

ارائه مدل توام قیمت‌گذاری و مسیریابی موجودی در زنجیره تامین دو سطحی حلقه بسته

محمد محمدنژاد*، عیسی نخعی کمال آبادی**، رامین صادقیان⁺، فردین احمدی زر^x

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۰۱

چکیده

این مقاله مسئله قیمت‌گذاری محصول در زنجیره تامین حلقه بسته چند دوره‌ای چند محصولی با تقاضای وابسته به قیمت را بررسی می‌کند. هدف، اختصاص مکان برای مرکز جمع‌آوری و دمونتاژ، مسیریابی وسایل نقلیه و سفارش‌دهی مواد به منظور به حداکثر رساندن سود است. در این مقاله یک مدل ریاضی غیرخطی برای حل مسائل در ابعاد کوچک ارائه شده است. از آنجا که مسئله حاضر دارای پیچیدگی سخت است، دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ استفاده شده است. برای اعتبارسنجی این دو الگوریتم، نتایج آنها با نتایج به دست آمده از مدل ریاضی مورد مقایسه قرار گرفته است. نهایتاً، مقایسه عملکرد دو الگوریتم فراابتکاری از طریق تحلیل‌های آماری نشان داده است که الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

طبقه‌بندی JEL: G35, C13, Z14

واژگان کلیدی: زنجیره تامین حلقه بسته، قیمت‌گذاری، ناوگان حمل‌ناهمگن، دریافت و تحویل همزمان، الگوریتم تجمع ذرات، الگوریتم ژنتیک.

* دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور (نویسنده مسئول)، تهران، ایران، پست الکترونیکی:

mmohammadnejad@razi.ac.ir

nakhai@modares.ac.ir

** استاد مهندسی صنایع دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، پست الکترونیکی:

ramtin_sadeghian@yahoo.com

⁺ استادیار مهندسی صنایع دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، پست الکترونیکی:

f.ahmadizar@uok.ac.ir

^x دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، پست الکترونیکی:

۱. مقدمه

در فضای رقابتی کنونی، برخورداری از یک زنجیره تأمین کارا و اثربخش یک مزیت رقابتی برای سازمان‌ها محسوب می‌شود که می‌تواند ضامن بقای سازمان‌ها در بازار باشد. یکی از راه‌های نیل به این هدف، افزایش بهره‌وری و اثربخشی فعالیت‌های لجستیکی زنجیره تأمین است. آنچه که در جریان سنتی کالا وجود دارد و مدیران صنایع بر آن تأکید می‌ورزند، جریان رو به جلوی مواد و محصولات است که عمدتاً از سمت تأمین‌کنندگان به سمت تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و نهایتاً مشتریان جریان دارد. اما در بسیاری از صنایع، جریان مهم دیگری نیز در زنجیره‌های تأمین وجود دارد که به صورت معکوس شکل گرفته و در آن محصولات از سطوح پایینی زنجیره تأمین به سطوح بالاتر جریان می‌یابند.

عوامل محرک شرکت‌ها برای برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل لجستیک معکوس را می‌توان در سه دسته اصلی الزامات قانونی، حساسیت‌های محیط زیستی و سودآوری اقتصادی گنجانده. در حقیقت، نگرانی‌ها نسبت به عوامل زیست محیطی و اجتماعی موجب توجه ویژه کشورها به لجستیک معکوس برای استفاده مجدد از کالاهای مصرف شده و جلوگیری از آسیب‌رسانی آن‌ها به محیط زیست شده است؛ به گونه‌ای که در بسیاری از کشورها قوانین الزام‌آور برای جمع‌آوری محصولات اسقاطی و برگشتی وضع گردیده است. از سوی دیگر، منافع اقتصادی و سود حاصل از استفاده مجدد از کالاهای مصرف شده نیز موجب استقبال شرکت‌ها از ایجاد و مدیریت شبکه‌های لجستیک معکوس گشته است.

اگرچه مقالات پژوهشی متعددی به حوزه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند، اما به مسئله قیمت‌گذاری و تاثیر آن بر این نوع زنجیره آن چنان که باید، توجه نشده است. بنابراین، در این تحقیق، یک زنجیره تأمین حلقه بسته با دو سطح تولیدکننده و مشتریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشتریان این زنجیره دارای تقاضا از محصولات متفاوت هستند که مقدار این تقاضا تابعی از قیمت تعیین شده توسط تولیدکننده است. این وابستگی به صورت خطی وجود دارد به طوری که یک حداقل قیمت و یک حداکثر قیمت برای محصول وجود دارد که متناسب با آن به ترتیب حداقل و حداکثر تقاضا تعریف شده است که تعیین هر قیمت در این بازه به تناسب باعث تغییر میزان تقاضا در بازه حداقل و حداکثر آن می‌گردد. همچنین محصولات تولید شده با توجه به قیمت تعیین شده از کیفیت مشخص برخوردارند. اثر این کیفیت در نرخ

کالای معیوب نمایان می‌گردد. رابطه تعداد محصولات معیوب و قیمت نیز همانند رابطه تقاضا و قیمت به طور مشابه تعریف می‌شود. محصولات معیوب چنانچه به مشتری ارسال گردند در دوره بعدی به عنوان برگشتی از آن‌ها دریافت شده و در مرکز جمع‌آوری و دمونتاز پس از دمونتاز به مواد اولیه محصولات تبدیل می‌شوند. درصدی از این مواد اولیه قابل استفاده به تولیدکننده بازمی‌گردند و مابقی آن‌ها به عنوان ضایعات فروخته می‌شوند. مدل پیشنهادی به دنبال تعیین قیمت محصولات، سفارش‌دهی مواد اولیه، تعیین مکان مرکز جمع‌آوری و انتخاب و تعیین مسیر وسایل حمل و نقل است؛ به طوری که سود زنجیره حداکثر گردد.

۲. مروری بر ادبیات

در این بخش، تحقیقات انجام شده در حوزه قیمت‌گذاری، مسیریابی و کنترل موجودی در زنجیره تامین حلقه بسته بیان می‌شود.

وی و ژا^۱ (۲۰۱۱) مسئله قیمت‌گذاری بهینه در یک زنجیره تامین حلقه بسته فازی شامل یک تولیدکننده و دو خرده‌فروش را با فرض رقابت بین خرده‌فروشان در نظر گرفتند. در این مطالعه با استفاده از نظریه بازی‌ها و نظریه فازی در مورد قیمت عمده فروشی، قیمت‌های خرده‌فروشی و نرخ تولید مجدد تصمیم‌گیری می‌شود.

چن و همکاران^۲ (۲۰۱۳) از دو تکنیک برنامه‌ریزی پویا و آزادسازی لاگرانژ در حل مسئله قیمت‌گذاری محصولات نو و تولید مجدد شده استفاده کرده‌اند. نتایج تحلیلی و عددی این مطالعه بیانگر این است استراتژی قیمت‌گذاری به شدت به نوع بازارها، هزینه صرفه‌جویی شده از محصولاتی که تولید مجدد شده‌اند و ضریب جانشینی بستگی دارد. هانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۵) از بهینه‌سازی دو سطحی و مدل‌های بازی استکلبرگ به منظور بررسی تصمیمات بهینه برای سرمایه‌گذاری تبلیغات محلی، نرخ جمع‌آوری محصولات مستعمل و قیمت‌گذاری در زنجیره‌های تامین حلقه بسته متمرکز و غیرمتمرکز استفاده کرده‌اند.

¹ Wei & Zhao

² Chen

³ Hong

کایا و همکاران^۱ (۲۰۱۶) یک مدل مکان‌یابی، موجودی و قیمت‌گذاری غیرخطی عدد صحیح مختلط را در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه نمودند. مدل پیشنهادی، تصمیمات مربوط به مکان‌های بهینه مراکز جمع‌آوری و توزیع، مقادیر بهینه موجودی که بین تسهیلات باید حمل شوند، قیمت محصولات نو و مقادیر انگیزشی پیشنهادی به مشتریان برای جمع‌آوری محصولات مستعمل را در نظر می‌گیرد و هدف بیشینه کردن کل سود زنجیره را دنبال می‌نماید.

دث لف^۲ (۲۰۰۱) برای مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با دریافت و تحویل همزمان در لجستیک معکوس مدلی ارائه نمود و سپس به مقایسه مسئله مطرح شده با سایر مسایل مسیریابی وسایل حمل و نقل و حل آن با یک الگوریتم ابتکاری پرداخت.

