج بیانگر این است که عملکرد تمامی الگوریتم‌ها فراابتکاری در حل مدل ریاضی ارائه شده بالاست. اگرچه الگوریتم بهترین میانگین سود کسب شده در میان سه الگوریتم مورد بررسی، متعلق به الگوریتم GWGO می‌باشد.

۶. نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مسأله قیمت‌گذاری پویا در زنجیره تأمین چندکاناله، نه یک تصمیم ساده اقتصادی، بلکه فرایندی است که لایه‌های پیچیده‌ای از رفتار انسانی، عدم قطعیت‌های محیطی و محدودیت‌های عملیاتی در آن دخیل است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن مشتریان استراتژیک و غیر استراتژیک، تفاوت کانال‌های فروش و ویژگی‌های خاص هر وسیله حمل‌ونقل توانست به شکلی واقع‌بینانه رفتار بازار را بازتاب دهد. استفاده از پارامترهای فازی و رویکرد استوار امکانی در این مدل کمک کرد تا تصمیمات قیمت‌گذاری حتی در شرایطی که داده‌های دقیق در دسترس نیست، همچنان قابل اعتماد و با ثبات باقی بمانند. نتایج تجربی نشان داد که افزایش نرخ عدم قطعیت، برخلاف تصور اولیه، می‌تواند در صورتی که به‌درستی مدیریت شود، منجر به افزایش سود شود. این پدیده بیشتر در رفتار مشتریان استراتژیک مشاهده شد؛ گروهی که به دلیل ارزش ادراک شده بالاتر، نسبت به تغییرات قیمت انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و با بهبود سیاست‌های قیمت‌گذاری می‌توان نقش آن‌ها را در سودآوری تعمیق کرد. همچنین تحلیل‌های انجام شده روی ظرفیت حمل‌ونقل تأیید کرد که ظرفیت نه تنها یک پارامتر عملیاتی ساده نیست، بلکه به عنوان اهرمی استراتژیک عمل می‌کند که توان پاسخ‌دهی به تقاضا، حفظ مشتریان و جلوگیری از ازدست رفتن فرصت‌های فروش را تعیین می‌کند. کاهش ظرفیت آثار منفی قابل توجهی بر سود دارد و افزایش آن می‌تواند حاشیه سود را به شکل معنی‌داری بهبود دهد. در حوزه حل مدل، الگوریتم‌های فراابتکاری عملکرد قابل توجهی داشتند. الگوریتم ترکیبی GWGO نشان داد که ترکیب سازوکارهای جستجوگر GWO با قدرت جهش و تنوع‌بخشی GA می‌تواند موجب پایداری بیشتر در همگرایی و دستیابی به نتایج باکیفیت‌تر شود.

