فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال پانزدهم/ شماره ۵۳ / پاییز ۱۳۹۹

طراحی مدل ریاضی چند هدفه برای مکانیابی زنجیره تامین چهار سطحی با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری

حمید رضا محمدی
دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
رضا احتشام راثی(نویسنده مسؤول)
استادیار،گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
Email:rezaehteshamrasi@gmail.com
علی محتشمی
دانشیار،گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۲۸ * تاریخ پذیرش ۹۹/۰۸/۱۷

چکیده

هدف این پژوهش، طراحی یک مدل ریاضی چند هدفه به در راستای بهینه سازی زنجیره تامین چهار سطحی کالاهای فاسد شدنی با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری هیبرید با عنایت به زمان تدارک، هزینه و رضایت مشتری است. زنجیره‌های تامین چهار سطحی مواد غذایی فاسدشدنی به دلیل تغییرات مداوم و قابل توجه در کیفیت محصولات غذایی در سراسر زنجیره تا زمان مصرف نهایی جزو زنجیره‌های تامین محصولات متفاوت محسوب می‌گردد. در این پژوهش، مدل ریاضی برای مسئله مکانیابی– مسیریابی تسهیلات در یک زنجیره تامین چهار سطحی برای محصولات فاسد شدنی با رویکرد بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های کل زنجیره تامین، زمان تحویل سفارشات، انتشار آلاینده‌ها و سطح رضایت مشتریان ارائه می‌گردد. برای سنجش اعتبار پژوهش، مدل ریاضی در صنایع غذایی بهشهر مورد مطالعه قرار گرفته و مسئله پژوهش در قالب یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه و برای حل آن از ترکیب دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و گوزن قرمز استفاده شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی در مطالعه موردی حل و نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم بر اساس شاخص‌های استاندارد بررسی شده و در نهایت نتایج محاسباتی، نشانگر کارایی الگوریتم برای طیف وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین چهار سطحی، کالای فاسدشدنی، مدل ریاضی چند هدفه، الگوریتم فرا ابتکاری.

۱-مقدمه

زنجیره تامین چهار سطحی مجموعه‌ای از روش‌های مورد استفاده برای یکپارچگی تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده فروشان به منظور حداقل کردن هزینه‌های سیستم، تولید و توزیع کالاها به تعداد صحیح در مکان، زمان مناسب و تحقق نیازهای مشتری است(Kovačić & Bogataj,2013). زنجیره تامین، شبکه‌ای از سازمان‌ها است که با ارتباط بالادستی به پایین‌دستی در فرآیندها و فعالیت‌ها درگیر است و به صورت محصولات و خدمات ارائه شده به مشتری نهایی تولید ارزش می‌نماید(Dai et al.,2018). هدف همه کسانی که در زنجیره تامین فعالیت می‌کنند، افزایش رقابت‌پذیری یا همان افزایش خدمت به مشتری است؛ زیرا امروزه از دید مشتری نهایی، یک واحد سازمانی به تنهایی در مورد رقابت‌پذیری محصولات یا خدمات خود مسول نیست و زنجیره تامین، همه سازمان‌های درگیر را با هم در نظر می‌گیرد؛ این مطالب تاثیر هزینه و زمان در رضایت مشتری را نشان می‌دهد(Kovačić & Bogataj,2013). از سوی دیگر، زنجیره تامین کالاهای فاسدشدنی محصولات غذایی به شیوه دیگری عمل می‌نمایند و محصولات ممکن است ارزش یا کیفیت خود را به طور ناگهانی یا به مرور از دست بدهند(Mogal et al.,2018). فساد محصولات نگرانی اصلی زنجیره تامین است، زیرا کیفیت یا ارزش اکثر محصولات در طول دوره عمر کاهش می‌یابد. فساد یک تابع غیر خطی است که از فاکتورهای بسیاری مانند انواع حمل و نقل تاثیر می-پذیرد. زنجیره تامین مواد غذایی سالم و با کیفیت، به خصوص مواردی که شرایط ویژه‌ای دارند، مانند مواد فاسدشدنی[1]، از جمله دغدغه‌های شرکت‌های دست‌اندرکار زنجیره تامین می‌باشد(Morganti et ail.,2015). زنجیره تامین در خصوص کالاهای با عمر کوتاه و فاسدشدنی همواره یکی از با اهمیت‌ترین و چالش‌برانگیزترین مباحث مدیریتی در زمان‌های مختلف است. کالاهای با عمر کوتاه و به‌خصوص مواد غذایی مواردی هستند که بیشترین چالش‌ها را برای مدیریت زنجیره تامین به وجود می‌آورند(Khodaparasti et al.,2018؛De Keizer et al.,2017). خطرات مربوط به مواد غذایی می‌تواند در هر مرحله از زنجیره تامین غذا ظاهر شود و مدیریت صحیح آن را به منظور تعیین نقاط کنترل بحرانی برای گرفتن اطلاعات درست در مورد مواد، ساخت و تاریخ انقضا و ارائه آن به شیوه‌ای شفاف برای شرکت‌کنندگان و مصرف‌کنندگان زنجیره تامین ضروری نماید. زنجیره تامین برای مواد فاسدشدنی که شامل محصولات با عمر مفید ثابت و تولید محدود است؛ نیاز به تصمیم گیری صحیح دارد(Katsaliaki et al.,2014).

وحدانی و طاهروردی (۱۳۹۸)، طراحی شبکه زنجیره تامینی را مورد مطالعه قرار دادند که شامل مسئله مسیریابی و موجودی متشکل از تخصیص جریان، مسیریابی وسایل نقلیه بین تسهیلات، مکانیابی مراکز توزیع و همچنین در نظر گرفتن حداکثر پوشش جهت پاسخ به تقاضای مشتریان می‌باشد. مدل ریاضی ارائه شده یک مدل برنامه ریزیغیر خطی عدد صحیح مختلط برای مساله مکانیابی–مسیریابی–موجودی در زنجیره تامین چهار سطحی با در نظر گرفتن اهداف متعارض چندگانه هزینه کل، زمان سفر و حداکثر پوشش می باشد. به منظور حل مدل ارائه شده از سه الگوریتم فراابتکاری NSGA-II NRGA و MOPSO استفاده شده است.که صحت مدل ریاضی و الگوریتم های ارائه شده از طریق مثال عددی ارزیابی می شود.خبوشانی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیق خود یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط، چند محصولی برای برنامه ریزی تولید، توزیع، حمل و نقل با در نظر گرفتن شاخص های پایداری در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته صنعت غذا ارائه نموده است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از تکنیک دیمتل، عوامل اثرگذار و اثر پذیر را شناسایی و سپس با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای اولویت نمودند.

فاسدشدن سریع محصولات غذایی به از دست دادن حجم بسیاری از مواد غذایی و فشار بیشتر بر FSCs منجر می‌گردد، همچنین باعث کاهش کیفیت، سودآوری و پایداری مواد غذایی می‌شود. برخی از تلفات مواد غذایی که پس از برداشت و در ارتباطات شبکه زنجیره تامین اتفاق می افتد، اجتناب ناپذیر است. بر اساس گزارشات FAO از ۲۰ تا ۶۰ درصد کل تولیدات در همه کشورها و یک سوم محصولات غذایی برای مصرف انسان در جهان پس از برداشت از بین می‌رود که به میزان حدود ۱.۳ میلیارد تن در سال است(Garai & Roy, 2020). در سطح استراتژیک، مسله کلیدی، طراحی یا مهندسی مجدد شبکه‌های

