

تصمیمات مشترک در خصوص قیمت‌گذاری و تجمیع سفارش‌های مشتری در گام آخر تحویل کالا در شرایط تقاضای غیرقطعی

ملینا صفری‌نسب^۱، محسن شیخ سجادیه^۲، متینه زیاری^{۳*}

۱. گروه مهندسی سیستم‌ها، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی سیستم‌ها، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه

امروزه با توسعه روزافزون فروشگاه‌های اینترنتی و کسب‌وکارهای آنلاین، بخش زیادی از نیازهای مشتریان از این راه پاسخ داده می‌شود. تمرکز این پژوهش، بر قیمت‌گذاری محصولات و حل مسأله تحویل جداگانه سفارش‌ها در گام آخر تحویل کالا است. تحویل جداگانه سفارش‌ها، هنگامی که چندین سفارش یک مشتری در یک دوره زمانی مشخص، در چند سفر جداگانه ارسال می‌شود موضوعیت دارد. این پژوهش، یک زنجیره تأمین دو سطحی شامل یک مرکز تحویل و تعدادی از مشتریان نهایی را مورد هدف قرار می‌دهد. هر یک از مشتریان، در طول یک دوره زمانی مشخص، می‌توانند چندین سفارش ثبت کنند. همچنین در این پژوهش، تنوع محصول وجود دارد و زمان ثبت سفارش هر محصول توسط هر مشتری غیرقطعی و تحت هر سناریو متفاوت است. برای مواجهه با این عدم قطعیت، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح با رویکرد بهینه‌سازی استوار براساس مدل سناریو محور مالوی ارائه شده است. برای حل مدل ریاضی در ابعاد بزرگ از یک الگوریتم ابتکاری استفاده می‌شود. در نهایت، مسأله به صورت عددی در ابعاد مختلف، حل و عملکرد خوب الگوریتم ابتکاری با دقت ۹۵٪ تا ۹۹٪ و حداکثر زمان حل ۹ ثانیه برای بزرگ‌ترین نمونه نسبت به روش حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز که بیش از ۷۲۰۰ ثانیه برای همگرایی نیاز به زمان دارد، نشان داده می‌شود. همچنین، برتری سیاست تجمیع سفارش‌ها نسبت به روش خروج به ترتیب ورود روی پارامترهای مختلف حاصل می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تأثیرگذار مسأله، دیدگاه‌های مدیریتی ارزشمندی برای به کار بردن در عمل ایجاد می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

سیاست تجمیع سفارش‌ها

براساس زمان

تحویل گام آخر کالا

قیمت‌گذاری

میل به پرداخت مشتری

عدم قطعیت در تقاضا

بهینه‌سازی استوار

۱. مقدمه

منظور از تجارت الکترونیک، انجام فرآیندهای خرید، فروش یا تبادل محصولات و همچنین ارائه خدمات در بستر اینترنت می‌باشد [۱]. در بازار جهانی، وجود تجارت الکترونیک به عنوان تجارتی پیشرو، درهای جدیدی از فرصت‌ها را به روی شرکت‌ها، برندها و سرمایه‌گذاران گشوده است. بنابراین همه‌ی کسب‌وکارها نیاز مبرمی به فعالیت از طریق بستر

امروزه اینترنت به بستری گسترده جهت انجام معاملات تجاری تبدیل شده است و مزیت‌های بسیاری را در شیوه‌های انجام کسب‌وکار، برای مصرف‌کنندگان و فروشندگان ایجاد نموده است. این امر موجب شده است تا بسیاری از کسب‌وکارها پا به عرصه تجارت الکترونیک بگذارند.

* نویسنده مسئول: متینه زیاری

تلفن: ۰۲۱-۸۴۴۸۳۰۸۲۱؛ پست الکترونیکی: m.ziari@ut.ac.ir

مرتبط انجام شده پرداخته شده است. در بخش سوم این پژوهش مدل سازی مسأله قطعی و غیرقطعی مطرح شده است. در بخش چهارم مدل حل شده و تصمیمات بهینه مشخص می شود و در بخش پنجم نتایج مختلف به دست آمده تحت هر کدام از سیاست ها با هم مقایسه می شوند و در نهایت بخش آخر به نتیجه گیری مقاله می پردازد.

۲. مرور ادبیات

در این بخش، به بررسی ادبیات مربوط به هر کدام از این مفاهیم پرداخته می شود. البته این نکته باید ذکر شود که در پژوهش های پیشین بعضی از این مفاهیم توأم در ادبیات استفاده شده اند اما سعی شده یک دسته بندی کلی پژوهش های انجام شده از مفاهیم ارائه شود تا کاربرد مفاهیم به خوبی توضیح داده شود و جایگاه این پژوهش در بین ادبیات موجود مشخص شود. برای جلوگیری از دست رفتن توضیحات و مفاهیم موجود در پژوهش ها، تمام اهداف و نکات بیان می شود و همچنین دسته بندی جدیدی برای پژوهش هایی که مرتبط هستند نیز آورده می شود.

۲-۱. بهینه سازی عملیات در گام آخر لجستیک

رشد سریع کسب و کارهای تجارت الکترونیک، اگرچه انتخاب های بیشتری را برای خریداران فراهم آورده است، اما به یکی از بزرگترین چالش های سیستم های لجستیکی مخصوصاً در گام آخر تحویل، تبدیل شده است [۵]. از این رو در سال های اخیر بسیاری از پژوهش ها با استفاده از بهینه سازی ریاضی سعی در تسهیل امور در گام آخر تحویل کرده اند. این پژوهش ها عمدتاً بر مسائل مسیریابی وسایل نقلیه [۶، ۷]، زمان بندی تحویل [۸، ۹]، مکان یابی تسهیلات [۱۰] و برنامه ریزی حمل و نقل [۱۱، ۱۲] تأکید کرده اند.

در مسائل مسیریابی برخی از مقالات به مسیریابی وسیله نقلیه پرداخته اند. برای نمونه در پژوهشی از دگرنسی و همکاران [۱۳]، یک مدل جدید به منظور مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر داشتن پنجره های زمانی و چندین فرد خدمت دهنده ارائه شد که هدف آن، رسیدن به تعادل بین پرداخت بیشتر به خدمت دهنده ها برای تحویل سفارش به صورت پیاده، در نتیجه کاهش هزینه حمل و نقل و یا استفاده بیشتر از وسیله نقلیه به منظور تحویل می باشد. همچنین در مقاله ای از دیوید کورتس و سوزوکی [۱۴] مفهوم جدیدی به نام تجمیع سفارش ها بین مسیر برای هر مشتری بیان شد. در این مطالعه، سفارش های هر مشتری در محل های مشخصی بین وسایل حمل و نقل جابه جا می شوند. نتایج این مطالعه نشان داد با به کارگیری این سیاست، هزینه حمل و نقل می تواند تا ۱۰ درصد نسبت به حالتی که چندین ارسال جداگانه برای هر مشتری انجام شود، کاهش یابد.

مسائل زمان بندی اغلب به برنامه ریزی توالی زمان های تحویل می پردازد. برای نمونه می توان به پژوهش هان و همکاران [۱۵] اشاره کرد که زمان بندی تحویل و مسیریابی وسیله نقلیه برای تحویل درب منزل را در یک افق زمانی، بهینه کردند. برخی دیگر از پژوهش ها به جنبه های گوناگونی در برنامه ریزی حمل و نقل مانند استفاده از

اینترنت را حس می کنند. در چنین فضایی، در صورت عدم ارائه راهکارهای مناسب، کسب و کارها از سود قابل توجهی که قادر به کسب آن بودند، باز می مانند [۲]. همچنین ممکن است بسیاری از آن ها در این فضای رقابتی در مراحل ابتدایی با شکست روبه رو شده و از بازار خارج شوند. گفته می شود که کسب درآمد به اندازه ی کاهش هزینه ها در استراتژی لجستیک حائز اهمیت است [۳].

از آنجا که گام آخر تحویل کالا، به عنوان پرهزینه ترین و کم بازده ترین بخش زنجیره تأمین شناخته می شود و تفاوت اصلی بین ارسال کالا به روش سنتی و مدرن در این مرحله بارزتر است، تصمیم گیری در خصوص نحوه ارسال سفارش ها و تعیین زمان بهینه ارسال می تواند باعث صرفه جویی در بخش قابل توجهی از هزینه ها شود و تعیین قیمت بهینه محصولات، می تواند سود قابل ملاحظه ای را برای کسب و کارها در بر داشته باشد. از طرفی، علی رغم نقش حیاتی قیمت کالا و خدمات به عنوان یک متغیر مهم در ایجاد مزیت رقابتی در بازار فعال و رقابتی کنونی، تحقیقات اندکی مبحث بهینه سازی قیمت را مورد بررسی قرار دادند و اکثر تحقیقات حاضر در زمینه قیمت گذاری، از دیدگاه بازاریابی و مدیریتی به این مبحث پرداخته اند [۴].

همچنین در دنیای واقعی تقاضا دارای عدم قطعیت می باشد و در صورتی که تقاضا به درستی پیش بینی نشود، می تواند سایر تصمیم گیری ها در گام های بعد را در زنجیره تأمین تحت تأثیر قرار بدهد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی مسأله تصمیمات مشترک در خصوص قیمت گذاری و نحوه ارسال سفارش های هر مشتری در گام آخر تحویل کالا در شرایط تقاضای غیرقطعی می باشد. مدل سازی مسأله با هدف حداکثرسازی سود مرکز تحویل و ایجاد موازنه ای بین ارسال جداگانه یا ارسال یکجا برای سفارش های هر مشتری انجام می گیرد. تقاضای هر مشتری برای هر محصول، قیمت فروش هر محصول، زمان ارسال هر سفارش برای هر مشتری تحت سه سناریوی گسسته توسط یک مدل بهینه سازی استوار مبتنی بر رویکرد مالی و همکاران تعیین می شوند. مدل ریاضی توسط یک الگوریتم ابتکاری حل می شود. خروجی حل با روش ارسال خروج به ترتیب ورود مقایسه می شود و در نهایت نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تأثیرگذار مسأله، می تواند در تعیین استراتژی، کمک کننده ی خرده فروشان آنلاین باشد. از اهداف اصلی انتخاب موضوع پژوهش حاضر پاسخ به این سؤالات است:

- در چه شرایطی استفاده از سیاست تجمیع سفارشات براساس زمان نسبت به روش خروج به ترتیب ورود برتری دارد؟
- آیا مقدار تعیین کننده ای برای هزینه ثابت حمل و نقل و هزینه نگهداری موجودی وجود دارد که در تصمیم گیری نحوه ارسال نقش داشته باشد؟
- با افزایش عدم قطعیت در سناریوهای مختلف، استراتژی مناسب برای تعیین قیمت محصولات چیست؟

در ادامه این پژوهش در بخش دوم به بررسی و مرور ادبیات سیاست های قیمت گذاری، جابه جایی محصول و سایر پژوهش های

سیاست‌های تجمیع، استفاده از ظرفیت اضافی وسیله نقلیه و برنامه‌ریزی تحویل‌های درب منزل پرداخته‌اند که در این بین، سیاست تجمیع سفارش‌ها به دلیل پتانسیل بالایی که در کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد تحویل دارد مورد توجه بسیار قرار گرفته است که ادبیات آن در بخش بعدی به‌طور گسترده شرح داده شده است.

۲-۲. سیاست تجمیع سفارش‌ها

در نتیجه‌ی رشد تجارت الکترونیک و در پی آن حجم بالای سفارش‌های اینترنتی، بسیاری از پژوهش‌ها به مطالعه تأثیر استفاده از سیاست تجمیع سفارش‌ها به منظور کاهش هزینه‌ها در گام آخر تحویل کالا پرداخته‌اند. در این سیاست، یک مرکز تحویل، تحویل برخی سفارش‌ها را به تأخیر انداخته و آن‌ها را در تعداد بسته‌بندی و تعداد سفرهای کمتری همراه با سفارش‌های بعدی ارسال می‌کند. در نتیجه‌ی این اقدام، هزینه حمل‌ونقل به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۶]. اگرچه بعضی از محققان مانند اولکو [۱۷] معتقد هستند که به‌کارگیری سیاست تجمیع سفارش‌ها، باعث کاهش تأثیرات مضر زیست محیطی نیز می‌شود، برخی دیگر همچون برلینگ و انگ-لارسون [۱۸] نشان می‌دهند که در برخی موارد، پیاده‌سازی این سیاست، به‌علت انباشت شدن سفارش‌ها و یا ارسال سفارش‌های تجمیع‌شده با تناوبی بیش از تناوب بهینه، می‌تواند تأثیر عکس بر محیط زیست داشته باشد. بنابراین در مطالعات انجام شده در این حوزه، تعیین زمان بهینه ارسال بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به‌طور کلی سیاست‌های تجمیع سفارش‌ها در عمل و در ادبیات به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱) سیاست تجمیع براساس مقدار

۲) سیاست تجمیع براساس زمان

۳) سیاست ترکیبی تجمیع براساس مقدار و زمان

باید توجه کرد که انتخاب نوع رویکرد بستگی به ویژگی‌های مسئله تحت بررسی دارد. به‌طور کلی، زمانی که تحویل به موقع اهمیت بیشتری نسبت به هزینه‌ی نگهداری داشته باشد، بهتر است از رویکرد تجمیع براساس زمان استفاده شود و بالعکس.

