مهندسی صنایع و مدیریت شریف (تابستان ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۱، ص. ۶۷-۷۷، (پژوهشی)

Original Article

موازنه هزینه ـ سطح سرویس با رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک: مطالعه موردی یک شرکت تامین تجهیزات پزشکی

حسین خلیلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سعید علائی* (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خاتم

امروزه برای موفقیت در بازار رقابتی، کنترل زمان تدارک در شرایطی که تقاضا تصادفی باشد، اهمیت زیادی دارد و می‌تواند منجر به افزایش رضایت مشتریان و بهبود سطح سرویس شود. از لحظه ثبت سفارش تا لحظه تحویل آن به مشتری، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها انجام می‌گیرند که با ویژگی‌هایی مانند روابط پیشنیازی، روش‌های انجام، زمان و هزینه تعریف می‌شوند. در این مقاله، با تحلیل هزینه‌ای و زمانی چنین فعالیت‌هایی با وجود تصادفی بودن ورود مشتریان، مقدار تقاضای آنها و زمان انجام فعالیت‌ها، موازنه سطح سرویس و هزینه انجام می‌شود. برای شناسایی جواب‌های پارتو، رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب پیشنهاد می‌شود. کارایی الگوریتم پیشنهادی با اجرای آن روی داده‌های شرکت تامین‌کننده تجهیزات پزشکی، به‌عنوان مطالعه موردی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سطح سرویس نسبت به فشرده‌سازی زمان سفارشات کدام بازه حساسیت بیشتری دارد تا تصمیم‌گیرنده روی کاهش زمان آن بازه متمرکز شود.

واژگان کلیدی: زمان تدارک؛ سطح سرویس، شبیه‌سازی مونت کارلو؛ فعالیت‌های چندحالته.

h.khalili67@gmail.com
s.alaei@khatam.ac.ir

۱. مقدمه

پاسخگویی[۱] مبتنی بر زمان، اغلب توسط سطوح سرویس تعریف می‌شود. خیلی از اوقات برای موفقیت در بازار رقابتی، بیشینه کردن سطح سرویس اهمیت زیادی پیدا می‌کند، مخصوصا زمانی که تامین‌کننده نگران اعتبار و خوشنامی[۲] خود باشد.[۱] شاخص‌های مختلفی برای سطح سرویس تعریف شده است که می‌توان به چن و کراس[۲] و زیپکین[۳] مراجعه نمود. مهم‌ترین شاخص‌ها، احتمال عدم مواجهه با کمبود،[۱و۴-۷] بخشی از تقاضا که در زمان تدارک[۳] (مدت زمان بین ثبت سفارش تا تحویل) می‌تواند تامین شود[۱و۷-۱۰] و زمان پاسخ مورد انتظار[۱۱و۱۲] است.

هنگامی‌که تقاضا به‌صورت تصادفی باشد، کنترل زمان تدارک اهمیت زیادی پیدا کرده و می‌تواند منجر به مزایای بسیاری شود. زمان تدارک کوتاه‌تر، منجر به افزایش رضایت مشتریان، بهبود سطح سرویس و افزایش مزیت رقابتی شرکت می‌شود.[۱۳]

معمولا زمان تدارک از اجزای مختلفی تشکیل شده است که شامل آماده‌سازی سفارش، راه‌اندازی، حمل و نقل، انتظار، تحویل و غیره است.[۱۴] در بسیاری مواقع می‌توان زمان تدارک را با صرف هزینه‌های اضافی کوتاه‌تر کرد که این هزینه‌ها تحت عنوان هزینه‌های کاهش زمان تدارک هستند. کاهش زمان تدارک در مطالعات اندکی در زمینه مدل‌های موجودی مورد بررسی قرار گرفته است. به اینصورت که زمان تدارک را شامل اجزای مختلفی در نظر گرفته‌اند و هر جزء آن قابل کنترل بوده و با صرف هزینه‌ای می‌توان آنها را کوتاه‌تر کرد.[۵و۱۵-۱۸]

شرکت KT تامین‌کننده یک محصول پزشکی خاصی به مجموعه‌ای از مشتریان است. ورود مشتریان و مقدار سفارش آنها متغیری تصادفی با توزیع معلوم است. هر سفارشی که توسط مشتریان ثبت می‌شود، در انتهای هر دوره تجمیع شده و در قالب یک سفارش تجمیعی پردازش می‌شود. در زمان تدارک، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها با روابط پیش‌نیازی مشخص باید انجام شوند که برای انجام هر فعالیت می‌توان حالت‌های مختلفی در نظر گرفت. هر فعالیت با دو

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۲/۷/۸، پذیرش ۱۴۰۲/۸/۸.

استناد به این مقاله:
خلیلی، حسین و علائی، سعید، ۱۴۰۳. موازنه هزینه ـ سطح سرویس با رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک: مطالعه موردی یک شرکت تامین تجهیزات پزشکی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۰(۱)، صص. ۶۷-۷۷. DOI:10.24200/J65.2023.61050.2318.

جدول ۱. خلاصه مقالات با در نظرگرفتن سطح سرویس در تابع هدف یا محدودیت.

نویسنده	تابع هدف	مساله	پارامتر عدم قطعیت	متدلوژی
هولر و همکاران[۱]	هزینه	موجودی	تقاضا	الگوریتم ابتکاری
میراندا و گاریدو[۴]	سطح سرویس	مکانیابی ـ موجودی	تقاضا	برنامه‌ریزی دوسطحی
جاها و شانکر[۵]	هزینه	موجودی-مسیریابی	تقاضا	مدل ریاضی
علائی و ستاک[۶]	سود و سطح سرویس	موجودی ـ مسیریابی ـ قیمت گذاری	تقاضا	برنامه‌ریزی چندهدفه
اسکالونا و همکاران[۷]	هزینه	موجودی	تقاضا	برنامه‌ریزی غیرخطی
ساویک[۸]	هزینه/سطح سرویس	انتخاب تامین کننده و زمان‌بندی سفارشات مشتریان	ریسک اختلال	برنامه‌ریزی تصادفی
اورلیس و همکاران[۹]	سود	مسیریابی	-	مدل ریاضی
کانداس و کوتانوغلو[۱۰]	هزینه	مکانیابی ـ موجودی	تقاضا	برنامه‌ریزی غیرخطی
تسای و ژنگ[۱۱]	هزینه	موجودی دوسطحی	زمان حمل و نقل و تعمیر	شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی
تسای و لیو[۱۲]	هزینه	موجودی چندسطحی	زمان حمل و نقل و تعمیر	سیستم پشتیبانی تصمیم مبتنی بر شبیه‌سازی
بونیا و همکاران[۱۹]	هزینه	موجودی دوسطحی	تقاضا	تحلیلی
مالیک و همکاران[۲۰]	هزینه	موجودی دوسطحی	تقاضا	نظریه بازی‌ها
یاداو و همکاران[۲۱]	سود	موجودی دوسطحی	-	تحلیلی
الغربی[۲۲]	هزینه	موجودی چندسطحی	تقاضا	شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی
کومار و همکاران[۲۳]	هزینه	موجودی	تقاضا	تحلیلی
تحقیق جاری	هزینه و سطح سرویس	تسریع فعالیت‌های زمان تدارک	ورود مشتریان، تقاضا، زمان فعالیت‌ها	شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

پارامتر هزینه و زمان قطعی/تصادفی مشخص شده است که مقادیر این پارامترها وابسته به مقدار سفارش تجمیعی و حالت انجام فعالیت است. به‌علت وجود شکایات متعدد مشتریان در رابطه با طولانی شدن مدت زمان بین ثبت سفارش تا تحویل آن، مدیریت علاقه‌مند است تا سطح سرویس خود را بهینه‌سازی کند و در نتیجه سهم بازار خود را از دست ندهد. در این تحقیق سطح سرویس به‌صورت درصدی از سفارشات که مدت زمان بین ثبت سفارش تا تحویل آنها حداکثر برابر مقدار مشخص L باشد، تعریف می‌شود. با توجه به‌اینکه کاهش این زمان هزینه‌هایی را به شرکت تحمیل می‌کند، بنابراین، مدیریت تمایل دارد تا موازنه‌ای بین هزینه و سطح سرویس انجام شود. در حال‌حاضر، حدود ۵۰ درصد از مشتریان سفارش خود را در کمتر از $L = ۲۰$ روز کاری تحویل می‌گیرند. هدف اصلی تحقیق، تعیین حالت انجام فعالیت‌های بین ثبت سفارش تا تحویل آن است به‌طوری‌که موازنه بین سطح سرویس و هزینه ایجاد شود. در این راستا، سوالات اصلی تصمیم‌گیرنده عبارتند از: الف) با حداکثر ۱۰ درصد افزایش هزینه هر محصول، حداکثر به چه سطح سرویسی می‌توان دست پیدا کرد؟ ب) برای افزایش سطح سرویس به ۷۰ درصد، هزینه هر محصول چقدر افزایش پیدا می‌کند؟ همچنین مدیریت تمایل دارد تا حساسیت جواب‌ها نسبت به برخی پارامترها بررسی شود.

در مطالعات قبلی، اغلب سطح سرویس به‌صورت محدودیت درکنار بهینه‌سازی هزینه/سود در نظر گرفته شده است.[۱،۵،۷،۹-۱۲،۱۹-۲۳] میراندا و گاریدو[۴] برای یک مساله مکانیابی ـ موجودی، بهینه‌سازی سطح سرویس را بررسی کرده و برای حل آن از برنامه‌ریزی دوسطحی استفاده کرده‌اند. ساویک[۸] برای مساله انتخاب تامین‌کننده و زمان‌بندی سفارشات، دو مدل با وجود ریسک اختلال ارائه کرده است که در یکی هزینه در بدترین حالت و در دیگری سطح سرویس در بدترین حالت بهینه‌سازی شده است و برای حل آنها از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده کرده است. همچنین علائی و ستاک[۶] بهینه‌سازی همزمان سود و سطح سرویس را در یک مسئله موجودی ـ مسیریابی ـ قیمت‌گذاری مورد بررسی قرار داده‌اند و برای حل آن از برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده کرده‌اند. جدول ۱ خلاصه مقالات مرتبط با موضوع را که سطح سرویس در آنها به‌صورت تابع هدف یا محدودیت در نظرگرفته شده است، نشان می‌دهد.

