پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱٤۰٤، صص ۱۱۲-۱٤۳
نوع مقاله: پژوهشی

بهینه‌سازی چینش و قیمت‌گذاری محصولات با در نظر گرفتن اثر جایگزینی در خرده فروشی‌های اومنی-کانال

نعیم ابراهیمیان [*۱]، حنان عموزاد [۲] ، مصطفی زندیه [۳]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰٤/۰٦

چکیده

مدیریت هم‌زمان چینش محصولات، قیمت‌گذاری و اثر جایگزینی در خرده‌فروشی اومنی-کانال چالشی پیچیده است. این پیچیدگی ناشی از تعامل میان تقاضای مشتری، محدودیت‌های عملیاتی و رقابت قیمتی است. اغلب مدل‌های پیشین تنها بر یکی از این حوزه‌ها تمرکز کرده و اثرات متقابل آن‌ها را نادیده گرفته‌اند. این پژوهش یک مدل یکپارچه و غیرخطی ارائه می‌کند که تقاضای تصادفی، جایگزینی چندمرحله‌ای (درون و بین کانال‌ها)، محدودیت موجودی، فضای قفسه و ظرفیت مراکز تحقق سفارش را در نظر گرفته و هدف آن حداکثرسازی سود است. برای حل مدل، چهار الگوریتم فرااکتشافی شامل بهینه‌سازی جنگل، ازدحام ذرات، رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به‌کار گرفته شد. عملکرد این الگوریتم‌ها با داده‌های واقعی بزرگ‌ترین خرده‌فروش ایران و مجموعه داده‌های مصنوعی مقایسه شد. نتایج نشان داد الگوریتم بهینه‌سازی جنگل نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد؛ به‌طور میانگین ۲۰٪ افزایش سود و ۱۵٪ کاهش فروش ازدست‌رفته را به‌دست آورد. همچنین این الگوریتم ۲۵٪ سریع‌تر به همگرایی رسید و پایداری نتایج آن در آزمون ویلکاکسون با سطح معناداری ۰.۰۵ تأیید شد. تحلیل سناریوها نشان داد که افزایش تعداد کانال‌ها تا ۳۰٪ سودآوری را ارتقاء داده و رقابت داخلی میان کانال‌ها را کاهش می‌دهد. در مقابل، افزایش تنوع محصولات تا ۱۸٪ فروش ازدست‌رفته را کاهش داد. یافته‌ها می‌تواند راهنمای عملی برای خرده‌فروشان در بهینه‌سازی تصمیمات قیمت‌گذاری، موجودی و چینش محصولات در کانال‌های فیزیکی و آنلاین باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، خرده‌فروشی اومنی-کانال، چینش محصولات، قیمت‌گذاری، روش‌های فرااکتشافی

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: naim.ebrahimian@ut.ac.ir

۱- مقدمه و بیان مسئله

صنعت خرده‌فروشی[۱] سهم قابل‌توجهی در اقتصاد جهانی و ایران دارد؛ به‌طوری‌که حدود ٪٦،٤ از تولید ناخالص ملی ایالات متحده و ٪۷ از تولید ناخالص داخلی ایران (معادل تقریبی ۳۰ میلیارد دلار) را تشکیل می‌دهد [۱]. حدود یک‌سوم این بازار به کالاهای تندمصرف اختصاص دارد. برندهای بزرگ ایرانی مانند «افق کوروش» و «دیجی‌کالا» مشابه نمونه‌های جهانی همچون والمارت و آمازون، به مدل اومنی-کانال[۲] روی آورده‌اند، که امکان خرید یکپارچه از کانال‌های فیزیکی و آنلاین را فراهم می‌کند؛ برای مثال، ٪۹۵ مشتریان افق کوروش از هر دو کانال استفاده می‌کنند. مدیریت موفق در خرده‌فروشی اومنی-کانال نیازمند هماهنگی در چینش محصولات[۳]، قیمت‌گذاری[٤]، مدیریت موجودی و سیاست‌های تخفیف است. این هماهنگی موجب افزایش سودآوری، بهبود رضایت مشتری و ارتقای کارایی عملیاتی می‌شود. تصمیم‌گیری در پنج حوزه کلیدی شامل تنوع محصولات با درنظر گرفتن اثر جایگزینی، فضای قفسه، موجودی، قیمت‌گذاری و تبلیغات اهمیت ویژه‌ای دارد [۲].

با وجود تحقیقات متعدد در زمینه قیمت‌گذاری و چینش محصولات، اثر جایگزینی مشتری (تغییر رفتار در صورت عدم دسترسی به محصول) کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲–٤]. برخی مطالعات تنها خرده‌فروشی دوکاناله را بررسی کرده‌اند و برخی دیگر به بهینه‌سازی بخش محدودی از تصمیمات پرداخته‌اند [٥]. تاکنون هیچ پژوهشی به‌طور هم‌زمان به بهینه‌سازی[٥] چینش محصولات، قیمت‌گذاری و اثر جایگزینی در محیط چندکاناله نپرداخته است، که این شکاف انگیزه اصلی مطالعه حاضر است.

این پژوهش مدلی یکپارچه و غیرخطی ارائه می‌دهد که اثر جایگزینی و محدودیت‌های عملیاتی (فضای قفسه[٦]، ظرفیت انبار، بودجه تخفیف و زمان تحویل سفارش) را در نظر می‌گیرد. مدل با استفاده از الگوریتم‌های فراکتشافی[۷] شامل بهینه‌سازی جنگل[۸]، ازدحام ذرات[۹]، رقابت استعماری[۱۰] و الگوریتم ژنتیک بررسی و مورد آزمایش قرار گرفته است.

---

۱ Retailing
۲ Omni-channel
۳ Product Assortment
٤ Pricing
٥ Optimization
٦ Shelf
۷ Meta-heuristic
۸ Forest Optimization Algorithm
۹ Particle Swarm Optimization
۱۰ Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

سه ویژگی اصلی مطالعه عبارتند از:

۱ .**یکپارچه‌سازی تصمیمات کلیدی**: هم‌زمانی در چینش محصولات، قیمت‌گذاری و اثر جایگزینی در محیط اومنی-کانال.

۲ .**مدل‌سازی محدودیت‌های عملیاتی**: در نظر گرفتن محدودیت‌های واقعی زنجیره تأمین همراه با تقاضای تصادفی و جایگزینی چندمرحله‌ای.

۳ .**ارزیابی الگوریتم‌های فرااکتشافی**: مقایسه چهار الگوریتم برای دستیابی به راه‌حل‌های کارا و بهبود عملکرد شبکه فروش.

ساختار پژوهش شامل مرور ادبیات، ارائه مدل ریاضی و الگوریتم‌ها، تحلیل مطالعه موردی با داده‌های واقعی (افق کوروش) و نتایج و پیشنهادات برای تحقیقات آتی است.

این پژوهش در چندین بخش سازمان‌دهی شده است که در بخش دوم مبانی نظری از خرده‌فروشی اومنی کانال و شکاف‌های تحقیقاتی ارائه می‌دهد. در بخش سوم پیشینه پژوهش مرور شده و در بخش چهارم روش شناسی تحقیق تشریح شده است سپس مدل ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری را معرفی می‌کند. در بخش پنجم مطالعه موردی با داده‌های واقعی (افق کوروش) را تحلیل می‌کند. بخش ششم توصیه‌های مدیریتی و اعتبارسنجی آماری را ارائه می‌دهد، و بخش ششم نتایج و پیشنهادات برای تحقیقات آینده را جمع‌بندی می‌کند.

۲- مبانی نظری پژوهش

کالاهای تندمصرف مانند مواد غذایی و نوشیدنی‌های بسته‌بندی‌شده به فروش سریع و مدیریت دقیق موجودی وابسته‌اند. برندهایی چون کوکاکولا و یونیلیور برای موفقیت به این عوامل تکیه دارند. چینش مناسب در فروشگاه‌ها، همچون یک «فروشنده نامرئی»، بدون دخالت مستقیم، بر افزایش فروش اثر می‌گذارد.

با ظهور فروش اومنی-کانال، پیچیدگی پیش‌بینی تقاضا و مدیریت زنجیره تأمین افزایش یافته و فروشگاه‌های حضوری ملزم به ارائه هم‌زمان خدمات آنلاین شده‌اند. این امر مستلزم افزایش تنوع کالا، تنظیم کارآمد کانال‌های فروش و بهینه‌سازی عرضه است [۲, ٦].

با وجود این تحولات، مطالعات کافی در زمینه هماهنگی و برنامه‌ریزی در این محیط‌های پیچیده انجام نشده و روش‌های موجود، انتقال مشتری میان کانال‌ها و اثرات تقاضای متقاطع را

به‌درستی لحاظ نمی‌کنند. برای حداکثرسازی سود، خرده‌فروشان باید تصمیمات پیچیده‌ای در زمینه تعداد کالاها، موجودی و اثرات متقابل کانال‌ها اتخاذ کنند [۷].

یکی از نکات کلیدی در موفقیت فروش چندکاناله، تأثیر رفتار مصرف‌کنندگان است. انتخاب مشتری میان خرید حضوری یا آنلاین و ترجیح او برای جایگزینی کالاهای متفاوت، نقش مهمی در میزان فروش ایفا می‌کند[۸].

علاوه بر این، استراتژی‌های نوینی مانند خرید آنلاین و دریافت حضوری کالا، بازگشت کالاهای خریداری‌شده به فروشگاه و ارسال مستقیم از انبار بدون دخالت فروشگاه، ساختار خرده‌فروشی را به‌طور قابل توجهی تغییر داده‌اند [۲].

برای مدیریت بهتر، خرده‌فروشان معمولاً محصولات خود را در گروه‌هایی شامل ٦۰ تا ۸۰ کالا دسته‌بندی می‌کنند. این دسته‌بندی فرآیندهای مدیریتی را ساده‌تر کرده و برنامه‌ریزی موجودی و فروش را تسهیل می‌کند [۹].

در مرحله اول، محصولات بر اساس عواملی مانند ترجیحات مشتری، تقاضا، سود قابل ایجاد و شرایط بازار انتخاب می‌شوند. سپس برنامه‌ریزی‌هایی برای تنظیم سطح موجودی کالاها به‌منظور ارائه خدمات بهتر به مشتریان انجام می‌گیرد. افزون بر این، تنظیم موقعیت محصولات در قفسه‌ها و چینش آن‌ها می‌تواند هم در افزایش فروش و هم در کاهش موجودی مازاد مؤثر باشد.

بخشی از موفقیت خرده‌فروشان به توانایی آن‌ها در پیش‌بینی تصمیمات مشتریان بازمی‌گردد، به‌ویژه در شرایطی که یک محصول در دسترس نیست. مشتریان معمولاً یکی از سه واکنش را نشان می‌دهند: انتخاب جایگزین در همان کانال، جستجوی محصول در کانال دیگر، یا یافتن محصولی مشابه در فروشگاهی متفاوت [۱۰]. در تجارت الکترونیک، درک رفتار مشتریان و انتخاب هوشمندانه محصولاتی که در نتایج جستجو نمایش داده می‌شوند، به خرده‌فروشان کمک می‌کند تا فروش بالاتری داشته باشند.

علاوه بر این، میان تنوع موجودی کالاها و تأمین فضای لازم برای نمایش آن‌ها در قفسه‌های فروشگاه یا صفحات وب‌سایت باید توازن برقرار شود. این موضوع مستقیماً بر تقاضا و دسترس‌پذیری کالاها تأثیر می‌گذارد. بسته به نوع محصول و شرایط فروش، نرخ جایگزینی می‌تواند از ٤٥٪ تا ۸٤٪ متغیر باشد [۱۱].

