نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و سوم، شماره ۷۲، پاییز ۱۴۰۰؛ ص ۳۹- ۲۳

علمی – پژوهشی

توسعه یک مدل ریاضی مکان‌یابی– موجودی در طراحی شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم/ معکوس تحت عدم قطعیت تقاضا و برگشتی با سطوح ظرفیت چندگانه

مهدی سیف‌برقی[1*]، مهدی کربلایی‌اسماعیلی[2]

۱- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران، ۲- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، شعبه قزوین، قزوین، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰)

چکیده

امروزه محیط تجاری رقابتی منجر به همکاری فزاینده میان شرکت‌ها به‌عنوان اعضای شبکه زنجیره تأمین شده است. در این زمینه، طراحی شبکه لجستیک زنجیره تأمین با توجه به تأثیر آن بر کارایی و پاسخگویی زنجیره از موضوعات مهم استراتژیک به‌شمار می‌رود. علاوه‌بر این، در سال‌های اخیر توجه به مسائل زیست‌محیطی، الزامات قانونی و نیز منافع اقتصادی توجه خاصی بر لجستیک معکوس صورت گرفته است. در این مقاله به ارائه یک مدل مکان‌یابی- موجودی و از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته احتمالی برای طراحی یکپارچه شبکه یک زنجیره تأمین حلقه بسته چند کالایی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن سطوح ظرفیت چندگانه پرداخته می‌شود. همچنین برای انطباق شبکه لجستیک مورد نظر با دنیای واقعی، مقدار تقاضای مشتریان و بالطبع مقدار برگشتی تحت عدم قطعیت و به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه مسئله مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود در این تحقیق به‌دستهٔ مسائل سخت تعلق دارد، لذا برای حل آن به ارائه دو روش فرا ابتکاری مبتنی‌بر الگوریتم زنبورها و الگوریتم ژنتیک پرداخته و مقایسه جواب‌های این دو روش براساس مسائل عددی طراحی شده صورت گرفته است. از نظر مقدار تابع هدف، عملکرد الگوریتم ژنتیک به‌طور متوسط ۱۱/۶درصد پایین‌تر از زنبور عسل بوده و از منظر زمان حل عملکرد الگوریتم زنبور عسل به میزان قابل ملاحظه‌ای (به طور متوسط نزدیک به ۵ برابر) پایین‌تر از الگوریتم ژنتیک است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین حلقه بسته، طراحی شبکه، عدم قطعیت، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم زنبور عسل

۱- مقدمه

در گذشته، بخش عمده فعالیت‌های مدیریت زنجیره تأمین به عملیات تولید و توزیع و به‌عبارت دیگر، جریان مستقیم زنجیره تأمین متشکل از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان معطوف بوده است [۱]. در دهه‌های اخیر توجه به مسائل زیست محیطی، الزامات قانونی و نیز منافع اقتصادی ناشی از فعالیت‌های احیا و بازسازی محصول مانند بهبود رضایت‌مندی مشتریان، افزایش سهم بازار، کاهش هزینه‌ها و افزودن ارزش به شبکه لجستیک، سبب شده است بسیاری از شرکت‌های مهم، بر اجرای فعالیت‌هایی چون جمع‌آوری، احیا، ساخت دوباره و یا بازیافت محصولاتی که در انتهای زنجیره تأمین سنتی و در پایان عمر مفید خود قرار دارند، تمرکز نموده و در این زمینه موفقیت‌های قابل توجهی به‌دست آوردند [۲]. احیای محصول نیاز به مواد نو، مصرف انرژی و فضای لازم برای امحاء محصولات را کاهش می‌دهد، به طوریکه طبق تحقیقات انجام شده می‌تواند منجر به کاهش هزینه واحد تولید بین ۴۰ تا ۶۰ درصد گردد [۳]. از دیدگاه تجاری، این سیستم‌ها سهم قابل توجهی در افزایش سودآوری سازمان را دارند. مدیریت لجستیک معکوس[1] و زنجیره‌های تأمین حلقه بسته[2] از جنبه‌های مهم و حیاتی هر کسب وکاری بوده و متضمن تولید، پخش خدمات و پشتیبانی از هر نوع محصولی است. در عصر کنونی، چرخه عمر محصولات هر روز کوتاه و کوتاه‌تر شده و تأکید بیشتری بر مدیریت بازگشت، تغییر شکل و ذخیره دوباره کالاهای تمام شده وجود دارد. قوانین سبز که به بازگرداندن و از رده خارج کردن مواد زائد الکترونیکی و دیگر مواد خطرناک مربوط است نیز مدیران و

* رایانامه نویسنده مسئول: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

[1] Reverse Logistic
[2] Closed Loop Supply Chain

سطوح بالای مسئول امور لجستیک فرآیندهای زنجیره تـأمین را وادار می‌سازد نگاه نزدیک‌تری به این فرآیند بیندازند. مجموعه این مسائل موجب توجـه بـه جریـان معکـوس در زنجیـره و توسـعه‌ی محـدودهٔ فعالیت‌های مدیریت زنجیره تـأمین شـده اسـت [۱]. سـابقه نگـرش یکپارچه به دو مسئله مکان‌یابی و موجودی شاید بـه حـدود دو دهـه قبل برمی‌گردد. در گذشـته تصـمیمات مکـان‌یـابی بـدون توجـه بـه تصمیمات موجودی اتخاذ می‌شد لـیکن در خصـوص برخـی از اقـلام مانند اقلام زیر صفری که هزینه‌هـای نگهـداری موجـودی مسـتقیماً متأثر از مکان نگهداری می‌باشـد، یکپارچـه‌سـازی ایـن دو تصـمیم و به‌خصوص توجه به هزینه‌های موجودی به‌عنوان یک هزینه عملیـاتی در زمان اتخاذ تصمیم مکان‌یابی، می‌تواند هزینه‌های کـل سیسـتم را طی دوره برنامه‌ریزی (مثلاً یک‌ساله یا چندساله) تا حد زیادی کاهش دهد.

آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته اسـت، یـک مـدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیختـه احتمـالی[1] بـرای طراحـی بهینهٔ شبکه یکپارچه لجستیک مسـتقیم و معکـوس تحـت عـدم قطعیت می‌باشد. طراحی شـبکه لجسـتیک ماهیتـاً یـک تصـمیم استراتژیک است که معمولاً شامل تعیین محل تسهیلات، ظرفیت آنها، تعداد محصولات، تعداد سـطوح در زنجیـره و نحـوه ارتبـاط تسهیلات می‌باشد [۴]. با این تعریف، طراحـی شـبکه لجسـتیک معکوس شامل تعیین تعداد، مکان و ظرفیـت مراکـز جمـع‌آوری، احیا و امحاء ، میزان موجودی‌های واسطه‌ای در هر محل و میزان جریان بین هر دو تسهیل می‌باشـد. همـه ایـن موضـوعات، تـأثیر فراوانی بر کارایی و در نتیجه، عملکرد زنجیره تـأمین دارنـد [۵]. به‌طور کلی می‌توان گفت لجستیک، بخش فیزیکی زنجیره تـأمین را در برمی‌گیرد و عمدتاً شامل کلیهٔ فعالیت‌های مربوط به جریان مواد و کالاها از مرحلهٔ تهیه مواد خام تا تولید محصـول نهـایی از جمله حمل ونقل، انبارداری و غیره اسـت. یکـی از گـرایش‌هـای جدید در مدیریت لجسـتیک، بازیافـت[2] و یـا اسـتفاده مجـدد[3] از محصولات اسـت. در ایـن روش، محصـولاتی کـه بـه پایـان عمـر مفیدشان می‌رسند، مجـدداً از مصـرف کننـده نهـایی خریـداری می‌شوند و پس از دمونتاژ، قسمت‌هـایی از محصـول کـه قابلیـت استفاده مجدد را دارند، دوباره در قالـب محصـولات اسـقاطی بـه چرخه حیات برمی‌گردند به‌نحوی‌کـه یکپارچـه شـدن لجسـتیک معکوس و لجستیک مستقیم منجر به ایجاد زنجیره تأمین حلقـه بسته می‌شود. از آنجا که احداث تسهیلات یا بستن آنهـا هزینـه و زمان زیادی می‌برد، تغییر آنها در کوتاه‌مدت، امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین سرمایه‌گذاری در تصمیمات استراتژیک طراحی شـبکه، بازگشت سرمایه بیشتری نسبت به تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی دارد. یکی از موارد مهم در طراحی شبکه لجستیک معکـوس کـه باید مورد توجه قرار گیرد، دستیابی بـه اهـداف طـولانی مـدت و استراتژیک می‌باشد [۶].