با بررسی مطالعات قبلی می‌توان دریافت که بهینه‌سازی همزمان هزینه و سطح سرویس مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، در مطالعات قبلی اغلب پارامتر تقاضا بصورت غیرقطعی در نظرگرفته شده است. نوآوری‌های تحقیق، شامل موارد ذیل است: با تحلیل هزینه‌ای و زمانی فعالیت‌های بین ثبت سفارش تا تحویل با وجود تصادفی بودن ورود مشتریان، مقدار تقاضای آنها و زمان انجام فعالیت‌ها، موازنه بین سطح سرویس و هزینه ایجاد می‌شود. یک رویکرد ترکیبی شامل شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای شناسایی جواب‌های پارتو پیشنهاد شده است. لازم به‌ذکر است که تحلیل‌های عددی بر پایه داده‌های واقعی شرکت KT انجام شده است.

ادامه ساختار مقاله به‌صورت زیر تنظیم شده است. در بخش ۲، بیان مسئله و مفروضات آن به تفصیل آورده شده است. در بخش ۳، مسئله مطالعه موردی

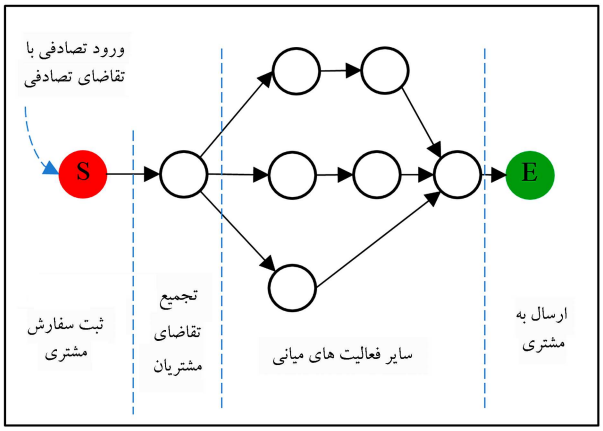
تشریح شده و داده‌های مرتبط با توالی فعالیت‌ها، زمان و هزینه آنها و توزیع تقاضای مشتریان ارائه شده است. در بخش ۴، رویکرد پیشنهادی شامل رویه‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی بیان شده است. در بخش ۶، نتایج عددی به‌همراه تحلیل حساسیت ارائه شده است و در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی ارائه می‌شود.

۲. تشریح مساله

شرکتی تامین‌کننده محصول خاصی به مشتریان است و بر مبنای تولید بر اساس سفارش عمل می‌کند. هر سفارشی که ثبت می‌شود تا لحظه تحویل آن به مشتری، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها ($J = ۱, ۲, \ldots, J$) با وجود روابط پیشنیازی مطابق شکل ۱ باید انجام شوند. هر فعالیت j با حالت‌های مختلفی قابل انجام است. ($mj = ۱, ۲, \ldots, Mj$) همچنین، برای هر فعالیت دو پارامتر زمان و هزینه تعریف شده است: مدت زمان انجام هر فعالیت به‌صورت قطعی یا تصادفی با توزیع مشخص است. هزینه انجام هر فعالیت به‌صورت قطعی بوده و شامل هزینه ثابت و هزینه متغیر است. پارامترهای زمان و هزینه هر فعالیت وابسته به حالت انجام آن و مقدار تقاضای انفرادی/تجمیعی است. برای روشن شدن موضوع توالی رویدادها را به‌صورت زیر در نظر بگیرید:

- مشتری i در زمان TS_i سفارشی با اندازه d_i ثبت می‌کند (فعالیت S). ورود مشتریان و همچنین مقدار تقاضای آنها متغیری تصادفی بوده و توزیع احتمالاتی آن مشخص است؛
- درانتهای هر دوره، سفارش مشتریان تجمیع می‌شود. فرض کنید سفارش تجمیعی مشتریان برابر D باشد؛
- درادامه سایر فعالیت‌های میانی با هزینه و زمان وابسته به حالت انجام و تقاضای تجمیعی D انجام می‌شوند. مثال‌هایی از این فعالیت‌ها می‌تواند برنامه‌ریزی خرید، خرید مواد اولیه، مونتاژ محصول در کارخانه، کنترل کیفیت، بسته‌بندی و غیره باشد؛
- در نهایت فعالیت ارسال با زمان و هزینه وابسته به حالت انجام و d_i انجام شده و سفارش مشتری i در زمان TE_i تحویل داده می‌شود.

تصمیم‌گیرنده قصد تعیین حالت انجام فعالیت‌ها را دارد طوری‌که هزینه واحد محصول و سطح سرویس به‌صورت همزمان بهینه‌سازی شوند. توجه شود که رویدادهای فوق



شکل ۱. نمایی از مساله مورد بررسی.

در طول افق زمانی تکرار می‌شوند. زمان تدارک شامل دو بخش است. بخش اول زمان انتظار از لحظه ورود سفارش تا لحظه تجمیع سفارشات. با توجه به ورود تقاضا در روزهای مختلف هفته و تجمیع آنها در ابتدای هفته آتی، مدت زمان انتظار هر مشتری متفاوت خواهد بود. بخش دوم نیز شامل انجام مجموعه فعالیت‌هایی است که بسته به میزان سفارش تجمیعی و انتخاب حالت عادی یا سریع، زمان انجام آنها نیز متفاوت خواهد بود. رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، به‌دنبال بهینه‌سازی بخش دوم لیدتایم است. لازم به توضیح است که کاهش زمان تدارک با کاهش زمان انتظار (بخش اول) هم می‌تواند میسر شود که در این تحقیق لحاظ نشده است.

فرض کنید I سفارش مستقل در قالب I' سفارش تجمیعی انجام می‌شود. زمان تدارک یا مدت زمان بین ثبت سفارش تا تحویل آن برای مشتری i به‌صورت $L_i = TE_i - TS_i$ محاسبه می‌شود. درصدی از مشتریان که زمان تدارک آنها حداکثر برابر L است، یعنی $L_i \leq L$، به‌عنوان سطح سرویس است. همچنین، نسبت مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با سفارش‌ها تقسیم بر مجموع تقاضای مشتریان، $\sum_i d_i$، هزینه به‌ازای واحد محصول را نتیجه می‌دهد.

۳. مطالعه موردی

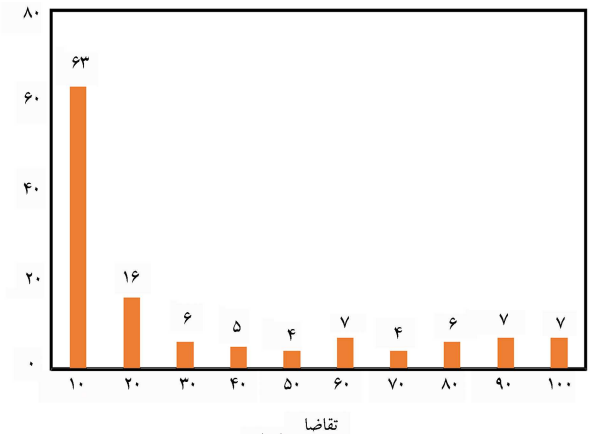
شرکت KT تولیدکننده یک محصول پزشکی به‌نام سیستم احضار پرستار است. فعالیت‌ها عبارتند از: (A) ثبت سفارش مشتری که دارای توزیع تصادفی است. (B) تجمیع سفارشات مشتریان (انتهای هر دوره)، تقاضاهایی که در روزهای یکشنبه، دوشنبه، سه شنبه، چهارشنبه و شنبه انجام می‌شود، روز شنبه تجمیع می‌شود تا بر اساس آن برنامه‌ریزی خرید مواد اولیه انجام شود. (C) خرید مواد اولیه بر اساس تقاضای تجمیعی هفتگی و ارسال به مونتاژکار. (D) مونتاژ توسط پیمانکار و ارسال به محل شرکت. (E) کنترل کیفیت و ورود به انبار محصول. (F) بسته‌بندی محصولات و ارسال به محل مشتری.

بنابراین، برای هر یک از فعالیت‌ها، زمان و هزینه انجام آنها مشخص است. زمان هر فعالیت، قطعی یا تصادفی با توزیع یکنواخت گسسته بوده و بر اساس روزهای کاری در نظرگرفته می‌شود. روزهای پنجشنبه و جمعه جزو روزهای غیرکاری هستند و در محاسبات لحاظ نمی‌شوند. هزینه هر فعالیت شامل یک هزینه متغیر و یک هزینه ثابت است که اغلب به‌صورت هزینه حمل و نقل است. مقدار هزینه متغیر و هزینه ثابت در برخی فعالیت‌ها وابسته به مقدار تقاضای هفتگی است. وابستگی هزینه به مقدار تقاضا در فعالیت‌ها دلایل مختلفی دارد که عبارتند از: تخفیف در قیمت خرید، تفاوت در وسیله حمل و نقل و غیره. با هدف کاهش زمان فعالیت‌ها، برای هر یک از فعالیت‌های C، D، E و F حالت سریع شناسایی شده و مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است که واحد هزینه‌ها و زمان فعالیت‌ها به‌ترتیب هزار تومان و روز کاری است. برای فعالیت‌های A و B زمان و هزینه قید نشده است. فعالیت ثبت سفارش از طرف خریدار در طی روزهای هفته انجام می‌گیرد و هزینه قابل توجهی ندارد و زمان صرف شده به این فعالیت ناچیز است. تجمیع سفارشات و برنامه‌ریزی خرید نیز در عصر روزهای شنبه هر هفته صورت می‌گیرد و حداکثر زمان مورد نیاز آن یک الی دو ساعت است. بنابراین، با توجه به‌اینکه این زمان کمتر از ۱ روز کاری است، زمان فعالیت برابر صفر منظور شده است. زمان فعالیت‌ها با توجه به داده‌های گذشته دارای توزیع یکنواخت گسسته است. به‌عنوان مثال فعالیت C برای حجم سفارش تجمیعی ۳۱ تا ۵۰ واحد با احتمال یکسان در دقیقا ۲ یا دقیقا ۳ روز کاری انجام می‌شود. بررسی

جدول ۲. هزینه و زمان فعالیت ها در دو حالت استاندارد و سریع.