۳- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های اخیر بر حوزه تصمیم‌گیری یکپارچه در خرده‌فروشی اومنی-کانال متمرکز شده‌اند. برای نمونه، ویسیلیف[۱] و همکاران (۲۰۲۳) مدل جذبه چندکاناله را معرفی کرده‌اند که رفتار جایگزینی مشتریان داخل هر کانال و جابجایی بین کانال‌ها را همزمان در نظر می‌گیرد و مسأله بهینه‌سازی تنوع محصولات را با روش‌های اکتشافی حل می‌کند [۱۲].

همچنین، گوان[۲] و همکاران (۲۰۲٤) یک مدل بهینه‌سازی توزیع‌گرا پیشنهاد کرده‌اند که برنامه‌ریزی تنوع محصولات، کنترل موجودی و اجرای سفارش را به‌طور همزمان مدلسازی می‌کند. در این مدل، یک معیار برای وزن‌دهی به سود و ریسک اتخاذ شده و ترجیح زمانی مشتریان با یک تابع تخفیف کوازی-هایپر بولیک لحاظ شده است [۱۳]. از نظر روش‌شناسی، گروه گوان مدل خود را به مسأله بهینه‌سازی محدب تبدیل کرده و با الگوریتم‌های حل عددی، اثرات ریسک و ترجیح زمانی را تحلیل کرده‌اند.

چن[۳] و همکاران (۲۰۲٤) نیز مسأله انتخاب محصول و تخصیص فضای قفسه را بررسی کرده‌اند. آن‌ها با هدف حداکثرسازی سود کل کانال‌ها، محصولات قابل عرضه در کانال‌های حضوری و آنلاین را تعیین کرده و فضای قفسه را به این محصولات تخصیص داده‌اند. همچنین، «اثر نمایشگاهی» فروشگاه حضوری بر فروش آنلاین را نیز لحاظ کرده‌اند [۱٤]. مدل آن‌ها به شکل یک برنامه‌ریزی عدد صحیح توأمان فرموله شده و نتایج عددی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی همزمان این تصمیمات، سود کلی را نسبت به تصمیم‌گیری جداگانه افزایش می‌دهد.

یک پژوهش در خرده‌فروشی پوشاک ایران، عوامل کلیدی تحول دیجیتال را با مرور نظام‌مند و مصاحبه با ۱۷ خبره شناسایی کرده است. محرک‌های درون‌سازمانی، فشار بازار، الزامات زیرساختی و روندهای محیطی، مبنای انطباق سریع و افزایش رقابت‌پذیری در اومنی-کانال را فراهم می‌کنند [۱۵].

مطالعه‌ای [۱٦] عوامل مؤثر بر تجربه خرید موبایلی را با روش دلفی و مدل‌سازی تفسیری بررسی کرده و نشان داده است که قابلیت‌های دستگاه (مانند سایز صفحه، سیستم‌عامل و موقعیت جغرافیایی) بیشترین تأثیر را دارند، هرچند خارج از کنترل خرده‌فروش‌اند.

---

[۱] Vasilyev
[۲] Guan
[۳] Chen

مطالعه [۱۷] یک مدل یکپارچه غیرخطی دو هدفه ارائه می‌دهد که تصمیمات مربوط به موجودی، بازاریابی و قیمت‌گذاری را همزمان در شبکه زنجیره تأمین فروشگاه‌های زنجیره‌ای بررسی می‌کند. هدف این مدل حداکثرسازی سود و رضایت مشتری است. مدل با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی متریک و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب پیاده‌سازی شد و نشان داد که این روش در شبکه‌های بزرگ، نتایج بهینه را با زمان پردازش مناسب ارائه می‌دهد، که برای بهبود استراتژی اومنی-کانال و مدیریت چندکاناله فروش کاربرد دارد.

مطالعه [۱۸] به بهینه‌سازی موجودی کالاهای منسوخ‌شدنی در خرده‌فروشی با در نظر گرفتن تخفیف و تغییرات احتمالی تقاضا می‌پردازد. مدل پیشنهادی تصمیمات مربوط به مقدار سفارش و قیمت خرید را به‌صورت همزمان و با توجه به احتمال منسوخ شدن کالا هماهنگ می‌کند، که می‌تواند عملکرد خرده‌فروشی و تجربه مشتری در محیط‌های اومنی-کانال را بهبود دهد.

با رشد فزاینده خرید آنلاین، بسیاری از شرکت‌ها تلاش می‌کنند استراتژی‌های قیمت‌گذاری خود را با نیازها و رفتارهای مصرف‌کنندگان تنظیم کنند. معمولاً قیمت‌گذاری کالاها در فروشگاه‌های آنلاین و حضوری یکسان نگه داشته می‌شود. به‌عنوان نمونه، Tesco.com قیمت‌های خود را منطبق با بازار نگه می‌دارد و Ocado نیز تضمین کرده است که قیمت‌هایش با Tesco هماهنگ باشد. اهمیت هماهنگی قیمت‌ها به‌ویژه در فروشگاه‌های جدید آنلاین که تجربه کافی ندارند، مشهودتر است[۱۹].

استفاده از داده‌های مشتری برای تعیین قیمت‌ها بر اساس ترجیحات و حساسیت‌های آنان به قیمت، خرده‌فروشان را توانمند می‌سازد تا بهتر با شرایط بازار سازگار شوند. تبلیغات و فروش‌های ویژه نیز ابزارهای کلیدی در افزایش سودآوری هستند. تخفیف‌ها می‌توانند هم میزان فروش و هم وفاداری مشتریان را افزایش دهند و جایگاه خرده‌فروش را نسبت به رقبا ارتقا دهند [۲۰].

با این حال، بررسی سیستماتیک منابع نشان می‌دهد که هیچ مطالعه‌ای به‌طور همزمان چیدمان محصولات (فضای قفسه)، سیاست‌های قیمت‌گذاری و اثر جایگزینی مشتری (در شرایط کمبود موقت یا دائمی محصول) را در محیط چندکاناله بررسی نکرده است. این خلأ پژوهشی، که ناشی از در نظر گرفته نشدن تعامل بین «تنوع محصول»، «قیمت‌گذاری» و «رفتار جایگزینی» است، تأکید می‌کند که مدل یکپارچه حاضر ضروری و مفید است. به عبارت دیگر، مرور دقیق

مقالات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که مطالعاتی که جنبه‌هایی مانند موجودی، ترجیح زمانی مشتری یا سیاست‌های بازگشت را لحاظ کرده‌اند، معمولاً چیدمان قفسه یا جایگزینی را نادیده گرفته‌اند. پژوهش حاضر با ترکیب این ابعاد تلاش می‌کند شکاف موجود را پر کند.

۴- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف توسعه و اعتبارسنجی یک مدل چندمتغیره، غیرخطی و غیرمحدب برای بهینه‌سازی چینش محصولات، قیمت‌گذاری و تخفیف‌ها در خرده‌فروشی اومنی-کانال طراحی شده است. مدل چالش‌هایی چون تقاضای تصادفی، جایگزینی کالا و محدودیت ظرفیت را پوشش می‌دهد تا با افزایش سود و کاهش فروش‌های از دست‌رفته، عملکرد کانال‌ها را بهبود دهد.

داده‌ها از زنجیره فروشگاه‌های افق کوروش استخراج شده و شامل ٤,٠٠٠ فروشگاه حضوری، ٣,٠٠٠ فروشگاه اومنی-کانال و ١٠ مرکز آنلاین است. پژوهش با رویکرد واقع‌گرایانه، روش قیاسی و استراتژی نظرسنجی، به صورت تک‌فروشی و کمی با افق مقطعی انجام شده و از منابع اولیه و ثانویه بهره گرفته است.

در این مطالعه، فروشگاه‌ها بر اساس دو شاخص «اندازه» و «حجم فروش» خوشه‌بندی شده و به سه گروه بزرگ، متوسط و کوچک با سطوح فروش متفاوت تقسیم شدند. از هر گروه، ٤٩ فروشگاه دارای کانال فروش حضوری و آنلاین انتخاب شد. داده‌های فروش طی یک بازه زمانی دوماهه با ثبات بازار جمع‌آوری شده و با استفاده از نظرات ١٤ مدیر ارشد خبره، وزن‌دهی و عادی‌سازی شد.

خبرگان از طریق نمونه‌گیری هدفمند و بر اساس معیارهایی چون حداقل ۳۵ سال سن، بیش از پنج سال سابقه در خرده‌فروشی، داشتن سمت مدیریتی، تحصیلات دانشگاهی و گذراندن حداقل ۵۰ ساعت آموزش تخصصی انتخاب شدند. اطلاعات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول۱. مشخصات و صلاحیت‌های متخصصان منتخب در این پژوهش.

کارشناس	جنسیت	تجربه	سن	تحصیلات	دسته بندی	کارشناس	جنسیت	تجربه	سن	تحصیلات	دسته بندی
۱	مرد	۸	۵۱	دکتری	مدیر عملیات	۸	زن	۸	۳۵	دکتری	مدیرعامل
۲	مرد	۹	۴۳	دکتری	مدیر محصول	۹	زن	۶	۳۸	دکتری	مدیر بازاریابی دیجیتال
۳	مرد	۷	۴۳	کارشناسی	مدیر فروش منطقه‌ای	۱۰	مرد	۷	۳۵	دکتری	مدیر ارشد بازاریابی

کارشناس	جنسیت	تجربه	سن	تحصیلات	دسته بندی	کارشناس	جنسیت	تجربه	سن	تحصیلات	دسته بندی
۴	مرد	۵	۴۵	کارشناسی	مدیر فروش منطقه‌ای	۱۱	مرد	۸	۴۴	کارشناسی	مدیر زنجیره تأمین
۵	مرد	۶	۴۱	کارشناسی	مدیر فروش منطقه‌ای	۱۲	مرد	۹	۴۹	کارشناسی	مدیر منابع انسانی
۶	مرد	۷	۳۷	کارشناسی	مدیر فروش منطقه‌ای	۱۳	مرد	۶	۳۸	کارشناسی	مدیر فروش منطقه‌ای
۷	مرد	۵	۴۵	دکتری	مدیر فروش منطقه‌ای	۱۴	مرد	۸	۴۰	دکتری	مدیر محصول

۴-۱- ساختار و هدف مدل ریاضی

مدل پیشنهادی این پژوهش با هدف حداکثرسازی سود خرده‌فروش در محیط اومنی-کانال طراحی شده است و به‌طور هم‌زمان سه تصمیم کلیدی را پوشش می‌دهد: انتخاب و تخصیص محصولات به کانال‌ها (تخصیص قفسه)، تعیین قیمت و تخفیف‌ها، و مدیریت اثر جایگزینی مشتریان.

ساختار مدل شامل سه بخش اصلی است:

- **تابع هدف :**سود کل را به‌عنوان تفاوت بین درآمد حاصل از فروش و هزینه‌های خرید و تخفیف‌ها محاسبه می‌کند (معادله ۹). این تابع به‌طور مستقیم تحت تأثیر قیمت‌گذاری، نرخ تخفیف و میزان تقاضا قرار دارد.
- **مدل‌سازی تقاضا و اثر جایگزینی :**معادلات (۱) تا (۸) تغییرات تقاضا را بر اساس تخفیف‌ها، چینش محصولات و شرایط کمبود موجودی درون‌کانالی و بین‌کانالی مدل می‌کنند.
- **محدودیت‌ها :**معادلات (۱۰) تا (۱۸) محدودیت‌های واقعی بازار را اعمال می‌کنند، شامل بودجه تخفیف، تعداد محصولات مشمول تخفیف، ظرفیت فضای قفسه، زمان تحویل و محدودیت‌های دامنه متغیرها.

