



طراحی مدل بهینه بازیافت در زنجیره تأمین چهار سطحی حلقه بسته به وسیله تئوری صف و برنامه ریزی استوار (مطالعه موردی صنعت کاغذ)

مهدی علیزاده برمی

گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Email: mahdi2496@yahoo.com

محمدعلی افشار کاظمی (نویسنده مسؤول)

گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Email: m_afsharkazemi@iauec.ac.ir

محمد علی کرامتی

گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

عباس طلوعی اشلقی

گروه مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

چکیده

در سال‌های اخیر رقابت‌های صنعتی و اقتصادی، مباحث زیست محیطی و فشار دولت‌ها بر تولیدکنندگان برای مدیریت پسماند محصولات و از طرفی سود ناشی از بازیافت محصولات، اهمیت طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته را دوچندان کرده است. تحقیق موردنظر در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چهار سطحی در شرایط عدم قطعیت درصد بازیافت محصولات انجام می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است که به منظور حداقل سازی هزینه‌های زنجیره تأمین و زمان خدمت دهی به مشتریان تحت شرایط عدم قطعیت ایجاد می‌شود. این مدل شبکه تأمین با در نظر گرفتن تئوری صف و بهینه‌سازی سیستم بازیافت محصولات طراحی می‌شود. یکی از نکات مهم تحقیق، مدل سازی عدم قطعیت در میزان بازگشت محصولات مصرفی به چرخه زنجیره تأمین حلقه بسته است. این تحلیل به منظور ایجاد یک رهیافت استوار برای مدل سازی مساله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتها، عملکرد مدل پیشنهادی در صنعت تولید کاغذ ارزیابی می‌شود و یک تحلیل حساسیت با توجه به متغیرهای تصمیم بین دو الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی چندهدفه و الگوریتم ژنتیک مرتب سازی مغلوب ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم های فراابتکاری چندهدفه، برنامه ریزی استوار، برنامه ریزی خطی مختلط، زنجیره تأمین حلقه بسته، تئوری صف.

۱- مقدمه

رقابت در بازارها و ابزارهای جدید در بهبود روند تجارت، تاثیر عمیقی بر کسب و کارها گذاشته است. برای کاهش هزینه‌ها و ماندن در بازار رقابتی، باید کلیه فرصتهای بالقوه برای کاهش هزینه‌ها را پیدا کرد. یکی از این گزینه‌ها که زمینه‌های فراوانی برای کاهش هزینه در آن وجود دارد، زنجیره تأمین است. یک زنجیره تأمین شامل همه مراحل است (اعضای زنجیره) که چه مستقیم و چه غیر مستقیم، در فراهم سازی درخواست‌های یک مشتری نقش دارند (Dzwigol et al., 2020).

از طرفی، با توجه به قوانین پیچیده زیست محیطی و مباحث اقتصادی-تجاری، محبوبیت زنجیره تأمین حلقه بسته و تمرکز بر آن در قرن حاضر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. از طرفی، کوتاه شدن چرخه عمر محصول نسبت به قبل و افزایش تصاعدی مصرف محصولات و کمبود مواد خام در دنیا، بر قیمت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. از این رو، بازیافت محصولات استفاده شده و ساخت مجدد آنها، به یک گزینه رایج در کشورها تبدیل شده است. تولید مجدد و بازآفرینی محصولات، درآمدهای مناسب و رشد اقتصادی و همچنین مشوق‌های زیست محیطی را برای سازندگان محصولات، به همراه دارد (Marić & Opazo-Basáez, 2019).

ارزش اقتصاد بازیافت برای صنعت اروپا در سال ۲۰۱۶، ۱۱۱ میلیارد دلار برآورد شده است. علاوه بر این، مفاهیم «اقتصاد حلقه ای»، تا جایی که ممکن است، حفظ ارزش محصولات، مواد و منابع را در اقتصاد ترویج می‌کند که به معنای تولید مجدد بیشتر و ضایعات کمتر است (Jang et al., 2020).

همچنین، بازیافت و تولید مجدد، فرصت‌های شغلی بسیاری را در کشورهای مختلف ایجاد کرده است. ایالات متحده بزرگترین تولید کننده، مصرف کننده و صادرکننده محصولات بازتولید شده در جهان است. در گزارش سال ۲۰۱۲، کمیسیون تجارت بین‌الملل ایالات متحده تصریح کرد که ارزش بازیابی محصولات صنعتی ایالات متحده برای سال ۲۰۱۱، ۴۳ میلیارد دلار بوده که حدود ۱۸۰۰۰۰ شغل تمام وقت ایجاد کرده است (Laili et al., 2022).

از طرفی، هزینه تولید محصولات بازسازی شده معمولاً تنها حدود ۵۰ درصد از تولید محصولات جدید است که حدود ۶۰ درصد انرژی و ۷۰ درصد از مواد را حفظ می‌کند. یادآوری می‌شود که تولید مجدد می‌تواند نسبت به تولید سنتی رشد سریع به سودآوری نیز داشته باشد (Bundschuh et al., 2021).

ذکر این نکته ضروری است که در هر زنجیره تأمین دو نوع جریان برای مواد و محصولات وجود دارد. زنجیره تأمین پیشرو که جریان رو به جلو مواد است و حرکت محصولات را در یک شبکه تعیین می‌کند. در این نوع زنجیره تأمین پس از تأمین مواد اولیه، محصولات میانی و نهایی از طریق گذر از مراکز مختلف زنجیره تأمین تولید و در نهایت محصولات نهایی توسط مراکز توزیع به مشتریان تحویل داده می‌شود. همچنین جریان معکوس محصولات از مشتریان به مراکز زنجیره تأمین وجود دارد که در تحقیقات اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. لجستیک معکوس توضیح می‌دهد که محصولات می‌توانند به جای آنکه دور انداخته شوند، از مشتریان بازگردانده شوند بازیافت شوند، استفاده مجدد شوند یا دوباره ساخته شوند. در شبکه طراحی شده در این مقاله، علاوه بر در نظر گرفتن جریان رو به جلو مواد از تأمین کننده به سیستم تولید و سپس به مرکز توزیع و مشتریان، لجستیک معکوس در طراحی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن بازگشت محصولات از مشتریان و تولیدکننده، به مرکز جمع‌آوری برای انتقال به مرکز بازیافت بررسی می‌شود. در واقع، با در نظر گرفتن همزمان لجستیک پیشرو و معکوس، یک زنجیره تأمین حلقه بسته در مقاله ارائه شده است (Valizadeh et al., 2020).

در مدل ارائه شده، با استفاده از مرور ادبیات مساله، در نکات زیر به شکاف تحقیق می‌پردازیم. ابتدا یک سیستم صف برای زنجیره تأمین کالا با ملاحظات لجستیک معکوس به شکلی جامع تر از تحقیقات قبلی به کار گرفته شده و نگرش متفاوتی نسبت به زنجیره معکوس برای کاهش هزینه‌ها در نظر گرفته شده است. در این نگرش، با تمرکز بر بازگشت محصول از سمت مشتریان و تولید کننده‌ها، سیستم صف واقع بینانه‌ای برای کالاهای برگشتی توسعه داده شده است. این سیستم صف، منطبق بر کانال‌های ارتباطی مساله است و هدف از آن، کاهش زمان انتظار محصولات بازگشتی، در سیستم بازیافت، با در نظر گرفتن

بهینگی هزینه هاست. به همین منظور، تابع هدف مساله، به طور همزمان بر هزینه‌ها و بر زمان بازیافت، متمرکز است (Soon et al., 2022).

تئوری صف یک تئوری ریاضی برای کانال‌های انتظار نهادها (اعم از افراد، کالاها و...) می‌باشد. به طور کلی تئوری صف به دنبال استفاده از مدل سازی ریاضی و تجزیه و تحلیل سیستمی است که بتواند به نحو مطلوب به تقاضاهای تصادفی، خدمت رسانی کند. یک تئوری صف به طور کلی بیانگر دو مطلب است:

۱- موقعیت فیزیکی سیستم، از طریق مشخص کردن تعداد و آرایش خدمت دهندگان که به مشتریان سرویس می‌دهند
 ۲- ماهیت تقاضا، که می‌توان از طریق متغیر گرفتن فرایند ورود به سیستم و همچنین نحوه سرویس‌دهی به مشتریان، آنرا مشخص کرد (Wierzbicka, 2020).

یکی از کاربردهای تئوری صف در مدل سازی شبکه زنجیره تأمین، تخمین زمان پاسخ گویی در این شبکه است که از طریق پیدا کردن کوتاهترین مسیر بتوان به این مهم دست پیدا کرد (Chin et al., 2020).

در واقع از این مدل در این تحقیق، برای پاسخ به سوالات زیر استفاده شده است:

- طراحی بهینه، هر کدام از بخش‌های زنجیره تأمین، به چه شکل است؟
- کدام ساختار در سیستم بازیافت، تحت شرایط درصد بازیافت، بهترین عملکرد را دارد؟
- زمان انتظار در سیستم بازیافت، برای هر کالا چقدر است؟

۲- روش شناسی پژوهش

الف) پیشینه نظری

رقابت شدید در کسب و کارها در سال‌های اخیر، برخورداری از زنجیره تأمین کارا و بهینه را به یک فاکتور کلیدی تبدیل کرده است. به طور سنتی، سازمان‌ها بر کاهش هزینه تولید به واسطه تولید انبوه تمرکز داشته است و تا اوایل دهه ۸۰ میلادی، رهبری هزینه در تولید، از اولویت‌های مورد توجه برنامه ریزان و مدیران در یک سیستم صنعتی نبود. در دهه ۹۰ میلادی، زمان خدمت دهی، به عنوان یک عامل استراتژیک بین رقبا مطرح شد، که نتیجه این تغییر تمرکز، شناسایی راه‌ها برای کاهش زمان تولید بود و از این زمان، نظریه‌های صف، مورد توجه محققان حوزه صنعت قرار گرفت و تجزیه و تحلیل زمان مصرف شده در سیستم تولیدی به طور طبیعی باعث افزایش علاقه به علم پویای شبکه‌های صف شد.

به طور کلی تئوری صف به دنبال استفاده از مدل سازی ریاضی و تجزیه و تحلیل سیستمی است که بتواند به نحو مطلوب به تقاضاهای تصادفی خدمت رسانی کند. یک تئوری صف به طور کلی بیانگر دو مطلب است: ۱- موقعیت فیزیکی سیستم، از طریق مشخص کردن تعداد و آرایش خدمت دهندگان که به مشتریان سرویس می‌دهند و ۲- ماهیت تقاضا، که می‌توان از طریق متغیر گرفتن فرایند ورود به سیستم و همچنین نحوه سرویس دهی به مشتریان، آنرا مشخص کرد (Askin & Hanumantha, 2018).

در مرور ادبیات این حوزه، ابتدای کاربرد تحلیلی صف در صنعت بر مبنای تئوری شبکه صف از سال ۱۹۵۰ بوده است، اما به دلیل پیچیدگی‌های خاص این علم، در آن زمان چندان مورد توجه قرار نگرفت. در سال ۱۹۷۰ محققان به کاربرد یک شاخه از سیستم‌های خودکار که سیستم‌های صنعتی انعطاف پذیر نامیده می‌شد، پی بردند. آنها اثبات کردند که مزیت‌های تحلیلی صف بیشتر از دیگر مدل هاست، اما استفاده از مدل‌های صف، همچنان در صنعت محدود باقی ماند. در سال ۱۹۸۰، راه حل‌های جدیدی برای مدل‌ها، بر مبنای روشهای «تجزیه گره»^۱ ارائه شد (Zhang et al., 2021).

ب) پیشینه تجربی

¹ Node decomposition

(Viswanadham & Raghavan, 2001) در پژوهش خود با عنوان «مدل سازی عملکرد زنجیره تامین به وسیله شبکه های صف» چنین بیان داشتند که شبکه های زنجیره تامین از ترکیب عوامل موثر بر یکدیگر در میان شرکت ها تشکیل شده است که هدفشان تولید و تحویل محصولات به مشتریان در زمان و مکان بخصوص می باشد. در این پژوهش آنها مدل های تجزیه و تحلیلی برای ارزیابی زنجیره های تامین ارائه می دهند.