در بسیاری از مطالعات گذشته، طراحی شبکه‌های لجسـتیک مستقیم و معکوس به‌صورت مجزا صورت می‌گرفت که منجـر بـه زیر بهینگی می‌گردید، اما با توجه به این حقیقت که پیکره‌بنـدی شبکه لجستیک معکوس تأثیر زیادی بر شبکه لجستیک مستقیم دارد و برعکس، طراحی شبکه‌های لجستیک مستقیم و معکـوس تا حد امکان باید به‌صورت یکپارچه صورت گیـرد [۷]. همچنـین در تحقیقات پیشین فرض می‌شد کـه مؤلفـه‌هـای مهمـی چـون تقاضا و برگشتی‌ها قطعی هستند در حالی که طراحـی و اسـتقرار شبکه لجستیکی، یک تصمیم‌گیری استراتژیکی است که تأثیر آن برای چندین سـال طـول خواهـد کشـید و مؤلفـه‌هـای تقاضـا و برگشتی مشتریان در طی ایـن مـدت ممکـن اسـت تغییـر کنـد. بنابراین یک شبکه لجستیکی کارآ باید به شیوه‌ای طراحـی شـود که بتواند عدم قطعیت‌ها را مدیریت کند [۸].

از دیگر نوآوری‌های این تحقیق، نگهداری موجودی در مراکز جمع‌آوری در دوره‌های مختلف می‌باشـد. بـه‌طـور کلـی هـدف از مدیریت موجودی، کنترل سفارش اجزای خارجی و اجرای فرآیند احیـای داخلـی بـه‌منظـور تـأمین سـطح خـدمت مـورد نیـاز و حداقل‌سازی هزینـه‌هـای ثابـت و متغیـر مـی‌باشـد. در مـدیریت موجودی دارای بازگشت، تقاضا از دو طریق می‌تواند تأمین گردد: ۱- سفارش مواد خام مـورد نیـاز از خـارج و سـاخت محصـولات جدیـد ۲- اوراق محصـولات قـدیمی و تبـدیل آنهـا بـه کـالایی جدید[۹].

در این تحقیق، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته توصـیف شده است. ایـن شـبکه شـامل مراکـز تولیـد/ بـاز تولیـد، مراکـز جمع‌آوری، بازارهای تقاضا و مرکز امحـاء مـی‌باشـد. کارخانـه‌هـا می‌توانند محصولات جدیدی تولید و یـا محصـولات بازگشـتی را بازتولید کننـد. محصـولات بـه بازارهـای تقاضـا ارسـال و سـپس محصولات بازگشتی به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌گردنـد. مراکـز جمـع‌آوری مسـئولیت‌هـای زیـر را بـر عهـده دارنـد: جمـع‌آوری محصـولات اسـتفاده شـده از بازارهـای تقاضـا، تعیـین شـرایط

[1] Probabilistic Mixed Integer Linear Programming
[2] Recycling
[3] Reuse

بازگشتی‌ها به‌وسیله بازرسی و یا جداسازی (برای تعیین اینکه این محصولات قابل بازیافت هستند یا خیر)، فرستادن بازگشتی‌های قابل بازیافت به کارخانه‌ها، ارسال بازگشتی‌های غیرقابل بازیافت (به دلایل اقتصادی و/یا تکنولوژیکی) به مرکز امحاء [۱۰].

بنابراین، مدل مکان‌یابی موجودی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای چندین کارخانه (تولیدی و باز تولیدی)، بازارهای تقاضا، مراکز جمع‌آوری، امحاء و محصولات، توسعه داده شده است. هدف تعیین تعداد و مکان‌های مراکز تولید و مراکز جمع‌آوری و یافتن جریان‌های محصولات مابین آنها می‌باشد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مرور ادبیات

در چند سال اخیر افزایش توجه به مسائل زیست‌محیطی و رشد فرصت‌های مناسب برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها و منابع و یا افزایش درآمد از طریق محصولات برگشتی، باعث ترغیب محققان به بررسی لجستیک معکوس شده است. در زمینه طراحی شبکه‌های لجستیک که شامل مدل‌های مختلف بهینه‌سازی و مکان‌یابی تسهیلات بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته است، کارهای زیادی در سراسر دنیا انجام شده است که در ادامه به بررسی مدل‌های ارائه شده می‌پردازیم.

مدل‌های لجستیک معکوس ارائه شده، از سه منظر زیر قابل بررسی هستند:

- مدل‌سازی برای استفاده مجدد
- مدل‌سازی برای بازیافت
- مدل‌سازی برای تولید مجدد

در خصوص مدل‌سازی برای استفاده مجدد، کرون و وریجنس [۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای محصولات قابل استفاده مجدد ارائه کردند. مدل ارائه شده یک مدل جایابی بدون محدودیت ظرفیت کلاسیک می‌باشد که برای مطالعه موردی جعبه‌های حمل و نقل قابل استفاده مجدد طراحی شده است. در خصوص مدل‌سازی برای بازیافت: باروس و همکاران [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس برای یک زنجیره دو رده‌ای با محدودیت ظرفیت برای بازیافت سنگ ارائه کردند. مدل ارائه شده با استفاده از یک رویکرد ابتکاری، تعداد و همچنین ظرفیت بهینه انبارها را مشخص می‌کند. در مورد مدل‌سازی برای تولید مجدد، جایارامان و همکاران [۱۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه کردند که هدف از آن حداقل‌سازی هزینه می‌باشد. در این تحقیق، تنها به فعالیت‌های مربوط به احیای محصولات برگشتی پرداخته شده است که هدف از آن، طراحی یک سیستم کششی بر اساس تقاضای مشتریان است.

کریکه و همکاران [۱۴] یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته را برای یک شبکه لجستیک معکوس دو رده‌ای برای یک تولیدکننده دستگاه‌های کپی ارائه کردند. در این مدل، هزینه‌های پردازش محصولات برگشتی و موجودی در تابع هدف مورد توجه قرار گرفته است. جایارامان همکاران [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه دادند. مدل ارائه شده که در سطوح استراتژیک پایه‌گذاری شده است، مشخص می‌کند کدام یک از مراکز بازتولید با توجه به محصولات برگشتی، احداث شوند. مینو و همکاران [۱۶] یک مدل شبکه لجستیک چندکالایی، چند رده‌ای ارائه کردند که در آن از رویکرد آزاد سازی لاگرانژ استفاده شده است. مین و همکاران [۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته را با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها ارائه کردند. برای حل از یک رویکرد باینری در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.کیم و همکاران [۱۸] یک چارچوب کلی را برای تولید مجدد ارائه کردند، به‌صورتی که مدل ریاضی ارائه شده، با هدف حداکثر سازی سود حاصل از صرفه‌جویی منابع، بتواند به تصمیم‌گیری در این باره بپردازد که چه تعداد قطعه از تأمین‌کننده خریداری شود و چه تعداد قطعه از محصولات استفاده شده در هر مرکز تولید استفاده شود.