[1] perishable goods

زنجیره تامین است که به جایابی و اندازه‌گیری تسهیلات و تعیین جریان مواد از طریق شبکه می‌پردازد و در این میان، مدیریت زنجیره تامین به دنبال رسیدن به اهدافی چون رقابتهای اقتصادی موثر، لحاظ کردن زمان و کیفیت سرویس می‌باشد. مدیریت زنجیره تامین یک مورد استراتژیک برای هر سازمان است که به دنبال رسیدن به اهداف از لحاظ رقابتهای اقتصادی، زمان و کیفیت سرویس به خصوص در محیط اقتصادی مشخص شده با جهانی سازی معاملات و شتاب چرخه‌های صنعتی است(Wang et al.,2018). هماهنگی، ادغام و مدیریت فرایندهای کسب و کار در زنجیره تامین، موفقیت رقابتی شرکتهای مواد غذایی را مشخص خواهد کرد. پیشوایی و ربانی (۲۰۱۱) روش بهینه‌سازی استوار را برای طراحی شبکه یک زنجیره تأمین چندسطحی حلقه بسته تحت عدم قطعیت به کار بردند. آنها ابتدا مدل خطی مختلط عدد صحیح قطعی را طراحی کرده و سپس مدل استوار آن را با استفاده از روش بن– تال و نمیرووسکی طراحی کرده‌اند و در نهایت مدل تولید شده را با چند مثال عددی مختلف با مدل قطعی‌اش مقایسه کرده‌اند. یو و همکاران (۲۰۱۲) مقدار اطلاعات در تصمیمات اندازه سفارش برای یک شبکه تولید/ بازیافتی تک دوره‌ای مورد توجه قرار دادند؛ به طوری که دو گزینه بازیافت موجود بودند و فرآیند بازرسی کامل نبود، اما با صرف هزینه هایی می توانست بهتر شود. پیشوایی و رزمی (۲۰۱۲) مدلی دو هدفه برای شبکه زنجیره تأمین زیست‌محیطی تحت عدم قطعیت ذاتی داده‌های ورودی طراحی کرده‌اند. آنها از روش مبتنی بر ارزیابی چرخه عمر محصول[۲] برای سبز نمودن طراحی استفاده کرده‌اند و همچنین روش فازی را برای حل آن به کار برده‌اند.موسوی و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل دو هدفه برای برنامه ریزی کامیون سبز و مسله مسیریابی در یک سیستم انبار متقاطع معرفی کردند. این مدل سه تصمیم کلیدی در انبار متقاطع را مشخص می‌کند: ۱) تعیین توالی و برنامه کامیونهای ورودی در درب پذیرش؛ ۲) تعیین یک دنباله و برنامه کامیونهای ورودی در درب حمل و نقل؛ ۳) تعیین مسیرهای کامیون خروجی که به سمت مشتری می‌روند. اولین تابع هدف به پاسخگویی شبکه مربوط است که کمینه کردن نقص پنجره زمانی است و دومین هدف کمینه کردن کل مصرف سوخت برای حفظ جنبه زیست محیطی شبکه است. یک اثر یادگیری نیز در زمان فرایند بارگیری و تخلیه در نظر گرفته شده است. برای حل مدل دو هدفه یک مدل شبیه‌سازی چندهدفه به کار گرفته شده است. در این پژوهش که از برنامه ریزی ریاضی استفاده کرده‌اند، چندین مشتری در نظر گرفته شده که هر کدام یک تقاضای از قبل شناسایی شده برای هر نوع محصول و یک پنجره زمانی برای دریافت محصول دارد. یک انبار متقاطع با تنها یک در ورودی و یک در حمل و نقل که محصولات ورودی را جمع و مرتب می‌کند و آنها را به کامیونهای خروجی توزیع می‌کند، در نظر گرفته شده است. این پژوهش با روش حل اپسیلون محدودیت مقایسه و الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی به روش بهینه‌سازی پارتو نتایج بهتری در زمان محاسبه دارد.

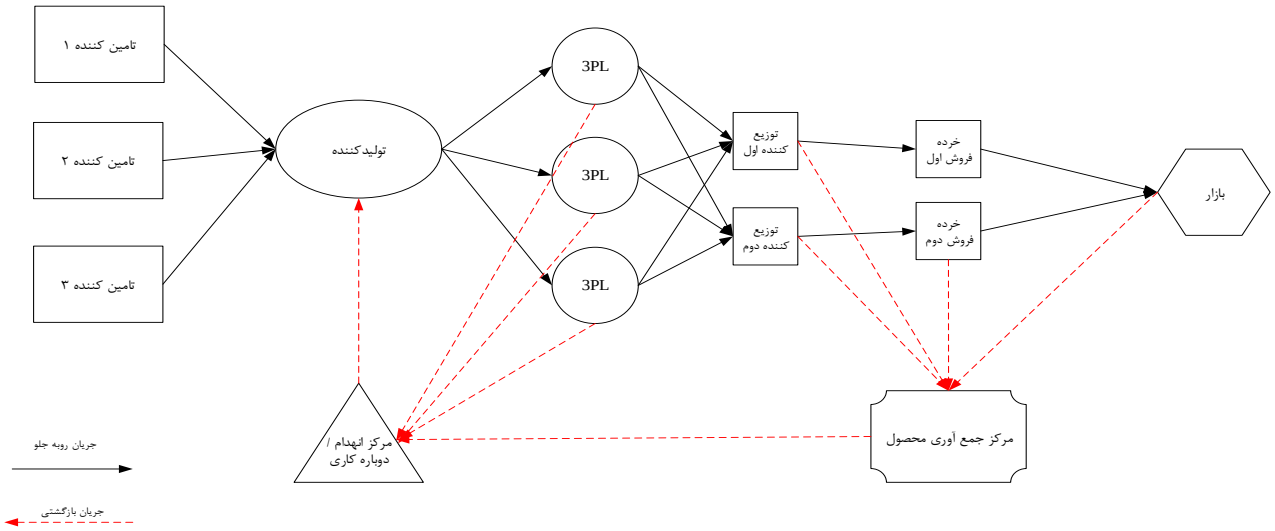
موگال و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل ریاضی چند دوره‌ای – چند هدفه جدید برای مسله مکانیابی– تخصیص سیلوی حبوبات با زمان سکونت برای پشتیبانی از فرایند تصمیم‌گیری دولت هند ارائه نمودند. دو هدف کمینه کردن متقاطع هزینه شبکه زنجیره تامین و کل لیدتایم به طور همزمان با استفاده از دو مدل پارتو مبتنی بر الگوریتم‌های چند هدفه با پارامترهای کالیبراسیون اجرا شده است. فاکتورهای متنوعی مانند هزینه راه اندازی اولیه، هزینه حمل و نقل، هزینه موجودی، زمان سکونت و زمان انتقال در مدل لحاظ گردیده است. هدف این مطالعه، تعیین مکانهای بهینه برای استقرار سیلوها با ظرفیت مشخص است. به دلیل غیرخطی بودن و پیچیدگی بالای مدل، مدل مبتنی بر پارتو چند هدفه توسعه یافته به نام NCRO برای بهینه کردن همزمان دو هدف متقاطع و کسب نتایج با الگوریتم پایدار NSGA-II استفاده شده است. همچنین روش تاگوچی برای تنظیم پارامتر الگوریتمهای NCRO و NSGA-II بکار گرفته شده است. دای و همکاران (۲۰۱۸) یک مسئله موجودی–مکانیابی شبکه زنجیره تامین را برای محصولات فاسدشدنی با ظرفیت فازی و محدودیت انتشار کربن ادغام برای مدل بهینه سازی بهبود داده اند. این مدل یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را فرموله کرده است و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک ترکیبی (HGA) و هارمونی ترکیبی (HHS) به منظور کمینه کردن کل هزینه بهره برده‌اند. در این پژوهش، به منشور مطالعه اثر تقاضا بر هزینه کل، کل هزینه‌ها تحت تقاضاهای مختلف با استفاده از HGA و HHS محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده، اگرچه لیندو از HHS و HGA سریعتر است، ولی مقادیر HHS و HGA بالاتر از لیندو است. همچنین محدودیت ظرفیت و

[2] Life Cycle Assesment (LCA)- based

کربن تا زمانی که به سطح معینی برسند، اثر قابل توجهی بر هزینه‌های کل ندارند. از سوی دیگر، تعداد خرده‌فروشان به طور مثبتی با هزینه کل در ارتباط است و در حالی که تعداد کارخانه‌ها و انبارها رابطه منفی با هزینه‌های کل دارد. خداپرستی و همکاران (۲۰۱۸) یک مسله مکانیابی-تخصیص چند دوره ای برای برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تامین معکوس معرفی کردند. این پژوهش مدل تخصیص اصلاح شده‌ای برای جلوگیری از نقص ناخواسته معیارها ارائه می‌دهد. این مسله به عنوان یک مدل پوششی ظرفیت تسهیلات و کشش تقاضا بیان شده است. عدم قطعیت در تقاضا در هر دوره زمانی با اتخاذ یک رویکرد پایدار توزیعی ثبت می‌شود. مسله شبکه زنجیره تامین معکوس می‌تواند به عنوان یک پوشش مدل مکانیابی-تخصیص که تعداد محدودی نقاط تقاضا (مراکز جمعیت) با تعدادی تسهیلات خدمت‌رسانی مدلسازی می‌شود. مکانیابی تسهیلات از یک مجموعه مکان مشخص انتخاب و با استفاده از چارچوب چند دوره‌ای با استقرار تسهیلات جدید، نقاط تقاضا که با دوره‌های قبلی پوشش داده نشده‌اند را ارضا می‌نماید. و برای ارزیابی امکان افزایش سطح سرویس تخصیص مجدد به فواصل دورتر برای همه دوره انجام شده است، در حالی که تقاضاهای پوشش داده شده قبلی می‌توانند فقط با تسهیلات نزدیکتر جواب داده شوند. اسیم و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی چند هدفه برای حل مسله مکانیابی-تخصیص در یک شبکه زنجیره تامین چند لایه برای بهینه‌سازی سه هدف همزمان کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تامین، بیشینه‌سازی نرخ تراکم و کمینه‌سازی انتشار گاز $CO2$ ارائه دادند. رویکرد تحلیلی تکاملی ترکیبی استخراج شده از داده‌ها با ترکیب الگوریتم NSGA-II برای اهداف چندگانه در الگوریتم تفاضا تکاملی به دست آمده است. پنج نوع الگوریتم ترکیبی برای مقایسه عملکرد با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات ترکیبی ارزیابی شده است. تمرکز اولیه زنجیره تامین بر داده‌های بزرگ برای بیشینه کردن جریان منابع، محصولات و مجموعه بزرگی از اطلاعات به شکلی است که بیشترین رضایت با استاندارد کیفیت مناسب را برای مشتری ایجاد کند. پنج الگوریتم ترکیبی برای مکانیابی کارخانه‌ها و انبارها از میان یک مجموعه محدود و همچنین تخصیص منابع به تامین کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مناطق مشتریان به کار رفته است. سان و وانگ (۲۰۱۹) با انتخاب سیاست کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، یک مدل مسیریابی تولید لجستیک معکوس را بررسی کردند. هدف این مطالعه، انتخاب سیاست کنترل بهینه گازهای گلخانه‌ای برای پیروی از مقادیر بهینه تولید، موجودی و تحویل تحت سیاست کنترل گازهای گلخانه‌ای بود. وو و همکاران (۲۰۱۹) بهینه‌سازی شبکه لجستیک معکوس تحت تقاضای فازی را مطالعه کردند. هدف از بازیافت جلوگیری از تخلیه سریع منابع طبیعی و تبدیل زباله به ارزش افزایی برای اقتصاد است.