(Seydanlou et al., 2022) مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین بسته را در صنعت زیتون در کشور مورد بررسی قرار داده اند و آن را به عنوان یک مسئله پیچیده در زمینه مدیریت پایدار منابع در نظر گرفتند. آنها الگوریتم های فراابتکاری را معرفی و مورد استفاده قرار داده و به طراحی شبکه زنجیره تامین با در نظر گرفتن چندین هدف به صورت همزمان پرداختند. این الگوریتم ها به تجزیه و تحلیل تصمیم های متناقض میان اهداف مختلف در زمینه های مختلف از زنجیره تامین کمک می کنند تا راهکارهای بهینه برای بهبود پایداری و عملکرد زنجیره تامین ارائه شود.

(Jouyban et al., 2018) مدلی را برای مکان یابی مراکز تولید دارویی در زنجیره تامین ارائه دادند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت تلاش بر کمینه کردن همزمان زمان تحویل و کاهش هزینه ها پرداختند.

(mahmoodi & Pouyan far, 2020) به طراحی زنجیره تامین برای مواد فساد پذیر پرداخته اند و به دلیل پیچیدگی مدل ابتدا یک مدل مفهومی ارائه داده اند و برای رسیدن به جواب بهینه از یکی از جدیدترین الگوریتم های فراابتکاری الگوریتم گرگ خاکستری^۲ استفاده کرده اند. و کارایی الگوریتم را در برخورد با سایر روش ها همانند الگوریتم ژنتیک^۳ مورد بررسی قرار داده اند.

(Ding et al., 2021) در مقاله تحت عنوان «ساختار سلسله مراتبی یک زنجیره تامین سبز» بیان نمودند که از دهه های گذشته، چالش های زیست محیطی به دلیل آلودگی و هزینه های تولید افزایش یافته است. برای توسعه پایدار، یک زنجیره تامین سبز فرآیند زیست محیطی پایدار را در زنجیره تامین سنتی ادغام می کند، هزینه تولید را کاهش می دهد، رشد اقتصادی را تحریک می کند و مسائل زیست محیطی را حل می کند. بنابراین، کاوش در طراحی امکان پذیر سیستم های زنجیره تامین سبز به یک نیاز ضروری برای صنعت و سازمان های تجاری تبدیل می شود. با این حال، سیستم زنجیره تامین سبز معمولاً سیستم های مختلفی را که در حال حاضر توسط شرکت کنندگان زنجیره تامین مورد استفاده قرار می گیرد، ادغام می کند. طراحی چنین سیستمی در مقیاس بزرگ از طریق رویکردهای مبتنی بر شبیه سازی رویداد گسسته مرسوم بسیار پرهزینه است. علاوه بر این، روش مدل سازی رسمی (به عنوان مثال شبکه های پتری)، به عنوان یک رویکرد جایگزین، پشتیبانی رسمی و کارآمدی را برای ایجاد و تحلیل مدل فراهم می کند. با این حال، شبکه های پتری نمی توانند به مدل سازی ترکیبی دست یابند، به ویژه برای سیستم های مقیاس بزرگ و پیچیده، به عنوان مثال، سیستم زنجیره تامین سبز. برای بهبود ترکیب بندی، این مقاله یک تکنیک مدل سازی ترکیبی را برای ادغام ویژگی ترکیبی در شبکه های پتری با ترکیب با جبر فرآیندی به دلیل قابلیت برتر آن در مدل سازی ترکیبی پیشنهاد می کند. تکنیک ترکیبی در ابتدا از مدل سازی با شبکه های پتری پشتیبانی می کند. ماتریس بروز مدل های شبکه های پتری را مرتب می کند تا رابطه نگاشت بین شبکه های پتری و جبر فرآیندی ارزیابی عملکرد را باز یابی کند، که ساختار ترکیبی مدل های شبکه پتری را نشان می دهد.

(Devika et al., 2014) به مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پرداخته و روش های بهینه سازی چند هدفه را برای این مسئله ارائه دادند. و در انتها الگوریتم ابتکاری خود را در این زمینه ارائه دادند. هدف از این مقاله ارائه یک رویکرد فراابتکاری جدید برای طراحی مسئله شبکه زنجیره تامین چند هدفه است. الگوریتم پیشنهادی سه رویکرد مختلف را ترکیب می کند. نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم پیشنهادی در مورد مسائل زنجیره تامین کوچک و متوسط با الگوریتم دقیق قابل مقایسه است. این مقاله به محققان و مدیران زنجیره تامین حلقه بسته اطلاعات ارزشمندی در زمینه بهینه سازی چند هدفه و طراحی شبکه های پایدار ارائه می دهد و می تواند به تصمیم گیری های بهبودی در این حوزه کمک کند.

(Aliahmadi et al., 2023) در مقاله تحت عنوان «تصمیمات قیمت گذاری در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن سیستم صف در مراکز تولید» بیان داشتند که یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند لایه با در نظر گرفتن تصمیمات

² Gray wolf algorithm

³ Genetic algorithm

قیمت‌گذاری و سیستم صف تحت عدم قطعیت مدل‌سازی می‌شود. هدف مدل ریاضی به حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص تحت پارامترهای نامشخص تقاضای بالقوه و هزینه‌های حمل و نقل است. بنابراین حساسیت تقاضای واقعی بر تصمیمات قیمت‌گذاری محصولات نهایی و برگشتی در شبکه زنجیره تأمین است. برای کنترل پارامترهای عدم قطعیت از روش بهینه‌سازی مقاوم-فازی انعطاف‌پذیر و برای حل مسئله از چهار الگوریتم G-HHO, PSO, ALO و GWO استفاده شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف نسبی بین نتایج کمتر از ۵ درصد است و الگوریتم G-HHO پیشنهادی بیشترین کارایی را در حل مسائل نمونه بزرگ دارد.

نخستین موارد به کارگیری توابع چند تابع هدف در سیستم موجودی زنجیره تأمین و موعد تحویل که به نوعی با تأخیر تحویل سفارشات سیستم صف ایجاد می‌شود به تحقیقات (Chang et al., 2006) باز می‌گردد. آن‌ها ترکیبی برای مسئله ترتیب سفارشات در موجودی زنجیره تأمین با تأخیر قابل کنترل و کاهش هزینه سفارش‌دهی ارائه دادند و دو تابع هدف مرتبط با موجودی و هزینه سفارش‌دهی در نظر گرفته برای مساله خود در نظر گرفتند.

(Alinezhad et al., 2015) مقاله ای تحت عنوان بهینه‌سازی مسأله ترکیبی موجودی صف در شرایط عدم اطمینان ارائه دادند که در آن یک سیستم موجودی-صف با سیاست کنترل موجودی پیوسته و ورود گروهی مشتریان در نظر گرفته شد و با وابسته کردن تقاضا به قیمت محصولات به نوعی به عدم قطعیت در تقاضا پرداخت و دو هدف خود یعنی کاهش قیمت تمام شده و افزایش سود سیستم موجودی تحت عدم قطعیت تقاضای محصولات خود را بررسی نمودند.

(Rezaee Nik & Asadi Zeidabadi, 2023) به ارزیابی دو الگوریتم ابتکاری در مدل زنجیره تأمین چند هدفه خود پرداختند، آنها به بررسی تأثیر تغییرات پارامترها و شرایط مختلف بر طراحی زنجیره تأمین پرداخته و سپس کیفیت جواب و زمان حل آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و جهت اتخاذ تصمیم از میان پاسخ‌های پارتو از شاخص ارزیابی عملکرد و روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. این مقاله به مدیران زنجیره تأمین ابزارها و روش‌های مفهومی ارائه می‌دهد تا بتوانند طراحی زنجیره تأمین خود را با در نظر گرفتن حساسیت به متغیرها و شرایط مختلف بهبود دهند.

(Mohtashami et al., 2020) در مقاله تحت عنوان «طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با استفاده از سیستم صف برای کاهش اثرات زیست محیطی و مصرف انرژی» بیان داشتند که با توجه به افزایش اثرات زیست محیطی و نقش مهم آنها در زندگی انسان، اخیراً کاهش اثرات ناشی از انسان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. زنجیره تأمین سبز یکی از موثرترین موضوعات مرتبط با اثرات زیست محیطی است و افزایش تعداد مطالعات در این زمینه این نظر را تأیید می‌کند. کاهش اثرات زیست محیطی که توسط ناوگان حمل‌ونقل ایجاد می‌شود، از این منظر، به طور جامع در زنجیره‌های تأمین لجستیک پیشرو و معکوس بررسی نشده است. برای رفع این شکاف، در این مقاله یک زنجیره تأمین سبز با ملاحظات لجستیکی رو به جلو و معکوس طراحی شده و از سیستم صف برای بهینه‌سازی حمل و نقل و زمان انتظار شبکه ناوگان حمل و نقل استفاده شده است. فرض بر این است که تعداد کافی سرور در مراکز تخلیه موجود است، بنابراین هیچ صفی در آنجا وجود نخواهد داشت. مدل پیشنهادی اثرات زیست محیطی ایجاد شده و مصرف انرژی ناوگان حمل و نقل را با تعیین نرخ بارگیری، تخلیه و تولید کاهش می‌دهد که بر زمان انتظار و حمل و نقل تأثیر می‌گذارد.

(Bathae et al., 2023) به مطالعه تأثیر نظریه صف در بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها در مسائل مسیریابی زنجیره تأمین پرداخته‌اند. آن‌ها عدم اطمینان در تقاضا را در مسئله خود در نظر گرفته‌اند و به کاهش هزینه‌های حمل و نقل و ارتباط آن با کاهش آلاینده‌ها در زنجیره تأمین خود پرداختند و نشان دادند که چگونه این رویکرد می‌تواند به شرکت‌ها کمک کند تا بهبود کارکرد زنجیره تأمین خود بپردازند.

(Baghizadeh et al., 2022) در مقاله تحت عنوان «طراحی شبکه زنجیره تأمین کشاورزی پایدار با در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی-غذا با استفاده از سیستم صف: یک برنامه ریزی ترکیبی قوی احتمالی» بیان نمودند که با توجه به ماهیت صنایع کشاورزی و غذایی، مدیریت تولید، ذخیره‌سازی، حمل و نقل، دفع زباله و اثرات زیست محیطی تولید آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مقابله با مسائل پایداری مرتبط با زنجیره تأمین آنها، یک مدل ریاضی برای طراحی یک زنجیره تأمین پایدار

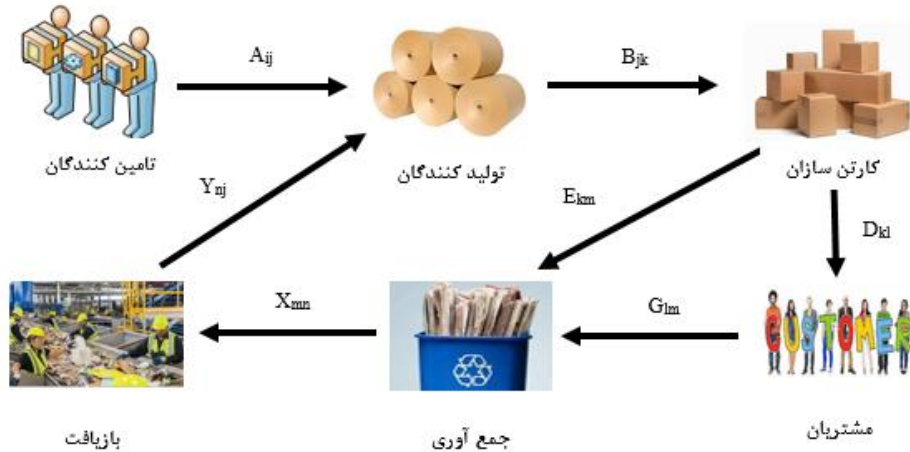
محصول کشاورزی بسیار فاسد شدنی (توت فرنگی) پیشنهاد شده است. این مدل یک برنامه ریاضی چندمنظوره و چند محصولی است که اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در نظر می‌گیرد تا تمام جنبه‌های پایداری را پوشش دهد. علاوه بر این، یک سیستم صف G/M/S/M برای حمل و نقل محصولات برداشت شده بین تأسیسات برای اولین بار توسعه داده شده است. بر اساس تحلیل‌ها، تجهیز گلخانه‌ها به سیستم آبیاری قطره‌ای و استفاده از پنل‌های خورشیدی در گلخانه‌ها به ترتیب بیشترین تأثیر را در بهبود همه عملکردهای هدف دارند.