اوستر و همکاران [۱۹] یک شبکه نیمه یکپارچه را طراحی کردند که در آن، فقط مراکز برگشت و احیا در لجستیک معکوس مکان‌یابی می‌شوند اما جریان مستقیم و معکوس هم‌زمان بهینه می‌گردند. در این مقاله، یک روش حل دقیق بر مبنای روش تجزیه ارائه شده است. فروتانتو و همکاران [۲۰] چارچوبی را برای طراحی و ارزیابی شبکه‌های پایدار لجستیک معکوس بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها و برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه کردند. آنها در انتها به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، این مدل را در صنعت کاغذ و خمیر اروپا پیاده نمودند. در مدل دوهدفه ارائه شده در این مقاله، کمینه‌سازی هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی، به‌عنوان دو هدف، در طراحی شبکه لجستیک در نظر گرفته شده است. پاتی و همکاران [۲۱] مدلی را براساس برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته آرمانی برای حل مسئله و بررسی روابط اهداف در

یک شبکه توزیع بازیافت کاغذ ارائه کردند. یکی از اهداف این مدل، کاهش هزینه‌های لجستیک معکوس می‌باشد (مدل‌سازی برای بازیافت). وحدانی و شریفی [۲۲] نیز در مقاله خود به ارائه مدل فازی برای زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی آنها در بخش لجستیک معکوس تنها شامل تسهیلات امحاء می‌باشد.کیوان‌شکوه و همکاران [۳] تصمیمات قیمت‌گذاری بازگشتی‌ها با توجه کیفیت محصولات استفاده شده را وارد مدل می‌نمایند. آنها یک شبکه چند محصولی، چند دوره‌ای ظرفیت‌دار همراه با تصمیمات قیمت‌گذاری برای بازگشتی‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهند. سپس برای حل دقیق این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه می‌دهند و سعی می‌نمایند میزان مایل بودن مشتری برای بازگرداندن محصولات استفاده شده را با استفاده از توزیع‌های احتمالی مدل نمایند و این موضوع نوآوری عمده این تحقیق است. اما این تحقیق عدم‌قطعیت را در نظر نگرفته است. همچنین تسهیلات به شکل تک ظرفیتی در نظر گرفته شده‌اند. امین و همکاران [۱۰] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که چندین کارخانه مراکز جمع‌آوری، بازارهای تقاضا و محصولات را در بر می‌گیرد بررسی می‌کند. برای این هدف یک مدل برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح برای کمینه‌سازی هزینه‌ها ارائه شده است. علاوه‌بر این، دو مسئله آزمایشی امتحان گشته‌اند.مدل برای بررسی فاکتورهای زیست‌محیطی به وسیلهٔ روش‌های جمع وزن‌دار و اپسیلون محدودیت توسعه داده شده است. همچنین تاثیر عدم قطعیت در تقاضا و بازگشتی‌ها را در پیکره‌بندی شبکه به‌وسیله برنامه‌ریزی احتمالی (سناریو بیس) بررسی می‌کند. این تحقیق تک دوره‌ای و در سایز کوچک در نظر گرفته شده است. روغنیان و همکاران [۲۳] یک مدل طراحی شبکه لجستیک معکوس را تحت عدم‌قطعیت احتمالی مورد مطالعه قرار می‌دهند. مدل پیشنهادی آنها شامل گزینه‌های بازیابی استفاده دوباره، تولید مجدد و بازیافت است. شبکه مورد مطالعه آنها یک شبکه چند محصولی چند مرحله‌ای است و برای حل از یک الگوریتم ژنتیک استفاده می‌نمایند. سلیمانی و همکاران [۲۴] یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای جامع در یک چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را توسعه دادند. در این تحقیق تمام تسهیلات ممکن برای شبکه در شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. مدل مورد نظر در حالت قطعی و با الگوریتم ژنتیک حل شده است. باتماز [۲۵] در مدل پیشنهادی خود یک تولیدکننده را در نظر می‌گیرد که فعالیت‌های لجستیک معکوس خود را برون‌سپاری می‌نماید. با در دست داشتن مراکز جمع‌آوری و پردازش، طراحی شبکه لجستیک معکوس شامل یافتن تعداد و مکان‌های مراکز تست تحت عدم قطعیت مربوط به میزان بازگشتی‌ها است. سلیمانی و همکاران [۲۶] به بهبود شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی ریاضی پرداختند. مدل ارائه شده توسط آنها یک مدل چند دوره‌ای، چند سطحی و چند محصولی قطعی می‌باشد. هر دو متغیر طراحی و طرح‌ریزی یعنی محل استقرار و تخصیص جریان در شبکهٔ پیشنهادی آنها در نظر گرفته شده و برای قابل اطمینان بودن عملکرد آن شبکه تجزیه و تحلیل محاسبه‌ای در یک مثال با مقیاس بزرگ ارائه شده است. احمد زاده و وحدانی [۲۷] یک مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تصمیمات مکان یابی و موجودی البته با قیمت‌گذاری را مورد بررسی قرار دادند به‌نحوی که تقاضای بازارهای مختلف به هم وابسته بوده و از سیاست موجودی مرور دوره ای برای کنترل موجودی استفاده نمودند. همچنین از کاربردهای وسیع الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل مکان‌یابی و موجودی می توان به تحقیق فتحی و همکاران [۲۸] اشاره کرد.

سیف برقی و ملک پور کلبادی نژاد [۲۹] تصمیمات مکان‌یابی و موجودی را به‌صورت توأم با در نظر گرفتن عوامل زیست محیطی در طراحی شبکه¬های تأمین مورد بررسی قراردادند. در این تحقیق با الهام از زنجیره تولید، توزیع و بازیافت لاستیک خودرو، یک مدل برنامه¬ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مکان یابی- موجودی مستقیم/معکوس با ظرفیت محدود ارائه شده است. همچنین مدل در شرایط عدم قطعیت مؤلفه های کلیدی نظیر تقاضا و نرخ برگشت محصولات مورد بررسی و تحلیل قرارگرفته است. خلاصه ای از این تحقیقات در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به ادبیات موضوع، نوآوری تحقیق پیش‌رو، طراحی و مدل‌سازی یک شبکه جدید لجستیک مستقیم/ معکوس به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای هر دو تصمیم‌گیری‌های استراتژیکی و تاکتیکی و یکپارچه کردن آن با مسائل مکان‌یابی- موجودی با در نظر گرفتن ظرفیت‌های چند گانه به‌صورت چند دوره‌ای و چند محصولی در شرایط عدم قطعیت تقاضا و برگشتی‌ها در ابعاد بزرگ و حل و مقایسهٔ آن با الگوریتم‌های ژنتیک و زنبور عسل می‌باشد.

جدول(۱): خلاصه تحقیقات پیشین

روش حل			اهداف			عدم قطعیت		محصول		دوره		شماره منبع و سال
ابتکاری	فراابتکاری	دقیق	سایر	زیست محیطی	هزینه	دارد	ندارد	چند	تک	چند	تک	
*					*		*		*		*	۱۹۹۸ [۱۲]
*					*		*		*		*	۲۰۰۳ [۱۵]
*					*		*	*			*	۲۰۰۵ [۱۶]
	*				*		*		*		*	۲۰۰۶ [۱۷]
		*			*		*	*			*	۲۰۰۷ [۱۹]
		*	*	*	*		*	*			*	۲۰۰۸ [۲۱]
		*		*	*		*		*		*	۲۰۰۸ [۲۰]
		*		*	*	*		*			*	۲۰۱۳ [۱۰]
		*			*		*	*		*		۲۰۱۳ [۳]
	*				*		*	*		*		۲۰۱۳ [۲۴]
	*				*		*	*			*	۲۰۱۴ [۲۳]
	*				*		*		*		*	۲۰۱۷ [۲۷]
		*		*	*	*			*		*	۲۰۲۰ [۲۹]
	*				*	*			*		*	۲۰۲۱ [۲۸]
	*				*	*		*		*		**تحقیق فعلی**