این مدل یک برنامه‌ریزی غیرخطی چندمتغیره و غیرمحدب است که هدف آن بهینه‌سازی هم‌زمان چینش محصول، قیمت‌گذاری و مدیریت موجودی با لحاظ اثر جایگزینی است. مدل در شرایط متغیر بازار و محدودیت‌های عملیاتی طراحی شده و می‌تواند سودآوری را حداکثر و فروش‌های از دست‌رفته را به حداقل برساند.

این پژوهش بر مبنای فرض انتخاب محصول توسط مشتری، بر اساس ترجیحات و امکان جایگزینی در صورت عدم دسترسی، طراحی شده است. برخلاف مدل‌های سنتی که جایگزینی را نادیده می‌گیرند، این مدل جایگزینی چندمرحله‌ای درون و میان کانال‌ها را در نظر می‌گیرد و تقاضا را به‌صورت تصادفی و وابسته به تخفیف‌ها مدل‌سازی می‌کند. همچنین، برخلاف مطالعاتی که تنها یک سطح جایگزینی یا کشش تقاضا را لحاظ می‌کنند، این پژوهش اثرات زمانی ارسال، فروش‌های ازدست‌رفته و رفتار جایگزینی مشتری را دقیق‌تر مدل کرده است [۲], [۱۰], [۸], [۱۹], [۲۱].

با فرض ثابت بودن قیمت‌ها و حذف هزینه‌های تبلیغات و نگهداری، تمرکز مدل بر محدودیت‌های فضایی واقعی فروشگاه‌ها و انبارهاست. برخلاف برخی مطالعات، فضای قفسه به‌طور مستقل از تقاضا در نظر گرفته شده و سطح خدمت‌دهی تأمین‌کنندگان کامل فرض شده است. هدف نهایی مدل، حداکثرسازی سود خرده‌فروش با لحاظ شرایط واقع‌گرایانه است. اطلاعات متغیرها و پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول۲. نمادها و توضیحات استفاده‌شده در مدل بهینه‌سازی.

شاخص(ها)	تعریف	نقش در مدل
c	مجموعه کانال‌ها	تعیین موقعیت محصول در یکی از کانال‌ها (فیزیکی یا آنلاین)
j	شاخص دسته‌بندی محصول (سطح پنج)	گروه‌بندی محصولات برای مدیریت قفسه و سیاست‌های تخفیف
i	شاخص محصول	تعیین‌کننده ویژگی‌ها، قیمت و موجودی هر محصول
t	شاخص زمان	لحاظ پویایی تقاضا، تخفیف و موجودی در دوره‌های مختلف
پارامتر(ها)	**تعریف**	**نقش در مدل**
pp_{ij}	قیمت خرید محصول i در دسته‌بندیj	تعیین‌کننده هزینه در تابع هدف و محدودیت‌های سود

sp_{ij}	قیمت فروش محصول i در دسته‌بندی j	تعیین‌کننده درآمد در تابع هدف (معادله ۹)
V_{ij}	حجم محصول i در دسته‌بندی j	استفاده در محدودیت فضای قفسه (معادله ۱۴)
φ_{ijc}	ضریب کشش تخفیف برای محصول i در دسته‌بندی j در کانال c	مدل‌سازی تغییرات تقاضا در اثر تخفیف
$\Theta^{OOA}_{ij_c kj_c}, \Theta^{OOS}_{ij_c kj_c}$	سهم تقاضای محصول i در دسته‌بندی j در کانال c که جایگزین محصول k در همان دسته‌بندی j و در همان کانال c می‌شود، هنگامی که محصول k در گروه j در کانال c ناموجود (کمبود موجودی) است.	مدل‌سازی جایگزینی درون‌کانالی
$\Phi^{OOA}_{ij_c ij_e}, \Phi^{OOS}_{ij_c ij_e}$	سهم تقاضای محصول i در دسته‌بندی j در کانال c که جایگزین محصول k در همان دسته‌بندی j و در همان کانال c می‌شود، هنگامی که محصول k در گروه j در کانال c ناموجود (کمبود موجودی) است.	مدل‌سازی جایگزینی بین‌کانالی
$\Omega^{OOA}_{ij_c kj_e}, \Omega^{OOS}_{ij_c kj_e}$	سهم تقاضای محصول k در دسته j در کانال c که جایگزین محصول i در دسته‌بندی j در کانال e می‌شود، زمانی که محصول k در دسته j در کانال c ناموجود (کمبود موجودی) باشد.	مدل‌سازی رفتار جایگزینی مشتریان بین دو کانال متفاوت، زمانی که تنها محصول k در کانال c ناموجود است.
IS_{jc}	حداکثر فضای ذخیره‌سازی برای گروه j در کانال c	محدودکننده تخصیص محصولات در هر کانال
$\widehat{D}_{ijc}$	تقاضا برای محصول i در دسته‌بندی j در کانال c	پارامتر ورودی تابع هدف و معادلات تقاضا (۱ تا ۸)
A_{ijc}	حداقل تقاضا برای محصول i در دسته‌بندی j در کانال c	
TPB_c	حداکثر بودجه در دسترس برای تخفیف در کانال c	محدودیت سیاست تخفیف (معادله ۱۱)

TNP_c	حداکثر تعداد محصولات با تخفیف در کانال c	محدودیت سیاست تخفیف (معادله ۱۱)
LBT_{jc}	حد پایین زمان تحویل برای گروه محصول j در کانال c	محدودیت تحویل به‌موقع سفارش‌ها (معادله ۱۵)
U_{ij}, L_{ij} LT_{ijc}	محدودیت‌های بالا و پایین برای تخفیف روی محصول i در دسته‌بندی j	کنترل دامنه مجاز تخفیف (معادله ۱۸)
a_{ijc}	مقدار یک می‌گیرد اگر محصول i در دسته‌بندی j در کانال c قرار بگیرد، در غیر این صورت مقدار صفر.	تصمیم تخصیص محصول به کانال (معادلات ۹ تا ۱۸)
p_{ijct}	درصد تخفیف محصول i در دسته‌بندی j در کانال cدر دوره زمانی t	متغیر تصمیم‌گیری اثرگذار بر تابع تقاضا و تابع هدف

مدل پیشنهادی بخشی از ساختار خود را از مدل‌های موجود در ادبیات اقتباس کرده است. به‌طور خاص، اجزای مرتبط با برآورد تقاضا بر اساس مدل SCANPRO [۱۶] و مدل اثرات چینش محصولات [۸] طراحی شده‌اند. بخش‌های مرتبط با محدودیت فضای قفسه و ظرفیت مراکز تحقق سفارش نیز از چارچوب هنس[۱] و همکاران [۱۰] الهام گرفته شده است.

سایر اجزا، از جمله مدل‌سازی جایگزینی چندمرحله‌ای بین و درون کانال‌ها، محدودیت‌های بودجه تخفیف و تلفیق این اجزا در قالب یک مدل غیرخطی چندهدفه، نوآوری اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهند.

تقاضا برای محصول i در دسته بندی j در کانال c (Dijc) به هفت بخش تقسیم می‌شود. اولین بخش به اثر تخفیف‌ها و قیمت‌گذاری بر تقاضا مربوط است و بخش دوم شامل عواملی چون موقعیت محصول روی قفسه، طبقه قفسه و تعداد نمایش‌های محصول می‌باشد. بر اساس این موارد، تابع تقاضا را می‌توان به شکل زیر مدل کرد [۲].

$$\widehat{D}_{ijc} = \mathrm{A}_{ijct} + D_{ijct}^{OOA(۱)} + D_{ijct}^{OOA(۲)} + D_{ijct}^{OOA(۳)} + D_{ijct}^{OOS(۱)} + D_{ijct}^{OOS(۲)} + D_{ijct}^{OOS(۳)} \quad (۱)$$

معادله ۱ شامل چند مؤلفه اصلی است: مؤلفه نخست، معرف تقاضای اولیه برای محصول i در دسته‌بندی j و کانال c طی دوره زمانی t است و مؤلفه‌های دوم تا چهارم به تغییرات تقاضا

[۱] ما

ناشی از سیاست‌های چینش محصولات اختصاص دارند. همچنین، مؤلفه‌های پنجم تا هفتم نشان‌دهنده تغییرات تقاضا هستند که به دلیل نبود موجودی کالا ایجاد می‌شوند.

$$\mathrm{A}_{ijct} = \left[\sum_{c=۱}^{C}\prod_{i=۱}^{m_j}\left(\frac{p_{ijct}}{\bar{p}_{jct}}\right)^{\varphi_{ijc}}\right]\prod_{t=۱}^{T}\delta_{jt}^{X_t}.a_{ijc} \quad (۲)$$

معادله ۲ بر پایه مدل SCANPRO طراحی شده [۱۶] و حجم تقاضای محصول i در دسته بندی j در کانال (c) طی دوره (t) را برآورد می‌کند، با لحاظ تأثیر شرایط فصلی (در صورت وجود، (X_t = ۱)). این مدل پیشرفته، اثر فروش‌های تبلیغاتی را بر تقاضای محصول و محصولات هم‌دسته بررسی کرده و تعاملات میان دسته‌بندی‌های مشابه در کانال‌های مختلف را نیز مدنظر قرار می‌دهد. تقاضا به نسبت فروش تبلیغاتی محصول به میانگین فروش تبلیغاتی هم‌دسته‌ها در همان و سایر کانال‌ها وابسته است [۲۳].

$$D_{ijct}^{OOA(۱)} = \sum_{\substack{k=۱\\k\neq i}}^{M_j}\mathrm{A}_{kjct}.(۱-a_{kjc}).\Theta_{ij_c kj_c}^{OOA} (۳)$$

معادله۳ مقدار افزایش تقاضا برای محصول i در دسته بندی j در یک کانال مشخص را بر اساس نبود محصولات جایگزین، به دلیل اجرای سیاست‌های مرتبط با چینش کالاها، محاسبه می‌کند [۲].

$$D_{ijct}^{OOA(۲)} = \sum_{\substack{e=۱\\e\neq c}}^{C}\mathrm{A}_{ijct}.(۱-a_{ije}).\Phi_{ij_c ij_e}^{OOA} (۴)$$

معادله ٤ میزان افزایش تقاضای محصولi در دسته بندی j را مدل‌سازی می‌کند که به دلیل کمبود کالاها در یک کانال دیگر، تحت تأثیر سیاست‌های مرتبط با چینش محصولات، رخ داده است [۸].

$$D_{ijct}^{OOA(۳)} = \sum_{\substack{e=۱\\e\neq c}}^{C}\sum_{\substack{k=۱\\k\neq i}}^{M_j}\mathrm{A}_{kjet}.(۱-a_{kje}).\Omega_{ij_c kj_e}^{OOA} (۵)$$

معادله ۵ تغییرات در سطح تقاضای محصول i در دسته بندی j را محاسبه می‌کند که به دلیل عدم موجودی محصولات جایگزین در سایر کانال‌ها تحت تأثیر سیاست‌های چینش کالا ایجاد شده است [۲].

$$D_{ijct}^{OOS(۱)} = \sum_{\substack{k=۱\\k\neq i}}^{M_j}\left[\left(\mathrm{A}_{kjc}-I_{kjc}\right)\middle|\mathrm{A}_{kjct}>I_{kjc}\right].(۱-a_{kjc}).\Theta_{ij_c kj_c}^{OOS} (۶)$$

معادله٦ تغییرات در تقاضای محصول i در دسته بندی j را مدل‌سازی می‌کند که ناشی از نبود محصولات جایگزین در همان کانال است.

$$D_{ijct}^{OOS(۲)} = \sum_{\substack{e=۱\\e\neq c}}^{C}\left[\left(\mathrm{A}_{ijc}-I_{ijc}\right)\middle|\mathrm{A}_{ijct}>I_{ijc}\right].(۱-a_{ije}).\Phi_{ij_c ij_e}^{OOS} (۷)$$