در تحقیق حاضر، تلاش برای نوآوری در حوزه زنجیره تامین کاغذ انجام شده و این امر به عنوان یک دستاورد مهم این تحقیق مطرح می‌شود. برای اولین بار، مسئله موجودی صف در این زنجیره تامین مورد تجزیه و تحلیل دقیق و جامعی قرار گرفته است. از دیگر نوآوری‌های این تحقیق، استفاده همزمان از دو الگوریتم حل جهت مقایسه و ارزیابی بهترین راهکارها در مواجهه با این مسئله است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت نیز به عنوان یک ابزار موثر برای تفهیم عوامل کلیدی و تاثیرگذار در مسئله مورد مطالعه قرار گرفته و به بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی کمک می‌کند. این تحقیق در ارتقاء بهره‌وری و بهبود عملکرد زنجیره تامین کاغذ نقش مهمی ایفا می‌کند و از اهمیت بالایی برخوردار است.

جدول شماره (۱): مروری بر پیشینه تجربی

مطالعه	نوع مقاله		تابع هدف		مدل بررسی شده		روش حل	
	مروری	پژوهشی	تک تابع هدفه	چند تابع هدفه	مدلسازی زنجیره تامین	مدلسازی سیستم صف	دقیق	ابتکاری
ویزواندهام و راغوان (۲۰۰۱)	*	*	*	*	*	*	*	*
چانگ و همکاران (۲۰۰۳)	*	*	*	*	*	*	*	*
داویکا و همکاران (۲۰۱۴)	*	*	*	*	*	*	*	*
علینژاد و همکاران (۲۰۱۵)	*	*	*	*	*	*	*	*
جوییان و همکاران (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	*	*
محمودی و پویان فر (۲۰۲۰)	*	*	*	*	*	*	*	*
محتشمی و همکاران (۲۰۲۰)	*	*	*	*	*	*	*	*
دینگ و همکاران (۲۰۲۱)	*	*	*	*	*	*	*	*
صیدانلو و همکاران (۲۰۲۲)	*	*	*	*	*	*	*	*
باقی زاده و همکارانش (۲۰۲۲)	*	*	*	*	*	*	*	*
علی احمدی و همکاران (۲۰۲۳)	*	*	*	*	*	*	*	*
رضایی نیک و اسدی زیدآبادی (۲۰۲۳)	*	*	*	*	*	*	*	*
بطهایی و همکاران (۲۰۲۳)	*	*	*	*	*	*	*	*

در این مساله بر طبق شکل شماره ۱، یکی از کاربردی ترین مسائل زنجیره تأمین یعنی مربوط به زنجیره تأمین و مصرف کاغذ آورده شده است که هدف زنجیره تأمین کاهش هزینه های وارده بر سیستم می باشد.



شکل شماره (۱): زنجیره تأمین مورد مطالعه

الف) فرضیات مسئله

- هزینه سفارش در نظر گرفته نشده است
- محدودیت حمل و نقل وجود ندارد
- از مدت زمان حمل و نقل، چشم پوشی شده است
- درصد ضایعات کارت، ثابت و مشخص در نظر گرفته شده است
- از کمبود و هزینه های مربوط به آن صرف نظر شده است

ب) اندیس ها

- I: مجموعه تأمین کنندگان مواد اولیه $i \in \{1, \dots, I\}$
- J: مجموعه تولید کنندگان کاغذ $j \in \{1, \dots, J\}$
- K: مجموعه سازندگان کارت $k \in \{1, \dots, K\}$
- L: مجموعه مشتریان $l \in \{1, \dots, L\}$
- M: مجموعه مراکز جمع آوری $m \in \{1, \dots, M\}$
- N: مجموعه دستگاه های بازیافتی بالقوه $n \in \{1, \dots, N\}$
- P1: مجموعه نوع مواد اولیه $p1 \in \{1, \dots, P1\}$
- P2: مجموعه نوع کاغذ $p2 \in \{1, \dots, P2\}$
- P3: مجموعه نوع کارت $p3 \in \{1, \dots, P3\}$
- T: دوره های زمانی $t \in \{1, \dots, T\}$

ج) پارامترها

- F_n : هزینه ثابت نصب دستگاه بازیافت n ام در مرکز بازیافت
- $TrSP_{ijp1}$: هزینه واحد حمل و نقل بین تأمین کننده i ام و تولید کننده کاغذ j به ازای واحد ماده اولیه P1 ام
- $TrPM_{jkp2}$: هزینه واحد حمل و نقل بین تولید کننده کاغذ j ام و سازنده کارت k ام به ازای واحد کاغذ P2 ام
- $TrMC_{klp3}$: هزینه واحد حمل و نقل بین سازنده کارت k ام و مشتری l ام به ازای واحد محصول P3 ام

- $TrMG_{kmp3}$: هزینه واحد حمل و نقل بین سازنده کارتن k ام و مرکز جمع آوری m ام به ازای واحد محصول $P3$ ام
- $TrCG_{lmp3}$: هزینه واحد حمل و نقل بین مشتری l ام و مرکز جمع آوری m ام به ازای واحد محصول $P3$ ام
- $TrGR_{mp3}$: هزینه واحد حمل و نقل بین مرکز جمع آوری m ام و بازیافت کننده به ازای واحد محصول $P3$ ام
- $TrRP_{jp1}$: هزینه واحد حمل و نقل بین بازیافت کننده و مرکز تولید j ام به ازای واحد ماده اولیه $P1$ ام
- hp_{jp2} : هزینه نگهداری کاغذ نوع $P2$ در یک دوره زمانی در تولید کننده کاغذ j ام
- hm_{kp3} : هزینه نگهداری کارتن نوع $P3$ در یک دوره زمانی در سازنده کارتن k ام
- hc_{lp3} : هزینه نگهداری واحد کارتن $p3$ ام در یک دوره زمانی در مشتری l ام
- $CAPS_{ip1}$: ظرفیت تامین تأمین کننده i برای ماده اولیه $P1$
- $CAPP_{jp2}$: ظرفیت تولید مرکز تولید j برای کاغذ $P2$
- $CAPM_{kp3}$: ظرفیت تولید سازنده k برای محصول نهایی $P3$
- $CAPG_{mp3}$: ظرفیت مرکز جمع آوری m برای جمع آوری محصول $P3$
- $DEMClp3$: تقاضای مشتری l برای محصول نهایی $P3$ در هر دوره
- λ_{1p1p2} : ضریب تبدیل ماده اولیه $P1$ به کاغذ $P2$
- λ_{2p2p3} : ضریب تبدیل کاغذ $P2$ به محصول نهایی $P3$
- λ_{3p3p1} : ضریب بازیافت محصول نهایی $P3$ به ماده اولیه $P1$
- α_{lp3} : درصد محصول $P3$ برای مشتری l که به زنجیره تأمین بر نمی گردد
- β_{p3} : درصد محصول $P3$ از مرکز بازیافت که به زنجیره تأمین باز نمی گردد

(د) متغیرهای تصمیم

- Zn : متغیر صفر و یک اگر در مرکز بازیافت، دستگاه بازیافت n ایجاد شود، یک و در غیر این صورت صفر است.
- A_{ijp1t} : مقدار ماده اولیه $P1$ ام جابه جاشده از تأمین کننده i ام به تولید کننده کاغذ j ام در دوره t ام
- B_{jkp2t} : مقدار کاغذ $P2$ ام جابه جاشده از تولید کننده کاغذ j ام به سازنده کارتن k ام در دوره t ام
- D_{klp3t} : مقدار محصول $P3$ ام جابه جاشده از سازنده کارتن k ام به مشتری l ام در دوره t ام
- E_{kmp3t} : مقدار محصول $P3$ ام جابه جاشده از سازنده کارتن k ام به مرکز جمع آوری m ام در دوره t ام
- G_{lmp3t} : مقدار محصول $P3$ ام جابه جاشده از مشتری l ام به مرکز جمع آوری m ام در دوره t ام
- X_{mp3t} : مقدار محصول $P3$ ام جابه جاشده از مرکز جمع آوری m ام به مرکز بازیافت در دوره t ام
- Y_{jp1t} : مقدار ماده اولیه $P1$ ام جابه جاشده از مرکز بازیافت به تولید کننده j ام در دوره t ام
- $INVP_{jp2t}$: موجودی کاغذ نوع $P2$ ام در تولید کننده کاغذ j ام در دوره t ام
- $INVM_{kp3t}$: موجودی محصول $P3$ ام در سازنده کارتن k ام در دوره t ام
- $INVC_{ltp3}$: موجودی محصول $P3$ ام نزد مشتری l ام در دوره t ام

(ه) مدلسازی

$$\text{Min } f = \tag{۱}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N F_n Z_n + \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{TrSP}_{ijp1} A_{ijp1t} + \\ & \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \text{TrPM}_{jkp2} B_{jkp2t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \text{TrMC}_{klp3} D_{klp3t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \text{TrMG}_{kmp3} E_{kmp3t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \text{TrCG}_{lmp3} G_{lmp3t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \text{TrGR}_{mp3} X_{mp3t} + \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{TrRP}_{jp1} Y_{jp1t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \pi_{lp3} \text{SH}_{ltp3} + \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \text{hp}_{jp2} \text{INVP}_{jp2t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \text{hm}_{kp3} \text{INVM}_{kp3t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \text{hc}_{lp3} \text{INVC}_{lp3t} \end{aligned}$$

St:

$$\sum_{k=1}^K B_{jkp2t} + \text{INVP}_{jp2t} = Y_{jp1t} \lambda_{1p1p2} + \sum_{i=1}^I A_{ijp1t} \lambda_{1p1p2} + \text{INVP}_{jp2(t-1)} \quad \forall j, t, p2 \tag{۲}$$

$$\sum_{j=1}^J B_{jkp2t} \lambda_{2p2p3} + \text{INVM}_{kp3(t-1)} = \tag{۳}$$

$$\sum_{m=1}^M E_{kmp3t} + \sum_{l=1}^L D_{klp3t} + \text{INVM}_{kp3t} \quad \forall k, t, p3$$

$$\sum_{m=1}^M G_{lmp3t} + \text{INVC}_{ltp3} = \sum_{k=1}^K (D_{klp3t} + \text{INVC}_{l(t-1)p3}) (1 - \alpha_{lp3}) \quad \forall l, t, p3 \tag{۴}$$

$$X_{mp3t} = \sum_{l=1}^L G_{lmp3t} + \sum_{k=1}^K E_{kmp3t} \quad \forall m, t, p3 \tag{۵}$$

$$\sum_{m=1}^M X_{mp3t} (1 - \beta_{p3}) \lambda_{3p3p1} = \sum_{j=1}^J Y_{jp1t} \quad \forall t, p1 \tag{۶}$$

$$\sum_{k=1}^K D_{klp3t} \geq \text{DEMC}_{lp3} \quad \forall l, t, p3 \tag{۷}$$

$$\sum_{j=1}^J A_{ijp1t} \leq \text{CAPS}_{ip1} \quad \forall i, t, p1 \tag{۸}$$

$$\sum_{k=1}^K B_{jkp2t} + \text{INVP}_{jp2(t-1)} - \text{INVP}_{jp2t} \leq \text{CAPP}_{jp2} \quad j, t, p2 \tag{۹}$$

$$\sum_{m=1}^M E_{kmp3t} + \sum_{l=1}^L D_{klp3t} + \text{INVM}_{kp3(t-1)} - \text{INVM}_{kp3t} \leq \text{CAPM}_{kp3} \quad \forall k, t, p3 \tag{۱۰}$$

$$X_{mp3t} \leq \text{CAPG}_{mp3} \quad \forall m, t, p3 \tag{۱۱}$$

$$A_{njp1t}, B_{jkp2t}, D_{lmp3t}, E_{kmp3t}, G_{lmp3t}, X_{mp3t}, Y_{jp1t}, \text{INVP}_{jp2t}, \text{INVM}_{kp3t}, \text{INVC}_{ltp3} \geq 0 \tag{۱۲}$$

تابع هدف این مسئله حداقل سازی کل هزینه‌های زنجیره تأمین است شامل ۳ قسمت می‌شود. در بخش نخست به حداقل سازی هزینه توسعه و راه اندازی دستگاه‌های بازیافت پرداخته شده است، هدف قسمت دوم حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز مختلف را شامل می‌شود و قسمت سوم به کاهش هزینه‌های نگهداری می‌پردازد. محدودیت‌های ۲ تا ۶ کل انتقال مواد خام، کاغذ، محصول نهایی و مواد بازیافتی در زنجیره تأمین را نشان می‌دهد، محدودیت ۷ ارضای تقاضا را برای مشتریان به ارمغان می‌آورد. محدودیت‌های ۸ تا ۱۱ ظرفیت مراکز زنجیره تأمین را توضیح می‌دهد و محدودیت ۱۲ محدوده متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