فعالیت	شرح فعالیت	تعداد	حالت ۱ (استاندارد)				حالت ۲ (سریع)			
			هزینه متغیر	هزینه ثابت	زمان		هزینه متغیر	هزینه ثابت	زمان	
A	ثبت سفارش در روزهای هفته	-	۰	۰	۰		۰	۰	۰	
B	تجمیع سفارشات و برنامه‌ریزی خرید	-	۰	۰	۰		۰	۰	۰	
C	خرید مواد اولیه جهت	۱-۵	۲۰۰۰	۵۰	۱		۲۰۰۰	۵۰	۱	
	تولید محصول و ارسال	۶-۳۰	۱۹۵۰	۲۰۰	۱		۱۹۵۰	۲۰۰	۱	
	به مونتاژ کار	۳۱-۵۰	۱۸۵۰	۳۰۰	U{2,3}		۱۹۵۰	۳۰۰	۱	
		۵۱-۷۰	۱۷۰۰	۵۰۰	U{3,4}		۱۹۰۰	۵۰۰	U{1,2}	
		۷۱-۱۰۰	۱۶۰۰	۶۰۰	U{4,5}		۱۸۵۰	۶۰۰	U{2,3}	
D	مونتاژ محصولات	۱-۵	۲۰۰	۶۵	۲		۳۵۰	۶۵	۱	
	توسط پیمانکار و	۶-۳۰	۲۰۰	۳۰۰	U{2,3}		۳۳۰	۳۰۰	۱	
	ارسال به کارفرما	۳۱-۵۰	۱۹۰	۵۰۰	U{4,5}		۳۱۰	۵۰۰	U{2,3}	
		۵۱-۷۰	۱۸۵	۸۰۰	U{7,8}		۳۰۰	۸۰۰	U{3,4}	
		۷۱-۱۰۰	۱۸۰	۱۰۰۰	U{10,12}		۲۹۰	۱۰۰۰	U{6,8}	
E	کنترل کیفیت (Q.C) و	۱-۵	۳۰۰	۰	۱		۳۰۰	۰	۱	
	ورود به انبار محصول	۶-۳۰	۳۰۰	۰	U{2,3}		۶۰۰	۰	۲	
		۳۱-۵۰	۳۰۰	۰	U{4,5}		۶۰۰	۰	U{2,3}	
		۵۱-۷۰	۳۰۰	۰	U{6,7}		۶۰۰	۰	U{4,5}	
		۷۱-۱۰۰	۳۰۰	۰	U{8,10}		۶۰۰	۰	U{5,6}	
F	بسته‌بندی محصول	۱-۵	۷۰	۲۰۰	۲		۱۳۰	۲۰۰	۱	
	و ارسال به خریدار	۶-۳۰	۷۰	۳۰۰	U{2,3}		۱۳۰	۳۰۰	۱	
		۳۱-۵۰	۷۰	۴۰۰	U{3,4}		۱۳۰	۴۰۰	۲	
		۵۱-۷۰	۷۰	۵۰۰	U{3,4}		۱۳۰	۵۰۰	U{2,3}	
		۷۱-۱۰۰	۷۰	۶۰۰	U{4,5}		۱۳۰	۶۰۰	U{3,4}	

داده‌های تقاضای دو سال اخیر نشان می‌دهد که در ۵۷۰ روز کاری، در ۴۴۴ روز هیچ سفارشی ثبت نشده است (مقدار تقاضا برابر صفر بوده است). ولی در ۱۲۶ روز مقدار تقاضا مثبت بوده است. میانگین و انحراف معیار تقاضای روزانه در دو سال اخیر به‌ترتیب برابر ۶/۱۵ و ۱۸/۹ است. شکل ۲ هیستوگرام تقاضا را برای مقادیر مثبت تقاضا نشان می‌دهد که در آن تقاضای ۴۴۴ روز با مقدار صفر نشان داده نشده است و بیشترین تقاضا در بازه ۱ تا ۱۰ بوده است که در ۶۳ روز کاری رخ داده است. در شکل ۳ نیز تابع توزیع تجمعی تقاضای روزانه نشان داده شده است که برای تولید تقاضای تصادفی در حل مساله استفاده خواهد شد.

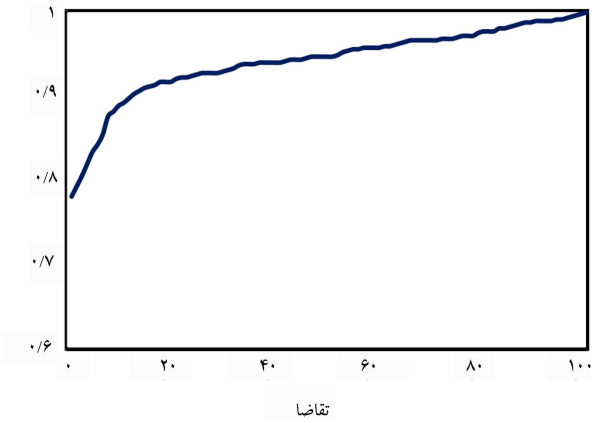


شکل ۲. هیستوگرام تقاضای روزانه برای مقادیر مثبت تقاضا.

۴. رویکرد پیشنهادی

با توجه به‌اینکه لحظه ورود مشتریان، مقدار تقاضای هر مشتری، مقدار تقاضای تجمیعی هر دوره و همچنین مدت زمان انجام فعالیت‌ها دارای ماهیت تصادفی است. امکان مدل‌سازی ریاضی مساله و استفاده از روش‌های دقیق برای تحلیل مسئله میسر نیست. اگرچه مدل‌سازی براساس پارامتر مقدار تقاضای تجمیعی هفتگی امکانپذیر است ولی در اینصورت تنها می‌توان هزینه را تعیین کرد و امکان تعیین سطح سرویس وجود ندارد. به‌عبارت دیگر با توجه به تجمیعی بودن پارامتر تقاضا، امکان تفکیک تقاضا و تعیین درصدی از مشتریان که زمان تدارک آنها کمتر از حد مشخصی باشد، با توجه به مدل ریاضی امکان پذیر نخواهد بود به این منظور از رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای تحلیل مسئله استفاده می‌شود.

هدف تحلیل مساله، تعیین بهترین ترکیب حالت‌های انجام فعالیت‌ها است به‌نحوی که اهداف هزینه و سطح سرویس بهینه‌سازی شوند. رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو به‌ازای هر ترکیب از حالت‌های انجام فعالیت‌ها می‌تواند هزینه و سطح سرویس را برآورد کند. برای انتخاب بهترین ترکیب از بین ترکیب‌های ممکن، در صورتی‌که تعداد حالات محدود باشد، می توان مسئله را به‌ازای تمام حالات مختلف



شکل ۳. تابع توزیع تجمعی تقاضای روزانه.

شبیه‌سازی کرد. در غیر این‌صورت از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب[۲۴] استفاده می‌شود.

۱.۴. رویه الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

در این بخش جزئیات الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب تشریح می‌شود: هر جواب توسط یک بردار X با J درایه نمایش داده می‌شود که J تعداد فعالیت‌ها بوده و مقدار درایه j متناظر با حالت انجام فعالیت j است. جمعیت اولیه شامل Npop جواب می‌باشد که برای تولید جواب، یکی از حالت‌های انجام فعالیت j به‌صورت تصادفی به درایه j تخصیص داده می‌شود. مقادیر توابع هدف هزینه و سطح سرویس به‌عنوان تابع برازش در نظرگرفته شده است که با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و در بخش بعدی تشریح می‌شود. برای تولید جواب‌های جدید از تقاطع یکنواخت استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال دو جواب X_1 و X_2 انتخاب می‌شوند، سپس یک بردار Y هم اندازه با X با مقادیر صفر و یک تولید می‌شود و هر فرزند متناسب با مقادیر بردار Y، مقادیر X_1 یا X_2 را به ارث می‌برد. برای جهش نیز ابتدا یک بردار Z هم اندازه با X با مقادیر صفر و یک متناسب با نرخ جهش تولید می‌شود و در صورتی‌که مقادیر متناظر با هر فعالیت در این بردار مقدار ۱ بگیرد، حالت انجام آن فعالیت تغییر پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال برای ۴ فعالیت که هرکدام ۳ حالت انجام دارند، شکل ۴ نحوه نمایش جواب و عملگرهای تقاطع و جهش را نشان می‌دهد. همچنین رویه الگوریتم به‌صورت زیر است:

ورودی ها: اندازه جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش، شرط توقف

گام ۱. تولید جمعیت اولیه؛

گام ۲. محاسبه توابع هدف برای هر جواب (شبیه‌سازی)؛

گام ۳. تعیین رتبه جواب‌ها؛

گام ۴. تولید فرزندان با عملگر انتخاب، تقاطع و جهش؛

گام ۵. محاسبه توابع هدف برای هر فرزند (شبیه‌سازی)؛

گام ۶. تجمیع والدین با فرزندان؛

گام ۷. محاسبه رتبه و فاصله ازدحامی جواب‌ها؛

گام ۸. بروزرسانی جمعیت جدید با توجه به گام ۷؛

گام ۹. برگشت به گام ۴ در صورت برآورده نشده شرط توقف؛

گام ۱۰. گزارش جواب‌های پارتو.