معادله۷ افزایش تقاضای محصول i در دسته بندی j را بر اساس کمبود موجودی محصولات جایگزین بررسی و محاسبه می‌کند.

$$D_{ijct}^{OOA(۲)} = \sum_{\substack{e=۱ \\ e\neq c}}^{C} \sum_{\substack{k=۱ \\ k\neq i}}^{M_j} \left[\left(A_{kje} - I_{kje}\right) | A_{kjet} > I_{kje}\right] . (۱ - a_{kje}) . \Omega_{ij_c kj_e}^{OOA} (۸)$$

معادله۸ تغییرات تقاضای محصول i در دسته بندی j را که تحت تأثیر کمبود موجودی محصولات جایگزین رخ داده، محاسبه می‌کند. بر همین اساس، مدل بهینه‌سازی سود خرده‌فروشی در کانال‌های یکپارچه به صورت زیر طراحی شده است.

$$\max z_۱ = \sum_{c=۱}^{C} \sum_{j=۱}^{N} \sum_{i=۱}^{M_j} \widehat{D}_{ijct} . \left((۱ - p_{ijct}) . sp_{ijt} - pp_{ijt} \right) (۹)$$

$$\sum_{j=۱}^{N} \sum_{i=۱}^{M_j} \widehat{D}_{ijct} . \left(p_{ijct} . sp_{ijt}\right) . a_{ijc} \leq TPB_c \qquad \forall c, t (۱۰)$$

$$\sum_{j=۱}^{N} \sum_{i=۱}^{M_j} \varrho_{ijct} \leq TNP_{ct} (۱۱)$$

$$p_{ijct} \leq ۱ - \frac{sp_{ijt}}{pp_{ijt}} (۱۲)$$

$$I_{it} = \sum_{z=۱}^{t-LT} O_{ijcz} - \sum_{z=۱}^{t} D_{ijcz} \qquad \forall\, t \in \{۱,۲, \dots, T - LT\} (۱۳)$$

$$\sum_{i=۱}^{M_j} V_{ij} . I_{ijct} \leq IS_c \quad \forall c, t (۱۴)$$

$$LTB \leq LT_{ijc} (۱۵)$$

$$O_{ijct} \leq BM . a_{ijc} \qquad \forall\, t (۱۶)$$

$$a_{ijc}, \varrho_{ijct} \in \{۰,۱\} (۱۷)$$

$$I_{ijct}, LT_{ijc}, p_{ijc}, O_{ijc} \geq ۰ (۱۸)$$

مدل پیشنهادی با هدف حداکثرسازی سود خرده‌فروش تدوین شده و سود نهایی از کسر تخفیف‌ها از قیمت فروش (معادله ۹) محاسبه می‌شود. محدودیت‌های کلیدی مدل شامل سقف بودجه تخفیف (معادله ۱۰)، تعداد مجاز کالاهای مشمول تخفیف (معادله ۱۱)، حفظ حاشیه سود با کنترل سطح تخفیف (معادله ۱۲)، محدودیت موجودی کالا (معادله ۱۳)، ظرفیت ذخیره‌سازی کانال‌ها (معادله ۱٤)، حداقل زمان ارسال سفارش‌ها (معادله ۱۵)، الزام به گنجاندن کالای منتخب در فهرست سفارش (معادله ۱٦) و تعیین دامنه مجاز برای متغیرهای مدل (معادلات ۱۷ و ۱۸) هستند. این معادلات چارچوبی واقع‌گرایانه برای بهینه‌سازی تخصیص و تخفیف‌ها فراهم می‌کنند.

۴-۲- روش حل

در این روش، با بهره‌گیری از تکنیک‌های فرااکتشافی، مسئله تخصیص محصولات و مدیریت تخفیف‌ها در کانال‌های فروش به‌صورت پویا حل می‌شود. ابتدا داده‌های مربوط به موجودی،

سفارشات، دسته‌بندی کالاها و ویژگی‌های کانال‌ها گردآوری شده و به‌عنوان ورودی در شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. فرآیند تخصیص و به‌روزرسانی به کمک الگوریتمی حریصانه انجام شده و اطلاعات سیستم در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شوند. در گام دوم، الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بیشینه‌سازی سود از طریق تنظیم بهینه تخصیص کالا و تخفیف‌ها به کار گرفته می‌شوند. برای مدیریت داده‌ها، از آرایه‌های یک‌بعدی استفاده شده که اطلاعاتی چون موجودی، قیمت و تخفیف را در سطح هر محصول و کانال ذخیره می‌کنند. تابع هدف طراحی‌شده نقش محوری در هدایت تخصیص بهینه ایفا کرده و با تطبیق محصولات با تقاضا و محدودیت‌ها، کارایی سیستم و سودآوری نهایی را بهبود می‌بخشد.

۴-۳- الگوریتم‌های بهینه سازی مورد استفاده در این پژوهش

چهار الگوریتم بهینه‌سازی در این مطالعه بررسی شده‌اند:

- **الگوریتم بهینه‌سازی جنگل**، معرفی‌شده در سال ۲۰۱٤، با الهام از رشد طبیعی جنگل طراحی شده و شامل سه مرحله تولید بذر محلی، کنترل جمعیت و کاشت بذر جهانی است. در این فرآیند، راه‌حل‌ها به‌عنوان درخت در نظر گرفته می‌شوند و با تکرار چرخه رشد و جایگزینی درختان ضعیف با نمونه‌های بهتر، جست‌وجوی بهینه انجام می‌شود [۲٤].
- **الگوریتم ازدحام ذرات**، معرفی‌شده در سال ۱۹۹۵، حرکت ذرات را براساس بهترین تجربیات شخصی و جمعی هدایت می‌کند و با به‌روزرسانی مستمر موقعیت و سرعت ذرات، به سمت بهترین راه‌حل پیش می‌رود[۲۵].
- **الگوریتم رقابت استعماری**، ارائه‌شده در سال ۲۰۰۷، فرآیند بهینه‌سازی را از طریق تعامل استعمارگران و مستعمره‌ها شبیه‌سازی می‌کند؛ مستعمره‌ها به سمت قدرت مرکزی حرکت کرده و با جابجایی جایگاه‌ها، راه‌حل‌های بهتری کشف می‌شود[۲٦].
- **الگوریتم ژنتیک**، معرفی‌شده در سال ۱۹۹۲، با الگوبرداری از انتخاب طبیعی عمل می‌کند. با تکرار انتخاب، ترکیب و جهش کروموزوم‌ها، جمعیت به سمت راه‌حل‌های بهینه‌تر تکامل می‌یابد.

همه این الگوریتم‌ها از فرآیندهای الهام‌گرفته از طبیعت برای جست‌وجوی مؤثر در فضای راه‌حل استفاده می‌کنند.

۴-۴- روش جمع‌آوری داده‌ها و طراحی آزمایش

این پژوهش با رویکرد کمی و تجربی–تحلیلی، با استفاده از داده‌های واقعی زنجیره فروشگاه‌های افق کوروش و مجموعه‌ای از داده‌های مصنوعی طراحی و اجرا شده است.

داده‌های پژوهش از زنجیره فروشگاه‌های افق کوروش شامل ٤٠٠٠ فروشگاه حضوری، ٣٠٠٠ فروشگاه اومنی–کانال و ١٠ مرکز آنلاین استخراج شد. رویکرد پژوهش واقع‌گرایانه و کمّی است.

تمرکز موردکاوی بر گروه کنسروها (به‌ویژه رب گوجه‌فرنگی و ماهی تُن) است؛ ٨٦ محصول در ١٠ گروه، با تخصیص قفسه‌های اختصاصی بر اساس دسته‌بندی. ظرفیت قفسه‌ها IS_{jc} بین ١٣٢ تا ١٤٤٠، حجم هر کالا v_{ij} ١ تا ٣، تعداد قفسه‌ها ١ تا ٧، بودجه تخفیف کانالی TPB_c ١٣٠ تا ٢٠٠، تعداد اقلامِ مشمول تخفیف TNP_c ٠ تا ٢٠ و بازه‌ی مجاز تخفیف P_{ijct} ٨٪ تا ٢٦٪ تعیین شده است. محدوده قیمت خرید/فروش نیز در داده‌های عملیاتی ذکر شده است. ساختاری یک نمونه از این قفسه‌ها در شکل ١ نمایش داده شده است.

شکل ١. ساختار قفسه شامل رب گوجه‌فرنگی، ماهی تُن کنسرو شده و سایر کنسروها است.

سیاست‌های تخفیف با تحلیل رقبا و سیاست‌های داخلی تعیین شده و بین حدود $\mathbf{L}$ و $\mathbf{U}$ اعمال می‌شوند. سقف بودجه تخفیف کل ٣,٠٠٠,٠٠٠ واحد پولی بوده که ٦٠٪ به فروش آنلاین و ٤٠٪ به فروش حضوری تخصیص یافته است. مصرف بودجه نیز با سقف ١٠٪ فروش رب و ١٢٪

فروش ماهی تُن کنترل می‌شود (فروش حضوری/آنلاین به‌ترتیب ۱۳۰ و ۲۰۰ میلیون واحد پولی). تعداد اقلام مشمول تخفیف محدود است و تصمیم‌ها در سطح محصول–کانال–دوره اعمال می‌شوند.

برای ارزیابی عملکرد ذخیره‌سازی و فروش، داده‌های جمع‌آوری‌شده از پنج خوشه فروشگاهی تجزیه و تحلیل شدند. در خوشه‌های فروشگاهی **A+ و A**، میانگین فروش روزانه ماهی تُن و رب گوجه‌فرنگی به ترتیب ۲.۵ و ۳ جعبه است. در مقابل، خوشه‌های فروشگاهی **B و C** به‌ترتیب فروش روزانه ۱.۷ و ۰.۸ جعبه ماهی تُن و ۲ و ۱ جعبه رب گوجه‌فرنگی را ثبت کرده‌اند. در فروشگاه‌های فرانچایز، میانگین فروش روزانه ماهی تُن ۲.۱ جعبه و رب گوجه‌فرنگی ۲.۵ جعبه بوده است. این داده‌ها نشان‌دهنده تنوع قابل توجه عملکرد فروش میان خوشه‌هاست که می‌تواند ناشی از تفاوت در تقاضای مشتریان یا نحوه مدیریت فضای ذخیره‌سازی باشد.

از نظر فضا، ۳ قوطی ماهی تُن معادل ۱ قوطی رب گوجه‌فرنگی است؛ این نسبت در برنامه‌ریزی قفسه‌ها و پالت‌ها اثرگذار است. نمونه تخصیص فیزیکی: ۳٤ واحد فضا برای رب (۱۲۰ قوطی/۱۰ جعبه) و ۲۸ واحد برای ماهی تُن (۲٦٤ قوطی/۱۱ جعبه). در سطح انبار، ۳ پالت برای ۷۲۰ قوطی (٦۰ جعبه رب + ۳۰ جعبه ماهی تُن) نگهداری می‌شود.

میانگین فروش روزانه (جعبه) در خوشه‌های A+ و A برای ماهی تُن و رب به ترتیب ۲.۵ و ۳؛ در B و C به‌ترتیب ۱.۷ و ۲ و ۰.۸ و ۱؛ و در فروشگاه‌های فرانچایز ۲.۱ و ۲.۵ است. این ناهمگنی، ضرورت شخصی‌سازی سیاست تخفیف و چینش را نشان می‌دهد.