شبکه زنجیره تامین این پژوهش از نوع چهار سطحی شامل چند تامین کننده، یک تولیدکننده، سه شرکت لجیستک سه بخشی، دو توزیع‌کننده و دو خرده فروش است که در این پژوهش به دنبال مکانیابی صحیح آنها به منظور بهینه‌سازی هزینه و زمان تدارک در راستای رضایت‌مندی مشتریان می‌باشیم. بر این اساس تولیدکننده مواد اولیه خود را طبق نیازهای خود توسط شرکت-های لجیستک سه بخشی از تامین‌کننده واجد شرایط تامین می‌نماید. سپس تولیدکننده پس از طی فرآیند تولید، محصول نهایی را برای انتقال به بازار، به شرکت‌های لجیستک سه بخشی تحویل می‌دهد تا در کوتاهترین زمان به توزیع‌کنندگان (دو توزیع کننده) منتقل نمایند. در شکل (۱) همان‌گونه که قابل مشاهده می‌باشد، در این مرحله محصول فاسدشدنی به دلایلی از قبیل نگهداری نامناسب نیز می‌تواند به تولیدکننده بازگرداننده شود تا پس از بررسی از نظر کیفیت محصول در صورت تایید مجددا در فرآیند تولید مورد استفاده قرار گیرد و در غیر اینصورت محصول معدوم می‌گردد. پس از رسیدن محصول به توزیع‌کنندگان، دو توزیع‌کننده می‌بایست محصول را به دو خرده‌فروش برسانند. در این مرحله نیز امکان خرابی و زوال‌پذیری محصول وجود دارد. در این گام محصول فاسدشده را تحویل مرکز جمع‌آوری دائر شده در بازار هدف می‌نمایند تا توسط شرکت‌های لجیستک سه بخشی به تولیدکننده بازگرداننده شوند. در پایان، اگر محصول موجود در بازار در صورتی که وارد دوره بحران (دوره بحران، زمانی است که حتی اگر از زمان مصرف محصول باقی‌مانده باشد، با توجه به مقرارت بازار هدف باید جمع آوری و بازگردانده شود) گردید توسط شرکت‌های لجیستیک سه‌بخشی، به تولیدکننده بازگرداننده می‌شود. بطوری کلی گام‌های اجرایی تحقیق به شرح ذیل می‌باشند:

- مکانیابی شرکت‌های لجستیک سه‌بخشی، خرده‌فروشان و توزیع‌کنندگان
- ایجاد هماهنگی بین سطوح زنجیره به جهت کاهش هزینه و زمان تدارک
- ایجاد تناسب بین کاهش هزینه و زمان تدارک و افزایش رضایت‌مندی مشتریان



شکل شماره (۱): مدل مفهومی زنجیره مورد مطالعه پژوهش

هدف این پژوهش، طراحی مدل ریاضی است که با در نظر گرفتن بهینه‌سازی هزینه، زمان تدارک و رضایت مشتری بهترین مکانیابی تسهیلات برای زنجیره تامین را انجام دهد. در زنجیره تامین این پژوهش، تولیدکننده محصولی جدید را تولید و از طریق شرکت لجستیک نوع سوم[3](3PL) به یک بازار دور ارسال می‌نماید، سپس توزیع‌کننده کالا را خرید و به مشتریان نهایی ارسال می‌نماید. از آنجا که محصول مورد نظر فاسدشدنی است، ممکن است هم مقدار و هم کیفیت آن در طول فرایند حمل و نقل کاهش یابد. علاوه بر آن، مشتریان نهایی هم به قیمت خرده‌فروشی و هم به سطح تازگی محصول حساس هستند؛ بنابراین تقاضای بازار، تصادفی و وابستگی زیادی به این دو عامل دارد. با توجه به زمان حمل و نقل متغیر، سطح تازگی محصول و تقاضای بازار، تصمیمات سه طرف درگیر در این زنجیره تامین بسیار پیچیده است و در صورت عملکرد نامناسب، ممکن است ایجاد ضرر نماید. در این پژوهش محققین سعی بر آن دارند به این سوال اساسی پاسخ دهند: مکان مناسب تسهیلات یک زنجیره چهار سطحی و میزان تخصیص بهینه با توجه به هزینه، زمان تدارکات و رضایت مشتری کدام است؟ هدف اصلی این تحقیق توسعه یک مدل ریاضی برای مشخص نمودن تصمیمات مطلوبی است که هر جز باید اتخاذ کند تا اعضای زنجیره به هماهنگی بیشتر تحریک شوند، به طوری که همگی از عملکرد ارتقا یافته سیستم سود ببرند.

۲- روش شناسی پژوهش

امروزه، برنامه ریاضی به ویژه برنامه ریزی خطی یکی از توسعه یافته ترین ابزارهای علم مدیریت است که به طور گسترده برای تخصیص بهینه منابع محدود، بین فعالیتهای نامحدود مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به اینکه طبیعت بسیاری از مسائل برنامه ریزی چند هدفه است، روش های تک هدفه نمی تواند پاسخگوی خواسته های سیاست گذاران در یک زنجیره تامین چهار سطحی باشد.از این رو روش هایی مورد نیاز است که بتواند به طور همزمان و با در نظر گرفتن ابعاد متفاوت موجود جواب بهینه را برای دستیابی به اهداف فراهم آورد. این پژوهش از نظر هدف کاربردی و در چارچوب تحقیقات مدل‌سازی ریاضی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از روش مدلسازی ریاضی برای مکانیابی زنجیره تامین کالای فاسد شدنی استفاده می‌شود تا بتواند زمان و هزینه را بهینه نماید و رضایت مشتری را افزایش دهد. همچنین با وجود عدم قطعیت ذاتی در زنجیره تامین کالای

[3] Third Party Logistics

فاسدشدنی و اهمیت این حوزه، از منطق فازی به جای داده‌های قطعی استفاده می‌گردد تا نتایج قابل اعتمادتری حاصل گردد. برای گرداوری اطلاعات مورد نیاز این

در این پژوهش در گام اول پس از مقدمه، ادبیات موضوع معرفی و توضیح واژه های مصطلح بر پایه مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تامین بر پایه شاخص‌های زیست محیطی بیان می شود سپس در نهایت با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی به ارائه مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تامین می‌پردازیم. با توجه به مطالب ذکر شده قبل از ورود به بحث مدل‌سازی در این پژوهش، رویه کلی یا گام‌های انجام آن در ذیل ارائه می‌گردد:

۱. تعیین مفروضات مدل
۲. مدل‌سازی ریاضی (تعریف متغیرها، پارامترها، تعیین اهداف و محدودیت‌ها)
۳. متمایز ساختن پارامترهای قطعی و غیرقطعی
۴. تعیین مقادیر پارامترها، حل مدل و بررسی کیفیت جواب‌ها(تحلیل حساسیت)

الف) مفروضات مسئله تحقیق

مفروضات این پژوهش به شرح ذیل عبارتند از:

- حمل و نقل محصولات از مجموعه‌ای از عرضه‌کنندگان به مجموعه‌ای از مشتریان/خرده فروشان متناظر از طریق یک انبار متقاطع است.
- حمل مستقیم از عرضه‌کننده به خرده‌فروش مجاز نیست.
- یک پنجره زمانی برای هر مشتری در نظر گرفته شده است.
- مجموعه‌ای از وسایل نقلیه مشابه برای حمل محصولات از عرضه‌کننده به خرده‌فروش استفاده می‌شود.
- کل فرایند باید در افق برنامه‌ریزی تکمیل شود.
- دوره‌ی زمانی، یک روزه(سه شیفت در یک روز) در نظر گرفته می‌شود.
- وسیله نقلیه از پیش تعریف شده‌ای برای برخی عرضه‌کنندگان و خرده‌فروشان وجود ندارد.
- ظرفیت تولید کنندگان و مراکز توزیع محدود است.
- مراکز توزیع، تقاضای خرده فروشان را برآورده می‌کنند و تولیدکنندگان می‌توانند سفارشات مراکز توزیع را برآورده کنند.
- خرده فروشان و مراکز توزیع می‌توانند بیش از سفارشات، سفارش دهند (اجازه ذخیره کردن نیز دارند).
- چند نوع محصول در نظر گرفته شده است.
- در خرده فروشی و مراکز توزیع، برگشت سفارش ممکن نیست.
- زمان و هزینه ارسال وسیله مشخص است.
- هزینه سفر و مسافت واحد مشخص است.