الشمرانی و همکاران^۳ (۲۰۰۷) مدلی جهت عملیات توزیع خون توسط صلیب سرخ آمریکا ارائه داده‌اند که در آن به طور همزمان به طراحی مسیرهای تحویل و راهکارهای بازگشت مواد پرداخته می‌شود. کاسم و همکاران^۴ (۲۰۱۳) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را به منظور بهینه‌سازی یک مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با دریافت و تحویل همزمان در شبکه لجستیک حلقه بسته ارائه نمودند. در این مقاله برای مسیرهای حمل و نقل یک محدودیت پنجره زمانی در نظر گرفته شده و تابع هدف به صورت کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل مطرح گردیده است. هو و همکاران^۵ (۲۰۱۵) یک مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با دریافت و تحویل همزمان در زنجیره تأمین حلقه بسته را مورد بررسی قرار دادند که در آن ناسازگاری بین کالاهای دریافتی و تحویلی در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی به کمینه‌سازی هزینه حمل، ناسازگاری و تعداد مشتریانی که دو بار بازدید می‌شوند، می‌پردازد و برای حل آن از یک روش حل دو مرحله‌ای بر اساس جستجوی همسایگی متغیر استفاده شده است.

¹ Kaya

² Dethloff

³ Alshamrani

⁴ Kassem

⁵ Hu

فلیشمن و همکاران^۱ (۲۰۰۳) مسئله کنترل موجودی در یک مدل لجستیک معکوس را مورد مطالعه قرار داده‌اند که در آن با استفاده از فرآیند مارکوف به بررسی تأثیر میزان برگشت محصول بر برنامه بهینه موجودی پرداخته می‌شود. ژو و همکاران^۲ (۲۰۰۶) یک سیستم ترکیبی تولید/ تولید مجدد پیشنهاد کرده‌اند که در آن به وسیله نظریه کنترل و شبیه‌سازی، عملکرد پویای سیستم ترکیبی تجزیه و تحلیل می‌شود. چانگ و همکاران^۳ (۲۰۰۸) یک سیستم موجودی چند سطحی با قابلیت تولید مجدد را در زنجیره تامین حلقه بسته بررسی نمودند و سیاستی را برای تولید و دوباره‌پس‌سازی بهینه پیشنهاد کردند به گونه‌ای که سود مشترک تامین‌کننده، تولیدکننده، بازیافت‌کننده طرف سوم و خرده‌فروش بیشینه شود. هسو^۴ (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر دوره عمر محصول (معرفی، رشد، بلوغ و نزول) بر سیاست‌های کنترل موجودی در یک سیستم تولید / تولید مجدد و تعیین اندازه دسته تولید بهینه، نقطه سفارش مجدد و موجودی اطمینان در هر مرحله از دوره عمر محصول پرداخته است.

میترا^۵ (۲۰۱۲) مسئله مدیریت موجودی را در زنجیره‌های تامین حلقه بسته دو سطحی بررسی نموده و با در نظر گرفتن هزینه‌های آماده‌سازی، نگهداری موجودی و کمبود، مدل‌های قطعی و احتمالی را توسعه داده است. هدف مدل‌های توسعه یافته، تعیین مقادیر متغیرهای سیاست موجودی در همه سطوح است؛ به نحوی که کل هزینه‌های سیستم کمینه گردد.

پلز^۶ (۲۰۱۳) یک سیستم تولید - موجودی را برای تولید مجدد با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی سیستم‌های پویا مدل کرده است. هدف این مقاله بررسی پویایی فرآیند تولید مجدد و ارزیابی استراتژی‌های بهبود سیستم است. عسل نجفی و همکاران^۷ (۲۰۱۵) یک مسئله مکان‌یابی - موجودی در زنجیره تامین حلقه بسته چند محصولی را مورد بررسی قرار دادند که تصمیمات استراتژیک (مکان‌یابی مراکز توزیع و مراکز دوباره‌کاری) و تصمیمات تاکتیکی (تخصیص مراکز و مدیریت موجودی) را تحت ریسک در دسترس نبودن تسهیلات بهینه

¹ Fleischmann

² Zhou

³ Chung

⁴ Hsueh

⁵ Mitra

⁶ Poles

⁷ Asl-Najafi

می‌نماید. ماواندیا و همکاران^۱ (۲۰۱۵) یک مدل تولید - موجودی را در زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای دو سطحی شامل یک تولیدکننده، یک تولیدکننده مجدد و یک خرده فروش ارایه دادند. این مطالعه به دنبال یافتن یک سیاست تولید - موجودی بهینه برای اعضای زنجیره تأمین است به گونه‌ای که کل هزینه‌های مشترک دو سطح زنجیره تأمین حلقه بسته کمینه گردد. بررسی مطالعات انجام شده در دهه‌های اخیر نشان می‌دهد، با توجه به اهمیت زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن مباحث زیست محیطی و محدودیت منابع، توام قیمت‌گذاری در مسایل مسیریابی موجودی حلقه بسته با در نظر گرفتن سیاست‌های استراتژیک که می‌تواند در تشخیص توجیه‌پذیری زنجیره مورد استفاده قرار گیرد، مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق به بررسی این دست از مسایل جهت پوشش خلاء موجود در مسایل زنجیره تأمین بالاخص زنجیره تأمین محصولاتی که قابلیت دمونتاژ و استفاده مجدد دارند همانند زنجیره تأمین قطعات یدکی وسایل نقلیه پرداخته شده است.

۳. روش تحقیق

در این بخش، ابتدا به تشریح مسئله و تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم پرداخته می‌شود. سپس، مدل ریاضی مسئله مورد نظر در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی فرموله می‌گردد. در نهایت نیز به توصیف مدل توسعه یافته و محدودیت‌های آن پرداخته خواهد شد. در این تحقیق، یک زنجیره تأمین حلقه بسته با دو سطح تولیدکننده و مشتریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشتریان این زنجیره دارای تقاضا از محصولات متفاوت هستند که مقدار این تقاضا تابعی از قیمت تعیین شده توسط تولیدکننده است. جهت تأمین تقاضای مشتریان، تولیدکننده نیاز به مواد اولیه متفاوت دارد که آن‌ها را در ابتدای هر دوره می‌تواند سفارش دهد. از آن‌جا که قیمت مواد اولیه در دوره‌های مختلف متفاوت است، برای کاهش هزینه‌های خرید و سفارش‌دهی، تولیدکننده با توجه به هزینه‌های نگهداری، برای دوره‌های آتی نیز سفارش می‌دهد. مدت زمان بین سفارش و تحویل ناچیز در نظر گرفته شده است. محصولات تولید شده توسط تولیدکننده قیمت‌گذاری شده و با توجه به قیمت تعیین شده از کیفیت مشخص

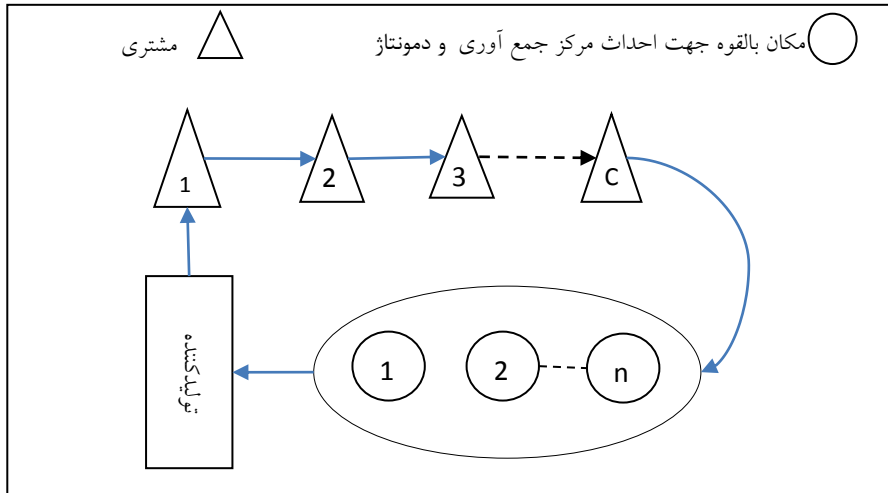
^۱ Mawandiya

برخوردارند که اثر این کیفیت در نرخ کالای معیوب نمایان می‌گردد. به عبارت دیگر، هرچه قیمت بالاتری برای محصولات تعیین گردد، درصد محصولات معیوب بین آن‌ها کمتر می‌گردد.

گفتنی است محصولات معیوب در هر دوره توسط مشتریان شناسایی شده و در دوره بعدی برگشت داده می‌شوند. محصولات برگشتی در مرکزی به نام مرکز جمع‌آوری که مکان آن از بین مکان‌های بالقوه انتخاب می‌گردد، گردآوری شده و پس از دمونتاژ به مواد اولیه تبدیل می‌شوند. درصدی از این مواد اولیه قابل استفاده هستند که به تولیدکننده منتقل می‌شوند و مابقی آن‌ها به عنوان ضایعات فروخته می‌شوند.