نمایش جواب		$X = [۱, ۲, ۱, ۳]$
تقاطع	والد ۱:	$X_۱ = [۲, ۱, ۲, ۱]$
	والد ۲:	$X_۲ = [۱, ۲, ۳, ۲]$
	بردار تصادفی:	$Y = [۰, ۱, ۱, ۰]$
	فرزند ۱:	$N_۱ = [۱, ۱, ۲, ۲]$
	فرزند ۲:	$N_۲ = [۲, ۲, ۳, ۱]$
جهش	جواب:	$X_۳ = [۱, ۲, ۱, ۳]$
	بردار تصادفی:	$Z = [۰, ۱, ۰, ۰]$
	جواب با جهش:	$N_۳ = [۱, ۳, ۱, ۳]$

شکل ۴. نمایش جواب، عملگر تقاطع و جهش در NSGA II.

۲.۴. رویه شبیه‌سازی مونت‌کارلو

با توجه به رویه الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای محاسبه توابع هدف در گام‌های ۲ و ۵ باید از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شود که رویه آن به‌شرح ذیل است:

ورودی ها: ترکیب انجام فعالیت‌ها، تعداد تکرار شبیه‌سازی (N)؛

گام ۱. قرار دهید: $Cost = ۰$ و $T = []$ و $Dem = ۰$؛

حلقه: به ازای $n = ۱, ۲, \ldots, N$؛

گام ۲. تولید تقاضای روزانه تصادفی برای ۵ روز هفته با توجه به تابع توزیع تقاضای روزانه؛

گام ۳. محاسبه تقاضای تجمیعی دوره (D_n)؛

گام ۴. تعیین پارامتر زمان با توجه به D_n و ترکیب انجام فعالیت‌ها (در صورت نیاز تولید زمان تصادفی)؛

گام ۵. محاسبات مدت زمان بین ثبت سفارش و تحویل مشتریان با توجه به زمان انتظار آنها و ذخیره آنها در بردار T_n؛

گام ۶. محاسبات مجموع هزینه‌ها و ذخیره آن در C_n؛

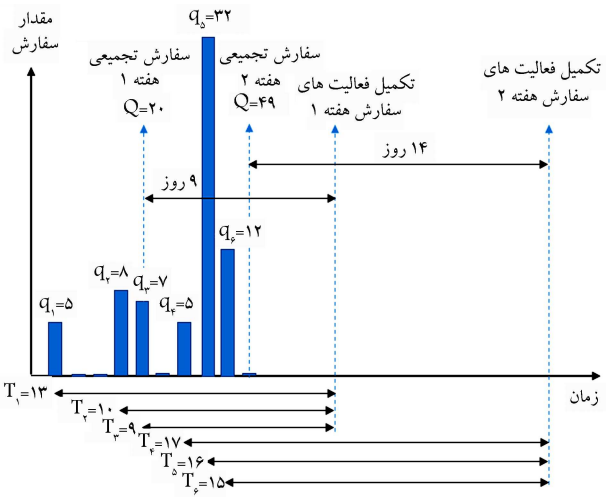
گام ۷. قدم $Dem = Dem + D_n$، $Cost = Cost + C_n$ و $T = [T; T_n]$؛

اتمام حلقه

گام ۸. هزینه هر محصول = نسبت Cost به Dem؛

گام ۹. سطح سرویس = درصدی از درایه‌های T که $T \leq L$.

برای روشن شدن مراحل شبیه‌سازی به‌مثال زیر توجه کنید: جواب $X = [۱, ۱, ۱, ۱]$ را برای مسئله مطالعه موردی در نظر بگیرید که در آن هر یک از فعالیت‌های C، D، E و F با حالت ۱ انجام می‌شوند. تعداد تکرارهای شبیه‌سازی را نیز برابر ۱۰۰۰۰ در نظر بگیرید. در قدم اول متغیرها مقداردهی اولیه می‌شوند. بنابراین برای یکی از تکرارهای شبیه‌سازی (یک دوره یا هفته)، قدم‌های ۲ تا ۷ باید انجام شود: در قدم ۲، تقاضای روزانه بصورت تصادفی برای روزهای یکشنبه، دوشنبه، سه شنبه، چهارشنبه و شنبه با توجه به تابع توزیع تقاضا تولید می‌شود. فرض کنید تقاضا به‌ترتیب برابر ۵، ۰، ۰، ۸ و ۷ باشد. در قدم ۳، سفارش تجمیعی هفتگی برابر ۲۰ محاسبه می‌شود و در روز شنبه فعالیت C شروع می‌شود. در قدم ۴، با توجه به جدول ۲ و مقدار تقاضای تجمیعی ۲۰ که در بازه دوم است، زمان فعالیت C برابر ۱ روز بوده و زمان



شکل ۵. فرایند ورود سفارشات روزانه، تجمیع سفارشات هفتگی و محاسبات زمان تحویل برای دو هفته.

هر یک از فعالیت‌های D، E و F یکنواخت در بازه (۳و۲) است. فرض کنید برای این سفارش زمان این فعالیت‌ها به‌ترتیب برابر ۱، ۳، ۲ و ۳ باشد. در قدم ۵، زمان اتمام فعالیت‌ها برای سفارش تجمیع شده برابر ۹ روز محاسبه می‌شود. توجه شود که فاصله زمانی ثبت سفارش هر مشتری تا تجمیع آن در روز شنبه نیز باید در محاسبه لحاظ شود. این زمان برای مشتری اول، دوم و سوم به‌ترتیب برابر ۴، ۱ و ۰ روز کاری است، بنابراین، مدت زمان صدور سفارش تا تحویل محصول برای این مشتریان به‌ترتیب برابر ۱۳، ۱۰ و ۹ خواهد بود. این مقادیر در بردار $T_n = [۱۳, ۱۰, ۹]$ ذخیره می‌شود. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است و توضیحات مربوط به هفته اول آن و محاسبات زمانی و هزینه در اینجا ارائه شده است.

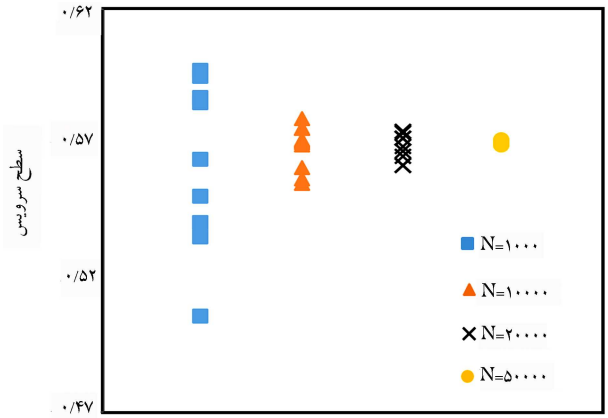
در قدم ۶، توجه به جدول ۲ و مقدار تقاضای تجمیعی ۲۰، هزینه متغیر برای فعالیت‌های C، D، E و F به‌ترتیب برابر ۱۹۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۷۰ است که مجموع آنها برای ۲۰ محصول برابر $۲۰ \times (۱۹۵۰ + ۲۰۰ + ۳۰۰ + ۷۰) = ۵۰۴۰۰$ می‌شود. هزینه ثابت این فعالیت‌ها نیز به‌ترتیب برابر ۲۰۰، ۳۰۰، ۰ و ۳۰۰ با مجموع ۸۰۰ است. مجموع هزینه‌های این سفارش در $C_n = ۵۱۲۰۰$ ذخیره می‌شود. در قدم ۷، متغیرهای اصلی برای هفته اول به‌صورت ذیل مقداردهی می‌شوند $Dem = ۲۰$، $Cost = ۵۱۲۰۰$ و $T = [۱۳, ۱۰, ۹]$.

قدم‌های ۲ تا ۷ به‌ازای ۱۰۰۰۰ بار تکرار می‌شود و متغیرهای اصلی بروزرسانی می‌شوند. در تکرار آخر، مقادیر متغیرها به‌صورت $Dem = ۲۸۵۶۰۰$ و $Cost =$ ۶/۴۶× به‌دست می‌آید و بردار T شامل ۸۳۰۰ درایه است. به‌عبارت دیگر ۸۳۰۰ مشتری ثبت سفارش کرده‌اند و مجموعا ۲۸۵۶۰۰ محصول سفارش داده شده است. در قدم ۸، هزینه ۲۲۶۲ هزار تومان به‌ازای واحد محصول محاسبه می‌شود. در قدم ۹ نیز با بررسی مشخص می‌شود ۴۷۳۰ درایه از ۸۳۰۰ درایه‌ی بردار T حداکثر برابر $L = ۲۰$ است و سطح سرویس برابر ۵۷ درصد محاسبه می‌شود.

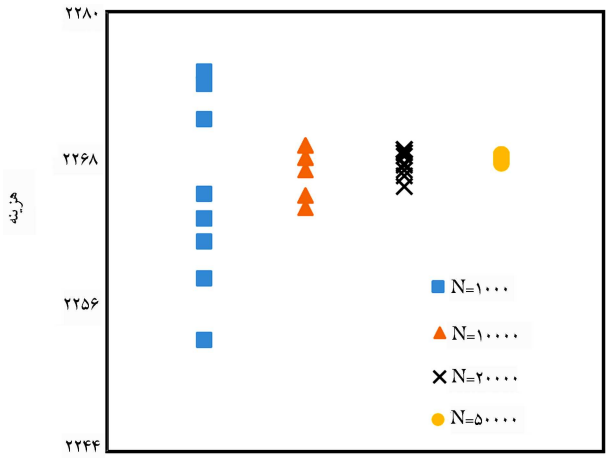
۵. نتایج محاسباتی

۱.۵. انتخاب تعداد تکرار شبیه‌سازی

با توجه به تصادفی بودن مقدار تقاضا و مدت زمان انجام هر فعالیت، تعداد تکرارهای شبیه‌سازی (N) باید مقداری انتخاب شود که خطای قابل قبولی داشته باشد. در



شکل ۶. مقادیر سطح سرویس در ۱۰ بار اجرای شبیه‌سازی به‌ازای تعداد تکرارهای مختلف.



شکل ۷. مقادیر هزینه در ۱۰ بار اجرای شبیه‌سازی به‌ازای تعداد تکرارهای مختلف.