ب) مدل سازی ریاضی

زنجیره تامین شکل (۱) را در نظر بگیرید که شبکه زنجیره تامین مورد مطالعه می‌باشد، زنجیره تامین چهار سطحی شامل چند تامین‌کننده(I)، چند تولیدکننده(J)، چند توزیع‌کننده (K) و مشتریان (L) می‌باشند که در این پژوهش به دنبال مکانیابی صحیح آنها به منظور بهینه‌سازی هزینه و زمان تدارک در راستای رضایت‌مندی مشتریان هستیم. در این پژوهش اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و غیر منفی به شرح ذیل عبارتست:

اندیس‌ها:

I : مجموعه ایی از تامین کنندگان $i \in \{1,2,...,\ I\}$

J : مجموعه‌ایی از مراکز تولید $j \in \{1,2,...,\ J\}$

K : مجموعه‌ایی از مراکز توزیع $k \in \{1,2,...,\ K\}$

L : مجموعه‌ایی از مشتریان $l \in \{1,2,...,\ L\}$

P : مجموعه‌ایی از محصولات $p \in \{1,2,...,\ P\}$

τ : مجموعه‌ایی از مواد اولیه $\tau \in \{1,2,...,\ \tau\}$

M : مجموعه‌ایی از وسایل(امکانات) حمل و نقل $m \in \{1,2,...,\ M\}$

T : دوره زمانی $t \in \{1,2,...,\ T\}$

G : گروه محصولات $g \in \{1,2,...,\ G\}$

A : سطح ظرفیت a تامین کننده $a \in \{1,2,...,\ A\}$

B : سطح ظرفیت b تولیدکننده $b \in \{1,2,...,\ B\}$

C : سطح ظرفیت c توزیع کننده $c \in \{1,2,...,\ C\}$

پارامترها:

$\tilde{\theta}_{lt}^{p}$: تقاضای مشتری l برای محصول p در دوره زمانی t

$\omega_{\tau pt}$: مصرف مواد اولیه τ در تولید محصول p در دوره زمانی t

ϕ_{pgt} : گروه محصولات g از محصول p در دوره زمانی t

$\tilde{S}_{i\tau}^{at}$: حداکثر ظرفیت تامین، تامین کننده i با سطح ظرفیت a برای مواد اولیه τ در دوره زمانی t

$\tilde{M}_{jp}^{bt}$: حداکثر ظرفیت تولید، تولید کننده j با سطح ظرفیت b برای محصول p در دوره زمانی t

$\tilde{D}_{kg}^{ct}$: حداکثر ظرفیت توزیع، توزیع کننده k با سطح ظرفیت c برای گروه محصولات g در دوره زمانی t

$\hat{A}_{it}$: حداقل تعداد تامین کننده i انتخابی در دوره زمانی t

$\hat{B}_{jt}$: حداقل تعداد تولیدکننده j انتخابی در دوره زمانی t

$\hat{C}_{kt}$: حداقل تعداد توزیع‌کننده k انتخابی در دوره زمانی t

$\tilde{F}_{ij}$: فاصله مکانی بین تامین کننده i تا تولیدکننده j

$\tilde{W}_{jk}$: فاصله مکانی بین تولیدکننده j تا توزیع‌کننده k

$\tilde{H}_{kl}$: فاصله مکانی بین توزیع‌کننده k تا مشتری l

σ_{τ} : واحد مواد اولیه τ

V_{p} : واحد محصول p

E_{it}^{a} : هزینه ثابت و عملیاتی انتخاب تامین کننده i با سطح ظرفیت a در دوره زمانی t

Q_{jt}^{b} : هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولیدکننده j با سطح ظرفیت b در دوره زمانی t

N_{kt}^{c} : هزینه ثابت و عملیاتی احداث توزیع کننده k با سطح ظرفیت c در دوره زمانی t

R_m : هزینه هر واحد حمل و نقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m

U_m : هزینه هر واحد حمل و نقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m

$\in_{it}^{a}$: هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی انتخاب تامین کننده i با سطح ظرفیت a در دوره زمانی t

η_{jt}^{b} : هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی احداث تولیدکننده j با سطح ظرفیت b در دوره زمانی t

v_{kt}^{c} : هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی احداث توزیع کننده k با سطح ظرفیت c در دوره زمانی t

$\tilde{\lambda}_m$: ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ایی هر واحد حمل و نقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m

$\tilde{\mu}_m$: ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ایی هر واحد حمل و نقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m

متغیرهای تصمیم:

$\alpha_{it}^{a} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$: متغیر باینری، اگر تامین کننده i با سطح ظرفیت a در دوره زمانی t انتخاب شود برابر با ۱ در غیر اینصورت برابر با صفر.

$\beta_{jt}^{b} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$: متغیر باینری، اگر تولیدکننده j با سطح ظرفیت b در دوره زمانی t احداث شود برابر با ۱ در غیر اینصورت برابر با صفر.

$\gamma_{kt}^{c} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$: متغیر باینری، اگر توزیع کننده k با سطح ظرفیت c در دوره زمانی t احداث شود برابر با ۱ در غیر اینصورت برابر با صفر.

متغیرهای نامنفی:

$\tilde{X}_{ij}^{\tau tm}$: مقدار مواد اولیه τ انتقال داده شده از تامین کننده i به تولیدکننده j در دوره زمانی t با توجه به نوع وسیله حمل m

$\tilde{Y}_{jk}^{ptm}$: مقدار محصول p انتقال داده شده از تولیدکننده j به توزیع کننده k در دوره زمانی t با توجه به نوع وسیله حمل m

$\tilde{Z}_{kl}^{ptm}$: مقدار محصول p انتقال داده شده از توزیع کننده k به مشتری l در دوره زمانی t با توجه به نوع وسیله حمل m

توابع هدف مدل ریاضی پژوهش عبارتست:

$$\begin{aligned} Min \quad F_{Eco} &= \sum_i \sum_a \sum_t E_{it}^{a}.\alpha_{it}^{a} + \sum_j \sum_b \sum_t Q_{jt}^{b}.\beta_{jt}^{b} + \sum_k \sum_c \sum_t N_{kt}^{c}.\gamma_{kt}^{c} \\ &+ \sum_i \sum_j \sum_\tau \sum_t \sum_m \tilde{F}_{ijt}.R_m.\sigma_\tau \tilde{X}_{ij}^{\tau tm} + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_m G_{jkt}.U_m.V_p.\tilde{Y}_{jk}^{ptm} \\ &+ \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_m \tilde{H}_{kl}.U_m.V_p.\tilde{Z}_{kl}^{ptm} \end{aligned} \qquad (۱)$$

$$Min \quad F_{Env} = \sum_i \sum_a \sum_t \in {}^a_{it} \ \alpha {}^a_{it} + \sum_j \sum_b \sum_t \eta {}^b_{jt} . \beta {}^b_{jt} + \sum_k \sum_c \sum_t \nu {}^c_{kt} . \gamma {}^c_{kt}$$
$$+ \sum_i \sum_j \sum_\tau \sum_t \sum_m \tilde{F}_{ijt} \lambda_m . \sigma_\tau \tilde{X}^{\tau tm}_{ij} + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_m G_{jkt} . \mu_m . V_p . \tilde{Y}^{ptm}_{jk} \quad (۲)$$
$$+ \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_m \tilde{H}_{kl} . \mu_m . V_p . \tilde{Z}^{ptm}_{kl}$$

$$Min \quad F_{delivery\ -time} = \sum_i \sum_m \sum_j \sum_k \sum_t \left(\frac{\tilde{\theta}^p_{lt}}{R_m + U_m} \right) \tilde{Y}^{ptm}_{jk} \quad (۳)$$

$$Min \quad F_{Backorder\ -level} = \sum_t Max \sum_p \sum_k \tilde{Z}^{ptm}_{kl} \quad (۴)$$

تابع هدف اول ، کمینه کردن هزینه‌ها هزینه ثابت و عملیاتی انتخاب تامین کننده؛ هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولید کننده؛ هزینه ثابت و عملیاتی احداث توزیع کننده؛ بخش چهارم، هزینه حمل و نقل مواد اولیه بر اساس مسافت؛ بخش پنجم، هزینه انتقال محصول از تولیدکننده به توزیع کننده و بخش ششم، هزینه انتقال هر واحد محصول از توزیع کننده به مشتری می‌شود. تابع هدف دوم، کمینه کردن آلودگیهای زیست محیطی شامل تابع هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخاب تامین کننده، هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث تولید کننده، انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث توزیع کننده، هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل مواد اولیه از تامین کننده به تولید کننده، هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل محصول از تولیدکننده به توزیع کننده، هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل محصول از توزیع کننده به مشتری است. تابع هدف سوم و چهارم توابع رضایتمندی مشتری به وسیله کمینه کردن زمان ارسال و سطح فروش از دست رفته است. محدودیت‌های مدل ریاضی پژوهش عبارتست از:

$$\sum_j \tilde{X}^{\tau t}_{ij} \le \sum_a \tilde{S}^{at}_{i\tau} . \alpha^a_{it} \quad \forall i, \tau, t \quad (۵)$$

$$\sum_k \tilde{Y}^{pt}_{jk} \le \sum_b \tilde{M}^{bt}_{jp} . \beta^b_{jt} \quad \forall j, p, t \quad (۶)$$

$$\sum_l \sum_p V_p \tilde{Z}^{pt}_{kl} . \phi_{pgt} \le \sum_c \tilde{D}^{ct}_{kg} . \gamma^c_{kt} \quad \forall k, g, t \quad (۷)$$

$$\sum_j X^\tau_{ij} \ge \sum_k \sum_p \tilde{Y}^p_{jk} \omega_{\tau pt} \quad \forall j, \tau, t \quad (۸)$$