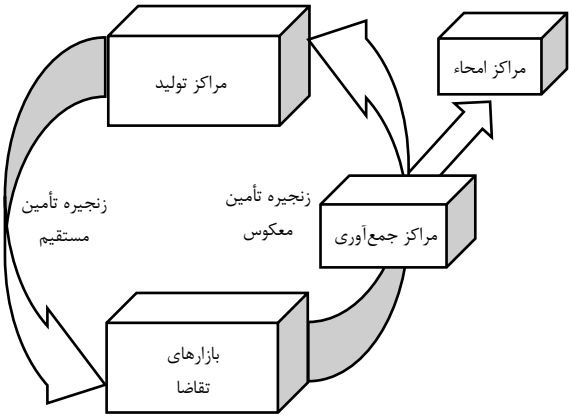
۲-۲- بیان مسئله و مدل‌سازی

در این تحقیق، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با الهام از تحقیق حسن زاده امین و ژانگ [۳۰] در نظر گرفته شده است. این شبکه شامل تعدادی مرکز تولید، بازارهای تقاضا یا مصرف، مراکز جمع‌آوری محصولات برگشتی و مرکز امحاء است. مراکز تولید/ بازتولید می‌توانند محصولات جدیدی تولید و یا محصولات بازگشتی را بازتولید[1] کنند. محصولات تولیدی به بازارهای تقاضا ارسال شده و بخشی از آنها با مدیریت صورت گرفته به زنجیره اصلی بازگشت داده شده و محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری تجمیع می شوند. هر مرکز جمع‌آوری مسئولیت‌های زیر را بر عهده دارند: جمع‌آوری محصولات برگشت داده شده از بازارهای تقاضا، تعیین شرایط بازگشتی‌ها به‌وسیله بازرسی و/ یا جداسازی، فرستادن بازگشتی‌های قابل بازیافت به مراکز تولید و همچنین ارسال بازگشتی‌های غیر قابل بازیافت (به‌دلائل اقتصادی و یا فنی) به مراکز امحاء. به‌دلیل زمان قابل توجه احتمالی محصولات برگشتی در مراکز جمع‌آوری، هزینه نگهداری این محصولات در آنها در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل مکان‌یابی موجودی در نظر گرفته شده در این تحقیق، ضمن مکان یابی تسهیلات مرتبط با تولید و جمع آوری، میزان موجودی اقتصادی قابل نگهداری در مراکز جمع آوری را نیز مشخص می کند. همچنین کلیه جریان‌های محصولات جدید و برگشتی بین اعضای این شبکه نیز مشخص می شود.

در نهایت می‌توان گفت نوآوری‌های خاص این تحقیق هدف تحقیق، طراحی یک شبکه یکپارچه مستقیم/ معکوس چند

[1] Remanufacturing

محصولی و چند دوره‌ای در شرایط عدم قطعیت تقاضا و بالطبع مقدار برگشت و در نظر گرفتن سطوح ظرفیت چندگانه برای تسهیلات می‌باشد. همچنین برای هر محصول متوسط عمر مفیدی در نظر گرفته می‌شود و فرض می شود برگشتی دوره جاری متناظر با تقاضای بازار مصرف در چند دوره قبل (تعداد دوره معادل متوسط عمر مفید) باشد.



شکل(۱): شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته موردبررسی

مفروضات مدل مورد بررسی در این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

مدل چند دوره‌ای و چند محصولی است.
تمام محصولات بازگشتی از بازارهای تقاضا در مراکز جمع‌آوری، تجمیع شده و وارد زنجیره دیگری نمی‌شوند.
مکان بازارهای تقاضا یا مصرف ثابت فرض می‌گردد.
مکان‌های کاندید برای احداث کارخانه‌ها و مراکز جمع‌آوری از قبل مشخص شده‌اند.
هیچ محدودیتی در ظرفیت جریان محصولات قابل حمل از طریق شبکه وجود ندارد.
ظرفیت مراکز تولید و جمع‌آوری باید از لیست مشخصی از ظرفیتهای از قبل موجود انتخاب گردد.
مقدار تقاضای مشتریان و در نتیجه مقدار برگشتی‌ها دارای عدم قطعیت بوده و فرض می شود از توزیع نرمال تبعیت کنند.
کیفیت محصولات نو و بازیافتی یکسان است.
برای هر محصول متوسط عمر مفیدی در نظر گرفته می‌شود و فرض می شود برگشتی دوره جاری متناظر با تقاضای بازار مصرف در چند دوره قبل (تعداد دوره معادل متوسط عمر مفید) باشد.

نمادهای مدل شامل مجموعه‌ها (و اندیس‌های)، مؤلفه‌ها و متغیرهای تصمیم مربوط می‌باشند که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

مجموعه‌های (و اندیس‌های) قابل تعریف به‌شرح زیر می‌باشد:

I: مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکزتولید/بازتولید $(i \in I)$
J: مجموعه محصولات $(j \in J)$
K: مجموعه بازارهای تقاضا یا مصرف $(k \in K)$
L: مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز جمع‌آوری $(l \in L)$
T: مجموعه دوره‌های زمانی در افق برنامه‌ریزی $(t \in T)$
R: مجموعه سطوح ظرفیت قابل دسترس برای تسهیلات بالقوه $(r \in R)$

همچنین مؤلفه‌های تعریف شده به‌شرح زیر می‌باشد:

A_j : هزینه واحد تولید محصول j در هر مرکز تولید
B^t_{ikj} : هزینه حمل هر واحد محصول j از مرکز تولید/ بازتولید i به بازار تقاضای k در دوره زمانی t
C^t_{klj} : هزینه حمل هر واحد از محصول j از تقاضای k به مرکز جمع‌آوری l در دوره زمانی t
D^t_{lij} : هزینه حمل واحد از محصول j از مرکز جمع‌آوری l به مرکز تولید/ بازتولید i در دوره زمانی t
O^t_{lj} : هزینه حمل هر واحد از محصول jازمرکز جمع‌آوری l به مرکز امحاء در دوره زمانی t
E_{ir} : هزینه احداث مرکز تولید/ بازتولید i با ظرفیت r
F_{lr} : هزینه احداث مرکز جمع‌آوری l با ظرفیت r
G_j: میزان صرفه‌جویی ناشی از بازتولید محصول j (بازتولید به جای تولید)
J_j : هزینه جمع‌آوری و بازرسی هر واحد از محصول j
H_j : هزینه امحاء هر واحد از محصولj
U_j : هزینه نگهداری هر واحد از محصول j در مراکز جمع‌آوری
P_{ir} : ظرفیت متناظر با سطح ظرفیتی r برای مرکز بالقوه تولید/ بازتولید i
Q_{lr} : متناظر با سطح ظرفیتی r برای مرکز بالقوه جمع‌آوری l
d^t_{kj} : متغیر تصادفی تقاضای بازار تقاضا یا مصرف k از محصول j در دوره زمانی t
r^t_{kj} : نرخ بازگشتی محصول j از بازار تقاضا یا مصرف k از محصول j در دوره زمانی t
M_j : حداقل نرخ امحاء محصول j
n_j: متوسط عمر مفید محصول j
$1-\alpha$: سطح اطمینان موردنظر برای برقراری محدودیت‌های احتمالی

متغیرهای تصمیم مدل توسعه داده شده به شرح زیر است:

X^t_{ikj} : میزان محصول j ارسالی از مرکز تولید/ بازتولید i برای بازار تقاضا یا مصرف k در دوره زمانی t
Y^t_{klj} : میزان محصول jبازگشتی از بازار تقاضا یا مصرف k به مرکز جمع‌آوری l در دوره زمانی t
S^t_{lij} : میزان محصول jبازگشتی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز تولید/ بازتولید i در دوره زمانی t

V_{lj}^t: میزان محصول j بازگشتی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز امحاء در دوره زمانی t

Z_{ir}: یک، اگر یک مرکز تولید/ بازتولید با سطح ظرفیتی r در مرکز بالقوه i ایجاد شود؛ در غیر اینصورت، صفر

W_{lr}: یک، اگر یک مرکز جمع‌آوری با سطح ظرفیتی r در مرکز بالقوه l ایجاد شود؛ در غیر اینصورت، صفر

INV_{lj}^t: سطح موجودی محصول j در مرکز جمع‌آوری l در دوره زمانی t

PQ_{ij}^t: میزان محصول j تولید شده در مرکز تولید/ بازتولید i در دوره زمانی t

از بین متغیرهای تصمیم چهار متغیر مرتبط با جریان و دو متغیر نشان دهنده میزان موجودی و تولید هستند و مرتبط با دوره تعریف شده اند، در حالیکه دو متغیر Z_{ir} و W_{lr} که مرتبط با جایابی و استقرار مراکز جمع‌آوری و تولید هستند، صرفا یک بار در ابتدای دوره اول تصمیم‌گیری اتخاذ می‌شوند و فرض می‌گردد وضعیت آنها در طی دوره‌های آتی تصمیم‌گیری ثابت است.