در این زنجیره، انتقال محصولات از طریق مسیردهی وسایل حمل صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، مجموعه‌ای از وسایل حمل با هزینه‌ها و ظرفیت‌های مشخص وجود دارند که در هر دوره جهت ارسال محصولات انتخاب می‌شوند. در هر دوره وسیله حملی که به هر یک از مشتریان سرویس‌دهی می‌کند، تعیین می‌گردد. هر یک از آن‌ها حرکت خود را از تولیدکننده آغاز نموده و جهت تحویل تقاضاها و دریافت برگشتی‌ها به مشتریانی که به آن تخصیص داده شده مراجعه نموده و پس از آن به منظور تحویل برگشتی‌ها و دریافت مواد اولیه به مرکز جمع‌آوری و دمونتاژ رفته و در انتهای مسیر مجدداً به تولیدکننده باز می‌گردند. در هر دوره از یک تا حداکثر ۷ وسیله حمل و نقل را می‌توان مورد استفاده قرار داد و هیچ یک از آن‌ها نمی‌توانند در طی مسیر بیش از ظرفیت خود بارگیری نمایند.

در این مسئله به دنبال تعیین قیمت محصولات، سفارش‌دهی مواد اولیه، تعیین مکان مرکز جمع‌آوری و دمونتاژ و انتخاب و تعیین مسیر وسایل حمل و نقل هستیم؛ به گونه‌ای که سود مجموعه که ناشی از درآمد حاصل از فروش محصولات و مواد اولیه اسقاطی منهای هزینه‌های زنجیره اعم از هزینه‌های خرید مواد اولیه، سفارش‌دهی، نگهداری، وسایل حمل و احداث مکان مرکز جمع‌آوری و دمونتاژ است، حداکثر گردد. شکل (۱)، نمایی از مسئله زنجیره تامین حلقه بسته ارائه شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمایش گرافیکی مسئله زنجیره تامین حلقه بسته

۱-۳. معرفی مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم

مجموعه‌ها

M : مجموعه محصولات

N : مجموعه تمامی گره‌ها است که شامل تولید کننده (گره اول) گره‌های مجموعه C (مجموعه مشتریان) و مجموعه L (مجموعه مکان‌های بالقوه جهت احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز) است.

R : مجموعه مواد اولیه

V : مجموعه وسایل حمل

T : مجموعه دوره‌های زمانی

پارامترها

γ_m^{\max} : حداکثر نرخ معیوب بودن محصول m

γ_m^{\min} : حداقل نرخ معیوب بودن محصول m

ϕ_r : درصدی از مواد اولیه r حاصل از محصولات معیوب که قابلیت استفاده مجدد دارند

- W_m : ضریب حجمی هر واحد ماده محصول m ام
- FL_j : هزینه احداث مرکز جمع آوری و دمونتاز در مکان بالقوه j ام
- CV_l : ظرفیت وسیله حمل l ام
- S_{mt}^{\max} : حداکثر قیمت ممکن برای محصول m در دوره t ام
- S_{mt}^{\min} : حداقل قیمت ممکن برای محصول m در دوره t ام
- FV_{lt} : هزینه به کارگیری وسیله حمل l در دوره t ام
- DV_{lt} : هزینه سفر وسیله حمل l به ازای یک واحد مسافت در دوره t ام
- SR_{rt} : قیمت فروش ماده اولیه غیرقابل استفاده r در دوره t ام
- α_{jmt}^{\max} : حداکثر تقاضای مشتری j از محصول m در دوره t ام
- α_{jmt}^{\min} : حداقل تقاضای مشتری j از محصول m در دوره t ام
- h_{rt} : هزینه نگهداری یک واحد ماده اولیه r در انبار تولیدکننده در دوره t ام
- CR_{mr} : نرخ مصرف ماده اولیه r در محصول m ام
- A_{rt} : هزینه سفارش‌دهی برای ماده اولیه r در دوره t ام
- PB_{rt} : هزینه خرید هر واحد ماده اولیه r در دوره t ام
- $Dist_{ij}$: فاصله بین دو گره i و j
- LA : یک عدد بزرگ دلخواه

متغیرهای تصمیم:

- LR_{lt} : حجم بارگیری وسیله حمل l در لحظه خروج از تولیدکننده در دوره t ام
- S_{mt} : قیمت فروش محصول m در دوره t ام
- RW_{rt} : تعداد مواد اولیه نوع r که در دوره t ام بازیافت می‌شود
- Z_{jlt} : متغیر مربوط به حذف زیرتور وسیله حمل l در مسیر گره j در دوره t ام
- D_{jmlt} : تعداد محصول m که توسط وسیله حمل l به مشتری j در دوره t تحویل داده می‌شود.
- P_{jmlt} : تعداد محصول برگشتی m که توسط وسیله حمل l از مشتری j در دوره t دریافت می‌شود.

LC_{jlt} : حجم بار وسیله حمل l در لحظه خروج از مشتری زد در دوره t ام

I_{rt} : میزان موجودی ماده اولیه r در انبار تولیدکننده در دوره t ام

Q_{rt} : مقدار سفارش ماده اولیه r در دوره t ام

X_{ijlt} : متغیر باینری است و برابر با ۱ است در صورتی که وسیله حمل l در دوره t در طول

مسیر خود از گره i به گره j حرکت کند

Y_j : متغیر باینری است و برابر با ۱ است در صورتی که مرکز جمع‌آوری و دمونتاز در محل j

احداث گردد

O_{rt} : متغیر باینری است و برابر با ۱ است در صورتی که ماده اولیه r در دوره t سفارش داده

شود

V_{lt} : متغیر باینری، برابر با ۱ است در صورتی که از وسیله حمل نوع l در دوره t استفاده شود.

۲-۳. مدل‌سازی مسئله

(۱-۵)

$$\begin{aligned} MaxZ = & \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} D_{jmlt} S_{mt} + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} SR_{rt} P_{jmlt} CR_{mr} \\ & - \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} P_{jmlt} S_{mt} - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} O_{rt} A_{rt} - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} PB_{rt} Q_{rt} - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} I_{rt} h_{rt} \\ & - \sum_{t \in T} \sum_{l \in V} v_{lt} FV_{lt} - \sum_{t \in T} \sum_{l \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} X_{ijlt} DV_{lt} Dist_{ij} - \sum_{k \in L} Y_k FL_k \end{aligned}$$

Subject to:

$$\sum_{l \in V} D_{jmlt} < 1 + \alpha_{jmt}^{\max} - \frac{\alpha_{jmt}^{\max} - \alpha_{jmt}^{\min}}{S_{mt}^{\max} - S_{mt}^{\min}} (S_{mt} - S_{mt}^{\min}) \quad j \in C, m \in M, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{l \in V} D_{jmlt} \geq \alpha_{jmt}^{\max} - \frac{\alpha_{jmt}^{\max} - \alpha_{jmt}^{\min}}{S_{mt}^{\max} - S_{mt}^{\min}} (S_{mt} - S_{mt}^{\min}) \quad j \in C, m \in M, t \in T \quad (2)$$

$$I_{rt} = I_{r,t-1} + Q_{rt} + RW_{rt} - \sum_{l \in V} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} D_{jmlt} CR_{mr} \quad r \in R, t \in T, t > 1 \quad (3)$$

$$Q_{rt} \leq O_{rt} LA \quad r \in R, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{l \in V} P_{jmlt} < 1 + \gamma_m^{\max} - \frac{\gamma_m^{\max} - \gamma_m^{\min}}{S_{mt}^{\max} - S_{mt}^{\min}} (S_{mt} - S_{mt}^{\min}) \sum_{l \in V} D_{jmlt-1} \quad j \in C, m \in M, t \in T, t > 1$$

$$\sum_{l \in V} P_{jmlt} \geq \gamma_m^{\max} - \frac{\gamma_m^{\max} - \gamma_m^{\min}}{S_{mt}^{\max} - S_{mt}^{\min}} (S_{mt} - S_{mt}^{\min}) \sum_{l \in V} D_{jmlt-1} \quad j \in C, m \in M, t \in T, t > 1$$

$$\sum_{l \in V} \sum_{i \in l, C} X_{ijlt} = 1 \quad j \in C, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in l, C} X_{ijlt} = \sum_{i \in C, L} X_{jilt} \quad j \in C, l \in V, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in C} X_{iilt} \leq v_{lt} \quad l \in V, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j \in L} Y_j = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in L} X_{iilt} \leq Y_i LA \quad l \in V, t \in T \quad (11)$$