$$\sum_j \tilde{Y}^{pt}_{jk} \ge \sum_l \tilde{Z}^{pt}_{kl} . \alpha^a_{it} \quad \forall k, p, t \quad (۹)$$

$$\sum_k \tilde{Z}^{pt}_{kl} \ge \tilde{\theta}^p_{lt} \quad \forall l, p, t \quad (۱۰)$$

$$\sum_a \alpha^a_{it} \le 1 \quad \forall i, t \quad (۱۱)$$

$$\sum_b \beta^b_{jt} \le 1 \quad \forall j, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_c \gamma^c_{kt} \le 1 \quad \forall k, t \quad (۱۳)$$

$$\sum_i \sum_a \sum_t \alpha^a_{it} \le \hat{A}_{it} \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j}\sum_{b}\sum_{t}\beta_{jt}^{b} \le \hat{B}_{jt} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{k}\sum_{c}\sum_{t}\gamma_{kt}^{c} \le \hat{C}_{kt} \quad (۱۶)$$

$$\tilde{X}_{ij}^{\tau t}, \tilde{Y}_{jk}^{pt}, \tilde{Z}_{kl}^{pt} \ge 0 \quad (۱۷)$$

$$\alpha_{it}^{a}, \beta_{jt}^{b}, \gamma_{kt}^{c} = 0,1 \quad (۱۸)$$

محدودیت (۵) تضمین می‌کند که مقدار ماده اولیه انتقال داده شده از تامین‌کننده به تولیدکننده از حداکثر ظرفیت تامینِ تامین کننده بیشتر نشود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که مقدار محصول منتقل شده از تولیدکننده به توزیع کننده نباید از حداکثر ظرفیت تولید تولیدکننده بیشتر شود. محدودیت (۷) بیانگر این مطلب است که حداکثر ظرفیت توزیع، توزیع کننده k با سطح ظرفیت c برای گروه محصولات g در دوره زمانی t نباید بیشتر از سطح ظرفیت تعریف شده باشد. محدودیت (۸) نشان می-دهد که مقدار ماده اولیه منتقل شده از تامین کننده به تولیدکننده، باید حداقل برابر مقدار ماده اولیه مورد نیاز برای تولید کل محصولات برنامه‌ریزی شده شود تا دچار کمبود ماده اولیه مورد نیاز نشویم. بر اساس محدودیت (۹)، مقدار محصول منتقل شده از تولیدکننده به توزیع کننده باید حداقل برابر مقدار محصول منتقل شده از توزیع کننده به مشتری باشد تا دچار کمبود نشویم. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که مقدار محصول منتقل شده از توزیع کننده به مشتری حداقل برابر تقاضای مشتری باشد. بدین ترتیب از فروش از دست رفته جلوگیری خواهد شد. محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که در هر دوره زمانی حداکثر یک تامین کننده انتخاب شود. محدودیت (۱۲) نیز تعداد تولیدکنندگان را در هر زمان حداکثر برابر یک نگه می‌دارد. محدودیت (۱۳) نیز تعداد توزیع کنندگان را در هر دوره حداکثر برابر ۱ در نظر می‌گیرد. محدودیت‌های (۱۴) الی (۱۶) نشان می‌دهد که حداقل تعداد تامین‌کنندگان باید برابر تامین‌کنندگان انتخابی باشد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) نیز محدودیتهای منطقی مسله هستند.

۳- نتایج و بحث

مسئله پژوهش، مدل‌سازی مکانیابی تسهیلات بهینه‌سازی جریان در زنجیره تامین چهار سطحی کالای فاسد شدنی است. برای این کار از برنامه‌ریزی ریاضی استفاده می‌شود که از دقت بالایی برخوردار است. همچنین با توضیحات داده شده برای مدل‌سازی مکانیابی تسهیلات بهینه‌سازی جریان، برای افزایش دقت وکارایی مدل، رویکرد مکانیابی تسهیلات برای این زنجیره در نظر گرفته شده‌است تا با استفاده از همه راه‌های موجود، بتوان به بالاترین حد ممکن از بهینگی دست یافت. در گام بعدی اعتبار الگوریتم ارائه شده برای حل مسئله سنجیده شده و در صورت امکان قدرت حل الگوریتم با دیگر الگوریتم‌های موجود در ادبیات موضوع مقایسه می‌شود. سرانجام پس از تایید اعتبار و کارایی روش حل پیشنهادی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیق انجام گرفته و زمینه تحقیقات آتی در زمینه حل مسئله انجام می‌گردد. از آنجا که بیشتر مسائل طراحی زنجیره تامین چهار سطحی NP-hard هستند(Altiparmak et al., 2006). روش های دقیق قابلیت حل این گونه مسائل در ابعاد بزرگ را نداشته است؛ از این روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل مسائل با ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. از این رو در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی توابع هدف در مدل چند هدفه از ترکیب روش الگوریتم تبرید شبیه‌سازی[۴] و الگوریتم گوزن قرمز[۵] استفاده خواهیم نمود.

الف) الگوریتم گوزن قرمز

این الگوریتم در سال ۲۰۱۶ توسط حاجی آقائی کشتلی و فتح اللهی فرد ارائه گردیده است. الگوریتم گوزن قرمز با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود. این جمعیت به دو گروه تقسیم می‌گردد: گروه گوزن های ماده و گروه دیگر گوزن های نر. رقابت بر سر

[4] Simulated Annealing (SA)
[5] Red Deer Algorithm (RDA)

جلب کردن گوزن های ماده از طریق مبارزه است که رفتار جفت گیری گوزن ها اساس الگوریتم تکاملی پیشنهاد شده است. گوزن نر با صدای بلند بارها و بارها سر و صدا ایجاد می‌کند. نرخ غرش رابطه مستقیمی با جذب گوزن ماده و موفقیت در تولید مثل و توانایی مبارزه دارد. نرخ غرش گوزن نر حداکثر حدود ۸ غرش در هر دقیقه قبل از مبارزه می‌باشد، که اگر رقیبی نباشد گوزن به غرش خود ادامه می‌دهد. مرحله مبارزه به این صورت است که گوزن‌ها در مقابل یکدیگر می‌ایستند و غرش می‌کنند و در مرحله دوم به سمت یکدیگر می‌روند. گوزن‌های نر به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ "فرماندهان" و " گوزن های معمولی". علاوه بر این، گروهی از گوزن‌های ماده بوسیله فرماندهان تشکیل می‌شود. میزان جمعیت هر واحد براساس توانایی فرماندهان درغرش و مبارزه است. پس از تشکیل یک واحد، فرماندهان و گوزن‌های نر هر واحد برای تصاحب آن با هم مبارزه می‌کنند. در نهایت فرماندهان هم با گوزن‌های ماده واحد خود و هم با گوزن های ماده واحدهای دیگرجفت‌گیری می‌کنند.همچنین گوزن های نر با نزدیکترین گوزن ماده بدون در نظر گرفتن محدودیت، جفت گیری می‌کنند.

ب) الگوریتم ترکیبی گوزن قرمز

کاربرد الگوریتم‌های ترکیبی در بهینه‌سازی دنیای واقعی زیاد است. در این حالت از یک الگوریتم برای رویکرد کلی استفاده می‌شود، اما در هنگام عمل بازگشت، آن را به یک الگوریتم دیگر، که بر روی داده‌های کوچک کارآمدتر است تغییر می‌دهیم. در این پژوهش ترکیبی از شبیه‌سازی تبرید و گوزن قرمز بعنوان یک الگوریتم جدید هیبرید اعمال شده است. تنظیم پارامترهای آن برای یکی از ابعاد مورد نظر صورت گرفته است. در این الگوریتم، گوزن قرمز به عنوان حلقه اصلی و شبیه‌سازی تبرید بعنوان ابزاری برای جستجوی محلی است. دو مرحله غرش کردن و مبارزه که مربوط به فاز تمرکز است، از الگوریتم گوزن قرمز حذف شده است. به همین منظور از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به جای این دو مرحله به عنوان ابزار جستجو استفاده شده است. بصورت کلی در این الگوریتم از شبیه سازی تبرید بعنوان فاز تمرکز و از گوزن قرمز بعنوان فاز تنوع استفاده شده است. در هر نسل، هر گوزن نر، یک جواب اولیه برای شبیه سازی تبرید می باشد.

برای مسئله پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی استفاده خواهد شد که ترکیبی از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده و الگوریتم گوزن قرمز (RDA) است که به اختصار H-RS نامیده می‌شود. الگوریتم RDA یک الگوریتم بر پایه جمعیت است و چندین مرحله دارد. این ترکیب به منظور کاهش زمان محاسباتی و حذف برخی مراحل با جایگزینی با قوانین SA صورت گرفته است. مراحل اجرای این الگوریتم به صورت ضمیمه شماره (۱) انجام می‌شود. با توجه به چندهدفه بودن مسئله پژوهش و استفاده از روش تلفیقی الگوریتم تبرید شبیه سازی شده و گوزن قرمز برای حل مدل ریاضی بر همین اساس عملکرد مدلهای چندهدفه از عملکرد مدل‌های تک هدفه بسیار پیچیده‌تر است. برهمین اساس، یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جوابهای حاصل از الگوریتم های ارائه شده کافی باشد. به طور کلی یک جواب ارائه شده توسط مدل‌های چندهدفه می بایست سه ویژگی داشته باشد:

- فاصله بین مجموعه جوابهای غالب حاصل از حل مسئله توسط الگوریتم با مجموعه پارتو بهینه باشد؛
- نحوه توزیع جوابها در مجموعه جوابهای پارتو به صورت یکنواخت باشد؛
- جوابهای حاصل به صورت گسترده بخش زیادی از مقادیر هریک از توابع هدف را پوشش دهند.