- segmentation. *Soft Computing*, 28(23), 13205-13224.
- [11] Li, Z., Yang, W., & Si, Y. (2022). Dynamic pricing and coupon promotion strategies in a dual-channel supply chain based on differential game. *Kybernetes*, 51(11), 3201-3235.
- [12] Tang, H., Yu, Z., & Liu, H. (2025). Supply Chain Coordination with Dynamic Pricing Advertising and Consumer Welfare An Economic Application. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*, 3(5), 1-6.
- [13] Pei, H., Liu, Y., & Li, H. (2022). Robust pricing for a dual-channel green supply chain under fuzzy demand ambiguity. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(1), 53-66.
- [14] Farrokh, M., Ahmadi, E., & Sun, M. (2023). A robust stochastic possibilistic programming model for dynamic supply chain network design with pricing and technology selection decisions. *Opsearch*, 60(3), 1082-1120.
- [15] Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Szmelter-Jarosz, A. (2025, July). Location-inventory-pricing model in closed-loop supply chain network under the robust-fuzzy optimisation method. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 26, No. 3, pp. 329-344). Taylor & Francis.
- [16] Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Aliahmadi, A. (2023). Contract Design for Return Products in a Cooperative Closed-Loop Supply Chain. *Global Business Review*, 09721509221148892.
- [17] Keswani, M. (2025). Investigating Impact of Dynamic Pricing and Sustainability-Dependent Demand on Production: A Comparative Study of Metaheuristic Algorithms. In *Adaptive Strategies for Green Economy and Sustainability Policies* (pp. 127-142). IGI Global Scientific Publishing.
- [18] Kavoosi, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sajedi, H., Tajik, N., & Tafakkori, K. (2025). Dynamic pricing and inventory control of perishable products by a deep reinforcement learning algorithm. *Expert Systems with Applications*, 291, 128570.
- [19] Modak, I., Bardhan, S., & Giri, B. C. (2025). Dynamic pricing and preservation strategy for a two-echelon perishable supply chain model with price and time sensitive demand: I. Modak et al. *Operational Research*, 25(3), 79.
- [20] Gao, J., Wang, X., Yang, Q., & Zhong, Q. (2016). Pricing Decisions of a Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain under Uncertain Demand of Indirect Channel. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016(1), 6053510.
- [۲۱] ستونه، شایان، شیخ سجادی، محسن و زیاری، متینه، (۱۴۰۴). مدل‌سازی و تحلیل استراتژی‌های قیمت‌گذاری و نوآوری در توسعه محصول با مشتریان ناهمگن و سیاست‌های دوگانه، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ۹۵-۱۱۷.
- [22] Fotouhi Ghazvini, M. A., Soares, J., Morais, H., Castro, R., & Vale, Z. (2017). Dynamic pricing for حمل‌ونقل پویا و وابسته به زمان، و یا تحلیل سیاست‌های توسعه ظرفیت، می‌تواند مدل را به سناریوهای پیچیده‌تر نزدیک کند. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضا یا شخصی‌سازی قیمت براساس ویژگی‌های مشتریان می‌تواند ارزش بیشتری به مدل بیفزاید. توسعه مدل برای کانال‌های نوین مانند شبکه‌های اجتماعی و بسترهای مبتنی بر هوش مصنوعی نیز از دیگر مسیرهای کاربردی است. در نهایت، ترکیب مدل حاضر با سیاست‌هایی نظیر تخفیفات پویا، مشوق‌های وفاداری یا قیمت‌گذاری دسته‌ای می‌تواند ابعاد جدیدی از رفتار مشتریان و اثرگذاری قیمت‌گذاری پویا را روشن سازد.
- ### مراجع
- [1] Sarkar, A., & Pal, B. (2021). Competitive pricing strategies of multi channel supply chain under direct servicing by the manufacturer. *RAIRO-Operations Research*, 55, S1849-S1873.
- [2] Barman, A., Chakraborty, A. K., Sana, S. S., & Banerjee, P. (2024). Pricing strategy and risk-averse flexibility in sustainable supply chain: a dual-channel logistics process under reward contracts and demand uncertainty. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 25(4), 733-762.
- [3] Li, M., & Mizuno, S. (2022). Dynamic pricing and inventory management of a dual-channel supply chain under different power structures. *European Journal of Operational Research*, 303(1), 273-285.
- [4] He, P., Zhang, G., Wang, T. Y., & Si, Y. (2023). Optimal two-period pricing strategies in a dual-channel supply chain considering market change. *Computers & Industrial Engineering*, 179, 109193.
- [5] Chen, Z. S., Wu, S., Govindan, K., Wang, X. J., Chin, K. S., & Martínez, L. (2022). Optimal pricing decision in a multi-channel supply chain with a revenue-sharing contract. *Annals of Operations Research*, 318(1), 67-102.
- [6] Liu, S., Wang, J., Wang, R., Zhang, Y., Song, Y., & Xing, L. (2024). Data-driven dynamic pricing and inventory management of an omni-channel retailer in an uncertain demand environment. *Expert Systems with Applications*, 244, 122948.
- [7] Ram, B., Lai, K. K., & Xiao, F. (2024). Retail reimaged: pricing optimization in single channel, multi-channel and omni-channel retailing. *Annals of Operations Research*, 1-26.
- [8] Das, R., Barman, A., Roy, B., & De, P. K. (2023). Pricing and greening strategies in a dual-channel supply chain with cost and profit sharing contracts. *Environment, Development & Sustainability*, 25(6).
- [9] Feng, Q. (2010). Integrating dynamic pricing and replenishment decisions under supply capacity uncertainty. *Management Science*, 56(12), 2154-2172.
- [10] Rahmani, D., & Pashapour, A. (2024). Dynamic pricing decision for new and returned products in a dual-channel supply chain based on customer