$$v_{lt} \leq \frac{\sum_{i \in C} X_{iilt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in L} X_{ijlt} + \sum_{i \in L} X_{iilt}}{3} \quad l \in V, t \in T \quad (12)$$

$$Z_{jlt} > Z_{ilt} - (1 - X_{ijlt}) LA \quad i, j \in N, l \in V, t \in T \quad (13)$$

$$RW_{rt} < 1 + \varphi_r \sum_{l \in V} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} P_{jmlt} CR_{mr} \quad r \in R, t \in T \quad (14)$$

$$RW_{rt} \geq \varphi_r \sum_{l \in V} \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} P_{jmlt} CR_{mr} \quad r \in R, t \in T \quad (15)$$

$$LR_{lt} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in C} D_{jmlt} w_m \quad l \in V, t \in T \quad (16)$$

$$LC_{ilt} \geq LR_{lt} - \sum_{m \in M} D_{imlt} w_m + \sum_{m \in M} P_{imlt} w_m - (1 - X_{iilt}) LA \quad i \in C, l \in V, t \in T \quad (17)$$

$$LC_{jlt} \geq LC_{ilt} - \sum_{m \in M} D_{jmlt} w_m + \sum_{m \in M} P_{jmlt} w_m - (1 - X_{ijlt}) LA \quad i, j \in C, l \in V, t \in T \quad (18)$$

$$LR_{lt} \leq CV_l v_{lt} \quad l \in V, t \in T \quad (19)$$

$$LC_{ilt} \leq CV_l v_{lt} \quad i \in C, l \in V, t \in T \quad (20)$$

$$S_{mt}^{\max} \leq S_{mt} \leq S_{mt}^{\max} \quad m \in M, t \in T \quad (21)$$

$$X_{ijlt}, Y_j, Z_{jlt}, O_{rt}, v_{lt} \in \{0,1\} \quad i, j \in N, l \in V, t \in T \quad (22)$$

$$D_{jmlt}, P_{jmlt}, \text{ and } RW_{rt} \text{ are integer} \quad j \in C, t \in T \quad (23)$$

۳-۳. توصیف تابع هدف و محدودیت‌ها

معادله اول مربوط به تابع هدف مسئله است که به دنبال حداکثرسازی سود می‌باشد. عبارت‌های اول و دوم این معادله شامل درآمد ناشی از فروش محصولات و ضایعات است که مجموع هزینه‌ها از این درآمد کسر می‌شود. هزینه‌ها در بخش سوم الی نهم تابع هدف به ترتیب شامل جریمه ارائه محصولات معیوب به مشتریان که معادل برگشت قیمت کالا است، هزینه سفارش‌دهی، هزینه خرید مواد اولیه، هزینه نگهداری مواد، هزینه به کارگیری وسایل حمل، هزینه سفر وسایل حمل، هزینه احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز است.

محدودیت‌های (۱) و (۲) تواما مقدار تقاضای وابسته به قیمت هر محصول برای هر مشتری در دوره‌ها را تعیین می‌نمایند. معادله (۳) مقدار موجودی مواد اولیه در هر دوره در انبار تولیدکننده را نمایش می‌دهد. محدودیت (۴) تضمین می‌نماید که در صورتی می‌توان در یک دوره یک ماده اولیه خرید که سفارشی انجام شود. محدودیت (۵) و (۶) مقدار برگشتی محصولات هریک از مشتریان را در هر دوره مشخص می‌نمایند که با استفاده از تابعی خطی از قیمت محصولات به دست می‌آید. معادله (۷) ملزم می‌نماید که در هر دوره سرویس‌دهی به هر یک از مشتریان انجام گیرد. معادله (۸) بیان می‌نماید که در صورتی که یک وسیله حمل در یک دوره به یک گره وارد شود باید از آن خارج گردد. محدودیت (۹) تضمین می‌نماید در صورتی که یک وسیله حمل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که حرکت خود را از تولیدکننده شروع نماید. معادله (۱۰) بیان می‌نماید که یکی از نقاط بالقوه باید به منظور احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز انتخاب گردد. محدودیت (۱۱) سبب می‌شود هیچ وسیله حملی از مکان بالقوه‌ای که به منظور مرکز جمع‌آوری و دمونتاز انتخاب نشده است، حرکت نمی‌کند. بنابراین براساس محدودیت (۸) هیچ ورودی نخواهد داشت. محدودیت (۱۲) باعث می‌شود که در صورتی که وسیله حمل، در صورت به کارگیری، باید مسیر خود را از تولیدکننده آغاز و پس از گذر از مشتریان به مرکز جمع‌آوری و دمونتاز رفته و در نهایت به تولیدکننده بازگردد.

محدودیت (۱۳) جهت حذف زیرتور هر یک از وسایل حمل در هر دوره به کار می‌رود. به عنوان مثال، اگر در یک مسیر ۵ گره وجود داشته باشد و ترتیب رفتن به گره‌ها به صورت ۵، ۲، ۱، ۳ و ۴ باشد طبق این محدودیت باید به هر گره یک عدد اختصاص داد که مقدار آن از عدد مربوط به گره قبل آن بیشتر و از گره بعد آن کمتر باشد. در این نمونه فرض کنید مقادیر این اعداد برای گره‌های ۵، ۲، ۱، ۳ و ۴ به ترتیب ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳، ۱۰۴ و ۱۰۵ است. در صورتی که در این مسیر زیرتوری به صورت ۲، ۱، ۳ و ۲ ایجاد شود، مقادیر مربوط به ۱ و ۳ نمی‌توانند همزمان از ۲ به دلیل اینکه بعد از آن هستند بیشتر و به دلیل آن که به آن برمی‌گردند کمتر باشند.

گفتنی است در این محدودیت اعداد تنها به گره‌های مشتری اختصاص می‌یابند و برگشت به مرکز جمع‌آوری و مونتاژ در انتهای مسیر با این محدودیت مغایر نیست. محدودیت (۱۴) و (۱۵) تعداد مواد اولیه قابل استفاده‌ای که از محصولات برگشتی به دست می‌آید را محاسبه می‌نماید. معادله (۱۶) میزان حجم بارگیری شده وسایل حمل در لحظه خروج از تولیدکننده را تعیین می‌نماید. محدودیت (۱۷) حجم بار هر وسیله حمل را در هنگام خروج از اولین مشتری در مسیر که بلافاصله بعد از تولیدکننده وجود دارد محاسبه می‌نماید. محدودیت (۱۸) حجم بار هر وسیله حمل را در هنگام خروج از هر مشتری را در مسیر وسیله حمل محاسبه می‌نماید. محدودیت (۱۹) موجب می‌شود حجم بار وسیله حمل در لحظه خروج از تولیدکننده از ظرفیت وسیله مورد نظر فراتر نرود. محدودیت (۲۰) جلوگیری می‌کند که حجم بار وسیله حمل در لحظه خروج از محل هر یک از مشتریان از ظرفیت وسیله مورد نظر فراتر نرود. محدودیت (۲۱) بازه مربوط به قیمت را مشخص می‌نماید. محدودیت (۲۲) و (۲۳) نوع متغیرها را تعیین می‌کنند.

۴. تولید مسئله نمونه در مقیاس کوچک

برای بررسی عملکرد مدل ارائه شده در این بخش، یک مسئله نمونه بیان شده و پس از اجرا نتایج آن بررسی می‌شود. مسئله نمونه در نرم افزار لینگو^{۱۹} اجرا گردید. مسئله نمونه براساس

^۱ LINGO 9

مطالعه زیلاس (۲۰۱۴) بوده و برای مسئله زنجیره تامین حلقه بسته چندمحصولی - چند دوره‌ای ارائه شده در این مقاله تطبیق یافته است.

مسئله نمونه زنجیره تامین ارائه شده در این بخش شامل ۱۰ مشتری، ۳ مکان بالقوه جهت احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز است که هزینه احداث در هریک از مکان‌ها (FL_i) به ترتیب ۶۷۰۰۰۰، ۸۶۰۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰ است. تعداد وسایل حمل برابر با ۲ بوده که ظرفیت هریک از آن‌ها (CV_i) به ترتیب ۱۷۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰ است. سه نوع ماده اولیه وجود دارد که ضریب حجمی (w_i) آن‌ها به ترتیب ۱، ۲ و ۱ بوده و نرخ مواد قابل استفاده پس از عملیات دمونتاز برای آن‌ها (ϕ_i) به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۷۴ است. تعداد محصولات نیز برابر با ۲ است که ضریب حجمی آن‌ها (w_m) به ترتیب ۹ و ۶ است. این نمونه برای ۲ دوره برنامه‌ریزی است. همچنین ضریب مصرف مواد اولیه در محصول ۱ به ترتیب ۱، ۱ و ۳ و در محصول ۲ به ترتیب برابر با ۳، ۱ و ۳ می‌باشد.