ج) داده‌های ورودی مسئله تحقیق

– در ادامه جداول(۱و ۲) مقادیر داده‌های ورودی که در حل مدل ریاضی طراحی شده به جهت بهینه‌سازی بکار می‌روند.

جدول شماره (۱): تعداد مجموعه‌های درگیر در مسئله تحقیق

ردیف	عنوان	مقدار
۱	مجموعه ایی از تامین کنندگان	۵
۲	مجموعه‌ایی از مراکز تولید	۵
۳	مجموعه‌ایی از مراکز توزیع	۴
۴	مجموعه‌ایی از مشتریان	۳
۵	مجموعه‌ایی از محصولات	۴
۶	مجموعه‌ایی از مواد اولیه	۴

ردیف	عنوان	مقدار
۷	مجموعه‌ایی از وسایل(امکانات) حمل و نقل	۹
۸	دوره زمانی	۱۲
۹	گروه محصولات	۵
۱۰	سطح ظرفیت a تامین کننده	۰/۵
۱۱	سطح ظرفیت b تولیدکننده	۰/۶۵
۱۲	سطح ظرفیت c توزیع کننده	۰/۴۷

داده‌های ورودی برای هریک از پارامترها براساس تابع توزیع تصادفی که در جدول (۲) نشان داده شده‌اند، بر این اساس توابع توضیح مختلف قابل مشاهده می‌باشند.

جدول شماره (۲): توابع توزیع تولید پارامترهای مسئله پژوهش

ردیف	نماد	پارامتر	تابع توزیع
۱	$\tilde{\theta}_{lt}^{p}$	تقاضای مشتری l برای محصول p در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۲	$\omega_{\tau pt}$	مصرف مواد اولیه τ در تولید محصول p در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۳	ϕ_{pgt}	گروه محصولات g از محصول p در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۴	$\tilde{S}_{i\tau}^{at}$	حداکثر ظرفیت تامین، تامین کننده i با سطح ظرفیت a برای مواد اولیه τ در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۵	$\tilde{M}_{jp}^{bt}$	حداکثر ظرفیت تولید، تولید کننده j با سطح ظرفیت b برای محصول p در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۶	$\tilde{D}_{kg}^{ct}$	حداکثر ظرفیت توزیع، توزیع کننده k با سطح ظرفیت c برای گروه محصولات g در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۷	$\hat{A}_{it}$	حداقل تعداد تامین کننده i انتخابی در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۸	$\hat{B}_{jt}$	حداقل تعداد تولیدکننده j انتخابی در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۹	$\hat{C}_{kt}$	حداقل تعداد توزیع‌کننده k انتخابی در دوره زمانی t	$U(50,100)$
۱۰	$\tilde{F}_{ij}$	فاصله مکانی بین تامین کننده i تا تولیدکننده j	$U(250,400)$
۱۱	$\tilde{W}_{jk}$	فاصله مکانی بین تولیدکننده j تا توزیع‌کننده k	$U(250,400)$
۱۲	$\tilde{H}_{kl}$	فاصله مکانی بین توزیع‌کننده k تا مشتری l	$U(250,400)$
۱۳	σ_{τ}	واحد مواد اولیه τ	$U(5,25)$
۱۴	V_{p}	واحد محصول p	$U(5,25)$
۱۵	E_{it}^{a}	هزینه ثابت و عملیاتی انتخاب تامین کننده i با سطح ظرفیت a در دوره زمانی t	$U(2000,10000)$
۱۶	Q_{jt}^{b}	هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولیدکننده j با سطح ظرفیت b در دوره زمانی t	$U(2000,10000)$
۱۷	N_{kt}^{c}	هزینه ثابت و عملیاتی احداث توزیع کننده k با سطح ظرفیت c در دوره زمانی t	$U(2000,10000)$
۱۸	R_{m}	هزینه هر واحد حمل و نقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m	$U(2000,10000)$
۱۹	U_{m}	هزینه هر واحد حمل و نقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m	$U(350,750)$
۲۰	$\in_{it}^{a}$	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی انتخاب تامین کننده i با سطح ظرفیت a در دوره زمانی t	$U(100,500)$
۲۱	η_{jt}^{b}	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی احداث تولیدکننده j با سطح ظرفیت b در دوره زمانی t	$U(100,500)$
۲۲	v_{kt}^{c}	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی احداث توزیع کننده k با سطح ظرفیت c در دوره زمانی t	$U(100,500)$
۲۳	$\tilde{\lambda}_{m}$	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ایی هر واحد حمل و نقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m	$U(0,1)$

ردیف	نماد	پارامتر	تابع توزیع
۲۴	$\tilde{\mu}_m$	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ایی هر واحد حمل و نقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل m	$U(0,1)$

د) تنظیم پارامترها

نتایج الگوریتم های فرا ابتکاری به مقادیر پارامترهای ورودی آن وابسته می‌باشد، لذا اکنون چگونگی تنظیم مقادیر پارامترهای پیشنهاد شده را بیان می‌نماییم. ضمناً شرط توقف رسیدن به تکرار بیست(۲۰) درنظر گرفته شده است. روشهای طراحی آزمایشات در بسیاری از نظام‌ها کاربرد وسیع دارند. و ابزاری فوق العاده مهم برای عملکرد فرایندها و اصلاح آنهاست. روشهای تنظیم پارامتر شامل:

- ارجاع به مطالعات گذشته
- روش سعی وخطا
- روش انجام آزمایشات کامل
- روش تاگوچی
- روش سطح پاسخ
- شبکه عصبی – فازی تطبیق پذیر
- استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری(قبل از اجرا یا درحین اجرا).

در این پژوهش از روش تاگوچی استفاده نمودیم. روش طراحی پارامتر، یک روش مهندسی به منظور طراحی محصول یا فرآیند ارائه می‌نماید که هدف آن کمینه‌سازی تغییرات و حساسیت عوامل اغتشاش می‌باشد. در یک طراحی پارامتر کارا، هدف اول شناسایی و تنظیم فاکتورهایی است که تغییرات متغیر، پاسخ را به حداقل می‌رساند و هدف بعدی شناسایی فاکتورهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل است. تاگوچی به طور خاص مفهوم تابع زیان[6] را مطرح کرده است. تابع زیان، هزینه، هدف و تنوع را ترکیب کرده و از آن یک معیار سنجش به دست می‌آورد و حدود مشخصات را در درجه دوم اهمیت قرار می دهد. افزون بر این، تاگوچی مفهوم استحکام را نیز گسترش داده است. هدف نهایی این روش پیداکردن ترکیب بهینه مقدار فاکتورهای قابل کنترل است. بنیان فلسفه تاگوچی، طراحی مستحکم و با ثبات است. جهت استفاده از این روش با استفاده از نرم افزارMinitab 16 وارد پنجره (DOE) شده وروش تاگوچی را انتخاب می‌نماییم. در اینجا باید تعداد فاکتورهای موردنیاز جهت تعیین تعداد، نحوه ترکیب سطوح آزمایش‌ها و تعداد سطوح مشخص گردد.

جدول شماره (۳): فاکتورها وسطوح کاندید در الگوریتم تلفیقی گوزن قرمز و شبیه‌سازی تبرید

پارامتر	مقادیر سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Maximum iteration	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
Population size	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰
Number of males	۲۰	۳۵	۵۰
Percentage of commanders	۰/۵	۰/۶	۰/۸
Percentage of inside the harems	۰/۴	۰/۶	۰/۷
Percentage of outside the harems	۰/۳	۰/۵	۰/۵

باتوجه به آرایه های متعامد استاندارد تاگوچی L9 را به عنوان طرح مناسب آزمایشی برای تنظیم پارامترهای پیشنهادی انتخاب شده است. آرایه L9 طرح آزمایشی با ۹ آزمایش است. طرحهای آزمایشی در جدول (۴) برای الگوریتم آمده است.