نوع بسته‌بندی محصولات نیز بر رفتار فروش تأثیرگذار است. در فروشگاه **A+**، فروش روزانه ماهی تُن با بسته‌بندی «شیرینک» ۲.۵ واحد و بدون «شیرینک» ٦۰ واحد بوده، و رب گوجه‌فرنگی به ترتیب ۳ و ۳٦ واحد فروش داشته است. الگوی مشابهی در فروشگاه A مشاهده می‌شود. در فروشگاه B، میانگین فروش روزانه ماهی تُن در بسته‌بندی شیرینک ۱.۵ و بدون شیرینک ۳٦ واحد بوده؛ برای رب گوجه‌فرنگی به ترتیب ۲ و ۲٤ واحد. در فروشگاه **C**، فروش روزانه ماهی تُن و رب گوجه‌فرنگی در بسته‌بندی شیرینک و بدون شیرینک به ترتیب برابر با ۱ و ۲٤ واحد برای ماهی تُن و ۱ و ۱۲ واحد برای رب بوده است. در فروشگاه **F**، فروش روزانه ماهی تُن ۲ واحد شیرینک و ٤۸ واحد بدون شیرینک، و رب ۲.۵ واحد شیرینک و ۳۰ واحد بدون شیرینک بوده است.

در مراکز فروش آنلاین، به دلیل نبود محدودیت فیزیکی مشابه فروشگاه‌های حضوری، ظرفیت ذخیره‌سازی و فروش محصولات متفاوت است. فروش روزانه ماهی تُن در بسته‌بندی شیرینک ۱۷ واحد و بدون شیرینک ٤٠٨ واحد بوده است. رب گوجه‌فرنگی نیز به ترتیب ۲۰ واحد شیرینک و ۲٤۰ واحد بدون شیرینک فروخته شده است. این داده‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای فروش آنلاین و اهمیت ویژگی‌های ذخیره‌سازی در این محیط‌هاست.

۴-۵- طراحی سناریو و پروتکل آزمایش

برای ارزیابی سیاست‌ها، سناریوها به‌صورت فاکتوریل-ناقص پیرامون متغیرهای زیر ساخته شد:

- پارامترهای قیمتی از جدول ۳؛ بازه‌های مجاز تخفیف و تعداد کانال‌ها.
- ظرفیت قفسه/پالت (طبق مقادیر عملیاتی فوق)؛ بودجه و سهم تخفیف؛ سهم اقلامِ مشمول تخفیف؛ رابطه فضایی تُن/رب؛ نرخ‌های جایگزینی (از جدول ٤).

در هر سناریو، یک دوره‌ی برنامه‌ریزی اجرا و شاخص‌ها شامل سود، فروش ازدست‌رفته، نرخ تحقق بودجه تخفیف و کارایی فضا ثبت شد.

جدول۳. قیمت خرید و فروش هرکدام از اقلام

اقلام	قیمت خرید	قیمت فروش	حداقل قیمت فروش
رب گوجه شیشه‌ای اعلا ۱	٤٧	٥٥	٥٠
رب گوجه قوطی اعلا ۲	٤٠	٤٧	٤٣
رب گوجه شیشه‌ای اقتصادی ۱	٣٢	٤٠	٣٢
رب گوجه قوطی اقتصادی ۲	٢٧	٣٣	٢٧
تن ماهی اعلا ۱	٧٠	٨٢	٧٥
تن ماهی ممتاز ۲	٦٥	٧٧	٧٢
تن ماهی اقتصادی ۱	٥٤	٦٧	٥٤
تن ماهی اقتصادی ۲	٥٣	٦٧	٥٣

سیاست‌های تخفیف با توجه به تحلیل رقبا و تصمیمات واحد تحقیقات بازار و با در نظر گرفتن موقعیت خرده‌فروشان تعیین می‌شوند و بین دو حد مجاز قرار دارند: حداقل تحت تأثیر رقبا و حداکثر بر اساس تفاوت قیمت خرید و فروش. سقف بودجه تخفیفات، سه میلیون واحد پولی، توسط واحد قیمت‌گذاری بین کانال‌ها تخصیص یافته و به نسبت ٦٠٪ برای آنلاین و ٤٠٪ برای حضوری توزیع شده است. این بودجه باید در چارچوب ۱۰٪ فروش رب گوجه‌فرنگی و ۱۲٪

فروش تن ماهی مصرف شود. میزان فروش حضوری و آنلاین به ترتیب ۱۳۰ و ۲۰۰ میلیون واحد پولی است. دامنه مجاز تخفیف هر کالا با ($pijct \in [Lij, Uij]$) تعیین می‌شود و تعداد کالاهای مشمول تخفیف نیز محدود شده است. پژوهش حاضر پنج فروشگاه حضوری و یک کانال آنلاین را به‌طور مستقل بررسی کرده و اثرات جایگزینی محصولات درون و میان کانال‌ها را بر اساس داده‌های جدول ٤ تحلیل کرده است.

جدول ۴. مقدار محاسبه‌شده جایگزینی میان فروشگاه‌ها

	کانال ۱ – فروشگاه الف	کانال ۲ – فروشگاه ب	کانال ۳ – فروشگاه ج	کانال ٤ – فروشگاه د	کانال ٥ – اینترنتی
کانال ۱ – فروشگاه الف		۰.٥	۰.۲	۰	۰.۳
کانال ۲ – فروشگاه ب	۰.٥		۰.۲	۰.۱	۰.۳
کانال ۳ – فروشگاه ج	۰.۲	۰.۲		۰.۲	۰.۳
کانال ٤ – فروشگاه د	۰	۰.۱	۰.۲		۰.۳
کانال ٥ – اینترنتی	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	

در مدل فروشگاه آنلاین، مشتری به‌عنوان مصرف‌کننده‌ای با حساسیت بالا نسبت به تغییرات کانال فروش و موجودی محصولات در نظر گرفته می‌شود. در صورت عدم دسترسی به یک کالا، فرایند جایگزینی آغاز شده و مصرف‌کننده محصولی دیگر را انتخاب می‌کند. جدول ٥ این رفتار را تحلیل کرده و نشان می‌دهد که جایگزینی تحت تأثیر عواملی مانند برند، قیمت، ویژگی‌های محصول و نوع کانال فروش شکل می‌گیرد. این پدیده، که در بخش‌های مختلف خرده‌فروشی و عمده‌فروشی مشاهده می‌شود، اهمیت مدیریت دقیق عرضه و تقاضا در زنجیره تأمین را برجسته می‌سازد. ناتوانی در تأمین کامل تقاضا نیز می‌تواند منجر به از دست رفتن فرصت‌های فروش و تأثیرگذاری بر سیاست‌های مدیریت موجودی شود.

بهینه‌سازی روش تخفیف ارائه‌شده توسط خرده‌فروش از طریق تحلیل سناریوهای متنوع انجام شد. در این فرآیند، سودآوری محصولات مختلف در کانال‌های فروش متعدد و طی مراحل

مختلف محاسبه گردید. برای ارزیابی عملکرد هر روش بهینه‌سازی، شاخص‌هایی مانند تغییرات سود، سفارش‌های از دست رفته، میزان همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، آزمون آماری ویلکاکسون[1] و مقدار p مورد استفاده قرار گرفت.

مدل ارائه‌شده با استفاده از داده‌های تجربی گسترده و داده‌های مصنوعی بررسی شد تا اثربخشی آن سنجیده شود. تحلیل‌ها شامل سه سناریوی مجزا بودند که در آن‌ها پارامترهایی مانند تعداد محصولات در هر گروه و تنوع کانال‌های فروش تغییر داده شدند. آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده و مشابه، به‌طور مکرر اجرا شدند تا اطمینان حاصل شود که نتایج بهینه‌سازی از انسجام و پایداری لازم برخوردار هستند.

جدول۵. جایگزینی یک محصول با محصول دیگر در مواقع نبود موجودی

	رب گوجه شیشه‌ای اعلا ۱	رب گوجه قوطی اعلا ۲	رب گوجه شیشه‌ای اقتصادی ۱	رب گوجه قوطی اقتصادی ۲	تن ماهی اعلا ۱	تن ماهی ممتاز ۲	تن ماهی اقتصادی ۱	تن ماهی اقتصادی ۲
رب گوجه شیشه‌ای اعلا ۱	۱	۰.۸	۰.۲	۰.۱				
رب گوجه قوطی اعلا ۲	۰.۷	۱	۰.۳	۰.۲				
رب گوجه شیشه‌ای اقتصادی ۱	۰	۰.۲	۱	۰.۸				
رب گوجه قوطی اقتصادی ۲	۰.۱	۰.۲	۰.۷	۱				
تن ماهی اعلا ۱					۱	۰.۸	۰.۲	۰.۱
تن ماهی ممتاز ۲					۰.۷	۱	۰.۳	۰.۲
تن ماهی اقتصادی ۱					۰	۰	۱	۰.۸
تن ماهی اقتصادی ۲					۰	۰	۰.۷	۱

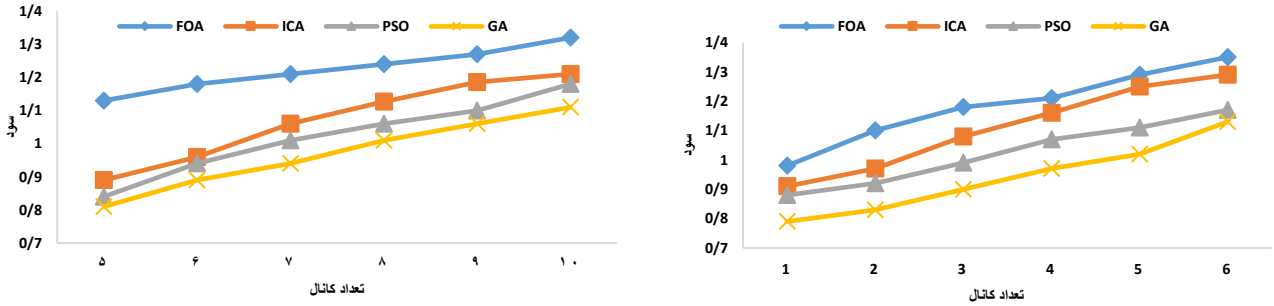
[1] Wilcoxon

۵- یافته‌های پژوهش

این پژوهش کارایی روش‌های بهینه‌سازی را با تمرکز بر تأثیر افزایش تعداد کانال‌های فروش بر بهره‌وری مدل‌ها بررسی می‌کند. منظور از «تعداد کانال‌ها» در این شکل، زیرکانال‌های تعریف‌شده در مدل شامل خوشه‌های فروشگاهی (A+، A، B، C، فرانچایز) و یک کانال آنلاین است. به این ترتیب، اگرچه به لحاظ مفهومی اومنی-کانال شامل دو نوع فیزیکی و آنلاین است، اما در این پژوهش برای تحلیل دقیق‌تر، هر خوشه به‌عنوان یک کانال مستقل مدل‌سازی شده است.

چهار الگوریتم بهینه‌سازی جنگل، ازدحام ذرات، رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک با اندازه جمعیت ۵۰ و ۵۰۰ تکرار پیاده‌سازی شدند. پارامترهای کلیدی شامل نرخ بذر محلی/جهانی (۰،٦ و ۰،٤) در بهینه سازی جنگل، ضرایب $c۱=c۲=۲$ و $w=۰،۷$ در ازدحام ذرات، نرخ همجوشی/انقلاب (۰،۳ و ۰،۱) در رقابت استعماری و نرخ تقاطع/جهش (۰،۸ و ۰،۰۵) در ژنتیک انتخاب شدند تا توازن بین کیفیت جواب و زمان اجرا حفظ شود.