۲-۳. تصمیمات مشترک درخصوص تجمیع سفارش‌ها و

قیمت‌گذاری

در دنیای امروزی، به دلیل بالا بودن رقابت در تجارت الکترونیک، طراحی یک زنجیره‌تأمین سودآور می‌تواند نقش مؤثری در بقا، تداوم و افزایش سهم بازار برای کسب‌وکارهای فعال در این محیط داشته باشد. به بیان دیگر، کسب‌وکارهای اینترنتی می‌توانند با تعیین زمان بهینه ارسال سفارش و قیمت مربوط به آن، رفتار مشتریان را تحت کنترل خود درآورند [۱۹]. ادبیاتی در زمینه حداکثرسازی سود در گام آخر تحویل کالا و همچنین تصمیمات مشترک درخصوص تجمیع سفارش‌ها و قیمت‌گذاری وجود دارد. برای نمونه، برلینگ و اینج لارسون [۱۸]، با به‌کار گرفتن سیاست تجمیع سفارش‌ها، دو دسته از مشتریان با حساسیت بالا و حساسیت کم به زمان تحویل را مورد هدف قرار دادند. همچنین آن‌ها دو سیاست قیمت‌گذاری ارائه کردند و نشان

دادند سیاست بهینه بسته به نوع مشتری متفاوت است.

در پژوهش دیگری توسط هانگ و لی [۲۰]، یک مدل ریاضی بر مبنای سیاست تجمیع براساس زمان به منظور پیدا کردن قیمت بهینه، مقدار دوباره پرکردن و سیکل تجمیع با هدف حداکثر کردن سود سیستم موجودی تک محصوله توسعه داده شد. در راستای توسعه‌ی این پژوهش، طالعی‌زاده و رسولی باغبان [۲۱]، به بهینه‌سازی موارد بالا در یک زنجیره‌تأمین سه سطحی شامل یک تولیدکننده، یک فروشنده و تعدادی خرده‌فروش پرداختند.

همان‌طور که تأثیر زمان تحویل تعهد شده را بر تقاضای مشتری نمی‌توان نادیده گرفت، تأثیر قیمت بر تقاضا نیز قابل چشم‌پوشی نیست. از تحقیقاتی که در زمینه‌ی تقاضای حساس به مدت زمان تحویل و قیمت صورت گرفته است، می‌توان به کارهای تحقیقاتی اولکو و همکاران [۲۲] اشاره کرد. آن‌ها به بررسی سیاست تجمیع و قیمت‌گذاری برای یک فروشنده و چندین خریدار تحت سرویس حمل‌ونقل شخصی پرداختند. در پژوهش دیگری از آن‌ها، تأثیر چهار سیاست متفاوت قیمت‌گذاری تحت تجمیع سفارش‌ها برای یک شرکت لجستیکی طرف سوم مورد مطالعه قرار گرفت [۲۳]. در پژوهشی از هانسون و مارتین [۲۴] مفهوم میل به پرداخت مشتری برای تعیین قصد خرید یا عدم قصد خرید بیان شده است. در این پژوهش متغیر باینری قصد خرید مشتری با توجه به مفهومی به نام مازاد مصرف‌کننده (اختلاف بین قیمتی که مشتری حاضر به پرداخت است و قیمت بازار) به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که در مسأله مورد تحقیق در این مقاله نیز از این مفهوم برای به‌دست آوردن خرید یا عدم خرید مشتری و زمان ثبت سفارش آن استفاده شده است. میل به پرداخت یک مفهوم کلیدی در اقتصاد و بازاریابی است که نشان‌دهنده حداکثر میلی است که یک مشتری به ازای دریافت یک کالا یا خدمت خاص، حاضر به پرداخت آن است. این پارامتر تحت تأثیر عوامل درونی و بیرونی متعددی از جمله ترجیحات شخصی، درآمد مشتری، وجود کالاهای جایگزین، شرایط محیطی (مانند آب‌وهوا یا مناسبت‌ها) و وضعیت بازار قرار می‌گیرد.

به‌علاوه، در ادبیات مربوط به تصمیمات مشترک درخصوص تجمیع سفارش‌ها و قیمت‌گذاری، تلاش برای حفظ تازگی محصولات فسادپذیر نیز در برخی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله‌ی آن می‌توان به کارهای چن [۲۵] اشاره کرد که در آن، تقاضا نه تنها به مدت زمان تحویل و قیمت حساسیت دارد بلکه، به تازگی محصول نیز وابسته است. در راستای توسعه این پژوهش، او یک مدل تحت عدم قطعیت در کیفیت اولیه محصولات فسادپذیر ارائه کرد [۲۶]. به‌علاوه در زمینه استفاده از سیاست تجمیع سفارش‌ها برای محصولات فسادپذیر، گوین و همکاران [۲۷] به تصمیم‌گیری برای نحوه تجمیع سفارش‌ها برای محصولات چندین تأمین‌کننده محصولات فسادپذیر در یک مرکز تجمیع پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که استفاده از این سیاست تنها زمانی که سطح تقاضای تأمین‌کنندگان متوسط است به‌صرفه می‌باشد. همچنین برخی از پژوهش‌های انجام

یکپارچه مورد بررسی قرار نداده اند.

این پژوهش به طور همزمان به پر کردن هر چهار شکاف فوق می پردازد. مدل پیشنهادی حاضر، یک مدل یکپارچه برای گام آخر تحویل کالا است که تنوع محصول را در نظر گرفته، عدم قطعیت در تقاضا را با به کارگیری بهینه سازی استوار پوشش می دهد و تصمیمات قیمت گذاری و تجمیع را به طور مشترک برای حداکثرسازی سود بهینه می کند. بنابراین، این مطالعه جایگاه خود را به عنوان پژوهشی نوآورانه و کامل در ادبیات موجود تثبیت می نماید.

۳. تعریف مسأله پیشنهادی

در این بخش، مسأله درخصوص تصمیمات مشترک قیمت گذاری و تجمیع سفارش های هر مشتری در یک زنجیره تأمین دو سطحی شامل یک مرکز تحویل و تعدادی از مشتریان مدل سازی می شود. در ابتدا، مسأله در حالت قطعی تعریف می شود، سپس برای حالت غیرقطعی تحت روش بهینه سازی استوار براساس رویکرد سناریو محور مالوی، مدل سازی انجام می شود.

۳-۱. حالت قطعی

پژوهش انجام شده توسط ژانگ و همکاران [۲]، زنجیره تأمینی دو سطحی شامل یک مرکز تحویل و مجموعه ای از مشتریان را در نظر می گیرد. اگرچه مطالعه ژانگ و همکاران [۲] به عنوان یک پایه مهم در حوزه تجمیع سفارش در گام آخر تحویل در نظر گرفته می شود، اما پژوهش حاضر از چند منظر اساساً با آن متفاوت است. اولاً، مدل ارائه شده در پژوهش ژانگ و همکاران در محیطی قطعی و با فرض مشخص بودن تمام پارامترها عمل می کند، در حالی که در این تحقیق، عدم قطعیت در زمان تقاضای مشتریان با به کارگیری یک مدل بهینه سازی استوار مورد توجه قرار گرفته است که انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان بیشتری در مواجهه با شرایط واقعی بازار ایجاد می کند. ثانیاً، تمرکز اصلی ژانگ و همکاران بر بهینه سازی لجستیک به منظور حداقل سازی هزینه هاست، اما مدل حاضر به تصمیم گیری مشترک در مورد قیمت گذاری پویای محصولات و تعیین زمان بهینه ارسال می پردازد که تابع هدف آن حداکثرسازی سود کل مرکز تحویل است. در نهایت، در این پژوهش تقاضا به صورت برونزا نیست، بلکه با استفاده از مفهوم میل به پرداخت مشتری و به صورت درونزا در مدل تولید می شود. این تفاوت های کلیدی، چارچوب جامع تری را برای تصمیم گیری های استراتژیک در محیط های کسب و کار غیرقطعی فراهم می آورد.

محدوده مورد بررسی در این پژوهش، گام آخر تحویل کالا از مرکز تحویل به مجموعه ای از مشتریان است. در این مطالعه، تعدد سفارش از هر مشتری در یک دوره زمانی مشخص (پنج روز) که شامل چند بازه زمانی گسسته است، وجود دارد. این سفارش ها از انبارهای مختلفی تأمین و به مرکز تحویل ارسال می شوند. از آنجا که زمان پردازش سفارش ها در انبارها و زمان ارسال سفارش ها از انبارها به مرکز تجمیع ممکن است متفاوت باشد، چندین سفارش از یک مشتری ممکن است در بازه های زمانی متفاوتی به مرکز تحویل ارسال شود.

شده به بررسی موضوعات قیمت گذاری و تحلیل هزینه در تحویل مرحله آخر پرداخته اند. به عنوان مثال یانگ و همکاران [۲۸]، به موضوع اثرگذاری بر تقاضای مشتریان به نحوی که آن ها را به سفارش گذاری در زمان هایی که برای کارخانه از نظر هزینه ای مناسب است سوق دهند، پرداخته اند. همان طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، مطالعات انجام شده در زمینه سیاست های تجمیع و قیمت گذاری در زنجیره تأمین، عمدتاً گام اول و گام میانی زنجیره تأمین را مورد هدف قرار داده اند. این در حالی است که گام آخر تحویل کالا به دلیل ویژگی های منحصر به فردی از قبیل تماس مستقیم با مشتری نهایی، حساسیت به زمان تحویل، پراکندگی جغرافیایی بسیار زیاد و سهم قابل توجه (گاهی تا ۵۰٪) در کل هزینه های لجستیک، به عنوان پرهزینه ترین و چالشی ترین بخش زنجیره تأمین شناخته می شود [۱]. بنابراین، ارائه راهکارهای بهینه سازی در این مرحله از ضرورت بالایی برخوردار است. مسأله مورد بررسی این پژوهش با درک این ضرورت، به گام آخر تحویل کالا و استفاده از سیاست تجمیع سفارش ها برای هر مشتری در شرایطی که با تعدد سفارش از هر مشتری مواجه هستیم، پرداخته است. این تمرکز امکان مدل سازی واقع بینانه تر تعامل بین قیمت گذاری، رضایت مشتری و هزینه های لجستیک پراکنده را فراهم کرده و بینش مدیریتی مستقیم و ارزشمندی برای فعالان صنعت خرده فروشی آنلاین ایجاد می کند. در این پژوهش، با تعیین قیمت بهینه محصولات و با استفاده از مفهوم میل به پرداخت مشتری، تقاضای هر مشتری برای هر محصول مشخص می شود. پارامتر میل به پرداخت در شرایط مختلف مقادیر متفاوتی را اخذ می نماید. بنابراین از یک مدل بهینه سازی استوار برای حل این مسأله استفاده شده است. در رویکرد بهینه سازی استوار، سناریوهای مختلفی طرح و مقادیر پارامتر غیرقطعی تحت هر کدام از سناریوها تعریف می شود. سپس با تخصیص جریمه به ازای نقض محدودیت های مسأله، حداکثر محافظه کاری برای مدل سازی فراهم می شود.

با بررسی تطبیقی ارائه شده در جدول (۱)، شکاف های تحقیقاتی زیر به وضوح قابل شناسایی است:

۱) اکثر مطالعات پیشین (مانند [۲۳]، [۲۰] و [۱۹]) به بهینه سازی گام های اول و میانی زنجیره تأمین پرداخته اند. در حالی که گام آخر تحویل کالا با ویژگی های منحصر به فرد خود (مانند پراکندگی جغرافیایی بالا، حساسیت زمانی مشتری و سهم عمده در هزینه ها) کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۲) تقریباً تمامی پژوهش های مرور شده، محیطی قطعی را برای پارامترهای مسأله در نظر گرفته اند. این در حالی است که در دنیای واقعی به ویژه در گام آخر، عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفارش ها یک قاعده است.

۳) مدل های موجود عمدتاً تک محصوله هستند و تنوع کالا که در خرده فروشی آنلاین بسیار متداول است، در آن ها لحاظ نشده است.