جدول شماره(۴): طرح آزمایشی با آرایه متعامدL9 .برای الگوریتم لفیقی گوزن قرمز و شبیه‌سازی تبرید

ترتیب اجرا	پارامترهای الگوریتم	مقادیرجواب

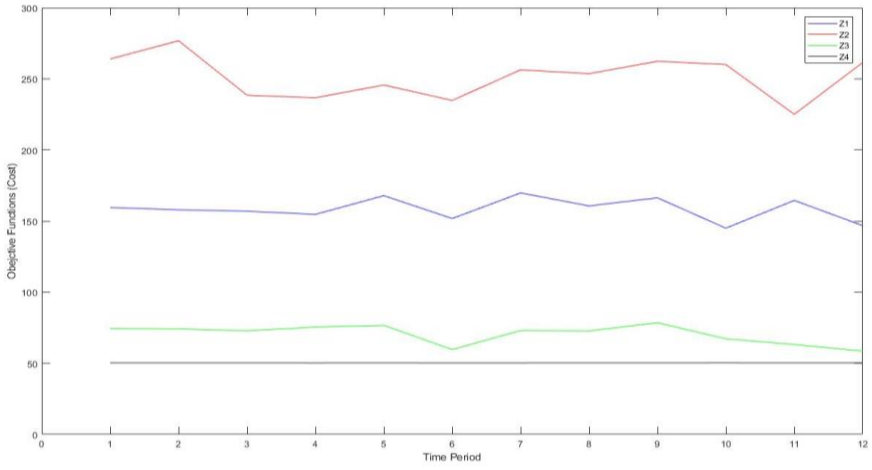
[6] loss function

	outside	inside	commanders	males	Population	iteration	MID
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۶/۹۵۱۷
۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۳۷/۱۶۲
۳	۱	۳	۳	۱	۳	۳	۳/۸۱۲
۴	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۹/۴۶۵
۵	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۵/۶۵۶۵
۶	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۹/۵۷۴۷
۷	۱	۱	۱	۳	۱	۳	۱۶/۳۷۵۲
۸	۱	۲	۲	۳	۲	۱	۱۴/۲۱۲۸
۹	۱	۳	۳	۳	۳	۲	۷/۹۲۳۱

الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی برای هر آزمایش تاگوجی اجرا می‌شود و سپس میانگین نسبت (S/N)بدست آمده برای هر سطح از عوامل مربوط به الگوریتم و سطوح بهینه پارامترهای ورودی این الگوریتم در جدول (۵) ارائه گردیده است.

جدول شماره (۵): نتایج بهینه هریک از توابع هدف در هر دوره

توابع	دوره											
هدف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۱۵۹/۵	۱۵۷/۹۲	۱۵۶/۹۱	۱۵۴/۷۱	۱۶۷/۸۶	۱۵۱/۷۷	۱۶۹/۷۸	۱۶۰/۶۶	۱۶۶/۳۴	۱۴۴/۹۹	۱۶۴/۵۲	۱۴۶/۷۸
۲	۲۶۳/۹۴	۲۷۶/۷۷	۲۳۸/۴۵	۲۳۶/۶۹	۲۴۵/۶۴	۲۳۴/۸۰	۲۵۶/۳۱	۲۵۳/۶۳	۲۶۲/۳۱	۲۶۰/۰۳	۲۲۵/۰۴	۲۶۱/۴۶
۳	۷۴/۵۷	۷۴/۱۷	۷۲/۸۲	۷۵/۴۹	۷۶/۶۶	۵۹/۶۴	۷۳/۰۳	۷۲/۷۵	۷۸/۵	۶۷/۲۱	۶۳/۱۸	۵۸/۵۷
۴	۵۰/۳۰	۵۰/۳۴	۵۰/۳۱	۵۰/۲۸	۵۰/۳۱	۵۰/۲۶	۵۰/۲۸	۵۰/۳۲	۵۰/۳۲	50.35	۵۰/۳۱	۵۰/۲۹

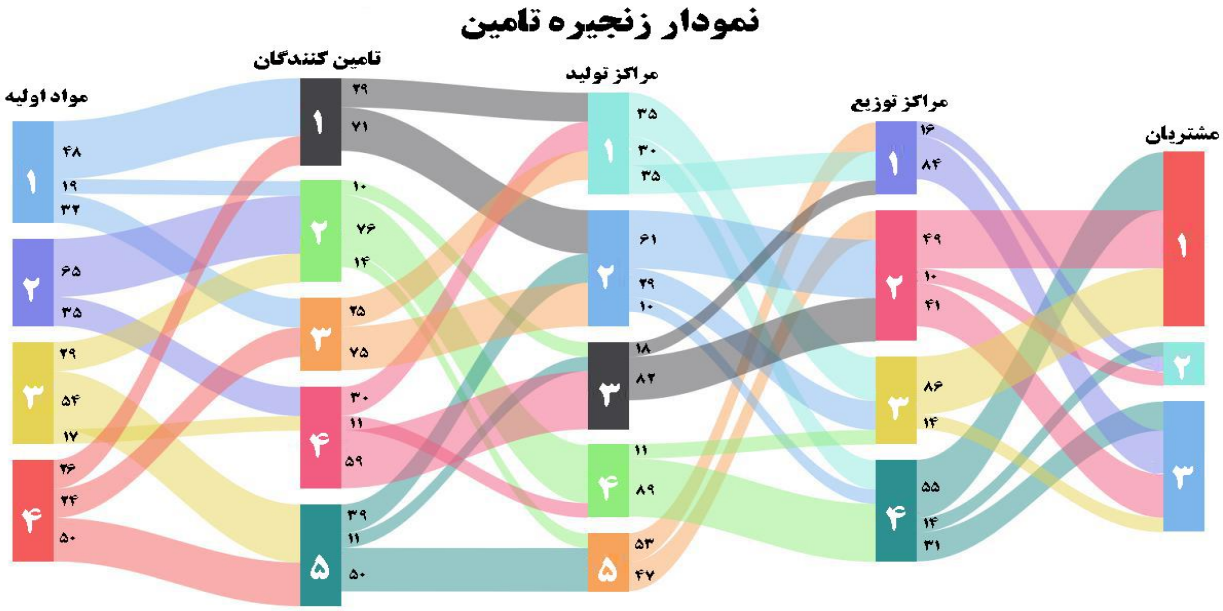


شکل شماره (۲): روند تغییرات توابع هدف در دوره‌های زمانی مختلف

شکل شماره (۲) بیانگر روند تغییرات توابع چهارگانه مدل پژوهش براساس دوره‌های دوازده‌گانه براساس الگوریتم تلفیقی گوزن قرمز و شبیه‌سازی تبرید است.

همانگونه که در شکل (۳) ملاحظه می‌نمائید، مسئله پژوهش حاضر دارای ۴ مواد اولیه، ۵ تامین‌کننده، ۵ تولیدکننده، ۴ توزیع-کننده و ۳ مشتری را دارا می‌باشد. مقادیر نشان داده شده بر روی شکل مذکور بیانگر میزان محصول یا کالای انتقال داده شده از هر سطح به سطح دیگر می‌باشد. برای مثال تولیدکننده شماره ۴ از مجموع ۱۰۰ محصول تولید شده در این واحد به میزان ۸۹ واحد محصول به توزیع‌کننده ۴ و ۱۱ واحد محصول باقیمانده را به توزیع‌کننده شماره ۳ ارسال می‌کند. در این شکل می‌توان

دریافت که بهینگی شبکه به صورتی است که سعی شده است مقادیر لازم برای هر سطح از نزدیک‌ترین واحد از سطح قبلی به آن تامین شود.



شکل شماره(۳): مقادیر انتقال جریان در بین سطوح مختلف مسئله پژوهش

ه) نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی تولید کلی در زنجیره تامین تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. رویکردهای مورد استفاده ضمن یکپارچه نمودن متمرکز تصمیمات برنامه‌ریزی کلی و برنامه‌ریزی زنجیره تامین، شامل دو گام اساسی می‌باشند: در گام اول؛ تصمیمات کلانِ پیش‌تولید، نظیر میزان و نحوه تامین مواد اولیه از تامین کنندگان، برنامه‌ریزی لجستیک و حمل و نقل مربوط به آن، تعیین نرخ تولید و مدیریت نیروی انسانی در کارخانه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم، با تحقق تصمیمات مربوط به گام اول، در مورد میزان و نحوه نگهداری موجودی‌ها، میزان و نحوه توزیع کالا به مشتریان به همراه برنامه‌ریزی لجستیک آن، تصمیم‌گیری می‌شود. تصمیمات مربوط به گام اول همگی مبتنی بر پیش بینی مقادیر پارامترها صورت می‌گیرد و تصمیمات مربوط به گام دوم همگی مبتنی بر مقادیر واقعی پارامترها گرفته می‌شود. مدل ارائه شده در این تحقیق، شامل ۴ تابع هدف می‌باشد که تابع هدف اول، کمینه کردن هزینه‌ها را بر عهده دارد که شامل: بخش اول، هزینه های سیستم زنجیره تامین، بخش دوم، کمینه کردن آلودگیهای زیست محیطی را به عهده دارد. تابع هدف سوم و چهارم توابع رضایتمندی مشتری به وسیله کمینه کردن زمان ارسال و سطح فروش از دست رفته است. مدل پژوهش، با فرضیات اساسی نظیر عدم قطعیت در تقاضا برای محصولات مختلف، عدم قطعیت در تامین، زمان تدارک و نیز پارامترهای هزینه‌ای و قوانین و مقررات زیست محیطی حاکم بر زنجیره‌های تامین پیاده سازی شده بودند. برای ارزیابی کارایی و کاربرد پذیری مدل، مطالعه موردی در صنایع غذایی بهشهر ارائه گردید و همچنین تحلیل حساسیت‌های مختلفی برای اعتبارسنجی مدل صورت گرفت. نتایج محاسباتی بدست آمده از یک مجموعه داده‌های واقعی نشان داد که مدل می‌تواند مفاهیمی نظیر رضایتمندی مشتریان را بصورت یکپارچه و همزمان با تصمیمات تاکتیکی تولید در نظر بگیرد. مدل با معرفی مفهوم بهره‌وری نیروی کار، ضمن یکپارچه نمودن تصمیمات مربوط به مدیریت منابع انسانی، برنامه کلی تولید صورت گرفته را در مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در تقاضا منعطف تر ساخت. همچنین مدل، نشان داد چگونه مقررات و قوانین بین المللی نظیر مقررات زیست محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماندهای صنعتی می‌تواند ساختارهای برنامه کلی را تحت الشعاع قرار دهد و نیز در نظر گرفتن توابع غیر خطی واقعی برای تخفیف و کمبود، مدل‌هایی واقع بینانه تر ایجاد می‌کند و تصویر شفاف‌تری نسبت به آنچه در آینده بر اثر تحقق سناریوهای مختلف رخ خواهد داد، ارائه می‌دهد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه وحدانی و طاهروردی (۱۳۹۸) نشان می‌دهد که در این مطالعه محققین به دنبال بهینه سازی چهار هدف انواع هزینه های زنجیره تامین چهار سطحی، انتشار گازهای گلخانه ای، زمان ارسال سفارشات و سطح فروش از دست رفته میزان تقاضای مشتریان می باشند و این در حالیست که در مطالعه گذشته اهدافی همچون بهینه سازی زمان و برخی از هزینه مورد بررسی واقع گردیده بود. در تحقیق خبوشانی و همکاران(۱۳۹۹) نیز فقط به اهدافی همچون هزینه و زمان ارسال سفارشات اشاره گردیده بود و نتایج تحقیق با این مطالعات در یافته‌هایشان مطابقت دارد.