با اجرای مسئله ارائه شده با هدف حداقل کردن هزینه‌ها، نتیجه مدل پس از صرف زمان ۱۲ دقیقه به دست آمده است که حداقل کل هزینه زنجیره برابر با ۷۰۸۲۲۷۰۶ بوده که هزینه‌های سفارش‌دهی، خرید، نگهداری، به کارگیری وسایل حمل، مسیردهی وسایل حمل و احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز به ترتیب برابر با ۲۲۴۳۵۰۰، ۶۵۵۶۹۸۱۰، ۱۲۰۰۷۲۶، ۴۹۰۰۰۰، ۶۴۸۶۷۰ و ۶۷۰۰۰۰ می‌باشد. مکان ۱ برای احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز انتخاب شده است. در دوره اول هر دو وسیله حمل به کار گرفته شدند که وسیله اول از تولیدکننده به ترتیب به مشتری‌های ۹، ۶، ۵، ۷، ۱۰ رفته و پس از رفتن به مرکز جمع‌آوری و دمونتاز به تولیدکننده باز می‌گردد. در همین دوره مشتریان ۲، ۸، ۳، ۴ و ۱ به ترتیب توسط وسیله حمل دوم سرویس‌دهی می‌شوند. در دوره دوم نیز تنها وسیله حمل دوم استفاده می‌شود و پس از خدمت‌دهی به ترتیب مشتریان ۸، ۲، ۹، ۶، ۵، ۷، ۱۰، ۱، ۳ و ۴ مرکز جمع‌آوری و دمونتاز رفته و از آنجا به تولیدکننده باز می‌گردد.^۱

^۱ به دلیل رعایت اختصار، بیشتر داده‌های مسئله غیرضروری، اعم از ورودی و خروجی، آورده نشده است. گفتنی است تمام اطلاعات مربوط به این مقاله به صورت کامل در رساله مربوط ارائه شده است.

۵. روش‌های حل پیشنهادی

با توجه به در زمره پیچیدگی سخت بودن مسایل زنجیره تامین حلقه بسته، مسئله پیش رو نیز در زمان معقول برای ابعاد موجود در دنیای واقعی حل شدنی نیست. از این رو، برای حل آن از رویکرد فراابتکاری در قالب الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات استفاده شده است. بدین منظور، پس از معرفی مختصر الگوریتم‌ها، ساختار چگونگی استفاده از آنها به گونه‌ای که برای حل تقریبی این مدل‌ها مناسب باشند، تشریح می‌شوند.

۵-۱. الگوریتم ژنتیک^۱ (GA)

در پی تلاش‌های فراوان برای شبیه‌سازی پدیده تکامل بر کامپیوترها، مفهوم الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار عمومی بهینه‌سازی برای نخستین بار توسط جان هالند (۱۹۷۵) مطرح گردید. الگوریتم‌های ژنتیک، تکنیک‌های جستجوی تصادفی بر اساس مکانیزم انتخاب طبیعی هستند و با الگوبرداری از تکامل ژنتیکی، رویه‌هایی را برای حل مسئله ارائه می‌کنند. این الگوریتم که شکل معمول آن توسط گلدبرگ (۱۹۸۹) معرفی شد، به دلیل شروع با مجموعه‌ای از حل‌های تصادفی اولیه که جمعیت نامیده می‌شوند تا اندازه‌ای از تکنیک‌های جستجوی کلاسیک متفاوت است. این ویژگی سبب می‌شود که به‌جای یافتن نقطه مناسب، محدوده‌های مناسب در فضای متغیرها شناسایی شده و امکان یافتن نقطه بهینه کلی افزایش یابد.

در الگوریتم ژنتیک، هر فرد در جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که ارائه‌دهنده راه حلی برای مسئله است. کروموزوم‌ها از طریق تکرارهای متوالی که نسل نامیده می‌شوند، تکامل می‌یابند و در طول هر نسل، با استفاده از برخی معیارهای برازندگی ارزیابی می‌شوند. برای ایجاد نسل بعدی، کروموزوم‌های جدید که فرزند^۲ نامیده می‌شوند از طریق پیوند دو کروموزوم از نسل کنونی با استفاده از عملگر تقاطع^۳ و اصلاح کروموزوم با استفاده از عملگر جهش^۴، ایجاد می‌شوند. نسل جدید توسط عملگر انتخاب و بر اساس مقادیر برازندگی بعضی از

^۱ Genetic Algorithm (GA)

^۲ Offspring

^۳ Crossover Operator

^۴ Mutation Operator

والدین و فرزندان و حذف بقیه آنها به منظور ثابت نگه داشتن اندازه جمعیت، شکل می‌گیرد. بعد از چندین نسل، الگوریتم به بهترین کروموزوم هم‌گرا می‌گردد (پسندیده و نیاکی، ۲۰۰۸).

۱-۱-۵. نحوه نمایش جواب‌ها

برای نمایش جواب در الگوریتم پیشنهادی از یک کروموزوم با پنج بخش استفاده شده است. از کنار هم قرار گرفتن تمامی این بخش‌ها و پس از رمزگشایی آن، مقادیر هر یک از متغیرهای مسئله به دست می‌آید. از آن جا که از روش اولویت‌بندی در کروموزوم‌ها استفاده شده، بخش عمده محدودیت‌های ظرفیتی در کروموزوم در نظر گرفته می‌شوند. اما با وجود این در برخی حالت‌ها، با توجه به ترتیب تخصیص‌ها ممکن است این کروموزوم به جواب نشدنی منتهی گردد که در آن صورت از استراتژی ردی استفاده شده و جواب جدید تولید و جایگزین می‌گردد. در ادامه هر یک از بخش‌ها به تفصیل تشریح می‌شود.

بخش اول کروموزوم از یک ماتریس به ابعاد $M \times T$ ایجاد شده است. مقادیر درایه‌های این ماتریس قیمت محصولات در هر دوره را نشان می‌دهد. با تعیین قیمت محصول، میزان تقاضا و میزان برگشتی آن قابل محاسبه است که در محاسبات مسئله از آن‌ها استفاده می‌شود. بخش دوم کروموزوم از یک رشته به طول تعداد مکان‌های بالقوه جهت احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز ایجاد شده است. هر درایه از این رشته نماینده یک مکان بالقوه می‌باشد و مقدار آن با یک عدد حقیقی در بازه $[0, 1]$ نمایش داده می‌شود که بیانگر اولویت مکان بالقوه مورد نظر جهت احداث مرکز جمع‌آوری و دمونتاز می‌باشد.

بخش سوم کروموزوم از یک ماتریس با ابعاد $C \times T$ ایجاد شده است. درایه‌های این ماتریس اعداد حقیقی در بازه $[0, V]$ هستند. هر سطر مربوط به یک مشتری و هر ستون متعلق به یک دوره است. از مقدار هر درایه می‌توان دریافت که در دوره مربوطه کدام وسیله حمل به مشتری موردنظر سرویس خواهد داد. بدین منظور، عدد مربوط به درایه به کوچک‌ترین عدد صحیح بزرگ‌تر از آن گرد خواهد شد که عدد به دست آمده، نشان‌دهنده شماره وسیله حملی است که به آن مشتری در آن دوره خدمات ارایه خواهد کرد.

بخش چهارم کروموزوم نیز همانند بخش قبلی از یک ماتریس با ابعاد $C \times T$ تشکیل شده است. درایه‌های این ماتریس اعداد حقیقی در بازه $[0, 1]$ هستند که نشان‌دهنده اولویت سرویس‌دهی به هر یک از مشتری‌ها در هر دوره است و تعیین‌کننده مسیر وسایل حمل هستند.

هر سطر مربوط به یک مشتری و هر ستون متعلق به یک دوره است. پس از مشخص شدن مشتریانی که به هریک از وسایل حمل اختصاص یافتند از بخش سوم کروموزوم، وسایل حمل به ترتیب اولییتی که توسط بخش چهارم کروموزوم مشخص می‌گردد به مشتریان رجوع می‌نمایند. به عنوان مثال از بخش سوم در نمونه قبلی داریم که در دوره اول مشتری‌های ۲ و ۳ توسط وسیله حمل ۳ سرویس‌دهی می‌شوند.