مدل ریاضی مسئله به‌صورت مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها به‌صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

$$Min\ Z_1 = \sum_i \sum_r E_{ir} \times Z_{ir} + \sum_l \sum_r F_{lr} \times W_{lr} + \sum_i \sum_j \sum_t A_j \times PQ_{ij}^t + \sum_k \sum_l \sum_j \sum_t J_j \times Y_{klj}^t + \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t B_{ikj}^t \times X_{ikj}^t + \sum_k \sum_l \sum_j \sum_t C_{klj}^t \times Y_{klj}^t + \sum_l \sum_i \sum_j \sum_t D_{lij}^t \times S_{lij}^t + \sum_l \sum_j \sum_t O_{lj}^t \times V_{lj}^t + \sum_l \sum_i \sum_j \sum_t (-G_j) \times S_{lij}^t + \sum_l \sum_j \sum_t H_j \times V_{lj}^t + \sum_l \sum_j \sum_t U_j \times INV_{lj}^t \quad (۱)$$

$$P\left(\sum_i X_{ikj}^t \geq d_{kj}^t\right) \geq 1 - a\ ; \forall t, k, j \quad (۲)$$

$$P\left(\sum_l Y_{klj}^t = r_{kj}^t \times d_{kj}^{t-n_j}\right) \geq 1 - a\ ;\ \forall t, k, j \quad (۳)$$

$$M_j \sum_k Y_{klj}^t \geq V_{lj}^t\ ;\ \forall t, l, j \quad (۴)$$

$$\sum_k Y_{klj}^t + INV_{lj}^{t-1} - INV_{lj}^t = \sum_i S_{lij}^t + V_{lj}^t\ ;\ \forall t, l, j \quad (۵)$$

$$PQ_{ij}^t + \sum_l S_{lij}^t = \sum_k X_{ikj}^t\ ;\ \forall i, j, t \quad (۶)$$

$$\sum_l \sum_j S_{lij}^t + \sum_j PQ_{ij}^t \leq \sum_r Z_{ir} \times P_{ir}\ ;\ \forall t, i \quad (۷)$$

$$\sum_i \sum_j S_{lij}^t + \sum_j V_{lj}^t \leq \sum_r W_{lr} \times Q_{lr}\ ;\ \forall t, l \quad (۸)$$

$$\sum_r Z_{ir} \leq 1\ ;\ \forall i \quad (۹)$$

$$\sum_r W_{lr} \leq 1\ ;\ \forall l \quad (۱۰)$$

$$Z_{ir}, W_{lr} \in \{0,1\}\ ;\ \forall i, l, r \quad (۱۱)$$

$$X_{ikj}^t, Y_{klj}^t, S_{lij}^t, V_{lj}^t, INV_{lj}^t, PQ_{ij}^t \geq 0\ ;\ \forall i, k, l, j, t \quad (۱۲)$$

معادله (۱) نشان دهندهٔ تابع هدف است که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت بازگشایی مراکز تولید/ بازتولید و جمع‌آوری با سطح ظرفیت مرتبط، هزینه تولید محصولات در مراکز تولید/ بازتولید، هزینه‌های جمع‌آوری و بازرسی محصولات در مراکز جمع‌آوری، هزینه حمل و نقل محصولات بین تسهیلات، هزینهٔ امحاء محصولات در مرکز امحاء و هزینه نگهداری محصولات برگشتی در مراکز جمع‌آوری طی افق برنامه‌ریزی مربوطه می‌باشد.

محدودیت (۲) تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی، میزان محصول ارسالی از هر نوع به هر بازار تقاضا با سطح اطمینان تعریف شده، تقاضای مربوط به آن بازار را برآورده می‌کند. طبق محدودیت (۳) به‌دلیل احتمالی بودن تقاضا، تضمین می‌شود که میزان محصول بازگشتی از هر نوع در هر دوره زمانی از هر بازار تقاضا، معادل حاصل‌ضرب نرخ برگشت در تقاضای چند دوره قبل (تعداد دوره معادل متوسط عمر مفید) باشد.

محدودیت (۴) یک حداقل نرخ امحاء برای هر محصول در هر دوره زمانی از هر مرکز جمع‌آوری را الزام می‌کند. محدودیت (۵)

تعادل جریان برگشتی را در هر مرکز جمع‌آوری در هر دوره زمانی از هر محصول ارائه می‌دهد. محدودیت (۶) تعادل جریان هر محصول تولید شده در هر مرکز تولید/ بازیابی را در هر دوره زمانی نشان می‌دهد به‌نحوی که مجموع محصولات جدید تولید شده و بازیابی شده، نشان دهنده میزان محصول خروجی می‌باشد.

محدودیت‌های (۷) و (۸) محدودیت ظرفیت مراکز تولید/ بازتولید و جمع‌آوری را در هر دوره زمانی نشان می‌دهد. محدودیتهای (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده انتخاب حداکثر یک سطح ظرفیتی برای تسهیلات تولید/ بازتولید و جمع‌آوری می‌باشد. دو محدودیت آخر یعنی (۱۱) و (۱۲)، وضعیت متغیرهای تصمیم مدل را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه تقاضا دارای عدم قطعیت می‌باشد، جهت سهولت فرض می‌شود متغیر تصادفی تقاضای بازار k از محصول j در دوره زمانی t یعنی d_{kj}^{t} دارای توزیع نرمال با میانگین و واریانس به ترتیب $(\sigma_{kj}^{t}, \mu_{kj}^{t})$ باشد. در این صورت براساس قاعده محدودیت‌های شانسی، محدودیت (۲) به‌صورت (۱۳) نوشته می شود:

$$P\left(\frac{\sum_i X_{ikj}^{t} - \mu_{kj}^{t}}{\sigma_{kj}^{t}} \geq \frac{d_{kj}^{t} - \mu_{kj}^{t}}{\sigma_{kj}^{t}}\right) \geq 1 - a \; ; \forall t, k, j \qquad (۱۳)$$

در نهایت با توجه به اینکه عبارت $\frac{d_{kj}^{t} - \mu_{kj}^{t}}{\sigma_{kj}^{t}}$ از توزیع نرمال استاندارد برخوردار است، می‌توان نامعادله (۱۴) را نوشت که در آن Z_α عبارتست از عدد متناظر از جدول احتمال توزیع نرمال به نحوی که سطح زیر منحنی نرمال تا آن عدد معادل $1 - a$ یعنی همان مقدار سطح اطمینان باشد. لازم به ذکر است در صورت انجام عملیات مشابه روی محدودیت (۳) نتیجه به‌صورت معادله (۱۵) خواهد بود. بنابراین مدل نهایی مسئله حداقل‌سازی تابع هدف ارائه شده در معادله (۱) با در نظر گرفتن محدودیتهای (۴) تا (۱۲) و (۱۴)-(۱۵) خواهد بود.

$$\sum_i X_{ikj}^{t} \geq \mu_{kj}^{t} + Z_\alpha \sigma_{kj}^{t} \; ; \forall t, k, j \qquad (۱۴)$$

$$\sum_l Y_{klj}^{t} = r_{kj}^{t}\left(\mu_{kj}^{t} + Z_\alpha \sigma_{kj}^{t}\right) ; \forall t, k, j \qquad (۱۵)$$

۲-۳- روش‌های حل و مسائل عددی نمونه

از آنجایی که مدل مسئله ارائه شده از نوع برنامه ریزی خطی با متغیرهای ترکیبی پیوسته و صفر و یک می‌باشد، لذا با افزایش ابعاد مسئله و با توجه به پیچیدگی و حجم بالای محاسباتی، دیگر نمی‌توان مسئله را به کمک روش‌های بهینه‌سازی دقیق و در یک زمان منطقی، حل کرد. به‌همین دلیل یکی از راهکارهای حل این مسائل استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد. در این تحقیق جهت انجام مقایسه بهتر از دو الگوریتم مبتنی‌بر جمعیت که یکی از آنها بر اساس هوش جمعی (الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی[1] و الگوریتم زنبورها یا BA۲) و دیگری بر اساس تکاملی (الگوریتم ژنتیک یا GA۳) می‌باشد، برای حل استفاده شده است.