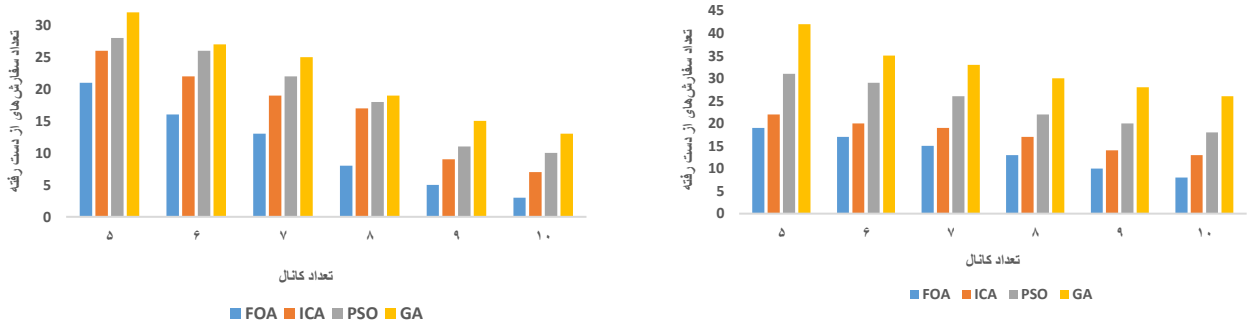
نتایج مطابق شکل ۲ نشان می‌دهند که افزایش تعداد کانال‌ها سودآوری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد، زیرا کاهش هم‌پوشانی محصولات میان کانال‌ها موجب کاهش رقابت داخلی و نیاز به تخفیف شده و در نهایت حاشیه سود را بهبود می‌بخشد. این روند در داده‌های واقعی و مصنوعی تأیید شده است. در میان الگوریتم‌ها، روش جنگل عملکرد برتری دارد، زیرا با تکیه بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهانی مبتنی بر جمعیت، قادر است نرخ‌های تخفیف را با دقت بیشتری تنظیم کرده و کارایی فرآیند بهینه‌سازی را به‌طور محسوسی افزایش دهد.



(ب) (الف)

شکل۲. الف) بررسی اثر تعداد کانال‌ها (خوشه‌های فروشگاهی و کانال آنلاین) بر سود حاصل در روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای داده‌های تجربی، ب) بررسی اثر تعداد کانال‌ها (خوشه‌های فروشگاهی و کانال آنلاین) بر سود حاصل در روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای داده‌های مصنوعی

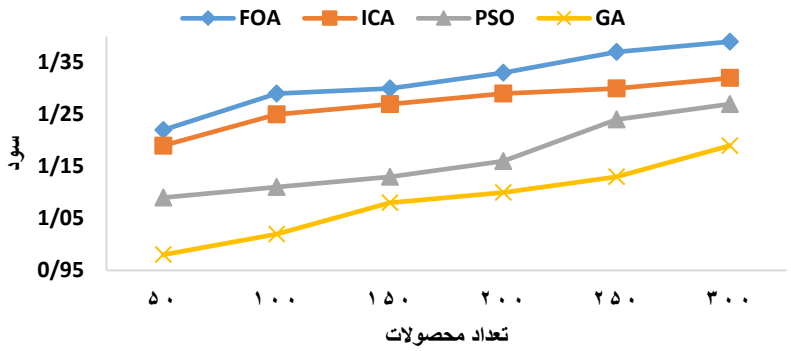
نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تعداد کانال‌ها، میزان سفارش‌های ازدست‌رفته مشتریان کاهش یافته است (شکل ۳). از آنجایی که تعداد اولیه هر محصول در کانال‌ها ثابت در نظر گرفته شده است، افزایش تعداد کانال‌ها تأثیری بر تغییر تعداد محصولات موجود ندارد. این افزایش تعداد کانال‌ها امکان پاسخگویی بهتر به تقاضای مشتریان را فراهم می‌کند، زیرا مشتریان قادر خواهند بود از کانال‌های مختلف برای دستیابی به محصول موردنظر خود استفاده کنند. علاوه بر این، در صورت کمبود محصول در یک کانال خاص، وجود کانال‌های جایگزین این امکان را فراهم می‌آورد تا از عدم پاسخگویی به تقاضای مشتری جلوگیری شود.



(ب) (الف)

شکل۳. الف) تأثیر تعداد کانال‌ها بر سفارش‌های ازدست‌رفته برای داده‌های تجربی، ب) تأثیر تعداد کانال‌ها بر سفارش‌های ازدست‌رفته برای داده‌های مصنوعی.

در این آزمایش، با افزایش تعداد محصولات و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، کارایی روش‌های بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که این افزایش، موجب بهبود سودآوری می‌شود؛ چرا که کاهش سفارش‌های ازدست‌رفته و بهینه‌سازی سیاست‌های قیمت‌گذاری و تخفیف‌ها، عملکرد کلی سیستم را ارتقا می‌دهد. در این میان، الگوریتم بهینه‌سازی جنگل عملکرد برجسته‌ای داشته و در تمامی مراحل افزایش تعداد محصولات، روندی صعودی در سودآوری نشان داده است، که بیانگر کارایی بالای آن به‌عنوان راه‌حل بهینه در این مسئله است.



شکل۴. تأثیر سود حاصل به ازای تعداد محصولات برای داده‌های مصنوعی

شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد محصولات، میزان سفارش‌های ازدست‌رفته در همه روش‌های بهینه‌سازی کاهش می‌یابد. در این میان، الگوریتم بهینه‌سازی جنگل با ثبت کمترین مقدار، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها، به‌ویژه الگوریتم رقابت استعماری، از خود نشان می‌دهد. این برتری ناشی از تنوع بالای محصولات و امکان جایگزینی درون‌گروهی آن‌هاست، که باعث افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، پاسخ‌گویی بهتر به تقاضا، کاهش کمبود و در نتیجه ارتقای رضایت مشتری و بهبود عملکرد شبکه توزیع می‌شود.

شکل۵. تأثیر افزایش تعداد محصولات بر سفارش‌های ازدست‌رفته برای داده‌های مصنوعی

به منظور ارزیابی سهم نسبی هر یک از سه عامل اصلی مدل، چهار سناریوی آزمایشی طراحی و اجرا شد. جزئیات هر یک از این سناریوها به‌صورت تفکیک‌شده در جدول ٦ ارائه شده است.

جدول ۶. بررسی اثرات هر سناریو و استراتژی قیمت گذاری، چینش، جایگزینی و مدل کامل بر میزان سود.

سناریو	توضیح	تغییر سود (٪)	تغییر فروش ازدست‌رفته (٪)
فقط قیمت‌گذاری	تنظیم پویا، چینش و جایگزینی ثابت	+٨.٤٪	–٦.٢٪
فقط چینش	بازآرایی بهینه، قیمت و جایگزینی ثابت	+٦.٩٪	–٥.٧٪
فقط جایگزینی	اعمال ماتریس جایگزینی، قیمت و چینش ثابت	+٤.٥٪	–٩.١٪
ترکیبی (مدل کامل	قیمت‌گذاری + چینش + جایگزینی	+٢٠.١٪	–١٥.٣٪

اثر قیمت‌گذاری عمدتاً در افزایش حاشیه سود واحد و کاهش نیاز به تخفیف‌های گسترده مشهود بود. اثر چینش محصولات بیشتر به بهبود فروش اقلام پرتقاضا و بهینه‌سازی استفاده

از فضای قفسه اختصاص داشت. اثر جایگزینی چندمرحله‌ای، با کاهش قابل توجه فروش‌های ازدست‌رفته همراه بود، هرچند تأثیر مستقیم آن بر سود، کمتر از دو عامل دیگر بود. ترکیب همزمان این سه عامل، اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و بیشترین بهبود کلی را به همراه داشت.

الگوریتم‌های فرااکتشافی مانند بهینه‌سازی جنگل و الگوریتم ژنتیک با تولید تصادفی جمعیت اولیه آغاز می‌شوند و بسیاری از عملگرهای آن‌ها ماهیت تصادفی دارد؛ بنابراین اجرای منفرد می‌تواند نتایج ناپایداری ارائه دهد. برای ارزیابی دقیق عملکرد، تکرار آزمایش‌ها و استفاده از میانگین نتایج ضروری است. بسته به توزیع داده‌ها، برای مقایسه آماری عملکرد الگوریتم‌ها از آزمون‌های پارامتری یا غیرپارامتری استفاده می‌شود؛ در این پژوهش، آزمون کولموگروف–اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌ها به کار گرفته شد.

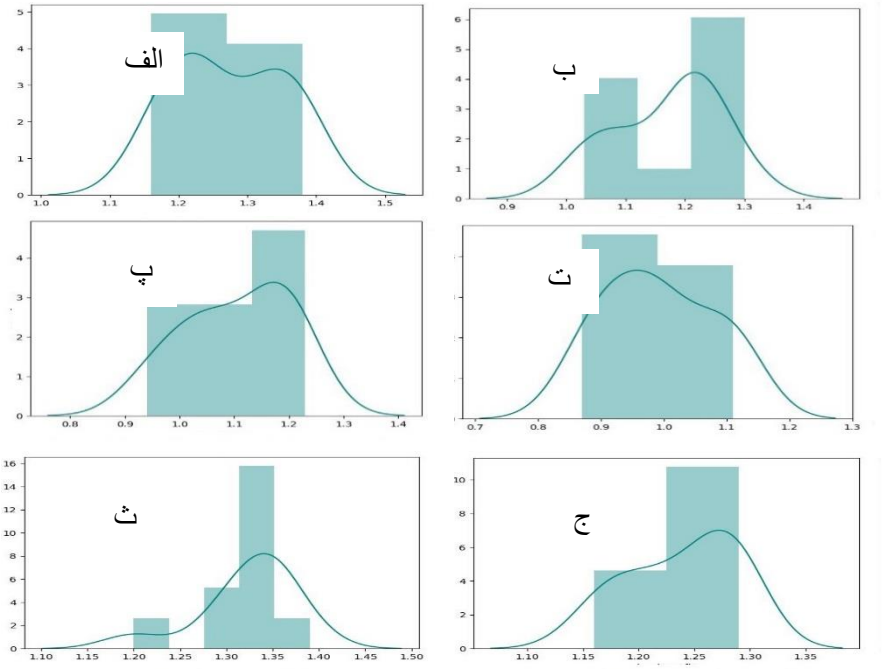
داده‌های تجربی شامل ۱۰ محصول در شش کانال و دو تأمین‌کننده و داده‌های مصنوعی مشتمل بر ۲۰۰ محصول در هفت دسته و شش کانال هستند. این چارچوب، سنجش الگوریتم‌ها در شرایط گوناگون را ممکن ساخته و نتایج حاصل از تکرارهای مختلف هر الگوریتم در جدول ۷ گزارش شده‌اند. این داده‌ها برای تحلیل‌های آماری بعدی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

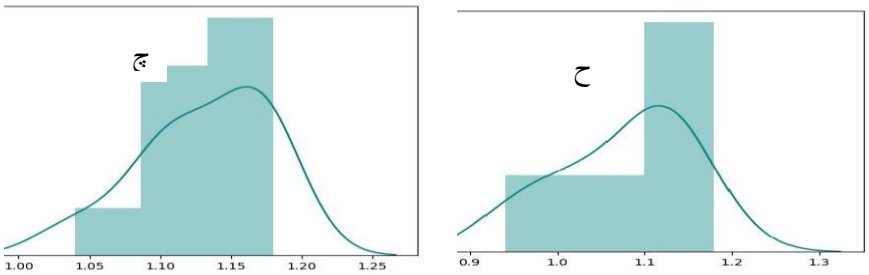
جدول ۷. نتایج آزمایش برای روش‌های مختلف بهینه‌سازی بر روی داده‌های تجربی