(و) عدم قطعیت در مدل‌سازی

در مدل فوق، فرض بر قطعی و مشخص بودن پارامترهای مساله است. این در حالی است که در دنیای واقعی، بسیاری از پارامترها، محدوده مشخص و قطعی ندارند و عموماً ترانس آنها در یک بازه است. اهمیت محاسبه عدم قطعیت‌ها و ریسک در زنجیره تامین، توجه به توسعه ابزارهای تصمیم‌گیری مناسب جهت غلبه بر پارامترهای نامطمئن را در مسائل طراحی شبکه زنجیره تامین افزایش داده است (Pishvae & Torabi, 2010). تأثیر عدم قطعیت سیستم‌های تولید جهان واقعی را به دو گروه دسته بندی نموده است: ۱- عدم قطعیت محیطی و ۲- عدم قطعیت سیستمی. در زمینه زنجیره تامین، عدم قطعیت محیطی مرتبط با عدم قطعیت تقاضا و تامین می‌باشد که از عملکرد تامین کنندگان و رفتار مشتریان سرچشمه می‌گیرد. عدم قطعیت سیستم شامل، عدم قطعیت‌ها در فرآیندهای تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت از قبیل عدم قطعیت در زمان تحویل، هزینه تولید و ظرفیت واقعی فرآیندهای متفاوت است (Asim et al., 2019) که در این تحقیق، عدم قطعیت سیستمی در زمینه بازیافت، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در واقع، در این مطالعه، به دلیل تمرکز بر مرکز بازیافت، مقدار پارامتر β_{p3} که درصد دور ریز محصول و خروج از چرخه زنجیره تامین در مرکز بازیافت است، غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود. بازه این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\tilde{\beta}_{p3} - \hat{\beta}_{p3} \leq \beta_{p3} \leq \tilde{\beta}_{p3} + \hat{\beta}_{p3} \quad (13)$$

که در آن متغیر تصادفی $\eta_{p3} = \frac{\tilde{\beta}_{p3} - \hat{\beta}_{p3}}{\tilde{\beta}_{p3}}$ از یک توزیع متقارن و ناشناخته پیروی میکند و در بازه $[-1, 1]$ نوسان دارد.

ز) عدم قطعیت داده‌ها در بهینه سازی خطی

در مساله بهینه سازی خطی مساله زیر

$$\text{maximize } C'X \quad (14)$$

Subject to

$$AX \leq b \quad (15)$$

$$l \leq X \leq u \quad (16)$$

فرض میشود که عدم قطعیت داده‌ها فقط در ماتریس A می‌باشد و C در تابع هدف عدم قطعیت ندارد. با در نظر گرفتن ستون داده‌های تحت عدم قطعیت، مدل استوار سویستر به صورت زیر میباشد.

$$\text{maximize } C'X \quad (17)$$

$$\sum_j a_{ij}x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}y_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad (18)$$

$$-y_i \leq x_j \leq y_i \quad (19)$$

$$l \leq x \leq u \quad (20)$$

$$y \geq 0 \quad (21)$$

x^* اگر جواب بهینه مدل ماکزیمم سازی باشد در بهینگی $|x_j^*| = y_j$ است، بنابراین:

$$\sum_j a_{ij}x_j^* + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}|x_j^*| \leq b \quad \forall i \quad (22)$$

سویستر نشان داد که تحت هر مقدار ممکن، \tilde{a}_{ij} با داده‌های عدم قطعیت، جواب موجه میماند، که یک جواب استوار است.

$$\sum_j \tilde{a}_{ij}x_j^* = \sum_j a_{ij}x_j^* + \sum_{j \in J_i} \eta \hat{a}_{ij}x_j^* \leq \sum_j a_{ij}x_j^* + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}|x_j^*| \leq b_i \quad \forall i \quad (23)$$

برای هر محدودیت λ_m ، جمله $\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j|$ محافظت لازم از محدودیت را میکند و این محافظت، به وسیله ایجاد فاصله بین $\sum_j a_{ij} x_j^*$ و b_i ایجاد می شود.

با توجه به موارد ذکر شده و مدل سویستر، معادل استوار مدل برنامه ریزی خطی مساله، به شکل زیر خواهد بود:

$$\text{Min } f = \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N F_n Z_n + \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{TrSP}_{ijp1} A_{ijp1t} + \\ & \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \text{TrPM}_{jkp2} B_{jkp2t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \text{TrMC}_{klp3} D_{klp3t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \text{TrMG}_{kmp3} E_{kmp3t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \text{TrCG}_{lmp3} G_{lmp3t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \text{TrGR}_{mp3} X_{mp3t} + \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \text{TrRP}_{jp1} Y_{jp1t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \pi_{lp3} \text{SH}_{ltp3} + \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_{pjp2} \text{INVP}_{jp2t} + \\ & \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L h_{mkp3} \text{INVM}_{kp3t} + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L h_{clp3} \text{INVC}_{lp3t} \end{aligned}$$

St:

$$\sum_{k=1}^K B_{jkp2t} + \text{INVP}_{jp2t} = \quad (25)$$

$$Y_{jp1t} \lambda_{1p1p2} +$$

$$\sum_{i=1}^I A_{ijp1t} \lambda_{1p1p2} +$$

$$\text{INVP}_{jp2(t-1)}$$

$$\forall j, t, p2$$

$$\sum_{j=1}^J B_{jkp2t} \lambda_{2p2p3} + \text{INVM}_{kp3(t-1)} = \quad (26)$$

$$\sum_{m=1}^M E_{kmp3t} +$$

$$\sum_{l=1}^L D_{klp3t} + \text{INVM}_{kp3t}$$

$$\forall k, t, p3$$

$$\sum_{m=1}^M G_{lmp3t} + \text{INVC}_{ltp3} = \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K (D_{klp3t} +$$

$$\text{INVC}_{l(t-1)p3}) (1 - \alpha_{lp3})$$

$$\forall l, t, p3$$

$$X_{mp3t} = \sum_{l=1}^L G_{lmp3t} + \sum_{k=1}^K E_{kmp3t} \quad \forall m, t, p3 \quad (28)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{mp3t} (1 - \hat{\beta}_{p3}) \lambda_{3p3p1} - \sum_{m=1}^M \hat{X}_{mp3t} \hat{\beta}_{p3} \lambda_{3p3p1} \leq \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{jp1t}$$

$$\forall t, p1$$

$$\sum_{m=1}^M X_{mp3t} (\hat{\beta}_{p3} - 1) \lambda_{3p3p1} + \sum_{m=1}^M \hat{X}_{mp3t} \hat{\beta}_{p3} \lambda_{3p3p1} + \sum_{j=1}^J Y_{jp1t} \leq \quad (30)$$

$$0 \quad \forall t, p1$$

$$-\hat{X}_{mp3t} \leq X_{mp3t} \leq \hat{X}_{mp3t} \quad \forall t, p3, m \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^K D_{klp3t} \geq \text{DEMC}_{lp3} \quad \forall l, t, p3 \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{ijp1t} \leq \text{CAPS}_{ip1} \quad \forall i, t, p1 \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^K B_{jkp2t} + \text{INVP}_{jp2(t-1)} - \text{INVP}_{jp2t} \leq \text{CAPP}_{jp2} \quad j, t, p2 \quad (34)$$

$$\sum_{m=1}^M E_{kmp3t} + \sum_{l=1}^L D_{klp3t} + \text{INVM}_{kp3(t-1)} - \text{INVM}_{kp3t} \leq \text{CAPM}_{kp3} \quad \forall k, t, p3 \quad (35)$$

$$X_{mp3t} \leq \text{CAPG}_{mp3} \quad \forall m, t, p3 \quad (36)$$

$$A_{njp1t}, B_{jkp2t}, D_{lmp3t}, E_{klp3t}, G_{lmp3t}, X_{mp3t}, \hat{X}_{mp3t}, Y_{jp1t}, \text{INVP}_{jp2t}, \text{INVM}_{kp3t}, \quad (37)$$

$$\text{INVC}_{ltp3} \geq 0$$

در مدل مطرح شده، در بخش جمع آوری ضایعات، صف تشکیل می شود... با فرض اینکه ورودی از سمت مشتری و ورودی از بخش کارتن سازی، توزیع نمایی با پارامترهای λ_1 و λ_2 داشته باشند، در نتیجه ورودی جمع آوری کننده توزیع نمایی با پارامتر $\lambda_1 + \lambda_2$ خواهد داشت. از طرفی به دلیل مشخص بودن فرآیند بازیافت توسط دستگاه ها، می توان زمان خدمت دهی دستگاه ها

را ثابت در نظر گرفت بنابراین صف ایجاد شده از نوع $M/D/K$ خواهد بود. صف با ورودی نمایی، خدمت دهی ثابت و البته C تعداد خدمت دهندهها (ماشین های بازیافت) است. ارلنگ نشان داد که توزیع زمان انتظار در این مدل صف به صورت زیر است:

$$F(y) = \int_0^{\infty} F(x+y-D) \frac{\lambda^k x^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda x} dx, \quad y \geq 0, \quad k \in \mathbb{N} \quad (38)$$

از آنجا که زمان انتظار در این مدل صف، رابطه صریح ریاضی ندارد می توان از تخمین ریاضی برای به دست آوردن تقریبی از این زمان به دست آورد. تقریب های زیادی برای میانگین انتظار در صف وجود دارد. اولین مورد در سال ۱۹۵۹ با استفاده از فاکتوری برای تنظیم میانگین زمان انتظار در یک صف $M/M/K$ ارائه شد که به عنوان قانون تراکم کینگمن شناخته می شود.

$$E[W^{M/G/K}] = \frac{C^2+1}{2} E[W^{M/M/K}] \quad (39)$$

که در آن C^2 واریانس توزیع زمان خدمت دهی است. وارد ویت این تقریب را به عنوان "معمولاً یک تقریب عالی، حتی با توجه به اطلاعات اضافی در مورد توزیع زمان خدمت دهی توصیف میکند.

برای صف $M/M/K$ که در آن ورودی و زمان خدمت دهی، توزیع نمایی دارند، زمان انتظار در صف به صورت زیر است:

$$W_q = \pi_0 \frac{\rho(k\rho)^k}{\lambda(1-\rho)^2 k!} \quad (40)$$

که در آن

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} < 1, \quad \pi_0 = \left[\left(\sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k\rho)^i}{i!} \right) + \frac{(k\rho)^k}{k!(1-\rho)} \right]^{-1}$$

بنابراین می توان رابطه (۴۰) را به عنوان تابع هدف دوم به مساله اضافه کرد.

ح) روش حل

برای حل مسائل تصمیم گیری / بهینه سازی دو/چندهدفه^۴ (MODM) رویکردهای مختلفی تا به حال ارائه گردیده است روش هایی همانند مجموع وزن دار^۵ (SAW)، اپسیلون محدودیت^۶ (EC)، Lp-متریک^۷، برنامه ریزی آرمانی^۸ (GP) و ... اشاره کرد که در آنها از تبدیل مسئله چندهدفه به تک هدفه استفاده می شود، که در اغلب این مسائل مفهوم پاسخ غالب و مغلوب مطرح گردیده شده است (Shahtaheri et al., 2019).

به علاوه روش های حل دیگری وجود دارد که به صورت همزمان به پاسخ های دو تابع هدف توجه می نمایند و به عبارت دیگر در جواب این مسائل هر دو تابع هدف دیده شده است و به جوابی مناسب در زمان مناسب خواهیم رسید که اصطلاحاً به دنبال یافتن مجموعه جواب های کارا و موثر هستیم که مقادیر توابع هدف نامغلوب می گردند و روی جبهه پارتو سراسری قرار می گیرند، که از جمله این الگوریتم ها می توان الگوریتم ژنتیک مرتب سازی مغلوب^۹ (NSGAI) و هارمونی سرچ چند هدفه^{۱۰} (MOHS) را نام برد (Mohammadpour & Alinezhad, 2015).