۲-۳-۱- ساختار پیشنهادی الگوریتم زنبور (BA)

این الگوریتم در واقع الهام گرفته از فرایند یافتن منابع غذایی توسط زنبور عسل و انتقال آن به کندو و انتقال تجربیات مربوطه به سایر زنبورها می‌باشد. در این فرایند فرض می‌شود که ابتدا تعدادی زنبور با تجربه به‌عنوان پیشاهنگ، از کندو خارج شده و هر یک منبع غذایی‌ای را پیدا می‌کند.از نظر بهینه‌سازی این به معنای تولید یک جواب اولیه می‌باشد و به تعداد زنبورهای پیشاهنگ، جواب‌های اولیه تولید می‌شود. این جواب‌ها از نظر میزان برازندگی مورد ارزیابی قرار گرفته و ابتدا به دو دسته جواب‌های منتخب و غیر منتخب تقسیم می‌شوند. جواب‌های غیر منتخب بعدا باید با جواب‌های دیگری که احتمالا به‌طور تصادفی تولید می‌شوند جایگزین شوند که این مورد در واقع همان شکل‌گیری مفهوم اکتشاف ۴ در الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد. جواب‌های منتخب به دو دسته جواب‌های نخبه و معمولی تقسیم می‌شوند.

زنبورهای پیشاهنگ پس از برگشت به کندو، تجربیات خود را در خصوص آن منابع غذایی با حرکات رقص، به دیگر زنبورها انتقال می‌دهند و قاعدتا هر چقدر منبع غذایی مربوطه مرغوب‌تر و غنی‌تر باشد تعداد زنبور بیشتری به آن منبع خواهند رفت. از نظر بهینه‌سازی، تعداد زنبور بیشتری به منابع یا سایت‌های نخبه نسبت به سایت‌های معمولی اختصاص می‌یابد.

[1] Artifical Bee Colony
[2] Bees Algorithm
[3] Genetic Algorithm
[4] Exploration

مسئله‌ای که در اینجا وجود دارد این است که زنبورهایی که به هر منبع غذایی تخصیص می‌یابند، لزوما ممکن است به مکان دقیق آن منبع غذایی مراجعه نکنند، در واقع رقص زنبور پیشاهنگ و انتقال اطلاعات مکانی منبع غذایی ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشد. به‌همین دلیل ممکن است زنبورهای مراجعه‌کننده که اصطلاحا به آنها زنبورهای کارگر گفته می‌شود، به مکان‌هایی حول و حوش مکان اصلی آن منبع غذایی بروند. از نظر بهینه‌سازی، تولید جواب‌هایی جدید در همسایگی جواب قبلی صورت می‌گیرد. همچنین از نظر بهینه سازی جستجو و رسیدن به جواب‌ها در همسایگی جواب‌های قبلی به مفهوم استخراج[1] می‌باشد.

لازم به‌ذکر است تعداد زنبورهای کارگر گسیل شده به یک منبع غذایی ممکن است بیش از یکی باشد که از نظر بهینه سازی به مفهوم تولید چندین جواب همسایه بوده و قاعدتا بهترین جواب ایجاد شده از بین جواب‌های همسایه باید انتخاب شود.

همچنین خود زنبورهای کارگر پس از رسیدن به منبع غذایی و تغذیه از آن، به زنبورهای پیشاهنگی تبدیل شده و مجددا اطلاعات خود را به کندو منتقل می‌کنند.

این الگوریتم اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافته است. روند اجرای آن را می‌توان در پنج فاز زیر بیان کرد:

فاز اول: تعریف مسئله

۱) تعریف تابع هدف مسئله مورد بررسی

۲) تعیین دامنه تغییر متغیرها

فاز دوم: تعریف مؤلفه‌های الگوریتم

۱) مشخص نمودن تعداد تکرارهای الگوریت.

۲) تعیین تعداد زنبورهای پیش‌آهنگ (تعداد جواب‌های اولیه یا هملن اندازه جمعیت)

۳) تعیین تعداد سایت‌های منتخب۲

۴) تعیین تعداد سایت‌های نخبه۳

۵) تعیین تعداد زنبورهای تخصیصی به هر یک از سایت‌های منتخب (همان تعداد جواب‌های همسایه تولید شده)

۶) تعیین تعداد زنبورهای تخصیصی به هر یک از سایت‌های نخبه (همان تعداد جوابهای همسایه تولید شده)

۷) تعیین شعاع همسایگی

فاز سوم: آماده‌سازی

۱) تعریف ویژگی هر زنبور (شامل موقعیت و ارزیابی تابع هدف)

۲) تکثیر ساختار تعریف‌شده در گام شماره ۱

۳) مقداردهی زنبورها و ارزیابی تابع هدف آنها

۴) مرتب‌سازی هزینه‌ها

۵) تعیین کمترین هزینه

۶) تعیین آرایه‌ای برای ذخیره‌سازی بهترین جواب در هر تکرار

فاز چهارم: بدنه اصلی الگوریتم

۱) اختصاص تعداد زنبور مشخص شده در فاز دوم به بهترین مکان‌های (جواب‌های) نخبه، به‌منظور تشکیل دستهٔ P1.

۲) اختصاص تعداد زنبور مشخص شده در فاز دوم به بهترین مکان‌های (جواب‌های) منتخب، به‌منظور تشکیل دستهٔ P2.

۳) اختصاص سایر زنبورها به سایر مکان‌ها جهت تشکیل دسته‌ی P3.

۴) جستجوی همسایگی مربوط به دستهٔ P1 و یافتن مکان (جواب) جدید.

۵) جستجوی همسایگی مربوط به دستهٔ P2 و یافتن مکان (جواب) جدید

۶) محاسبهٔ برازندگی جواب‌های جدید

۷) انتخاب **N** (جمعیت اولیه) جواب بهتر به‌عنوان جواب‌های جمعیت بعد.

۸) اعمال فرآیند بهبود بر جواب‌های تکرارهای بعدی.

فاز پنجم: اعلام نتایج

در ساختار بالا، در فاز اول تمام موارد لازم جهت تعریف مسئلهٔ مورد نظر شامل تابع هدف، دامنهٔ تغییر متغیرها و غیره تعیین می‌شوند. در فاز دوم به تعریف مؤلفه‌های الگوریتم شامل تعداد تکرار لازم برای الگوریتم، تعداد جمعیت اولیه و سایر مؤلفه‌ها می‌پردازیم. فاز سوم به اختصاص حافظه، تولید پاسخ اولیه و ارزیابی آنها تعلق دارد. همچنین در فاز چهارم که حلقه اصلی الگوریتم در آن به تعداد از پیش تعیین شده تکرار می‌شود، به تخصیص زنبورهای معین و از پیش تعریف شده به مکان‌های منتخب و نخبه و زنبورهای تصادفی به سایر مکان‌ها می‌پردازیم. پس از انجام این تخصیص‌ها، عملگرهای جستجوی همسایگی که در ادامه توضیح داده خواهند شد، بر روی جواب‌های هر دسته منتخب و نخبه اعمال شده و جواب‌های جدید تولید می‌شوند. از

[1] Exploitation
[2] Selected sites
[3] Elite sites

بین جواب‌های به‌دست آمده، به تعداد جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند و فرآیند بهبود بر روی آنها اعمال می‌گردد و به‌عنوان جواب‌های تکرار بعد، تعیین می‌شوند.

در خصوص نحوه نمایش راه‌حل یا جواب، به‌طور کلی هر الگوریتم فرا ابتکاری، نیاز به ساختاری برای نمایش جواب (کدگذاری) راه‌حل‌ها دارد. کدگذاری تاثیر بسیار مهمی بر کارایی و اثربخشی هر متاهیوریستیک دارد و یک مرحله مهم در طراحی آن محسوب می‌گردد. در این مقاله، برای نمایش هر جواب از ساختار ماتریسی استفاده می‌شود. هر جواب شامل چندین ماتریس است که این ماتریس‌ها مطابق با خروجی‌های مدل طراحی می‌شوند. به‌عنوان مثال برای متغیر Z_{ir} یک ماتریس دو بعدی با مقادیر صفر و یک و برای متغیر X^t_{ikj} یک ماتریس چهار بعدی با مقادیر پیوسته تعریف می‌گردد.