۴) هیچ یک از مطالعات پیشین، تصمیم قیمت گذاری پویا را به طور همزمان با تصمیم تجمیع سفارش ها براساس زمان در یک مدل

جدول (۱). جمع‌بندی و مقایسه مطالعات انجام شده در زمینه سیاست تجمیع سفارش‌ها و قیمت‌گذاری

نویسنده	عدم قطعیت	پارامتر غیرقطعی	حیطه مورد بررسی در تحقیق	متغیرهای تصمیم				تنوع کالایی	مقایسه با رویکرد FIFO	نوع سیاست تجمیع اتخاذ شده	مدل / روش حل نوع تابع هدف
				زمان ارسال سفارش	مقدار (وزن) سفارش	قیمت کالا	سایر				
درور و هارتمن [۱۶]	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	براساس مقدار	Cooperative inventory game کمینه‌سازی هزینه‌ها
ستینکایا و همکاران [۲۹]	✓	تقاضا	گام اول زنجیره تأمین	✓	✓	-	-	-	-	براساس مقدار - براساس زمان	Renewal theory کمینه‌سازی هزینه‌ها
اولکو و بوکبندر [۲۳]	-	-	گام میانی زنجیره تأمین	✓	-	✓	-	-	-	براساس زمان	روش حل دقیق بیشینه‌سازی سود
هانگ و لی [۲۰]	-	-	گام میانی زنجیره تأمین	✓	-	✓	مقدار باز پر کردن موجودی	-	-	براساس زمان	RAND algorithm بیشینه‌سازی سود
گوین و همکاران [۲۷]	-	-	گام اول زنجیره تأمین	-	✓	-	-	-	-	براساس مقدار	برنامه‌ریزی پویا الگوریتم ابتکاری کمینه‌سازی هزینه‌ها
چن و همکاران [۲۵]	-	-	گام میانی زنجیره تأمین	✓	-	✓	حفظ تازگی کالای فسادپذیر	-	-	براساس زمان	روش حل دقیق بیشینه‌سازی سود
ژانگ و همکاران [۲]	-	-	گام آخر زنجیره تأمین	✓	-	-	تعداد وسیله حمل‌ونقل اعزام شده	-	✓	براساس زمان	Breadth first search کمینه‌سازی هزینه‌ها
پژوهش حاضر	✓	زمان ورود سفارش‌ها به مرکز تحویل	گام آخر زنجیره تأمین	✓	-	✓	-	✓	✓	براساس زمان	بهینه‌سازی استوار - الگوریتم ابتکاری بیشینه‌سازی سود

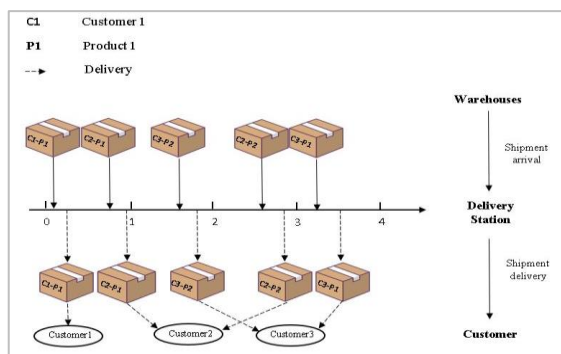
همچنین در صورتی که مجموع وزن W_i سفارش‌ها در هر ارسال از آستانه وزنی استاندارد در هر ارسال wt بیشتر شود، به ازای واحد وزن مازاد، هزینه مازاد $C^{surplus}$ تعلق می‌گیرد. برای محاسبه هزینه نگهداری موجودی، به ازای تعداد واحد زمانی تاخیر در ارسال واحد سفارش، هزینه ثابت نگهداری موجودی C^{hold} لحاظ می‌گردد.

۲-۳. حالت غیرقطعی

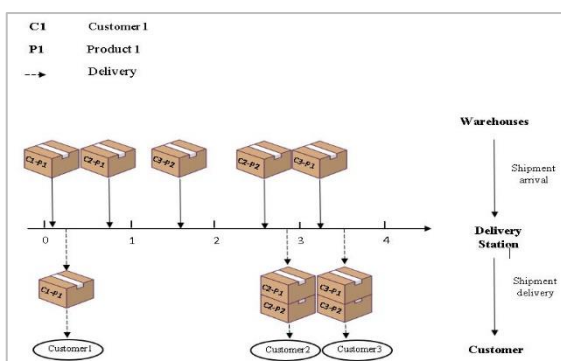
زنجیره تأمین دو سطحی شامل یک مرکز تحویل و مجموعه‌ای از مشتریان را در گام آخر تحویل کالا در نظر بگیرید. مشتریان در یک دوره زمانی مشخص (پنج روز) معمولاً بیش از یک سفارش ثبت می‌کنند. این سفارش‌ها که می‌توانند از محصولات متفاوتی باشند، از انبارهای مختلف تأمین و به مرکز تحویل ارسال می‌شوند. در ابتدای دوره زمانی، تقاضای مشتریان برای هر محصول و به دنبال آن زمان ثبت سفارش آن‌ها برای هر محصول غیرقطعی است. در مواجهه با این عدم قطعیت، مجموعه‌ای از سناریوها به صورت $S = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف شده و احتمال وقوع هر سناریو با p_s نشان داده شده است که $\sum_{s=1}^S p_s = 1$

در ابتدای دوره فرض می‌شود که میزان تقاضای هر مشتری و زمان ورود سفارش‌های هر یک به مرکز تحویل مشخص است. طول دوره زمانی n در نظر گرفته می‌شود و t اندیس هر بازه زمانی گسسته است $T = \{1, \dots, t, \dots, n\}$. تعداد کل سفارش‌ها m می‌باشد و برای هر سفارش i ، زمان ورود سفارش $tstart_i$ به مرکز تحویل مشخص فرض می‌شود زیرا امروزه از طریق اینترنت اشیا مانند سیستم تعیین موقعیت فراگیر، وضعیت سفارش‌ها از انبارها به مرکز تحویل قابل پیگیری می‌باشد. هر یک از سفارش‌ها، یک زمان تعهد شده برای ارسال $tpromised_i$ دارند که یا از طرف مرکز تحویل تعهد می‌شود و یا از طرف مشتری درخواست می‌شود، به این معنا که سفارش، حداکثر تا زمان تعهد شده باید به دست مشتری برسد. زمان ارسال هر سفارش $tdeliver_i$ می‌باشد که باید بهینه شود. شرط $tstart_i < tdeliver_i < tpromised_i$ باید برقرار شود زیرا عملیات تخلیه، مرتب‌سازی و بارگیری قبل از ارسال سفارش‌ها زمان‌بر است. هزینه حمل‌ونقل، از دو بخش هزینه ثابت و هزینه مازاد تشکیل شده است. هزینه ثابت C^{fix} به ازای هر بار ارسال محاسبه می‌شود.

مشتری، مرکز تحویل با هدف حداکثرسازی سود خود، درخصوص زمان ارسال $tdeliver_{ij}^s$ تصمیم گیری می کند. برای این تصمیم گیری شرط $tstart_{ij}^s < tdeliver_{ij}^s < tpromised_{ij}^s$ باید برقرار باشد. طبق این محدودیت همهی سفارش ها باید حداکثر تا زمان تعهد شده ارسال گردند. همچنین، نحوه محاسبه هزینه های حمل و نقل و هزینه نگهداری موجودی نیز همانند مسأله در حالت قطعی است. برای درک بهتر مسأله حاضر و همچنین مقایسه ای بین روش های ارسال خروج به ترتیب ورود و ارسال تجمیعی شکل های (۱) و (۲) رسم شده است.



شکل (۱). ارسال سفارش ها به روش FIFO



شکل (۲). ارسال سفارش ها به روش تجمیع براساس زمان

یک مرکز تحویل و مجموعه ای از u مشتری را در گام آخر تحویل کالا در بستر خرید اینترنتی در نظر بگیرید. تعداد m نوع محصول و n بازه زمانی و s سناریوگسسته وجود دارد. در این بخش، مدل ریاضی مسأله تحقیق طراحی می گردد. پیش از آن اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم برای حل مسأله با رویکرد بهینه سازی استوار تحت روش مالوی معرفی می گردند.

اندیس ها

مجموعه مشتریان	J
مجموعه محصولات	I
مجموعه بازه های زمانی	T
مجموعه سناریوها	S

پارامترها

w_i	i وزن محصول
C^{fix}	هزینه ثابت حمل و نقل به ازای هر بار ارسال

سناریوهای تعریف شده در این پژوهش به صورت سه سناریو مشتریان با میل به پرداخت کم، مشتریان با میل به پرداخت متوسط و مشتریان با میل به پرداخت زیاد است. از علت های تغییر در میل به پرداخت مشتریان به صورت روز به روز می توان به تغییر در آب و هوا، مناسبت های ملی، رویدادهای ویژه و ... اشاره کرد. در مرحله اول در این پژوهش، با توجه به داده های میل به پرداخت مشتری $wtp_{i,j,t}^s$ برای هر محصول در هر بازه زمانی که تحت هر سناریو مقادیر آن متفاوت است، قیمت هر محصول در هر بازه زمانی $P_{i,t}$ بهینه می شود.

در این پژوهش، پارامتر $wtp_{i,j,t}^s$ به عنوان سنگ بنای مدل تقاضا عمل می کند و نشان می دهد که مشتری j تحت سناریوی s ، حداکثر چقدر حاضر است برای محصول i در بازه زمانی t پرداخت کند. تفاوت بین این مقدار و قیمت تعیین شده $P_{i,t}$ ، مازاد مصرف کننده $CS_{i,j}^s$ را تشکیل می دهد. سپس، مدل از این منطق پیروی می کند که مشتری تنها در بازه ای کالا را خریداری می کند $(h_{ijt}^s=1)$ که این مازاد برای او حداکثر باشد و مقدار آن غیرمنفی باشد. به این ترتیب، تقاضا به صورت درونزا و براساس یک رفتار اقتصادی عقلایی مدل شده و وابستگی مستقیمی به تصمیم قیمت گذاری مرکز تحویل پیدا می کند. تغییرات روزانه wtp تحت سناریوهای مختلف (مثلاً با میل به پرداخت کم، متوسط و زیاد)، منبع اصلی عدم قطعیت در مسأله حاضر است. (متغیر h_{ijt}^s تصمیم خرید مشتری است و این متغیر نشان می دهد که آیا مشتری j تحت سناریوی s محصول i را در بازه زمانی t خریداری کرده است یا خیر. این تصمیم، یک خروجی از مدل است که براساس مقایسه قیمت $P_{i,t}$ و میل به پرداخت مشتری $wtp_{i,j,t}^s$ و با هدف حداکثر کردن مازاد مصرف کننده به دست می آید. این متغیر مربوط به مرحله تقاضا و فروش است. متغیر x_{ijt}^s تصمیم ارسال مرکز تحویل است و این متغیر نشان می دهد که آیا مرکز تحویل تصمیم می گیرد که محصول i خریداری شده توسط مشتری j را در بازه زمانی t ارسال کند یا خیر. این یک تصمیم لجستیکی است که براساس زمان ورود سفارش ها، هزینه های حمل و نقل و نگهداری، و با هدف حداقل سازی این هزینه ها در مرحله تحویل گرفته می شود).

حال با توجه به بیشترین مازاد مصرف کننده ایجاد شده $CS_{i,j}^s$ ، تقاضای هر مشتری برای هر محصول در هر بازه زمانی توسط متغیر باینری h_{ijt}^s به دست می آید. بدین ترتیب، اگر متغیر باینری h_{ijt}^s مقدار یک بگیرد، به این معنا است که تقاضا برای محصول i توسط مشتری j در زمان t اتفاق می افتد. در این پژوهش برای سادگی، فاصله زمانی بین ثبت سفارش و ورود آن به مرکز تحویل نادیده گرفته می شود. زمان ورود سفارش i برای مشتری j ، با $tstart_{ij}^s$ (زمان ورود سفارش i برای مشتری j تحت سناریوی s) نشان داده می شود. در مرحله بعدی با توجه به مشخص بودن زمان ورود سفارش های هر مشتری در یک دوره زمانی و با هدف ایجاد تعادلی بین هزینه حمل و نقل و هزینه نگهداری موجودی ناشی از تجمیع سفارش های هر

x بردار متغیرهای طراحی و y بردار متغیرهای کنترل است. A ، B و C ماتریس ضرایب فنی و b و e بردارهای سمت راست می‌باشند. مقادیر A و b مشخص، در حالی که d ، C ، B و e دارای عدم قطعیت می‌باشند. تعدادی سناریو با نماد $S = \{1, 2, \dots, S\}$ برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تعریف می‌شود که هر کدام دارای احتمال وقوع می‌باشد و داریم $\sum_S p_S = 1$.

به ازای هر سناریو پارامترهای عدم قطعیت به صورت $\{d_S, B_S, C_S, e_S\}$ تعریف می‌شود. همچنین متغیر کنترل y چون بعد از فهم یک سناریو تعدیل می‌شود، می‌تواند به عنوان y_S برای سناریوی S نمایش داده شود. مدل برنامه‌ریزی خطی زیر شامل پارامترهای غیرقطعی را در نظر بگیرد:

$$\text{Min } c^T x + d^T y_S \quad (1)$$

$s. t.$

$$Ax = b, \quad (2)$$

$$B_S x + C_S y_S = e_S, \quad \forall S \in S \quad (3)$$

$$x, y_S \geq 0 \quad (4)$$

لئونگ و همکاران [۳۱] برای مدل بالا راه‌حلی ارائه دادند که به ازای تمامی سناریوهای S شدنی و بهینه باشد. به دلیل عدم قطعیت در پارامترها ممکن است مدل برای تعدادی از سناریوها غیرموجه شود، بنابراین δ_S غیرموجه بودن مدل را برای هر سناریوی S نشان می‌دهد. اگر مدل موجه باشد، δ_S برابر با صفر می‌شود و در غیر این صورت مقدار مثبتی طبق معادله (۷) خواهد گرفت.