4. Multiple Objective Decision Making
5. Weighted Sum
6. Augmented Epsilon Constraint
7. Liner Problem-metric
8. Goal Programming
9. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
- 10 Multiple Objective Harmony Search

در هر یک از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری چندهدفه، چه روش‌های دقیق مانند اپسیلون محدودیت تکمیل شده و چه در این تحقیق با توجه به ضعف روش‌های دقیق برای حل مسئله در این ابعاد یعنی ابعاد بزرگ از دو روش فراابتکاری ژنتیک چندهدفه NSGAI^{II} و هارمونی سرچ چندهدفه MOHS استفاده می‌شود.

به همین منظور در ابتدا ساختار کلی این الگوریتم‌ها به شرح آورده می‌شود و در ادامه با معرفی پارامترهای الگوریتم‌ها براساس روش تاگوچی تنظیم می‌گردد و در ابعاد بزرگ با مثالی عددی دو الگوریتم با شاخص‌های مشروحه ارزیابی و مقایسه می‌گردند.

ط) الگوریتم‌های حل در تحقیق حاضر جهت حل مدل در ابعاد بزرگ، حل الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه با نتایج الگوریتم ژنتیک NSGA-II مقایسه می‌شود.

در تمام الگوریتم‌های فراابتکاری، باید در ساختار مشخصی قرار گیرند که به آن نحوه نمایش جواب می‌گویند. برای تخصیص تأمین‌کنندگان به تولیدکننده‌ها یک کروموزوم (بردار) با یک سطر و به تعداد تأمین‌کنندگان ستون ایجاد می‌شود که خانه‌ی i م نشان دهنده‌ی تأمین‌کننده شماره i می‌باشد، اعداد داخل کروموزوم نشان دهنده‌ی شماره تولیدکنندگان می‌باشند، که بصورت تصادفی تخصیص داده می‌شوند، در شکل ۲ یک کروموزوم با ۵ تأمین‌کننده و ۲ تولیدکننده نشان داده شده است، خانه‌ی اول نشان دهنده‌ی تأمین‌کننده اول، خانه‌ی دوم نشان دهنده‌ی تأمین‌کننده دوم و خانه‌ی ۵م نشان دهنده‌ی تأمین‌کننده پنجم می‌باشد، در این کروموزوم برای مثال تأمین‌کننده ۱ به تولیدکننده دوم و تأمین‌کننده ۴ به تولیدکننده اول تخصیص داده شده است.

۲	۱	۱	۱	۲
---	---	---	---	---

شکل شماره (۲): نحوه تخصیص تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان در هر کروموزوم

کروموزوم دوم توالی بررسی ارسال به تولیدکنندگان را مشخص می‌کند به این صورت که ماتریس در یک سطر و به تعداد تولیدکننده‌ها ستون ایجاد می‌شود و تولیدکنندگان به صورت تصادفی به خانه‌های این کروموزوم تخصیص داده می‌شوند، از ترکیب دو کروموزوم فوق Z_j / z_j ایجاد می‌شوند، برای مثال در شکل ۳ تأمین‌کننده ۲، ۳ و ۴ به تولیدکننده یک تخصیص داده می‌شود، سپس تأمین‌کننده ۲ و در نهایت تأمین‌کننده ۳ به تولیدکننده اول تخصیص داده می‌شود.

۴	۱	۲	۵	۳
---	---	---	---	---

شکل شماره (۳): توالی انجام بررسی پروژه‌ها در کروموزوم

کروموزوم سوم بچ ارسالی را مشخص می‌کند به این صورت که ماتریس در یک سطر و به تعداد تولیدکننده‌ها ستون ایجاد می‌شود.

۱	۱	۲	۱	۲
---	---	---	---	---

شکل شماره (۴): مد اجرایی فعالیت‌ها در هر کروموزوم

برای تعیین ارسال مواد اولیه، یک ماتریس دو بعدی در نظر گرفته می‌شود که تعداد سطرهای آن برابر با تعداد تولیدکنندگان است و هر سطر شامل بچ ارسالی مواد اولیه نوع اول مرتبط با آن سطر است.

کلیات NSGAI^{II}

گام‌های اصلی اجرای NSGAI^{II}، برای حل یک مسئله MODM به صورت زیر می‌باشد.

- ایجاد جمعیت اولیه
- محاسبه معیارهای برازندگی
- مرتب‌سازی نامغلوب جمعیت و محاسبه‌ی فاصله‌ی ازدحامی

- انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید
- تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت بدست آمده از تقاطع و جهش
- جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل.
- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می شود.

در توابعی که تک هدفه می باشند تعیین معیار برازندگی جوابها نسبت به یکدیگر بسیار راحت می باشد به نحوی که جوابی که در مسائل کمینه سازی کترین میزان تابع هدف به عنوان بهترین پاسخ در نظر گرفته می شود ولی در مسائل بهینه سازی چندهدفه بحث به کلی متفاوت بوده و با مجموعه ای از پاسخها که نسبت به دیگر پاسخهای به دست آمده برتری دارند و به اصطلاح غالب هستند طرفیم از سوی دیگر با مفهومی دیگر در برازندگی پاسخها به نام مغلوب بودن طرفیم در پاسخهای مطلوب غالبیت وجود دارد اما حداقل از یک دسته پاسخی ضعیف تر دارند.

در NSGAI، با توجه به تحقیقات (Alinezhad et al., 2020)، ابتدا دسته ای از اعضای جمعیت که هرگز مغلوب نشده اند مشخص شده و به آنها رتبه یک اختصاص داده می شود. سپس برای بقیه اعضا با نادیده گرفتن اثر اعضای با رتبه یک بر جمعیت، مجدداً مرتب سازی نامغلوب انجام می شود و اعضای که در این مرحله هرگز مغلوب نشده اند با رتبه دو مشخص می شوند. برای بقیه اعضا، با نادیده گرفتن اثر اعضای با رتبه یک و دو بر جمعیت، بار دیگر مرتب سازی نامغلوب را انجام داده و اعضای که در این مرحله هرگز مغلوب نشده اند با رتبه سه مشخص می شوند و این روند تا جایی ادامه می یابد که رتبه همه اعضای جمعیت مشخص شود.

حفظ تنوع جوابها (فاصله ازدحامی)^{۱۱}

برای بدست آوردن تخمینی از چگالی جوابهای موجود در کنار یک جواب خاص، میانگین فاصله ای از دو جواب واقع در طرفین آن جواب برای هر تابع هدف جداگانه محاسبه می شود. مقدار عددی که از محاسبه فضای مربعی (در مسائل دوهدفه) اطراف جواب j با بکار بردن نزدیکترین همسایه های آن بدست می آید، فاصله ازدحامی نامیده می شود که از رابطه ۴۱ حساب می شود.

$$d_j = \sum_{i=1}^n \frac{f_i(j-1) - f_i(j+1)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (41)$$

به طور کلی فاصله ازدحامی جوابها در فضای جواب مسائل چند هدفه به صورت زیر محاسبه می شود:

گام اول: در هر جبهه، جوابها بر اساس یکی از توابع هدف دلخواه به صورت نزولی مرتب می شوند، فرض می شود که تعداد توابع هدف مساله و تعداد جوابها در هر جبهه برابر باشد.

گام دوم: فاصله ازدحامی نقاط اول و آخر لیست برابر بی نهایت می شود (دلیل این امر آن است که در کنار این نقاط، نقاط دیگری وجود ندارد که آن را پوشش دهد).

گام سوم: برای نقاط ۲ تا فاصله ازدحامی از روابط ۴۲ و ۴۳ محاسبه می شود:

$$CD_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m \quad (42)$$

$$d_i^1 = \frac{|f_m^{i+1} - f_m^{i-1}|}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (43)$$

در رابطه بالا منظور از فاصله ازدحامی در تابع هدف m می باشد و به منظور محاسبه فاصله ازدحامی کل، باید برای تمامی توابع هدف محاسبه و سپس جمع شود.

عملگر تقاطع (تقاطع یک نقطه ای)

این عملگر یک عملگر ترکیبی است در مرحله نخست یک جفت از کروموزومهای برگزیده را به طور تصادفی انتخاب می کند. در این روش یک نقطه روی دو کروموزوم والد به صورت تصادفی انتخاب می شود و که نقطه تقاطع را نشان می دهد. بیت های

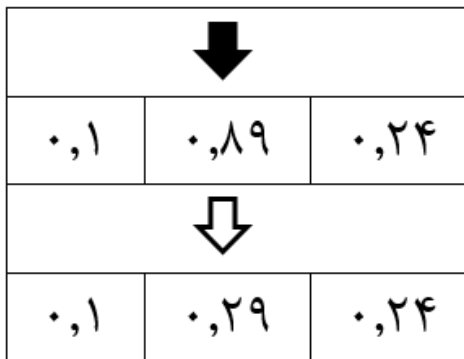
¹¹ Crowding distance

طراحی مدل بهینه بازیافت در زنجیره تأمین چهار سطحی حلقه بسته به وسیله تئوری صف و برنامه ریزی استوار (مطالعه موردی صنعت کاغذ) ۱۰۵
 سمت راست آن نقطه بین کروموزوم دو والد جابجا می‌شوند. به این صورت دو فرزند ایجاد می‌شوند که هر کدام بخشی از اطلاعات ژنتیکی هر کدام از دو والد خود را به همراه دارند.

والد ۱	۰/۲۴	۰/۸۹	۰/۱
والد ۲	۰/۷۳	۰/۲۹	۰/۳
فرزند ۱	۰/۷۳	۰/۸۹	۰/۱
فرزند ۲	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۳

شکل شماره (۵): عملگر تقاطع

در الگوریتم ژنتیک برای جلوگیری از همگرایی سریع جواب‌ها در محیط شدنی مسئله باید از نوعی جهش در جواب‌ها استفاده گردد که همانند جهش در نسل‌های موجودات زنده است این عمل موجب تنوع در جواب‌ها و احتمالاً ایجاد پاسخی بهتر و در نتیجه دستیابی به پاسخی معقول برای مسئله خواهد شد. به عبارت دیگر بر اساس نظریه داروین تولید کروموزوم‌های فرزند ممکن است در برخی از این کروموزوم‌ها جهش‌هایی به تصادف روی دهند که موجب بهینگی هرچه بیشتر کروموزوم و یا بدتر شدن آن گردند. ما نیز در استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک از این خصوصیت استفاده کرده و جهش‌هایی را در جواب‌های تولیدشده برای مسئله ایجاد می‌کنیم. این روش نیز بسته به ابتکار طراح الگوریتم به روش‌های گوناگونی پیاده‌سازی می‌شود. اما روش کلی کار بدین شکل است که مقدار یک یا چند عدد از ژن‌های یک کروموزوم را تغییر دهیم. برای این منظور می‌توان دو ژن را به تصادف انتخاب کرده و جای آن‌ها را باهم تعویض کنیم، یا می‌توان ژنی را انتخاب کرد و به تصادف مقدار جدیدی را به آن ژن انتساب داد. همچنین می‌توان ژنی را به تصادف انتخاب کرده و مکمل آن را به‌عنوان مقدار جدید ژن برگزینیم. که فلوجارت کلی الگوریتم در تحقیقات علینژاد و همکاران به جز آمده است.



شکل شماره (۶): عملگر جهش

با توجه به مرور ادبیات مربوط به الگوریتم‌های فراابتکاری که برای حل مدل‌های Np-Hard مورد استفاده قرار می‌گیرند سطوح پارامترهای الگوریتم NSGAIII مورد استفاده این پژوهش از پایان‌نامه توسطی در سال ۱۳۹۹ استخراج گردیده است.

جدول شماره (۲): پارامترهای الگوریتم NSGAIII

Max iterations	Population size	PC	PM	MU
۲۰۰	۱۰۰	۰/۸	۰/۲۵	۰/۰۴

گام‌های اصلی اجرای MOHS، برای حل یک مسئله MODM به صورت زیر می‌باشد.

- تولید پاسخ‌های اولیه، ارزیابی آن و پر کردن حافظه هارمونی
- تولید هارمونی جدید با احتمال استفاده از HM برابر با HMCR
- تغییر فرکانس با احتمال PAR و ارزیابی پاسخ جدید

- مقایسه هارمونی جدید و اضافه کردن آن به HM در صورت بهتر بودن
- بازگشت به مرحله ۲ در صورت برآورده نشدن شرایط خاتمه
- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می شود.