در خصوص موجه ماندن جواب‌های تولید شده حین اجرای الگوریتم، از ترکیب موجه ماندن ساختاری و تابع جریمه استفاده می‌شود. در رویکرد ساختاری با ایجاد مکانیزمی در طراحی ساختار جواب، از برآورده شدن قیود دارای ارجحیت، اطمینان حاصل می‌نماییم. همچنین در رویکرد تابع جریمه، تولید جواب‌های ناموجه منجر به بدتر شدن مقدار تابع هدف می‌گردد. استراتژی جریمه‌ای از متداول‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده برای مواجهه با جواب‌های غیرموجه می‌باشد که در آن ابتدا محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته نمی‌شوند پس برای هر تخطی از محدودیت‌ها یک جریمه اختصاص داده می‌شود که این جریمه در تابع هدف قرار می‌گیرد. مسئله اصلی چگونگی انتخاب یک مقدار مناسب برای مقدار جریمه می‌باشد تا در حل مسائل به ما کمک نماید. نکته‌ای که در روش جریمه وجود دارد این است که یک جواب غیرموجه به‌سادگی حذف نمی‌شود زیرا ممکن است در ژن‌های آن اطلاعات مفیدی وجود داشته باشد که با اندکی تغییر به جواب‌های بسیار خوب تبدیل شود.

در خصوص نحوه تولید و ارزیابی جواب‌های همسایه لازم به ذکر است که ورودی روش جستجوی همسایگی، جمعیت جواب‌های دسته‌های P1 و P2 می‌باشد. در واقع مجموعه‌ای از جواب‌ها به‌عنوان ورودی دریافت و سعی می‌گردد با بهبود هر کدام از جواب‌ها به جواب‌های همسایگی خوب دست یابی شود. ساختار کلی عملگر پیشنهادی طی گامهای زیر نشان داده شده است:

گام ۱: انتخاب جواب‌های موجود در دستهٔ P1 و P2 به‌عنوان ورودی

گام ۲: اعمال فرآیند جستجوی همسایگی و گزارش جواب‌های خروجی

گام ۳: ارزیابی جواب‌های به‌دست آمده حاصل از اعمال گام ۲

گام ۴: مقایسهٔ جواب اولیه با مجموعه جواب‌های واقع در همسایگی آن و انتخاب بهترین جواب

در روش فوق بر روی هر یک از جواب‌های موجود در دسته‌های P1 و P2، روش جستجوی همسایگی اعمال شده و نتیجه آن مجموعه‌ای از جواب‌های محلی است که در همسایگی جواب مذکور قرار دارند. تمام جواب‌های یاد شده با جواب اولیه مقایسه شده و در نهایت بهترین جواب انتخاب می‌شود.

همچنین با توجه به مطلوبیت کمتر دستهٔ P3 نسبت به دسته‌های P1 و P2 از نظر میزان تابع هدف و همچنین عدم تخصیص زنبور به سایت‌های مربوط به این دسته نسبت به سایت‌های نخبه و منتخب، جواب‌های مربوط به این دسته با جواب‌های تصادفی جایگزین می‌شوند. این عمل همچنین به میزان پراکندگی در اکتشاف کمک می‌کند.

در هر مرحله از اجرای این الگوریتم، از بین مکان‌های قبلی و مکان‌های جدید زنبورها، N (اندازه جمعیت) مکان به‌عنوان بهترین جواب‌ها با توجه به‌میزان برازندگی که در اینجا همان مقدار تابع هدف به ازای آن جواب می‌باشد، انتخاب خواهند شد. نحوه انتخاب به این صورت است که برای همه این مکان‌ها مقدار تابع هدف محاسبه شده و سپس مکان‌ها با توجه به‌ترتیب صعودی مقدار تابع هزینه مرتب گشته و در نهایت N جواب اول انتخاب خواهند شد.

۲-۳-۲- ساختار پیشنهادی الگوریتم ژنتیک (GA)

با توجه به استفاده گسترده این الگوریتم در حل مسائل، صرفا به برخی نکات کلیدی آن اشاره می‌شود. نحوه نمایش جواب در این الگوریتم نیز مانند الگوریتم قبلی می‌باشد. در خصوص عملگر انتخاب، از روش انتخاب براساس چرخ رولت برای به‌دست آوردن جمعیت اولیه فرزندان در نسل جدید استفاده می‌شود. در خصوص عملگر تقاطع با توجه وجود همزمان متغیرهای باینری و متغیرهای پیوسته در مسئله مورد بررسی، باید از عملگرهای تقاطع حالت باینری و پیوسته به‌صورت ترکیبی و به شرح زیر استفاده نمود.

گام ۱: انتخاب عددی تصادفی از مجموعه تمام حالات ممکن برای اعمال عملگر تقاطع بر روی اجزای موجود در هر یک از جواب‌ها.

گام ۲: اعمال عملگر تقاطع حالت حقیقی یا باینری و یا ترکیبی از آنها با توجه به نوع اجزای منتخب عملگرهای تقاطع مورد استفاده شامل تقاطع باینری یک نقطه‌ای[1]، تقاطع باینری n نقطه‌ای، تقاطع باینری یکنواخت[2] و تقاطع حالت حقیقی می‌باشند. در خصوص عملگر جهش از عملگر جهش برای نمایش‌های باینری از طریق تعویض جای صفر و یک (به این صورت که اگر بیت مورد نظر ۱ بود، به ۰ و بالعکس تبدیل خواهد شد) و برای رشته‌های عدد حقیقی، به‌دلیل پیوستگی دامنهٔ مقادیر، جهش‌های معمول کاربرد نداشته و از جهشی که برای نمایش عدد اعشاری به‌کار می‌رود، استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر مقدار هر ژن به‌طور تصادفی با یکی از مقادیر در حد پایین تا حد بالا جایگزین می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی، تعدادی مسئله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شده است. تعداد متغیرهای مسائل کوچک به ترتیب ۳۲، ۵۴، ۹۰ و ۱۲۱، تعداد متغیرهای مسائل متوسط به‌ترتیب ۵۹۸، ۱۱۹۰، ۲۳۶۶ و ۳۷۶۰ و نهایتا تعداد متغیرهای مسائل بزرگ ۷۶۷۴، ۲۲۶۸۵، ۹۷۴۹۰ و ۷۰۵۵۵ می‌باشد. این مسائل با الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی (در محیط متلب) حل و نتایج ارائه شده‌اند. همچنین نحوه تنظیم مؤلفه‌ها نیز در این بخش توضیح داده می‌شود.

تعداد ۱۲مسئله مطابق با جدول (۲) طراحی و تعریف شده اند. هر مسئله به دفعات متعدد توسط الگوریتم‌های پیشنهادی حل خواهد شد.

در تولید مسائل نمونه مقادیر مؤلفه‌های مسائل به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

هزینه واحد تولید محصولات از بازه یکنواخت [۱۰۰و ۹۰] تولید می شوند.

کلیه هزینه‌های حمل و نقل به‌طور تصادفی از بازه یکنواخت [۴و۲] تولید شده‌اند.

هزینه احداث مراکز تولید/ بازتولید از بازه یکنواخت [۵۰۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰] و نیز به‌صورت تابعی از سطح ظرفیت انتخاب شده برای این تسهیلات تولید می‌گردد.

هزینه احداث مراکز جمع‌آوری و بازرسی در بازه یکنواخت [۲۲۰۰۰۰ و ۱۷۰۰۰۰] و نیز به‌صورت تابعی از سطح ظرفیت انتخاب شده برای این تسهیلات تولید می‌گردد.

میزان صرفه جویی ناشی از تولید محصولات بازیافتی از بازه یکنواخت [۵۵ و ۴۵۰] تولید می‌گردد.

هزینه جمع‌آوری و بازرسی محصولات از بازه یکنواخت [۱۲و ۷] تولید می‌گردد.

هزینه امحاء محصولات از بازه یکنواخت [۵ و۳] تولید می‌گردد.

هزینه نگهداری محصولات در مراکز جمع‌آوری از بازه یکنواخت {[۸ و ۵] تولید می‌گردد.

میزان تقاضای بازارهای مصرف دارای توزیع نرمال با میانگین ۳۰۰۰ و انحراف معیار ۳۰ در نظر گرفته شده است.