مدل بهینه‌سازی استوار به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S) + \omega \rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S) \quad (5)$$

$$Ax = b, \quad (6)$$

$$B_S x + C_S y_S + \delta_S = e_S, \quad \forall S \in S, \quad (7)$$

$$x \geq 0, y_S \geq 0, \delta_S \geq 0 \quad \forall S \in S, \quad (8)$$

تابع هدف فوق شامل دو عبارت است که عبارت اول نشان‌دهنده استواری راه‌حل می‌باشد که میزان تمایل برای کاهش هزینه‌ها و ریسک را مدنظر قرار می‌دهد. عبارت دوم نشان‌دهنده استواری مدل می‌باشد که به عدم تأمین تقاضای مورد نیاز در یک سناریو و یا نقض محدودیت‌های فیزیکی، جریمه‌ای به صورت وزن ω اختصاص می‌دهد [۳۲].

در این مدل برای ارائه $f(x, y)$ از نماد ξ که یک تابع سود یا هزینه است و برای نمایش این تابع تحت سناریوی S از $\xi_S = f(x, y_S)$ استفاده می‌شود. λ وزن اختصاص یافته برای واریانس راه‌حل است به طوری که با افزایش λ ، ریسک تصمیم بالا می‌رود. به عبارت دیگر، یک تغییر کوچک در پارامترهای دارای عدم قطعیت می‌تواند سبب تغییرات بزرگ در ارزش تابع اندازه‌گیری شود. مالوی و همکاران از عبارت

$$\sigma(0) = \sum_{S \in S} p_S \xi_S + \lambda \sum_{S \in S} p_S \left(\xi_S - \sum_{S' \in S} p_{S'} \xi_{S'} \right)^2 \quad (9)$$

برای نشان دادن استواری راه‌حل استفاده کردند. همان‌طور که قابل

هزینه مازاد حمل‌ونقل به ازای هر واحد وزنی مازاد در هر بار ارسال $C_{surplus}$
 آستانه وزنی استاندارد در هر ارسال wt
 هزینه واحد نگهداری به ازای هر سفارش به تأخیر افتاده C^{hold}
 حداکثر زمان تعهد شده‌ی ارسال هر سفارش برای هر مشتری $tpromised_{i,j}$
 احتمال وقوع سناریوی S p_S
 حداکثر قیمت محصول i در بازه زمانی t تحت سناریوی S $up_{i,t}^S$
 میل به پرداخت مشتری j برای محصول i در بازه زمانی t تحت سناریوی S $wtp_{i,j,t}^S$
 ضریب ثابت اهمیت بخش انحراف معیار در تابع هدف مالوی λ

متغیرهای تصمیم

اگر محصول i برای مشتری j در بازه t ارسال شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد تحت سناریوی S x_{ijt}^S
 اگر مشتری j محصول i را در بازه زمانی t تقاضا داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد تحت سناریوی S h_{ijt}^S
 اگر مشتری j در بازه زمانی t خدمت گرفته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد تحت سناریوی S z_{jt}^S
 قیمت فروش واحد محصول i در بازه زمانی t $P_{i,t}$
 زمان ورود محصول i برای مشتری j به مرکز تجمع و تحویل تحت سناریوی S (متغیر وابسته) $tdeliver_{ij}^S$
 هزینه حمل‌ونقل برای مشتری j در بازه زمانی t تحت سناریوی S (متغیر وابسته) $cship_{jt}^S$
 اندازه انحراف در سناریوی S (متغیر نامنفی برای خطی‌سازی بخش انحراف معیار در تابع هدف مالوی) θ^S
 مازاد (رفاه) مصرف‌کننده‌ی j برای محصول i تحت سناریوی S (متغیر کمکی) $CS_{i,j}^S$

۳-۳. رویکرد بهینه‌سازی استوار

از جمله رایج‌ترین عدم قطعیتی که در مسائل دنیای واقعی وجود دارد و در تحقیقات نیز در نظر گرفته می‌شود، عدم قطعیت در تقاضا می‌باشد. در پژوهش پیش‌رو تقاضای هر مشتری برای هر محصول در ابتدای دوره زمانی دارای عدم قطعیت است. برای مواجهه با این عدم قطعیت، از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور به عنوان رویکردی قوی استفاده می‌شود. در ابتدا معرفی کلی از رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه می‌شود و سپس مسأله پیش‌رو، با استفاده از این روش مدل‌سازی می‌شود. بهینه‌سازی استوار برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط مالوی و همکاران در تحقیقی با عنوان "بهینه‌سازی استوار با مقیاس بزرگ" معرفی شد [۳۰].

ابتدا نمادهای مرتبط با مدل بهینه‌سازی استوار ارائه شده توسط مالوی و همکاران معرفی و سپس صورت کلی این مدل شرح داده می‌شود.

$$R_s(\text{revenue}) = \sum_{i,j,t} P_{i,t} h_{ijt}^s \quad (15)$$

رابطه (۱۵) کل درآمد حاصل از فروش مرکز تحویل را نشان می دهد که از مجموع حاصل ضرب قیمت فروش محصول i در زمان t در متغیر باینری h_{ijt}^s که خرید یا عدم خرید محصول i توسط مشتری j در زمان t تحت سناریو s را نشان می دهد، به دست می آید. این عبارت، یک عبارت غیرخطی است که نحوه خطی سازی آن در ادامه شرح داده می شود.

$$SC_s(\text{shipping cost}) = \sum_{j,t} cship_{jt}^s \quad (16)$$

رابطه (۱۶) کل هزینه حمل و نقل را نشان می دهد که از مجموع هزینه حمل و نقل برای مشتریان متفاوت در بازه های زمانی متفاوت به دست می آید. همان طور که قبل تر گفته شد هزینه حمل و نقل از دو بخش هزینه ثابت و هزینه مازاد تشکیل شده است. هزینه ثابت به ازای هر بار ارسال و هزینه مازاد تنها در صورتی که وزن سفارش ها در یک ارسال از آستانه وزنی استاندارد برای یک وسیله حمل و نقل بیشتر باشد، لحاظ می گردد.

$$HC_s(\text{holding cost}) = \sum_{i,j} C^{hold}(tdeliver_{ij}^s - tstart_{ij}^s) \quad (17)$$

رابطه (۱۷) کل هزینه نگهداری موجودی ناشی از سفارش های به تأخیر افتاده در مرکز تحویل را نشان می دهد که از حاصل ضرب هزینه ثابت نگهداری واحد سفارش در مدت زمان نگهداری سفارش ها (از زمان ورود به مرکز تجمیع و تحویل تا زمان ارسال) به دست می آید. در نهایت، تابع هدف مسأله به صورت زیر نوشته می شود:

$$\max \sum_{s \in S} p_s \left(\sum_{i,j,t} P_{i,t} h_{ijt}^s - \sum_{j,t} cship_{jt}^s - \sum_{i,j} C^{hold}(tdeliver_{ij}^s - tstart_{ij}^s) \right) \quad (18)$$

۳-۳-۱. مدل ریاضی نهایی با رویکرد بهینه سازی استوار

$$\max \sum_{s \in S} p_s (R_s - SC_s - HC_s) - \lambda \sum_{s \in S} p_s [(R_s - SC_s - HC_s) - \sum_{s' \in S} p_{s'} (R_{s'} - SC_{s'} - HC_{s'}) + 2\theta_s] \quad (19)$$

$s.t.$

$$cship_{jt}^s = \begin{cases} c^{fix}_{Z_{j,t}^s} + if \sum_i x_{i,j,t}^s w_i \leq wt, \forall j, t, s \\ c^{fix}_{Z_{j,t}^s} + C_{surplus} \sum_i x_{i,j,t}^s w_i - wt, \text{ else, } \forall j, t, s \end{cases} \quad (20)$$

مشاهده است، عبارت $\lambda \sum_{s \in S} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'})^2$ درجه دو می باشد. با توجه به دشواری محاسبه تابع هدف و برای کاهش محاسبات در عملیات کامپیوتری، از یک عبارت قدرمطلق انحراف به جای عبارت درجه دو استفاده می شود [۳۳]، که در زیر نشان داده شده است:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left| \xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right| \quad (10)$$

اگرچه تابع هدف فوق غیرخطی است، می توان با اضافه کردن دو متغیر نامنفی انحرافی، این مسأله غیرخطی را به یک مدل برنامه ریزی خطی تبدیل کرد به طوری که این مدل برنامه ریزی، دارای یک تابع هدف خطی و محدودیت های خطی باشد [۳۴].

طبق پژوهش لئونگ و همکاران، به جای حداقل کردن مجموع انحرافات مثبت در معادله (۱۰) از دو متغیر انحرافی مثبت استفاده می شود که با توجه به محدودیت های اصلی و یک محدودیت اضافه شده کمینه می شوند. این محدودیت اضافه مقدار داخل قدر مطلق را مثبت می نماید. یو و لی مدل مؤثری را ارائه دادند که چهارچوب این مدل برنامه ریزی خطی به شکل زیر و با تغییر معادله (۹) به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{s \in S} p_s \xi_s \\ & + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] \\ & s.t. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\xi_s - \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \theta_s \geq 0, \quad \forall s \in S \quad (12)$$

$$\theta_s \geq 0, \quad \forall s \in S \quad (13)$$

می توان گفت اگر مقدار ξ_s بزرگتر از $\sum_{s \in S} p_s \xi_s$ باشد، یعنی $\xi_s - \sum_{s \in S} p_s \xi_s \geq 0$ ، آنگاه $\theta_s = 0$ در حالی که اگر مقدار $\xi_s - \sum_{s \in S} p_s \xi_s \leq 0$ بزرگتر از ξ_s باشد، یعنی $\xi_s - \sum_{s \in S} p_s \xi_s \leq 0$ ، آنگاه $\theta_s = \sum_{s \in S} p_s \xi_s - \xi_s$.

عبارت دوم تابع هدف در معادله (۱۱)، $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ ، جریمه موجه بودن است که برای در نظر گرفتن جریمه نقض محدودیت های کنترل در برخی سناریوها استفاده می شود. با استفاده از وزن ω ، توازنی بین استواری راه حل که توسط عبارت اول $\sigma(0)$ اندازه گیری می شود و استواری مدل که توسط عبارت دوم $\rho(0)$ اندازه گیری می شود، برقرار می شود. بنابر توضیحات ارائه شده، تابع هدف به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{s \in S} p_s \xi_s \\ & + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] \\ & + \omega \sum_{s \in S} p_s \delta_s \end{aligned} \quad (14)$$

در بخش بعدی، ابتدا مدل غیرخطی با به کارگیری روش‌های خطی‌سازی، خطی شده، سپس مدل ریاضی ارائه شده در ابعاد کوچک و متوسط در نرم‌افزار گمز اجرا می‌شود. از آنجا که ماهیت مدل تعریف شده NP-hard است و در ابعاد بزرگ توسط این نرم‌افزار قابل حل نیست یا مستلزم صرف زمان زیادی است، یک الگوریتم ابتکاری در بخش چهارم معرفی می‌شود.

۴. روش حل پیشنهادی

در بخش قبل، مدل‌سازی ریاضی مسأله‌ی تصمیمات مشترک در خصوص قیمت‌گذاری و تجمیع سفارش‌های هر مشتری در گام آخر تحویل کالا در شرایط تقاضای غیرقطعی برای یک مرکز تحویل و مجموعه‌ای از مشتریان انجام شد. برای مواجهه با عدم قطعیت در پارامتر تقاضا از مدل بهینه‌سازی استوار با رویکرد مالوی استفاده شد که در این رویکرد، پارامتر میل به پرداخت مشتری برای هر محصول در زمان‌های متفاوت تحت سناریوهای مختلف با احتمالات متفاوت، مقادیر متفاوتی می‌گرفت. در این بخش، ابتدا به خطی‌سازی عبارت اول در تابع هدف و محدودیت شرطی (۲۰) پرداخته می‌شود. در ادامه به غیر از روش حل دقیق که توسط نرم‌افزار گمز اجرا می‌شود، یک الگوریتم ابتکاری ارائه می‌شود. روش حل دقیق برای حل مسأله در ابعاد کوچک و الگوریتم ابتکاری جهت حل مسأله در ابعاد متوسط و بزرگ استفاده می‌شوند.