این الگوریتم به دنبال بهینه سازی یک مسئله بهینه سازی پیچیده با تولید راه حل های بردار تصادفی در یک حافظه هماهنگ (HM) می باشد که تکرار آن با تعدادی از روش های تنظیم و به روز رسانی روش، برای رسیدن به جواب بهینه است. به طور خلاصه، طبق شباهت بداهه پردازی و بهینه سازی، هماهنگی فوق العاده به عنوان بهینه جهانی در نظر گرفته می شود، استاندارد زیبایی شناسی به وسیله تابع هدف تعیین می شود، مقادیر ابزار ارزش های مورد نظر متغیرها است و هر عمل در هر تکرار یکسان است.

فرایند آغازین شامل مقدار اولیه پارامترها و مقدار اولیه HM است.

پنج پارامتر الگوریتم هارمونی سرچ عبارت اند از:

- تنظیم طول گام (PPAR)
- تعداد متغیرهای تصمیم گیری (N)
- حداکثر تعداد بداهه (NI)
- اندازه حافظه هارمونیک (HMS)
- حافظه هارمونی با توجه به سرعت (PHMCR)

تنظیم طول گام (PPAR) که ارزش نمونه آن از ۰/۳ تا ۰/۹۹ است و در این تحقیق سه مقدار ۰/۸، ۰/۶ و ۰/۹ برای PPAR در نظر گرفته شده است.

تعداد متغیرهای تصمیم گیری مسئله بهینه سازی (N) به طور کامل به ویژگی های این مسئله وابسته است. تابع هدف (NI) به عنوان حداکثر تعداد بداهه (تکرار) که در آن سه مقدار ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است، مورد بررسی قرار می گیرد. HMS تعداد بردارهای راه حل همزمان در HM است. در این تحقیق سه مقدار ۱۰، ۱۵ و ۳۰ برای HMS در نظر گرفته شده است. در نهایت PHMCR احتمال انتخاب HM است. همان طور که مقادیر بسیار کوچک PHMCR کارایی الگوریتم را به سمت یک الگوریتم جستجوی تصادفی کاهش می دهد، در این تحقیق، سه مقدار ۰/۹، ۰/۹۵ و ۰/۹۹ برای PHMCR در نظر گرفته شده است.

برای ایجاد یک هارمونی یا راه حل جدید مانند الگوریتم ژنتیک به چند عملگر احتیاج داریم و تک تک به ایجاد متغیرها می پردازیم. برای ایجاد مقدار برای متغیر i ام ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می کنیم. این عدد تصادفی با PHMCR مقایسه می گردد و اگر کوچک تر از آن باشد، یک مقدار برای متغیر i ام از ماتریس حافظه و از ستون i ام انتخاب می گردد و در غیر این صورت یک مقدار تصادفی از فضای جستجو برای متغیر i ام انتخاب می گردد. در صورتی که از ماتریس حافظه یک مقدار انتخاب شد، سپس عدد تصادفی دیگری تولید می گردد و با PPAR مقایسه می شود. در صورتی که عدد تصادفی کوچک تر از PPAR باشد این متغیر انتخاب شده از ماتریس حافظه به مقدار کوچکی با توجه به رابطه ۳-۴، تغییر پیدا می کند. برای تعیین مقدار تغییر بر روی متغیر انتخاب شده از حافظه ماتریس، پارامتر دیگری به نام bw (ماکزیمم مقدار تغییر ایجاد شده در متغیر انتخاب شده) تعریف می گردد که با توجه به رابطه (۴۴) مقدار متغیر جدید به دست می آید.

$$X_{new} = X_{old} + bw \times \varepsilon \quad (44)$$

در اینجا X_{old} به عنوان مقدار متغیر ذخیره شده در حافظه هارمونی است و X_{new} به عنوان متغیر جدید بعد از عملیات تنظیمی و تغییری ظاهر می شود در واقع ε همان عدد تصادفی از یک توزیع یکنواخت در $[-1, 1]$ می باشد. به روز کردن ماتریس حافظه

به همین صورت تمام متغیرهای یک جواب یا هارمونی ایجاد می شود و سپس ارزش آن هارمونی با توجه به تابع برازش محاسبه شده و با بدترین هارمونی موجود در حافظه ماتریس مقایسه می گردد. در صورت بهتر بودن از بدترین هارمونی موجود در حافظه

طراحی مدل بهینه بازیافت در زنجیره تأمین چهار سطحی حلقه بسته به وسیله تئوری صف و برنامه ریزی استوار (مطالعه موردی صنعت کاغذ) ۱۰۷
 ماتریس، هارمونی جدید جایگزین هارمونی قبلی می‌شود. که فلوچارت کلی الگوریتم در تحقیقات علینژاد و همکاران به جز آمده است.

با توجه به مرور ادبیات مربوط به الگوریتم‌های فراابتکاری که برای حل مدل‌های Np-Hard مورد استفاده قرار می‌گیرند سطوح پارامترهای الگوریتم MOHS مورد استفاده این پژوهش از پایان‌نامه توسلی در سال ۱۳۹۹ استخراج گردیده است.

جدول شماره (۳): سطوح لازم برای پارامترهای الگوریتم MOHS

سطح بالا	سطح متوسط	سطح کم	MOHS پارامتر / عامل
۰/۸	۰/۶	۰/۴	Hmcr
۰/۵	۰/۴	۰/۳	Par
۴	۳	۲	BW

شرط توقف الگوریتم به چند صورت می‌تواند تعیین گردد. در این پژوهش شرط رسیدن به تعداد تکرارهای مشخص شده به عنوان معیار توقف در الگوریتم‌ها منظور می‌گردد.

(ی) مثال عددی

پس از اینکه شاخص‌های ارزیابی تعریف شد برای مقایسه الگوریتم‌ها ۲۰ مسئله طبق جدول حاوی مشخصات مسائل طراحی شد. سپس هر مسئله به ازای هر الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا و میانگین به عنوان جواب نهایی برای هر روش حل گزارش می‌شود که مقادیر همگی شاخص‌ها در جدول ۴ نشان داده می‌شود.

استفاده از این تعداد مسئله در تحقیق به منظور ایجاد تنوع، گستردگی، و کاهش انحصار در مطالعه دلایل متعددی دارد. این انتخاب به ما این امکان را می‌دهد که معیارها و روش‌های حل را بر روی یک مجموعه متنوع از مسائل ارزیابی کنیم و نتایج را به صورت کلی و جامعتر ارائه دهیم. همچنین، با این تعداد بیشتر از مسائل، می‌توانیم از داده‌های آماری قوی‌تری استفاده کنیم و به طور معتبرتری تحلیل‌ها و نتایج را ارائه دهیم. به طور کلی استفاده از این تعداد مسئله به ما این امکان را می‌دهد که تحقیق خود را بر روی پایه‌های قوی‌تری بنا کنیم و نتایج را به شکل کاملتری ارائه دهیم.

در این بخش، برای اعتبارسنجی مدل ابتدا از روش دقیق استفاده شده است. برای حل مسئله و گرفتن جواب دقیق از نرم‌افزار گمز و روش محدودیت آپسیلون تکامل یافته استفاده شده است. مسائل کوچک‌تر اغلب می‌توانند با روش‌های ساده‌تر یا به صورت مستقیم حل شوند. همچنین، مدل‌های ریاضی برای مسائل کوچک ممکن است پیچیدگی اضافی به مسئله اضافه کنند و اگر یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه (مسئله کمینه‌سازی Z_1) مورد نظر باشد، پر واضح است که هر روش حل که جواب شدنی ارائه دهد که به ازای آن Z_1 کمتر باشد، بهتر است. اما در مسئله چندهدفه، نحوه ارزیابی متفاوت است و نمی‌توان به صورت تک‌هدفه ارزیابی مسائل را دنبال کرد. و ممکن است عملکرد بهینه‌سازی را بدتر کنند، از این رو از آوردن پاسخ دقیق در مقاله خودداری شده است

در این قسمت نتایج محاسبات مثال‌های حل شده با الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها در نرم‌افزار MATLAB ورژن ۲۰۱۴ حل می‌شوند.

جدول شماره (۴): خروجی الگوریتم NSGAI

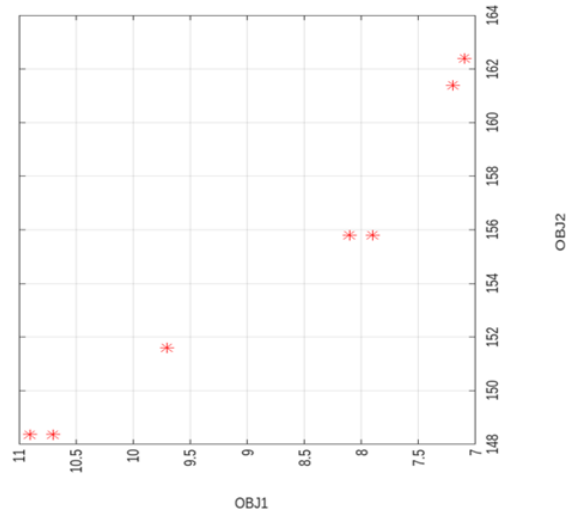
NSGAI					\hat{f}_1
RAS	Spacing	MID	Diversity	Time	
۰/۰۰۲۵۴۲۷	۱۰۹۱۰۰/۹۶	۳۰۸۶/۷۵۸۱	۵۱۹۹۸/۷۰۸	۱۱۷/۸۴۶۹۹	۱
۰/۰۰۱۲۰۳۸	۳۲۲۹۲/۵۵	۵۷۵۵/۷۰۹۷	۳۷۲۹۰/۶۸۹	۱۲۷/۸۷۹۶۴	۲
۰/۰۰۲۷۲۰۱	۳۳۶۲۸/۱۷	۲۶۶۰/۲۶۴۳	۸۱۷۱۰/۸۲۱	۱۳۱/۷۴۲۶۶	۳
۰/۰۰۴۶۱۴۴	۳۶۰۳۶۱/۸۵	۹۸۰۸/۵۲۱۲	۴۷۱۸۳/۳۴	۱۵۸/۲۲۱۰۲	۴
۰/۰۰۰۷۷۷۶	۴۵۶۴۵۶/۸۷	۵۸۳۳/۴۵۰۹	۷۶۸۹/۸۹۷۲	۱۷۱/۰۷۲۵۱	۵

۰/۰۰۲۴۸۰۴	۷۷۵۰۵۴/۸۱	۶۳۳/۳۶۷۳۸	۲۸۹۰۸/۹۶۲	۱۷۳/۶۳۱۰۵	۶
۰/۰۰۲۴۸۶۸	۸۹۴۷۸۲/۴۱	۵۰۰۸/۷۹۱	۳۱۸۷۷/۸۷۵	۱۹۰/۴۹۹۸۶	۷
۰/۰۰۰۷۶۸۳	۹۲۹۲۲۸/۶۶	۴۷۲۳/۰۶۸۵	۷۴۹۳۶/۲۹	۲۳۷/۳۷۳۴۸	۸
۰/۰۰۱۱۳۲	۹۳۴۳۶۶/۱۴	۳۵۷۸/۵۰۴۶	۵۶۶۴۶/۰۷۸	۲۴۹/۹۱۹۸۸	۹
۰/۰۰۲۹۸۶	۹۹۵۲۷۱/۹۱	۱۰۰۷۸/۶۶	۳۳۲۱/۳۳۴۶	۲۵۳/۹۹۷۵۱	۱۰
۸/۹۷E-05	۱۱۷۳۲۸۶/۱	۹۴۲۶/۷۷۹	۷۴۲۲۵/۳۰۷	۲۵۷/۰۰۵۰۵	۱۱
۰/۰۰۱۲۰۲۳	۱۲۹۹۵۱۰/۴	۱۱۳۷۰/۱۰۷	۲۹۳۱۰/۵۶۳	۲۶۷/۴۳۷۵۲	۱۲
۰/۰۰۲۴۷۲۸	۱۳۹۱۴۵۸/۱	۱۲۸۳۵/۹۶۲	۶۲۰۲۸/۳۵۳	۳۱۴/۸۶۷۶۷	۱۳
۰/۰۰۴۱۲۵۵	۱۵۵۰۱۷۳/۴	۱۰۵۷۲/۶۵۸	۲۲۱۹۶/۹۵۴	۳۷۷/۲۹۰۰۴	۱۴
۰/۰۰۲۶۲۸۶	۱۶۱۵۴۹۷/۹	۱۲۶۰۱/۶۵۶	۷۶۷۰/۷۶۲۵	۳۸۹/۳۶۵۳۳	۱۵
۵/۲۴E-05	۱۷۵۱۱۲۷/۲	۳۶۹۸/۹۱۰۲	۳۱۱۹/۵۱۲۳	۳۹۶/۳۸۱۶۵	۱۶
۰/۰۰۱۳۰۱۶	۲۰۸۲۶۴۳/۱	۱۲۲۹۵/۲۹۲	۲۹۱۸۰/۸	۴۱۷/۵۳۸۹۹	۱۷
۰/۰۰۰۳۴۲۹	۲۱۶۹۱۷۵/۷	۵۲۳۴/۴۷۰۹	۴۹۰۷۴/۶۳۲	۴۳۲/۸۷۱۳۸	۱۸
۰/۰۰۰۴۹۶	۱۸۸۲۹۸۰/۹	۵۶۵۵/۵۱۷۳	۵۸۲۵۱/۸۴۷	۴۴۳/۵۶۱۷۷	۱۹
۰/۰۰۲۹۷۵۲	۲۴۱۹۳۶۴/۶	۴۴۵۴/۴۱۰۷	۱۴۰۴۳/۴۴۷	۴۵۱/۷۱۰۹۵	۲۰
۰/۰۰۱۸۷	۱۱۷۳۴۴۹/۵	۶۹۶۵/۶۴۲۹	۳۸۵۳۳/۳۰۹	۲۷۸/۰۱۰۷۵	AV