	داده‌های مصنوعی				داده‌های تجربی			
ردیف آزمون	ژنتیک	ازدحام ذرات	رقابت استعماری	الگوریتم جنگل	ژنتیک	ازدحام ذرات	رقابت استعماری	الگوریتم جنگل
۱	۱.۰۳	۱.۱۱	۱.۱۶	۱.۲۰	۱.۰۰	۱.۱۸	۱.۲۱	۱.۱۹
۲	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۸	۱.۳۵	۰.۹۱	۱.۲۳	۱.۲۱	۱.۲۳
۳	۱.۱۸	۱.۱۸	۱.۲۹	۱.۳۰	۰.۸۹	۱.۰۳	۱.۳۰	۱.۳۸
۴	۰.۹۴	۱.۱۷	۱.۲۸	۱.۲۹	۱.۱۱	۰.۹۴	۱.۱۱	۱.۳۵
۵	۱.۱۱	۱.۱۶	۱.۲۳	۱.۳۲	۱.۱۰	۱.۱۸	۱.۰۹	۱.۲۴
۶	۱.۱۳	۱.۱۷	۱.۲۸	۱.۳۵	۰.۹۴	۱.۱۸	۱.۰۳	۱.۲۰
۷	۱.۰۴	۱.۱۲	۱.۲۹	۱.۳۵	۱.۱۱	۱.۰۶	۱.۲۰	۱.۱۶
۸	۰.۹۸	۱.۱۷	۱.۲۳	۱.۳۹	۰.۹۷	۰.۹۸	۱.۲۳	۱.۳۸
۹	۱.۱۴	۱.۰۹	۱.۲۶	۱.۳۴	۱.۰۳	۱.۰۶	۱.۲۴	۱.۳۳
۱۰	۱.۱۱	۱.۰۴	۱.۱۹	۱.۳۵	۰.۸۷	۱.۲۰	۱.۰۴	۱.۲۴

آزمون کولموگروف–اسمیرنوف، یکی از ابزارهای غیرپارامتریک مشهور در تحلیل آماری، برای بررسی تطابق توزیع داده‌های نمونه با یک توزیع نظری—معمولاً نرمال—به‌کار می‌رود و به عنوان آزمون نیکویی برازش نیز شناخته می‌شود. این آزمون با مقایسه توزیع تجربی داده‌ها با توزیع فرض‌شده، فرض صفر را بر نرمال بودن یا یکنواختی توزیع قرار می‌دهد و سطح خطای ۰.۰۵ را معیار تصمیم‌گیری در نظر می‌گیرد. اگر مقدار p حاصل از آزمون برابر یا بیشتر از ۰.۰۵ باشد، فرض صفر رد نمی‌شود و داده‌ها نرمال فرض می‌شوند؛ در غیر این صورت، استفاده از آزمون‌های غیرپارامتریک مناسب‌تر خواهد بود.

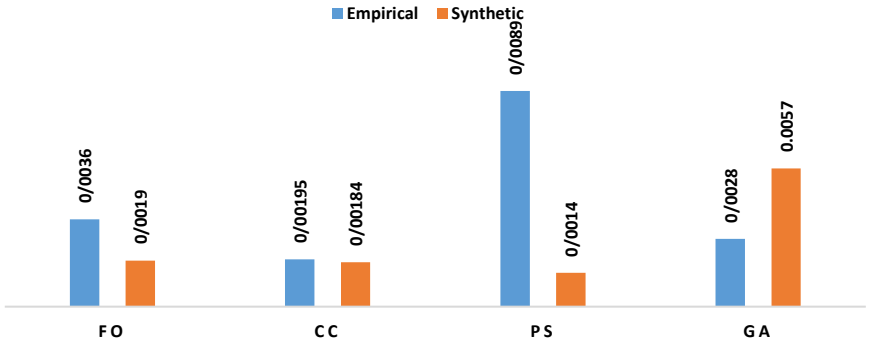
با توجه به داده‌های ارائه‌شده در شکل ٦، توزیع داده‌ها نرمال نبوده و فرض صفر در این آزمایش رد شده است.





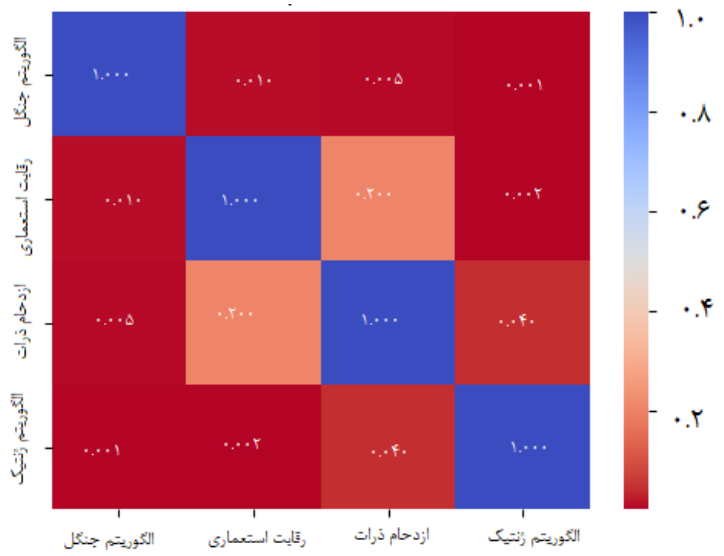
شکل۶. توزیع میزان سود بر اساس داده‌های تجربی: الف)بهینه سازی جنگل ، ب)رقابت استعماری ، پ) ازدحام ذرات ، ت) ژنتیک ، نمودار سود بر اساس داده‌های مصنوعی: ث) بهینه سازی جنگل ، ج) قابت استعماری ، چ) ازدحام ذرات ، ح) ژنتیک

شکل ۷ نتایج آزمون کولموگروف–اسمیرنوف را نشان می‌دهد، که با توجه به مقادیر p کمتر از ۰.۰۵، غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها را تأیید می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها با فرض نرمال بودن مطابقت ندارد و بنابراین، استفاده از آزمون‌های غیرپارامتریک برای مقایسه عملکرد روش‌ها ضروری است. در شرایطی که توزیع داده‌ها از نرمال بودن انحراف دارد، آزمون‌های غیرپارامتریک انعطاف‌پذیری بیشتری در تحلیل و تفسیر داده‌ها دارند، زیرا نیازی به فرضیات سختگیرانه مرتبط با نرمال بودن وجود ندارد. بر این اساس، در پژوهش حاضر از این آزمون‌ها برای ارزیابی دقیق‌تر روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۷. نتایج آزمون کولموگروف –اسمیرنف در روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای داده‌های تجربی و مصنوعی.

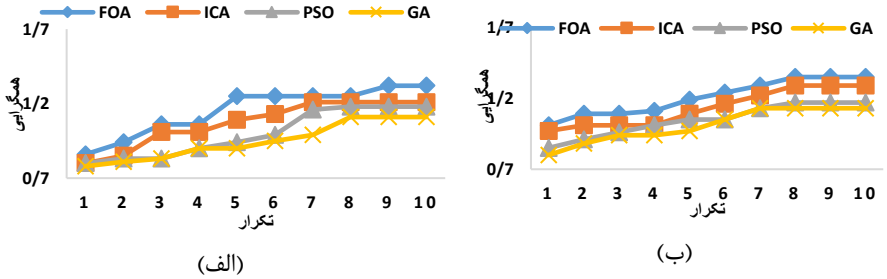
به دلیل غیرنرمال بودن داده‌ها، از آزمون ویلکاکسون برای مقایسه دو روش بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج آزمون نشان داد که در برخی موارد اختلاف عملکرد بین روش‌ها معنادار است، در حالی که در برخی موارد دیگر تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشد. شکل ۸ مقادیر p را نشان می‌دهد که مقادیر کمتر از ۰٫۰۵ بیانگر اختلاف معنادار هستند. بررسی نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی جنگل به‌طور کلی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و این امر برتری بالقوه آن را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. داده‌های تجربی اختلاف معنادار عملکرد را در تمامی روش‌ها، به جز الگوریتم رقابت استعماری، تأیید کردند، در حالی که داده‌های مصنوعی اختلاف معناداری را نشان دادند، به جز در موارد الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات. این نتایج به‌طور کلی نشان‌دهنده برتری متوسط روش بهینه‌سازی جنگل و پتانسیل آن برای بهبود عملکرد در سناریوهای مختلف است.



شکل۸. مقایسه روش‌های بهینه‌سازی با مقادیر p برای داده‌های تجربی

یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی الگوریتم‌های فرااکتشافی، سرعت و کیفیت همگرایی به راه‌حل نهایی است؛ یعنی نقطه‌ای که بهبود معناداری در نتایج رخ نمی‌دهد. هرچه همگرایی سریع‌تر و در نزدیکی راه‌حل‌های بهینه اتفاق بیفتد، کارایی الگوریتم بالاتر خواهد بود. بر اساس

نتایج تجربی (شکل ۹)، الگوریتم بهینه‌سازی جنگل معمولاً از مرحله چهارم به همگرایی می‌رسد، در حالی که سایر الگوریتم‌ها بین مراحل ٦ تا ۱۰ همگرا می‌شوند. در داده‌های مصنوعی نیز این الگوریتم از مرحله پانزدهم همگرا شده، در حالی که دیگر روش‌ها بین مراحل ۱۵ تا ۲۰ به همگرایی می‌رسند. این یافته‌ها نشان‌دهنده توان بالای بهینه‌سازی جنگل در دستیابی سریع‌تر و مؤثرتر به راه‌حل‌های بهینه است.



شکل ۹. (الف) بررسی نرخ همگرایی برای روش‌های مختلف بهینه‌سازی در داده‌های تجربی،(ب) بررسی نرخ همگرایی برای روش‌های مختلف بهینه‌سازی در داده‌های مصنوعی.

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی قیمت و مدیریت موجودی در خرده‌فروشی چندکاناله، مدلی چندهدفه و مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط ارائه می‌دهد که با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم زیگزاگ و مقایسه با روش‌های NSGA-II و MINLP ارزیابی شده است. برای کاهش سفارش‌های از دست‌رفته، راهکارهایی مانند تعدیل قیمت‌های تبلیغاتی و تأمین نیاز از کانال‌های با هزینه بالاتر پیشنهاد شده است. به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن مدل، حل آن با روش‌های ابتکاری مانند الگوریتم بهینه‌سازی جنگل و الگوریتم ژنتیک انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌سازی جنگل و روش پیشنهادی، در افزایش سود تا ۲۷٪ و کاهش سفارش‌های از دست‌رفته، عملکرد برتری دارند. همچنین، افزایش تعداد کانال‌ها و تنوع محصولات منجر به بهبود ۲۰ درصدی سود شده است. این پژوهش با توجه به نارسایی‌های ادبیات موجود در زمینه طراحی شبکه، تخصیص سفارش و برنامه‌ریزی موجودی، چارچوبی جامع برای بررسی یکپارچه و آینده‌نگر مسائل بازاریابی، قیمت‌گذاری، تبلیغات و خدمات تحویل ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در پر کردن خلأهای شناسایی‌شده در حوزه خرده‌فروشی چندکاناله به‌شمار می‌رود.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی یکپارچه تصمیمات گزینش کالا، چینش، قیمت‌گذاری و مدیریت اثر جایگزینی در محیط چندکاناله انجام شد. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی زنجیره فروشگاه‌های افق کوروش و مجموعه‌ای از داده‌های مصنوعی طراحی و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرااکتشافی شامل الگوریتم بهینه‌سازی جنگل، رقابت استعماری، ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک حل گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد:

- مدل پیشنهادی در سناریوی ترکیبی (قیمت‌گذاری + چینش + جایگزینی) میانگین سود را تا ٪۲۰٫۱ افزایش و فروش ازدست‌رفته را تا ٪۱۵٫۳ کاهش داد.
- الگوریتم بهینه‌سازی جنگل، در داده‌های تجربی سودی معادل ۱٫۲۸ برابر و در داده‌های مصنوعی ۱٫۳۳ برابر حالت پایه کسب کرد که از نظر آماری ($p < ۰٫۰۱$) و عملی (افزایش میانگین سود تا ٪۲۱) معنادار بود.
- بهینه‌سازی قیمت‌گذاری به‌تنهایی موجب افزایش سود ٪۸٫٤، بهینه‌سازی چینش ٪٦٫۹ و بهینه‌سازی اثر جایگزینی ٪٤٫۵ شد، اما ترکیب سه عامل بیشترین اثر هم‌افزایی را ایجاد کرد.
- مدل جایگزینی چندمرحله‌ای موجب کاهش قابل‌توجه فروش ازدست‌رفته در شرایط کمبود موجودی و تغییر الگوی تقاضا بین کانال‌ها شد.