- [29] Wen, Y., Wei, Y., & Yu, X. (2025). Multi-channel pricing strategies for pharmaceutical supply chains considering channel power and price competition. *PLoS One*, 20(5), e0322143.
- [30] Chen, L., Zeng, L., Dong, T., Xiao, Q., Rao, C., & Wang, Z. (2025). Pricing strategies for dual-channel supply chain considering showrooming effect and channel power structures. *Electronic Commerce Research*, 1-50.
- [31] Yeh, W. C., Liu, Z., Yang, Y. C., & Tan, S. Y. (2022). Solving dual-channel supply chain pricing strategy problem with multi-level programming based on improved simplified swarm optimization. *Technologies*, 10(3), 73.
- [32] Musavi, M., Taleizadeh, A. A., Bozorgi-Amiri, A., & Moshtagh, M. S. (2022). Pricing decisions of organic and conventional products in a dual-channel competitive food supply chain. *Annals of operations research*, 1-37.
- [33] Hu, W., Ding, J., Yin, P., & Liang, L. (2023). Dynamic pricing and sales effort in dual-channel retailing for seasonal products. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 19(2).
- [34] Ghaffari, A., Afsharian, M., & Taleizadeh, A. A. (2025). A Machine Learning Approach to Dynamic Pricing in Multi-Channel Transportation Supply Chains. *Supply Chain Analytics*, 100151.
- [35] Pishvae, M.S., Razmi, J., Torabi, S.A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and Systems*, 206, 1-20.
- [36] Nikzad, M. H., Heidari-Rarani, M., & Mirkhalaf, M. (2025). A novel Taguchi-based approach for optimizing neural network architectures: Application to elastic short fiber composites. *Composites Science and Technology*, 259, 110951.
- demand response considering market price uncertainty. *Energies*, 10(9), 1245.
- [23] Ma, J., Zhang, F., & Jiang, H. (2020). Dynamic pricing game under different channel power structures in a closed-loop supply chain. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 30(04), 2050052.
- [24] Wang, Y., Chen, X., & Ge, D. (2021). Uncertainty quantification for demand prediction in contextual dynamic pricing. *Production and Operations Management*, 30(6), 1703-1717.
- [۲۵] پاکزاد، منا، فاروقی، هیوا و گل محمدی، امیر محمد، (۱۴۰۴). مکان‌یابی مسیر یابی و مسائل نقلیه با در نظر گرفتن کالاهای فسادپذیر و به‌کارگیری فناوری RFID تحت شرایط وجود انبار متقاطع و عدم قطعیت، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ۷۱-۹۳.
- [26] Feng, Q. A., Li, L., & Shanthikumar, J. G. (2024). The effect of supply uncertainty on dynamic procurement and pricing strategies under lost sales. *Production and operations management*, 33(1), 108-127.
- [۲۷] باقرزاده رحمانی، سارا، رضائیان، جواد و احمد ابراهیمی، احمد، (۱۴۰۴). زمان‌بندی دوهدفه پروژه‌ها با گروه‌های کاری چندمهارته، اثر یادگیری و زمان‌های راه‌اندازی و پردازش وابسته به گروه کاری، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ۱۹-۳۵.
- [28] Akbarzadeh Sarabi, M., Taleizadeh, A. A., & Bhattacharya, A. (2026). Towards blockchain-enabled circular closed-loop supply chain and impact of consumers' distrust in price, product greenness sensitivity and carbon tax and subsidy. *European Journal of Operational Research*, 328, 105-121.



A Robust Possibilistic Optimization Model for Dynamic Pricing in a Multi-Channel Supply Chain Using Hybrid Metaheuristic Algorithms

Mona Jamdar¹, Mohammad Sheikhalishahi^{2*}, Ata Allah Taleizadeh³

¹ Department of Industrial Engineering, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

² School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2025/10/20

Revised 2026/01/24

Accepted 2026/02/11

Keywords:

Dynamic Pricing,
Robust Possibility Planning,
Multi-channel Supply Chain,
Hybrid Meta-heuristic Algorithms.

ABSTRACT

The intense market dynamics, the expansion of sales channels, and the prominent role of strategic customers who have forward-looking behavior have made dynamic pricing one of the most challenging decision-making problems in multi-channel supply chains. Aiming to face this complexity, this study presents a comprehensive framework in which the uncertainty in the basic parameters of utility and operating costs are modeled as trapezoidal fuzzy numbers and, by using a robust probabilistic programming approach, the decisions obtained from the model are stable and reliable against severe environmental fluctuations. In this model, the demand of strategic and non-strategic customers is considered separately and based on utility functions based on their behavior in different sales channels, so that the effect of strategic customers' forward-looking behavior and their different sensitivity to pricing is reflected in the results. To solve the proposed nonlinear model, three meta-heuristic algorithms including Genetic Algorithm (GA), Gray Wolf Algorithm (GWO) and a novel hybrid method (GWGO) were designed and implemented. Numerical experiments at different scales showed that the proposed model can provide optimal prices that remain profitable and stable even under high uncertainty; also, the GWGO hybrid algorithm provided the best balance between response quality and convergence speed. Sensitivity analysis showed that strategic customers have a significant impact on profitability and the increase in uncertainty associated with this group has a greater impact on profit structure and pricing behavior. This study provides a powerful analytical framework for designing flexible, robust and adaptive pricing policies to customers' behavior in turbulent environments.

* Corresponding author. M. Sheikhalishahi

Tel.: 021-82084162; E-mail address: m.alishahi@ut.ac.ir