پس از تعیین میزان تقاضای مشتریان با توجه به قیمت تعیین شده در بخش اول کروموزوم می‌توان میزان مواد اولیه مورد نیاز برای تولید این مقدار تقاضا را مشخص نمود که برای نحوه تعیین این مواد اولیه از بخش پنجم کروموزوم استفاده شده است. بنابراین، بخش پنجم کروموزوم مربوط به نحوه سفارش‌دهی برای مواد اولیه توسط تولیدکننده می‌باشد. این بخش از یک ماتریس با ابعاد $R \times T$ تشکیل شده است. درایه‌های این ماتریس مقادیر حقیقی با توزیع نرمال استاندارد هستند که میزان سفارش تولیدکننده در هر دوره را معین می‌نماید.

عملگر تقاطع

در این مسئله از دو نوع عملگر تقاطع استفاده شده است که به صورت ترکیبی از آنها جهت تولید جواب استفاده می‌گردد. عملگر تقاطع مورد استفاده در این الگوریتم، براساس یک ماتریس راهنما ایجاد می‌گردد. این ماتریس راهنما دارای درایه‌های باینری است و برای هریک از بخش‌ها کروموزومی به صورت جداگانه با ابعادی برابر همان بخش وجود دارد. در این روش، بر والدینی که از طریق رویکرد چرخ رولت انتخاب شده‌اند، عملگر تقاطع اعمال می‌شود. بدین ترتیب برای هر یک از درایه‌ها در هر یک از بخش‌های کروموزوم، یک درایه متناظر از ماتریس راهنما وجود دارد. برای تولید فرزندان جدید، در صورتی که مقدار درایه متناظر در ماتریس راهنما برابر ۱ باشد، مقادیر مربوط به آن درایه در دو والد جابه‌جا می‌گردد، در غیر این صورت، آن درایه بدون تغییر رها می‌شود.

در عملگر تقاطع نوع دوم که برخلاف نوع اول به صورت پیوسته می‌باشد نیز از یک ماتریس راهنما همانند نوع اول استفاده می‌گردد با این تفاوت که درایه‌های آن مقادیر حقیقی در بازه [0 1] هستند. مقادیر این ماتریس به تعیین نقاطی برای کروموزوم‌های فرزند در فاصله خطی بین والدین کمک می‌نماید. نحوه عملکرد این عملگر بدین صورت است که به ازای هر

درایه از کروموزوم‌های والدین یک درایه در ماتریس راهنما وجود دارد. به عنوان مثال، اگر درایه a مربوط به والد ۱ و درایه b مربوط به والد ۲ باشد و همچنین α مقدار متناظر در ماتریس راهنما باشد، مقادیر متناظر برای فرزند ۱ و ۲ به ترتیب به صورت $c = a + \alpha(b - a)$ و $d = b + \alpha(a - b)$ به دست می‌آید.

عملگر جهش

در این الگوریتم برای جهش در هر یک از بخش‌های کروموزوم، دو سطر و یا دو ستون آن به تصادف، انتخاب می‌گردد و درایه‌های میان آن به صورت وارونه جابه‌جا می‌شوند. برای بخش‌هایی از کروموزوم که بیش از یک بُعد دارند، برای هر بُعد آن این عمل به کار برده می‌شود.

۲-۵. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (PSO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که در حوزه هوش جمعی^۲ جای می‌گیرد. این الگوریتم، نخستین بار توسط کندی^۳ و ابرهارت^۴ و (۱۹۹۵) با الگو گرفتن از رفتار اجتماعی حیواناتی مانند ماهی‌ها یا پرندگان که به صورت گروهی زندگی می‌کنند، معرفی شد. با توجه به این که قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار موجودات اجتماعی حاکم است، پرندگان تنها، با تنظیم حرکت فیزیکی خود با اجتناب از تصادف به دنبال غذا می‌گردند و به طور نظری هر پرنده به عنوان یکی از اعضای گروه از تجربه‌های قبلی خود و تجربه‌های سایر پرندگان برای یافتن غذا بهره می‌برد. ایده اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات همین تسهیم اطلاعات بین اعضای گروه است (پولی و همکاران^۵، ۲۰۰۷).

تمام پرندگان یک مقدار شایستگی دارند که توسط تابع شایستگی که باید بهینه شود، ارزیابی می‌گردد. علاوه بر این هر پرنده i ، دارای یک موقعیت در فضای D بعدی مسئله است که در تکرار t ام، با یک بردار به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

^۱ Particle Swarm Optimization (PSO)

^۲ Swarm Intelligence

^۳ Kennedy

^۴ Eberhart

^۵ Poli

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$$

همچنین این پرنده سرعتی دارد که پرواز آن را هدایت می‌کند و در تکرار t با بردار زیر نشان داده می‌شود:

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$$

و این پرنده نیز در هر تکرار یک حافظه از بهترین موقعیت قبلی خودش را دارد که با بردار P نشان داده می‌شود:

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)$$

در هر تکرار جستجو، هر عضو با در نظر داشتن دو مقدار بهترین به‌روز رسانی می‌شود. مورد اول مربوط به بهترین راه‌حلی است که پرنده تاکنون آن را تجربه کرده است (مقدار شایستگی این بهترین راه حل نیز ذخیره می‌گردد). این مقدار را بهترین p یا اصطلاحاً P_{best} می‌نامند. مورد دوم بهترین راه حلی است که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دنبال می‌شود و بهترین موقعیتی است که تاکنون در جمعیت به دست آمده است. این مقدار بهینه عمومی است و اصطلاحاً G_{best} نامیده می‌شود.

زمانی که یک عضو، بخشی از جمعیت را به عنوان توپولوژی همسایگانش در نظر می‌گیرد؛ آنگاه بهترین مقدار، یک بهترین محلی است و P_{best} نامیده می‌شود. بعد از اینکه دو بهترین مقدار عمومی و محلی پیدا شدند، موقعیت و سرعت هر عضو توسط فرمول‌های زیر به‌روزرسانی می‌شود.

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + C_1 \cdot r_1^t \cdot (G_{best} - X_i^t) + C_2 \cdot r_2^t \cdot (P_{best} - X_i^t)$$

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{t_{max}} \cdot t$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}$$

در فرمول‌های فوق t بیانگر شماره تکرار، و متغیرهای c_1 و c_2 فاکتورهای یادگیری هستند. اغلب $c_1 = c_2 = 2$ است که میزان جابجایی یک پرنده را در یک‌بار تکرار کنترل می‌کند. r_1 و r_2 دو عدد تصادفی یک‌نواخت در بازه $[0,1]$ هستند. w یک وزن جبری است که به صورت نوعی در بازه $[0,1]$ مقداردهی اولیه می‌گردد. یک وزن جبری بزرگ‌تر یک استکشاف عمومی

و وزن جبری کوچک‌تر استکشاف محلی را آسان می‌کند. t_{max} ماکزیمم تعداد تکرارها، t نسل جاری، W_{min} و W_{max} حداقل و حداکثر مقداری که هریک از وزن‌های خارجی می‌توانند بگیرند، می‌باشند.

در الگوریتم PSO استاندارد، جمعیت با راه‌حل‌های تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود و تا رسیدن به شرط خاتمه به صورت تکراری شایستگی جمعیت توسط مقادیر P_{best} و G_{best} محاسبه شده سپس سرعت و موقعیت نیز به ترتیب به روزرسانی می‌شوند. در آخر هم G_{best} و مقدار شایستگی آن به عنوان خروجی بیان می‌شوند. شرط خاتمه می‌تواند رسیدن به ماکسیمم تعداد نسل‌ها یا رسیدن به یک مقدار خاص شایستگی در G_{best} باشد. نحوه نمایش ذرات تعریف شده برای جواب‌های مناسب در الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات همانند نحوه نمایش کروموزوم‌ها بوده و با توجه به پیوسته آن، این نحوه نمایش به راحتی برای الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات نیز قابل استفاده است.

به دلیل پیوسته بودن ذات حرکت در الگوریتم تجمع ذرات از یک سو و همچنین پیوسته بودن نحوه نمایش جواب ارائه شده در الگوریتم ژنتیک، می‌توان از این نحوه نمایش جواب در الگوریتم تجمع ذرات نیز بهره گرفت. با این ملاحظه که چنانچه در هر بخش از نمایش جواب، حرکت منجر به خروج مقدار درایه مربوطه از بازه مجاز آن گردد، در صورت بالاتر بودن از حد مجاز، حد بالای بازه و در صورت پایین‌تر بودن از حد مجاز، حد پایین بازه جایگزین درایه مربوطه می‌شود. همچنین سایر بخش‌های الگوریتم تجمع ذرات طبق استانداردهای این الگوریتم اجرا می‌شود.

۶. اعتبارسنجی الگوریتم‌های فراابتکاری

متوسط شاخص درصد انحراف نسبی برای هر یک از الگوریتم‌های مورد بررسی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$RPD = \frac{(Alg_{sol}) - Best_{sol}}{Min_{Best}} \times 100$$

که Alg_{sol} ارزش هدفی است که به ازای یک آزمایش توسط یک الگوریتم به دست می‌آید و $Best_{sol}$ نیز بهترین مقداری است که به ازای هر آزمایش توسط تمامی الگوریتم‌های پیشنهاد شده، محاسبه می‌شود.

برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات ارائه شده باید ابتدا نتایج آنها را با نتایج بخش ۴ که از روش دقیق محاسبه شده‌اند، مقایسه نمود. بدین منظور، در رابطه فوق مقدار $Best_{sol}$ برابر با نتیجه به دست آمده از روش دقیق قرار داده شده است.

نتایج حاصل از این مقایسه برای نمونه ارائه شده در بخش قبل نشان‌دهنده آن است که درصد انحراف نسبی دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات بسیار ناچیز است. در این نمونه، روش حل دقیق، میزان بهینه سود را معادل ۷۰۸۲۲۷۰۶ به دست آورده است و مقدار به دست آمده برای تابع هدف سود با استفاده از الگوریتم‌های GA و PSO به ترتیب برابر با ۷۰۸۱۹۸۷۳ و ۷۰۸۱۷۷۴۸ است که به ترتیب دارای RPD های $۰/۰۰۷$ و $۰/۰۰۴$ هستند که مقدار کمتر از یک درصد آنها نشان از عملکرد مناسب این دو الگوریتم دارد.

۷. تولید مسائل نمونه

برای تنظیم پارامتر و ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده ۳۰ مسئله با پارامترهایی بر مبنای مقاله سلیمانی و کنان (۲۰۱۴) تولید می‌گردد. پارامترها در این مسایل به صورت تصادفی در بازه‌های مشخص تولید می‌شوند. همچنین گره‌ها برای مسایل نمونه به صورت تصادفی در یک فضای مربعی شکل با ضلع ۲۰۰ واحد مسافت ایجاد شده‌اند و $Dist_{ij}$ (فاصله بین آنها) بر مبنای فاصله پله‌ای محاسبه شده است.

تنظیم پارامتر

کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد؛ به طوری که انتخاب صحیح مقادیر پارامترهای یک الگوریتم باعث افزایش کارایی آن می‌شود. در این تحقیق فاکتورهای کنترلی روش تاگوچی شامل پارامترهای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات می‌باشند. در این روش، هدف، یافتن سطوح بهینه عامل‌های مهم قابل کنترل و کمینه کردن اثر فاکتورهای اغتشاش است. ویژگی‌های کیفی مقادیر اندازه‌گیری شده از

آزمایش‌ها به نسبت سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌شود. این نرخ، نشان‌دهنده میزان انحرافات نمایش داده شده در متغیر پاسخ است. کاهش انحرافات الگوریتم زمانی است که پارامترهای الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۱۲۵ برای تعداد جمعیت اولیه، ۱۳۰ برای تعداد نسل، ۰/۹۵ برای نرخ تقاطع و ۰/۵۰ برای نرخ جهش تعیین گردد. همچنین پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات به ترتیب معادل ۱۰۰ برای تعداد ذرات، ۱۱۵ برای تکرار، ۰/۸ برای وزن اینرسی و ۰/۲ برای حداکثر سرعت بهترین مقادیر برای الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق هستند.

۱-۷. تولید مسئله نمونه در مقیاس بزرگ

مسائل مورد استفاده در این تحقیق براساس مقاله نکو قدیرلی و همکاران (۲۰۱۴) با ابعاد متفاوت تولید می‌شوند که سطوح پارامترهای آن طبق جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱. سطوح هر یک از پارامترهای اصلی مسئله

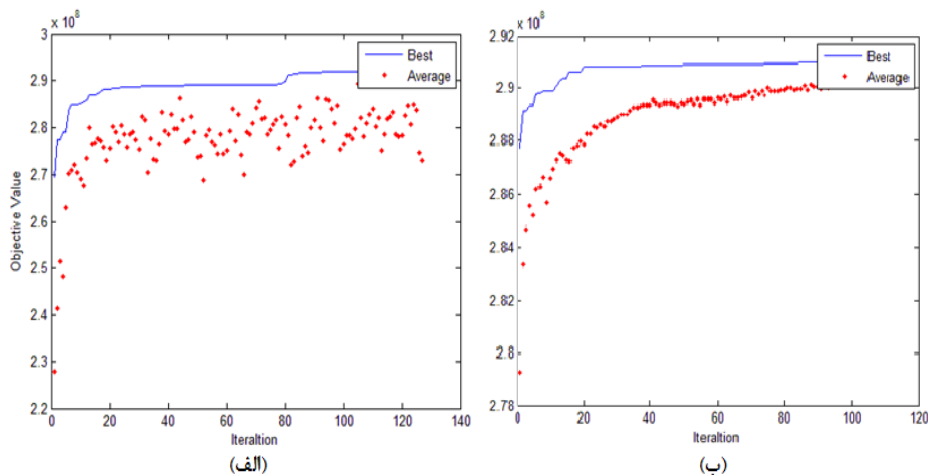
| پارامترها | سطوح |
|-----------------------|-------------------|
| تعداد مشتریان | ۱۰ و ۱۵ و ۳۰ و ۵۰ |
| تعداد محصول | ۲ و ۳ و ۵ |
| تعداد مکان‌های بالقوه | ۵ و ۱۰ و ۱۵ |
| تعداد وسائل نقلیه | ۳ و ۴ |
| تعداد دوره‌های زمانی | ۳ و ۵ و ۷ |

در جدول (۲) نتایج حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی نشان داده شده است. برای مقایسه عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها از شاخص‌های زمان محاسباتی و RPD استفاده می‌شود. متوسط زمان حاصل از پنج بار اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی نیز در این جدول به ثابته آمده است. مطابق جدول (۲)، متوسط خطای الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات پیشنهاد شده به ترتیب برابر ۰/۰۱۲۸ و ۰/۰۴۵۱ هستند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم PSO نسبت به GA است.

جدول ۲. نتایج محاسباتی حاصل از مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات

| شماره مسئله | تعداد محصول | تعداد دوره | تعداد مشتری | تعداد مکان بالقوه | تعداد وسیله حمل | GA | | PSO | |
|-------------|-------------|------------|-------------|-------------------|-----------------|--------|----------|--------|----------|
| | | | | | | RPD | CPU time | RPD | CPU time |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۱۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۰۱ | ۷۱ | ۰/۰۰۶۲ | ۵۶ |
| ۲ | ۳ | ۳ | ۱۵ | ۵ | ۳ | ۰/۰۰۷۶ | ۹۰ | ۰/۰۰۳ | ۶۷ |
| ۳ | ۵ | ۳ | ۳۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۴۳۵ | ۱۳۶ | ۰/۰۲۴۹ | ۹۸ |
| ۴ | ۲ | ۵ | ۵۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۱۵۶ | ۳۶۵ | ۰/۰۰۸۸ | ۲۷۵ |
| ۵ | ۳ | ۵ | ۷۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۶۲۹ | ۶۵۳ | ۰/۰۰۴۶ | ۵۴۶ |
| ۶ | ۵ | ۵ | ۱۰۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۸۵۴ | ۱۰۵۷ | ۰/۰۰۰۴ | ۷۷۷ |
| ۷ | ۲ | ۷ | ۱۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۶۳۶ | ۲۰۳ | ۰/۰۱۱۴ | ۱۴۸ |
| ۸ | ۳ | ۷ | ۱۵ | ۵ | ۳ | ۰/۰۷۹۵ | ۲۴۵ | ۰/۰۲۷۴ | ۱۷۹ |
| ۹ | ۵ | ۷ | ۳۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۸۱۸ | ۳۸۴ | ۰/۰۱۹۶ | ۲۸۲ |
| ۱۰ | ۲ | ۳ | ۵۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۰۹۵ | ۲۷۹ | ۰/۰۰۰۹ | ۲۲۹ |
| ۱۱ | ۳ | ۳ | ۷۰ | ۱۰ | ۳ | ۰/۰۰۶۹ | ۴۵۱ | ۰/۰۰۰۱ | ۳۲۹ |
| ۱۲ | ۵ | ۳ | ۱۰۰ | ۱۰ | ۳ | ۰/۰۲۲ | ۴۶۰ | ۰/۰۰۴۳ | ۳۳۹ |
| ۱۳ | ۲ | ۵ | ۱۰ | ۵ | ۳ | ۰/۰۳۹۶ | ۱۳۶ | ۰/۰۰۱۸ | ۱۰۱ |
| ۱۴ | ۳ | ۵ | ۱۵ | ۱۰ | ۳ | ۰/۰۶۱۲ | ۱۸۰ | ۰/۰۰۴۷ | ۱۲۳ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۳۰ | ۱۰ | ۳ | ۰/۰۴۳ | ۲۹۰ | ۰/۰۰۹۹ | ۲۳۰ |
| ۱۶ | ۲ | ۷ | ۵۰ | ۱۰ | ۴ | ۰/۰۱۹۲ | ۹۸۶ | ۰/۰۴۸۸ | ۷۴۰ |
| ۱۷ | ۳ | ۷ | ۷۰ | ۱۰ | ۴ | ۰/۰۶۶۸ | ۱۶۰۷ | ۰/۰۱۵۹ | ۱۱۸۷ |
| ۱۸ | ۵ | ۷ | ۱۰۰ | ۱۰ | ۴ | ۰/۰۸۳۷ | ۲۶۷۲ | ۰/۰۱۲۳ | ۱۹۹۹ |
| ۱۹ | ۲ | ۳ | ۱۵ | ۵ | ۴ | ۰/۰۰۳۸ | ۹۷ | ۰/۰۰۱ | ۷۳ |
| ۲۰ | ۳ | ۳ | ۱۵ | ۱۰ | ۴ | ۰/۰۱۵۱ | ۱۰۰ | ۰/۰۱۱۸ | ۷۷ |
| ۲۱ | ۵ | ۳ | ۳۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۱۰۹ | ۲۰۲ | ۰/۰۰۳۲ | ۱۹۸ |
| ۲۲ | ۲ | ۵ | ۵۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۶۴۷ | ۶۱۳ | ۰/۰۰۷۸ | ۴۶۴ |
| ۲۳ | ۳ | ۵ | ۷۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۹۷۴ | ۹۷۸ | ۰/۰۱۷۵ | ۷۲۶ |
| ۲۴ | ۵ | ۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۶۷۳ | ۱۶۰۱ | ۰/۰۲۰۵ | ۱۱۹۳ |
| ۲۵ | ۲ | ۷ | ۱۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۰۸۵ | ۳۰۵ | ۰/۰۳۰۷ | ۱۸۸ |
| ۲۶ | ۳ | ۷ | ۱۵ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۹۹۶ | ۳۰۰ | ۰/۰۱۵ | ۲۲۶ |
| ۲۷ | ۵ | ۷ | ۳۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۵۱۳ | ۴۸۰ | ۰/۰۳۵ | ۳۵۹ |
| ۲۸ | ۲ | ۳ | ۵۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۰۲۹ | ۲۳۹ | ۰/۰۰۰۷ | ۲۱۵ |
| ۲۹ | ۳ | ۵ | ۷۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۴۴۳ | ۹۹۲ | ۰/۰۰۶۳ | ۷۴۲ |
| ۳۰ | ۵ | ۷ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۴ | ۰/۰۹۴۶ | ۲۸۹۶ | ۰/۰۳۱۷ | ۲۱۳۹ |
| میانگین | | | | | | ۰/۰۴۵۱ | | ۰/۰۱۲۸ | |

شکل ۲ (الف) و (ب) به ترتیب نمودار همگرایی GA و PSO را برای مسئله ۲۰ نمایش داده است.



شکل ۲. نمودار همگرایی دو الگوریتم برای مسئله ۲۰

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله به بررسی مسئله قیمت‌گذاری محصولات در زنجیره تامین دوسطحی حلقه بسته چند دوره‌ای با تقاضای وابسته به قیمت پرداخته شد. سطوح این زنجیره را تولیدکننده و مشتریان تشکیل می‌دهند. در این مسئله قیمت‌گذاری محصولات، سفارش‌دهی مواد اولیه، تعیین مکان مرکز جمع‌آوری و انتخاب و تعیین مسیر وسایل حمل و نقل به نحوی صورت می‌گیرد که سود مجموعه که ناشی از درآمد حاصل از فروش محصولات و مواد اولیه اسقاطی منهای هزینه‌های زنجیره اعم از هزینه‌های خرید مواد اولیه، سفارش‌دهی، نگهداری، وسایل حمل و مکان مرکز جمع‌آوری است، حداکثر گردد.

برای این مسئله، ابتدا یک مدل ریاضی ارائه شده است و سپس با توجه به Np-hard بودن آن الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات پیاده‌سازی و اجرا شده است. در این مقاله دو مسئله نمونه در مقیاس‌های کوچک و بزرگ تولید شده است و از طریق مسئله با مقیاس

بزرگ، عملکرد روش‌های ارائه شده، بررسی شد که نتایج بیانگر آن است که الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات از الگوریتم ژنتیک عملکرد نسبتاً بهتری داشته است. برای اعتبارسنجی مدل، رویکردهای فراابتکاری در مقایسه با روش دقیق مورد بررسی قرار گرفت که در این تحقیق برخلاف پیچیدگی بالای مسئله روش‌های فراابتکاری با خطایی کمتر از ۱ درصد به جواب بهینه دست یافته‌اند. همچنین همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات و الگوریتم ژنتیک که حاصل از حل مسئله ۲۰ در قالب شکل‌های (۵) الف و ب نشان داده شده است. در این مقاله مواد اولیه برای تولیدکنندگان بدون در نظر گرفتن تامین کنندگان تهیه می‌گردد؛ این در حالی است که در دنیای واقعی تامین کنندگان می‌توانند نقش تاثیرگذاری در زنجیره تامین داشته باشند و نحوه انتخاب آنها توسط تولیدکنندگان در کیفیت و قیمت محصول نهایی تاثیرگذار خواهد بود. بنابراین، بررسی تامین کنندگان می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

همچنین در این مقاله برای آسان کردن مسیریابی تنها از یک مکان به عنوان مرکز جمع‌آوری و دمونتاژ استفاده شد؛ در صورتی که در مطالعات آتی می‌توان تعداد مکان‌ها و موقعیت آن‌ها را نیز جهت افزایش سود مجموعه تحت بررسی قرار داد.

منابع

- Alshamrani A., Mathur K., Ballou R.H., (2007). Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies. *Computers & Operations Research*, 34: 595-619.
- Asl-Najafi, J., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri A., Taheri-Moghaddam, A. (2015). A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk. *Computers & Industrial Engineering*, 90: 414-428.
- Chen, J.-M., Chang, C.-I. (2015). Dynamic pricing for new and remanufactured products in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 146: 153-160.
- Chung, S.L., Wee, H.M., Yang, P.C. (2008). Optimal policy for a closed-loop supply chain inventory system with remanufacturing. *Mathematical and Computer Modelling*, 48:867-881.
- Dethloff, J., (2001). Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR Spektrum* 23:79-96.
- Fleischmann M., Kuik R., (2003). On optimal inventory control with independent stochastic item returns. *European Journal of Operational Research*, 151: 25-37.
- Hong, X., Xu, L., Du, P., Wang, W. (2015). Joint advertising, pricing and collection decisions in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 167: 12-22.
- Hsueh C.F., (2011). An inventory control model with consideration of remanufacturing and product life cycle. *International Journal of Production Economics* 133: 645-652.
- Soleimani, H., Kannan, G. (2014). A Hybrid Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Closed-Loop Supply Chain Network Design in large-scale networks. *European Journal of Operational Research*, 39: 3990-4012.
- Hu Z.H., Sheu J.B., Zhao L., Lu C.C., (2015). A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 55: 273-297.
- Govindan. K., Hamed, S., Devika, K. (2014). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240: 603-626.
- Kassem S., Chen M., (2013). Solving reverse logistics vehicle routing problems with time windows. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68: 57-68.

- Kaya, O., Urek, B., (2016). A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. *Computers & Operations Research*, 65: 93-103.
- Lenstra, J K., Rinnooy, K.A.H.G. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*,11: 221-227.
- Mawandiya, B.K., Jha, J.K., Thakkar, J. (2015). Production-inventory model for two-echelon closed-loop supply chain with finite manufacturing and remanufacturing rates. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 39: 1-20.
- Mitra S., (2012). Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns. *Computers & Industrial Engineering* 62: 870-879.
- Nekooghadirli N., Tavakkoli-Moghadam R., Ghezavati V.R., Javanmard S., (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers & Industrial engineering*, 76: 204-220.
- Poles R., (2013). System dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies. *International Journal of Production Economics* 144: 189-199.
- Wei J., Zhao J., (2011). Pricing decisions with retail competition in a fuzzy closed-loop supply chain. *Expert Systems with Applications*, 38: 11209-11216.
- Zeballos, L., Méndez, A., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed loop supply chains with uncertain supply and demand. *Comput. Chem. Eng.* 66: 151-164.
- Zhou L., Naim M.M., Tang Q., Towill Q.R., (2006). Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process. *Omega* 34: 585-598.