۴-۱. خطی‌سازی

در مدل ریاضی ارائه شده در بخش سوم، عبارت اول تابع هدف، همچنین محدودیت (۲۰) نیاز به خطی‌سازی دارند. در ادامه نحوه خطی‌سازی هر یک توضیح داده می‌شود.

۴-۱-۱. خطی‌سازی ضرب یک متغیر باینری و یک متغیر پیوسته

فرض کنید در یک مدل عبارت $X \times Y$ وجود دارد که در آن Y یک متغیر باینری و X یک متغیر پیوسته نامنفی است. برای جایگزین کردن این عبارت با یک عبارت خطی بزرگتر، یک حد بالا M_X برای X و یک حد بالا M_Y برای عبارت $X \times Y$ در نظر گرفته و حاصل ضرب $X \times Y$ را برابر با P می‌نامیم. سپس با تعریف محدودیت‌هایی خطی به شکل زیر P مقدار درستی می‌گیرد:

$$P \leq x \quad (31)$$

$$P \leq M_Y \times y \quad (32)$$

$$P \geq x - M_X(1 - y) \quad (33)$$

۴-۱-۲. خطی‌سازی تابع هدف

در بخش قبل، همان‌طور که مشخص است، عبارت اول در تابع هدف (۱۸) به دلیل ضرب یک متغیر پیوسته در یک متغیر باینری غیرخطی شده است. برای خطی‌سازی این عبارت از روشی که پیش‌تر توضیح داده شد استفاده شده است. ابتدا حاصل ضرب متغیر پیوسته در متغیر باینری، برابر با یک متغیر باینری جدید قرار می‌گیرد و این متغیر جدید در مدل، با حاصل ضرب متغیر پیوسته در متغیر باینری به‌صورت رابطه (۳۴) جایگزین می‌شود.

$$\sum_t x_{i,j,t}^s = 1, \quad \forall i, j, s \quad (21)$$

$$z_{j,t}^s \geq x_{i,j,t}^s, \quad \forall i, j, t, s \quad (22)$$

$$tstart_{ij}^s = \sum_t t \times h_{i,j,t}^s, \quad \forall i, j, s \quad (23)$$

$$tstart_{ij}^s \leq tdeliver_{ij}^s \leq tpromised_{i,j}, \quad \forall i, j, s \quad (24)$$

$$tdeliver_{ij}^s = \sum_t x_{i,j,t}^s t, \quad \forall i, j, s \quad (25)$$

$$\sum_t h_{i,j,t}^s \leq 1, \quad \forall i, j, s \quad (26)$$

$$\sum_t h_{i,j,t}^s \leq 1, \quad \forall i, j, s \quad (27)$$

$$CS_{ij}^s \geq wtp_{i,j,t}^s - P_{i,t}, \quad \forall i, j, t, s \quad (28)$$

$$(R_s + DC_s + SC_s + OC_s + HC_s) - \sum_{s' \in S} p_{s'}(R_{s'} + DC_{s'} + SC_{s'} + HC_{s'} + OC_{s'}) + \theta_s \leq 0, \quad \forall s \quad (29)$$

$$x_{ijt}, z_{jt}, h_{ijt} = \{0,1\}, \quad P_{i,t}^s, N, CS_{i,j}^s \geq 0, \theta_s \geq 0, \quad \forall i, j, t \quad (30)$$

عبارت‌های اول و دوم در معادله (۱۹)، به ترتیب نشان‌دهنده میانگین و واریانس تابع هدف هستند. محدودیت (۲۰) هزینه حمل‌ونقل $cship_{jt}^s$ را نشان می‌دهد که شامل هزینه ثابت و هزینه مازاد حمل‌ونقل می‌باشد. هزینه مازاد تنها زمانی در نظر گرفته می‌شود که وزن سفارش‌ها در یک ارسال از آستانه وزنی استاندارد در یک ارسال بیشتر باشد ($\sum_i x_{i,j,t}^s w_i > wt$). محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که هر سفارش از هر مشتری تنها در یک بازه زمانی می‌تواند ارسال شود. محدودیت (۲۲) بیان‌گر این است که یک مشتری تنها زمانی خدمت می‌گیرد که حداقل یک سفارش برای او ارسال شده باشد. محدودیت (۲۳)، رابطه بین متغیرهای $h_{i,j,t}^s$ و $tstart_{ij}^s$ را نشان می‌دهد. از آنجایی که مشتری در هر سناریو برای هر محصول حداکثر در یک بازه زمانی سفارش می‌دهد $h_{i,j,t}^s$ تنها در یکی از زمان‌های t می‌تواند ۱ باشد، لذا با محاسبه ضرب $h_{i,j,t}^s$ در زمان t ، زمان ورود/ثبت برای سفارش و مشتری مورد نظر تحت هر سناریو به‌دست می‌آید. محدودیت (۲۴)، اطمینان حاصل می‌کند که زمان ارسال هر سفارش برای هر مشتری باید ما بین زمان ورود آن سفارش به مرکز تحویل و حداکثر زمان تعهد شده از طرف مرکز تحویل باشد. محدودیت (۲۵)، رابطه بین متغیرهای $tdeliver_{ij}^s$ و $x_{i,j,t}^s$ را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۶)، بیان‌گر خرید یا عدم خرید مشتری برای محصول i در زمان t است. محدودیت‌های (۲۷) و (۲۸) نشان‌گر ارتباط بین دو متغیر $P_{i,t}$ و $CS_{i,j}^s$ با پارامتر $wtp_{i,j,t}^s$ می‌باشند. طبق این دو محدودیت، مشتری در زمانی سفارش خود را ثبت می‌کند که بیشترین مازاد مصرف‌کننده (بیشترین اختلاف بین قیمت و میل به پرداخت) را برای آن ایجاد کند.

محدودیت (۲۹) محدودیت اضافه شده در مدل بهینه‌سازی استوار برای خطی‌سازی می‌باشد که پیش‌تر توضیح داده شد. محدودیت (۳۰) الزامات مقدارگیری متغیرها را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن هر دو هدف کاری دشوار است، در مرحله اول قیمت اولیه تنها با هدف حداکثرسازی سود و براساس میل به پرداخت مشتریان تعیین می شود. با توجه به قیمت اولیه، زمان ورود سفارش ها به مرکز تحویل مشخص می شود. در مرحله دوم از داده زمان ورود سفارش های به دست آمده در مرحله اول، نحوه ارسال سفارش ها با هدف حداقل سازی هزینه تعیین می شود. در مرحله سوم، با فرض در دسترس بودن داده های زمان ارسال سفارش ها، مجدداً قیمت هر محصول محاسبه می شود. قیمت های به دست آمده در این مرحله، به دلیل در نظرگیری حداقل کردن هزینه های آتی علاوه بر هدف حداکثرسازی سود، دقیق تر و بهتر است.

با توجه به توضیحات داده شده در بخش قبل، امکان حل این مسأله برای نمونه مثال های متوسط و بزرگ با استفاده از روش حل دقیق وجود ندارد و یا حل این نمونه مسائل مستلزم صرف زمان نسبتاً زیادی است. بنابراین یک الگوریتم ابتکاری به منظور حل مسأله در ابعاد متوسط و بزرگ ارائه می شود. گام های الگوریتم ابتکاری به صورت زیر می باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است:

گام اول: برای مشتری j تحت سناریو S راه حل اولیه را به روش FIFO به صورت لیست Ω ایجاد کنید.

$$\Omega = \{tdeliver_{ij}^S | h_{i,j,t}^S = 1, tdeliver_{ij}^S = tstart_{ij}^S\} \quad (40)$$

گام دوم: لیست Ω را به صورت صعودی مرتب کنید.

گام سوم: از ابتدای لیست، بین سفارش های بررسی نشده، سفارش های ثبت شده در هر دو بازه زمانی متوالی را به صورت زیر بررسی کنید: زودترین سفارش (های) ثبت شده را نگه داشته و با سفارش (های) ثبت شده در بازه زمانی بعدی تجمیع و به صورت یکجا ارسال نمایید. باقی سفارش ها را بدون تغییر نگه دارید. راه حل جدید را در لیست Ω_1 قرار دهید.

گام چهارم: اگر راه حل جدید Ω_1 محدودیت حداکثر زمان تعهد شده را برای سفارش (های) به تعویق افتاده نقض کرد، راه حل جدید حذف و راه حل اولیه انتخاب می شود، سپس به گام سوم برگردید، در غیر این صورت به گام پنجم بروید.

گام پنجم: تابع هدف را برای راه حل های Ω و Ω_1 به صورت زیر محاسبه کنید. اگر تابع هدف راه حل جدید Ω_1 بهتر از تابع هدف راه حل اولیه بود، راه حل جدید جایگزین راه حل اولیه می شود.

$$z_s^j = \sum_t cship_{gt}^S + \sum_i c^{hold}(tdeliver_{ij}^S - tstart_{ij}^S) \quad (41)$$

گام ششم: گام های سوم تا پنجم تا جایی که راه حل جدیدی وجود نداشته باشد تکرار شود. به این ترتیب راه حل بهبود یافته برای مشتری j تحت سناریو S به دست می آید.

هفتم: گام های یکم تا ششم برای همه مشتریان انجام شود. گام های الگوریتم ابتکاری در شکل (۴) قابل مشاهده است.

$$O_{i,j,t}^S = P_{i,t} h_{i,j,t}^S, \quad \forall i, j, t \quad (34)$$

در مرحله بعد، محدودیت های (۳۵)، (۳۶) و (۳۷) به محدودیت های مدل اصلی اضافه می گردند.

$$O_{i,j,t}^S \leq P_{i,t}, \quad \forall i, j, t, S \quad (35)$$

$$O_{i,j,t}^S \leq wtp_{i,j,t}^S h_{i,j,t}^S, \quad \forall i, j, t, S \quad (36)$$

$$O_{i,j,t}^S \geq P_{i,t} - (1 - h_{i,j,t}^S) up_{i,t}^S, \quad \forall i, j, t, S \quad (37)$$

۳-۱-۴. خطی سازی محدودیت شرطی

همان طور که مشخص است، محدودیت (۲۰) در بخش چهارم، یک محدودیت شرطی می باشد. برای حل مدل در نرم افزار گمز نیاز به خطی سازی این محدودیت می باشد. این محدودیت مقدار هزینه حمل و نقل برای هر مشتری در هر ارسال را محاسبه می نماید. همان طور که قبل تر گفته شد، هزینه حمل و نقل از دو قسمت هزینه ثابت و هزینه مازاد تشکیل شده است. هزینه مازاد تنها در صورتی که وزن سفارش های یک مشتری در یک ارسال بیشتر از آستانه وزنی استاندارد وسیله حمل و نقل باشد، محاسبه می گردد. به این ترتیب، محدودیت (۲۰) به دو محدودیت (۳۸) و (۳۹) به صورت زیر تبدیل می شود:

$$cship_{jt}^S \geq C^{fix} z_{jt}^S, \quad \forall j, t, S \quad (38)$$

$$cship_{jt}^S \geq C^{fix} z_{jt}^S + C^{surplus} \left(\sum_i x_{i,j,t}^S w_i - wt \right), \quad \forall j, t, S \quad (39)$$

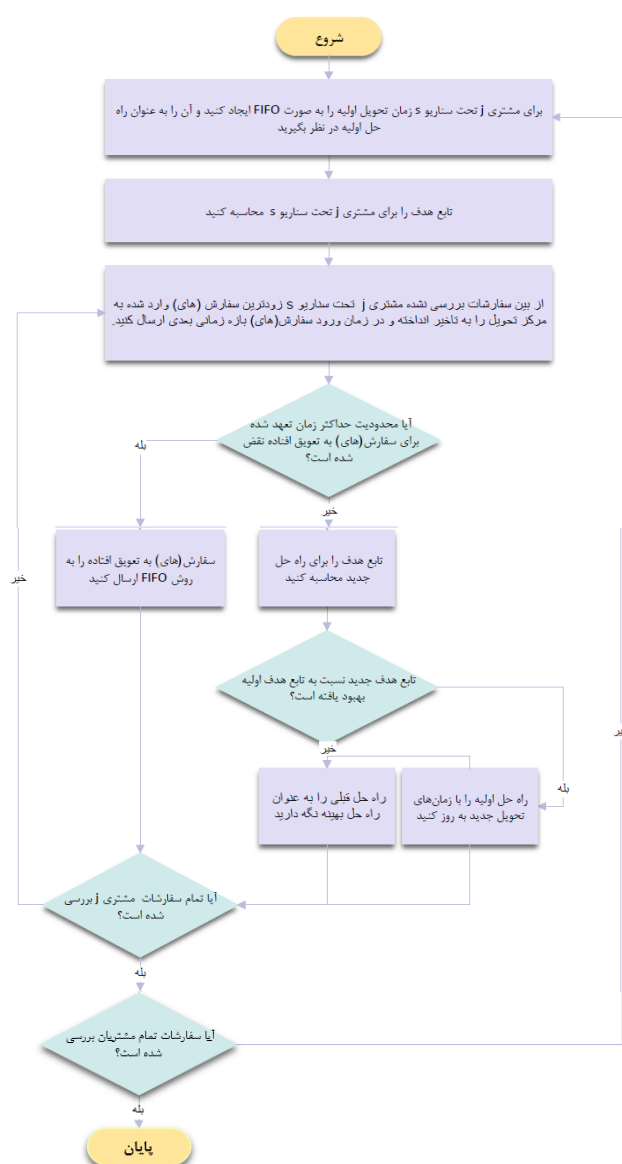
به این ترتیب، اگر شرط $\sum_i x_{i,j,t}^S w_i \leq wt$ برقرار باشد، یعنی وزن سفارش های یک مشتری در یک ارسال از آستانه وزنی استاندارد در هر ارسال کمتر باشد یا برابر با آستانه وزنی استاندارد باشد، عبارت دوم مقدار منفی می گیرد که به علت بزرگتر بودن هزینه مازاد بر هزینه ثابت ($C^{surplus} > C^{fix}$)، هزینه حمل و نقل مقداری منفی می گیرد. از آنجا که هزینه نمی تواند مقدار منفی بگیرد، محدودیت دوم غیرفعال و محدودیت اول فعال می شود. در حالتی که شرط $\sum_i x_{i,j,t}^S w_i \geq wt$ برقرار باشد، یعنی وزن سفارش های یک مشتری در یک ارسال از آستانه وزنی استاندارد در هر ارسال بیشتر باشد، چون محدودیت دوم مقدار بیشتری می گیرد و اشتراک دو محدودیت (۳۸) و (۳۹) برابر مقدار محدودیت بزرگتر می شود، در نتیجه محدودیت دوم در نظر گرفته می شود.