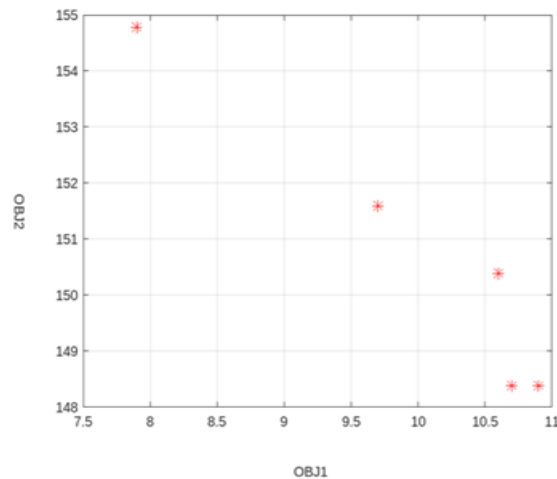
جدول شماره (۵): خروجی الگوریتم MOHS

MOHS					رتبه
RAS	Spacing	MID	Diversity	Time	
۰/۰۰۴۰۴۱۳	۱۸۳۳۰/۵۲	۲۳۷۹/۱۲۹۴	۸۲۲۴۴/۴۲۹	۷۳/۹۴۳۴۷۵	۱
۰/۰۰۳۸۰۲۱	۲۰۶۴۹۸/۱۴	۱۹۴۸/۵۶۰۹	۳۱۶۸/۶۹۲۱	۹۱/۵۸۴۶۳۹	۲
۰/۰۰۱۶۳۸۶	۲۴۷۷۴۶/۶۱	۳۰۷۵/۶۴۸۴	۴۴۷۱۰/۸۴	۹۹/۵۱۰۳۱۳	۳
۰/۰۰۷۶۸۰۱	۳۱۷۳۷۱/۸۵	۴۶۲۳/۲۱۰۶	۲۱۷۳۷/۳۲۱	۱۲۱/۱۳۳۶۷	۴
۰/۰۰۲۹۵۸۹	۴۰۲۱۸۰/۸۵	۳۳۰۸/۷۸۵۸	۲۳۶۱۶/۲۴۳	۱۲۶/۵۴۲۱۳	۵
۰/۰۰۸۱۴۲	۴۵۹۹۶۲/۲۸	۱۵۹۹/۶۷۳۸	۲۷۷۹۵/۶۹	۱۴۷/۵۹۲۲۷	۶
۰/۰۰۷۰۹۶۵	۷۷۷۴۳۲/۷۶	۳۹۴۶/۸۶۶۷	۴۱۹۹۰/۱۶۱	۱۵۱/۳۰۹۷۶	۷
۰/۰۰۳۱۱۷۹	۸۶۵۸۸۴/۰۲	۴۲۲۷/۸۵۹۴	۲۸۷۱۱/۹۱۵	۱۵۲/۲۸۲۲۴	۸
۰/۰۰۰۵۵۵۷	۹۷۱۷۵۲/۳۱	۱۳۸۴/۸۰۸۸	۱۲۴۰۸/۱۵۵	۱۸۱/۲۷۷۲۴	۹
۰/۰۰۲۱۰۷۳	۱۰۷۷۱۰۷/۳	۴۴۱۸/۳۰۴۱	۲۹۱۹۶/۲۲۷	۱۸۳/۸۵۱۲۷	۱۰
۰/۰۰۵۰۶۹۶	۱۲۰۸۴۹۶/۹	۵۱۰۹/۰۴۵۱	۶۶۲۰۹/۴۸۴	۱۹۱/۲۳۰۲	۱۱
۰/۰۰۵۸۵۳۱	۱۳۹۰۴۴۱/۷	۵۳۵۶/۲۸۴۹	۵۱۸۷۷/۸۱۵	۲۰۸/۱۳۷۶۵	۱۲
۰/۰۰۷۴۵۹۹	۱۴۱۱۹۷۴/۷	۶۲۷/۳۰۱۷۳	۸۷۵۷۸/۰۴	۲۵۷/۹۳۵۱۷	۱۳
۰/۰۰۸۱۷۴۹	۱۴۷۷۲۶۶	۱۲۲۴/۳۳۲۹	۱۹۴۶۵/۳۰۵	۲۵۸/۵۵۸۴۹	۱۴
۰/۰۰۱۷۳۷۲	۱۴۹۹۳۱/۴	۱۷۵۳/۲۸۷۸	۴۰۶۸۶/۹۵۲	۲۶۴/۴۱۷۴۹	۱۵
۰/۰۰۸۷۸۸۲	۲۰۱۶۹۲۸/۵	۸۵۴/۵۵۰۷۲	۱۴۵۵۴/۳۱۹	۲۸۳/۰۴۲۷۲	۱۶
۰/۰۰۸۹۷۹۱	۲۱۶۲۶۵۱/۱	۴۷۱۵/۹۸۵۹	۴۷۶۵/۹۲۱۴	۲۸۸/۵۴۹۰۵	۱۷
۰/۰۰۶۷۱۶۶	۲۴۳۷۹۸۷/۶	۲۶۷۴/۴۷۲۳	۵۶۸۲۱/۳۱۴	۳۱۱/۷۹۴۴۶	۱۸
۰/۰۰۲۲۰۸۱	۱۹۵۸۶۹۱/۴	۱۷۳۲/۶۵۸	۲۱۸۹/۸۶۸۸	۳۱۶/۴۷۰۲۳	۱۹

۰/۰۰۸۴۸۹۸	۲۴۳۷۹۸۷/۶	۱۴۰۰/۸۶۷۴	۹۳۱۱/۸۷۹۱	۳۲۲/۳۰۹۹۵	۲۰
۰/۰۰۵۲۳۰۸	۱۱۷۰۱۵۲/۶	۲۸۱۸/۰۸۱۷	۳۳۴۵۲/۰۲۹	۲۰۱/۵۷۳۶۳	AV

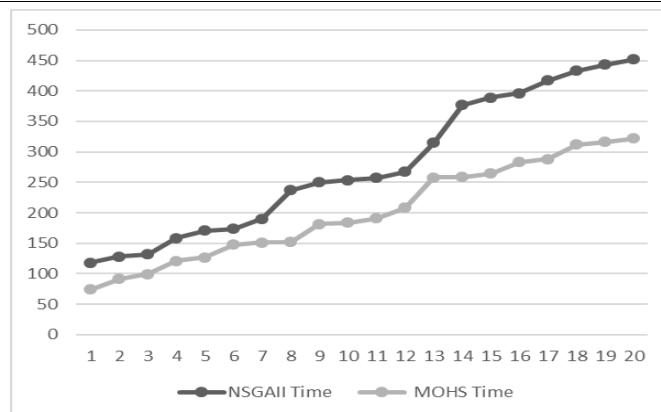


شکل شماره (۷): حل یک نمونه از مساله به صورت پارتو، الگوریتم هارمونی سرچ چندهدفه



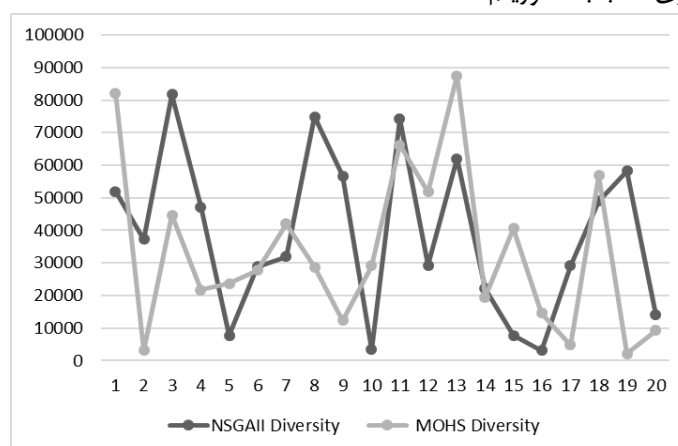
شکل شماره (۸): حل یک نمونه از مساله به صورت پارتو، الگوریتم NSGA II

با توجه به جدول ۴ و ۵ که داده‌های مربوط به حل هر الگوریتم را نشان می‌دهد به بررسی خروجی‌ها و تحلیل آن می‌پردازیم. شکل ۹ زمان حل هر الگوریتم به ازای هر مسئله را نمایش می‌دهد که نمودار مقایسه‌ای الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که زمان حل الگوریتم‌های جستجوی هارمونی چند هدفه کمتر از الگوریتم NSGA II می‌باشد. که با توجه به اینکه هر الگوریتم که زمان حل کمتری داشته باشد عملکرد بهتری دارد می‌توان گفت الگوریتم MOHS بهتر است.



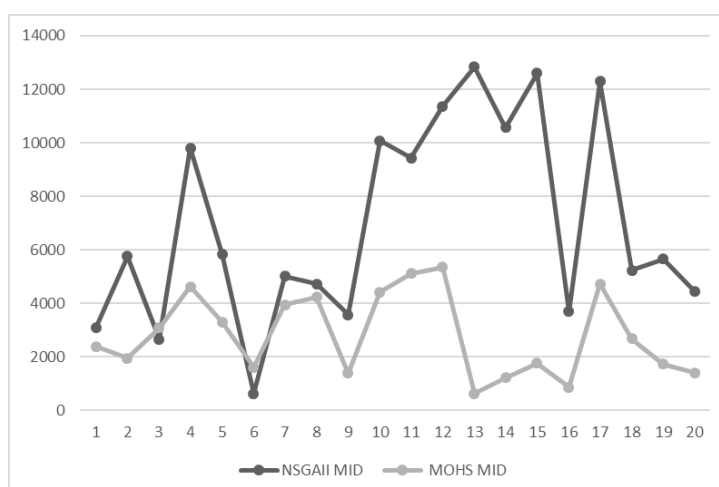
شکل شماره (۹): نمایش شاخص زمان برای الگوریتم‌های مقاله

شاخص دیگری که به بررسی آن می‌پردازیم شاخص Diversity می‌باشد که شکل ۱۰ نمودار مقایسه‌ای الگوریتم‌ها را بر حسب این شاخص نمایش می‌دهد. با توجه به شکل و ماهیت این شاخص که هر چه بیشتر باشد بهتر است، پیداست که الگوریتم MOHS عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به الگوریتم NSGAI داشته است.