این نتایج نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی تصمیمات عملیاتی و بازاریابی در قالب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه، هم‌زمان می‌تواند منجر به افزایش سود، بهبود بهره‌وری فضای قفسه و ارتقاء سطح خدمت به مشتری شود.

برای توسعه تحقیقات در این حوزه پیشنهاد می‌شود:

- مدل توسعه‌یافته با در نظر گرفتن رفتار رقبا و واکنش آن‌ها به تغییرات قیمت و موجودی مورد بررسی قرار گیرد.
- ابعاد پایداری، از جمله کاهش ضایعات غذایی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در زنجیره تأمین، به مدل افزوده شود تا ارزش مدیریتی و زیست‌محیطی ایجاد گردد.
- بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین و پیش‌بینی پویا برای تقاضا، جهت افزایش دقت ورودی‌های مدل و ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری، مورد توجه قرار گیرد.

- آزمون مدل در دسته‌بندی‌های کالایی و بازارهای مختلف، به منظور سنجش قابلیت تعمیم و انعطاف‌پذیری آن، انجام شود.
- ترکیب مدل با شبیه‌سازی عامل‌محور، امکان تحلیل دقیق‌تر تعاملات میان مشتریان و کانال‌های فروش را فراهم کرده و درک جامع‌تری از پویایی‌های بازار ارائه می‌دهد.

۷- منابع

[١] Y. Mou, Z. Guan, and J. Zhang, "Integrated optimization of assortment, inventory and pricing considering omnichannel retailer's risk aversion and customer's time preference," *Expert Systems with Applications*, vol. ٢٣٧, p. ١٢١٤٧٩, Mar. ٢٠٢٤, doi: ١٠,١٠١٦/j.eswa.٢٠٢٣,١٢١٤٧٩.

[٢] A. Hübner, J. Hense, and C. Dethlefs, "The revival of retail stores via omnichannel operations: A literature review and research framework," *European Journal of Operational Research*, vol. ٣٠٢, no. ٣, pp. ٧٩٩–٨١٨, Nov. ٢٠٢٢, doi: ١٠,١٠١٦/j.ejor.٢٠٢١,١٢,٠٢١.

[٣] J. Geunes and Y. Su, "Single-period assortment and stock-level decisions for dual sales channels with capacity limits and uncertain demand," *International Journal of Production Research*, vol. ٥٨, no. ١٨, pp. ٥٥٧٩–٥٦٠٠, Sept. ٢٠٢٠, doi: ١٠,١٠٨٠/٠٠٢٠٧٥٤٣,٢٠١٩,١٦٩٣٦٤٨.

[٤] Y. He, Q. Xu, and P. Wu, "Omnichannel retail operations with refurbished consumer returns," *International Journal of Production Research*, vol. ٥٨, no. ١, pp. ٢٧١–٢٩٠, Jan. ٢٠٢٠, doi: ١٠,١٠٨٠/٠٠٢٠٧٥٤٣,٢٠١٩,١٦٢٩٦٧٢.

[٥] I. Gasparin, E. Panina, L. Becker, M. Yrjölä, E. Jaakkola, and C. Pizzutti, "Challenging the 'integration imperative': A customer perspective on omnichannel journeys," *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. ٦٤, p. ١٠٢٨٢٩, Jan. ٢٠٢٢, doi: ١٠,١٠١٦/j.jretconser.٢٠٢١,١٠٢٨٢٩.

[٦] E. Brynjolfsson, Y. J. Hu, and M. S. Rahman, "Competing in the Age of Omnichannel Retailing," *MIT SMR*, May ٢٠١٣, Accessed: Sept. ٢٠, ٢٠٢٤. [Online]. Available: https://sloanreview.mit.edu/article/competing-in-the-age-of-omnichannel-retailing/

[٧] A. Hübner *et al.*, "Digitalization and omnichannel retailing: Innovative OR approaches for retail operations," *European Journal of Operational Research*, vol. ٢٩٤, no. ٣, pp. ٨١٧–٨١٩, Nov. ٢٠٢١, doi: ١٠,١٠١٦/j.ejor.٢٠٢١,٠٤,٠٤٩.

[٨] R. P. Rooderkerk and A. G. Kök, "Omnichannel Assortment Planning," in *Operations in an Omnichannel World*, S. Gallino and A. Moreno, Eds., Cham: Springer International Publishing, ٢٠١٩, pp. ٥١–٨٦. doi: ١٠,١٠٠٧/٩٧٨-٣-٠٣٠-٢٠١١٩-٧_٤.

[٩] T. Bianchi-Aguiar, A. Hübner, M. A. Carravilla, and J. F. Oliveira, "Retail shelf space planning problems: A comprehensive review and classification

framework," *European Journal of Operational Research*, vol. ۲۸۹, no. ۱, pp. ۱–۱٦, Feb. ۲۰۲۱, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ejor.۲۰۲۰,۰٦,۰۱۸.

[۱۰] J. Hense and A. Hübner, "Assortment optimization in omni-channel retailing," *European Journal of Operational Research*, vol. ۳۰۱, no. ۱, pp. ۱۲٤–۱٤۰, Aug. ۲۰۲۲, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ejor.۲۰۲۱,۰۹,۰٤٥.

[۱۱] G. S. Edirisinghe and C. L. Munson, "Strategic rearrangement of retail shelf space allocations: Using data insights to encourage impulse buying," *Expert Systems with Applications*, vol. ۲۱٦, p. ۱۱۹٤٤۲, Apr. ۲۰۲۳, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.eswa.۲۰۲۲,۱۱۹٤٤۲.

[۱۲] A. Vasilyev, S. Maier, and R. W. Seifert, "Assortment optimization using an attraction model in an omnichannel environment," *European Journal of Operational Research*, vol. ۳۰٦, no. ۱, pp. ۲۰۷–۲۲٦, Apr. ۲۰۲۳, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ejor.۲۰۲۲,۰۸,۰۰۲.

[۱۳] Z. Guan, Y. Mou, and J. Zhang, "Incorporating risk aversion and time preference into omnichannel retail operations considering assortment and inventory optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. ۳۱٤, no. ۲, pp. ٥۷۹–٥۹٦, Apr. ۲۰۲٤, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ejor.۲۰۲۳,۰۹,۰۳٤.

[۱٤] Y. Chen, Z. Wu, and Y. Wang, "Omnichannel product selection and shelf space planning optimization," *Omega*, vol. ۱۲۷, p. ۱۰۳۰۷٤, Sept. ۲۰۲٤, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.omega.۲۰۲٤,۱۰۳۰۷٤.

[۱٥] S. S. Alizadeh Moghadam, A. Kordnaeij, S. hamid Khodadad hosseini, and A. Mohamadian, "Identification and conceptualization of strategic decision-making drivers of digital transformation in Iranian apparel retail organizations," *Management Research in Iran*, vol. ۲۷, no. ٤, pp. ٥۹–۸۸, ۲۰۲٤.

[۱٦] P. Ghandvar, N. Azad, A. Naami, and F. Alizadeh Meshkani, "Factors Influencing Online Buying Experience Through Retail Mobile Applications using Interpretive Structural Modelling," *Management Research in Iran*, vol. ۲٦, no. ۳, pp. ٤۷–٦۸, ۲۰۲۲.

[۱۷] hassan bagheri, mohammad hosein Karimi Ghovareshki, M. ABBASI, and H. Fazlollahtabar, "An integrated model for optimizing pricing, inventory and marketing decisions for fast-moving goods in a multi-channel network," *Modern Research in Decision Making*, vol. ۸, no. ٤, pp. ۱–۲۹, ۲۰۲٤.

[۱۸] M. R. Gholamian and H. Zamani Bajegani, "An inventory control model for obsolete items with consideration of all unit quantity discount and price-dependent on order quantity," *Modern Research in Decision Making*, vol. ٤, no. ٤, pp. ۱۲۷–۱٤٦, ۲۰۱۹.

[۱۹] J. Cebollada, Y. Chu, and Z. Jiang, "Online Category Pricing at a Multichannel Grocery Retailer," *Journal of Interactive Marketing*, vol. ٤٦, no. ۱, pp. ٥۲–٦۹, May ۲۰۱۹, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.intmar.۲۰۱۸,۱۲,۰۰٤.

[۲۰] M. C. Cohen, N.-H. Z. Leung, K. Panchamgam, G. Perakis, and A. Smith, "The Impact of Linear Optimization on Promotion Planning," *Operations Research*, vol. ٦٥, no. ۲, pp. ٤٤٦–٤٦۸, Apr. ۲۰۱۷, doi: ۱۰,۱۲۸۷/opre.۲۰۱٦,۱٥۷۳.

[۲۱] P. C. Verhoef, P. K. Kannan, and J. J. Inman, “From Multi-Channel Retailing to Omni-Channel Retailing: Introduction to the Special Issue on Multi-Channel Retailing,” *Journal of Retailing*, vol. ۹۱, no. ۲, pp. ۱۷٤–۱۸۱, June ۲۰۱٥, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.jretai.۲۰۱٥,۰۲,۰۰٥.

[۲۲] S. Transchel, M. E. Buisman, and R. Haijema, “Joint assortment and inventory optimization for vertically differentiated products under consumer-driven substitution,” *European Journal of Operational Research*, vol. ۳۰۱, no. ۱, pp. ۱٦۳–۱۷۹, Aug. ۲۰۲۲, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ejor.۲۰۲۱,۰۹,۰٤۱.

[۲۳] H. J. van Heerde, P. S. H. Leeflang, and D. R. Wittink, “How Promotions Work: SCAN*PRO-Based Evolutionary Model Building,” *Schmalenbach Bus Rev*, vol. ٥٤, no. ۳, pp. ۱۹۸–۲۲۰, July ۲۰۰۲, doi: ۱۰,۱۰۰۷/BF۰۳۳۹٦٦٥۳.

[۲٤] M. Ghaemi and M.-R. Feizi-Derakhshi, “Forest Optimization Algorithm,” *Expert Systems with Applications*, vol. ٤۱, no. ۱٥, pp. ٦٦۷٦–٦٦۸۷, Nov. ۲۰۱٤, doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.eswa.۲۰۱٤,۰٥,۰۰۹.

[۲٥] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, Nov. ۱۹۹٥, pp. ۱۹٤۲–۱۹٤۸ vol.٤. doi: ۱۰,۱۱۰۹/ICNN.۱۹۹٥,٤۸۸۹٦۸.

[۲٦] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, “Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition,” in *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Sept. ۲۰۰۷, pp. ٤٦٦۱–٤٦٦۷. doi: ۱۰,۱۱۰۹/CEC.۲۰۰۷,٤٤۲٥۰۸۳.