اینجا هر تکرار، نشان‌دهنده هر هفته شبیه‌سازی شده است. برای انتخاب مقدار N، ۴ مقدار ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ در نظرگرفته شده‌اند. برای هر مقدار فوق، رویه شبیه‌سازی ۱۰ بار اجرا شد و هزینه و سطح سرویس محاسبه شدند. نتایج در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش تعداد تکرارهای شبیه‌سازی، تغییرات مقادیر سطح سرویس و هزینه کاهش پیدا می‌کند و یک مقدار همگرا می‌شود. جدول ۳ خلاصه نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای هر مقدار N، مقدار بیشترین، کمترین و میانگین ۱۰ اجرا برای سطح سرویس و هزینه محاسبه شده است. ردیف آخر نیز مقدار خطا را به‌صورت درصدی نشان می‌دهد که برابر است با اختلاف بیشترین و کمترین مقدار تقسیم بر میانگین ۱۰ اجرا. همانطورکه از نتایج مشخص است، مقدار خطا برای تعداد تکرارهای ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ بالا است ولی به‌ازای تعداد تکرار ۵۰۰۰۰ خطای سطح سرویس و هزینه به‌ترتیب برابر ۰/۳۲ و ۰/۰۳ است که خطای قابل قبولی است.

۲.۵. تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA II

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، مرتب‌سازی نامغلوب از روش تاگوچی استفاده شده است. این روش از نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای تخمین بهترین مقادیر پارامترها استفاده می‌کند. پارامترهای الگوریتم که باید تنظیم شوند، عبارتند از: اندازه جمعیت (Pop)، نرخ تقاطع (P_c)، نرخ جهش (P_m) و تعداد تکرارها (It). این

جدول ۳. نتایج اجرای شبیه‌سازی به‌ازای تعداد تکرارهای مختلف.

n		بیشترین	کمترین	میانگین	خطا ٪
۱۰۰۰	هزینه	۲۲۷۵	۲۲۷۵	۲۲۵۳	۲۲۶۵/۷	۱
	سطح سرویس	۰/۵۹۶۸	۰/۵۰۴۸	۰/۵۵۹۳	۱۶/۴
۱۰۰۰۰	هزینه	۲۲۶۹	۲۲۶۴	۲۲۶۷/۲	۰/۲
	سطح سرویس	۰/۵۷۸۹	۰/۵۵۵۰	۰/۵۶۸۳	۴/۲
۲۰۰۰۰	هزینه	۲۲۶۸/۷	۲۲۶۵/۷	۲۲۶۷/۶	۰/۱
	سطح سرویس	۰/۵۷۴۴	۰/۵۶۱۳	۰/۵۶۹۰	۲/۳
۵۰۰۰۰	هزینه	۲۲۶۸/۲	۲۲۶۷/۵	۲۲۶۷/۸	۰/۰۳
	سطح سرویس	۰/۵۷۰۵	۰/۵۶۸۷	۰/۵۶۹۷	۰/۳۲

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم و سطوح آنها.

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه جمعیت (Pop)	۲۵	۵۰	۷۵
تعداد تکرارها (It)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰
نرخ تقاطع (Pc)	۰/۶	۰/۷	۰/۸
نرخ جهش (Pm)	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲

پارامترها به‌همراه سطوح آنها مطابق جدول ۴، با توجه به آرایه اورتوگونال $L^{۹}$ برای طراحی آزمایش در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به دوهدفه بودن مسئله، شاخص های مختلفی برای ارزیابی جواب‌ها در ادبیات پیشنهاد شده‌اند که در اینجا از شاخص‌های تعداد جواب‌های پارتو (NPS)، فاصله از ایده‌آل (D) و گوناگونی (S) استفاده می‌شود. فاصله از ایده‌آل برابر است با میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده‌آل. مقدار ایده‌آل برای هر تابع هدف برابر با بهترین مقدار به‌دست آمده در تمامی آزمایش‌ها است. گوناگونی نیز وسعت جواب‌های پارتو را می‌سنجد. فاصله از ایده‌آل و گوناگونی به‌ترتیب در روابط ۱ و ۲ تعریف شده‌اند.

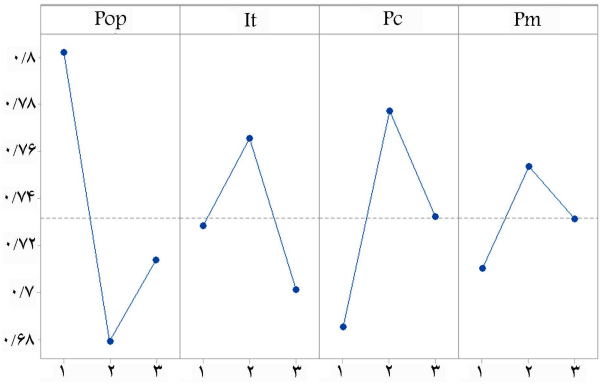
$$D = \frac{۱}{n}\sum_{i=۱}^{n}\sqrt{\sum_{j}\left(\frac{f_j^i - f_j^{best}}{f_{j,total}^{\max} - f_{j,total}^{\min}}\right)^{۲}} \qquad (۱)$$

$$S = \sqrt{\sum_{j}\left(\frac{f_j^{\max} - f_j^{\min}}{f_{j,total}^{\max} - f_{j,total}^{\min}}\right)^{۲}} \qquad (۲)$$

که در آن n برابر تعداد نقاط پارتو، i اندیس نقاط پارتو، j اندیس تابع هدف، f_j^{best}، $f_j^{\max}$ و $f_j^{\min}$ به‌ترتیب برابر مقدار ایده‌آل، مقدار تابع هدف، بیشترین و کمترین مقادیر تابع هدف jام در جواب مورد بررسی، $f_{j,total}^{\max}$ و $f_{j,total}^{\min}$ به‌ترتیب برابر بیشترین و کمترین مقادیر تابع هدف j در بین تمام آزمایش‌ها است. برای تنظیم پارامترها، ابتدا برای هر آزمایش، شاخص‌های فوق محاسبه می‌شوند. با توجه به‌اینکه مقادیر بیشتر برای شاخص‌های تعداد جواب‌های پارتو و گوناگونی و مقادیر کمتر فاصله از ایده‌آل مطلوب‌تر هستند، برای تجمیع آنها از روش مجموع وزنی ساده (SAW) استفاده می‌شود. جدول ۵ نتایج الگوریتم را روی آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که به‌ازای سطوح مختلف پارامترها شاخص‌های تعداد جواب‌های پارتو، گوناگونی و فاصله گزارش شده‌اند. همچنین، با در نظر گرفتن وزن یکسان برای شاخص‌ها، در ستون آخر نیز پس از بی‌مقیاس‌سازی، امتیاز نهایی آنها با روش مجموع وزنی ساده محاسبه شده است.

جدول ۵. مقادیر شاخص ها و امتیاز نهایی آنها با روش SAW برای آزمایشات مختلف.

Pop	It	Pc	pm	NPS	S	D	SAW
۱	۱	۱	۱	۷	۰/۹۲	۰/۴۲	۰/۷۳۱
۱	۲	۲	۲	۱۱	۱/۱۱	۰/۴۲	۰/۹۰۴
۱	۳	۳	۳	۹	۰/۹۹	۰/۴۹	۰/۷۷۲
۲	۱	۲	۳	۶	۱/۲۳	۰/۵۵	۰/۷۲۱
۲	۲	۳	۱	۷	۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۶۹۲
۲	۳	۱	۲	۶	۱/۰۸	۰/۷۶	۰/۶۲۴
۳	۱	۳	۲	۹	۰/۹۱	۰/۵۳	۰/۷۳۳
۳	۲	۱	۳	۸	۱/۰۵	۰/۶۵	۰/۷۰۱
۳	۳	۲	۱	۵	۰/۸۲	۰/۳۴	۰/۷۰۷



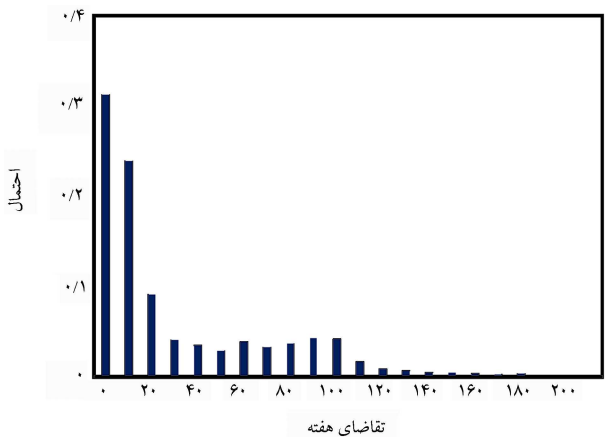
شکل ۸. مقادیر میانگین نسبت S/N برای سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم.

در شکل ۸ نیز مقادیر میانگین نسبت S/N برای سطوح پارامترهای الگوریتم نشان داده شده است که با توجه به این شکل سطح اول اندازه جمعیت و سطح دوم پارامترهای تعداد تکرار، نرخ تقاطع و نرخ جهش به‌عنوان مقادیر بهینه انتخاب می‌شوند. بنابراین، مقادیر پارامترها به‌صورت زیر مقداردهی می‌شوند: اندازه جمعیت برابر ۲۵، تعداد تکرار برابر ۶۰۰، نرخ تقاطع برابر ۰/۷ و نرخ جهش برابر ۰/۱۵.