۶. تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

حل مسأله در ابعاد متوسط و بزرگ طی سه مرحله به صورت شکل (۳) انجام می گیرد. با توجه به مدل ریاضی ارائه شده در بخش سوم، قیمت بهینه باید طوری تعیین شود که علاوه بر حداکثرسازی سود، بر نحوه ورود سفارش ها طوری تأثیر بگذارد که مرکز تحویل برای ارسال آن ها هزینه کمتری را متحمل شود. از آنجا که تعیین قیمت نزدیک به بهینه



شکل (۴). چارچوب الگوریتم پیشنهادی



شکل (۳). چارچوب کلی مسأله

۶-۱. پارامترهای ورودی

مقدار پارامترهای مسأله برگرفته از مقاله ژانگ و همکاران که به عنوان مقاله پایه این پژوهش در نظر گرفته شده است، می‌باشد. همچنین مقادیر پارامترهای جدید مسأله که قبلاً در ادبیات وجود نداشتند، به صورت فرضی با در نظر گرفتن منطقی بودن آن‌ها به صورت مستقل و در ارتباط با سایر پارامترها تخمین زده شده‌اند که در جدول (۲) این مقادیر ارائه شده است.

جدول (۲). پارامترهای ورودی مدل

پارامتر	شرح	مقدار / بازه
C^{fix}	هزینه ثابت حمل و نقل به ازای هر بار ارسال	۱/۵
$C^{surplus}$	هزینه مازاد حمل و نقل به ازای هر واحد وزنی مازاد در هر بار ارسال	۰/۵
C^{hold}	هزینه واحد نگهداری به ازای هر سفارش به تأخیر افتاده	۰/۲

۶. یافته‌ها و تحلیل حساسیت

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، مسأله حاضر در دسته مسائل NP-hard قرار دارد و زمان حل آن توسط روش حل دقیق در ابعاد متوسط و بزرگ به صورت نمایی رشد می‌یابد. بنابراین یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسأله در ابعاد متوسط و بزرگ ارائه شده است. در این بخش، ابتدا نمونه‌های عددی برای حل مسأله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ ایجاد می‌شوند. نمونه‌های عددی در ابعاد کوچک و متوسط ابتدا توسط روش حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز حل می‌شوند و نتایج به دست آمده با نتایج الگوریتم ابتکاری مقایسه می‌شود تا عملکرد الگوریتم ارزیابی گردد. برای نمونه‌های عددی در ابعاد بزرگ، یک محدودیت زمانی حل، تعیین می‌شود و بهترین جواب به دست آمده از نرم‌افزار گمز تا فرا رسیدن محدودیت زمانی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر مسأله انجام می‌گیرد و نتایج مدیریتی مرتبط با پژوهش استخراج می‌شود.

مشخص می گردد که جزئیات آن در جدول (۴) مشخص شده است.

جدول (۵). جزئیات نمونه های مسئله

مقیاس	شماره مسئله	تعداد مشتریان	تعداد محصولات	تعداد بازه های زمانی
کوچک	STP1	۲	۲	۳
	STP2	۳	۲	۳
	STP3	۳	۳	۴
	STP4	۴	۳	۴
	STP5	۵	۳	۵
	STP6	۶	۴	۵
	STP7	۷	۴	۵
متوسط	MTP1	۸	۴	۵
	MTP2	۹	۵	۵
	MTP3	۱۰	۵	۵
	MTP4	۱۱	۵	۵
	MTP5	۱۲	۵	۵
	MTP6	۱۳	۶	۵
	MTP7	۱۴	۶	۵
بزرگ	LTP1	۱۵	۶	۵
	LTP2	۱۵	۷	۵
	LTP3	۱۷	۸	۵
	LTP4	۱۸	۸	۵
	LTP5	۱۹	۹	۵
	LTP6	۲۰	۱۰	۵

۲-۶. نتایج حل مدل در ابعاد بزرگ

برای اعتبارسنجی الگوریتم در نمونه هایی با ابعاد بزرگ، ۶ نمونه در نظر گرفته شده است. با توجه به زمان حل بالا حتی در آخرین نمونه های ارائه شده در ابعاد متوسط، برای نمونه هایی با ابعاد بزرگ، یک محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه معادل ۱ ساعت در نظر گرفته شده است. به این صورت، بهترین جواب نرم افزار گمز پس از صرف ۱ ساعت زمان، به عنوان یک حد پایین برای مسئله در نظر گرفته شده است تا به عنوان معیاری برای قیاس با نتایج الگوریتم ابتکاری باشد. علت انتخاب ۳۶۰۰ ثانیه این است که در چند نمونه اول با بالا بردن زمان به اندازه ۴۶۰۰ ثانیه، بهبود چشم گیری در جواب حاصل نشد، بنابراین به جواب به دست آمده با صرف ۳۶۰۰ ثانیه اکتفا شد. در ادامه نتایج حل در جدول (۶) ارائه شده است.

در جدول (۶) همان طور که مشاهده می شود الگوریتم ابتکاری نسبت به حد پایین به دست آمده از نرم افزار گمز در اکثر نمونه ها به پاسخ بهتری دست یافته است. لازم به ذکر است که با اختصاص زمان بیشتر به نرم افزار گمز به پاسخ های بهتری دست خواهیم یافت اما در این سطح، الگوریتم ابتکاری توانسته است پاسخ بهتری ایجاد کند.

wt	آستانه وزنی استاندارد در هر ارسال	۲۰
w_i	وزن محصول i	Uniform (۲,۶)
$tpromised_i$	حداکثر زمان تعهد شده ی ارسال هر سفارش برای هر مشتری	Uniform (۱,۵)
$wtp_{i,j,t}^s$	میل به پرداخت مشتری j برای محصول i در بازه زمانی t تحت سناریو s	Uniform (۱۵,۳۰)
$up_{i,t}^s$	در بازه t تحت سناریو s حداکثر قیمت آزمانی محصول	$Max\{wtp_{i,j,t}^s\} \forall S = \{1, \dots, s\}$

همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود، مقادیر پارامتر p_s که احتمال وقوع هر سناریو را نشان می دهد به صورت تصادفی و با فرض $\sum_{s=1}^S p_s = 1$ ایجاد شده است. λ پارامتر تعادلی ریسک بین میانگین مقدار تابع هدف و واریانس آن است به طوری که با افزایش λ ریسک تصمیم بالا می رود. به عبارت دیگر، یک تغییر کوچک در پارامترهای دارای عدم قطعیت می تواند سبب تغییرات بزرگ در ارزش تابع اندازه گیری شود.

جدول (۳). پارامترهای ورودی مدل استوار

پارامتر	شرح	مقدار
p_s	احتمال وقوع سناریوی s	سناریو ۱: ۰/۵ سناریو ۲: ۰/۲۵ سناریو ۳: ۰/۲۵
λ	ضریب ثابت اهمیت بخش انحراف معیار در تابع هدف مالوی	۱

ابعاد نمونه ها در حدود ذکر شده در جدول به صورت تصادفی تولید شدند که در جداول (۴) و (۵) جزئیات هر مسئله مشخص شده است.

جدول (۴). حدود ابعاد مسئله

مقیاس	تعداد مشتریان	تعداد محصولات	تعداد بازه های زمانی
	max	min	max
کوچک	۲	۷	۳
متوسط	۸	۱۴	۵
بزرگ	۱۵	۲۰	۵

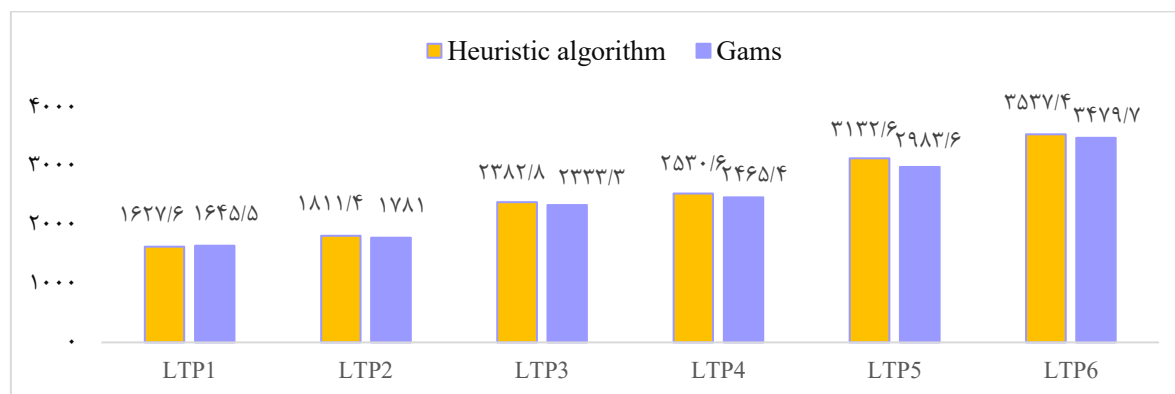
نمونه های تولید شده مسئله حاضر به سه دسته ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می شوند. این تقسیم بندی براساس توانایی نرم افزار گمز در همگرایی جواب و زمان حل تعیین شده است. برای هر سه دسته، چندین نمونه ایجاد شده است و ابعاد مسئله در هر نمونه توسط ۳ عامل تعداد مشتریان، تعداد محصولات و تعداد بازه های زمانی

جدول (۶). نتایج حل در ابعاد بزرگ

شماره مسئله	روش دقیق	الگوریتم ابتکاری		در صد اختلاف
		سود	زمان اجرا (ثانیه)	
LTP1	۱۶۴۵۵	۱۶۲۷۶	۳۵۷۰	٪۱۰۰۸
LTP2	۱۷۸۱۰	۱۸۱۱۴	۳۷۲۱	٪۱۰۷۰
LTP3	۲۳۳۳۳	۲۳۸۲۸	۳۷۲۴	٪۲۰۱۲
LTP4	۲۴۶۵۴	۲۵۳۰۶	۶۱۳۰	٪۲۰۶۴
LTP5	۲۹۸۳۶	۳۱۳۲۶	۸۳۴۰	٪۴۰۹۹
LTP6	۳۴۷۹۷	۳۵۳۷۴	۹۲۱۲	٪۱۰۶۵

جدول (۷). مقایسه عملکرد روش‌های حل برای ابعاد بزرگ

شماره مسأله	LTP1	LTP2	LTP3	LTP4	LTP5	LTP6
$\frac{Profit_{algorithm}}{Profit_{Gams}}$	۰/۹۸	۱/۰۱	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۱



شکل (۵). مقایسه مقدار تابع هدف با روش حل دقیق و الگوریتم ابتکاری در نمونه‌های ابعاد بزرگ

سیاست تجمیع سفارش‌ها و حالت خروج به ترتیب ورود برای نمونه‌های ابعاد کوچک با روش حل دقیق مقایسه شده است که نتیجه آن در جدول (۸) ارائه شده است.