با تغییر در مقدار پارامترها در مدل چند هدفه ارائه شده، می‌توان حساسیت پارامترها را نسبت به تغییر مقدارشان مشاهده نمود. پارامترهای مقدار تقاضای مشتریان و مصرف مواد اولیه برای تحلیل حساسیت در مدل در نظر گرفته می‌شود. تغییر در مقدار توابع هدف هزینه، میزان انتشار گازهای گلخانه ای ، زمان ارسال و سطح فروش از دست رفته میزان تقاضای مشتریان را نشان می دهد. همانطور که در مشاهده گردید برای افزایش میانگین تقاضای مشتریان، مقدار تابع هدف هزینه و زمان افزایش می‌یابد و مقدار تابع نیز کاهش می‌یابد.

برای انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود، یکپارچه سازی تصمیمات استراتژیک را محققان لحاظ نموده و در بحث مدیریت پسماندهای صنعتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مدل را با لحاظ نمودن صرفه جویی مقیاس اجرایی نمایند. از سوی دیگر الگوریتم های ابتکاری و یا فرا ابتکاری دیگر برای بهینه سازی مسائل چند هدفه تحت شرایط عدم قطعیت با ابعاد بزرگ را اقدام نمایند. از سوی دیگر با در نظر گرفتن متغیرهای دیگری مانند نیروی انسانی، پسماندهای صنعتی نیز می توان برای در تحقیقات آینده اقدام نمود.

٤-منابع

1. Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L. and Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51:196-215.
2. 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(3), 298-310.
3. Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X., & Gao, K. (2018). A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 5(8),15-33.
4. De Keizer, M., Akkerman, R., Grunow, M., Bloemhof, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. (2017). Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 535-549.
5. Garai, A., Roy, T. K.(2020).Multi-objective optimization of cost-effective and customer-centric closed-loop supply chain management model in T-environment. *Soft Computing*, 24(1), 155-178.
6. Khodaparasti, S., Bruni, M. E., Beraldi, P., Maleki, H. R., & Jahedi, S. (2018). A multi-period location-allocation model for nursing home network planning under uncertainty. *Operations Research for Health Care*, 18(2),4-15.
7. Katsaliaki, K., Mustafee, N., & Kumar, S. (2014). A game-based approach towards facilitating decision making for perishable products: An example of blood supply chain. *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4043-4059.
8. Khabooshani,Azam.Yousefi,Ommolbanin.Fadaee,Mahdi.Soltani,Iraj.(2020). Optimization of Closed-Loop Supply Chain with Stability Approach Using Multi- Objective Decision

Making DANP Method in Food Industry Case Study in Dairy Industry. *Industrial Management*, 15(52), 105-126.

9. Kovaˇci´c D, Bogataj Ml. (2013). Reverse logistics facility location using cyclical model of extended MRP theory. *Cent Eur J Oper Res*, 21(1), 41–57.
10. Mogale, D. G., Kumar, M., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2018). Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 40-69.
Morganti, E., & Gonzalez-Feliu, J. (2015). City logistics for perishable products. The case of the Parma's Food Hub. *Case Studies on Transport Policy*, 3(2), 120-128.
11. Mousavi, M., & Rayat, F. (2017). A Bi-Objective Green Truck Routing and Scheduling Problem in a Cross Dock with the Learning Effect. *Iranian Journal of Operations Research*, 8(1), 2-14.
12. Rasi, Ehtesham, R. (2018). A Cuckoo Search Algorithm Approach for Multi Objective Optimization in Reverse Logistics Network under Uncertainty Condition. International *Journal of Supply and Operations Management* (*IJSOM*), 5(1), 66-80.
13. Pishvaee, M. S., & Rabbani, M. (2011). A graph theoretic-based heuristic algorithm for responsive supply chain network design with direct and indirect shipment. Advances in *Engineering Software*, 42(3), 57-63.
14. Pishvaee, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
15. Sun, S., & Wang, X. (2019). Promoting traceability for food supply chain with certification. *Journal of Cleaner Production*, 217, 658-665.
16. Yoo, S. H., Kim, D., & Park, M.-S. (2012). Lot sizing and quality investment with quality cost analyses for imperfect production and inspection processes with commercial return. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 922–933.
17. Vahdani, Behnam & Taherverdi, Mohammad Hossein.(2019). Provide a multi-objective planning model for the location-inventory-routing problem in a multi-level supply chain network with a view to maximizing demand coverage. *Industrial Management Studies*,17(52), 239-286.
18. Wang, X., Guo, H., Yan, R., & Wang, X. (2018). Achieving optimal performance of supply chain under cost information asymmetry. Applied Mathematical Modelling, 53(4): 523-539.
19. 20-Wu, T., Zhang, L. G., & Ge, T. (2019). Managing financing risk in capacity investment under green supply chain competition. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 37-44.

Designing a Multi-Objective Mathematical Model to Locate Four-Echelon Supply Chain Using Meta-Heuristic Algorithms

Hamid Reza Mohammadi
Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
Reza Ehtesham Rasi (Corresponding author)
Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
Email:rezaehteshamrasi@gmail.com
Ali Mohtashami
Associate Professor, Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Abstract
The purpose of this paper is to design a multi-objective mathematical model in order to optimize the four-echelon supply chain of perishable goods using a hybrid algorithm with regard to procurement time, cost and customer satisfaction. Perishable four-echelon food supply chains are considered as different supply chains due to continuous and significant changes in the quality of food products throughout the chain until the end of consumption. In this research, a mathematical model for the location-routing facility in a four-echelon supply chain for perishable products with a simultaneous optimization approach of total supply chain costs, order delivery time, emissions and customer satisfaction is presented. To assess the validity of the research, the mathematical model in Behshahr food industry has been studied and the research problem is presented in the form of a multi-objective nonlinear programming model of mixed integer and to solve it, a hybrid of two refrigeration and red deer algorithms has been used. The results of the proposed algorithm are solved in a case study and the results of the algorithm performance are reviewed based on standard indicators and finally the computational results indicate the efficiency of the algorithm for a wide range of problems of different sizes.

Keywords: Four-echelon supply chain, perishable goods, multi-objective mathematical model, meta-heuristic algorithm.

ضمیمه

مراحل اجرای الگوریتم ترکیبی H-RS

The Combined RDA-SA Algorithm

1. Initialize the Red Deer's population.
2. Calculate the fitness, sort them, and form the hinds (*Nhind*) and male RDs (*Nmale*).
3. Set the Pareto optimal fronts.
4. *while* (*t*< maximum number of iteration)
5. *for* each male RD
6. sub=1;
7. *while* (sub< maximum number of sub-iteration)
8. Create a neighbor of this solution by a procedure, which is depicted in Fig. S.3.2 from Supplementary
9. Material S.3.
10. *if* the new solution is better than prior
11. Replace the old solution by new solution.
12. *Else*
13. *Compute* $\delta, \delta = \left| f_{old} - f_{new} \right|$.
14. *If rand* $< exp\left(-\delta / T\right)$
15. Replace the new solution.
16. *End if*
17. *End if*
18. sub=sub+1;
19. *end while*
20. *end for*
21. Update *T*.
22. Sort the males and form the stags and the commanders.
23. Form harems:

$$\left(V_n = v_n - \max_i\{v_i\};\ p_n = \left|\frac{v_n}{\sum_{i=1}^{N_{com}} v_i}\right|;\ N.harem_n = round\{p_n.N_{hind}\}\right).$$

24. *for* each male commander
25. Mate male commander with the selected hinds of his harem randomly.
26. $\text{New} = \frac{com + hind}{2}$;
27. Select a harem randomly and name it *k*.
28. Mate male commander with some of the selected hinds of the harem.
29. *end for*
30. *for* each stag
31. Calculate the distance between the stag and all hinds and select the nearest hind.
32. $New = \frac{stag + hind}{2}$;
33. Mate stag with the selected hind.
34. *end for*
35. Select the next generation with roulette wheel selection.
36. Update the Pareto optimal solutions.
37. *t*=*t*+1
38. *end while*
39. Consider the best front and evaluate the solutions by assessment metrics.