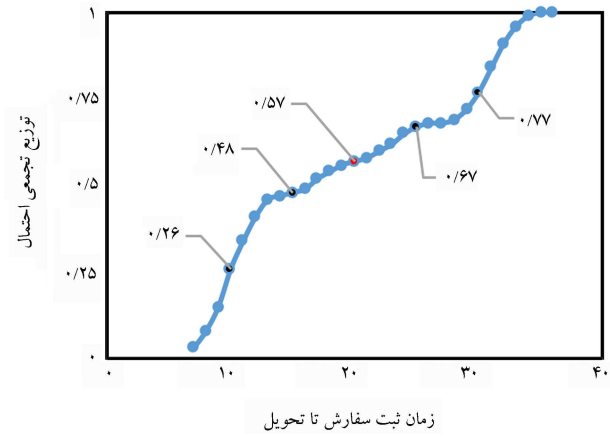
۳.۵. نتایج تفصیلی جواب

در این بخش، نتایج حل مسئله برای حالتی که تمام فعالیت‌ها در حالت استاندارد انجام می‌شوند، ارائه می‌شود. شبیه‌سازی برای ۵۰۰۰۰ هفته انجام شده است. ($N = ۵۰۰۰۰$) میانگین و انحراف معیار تقاضای هفتگی در داده‌های شبیه‌سازی شده به‌ترتیب برابر ۲۸/۵۵ و ۴۰/۱ است. شکل ۹ هیستوگرام تقاضای هفتگی را نشان می‌دهد که در ۳۱ درصد موارد (۱۵۶۵۰ هفته) تقاضای هفتگی برابر صفر بوده است، به‌عبارت دیگر در ۳۴۳۵۰ هفته تقاضای هفتگی مثبت بوده است و مجموعا ۴۱۵۴۷ سفارش مستقل ثبت شده است. بیشترین مقدار تقاضای هفتگی در بازه ۱ تا ۱۰ است که در ۲۴ درصد موارد (۱۱۹۶۰ هفته) رخ داده است.

مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر $۳/۲۳۷ \times ۱۰^{۹}$ و مجموع تقاضا ۱۴۲۷۹۸۱ بوده است که میانگین هزینه برای هر محصول ۲۲۶۶/۸ به‌دست می‌آید. نتایج زمان صدور سفارش تا تحویل محصول نشان می‌دهد که میانگین و انحراف معیار آن به‌ترتیب برابر ۱۹/۳ و ۹/۵ روز و کمترین و بیشترین مقدار آن به‌ترتیب ۷ و



شکل ۹. توزیع تقاضای هفتگی در شبیه سازی (تمام فعالیت‌ها در حالت استاندارد).



شکل ۱۰. تابع توزیع تجمعی احتمال برای زمان صدور سفارش تا تحویل (تمام فعالیت‌ها در حالت استاندارد).

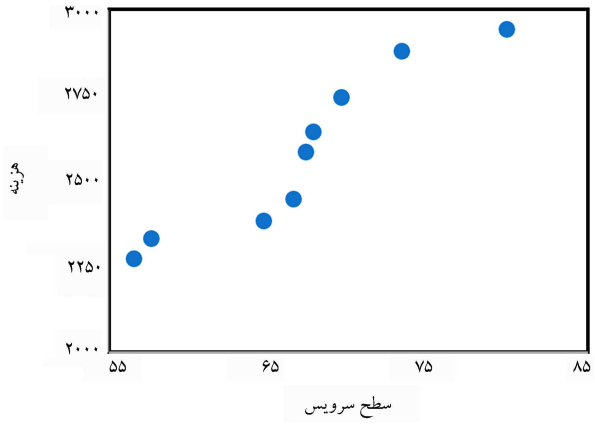
۳۶ است. شکل ۱۰ تابع توزیع تجمعی احتمال را برای زمان صدور سفارش تا تحویل نشان می‌دهد: ۲۶ درصد سفارشات در حداکثر ۱۰ روز تحویل داده شده‌اند. همچنین ۴۸ درصد در حداکثر ۱۵ روز، ۵۷ درصد در حداکثر ۲۰ روز، ۶۷ درصد در حداکثر ۲۵ روز، ۷۷ درصد در حداکثر ۳۰ روز و ۱۰۰ درصد سفارشات در ۳۶ روز تحویل مشتریان شده‌اند. با توجه به‌اینکه حداکثر زمان تحویل در مسئله برابر ۲۰ روز در نظرگرفته شده است، سطح سرویس مورد نظر برابر ۵۷ درصد خواهد بود که در شکل ۱۰ با رنگ قرمز نشان داده شده است.

۴.۵. موازنه هزینه ـ سطح سرویس

در این بخش نتایج حل مسئله با رویکرد شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که این مسئله دارای ۶ فعالیت است که ۲ فعالیت آن دارای ۱ حالت و ۴ فعالیت آن در ۲ حالت مختلف قابل انجام هستند. الگوریتم پیشنهادی روی داده‌های مسئله اجرا شد و در شبیه‌سازی به‌ازای هر یک از جواب‌ها، میانگین هزینه و داده‌های مرتبط با مدت زمان صدور سفارش تا تحویل به‌دست آمدند. سپس درصد سفارشاتی که در زمان حداکثر ۲۰ روزه تحویل مشتریان شدند به‌عنوان سطح سرویس محاسبه گردید. پس از اجرای شبیه‌سازی برای هر یک از ۱۶ جواب، ۷ جواب توسط جواب‌های دیگر مغلوب شدند و در نهایت ۹ جواب پارتو شناسایی شد که در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. جواب‌های پارتوی حاصل از نتایج شبیه‌سازی ـ بهینه سازی.

شماره جواب	جواب $[C, D, E, F]$	هزینه	سطح سرویس
۱	[۱, ۱, ۱, ۱]	۲۲۶۷	۵۶/۷
۲	[۱, ۱, ۱, ۲]	۲۳۲۷	۵۷/۸
۳	[۱, ۲, ۱, ۱]	۲۳۸۱	۶۴/۸
۴	[۱, ۲, ۱, ۲]	۲۴۴۱	۶۶/۷
۵	[۲, ۲, ۱, ۱]	۲۵۷۹	۶۷/۵
۶	[۲, ۲, ۱, ۲]	۲۶۳۹	۶۷/۹
۷	[۱, ۲, ۲, ۲]	۲۷۳۷	۶۹/۷
۸	[۲, ۲, ۲, ۱]	۲۸۷۵	۷۳/۵
۹	[۲, ۲, ۲, ۲]	۲۹۳۵	۸۰



شکل ۱۱. جواب‌های پارتوی مسئله.

شکل ۱۱ نیز مرز پارتوی حاصل از این ۹ جواب را به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد.

مدیریت تمایل دارد تا تعیین شود با حداکثر ۱۰ درصد افزایش هزینه، هر محصول به چه سطح سرویسی می‌توان دست یافت؟ در وضعیت فعلی متوسط هزینه ۲۲۶۷ هزار تومان برای هر محصول است و افزایش ۱۰ درصدی در آن معادل حداکثر هزینه ۲۴۹۴ هزار تومانی است. مطابق با جدول ۶، جوابی که بیشترین سطح سرویس را داشته باشد و هزینه آن کمتر از ۲۴۹۴ باشد، جواب شماره ۴ است که سطح سرویس ۶۶/۷ درصدی دارد. با مقایسه این جواب با جواب شماره ۱ مشخص می‌شود که جواب جدید ۷/۷ درصد افزایش هزینه در بردارد. بطور خلاصه می‌توان گفت با افزایش ۷/۷ درصدی در هزینه هر محصول می‌توان سطح سرویس را از ۵۶/۷ به ۶۶/۷ درصد رساند. در صورت انتخاب این جواب، فعالیت‌های خرید مواد اولیه و ارسال آن به مونتاژکار (C) و کنترل کیفیت و ورود به انبار محصول (E) مشابه با وضعیت فعلی در حالت استاندارد باید انجام شود. در حالی‌که فعالیت‌های مونتاژ محصولات توسط پیمانکار و ارسال آن به کارفرما (D) و بسته‌بندی محصول و ارسال آن به خریدار (F) باید در حالت سریع انجام شوند. در وضعیت فعلی فعالیت‌ها با حالت استاندارد انجام می‌شوند که با توجه به جواب شماره ۱ جدول ۶ منجر به سطح سرویس ۵۶/۷ درصدی برای شرکت می‌شود و بطور متوسط هزینه ۲۲۶۷ هزار تومانی برای هر محصول دارد. در صورتی‌که مدیریت بخواهد سطح سرویس خود را به حدود ۷۰ درصد افزایش دهد، جواب شماره ۷ این شرط را دارد که سطح سرویس آن ۶۹/۷ است و هزینه هر واحد محصول در مقایسه با وضعیت

فعلی (جواب شماره ۱) به میزان ۲۰٫۷ درصد افزایش می‌یابد. در صورت انتخاب این جواب، فعالیت خرید مواد اولیه و ارسال آن به مونتاژکار (C) مشابه با وضعیت فعلی در حالت استاندارد باید انجام شود. در شرایطی‌که ۳ فعالیت دیگر شامل مونتاژ توسط پیمانکار و ارسال به کارفرما (D)، کنترل کیفیت و ورود به انبار محصول (E) و بسته‌بندی محصول و ارسال آن به خریدار (F) باید در حالت سریع انجام شوند.

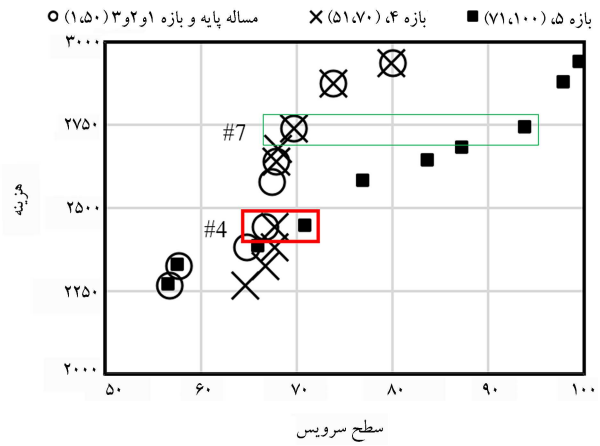
۵.۵. تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت جواب‌ها، نسبت به کاهش زمان بازه‌های تقاضای هفتگی انجام می‌شود که مطابق با جدول ۲، پنج بازه وجود دارد. مدیریت تمایل دارد تعیین کند سطح سرویس نسبت به کاهش زمان کدام یک از بازه‌ها حساسیت بیشتری دارد تا فشرده‌سازی زمان آن بازه را در دستور کار خود قرار دهد. لازم به توضیح است که در این تحلیل هزینه فشرده‌سازی به‌صورت مستقیم در تولید جواب‌ها در نظر گرفته نمی‌شود ولی در انتها روی مقدار هزینه فشرده‌سازی بحث می‌شود. در طی این تحلیل دو سوال اصلی تحقیق مدنظر قرارگرفته و تغییرات در پاسخ به آنها بررسی می‌شود: ۱. بیشترین سطح سرویس ممکن با حداکثر ۱۰ درصد افزایش هزینه چقدر است؟ ۲. درصد افزایش هزینه برای سطح سرویس ۷۰ درصد چقدر است؟ یادآوری می‌شود در مسئله پایه، پاسخ سوال اول ۶۷٫۷ درصد توسط جواب ۴ در جدول ۶ و پاسخ سوال دوم ۲۰٫۷ درصد توسط جواب شماره ۷ در جدول ۶ به‌دست آمده است.