۴-۶. تحلیل حساسیت بر تأثیر افزایش هزینه ثابت نگهداری بر

تابع هدف

در این بخش، تأثیر افزایش در هزینه ثابت نگهداری بر سود مرکز تحویل در یکی از نمونه‌ها (STP6) بررسی شده است. همان‌طور که در جدول (۹) مشخص است، افزایش در هزینه ثابت نگهداری تغییرات محسوسی در میزان درآمد ایجاد نمی‌کند. با در نظر گرفتن مقدار ۰/۲ برای هزینه ثابت نگهداری، مرکز تحویل کمترین هزینه و بیشترین سود را به همراه داشته است. سپس با افزایش آن تا رسیدن به عدد ۱ هزینه افزایش و به دنبال آن سود کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشخص است به‌کارگیری سیاست تجمیع سفارش‌ها توانسته است سود مرکز تحویل را در نمونه‌های مختلف بین ۱٪ تا ۷٪ افزایش دهد. این نتیجه، برتری به‌کارگیری این سیاست را نشان می‌دهد.

به غیر از نمونه اول، الگوریتم ابتکاری توانسته است در باقی نمونه‌ها به پاسخی بهتر از حد پایین درست یابد که قابل قبول است که با توجه به اینکه ۵ مشتری و ۷ محصول در نظر گرفته شده که شامل ۳۵ دسته جواب متفاوت و بیش از ۱۰۰ متغیر برای خروجی است که ماتریس بزرگی ایجاد خواهد کرد. لذا در قالب جدول (۶) قابل ارائه نیست. بنابراین، از گزارش کامل آن پرهیز کرده و صرفاً به عنوان نمونه بخشی از خروجی‌ها را در جدول متناظر ارائه کرده‌ایم. همچنین زمان اجرا نمونه‌ها بین ۳/۵۷ تا ۹/۲۱ ثانیه متغیر است که نشان‌گر سرعت بالای حل الگوریتم توسط نرم‌افزار پایتون است. از لحاظ دقت جواب نیز درصد اختلاف دو روش بین ۱/۰۸٪ و ۴/۹۹٪ متغیر است. جدول (۷) مقایسه‌ای بین جواب‌های هر دو روش را به‌صورت نسبتی نشان می‌دهد. در شکل (۵) مقایسه‌ای بین پاسخ‌های به‌دست آمده توسط دو روش نمایش داده شده است.

۳-۶. تحلیل حساسیت بر میزان سود مرکز تحویل در حالت به‌کارگیری سیاست تجمیع سفارش‌ها و حالت خروج به ترتیب

ورود

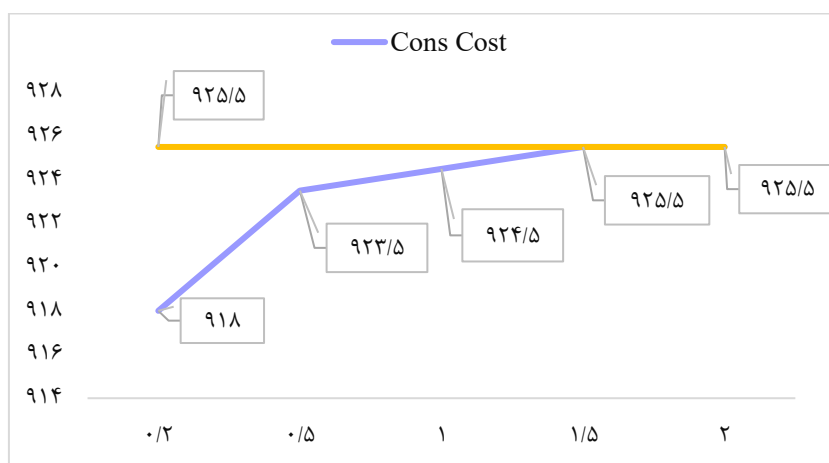
در این بخش میزان سود مرکز تحویل در حالت به‌کارگیری

جدول (۸). مقایسه تابع هدف در دو روش ارسال تجمیع سفارش ها و روش FIFO

شماره مسأله	سود با روش ارسال تجمیع سفارش ها	سود با روش ارسال خروج به ترتیب ورود	$\frac{Profit_{FIFO}}{Profit_{cons}}$
STP1	۶۰/۸	۶۰/۵	۰/۹۹
STP2	۸۹/۹	۸۹/۳	۰/۹۹
STP3	۵۳۱	۵۲۰	۰/۹۷
STP4	۲۱۴/۲	۲۰۰	۰/۹۳
STP5	۲۶۵	۲۵۲/۸	۰/۹۵
STP6	۴۳۵	۴۲۵/۵	۰/۹۷
STP7	۵۰۶/۲	۴۹۴	۰/۹۷

جدول (۹). تحلیل حساسیت پارامتر هزینه ثابت نگهداری بر تابع هدف با روش ارسال تجمیع سفارش ها

شماره مسأله	سیاست ارسال	هزینه ثابت نگهداری	درآمد با روش ارسال تجمیع سفارش ها	هزینه با روش ارسال تجمیع سفارش ها	سود با روش ارسال تجمیع سفارش ها	درصد افزایش در سود
STP6	روش ارسال تجمیع سفارش ها	۰/۲	۱۳۵۳	۹۱۸	۴۳۵	٪ ۲/۲۳
		۰/۵	۱۳۵۴	۹۲۳/۵	۴۳۰/۵	٪ ۱/۱۷
		۱	۱۳۵۲	۹۲۴/۵	۴۲۷/۵	٪ ۰/۴۷
		۱/۵	۱۳۵۱	۹۲۵/۵	۴۲۵/۵	۰
		۲	۱۳۵۱	۹۲۵/۵	۴۲۵/۵	۰



شکل (۶). تحلیل حساسیت پارامتر هزینه ثابت نگهداری بر هزینه با دو روش ارسال تجمیع سفارش ها و FIFO

در شکل های (۶) و (۷) نیز نمایش داده شده است. ۵-۶. تحلیل حساسیت بر تأثیر افزایش عدم قطعیت بر قیمت محصول و تابع هدف

در این بخش به بررسی تأثیر افزایش عدم قطعیت بر قیمت محصول و تابع هدف پرداخته می شود. به این منظور، در یکی از نمونه ها (STP6) مقدار میل به پرداخت مشتری برای سه سناریو با ۰/۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ اختلاف تعیین شده است و تغییرات قیمت بهینه و تابع هدف بررسی شده است که در جدول (۱۰) نتایج این تغییرات قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در نمونه های تولید شده، مقادیر سناریو با میل به پرداخت متوسط ثابت و سناریوها با میل به پرداخت کم و بالا به نسبت آن با اختلاف ۰/۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ تغییر یافته اند. همان طور که در جدول مشخص است، با افزایش عدم قطعیت،

این افزایش هزینه می تواند به این علت باشد که با افزایش هزینه ثابت نگهداری تا رسیدن به عدد ۱، تغییری در نحوه ارسال سفارش ها ایجاد نکرده و صرفاً افزایش هزینه ثابت نگهداری عامل افزایش هزینه بوده است اما زمانی که مقدار هزینه ثابت نگهداری به ۱/۵ می رسد، مقدار درآمد، هزینه و به دنبال آن سود مرکز تحویل، دقیقاً برابر با مقادیر آن در حالت ارسال به روش خروج به ترتیب ورود را که در جدول (۵) تا (۱۲) آمده است، می توان نتیجه گیری کرد که زمانی که هزینه ثابت نگهداری برابر با مقدار ۱/۵ (که برابر با هزینه ثابت حمل و نقل در این نمونه می باشد) و مقادیر بالاتر می شود، به کارگیری سیاست تجمیع سفارش ها سودآور نبوده و نتیجه ای برابر با نحوه ارسال به روش خروج به ترتیب ورود دارد. تأثیر افزایش هزینه ثابت نگهداری بر هزینه و سود مرکز تحویل، همان طور که در جدول (۹) آورده شده

۷. نتیجه‌گیری و سیر پژوهش‌های آتی

در این پژوهش، مسأله تصمیم‌های مشترک درخصوص قیمت‌گذاری و تجمیع سفارش‌های هر مشتری در گام آخر تحویل کالا تحت تقاضای غیرقطعی مورد بررسی قرار گرفت. زنجیره تأمین دو سطحی شامل یک مرکز تحویل و مجموعه‌ای از مشتریان در محیط خرید آنلاین در حالی مدنظر قرار داده شد که زمان ورود سفارش‌های هر مشتری دارای عدم قطعیت و تحت سناریوهای مختلف، متفاوت است. ابتدا، براساس داده‌های قبلی میل به پرداخت مشتریان برای محصولات مختلف که تحت هر سناریو موجود است، قیمت بهینه هر محصول محاسبه، سپس با استفاده از مفهوم مازاد مصرف‌کننده، زمان ورود سفارش‌های هر مشتری تعیین شد.

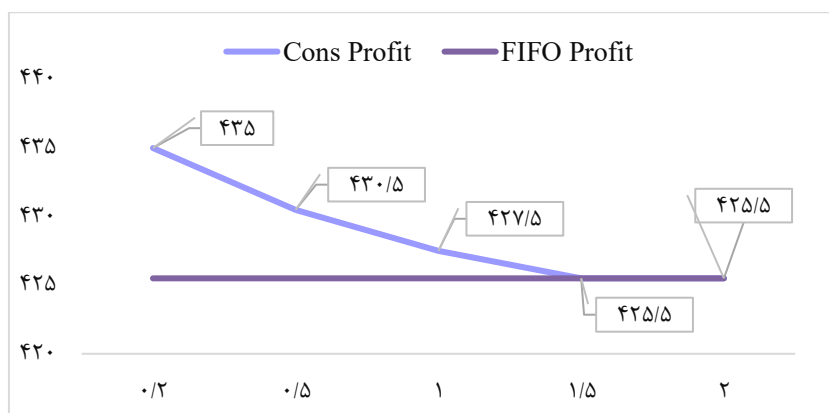
سپس درخصوص نحوه ارسال بهینه سفارش‌ها برنامه‌ریزی شد. برای مدل‌سازی این مسأله، یک مدل ریاضی براساس رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه شد. برای حل مدل در ابعاد کوچک از روش حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز استفاده شد. همچنین، یک الگوریتم ابتکاری برای حل آن در ابعاد متوسط و بزرگ ارائه شد. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم ابتکاری، نتایج حل نمونه‌های عددی در ابعاد کوچک و متوسط توسط نرم‌افزار گمز با نتایج الگوریتم ابتکاری مقایسه و برای ابعاد بالا، نتایج الگوریتم با بهترین جواب به‌دست آمده از نرم‌افزار گمز در محدوده زمانی مشخص شده مقایسه گردید. مقدار سود برای هر دو سیاست تجمیع و FIFO با استفاده از همان تابع هدف اصلی مدل محاسبه شده است. به‌طور خلاصه، ما یک بار مدل را با آزادی عمل برای تجمیع اجرا کردیم (ستون دوم) و یک بار مدل را با اجبار به ارسال فوری اجرا کردیم (ستون سوم). سپس سود هر دو سناریو را با استفاده از یک معیار ثابت (تابع هدف) مقایسه کرده‌ایم. این روش، مقایسه‌ای منصفانه و مبتنی بر یک مبنای مشترک را تضمین می‌کند. در بخش پایانی، تحلیل حساسیت روی پارامترهای مهم و حساس مسأله انجام شد و بینش‌های مدیریتی ارزشمندی ارائه شد تا بتواند راهنمایی برای خرده‌فروشان و فعالان این صنعت باشد.

سود مرکز تحویل و مقدار قیمت بهینه در بازه‌های زمانی مختلف کاهش یافته است. به عبارت دیگر، هرچه اختلاف بین میل به پرداخت مشتریان در سناریوهای مختلف بیشتر شده است، قیمت بهینه محصولات به‌صورتی که سناریو با میل به پرداخت کم را ارضا کند متمایل شده است.