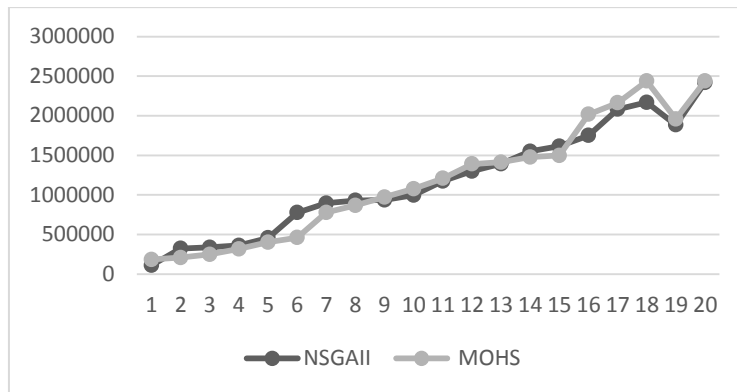
شکل شماره (۱۰): نمایش شاخص Diversity برای الگوریتم‌های مقاله

برای شاخص MID (هر الگوریتمی مقدار کمتری داشته باشد کارایی بهتری دارد) طبق شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت رتبه‌ی الگوریتم‌ها به این صورت است که MOHS رتبه اول الگوریتم NSGAI دوم که الگوریتم MOHS عملکرد بهتری داشته است.



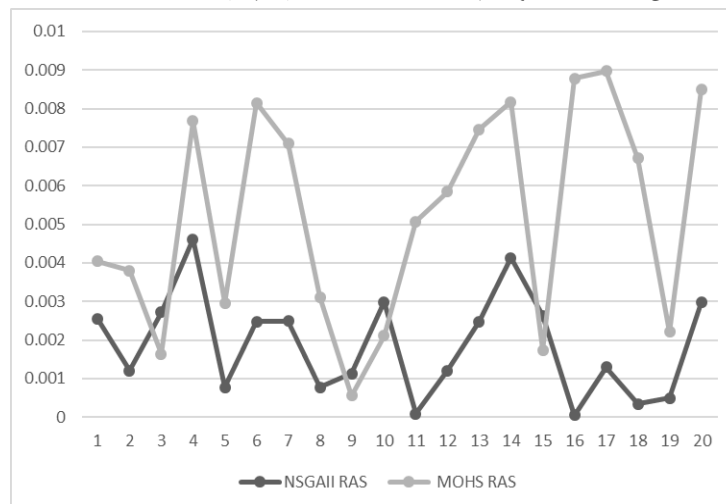
شکل شماره (۱۱): نمایش شاخص MID برای الگوریتم‌های پژوهش

از نظر شاخص Spacing می توان گفت تفاوت چندانی بین دو الگوریتم وجود ندارد که شکل ۱۲ همین موضوع را نمایش می دهد اما در برخی از مسائل الگوریتم MOHS عملکرد بهتری داشته است.



شکل شماره (۱۲): نمایش شاخص Spacing برای الگوریتم های مقاله

آخرین شاخص مورد بررسی در این پژوهش میزان دستیابی همزمان توابع هدف به جواب (RAS) می باشد که همانطور که پیش تر گفته شد دارای ماهیتی منفی (هرچه کمتر - بهتر) می باشد یعنی هر الگوریتمی که مقدار RAS کمتری داشته باشد بهتر است. با توجه به شکل ۱۳ مشخص است که الگوریتم NSGAI عملکرد بهتری داشته است.



شکل شماره (۱۳): نمایش شاخص RAS برای الگوریتم های مقاله

ک) نتیجه کلی مثال عددی

پژوهش حال حاضر مدلی از زنجیره تامین صنعت کاغذسازی است که به بررسی همزمان دو هدف حداقل سازی هزینه های کل زنجیره تامین و حداقل سازی زمان انتظار خدمت دهی در بخش جمع آوری ضایعات تبیین گردیده است که نمودی از نتایج آن با در نظر گرفتن همزمان دو هدف در شکل های شماره ۷ و ۸ برای دو الگوریتم الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه و الگوریتم NSGAI آمده است. علاوه بر آن با توجه به اطلاعات جدول شماره ۴ و ۵ عملکرد دو الگوریتم در ۲۰ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و در آن ۴ و ۵ شاخص زمان، شاخص بیشترین گستردگی پاسخ ها، میانگین انحرافات از جواب ایده آل و شاخص یکنواختی سنجیده شد، که با توجه به برتری الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه در سه شاخص زمان، شاخص بیشترین گستردگی پاسخ ها و میانگین انحرافات از جواب ایده آل، می توان این گونه نتیجه گرفت که عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه برای یافتن جوابی نزدیک به جواب بهینه برای دو تابع هدف در این مدلسازی از کارایی بالاتری برخوردار است.

ل) نتیجه گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در این مقاله، برای اولین بار از تئوری صف برای بهینه سازی تسهیلات بازیافت در مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده شد. در مدل پیشنهادی، برای اولین بار ضایعات به عنوان نهاد صف در نظر گرفته شده و یکی از اهداف مساله، بهینه سازی زمان انتظار این نهاد، با در نظر گرفتن هزینه های اضافه شدن تسهیلات بازیافت است. علاوه بر این، به منظور نزدیک کردن مساله به واقعیت، میزان دور ریز محصول پس از بازیافت، غیر قطعی در نظر گرفته شده است. در ادامه و برای نشان دادن کارایی مدل، از مثال عددی و حل آن توسط الگوریتم فراابتکاری، استفاده شده است. از طرفی و به منظور بررسی کارایی الگوریتم حل فراابتکاری جستجوی هارمونی، مقایسه ای با الگوریتم ژنتیک انجام شده و با استفاده از تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف، برتری این الگوریتم نشان داده شده است. به منظور تحقیقات آتی، موارد زیر پیشنهاد می شود:

- هزینه سفارش در نظر گرفته شود
- ظرفیت محدود برای حمل و نقل در نظر گرفته شود
- هزینه کمبود برای تقاضای مشتریان در نظر گرفته شود.

۴-منابع

1. Aliahmadi, A., Ghahremani-Nahr, J., & Nozari, H. (2023). Pricing decisions in the closed-loop supply chain network, taking into account the queuing system in production centers. *Expert Systems with Applications*, 212, 118741.
2. Alinezhad, A., Hajipour, V., & Mahmoudi, A. (2015). Optimizing Queuing-Inventory Problems under Uncertainty: A Fuzzy Mathematical Programming. *Journal of Industrial Mnagemnet*, 27(9), 17-32.
3. Alinezhad, A., kazemi, A., & Karimi, M. (2020). A Multi-Objective Model for Location-Routing Problem Considering Minimal Risk and Maximal Demand Covering. *Industrial Management Studies*, 18(58), 105-138. doi: 10.22054/jims.2020.36793.2184
4. Asim, Z., Jalil, S. A., & Javaid, S. (2019). An uncertain model for integrated production-transportation closed-loop supply chain network with cost reliability. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 298-310.
5. Askin, R. G., & Hanumantha, G. J. (2018). Queueing network models for analysis of nonstationary manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 22-42.
6. Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N., & Tomaszewska, B. (2021). State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 508, 115035.
7. Baghizadeh, K., Cheikhrouhou, N., Govindan, K., & Ziyarati, M. (2022). Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: A hybrid robust possibilistic programming. *Natural Resource Modeling*, 35(1), e12337.
8. Bathaee, M., Nozari, H., & Szmelter-Jarosz, A. (2023). Designing a new location-allocation and routing model with simultaneous pick-up and delivery in a closed-loop supply chain network under uncertainty. *Logistics*, 7(1), 3.
9. Chang, H. C., Ouyang, L. Y., Wu, K. S., & Ho, C. H. (2006). Integrated vendor-buyer cooperative inventory models with controllable lead time and ordering cost reduction. *European Journal of Operational Research*, 170(2), 481-495.
10. Chin, T. L., Chen, Y. S., & Lyu, K. Y. (2020). Queueing model based edge placement for work offloading in mobile cloud networks. *IEEE Access*, 8, 47295-47303.
11. Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of

- metaheuristics hybridization techniques. *European journal of operational research*, 235(3), 594-615.
12. Dzwigol, H., Dzwigol-Barosz, M., & Kwilinski, A. (2020). Formation of global competitive enterprise environment based on industry 4.0 concept. *International Journal of Entrepreneurship*, 24(1), 1-5.
 13. Ding, J., Chen, X., Sun, H., Yan, W., & Fang, H. (2021). Hierarchical structure of a green supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107303.
 14. Jang, Y. C., Lee, G., Kwon, Y., Lim, J. H., & Jeong, J. H. (2020). Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104798.
 15. Jouyban, F., yousefi, M., & Neyshaboori, E. (2018). Presenting a bi objective stochastic pharmaceutical supply chain model considering time and cost. *Journal of Industrial Mngemnet*, 13(44), 15-28.
 16. Laili, Y., Wang, Y., Fang, Y., & Pham, D. T. (2022). *Optimisation of robotic disassembly for remanufacturing*. Springer.
 17. Mahmoodi, F., & Pouyan far, F. (2020). Drug logistics network design based on the fleet routing by using the improved gray wolf optimizer algorithm. *Journal of Industrial Mngemnet*, 15(53), 96-114
 18. Marić, J., & Opazo-Basáez, M. (2019). Green servitization for flexible and sustainable supply chain operations: A review of reverse logistics services in manufacturing. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 20, 65-80.
 19. Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of cleaner production*, 242, 118452.
 20. Mohammadpour, H., & Alinezhad, A. (2015). A mathematical programming model for location-routing problem and solve it using an efficient meta-heuristic method. *J. Appl. Environ. Biol. Sci*, 5(12S), 579-594.
 21. Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
 22. Rezaee Nik, E., & Asadi Zeidabadi, S. (2023). Comparison of NSGA-II and SPEA2 algorithms in a bi-objective robust scenario-based supply chain considering material waste. *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, (), -. doi: 10.24200/j65.2022.58984.2251.
 23. Seydanlou, P., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Fathollahi-Fard, A. M. (2022). A multi-objective optimization framework for a sustainable closed-loop supply chain network in the olive industry: Hybrid meta-heuristic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 203, 117566
 24. Shahtaheri, Y., Flint, M. M., & de la Garza, J. M. (2019). A multi-objective reliability-based decision support system for incorporating decision maker utilities in the design of infrastructure. *Advanced Engineering Informatics*, 42, 100939.
 25. Soon, A., Heidari, A., Khalilzadeh, M., Antucheviciene, J., Zavadskas, E. K., & Zahedi, F. (2022). Multi-objective sustainable closed-loop supply chain network design considering multiple products with different quality levels. *Systems*, 10(4), 94.
 26. Valizadeh, J., Sadeh, E., Sabegh, Z. A., & Hafezalkotob, A. (2020). Robust optimization model for sustainable supply chain for production and distribution of polyethylene pipe. *Journal of Modelling in Management*, 15(4), 1613-1653.
 27. Viswanadham, N., & Raghavan, N. S. (2001, May). Performance modeling of supply chains using queueing networks. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International*

- Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)* (Vol. 1, pp. 529-534). IEEE.
28. Wierzbicka, A. (2020). Queue theory and improving the customer service process in the city hall—case study. *Organizacja i Zarządzanie: kwartalnik naukowy*.
29. Zhang, H. Y., Xi, S. H., Chen, Q. X., Smith, J. M., Mao, N., & Li, X. (2021). Performance analysis of a flexible flow shop with random and state-dependent batch transport. *International Journal of Production Research*, 59(4), 982-1002.

Designing an Optimal Recycling Model in a Four-Level Closed-Loop Supply Chain by Queuing Theory and Robust Planning (Case Study: Paper Industry)

Mahdi Alizadeh Beromi

Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: mahdi2496@yahoo.com

Mohammad Ali Afsharkazemi (Corresponding Author)

Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: m_afsharkazemi@iauec.ac.ir

Mohammad Ali Keramati

Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abbas Toloie Ashlaghi

Faculty of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, the growing industrial and economic competition, environmental concerns, and governmental pressures on manufacturers regarding waste management have underscored the significance of designing a reverse supply chain and closed-loop network. Simultaneously, the potential for profit arising from product recycling has further emphasized the importance of these systems. This research focuses on developing a four-stage closed-loop network model for the supply chain, taking into account the uncertainty of product recycling rates. The primary objective of this study is to provide an integer linear programming model aimed at minimizing supply chain costs and customer service time under uncertain conditions. The supply chain model is designed by integrating queuing theory and product recycling system optimization. A critical aspect of this research involves modeling the uncertainty in the return rate of consumer products in the closed-loop supply chain, with the aim of developing a robust approach to address this issue. Additionally, the performance of the proposed model in the paper industry is evaluated, and a sensitivity analysis is conducted with respect to the decision variables using two metaheuristic algorithms: the Multiple Objective Harmony Search and the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm.

Keywords: Closed-loop supply chain, mixed linear programming, multi-objective metaheuristic algorithms, queuing theory, robust programming