برای انجام تحلیل، به‌ازای هر یک از پنج بازه تعریف شده فعالیت‌ها در جدول ۲، زمان حالت استاندارد و زمان حالت سریع ۱ واحد زمانی کاهش داده می‌شود. البته این نکته باید ذکر شود که برای فعالیت‌هایی که در جدول ۲، زمان ۱ روز کاری در نظر گرفته شده است، حداقل زمان لازم برای فعالیت است و قابل کاهش نیست. بنابراین، الف) فعالیت‌هایی که زمان قطعی ۱ روزکاری دارند، بدون تغییر باقی می‌مانند. ب) فعالیت‌هایی که به‌صورت یکنواخت در بازه $U\{a,b\}$ انجام می‌شوند و $a>1$ است، با در نظرگرفتن کاهش ۱ روزکاری در بازه $U\{a-1,b-1\}$ انجام می‌شوند. ج) فعالیت‌هایی که به‌صورت یکنواخت در بازه $U\{a,b\}$ انجام می‌شوند و $a=1$ است، با در نظرگرفتن کاهش ۱ روزکاری در بازه $U\{1,b-1\}$ انجام می‌شوند. مسئله در ۵ حالت مختلف بررسی شده است که عبارتند از: فشرده سازی زمان استاندارد و سریع فعالیت‌ها برای تقاضاهای در بازه ۵ − ۱، ۱ − ۶، ۳۱ − ۵۰، ۵۱ − ۷۰ و ۱۰۰ − ۷۱ به‌عنوان مثال برای تقاضاهای در بازه ۳۰ − ۶، با توجه به جدول ۲ و مطابق نکات فوق‌الذکر در حالت فشرده‌سازی، فعالیت C در حالت استاندارد و سریع با زمان ۱ روز و ۳ فعالیت دیگر در حالت استاندارد با زمان $U\{1,2\}$ و سریع با زمان ۱ روز انجام خواهند شد.

شکل ۱۲ نتایج تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد که در آن سه مجموعه پارتو مشخص شده است. مرز پارتوی با نماد «O»، مربوط به داده‌های مسئله پایه است. فشرده‌سازی زمان مربوط به بازه‌های اول، دوم و سوم (تقاضای هفتگی در بازه ۱ تا ۵۰) تغییری در سطح سرویس مسئله ایجاد نمی‌کند بنابراین، مرز پارتوی مربوط به این حالت‌ها مشابه مرز پارتوی مسئله پایه است. نکته قابل توجه اینکه قطعا کاهش زمان نیاز به هزینه دارد. اعمال چنین هزینه‌ای برای کاهش زمان برای تقاضای هفتگی در بازه ۱ تا ۵۰، در نهایت منجر به تغییری در سطح سرویس نمی‌شود. بنابراین، فشرده‌سازی در این بازه‌ها مقرون به‌صرفه نبوده و پاسخ دو سوال اصلی تحقیق تغییری نخواهد کرد.

مرز پارتوی با نماد «×»، مربوط به فشرده‌سازی زمان بازه چهارم (تقاضای



شکل ۱۲. نتایج تحلیل حساسیت جواب‌ها نسبت به فشرده‌سازی زمان بازه‌های تقاضا.

هفتگی در بازه ۵۱ تا ۷۰) است. این فشرده‌سازی منجر به بهبود سطح سرویس برای جواب‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ از جدول ۶ شده است که قبلا سطح سرویس پایین‌تری داشتند و با فشرده‌سازی زمان نیز سطح سرویس آنها حداکثر به ۶۷ درصد رسیده است که معادل با جواب شماره ۴ مسئله پایه است. برای سایر جواب‌ها، تغییری در سطح سرویس مشاهده نمی‌شود. بنابراین، فشرده‌سازی زمان بازه چهارم نیز پاسخ سوالات اصلی تحقیق را تغییر نمی‌دهد.

همچنین نماد «ν» نشان دهنده مرز پارتوی مرتبط با فشرده‌سازی بازه پنجم است. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، سطح سرویس جواب‌های شماره ۱ و ۲ تغییری نکرده است. سطح سرویس جواب‌های دیگر افزایش پیدا کرده است که این افزایش برای برخی جواب‌ها چشمگیر است، به‌عنوان مثال برای جواب‌های شماره ۷ و ۸ افزایش ۲۴ درصدی در سطح سرویس رخ داده است.

در شکل ۱۲ مستطیل قرمز، جواب شماره ۴ را در حالت پایه، فشرده‌سازی بازه چهارم و بازه پنجم نشان می‌دهد. سطح سرویس در حالت پایه برابر ۶۶٫۷ است که با فشرده‌سازی زمان بازه چهارم به ۶۷٫۷ و با فشرده‌سازی زمان بازه پنجم به ۷۱ درصد می‌رسد. همچنین مستطیل سبز جواب شماره ۷ را نشان می‌دهد که سطح سرویس آن با فشرده‌سازی زمان بازه چهارم تغییری نکرده است ولی با فشرده‌سازی زمان بازه پنجم به ۹۴ درصد رسیده است.

همانطور که مشخص است، نتایج نسبت به فشرده‌سازی زمان بازه پنجم حساسیت زیادی نشان داده است و جواب هر دو سوال ممکن است دچار تغییراتی شود. با توجه به سوال ۱ افزایش هزینه ۱۰ درصدی معادل هزینه ۲۴۹۴ هزار تومانی است که در مسئله پایه، حداکثر سطح سرویس ممکن ۶۶٫۷ درصد با هزینه ۲۴۴۱ به‌دست آمد. بنابراین، با فشرده‌سازی بازه پنجم امکان رسیدن به سطح سرویس ۷۱ درصدی وجود دارد، البته در صورتی‌که هزینه فشرده‌سازی به‌ازای هر واحد محصول کمتر از ۵۳ = ۲۴۹۴ − ۲۴۴۱ باشد.

در پاسخ به سوال ۲ نیز مبنی بر اینکه حداقل هزینه لازم برای رسیدن به سطح سرویس ۷۰ درصدی چقدر است، در مسئله پایه هزینه ۲۷۳۷ هزار تومانی حاصل شد که منجر به افزایش هزینه ۲۰٫۷ درصدی می‌شود. بسته به هزینه فشرده‌سازی بازه پنجم جواب‌های بهتری نیز ممکن است وجود داشته باشد و پاسخ سوال ۲ دچار تغییراتی شود. به‌عنوان مثال اگر هزینه فشرده‌سازی ۱۲۰ هزار تومان به‌ازای هر محصول باشد، با هزینه ۲۵۶۱ = ۱۲۰ + ۲۴۴۱ هزار تومان در جواب شماره ۴ می‌توان به سطح سرویس ۷۱ درصد رسید که نسبت به وضعیت موجود شرکت

(۲۲۶۷ هزار تومان)، افزایش هزینه‌ای معادل با ۱۳ درصد دارد. با این تحلیل حتی در صورتی‌که هزینه فشرده‌سازی کمتر از ۲۹۵ = ۲۴۴۱ − ۲۷۳۷ هزار تومان باشد، با هزینه‌ای کمتر نسبت به مسئله پایه به سطح سرویس بالای ۷۰ درصد می‌توان دست پیدا کرد.

۶.۵. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

اعتبارسنجی، فرآیندی است برای بررسی اینکه آیا مدل شبیه‌سازی نمایش خوبی از سیستم واقعی است یا خیر. برای اعتبارسنجی مدل، رویکرد سه مرحله‌ای شامل ۱ اعتبارسنجی صوری، ۲ اعتبارسنجی مفروضات مدل و ۳ مقایسه ورودی ـ خروجی مدل شبیه‌سازی با ورودی ـ خروجی سیستم واقعی انجام شده است.