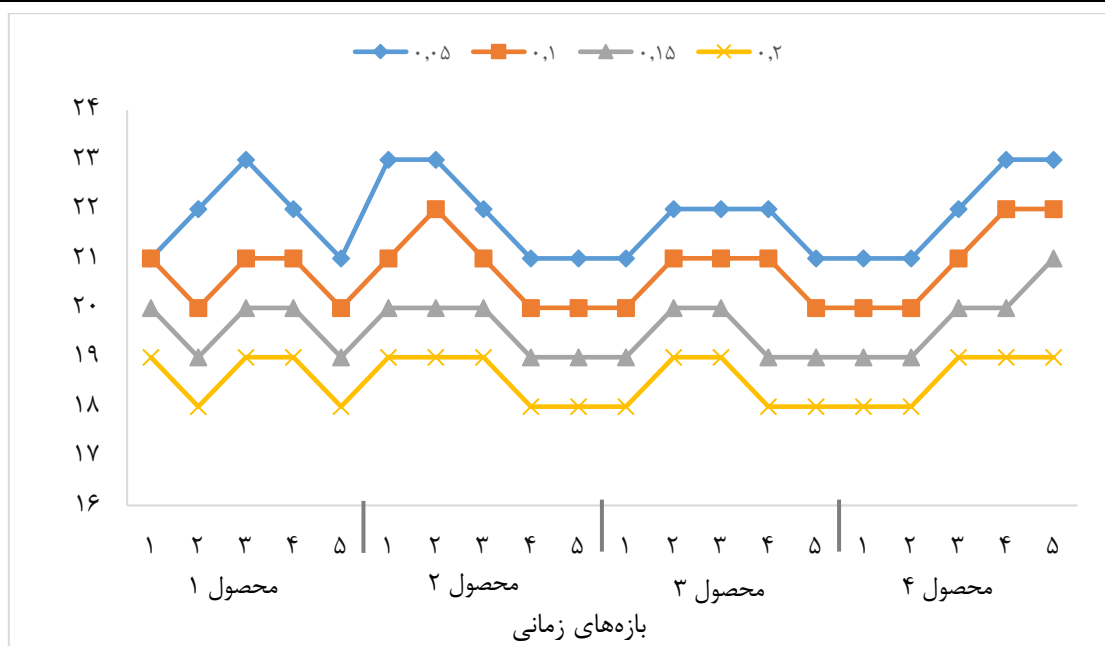
جدول (۱۰). بررسی تأثیر افزایش عدم قطعیت بر تابع هدف و

قیمت محصولات			
شماره مسأله	عدم قطعیت	سود با روش ارسال تجمیع سفارش‌ها	بازه تغییرات قیمت بهینه
STP6	٪۵	۵۰۱/۲	[۲۱-۲۳]
	٪۱۰	۴۳۷/۱	[۲۰-۲۳]
	٪۱۵	۴۴۵/۴	[۱۹-۲۱]
	٪۲۰	۴۲۰/۳	[۱۸-۲۰]

از آنجا که متغیر تصمیم قیمت قبل از رخ دادن سناریو تعیین می‌شود و وابسته به آن نیست، یکی از دلایل این اتفاق می‌تواند این باشد که در شرایطی که عدم قطعیت بیشتر شود، اختلاف بین میل به پرداخت مشتری در سناریوهای با میل به پرداخت کم و زیاد افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، اگر قیمت به‌نحوی تعیین شود که از میل به پرداخت مشتریان در سناریو با میل به پرداخت کم، بیشتر باشد، در صورت تحقق این سناریو، هیچ یک از مشتریان قادر به خرید نمی‌باشند اما در صورت تعیین قیمت به‌نحوی که برای مشتریان در سناریو با میل به پرداخت کم مناسب باشد، در صورت تحقق این سناریو، نه تنها مشتریان در این سناریو قادر به خرید خواهند بود، بلکه مشتریان در سناریوهای بالاتر نیز قادر به خرید با رضایت بالاتری خواهند بود زیرا اختلاف میل به پرداخت مشتریان در سناریوها با میل به پرداخت بالاتر با قیمت، بیشتر خواهد شد. در شکل (۸) بازه تغییرات قیمت بهینه با افزایش عدم قطعیت نمایش داده شده است.



شکل (۷). تحلیل حساسیت پارامتر هزینه ثابت نگهداری بر تابع هدف با دو روش ارسال تجمیع سفارش‌ها و FIFO



شکل (۸). بررسی تأثیر افزایش عدم قطعیت بر قیمت محصولات

مراجع

- [1] Gevaers, R., E. Van de Voorde, and T. Vanelslender, (2014). Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative B2C supply chain environment with implications on urban areas and cities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125: p. 398-411.
- [2] Zhang, Y., et al., (2019). Order consolidation for the last-mile split delivery in online retailing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122: p. 309-327.
- [3] Ballou, R.H., (2006). Revenue estimation for logistics customer service offerings. *The International Journal of Logistics Management*, 17(1): p. 21-37.
- [4] Wei, L., S. Jasin, and R. Kapuscinski, (2017). Shipping consolidation with delivery deadline and expedited shipment options. *Ross School of Business Paper*.
- [5] Goodarzi, A.H., et al., (2024). Evaluating the sustainability and resilience of an intermodal transport network leveraging consolidation strategies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 188: p. 103616.
- [6] Yu, V.F., et al., (2024). A fast simulated annealing heuristic for the multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options. *Transportation Letters*, 16(8): p. 921-932.
- [7] Moradi, N., et al., (2024). Two-echelon Electric Vehicle Routing Problem in Parcel Delivery: A Literature Review. *arXiv preprint arXiv:2412.19395*.
- [8] Yamada, K., et al., (2024). Drone scheduling for parcel delivery with an access grade to stops on a fixed truck route. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 18(2): p. JAMDSM0021-JAMDSM0021.

اولاً، در شرایطی که هزینه ثابت نگهداری از هزینه ثابت حمل و نقل کمتر است به کارگیری سیاست تجمیع سفارش ها برای ارسال سودآور می باشد. اگر هزینه ثابت نگهداری بزرگتر و یا مساوی با هزینه حمل و نقل باشد، بهتر است از روش ارسال خروج به ترتیب ورود برای ارسال سفارش های هر مشتری استفاده شود. دوماً، هرچه هزینه ثابت و هزینه مازاد حمل و نقل افزایش یابد، صرفه جویی در هزینه کل با روش ارسال تجمیع سفارش ها بیشتر و در نتیجه سود بیشتر می شود. نهایتاً، با افزایش عدم قطعیت، برآوردن تقاضای مشتریان در سناریو با میل به پرداخت کم، اهمیت بیشتر و ریسک کمتری نسبت به از دست دادن این مشتریان و فروش محصولات با قیمت بالاتر به مشتریان در سناریوهایی با میل به پرداخت بالاتر دارد.

در پژوهش حاضر ظرفیت مرکز تحویل نامحدود فرض شده است و درخصوص نحوه ارسال سفارش های هر مشتری به صورت مستقل تصمیم گیری می شود. بنابراین اضافه کردن این محدودیت می تواند در نحوه ارسال بهینه سفارش ها تغییر ایجاد کند.

علاوه بر این به کارگیری سیاست ترکیبی تجمیع سفارش ها، از نظر هزینه به صرفه تر از سیاست تجمیع سفارش ها براساس زمان است. بنابراین به کارگیری این سیاست و مقایسه نتایج با سیاست تجمیع براساس زمان می تواند در پژوهش های آتی مورد مطالعه قرار گیرد. الگوریتم های دیگر بهینه سازی برای حل مدل ریاضی طراحی شده می تواند ارائه شود تا با مقایسه با الگوریتم حاضر، بهترین نتیجه کسب شود. در آخر، برای پژوهش حاضر زمان ثبت سفارش و زمان ورود آن به مرکز تحویل یکسان فرض شده است. از آنجا که زمان آماده سازی محصولات مختلف می تواند متفاوت باشد، برای نزدیک کردن مدل به واقعیت می توان زمان آماده سازی محصولات را تحت عدم قطعیت بررسی کرد. همچنین زمان ارسال سفارش ها از مرکز تحویل به مشتری نیز می تواند غیرقطعی در نظر گرفته شود.

- discrete time and discrete quantity case. *Stochastic Models*, 27(4): p. 664-686.
- [23] Ülku, M.A. and J.H. Bookbinder, (2012). Optimal quoting of delivery time by a third party logistics provider: The impact of shipment consolidation and temporal pricing schemes. *European Journal of Operational Research*, 221(1): p. 110-117.
- [24] Hanson, W. and R.K. Martin, (1990). Optimal bundle pricing. *Management Science*, 36(2): p. 155-174.
- [25] Chen, J., M. Dong, and F.F. Chen, (2017). Joint decisions of shipment consolidation and dynamic pricing of food supply chains. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43: p. 135-147.
- [26] Chen, J., M. Dong, and L. Xu, (2018). A perishable product shipment consolidation model considering freshness-keeping effort. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 115: p. 56-86.
- [27] Nguyen, C., M. Dessouky, and A. Toriello, (2014). Consolidation strategies for the delivery of perishable products. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69: p. 108-121.
- [28] Yang, X., et al., (2016). Choice-based demand management and vehicle routing in e-fulfillment. *Transportation science*, 50(2): p. 473-488.
- [29] Çetinkaya, S., F. Mutlu, and C.-Y. Lee, (2006). A comparison of outbound dispatch policies for integrated inventory and transportation decisions. *European Journal of Operational Research*, 171(3): p. 1094-1112.
- [30] Mulvey, J.M., R.J. Vanderbei, and S.A. Zenios, (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2): p. 264-281.
- [31] Leung, S., Y. Wu, and K. Lai, (2002). A robust optimization model for a cross-border logistics problem with fleet composition in an uncertain environment. *Mathematical and Computer Modelling*, 36(11-13): p. 1221-1234.
- [32] Mirzapour Al-E-Hashem, S., H. Malekly, and M.B. Aryanezhad, (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International journal of production economics*, 134(1): p. 28-42.
- [33] Ben-Tal, A. and A. Nemirovski, (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations research letters*, 25(1): p. 1-13.
- [34] Rajgopal, J., (2004). Principles and applications of operations research. *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. p. 11.27-11.44.
- [9] Bányai, T., (2018). Real-time decision making in first mile and last mile logistics: How smart scheduling affects energy efficiency of hyperconnected supply chain solutions. *Energies*, 11(7): p. 1833.
- [10] Karaoglan, I., et al., (2012). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4): p. 465-477.
- [11] Zhou, L., et al., (2019). Model and algorithm for bilevel multisized terminal location-routing problem for the last mile delivery. *International Transactions in Operational Research*, 26(1): p. 131-156.
- [12] Tong, B., et al., (2025) A deep learning-based algorithm for the detection of personal protective equipment. *PLoS One*, 20(5): p. e0322115.
- [13] Senarclens de Grancy, G. and M. Reimann, (2016). Vehicle routing problems with time windows and multiple service workers: a systematic comparison between ACO and GRASP. *Central European Journal of Operations Research*, 24: p. 29-48.
- [14] Cortes, J.D. and Y. Suzuki, (2020). Vehicle routing with shipment consolidation. *International Journal of Production Economics*, 227: p. 107622.
- [15] Ma, Y., et al. (2017). An improved ACO for the multi-depot vehicle routing problem with time windows. in *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management*. Springer.
- [16] Dror, M. and B.C. Hartman, (2007). Shipment consolidation: Who pays for it and how much? *Management Science*, 53(1): p. 78-87.
- [17] Ülku, M.A., (2012). Dare to care: Shipment consolidation reduces not only costs, but also environmental damage. *International Journal of Production Economics*, 139(2): p. 438-446.
- [18] Berling, P. and F. Eng-Larsson, (2016). Pricing and timing of consolidated deliveries in the presence of an express alternative: Financial and environmental analysis. *European Journal of Operational Research*, 250(2): p. 590-601.
- [19] Snoeck, A., D. Merchán, and M. Winkenbach, (2020). Revenue management in last-mile delivery: state-of-the-art and future research directions. *Transportation Research Procedia*, 46: p. 109-116.
- [20] Hong, K.-s. and C. Lee, (2013). Optimal time-based consolidation policy with price sensitive demand. *International Journal of Production Economics*, 143(2): p. 275-284.
- [21] Taleizadeh, A.A. and A. Rasuli-baghdan, (2015). Pricing and inventory decisions for deteriorating products under shipment consolidation. *International Journal of Advanced Logistics*, 4(2): p. 89-99.
- [22] Bookbinder, J.H., Q. Cai, and Q.-M. He, (2011). Shipment consolidation by private carrier: the



Joint Decisions of Pricing and Shipment Consolidation per Customer for The Last-Mile Delivery with Uncertain Demand

Meilina Safari Nasab¹, Mohsen Sheikh Sajadieh², Matineh Ziari^{3*}

1. Department of Industrial Engineering & Management Systems, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

2. Department of Industrial Engineering & Management Systems, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

3. Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2025/07/13

Revised 2025/11/08

Accepted 2025/11/13

Keywords:

Time-based Shipment,
Consolidation Policy,
Last-mile Delivery,
Pricing,
Customer's Willingness to Pay,
Demand uncertainty,
Robust optimization.

ABSTRACT

With the increasing growth of online stores and e-commerce businesses, a significant portion of customer needs are now met through these channels. This research focuses on product pricing and solving the problem of separate order deliveries in the final stage of product delivery. Separate order deliveries occur when multiple orders from a single customer are shipped in separate trips within a specific time period. This study targets a two-level supply chain consisting of a delivery center and a number of end customers. Each customer can place multiple orders over a given time period. Additionally, the research considers product variety, and the time at which each customer places an order for a product is uncertain and varies under different scenarios. To address this uncertainty, a robust nonlinear integer programming model based on the scenario-based Mulvey robust optimization approach is proposed. To solve the mathematical model in large-scale instances, a heuristic algorithm is employed. Finally, the problem is numerically solved in various dimensions, demonstrating the strong performance of the heuristic algorithm with an accuracy of 95% to 99% and a maximum solution time of 9 seconds for the largest instance—compared to the exact solution method using GAMS software, which requires over 7,200 seconds to converge. Furthermore, the order consolidation policy proves superior to the first-come-first-served approach across various parameters. The results of sensitivity analysis on key problem parameters provide valuable managerial insights for practical implementation.

* Corresponding author. M. Ziari

Tel.: 021-82084483; E-mail address: m.ziari@ut.ac.ir