- در مرحله اول، اعتبار صوری مدل با توجه به افراد خبره مورد بررسی قرار گرفت که خروجی را از نظر معقول بودن بررسی کنند و ایرادات و نواقص احتمالی را شناسایی کنند. به این منظور مدل در حالت استاندارد همه فعالیت‌ها مدنظر قرار گرفت تا حساسیت آن با توجه به ورودی‌های مختلف از جمله تغییر در زمان و هزینه فعالیت‌ها بررسی شود. نتایج نشان داد که با توجه به میزان تغییرات در پارامترهای مسئله، جواب‌های مدل شبیه‌سازی با جواب‌های مورد انتظار مطابقت داشته و معقول هستند.
- در مرحله دوم، مفروضات مدل شامل مفروضات ساختاری و مفروضات داده اعتبارسنجی شدند. به این منظور مفروضاتی مانند تجمیع هفتگی سفارشات و توزیع آماری داده‌ها بررسی شدند و با توجه به نحوه عملکرد مدل شبیه‌سازی و مقایسه آن با سیستم واقعی، عملکرد مدل، توسط افراد خبره مورد تایید قرار گرفت؛
- در مرحله سوم نیز خروجی مدل شبیه‌سازی با واقعیت برای دو حالت مقایسه شد. ابتدا وضعیت فعلی شرکت در نظرگرفته شد که معادل با جواب شماره ۱ در جدول ۶ است. میانگین هزینه هر محصول و سطح سرویس با خروجی مدل شبیه‌سازی در وضعیتی که همه فعالیت‌ها در حالت استاندارد هستند، مقایسه شد. در واقعیت با توجه به داده‌های یک سال اخیر (۵۲ هفته) هزینه و سطح سرویس به‌ترتیب برابر ۲۲۶۰ و ۰٫۵۴۱ است. برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، مدل نیز به‌ازای ۳۰ سال (۳۰ تکرار ۵۲ هفته‌ای) اجرا شد. با توجه به ۳۰ داده به‌دست آمده از شبیه‌سازی، میانگین و انحراف معیار هزینه برابر ۲۲۶۵/۷ و ۲۶٫۹۶ است، فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای میانگین هزینه جامعه با توجه به رابطه $\bar{X} \pm Z_{۰/۲۵} S/\sqrt{N}$ به‌صورت (۲۲۷۵٫۴، ۲۲۵۶) حاصل می‌شود. بطور مشابه، میانگین و انحراف معیار سطح سرویس برابر ۰٫۵۶۵ و ۰٫۰۹۸ است، فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای میانگین سطح سرویس جامعه نیز به‌صورت (۲۷۷۰، ۲۷۲۷٫۲) و (۰٫۷۶۳، ۰٫۶۴۷) خواهد شد. همانطور که مشخص است، فواصل اطمینان ۹۵ درصدی شامل میانگین واقعی هزینه و سطح سرویس می‌شود. همچنین رویه مشابهی برای جواب شماره ۷ در جدول ۶ انجام شد. در این جواب سه فعالیت D، E و F در حالت سریع و بقیه فعالیت‌ها در حالت استاندارد انجام می‌شوند. با توجه به اینکه مدت زیادی از پیاده‌سازی این جواب در واقعیت نمی‌گذرد، صرفا داده‌های مربوط به ۱۵ هفته در دسترس است که هزینه و سطح سرویس به‌ترتیب برابر ۲۷۴۴ و ۰٫۷۰۳ است. در اینجا نیز برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، مدل به ازای ۳۰ تکرار ۱۵ هفته‌ای اجرا شد و بطور مشابه فواصل اطمینان ۹۵ درصدی به‌ترتیب برای هزینه و سطح سرویس به‌صورت (۲۷۷۰، ۲۷۲۷٫۲) و (۰٫۷۶۳، ۰٫۶۴۷) محاسبه شد. همانطور که مشخص است، در اینجا نیز فواصل اطمینان ۹۵ درصدی شامل میانگین واقعی هزینه و سطح سرویس می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

تعیین بهترین ترکیب حالت‌های انجام فعالیت‌ها در مدت زمان بین ثبت سفارش و تحویل محصول می‌تواند منجر به کاهش این زمان و بهبود سطح سرویس شود. در مساله مطالعه شده در این مقاله ورود مشتریان، مقدار تقاضای آنها و زمان انجام فعالیت‌ها به‌صورت تصادفی در نظرگرفته شد که استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای تحلیل آن میسر نبود. بنابراین، از یک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو در بطن الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای شناسایی جواب‌های پارتو استفاده شد. در پاسخ به دو سوال اصلی تحقیق، پس از اجرای الگوریتم در نهایت ۹ جواب پارتو برای مساله شناسایی شدند و با بررسی آنها مشخص شد که با افزایش ۷٫۷ درصدی در هزینه هر محصول می‌توان سطح سرویس را از ۵۶٫۷ به ۶۶٫۷ درصد رساند. همچنین برای رسیدن به سطح سرویس تقریبا ۷۰ درصدی، هزینه هر محصول ۲۰٫۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. نتایج تحلیل، حساسیت روی بازه‌های تقاضا نیز نشان داد که سطح سرویس نسبت به فشرده‌سازی زمان سفارشات در بازه ۷۱ تا ۱۰۰ حساسیت زیادی دارد و جواب هر دو سوال تحقیق ممکن است دچار تغییراتی شود. بنابراین تصمیم‌گیرنده می‌تواند روی کاهش زمان آن بازه تمرکز کند.

برای توسعه تحقیق، می‌توان اثر در نظرگرفتن موجودی اطمینان را روی نتایج بررسی کرد که نیازمند لحاظ کردن هزینه‌های نگهداری است. همچنین در مساله مورد بررسی، تجمیع سفارشات به‌صورت زمانی بود و صرفا در یک روز خاصی از هفته انجام می‌شد. با توجه به حساسیت سطح سرویس به بازه سفارشات بین ۷۱ تا ۱۰۰، در صورتی که فشرده‌سازی زمان این بازه امکان‌پذیر نباشد و یا هزینه بالایی داشته باشد، می‌توان اثر تجمیع مقداری را مورد بررسی قرار داد. به این‌صورت که هر زمانی که مجموع سفارشات به‌عنوان مثال به حداقل $a = ۶۰$ رسید، سفارشات تجمیع شوند. این اقدام باعث کاهش سفارشات تجمیعی در بازه فوق‌الذکر شده و در نهایت منجر به بهبود سطح سرویس می‌شود. البته باید مقدار صحیحی برای پارامتر a انتخاب شود و هزینه‌های تجمیع مقداری در محاسبات در نظرگرفته شود.

پانوشت‌ها

1. Responsiveness
2. Goodwill
3. Lead Time

منابع (References)

1. Höller, S.J., Özsen, R. and Thonemann, U.W., 2020. Determining optimal parameters for expediting policies under service level constraints. *European Journal of Operational Research*, *281*(2), pp.274-285.

https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.028.

2. Chen, F.Y. and Krass, D., 2001. Inventory models with minimal service level constraints. *European Journal of Operational Research*, 10.1016/S0377-2217(00)00243-5. *134*(1), pp.120-140. https://doi.org/

3. Zipkin, P., 1986. Inventory service-level measures: Convexity and approximation. *Management Science*, *32*(8), pp.975-981. https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.975.

4. Miranda, P.A. and Garrido, R.A., 2009. Inventory service-level optimization within distribution network design problem. *International Journal of Production Economics*, *122*(1), pp.276-285. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.010.

5. Jha, J.K. and Shanker, K., 2014. An integrated inventory problem with transportation in a divergent supply chain under service level constraint. *Journal of Manufacturing Systems*, *33*(4), pp.462-475. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.04.002.

6. Alaei, S. and Setak, M., 2015. Multi objective coordination of a supply chain with routing and service level consideration. *International Journal of Production Economics*, *167*, pp.271-281. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.002.

7. Escalona, P., Angulo, A., Weston, J., Stegmaier, R. and Kauak, I., 2019. On the effect of two popular service-level measures on the design of a critical level policy for fast-moving items. *Computers & Operations Research*, *107*, pp.107-126. https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.011.

8. Sawik, T., 2014. Optimization of cost and service level in the presence of supply chain disruption risks: Single vs. multiple sourcing. *Computers & Operations Research*, *51*, pp.11-20. https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.04.006.

9. Orlis, C., Laganá, D., Dullaert, W. and Vigo, D., 2020. Distribution with quality of service considerations: The capacitated routing problem with profits and service level requirements. *Omega*, *93*, p.102034. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.02.003.

10. Candas, M.F. and Kutanoglu, E., 2020. Integrated location and inventory planning in service parts logistics with customer-based service levels. *European Journal of Operational Research*, *285*(1), pp.279-295. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.058.

11. Tsai, S.C. and Zheng, Y.X., 2013. A simulation optimization approach for a two-echelon inventory system with service level constraints. *European Journal of Operational Research*, *229*(2), pp.364-374. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.010.

12. Tsai, S.C. and Liu, C.H., 2015. A simulation-based decision support system for a multi-echelon inventory problem with service level constraints. *Computers & Operations Research*, *53*, pp.118-127. https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.018.

13. Ouyang, L.Y. and Wu, K.S., 1997. Mixture inventory model involving variable lead time with a service level constraint. *Computers & Operations Research*, *24*(9), pp.875-882. https://doi.org/10.1016/S0305-0548(96)00084-6.

14. Tersine, R.J., 1994. Principles of Inventory and Materials Management. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1994.

15. Jha, J.K. and Shanker, K., 2009. Two-echelon supply chain inventory model with controllable lead time and service level constraint. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(3), pp.1096-1104. https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.018.

16. Ye, F. and Xu, X., 2010. Cost allocation model for optimizing supply chain inventory with controllable lead time. *Computers & Industrial Engineering*, *59*(1), pp.93-99. https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.003.

17. Li, Y., Xu, X. and Ye, F., 2011. Supply chain coordination model with controllable lead time and service level constraint. *Computers & Industrial Engineering*, *61*(3), pp.858-864. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.05.019.

18. Li, Y., Xu, X., Zhao, X., Yeung, J.H.Y. and Ye, F., 2012. Supply chain coordination with controllable lead time and asymmetric information. *European Journal of Operational Research*, *217*(1), pp.108-119. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.003.

19. Bhuniya, S., Pareek, S. and Sarkar, B., 2021. A supply chain model with service level constraints and strategies under uncertainty. *Alexandria Engineering Journal*, *60*(6), pp.6035-6052. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.039.

20. Malik, A.I., Sarkar, B., Iqbal, M.W., Ullah, M., Khan, I. and Ramzan, M.B., 2023. Coordination supply chain management in flexible production system and service level constraint: A Nash bargaining model. *Computers & Industrial Engineering*, *177*, p.109002. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109002.

21. Yadav, D., Singh, S.R., Kumar, S. and Cárdenas-Barrón, L.E., 2022. Manufacturer-retailer integrated inventory model with controllable lead time and service level constraint under the effect of learning-forgetting in setup cost. *Scientia Iranica*, *29*(2), pp.800-815. https://doi.org/10.24200/sci.2022.52236.2612.

22. Algharbi, I. 2021. Simulation based optimization for multi-echelon pharmaceutical supply chain under customer service level constraint (Doctoral dissertation, The George Washington University).

23. Kumar, M., Kumar, R.S. and Saha, A.K., 2022. Continuous review inventory system for intuitionistic fuzzy random demand under service level constraint. *Sâdhanâ*, *47*(2), p.103. https://doi.org/10.1007/s12046-022-01869-4.

24. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(2), pp.182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017.