درصد بازگشتی محصولات معادل ۵۰ در نظر گرفته شده است.

حداقل نرخ امحاء محصولات از بازه یکنواخت [۰/۳۳ و ۰/۲۷] تولید می‌گردد.

سطح اطمینان معادل ۹۵٪ در نظر گرفته شده است.

شایان ذکر است، ظرفیت مراکز تولید / بازتولید به‌صورت عددی تصادفی در بازهٔ یکنواخت، که حد پایین آن شامل تقسیم مجموع تقاضاهای مشتریان در یک دوره بر تعداد تسهیلات بالقوه تولید / باز تولید بوده و حد بالای آن به‌صورت دو برابر حد پایین می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. همچنین ظرفیت مراکز جمع‌آوری و بازرسی با تولید عددی تصادفی در بازهٔ یکنواخت، با حد پایین مجموع برگشتی‌های تمام مشتریان در یک دوره بر تعداد تسهیلات بالقوه جمع‌آوری و بازرسی و حد بالای دو برابر حد پایین، در نظر گرفته شده‌اند.

عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری تا حد زیادی به مقادیر مؤلفه‌های ورودی آنها وابسته است، به‌طوری که اگر مؤلفه‌های یک الگوریتم کارآمد به‌طور صحیح تنظیم نگردند، باعث ناکارآمدی الگوریتم خواهد شد. در این مقاله، از روش تاگوچی به منظور تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شده است. مؤلفه‌های اصلی منتخب برای تنظیم در هر الگوریتم و تعداد و مقدار سطوح در نظر گرفته شده برای آنها بسته به نوع مسئله اعم از کوچک و متوسط و بزرگ در جداول (۳) و (۴) داده شده است. همچنین مقادیر نهایی تنظیم شده در ستون آخر این جداول ارائه شده است. به‌منظور مقایسه دو الگوریتم همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، سه گروه از مسائل با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ جهت حل انتخاب شده‌اند. نتایج حاصل از ۵ بار اجرای هر الگوریتم برای هر مسئله در جدول (۵) ارائه شده است.

[1] One point crossover
[2] Uniform crossover

جدول(۲): ابعاد مسائل عددی تولید شده

شماره مسئله	اندازه مسئله	تعداد مراکز تولید/ بازتولید	تعداد بازارهای تقاضا	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد محصول	تعداد دوره های زمانی
۱	کوچک	۲	۲	۲	۱	۲
۲		۲	۳	۳	۱	۲
۳		۲	۵	۴	۱	۲
۴		۲	۶	۵	۱	۲
۵	متوسط	۳	۷	۷	۲	۳
۶		۶	۱۰	۸	۲	۳
۷		۶	۱۰	۸	۳	۴
۸		۷	۱۵	۹	۳	۴
۹	بزرگ	۱۰	۳۰	۱۶	۲	۴
۱۰		۱۰	۵۰	۲۵	۲	۶
۱۱		۱۵	۷۰	۳۵	۳	۸
۱۲		۱۵	۹۰	۴۰	۳	۱۰

جدول(۳): سطوح مؤلفه‌های الگوریتم ژنتیک

الگوریتم	پارامتر	نماد	تعداد سطح	اندازه مسئله	سطوح			مقدار تنظیم شده
					۱	۲	۳	
GA	اندازه جمعیت	A	۳	کوچک	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰
		A	۳	متوسط	۲۰	۲۵	۳۰	۳۰
		A	۳	بزرگ	۳۰	۳۵	۴۰	۳۰
	تعداد نسل	B	۳	کوچک	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
		B	۳	متوسط	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۰۰
		B	۳	بزرگ	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۰۰
	احتمال جهش	C	۳	کوچک	۰,۱	۰,۱۵	۰,۲	۰,۱
		C	۳	متوسط	۰,۲	۰,۲۵	۰,۳	۰,۲۵
		C	۳	بزرگ	۰,۳	۰,۳۵	۰,۴	۰,۴
	احتمال تقاطع	D	۳	کوچک	۰,۸	۰,۸۵	۰,۹	۰,۹
		D	۳	متوسط	۰,۸۵	۰,۹	۰,۹۵	۰,۸۵
		D	۳	بزرگ	۰,۸۵	۰,۹	۰,۹۵	۰,۹۵

جدول(۴): سطوح مؤلفه‌های الگوریتم زنبور عسل

الگوریتم	فاکتور	نماد	تعداد سطح	اندازه مسئله	سطوح			مقدار تنظیم شده
					۱	۲	۳	
BA	اندازه جمعیت	A	۳	کوچک	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰
		A	۳	متوسط	۲۰	۲۵	۳۰	۳۰
		A	۳	بزرگ	۳۰	۳۵	۴۰	۳۵
	تعداد تکرار	B	۳	کوچک	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
		B	۳	متوسط	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۰۰
		B	۳	بزرگ	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۳۵۰
	شعاع همسایگی	C	۳	کوچک	۰,۰۵	۰,۱	۰,۱۵	۰,۱۵
		C	۳	متوسط	۰,۱۵	۰,۲	۰,۲۵	۰,۲
		C	۳	بزرگ	۰,۲۵	۰,۳	۰,۳۵	۰,۳۵

جدول (۵): نتایج عددی حاصل از اجرای دو الگوریتم در ابعاد مختلف

سایز مسئله (I*K*L*J*T)	گروه	شماره اجرا	الگوریتم ژنتیک		الگوریتم زنبور عسل	
			مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)
۲*۲*۲*۱*۲*۲	کوچک	۱	۱۹۲۵۹۵۱,۷۴	۹,۵۶	۱۶۸۸۵۹۷,۶۵	۲۵,۶۴
		۲	۱۹۳۱۴۵۵,۹۸	۸,۲۳	۱۶۱۲۲۹۰,۲۴	۲۴,۳۲
		۳	۱۹۰۰۴۲۵,۰۰	۸,۵۴	۱۷۰۰۰۰۰,۶۹۸	۲۵,۶۵
		۴	۱۹۰۱۵۴۴,۲۳	۹,۰۵	۱۶۱۵۵۱۲,۷۸	۲۴,۶۶
		۵	۱۸۹۹۶۰۵,۵۴	۱۰,۳۲	۱۷۰۹۵۰۰,۵۸	۲۴
۲*۳*۳*۱*۳*۲		۱	۲۱۹۴۵۲۲,۸۱	۱۰,۵۴	۱۸۹۹۵۲۴,۳۶	۳۰,۲۵
		۲	۲۱۷۷۲۶۹,۴۴	۱۱,۵	۱۸۵۶۳۲۴,۶۵	۳۱,۱۴
		۳	۲۱۷۸۲۶۹,۵۶	۱۲,۶۵	۱۸۴۲۵۰۰,۶۳	۳۱,۲
		۴	۲۱۸۸۵۰۰,۲۳	۱۰,۸۷	۱۸۴۵۲۹۸,۸۵	۳۰,۶۸
		۵	۲۱۷۷۵۲۴,۳۳	۱۰,۹۵	۱۸۷۷۷۵۲,۱۹	۳۰,۶۵
۲*۵*۴*۱*۴*۲		۱	۳۴۰۲۸۴۲,۶۹	۱۷,۵۲	۲۹۶۲۰۲۵,۶۸۲	۳۶,۴۹
		۲	۳۳۸۲۶۶۷,۶۹	۹,۲۹	۲۹۶۱۴۹۹,۸۴۵	۳۵,۱۲
		۳	۳۳۹۴۲۱۵,۳۱	۹,۴۷	۲۹۵۳۰۵۸,۷۹۵	۳۵,۸
		۴	۳۲۹۸۹۸۵,۹۱	۱۴,۲۱	۲۹۶۴۶۲۸,۱۳۵	۳۵,۲۳
		۵	۳۳۷۶۵۵۶,۲۷	۱۴,۷۷	۲۹۵۸۷۴۸,۲۱۵	۳۵,۱۷
۲*۶*۵*۱*۴*۲		۱	۳۵۱۰۲۲۷,۰۳۴	۲۱,۰۵	۳۳۰۹۸۰۵,۲۵۹	۴۴
		۲	۳۶۱۱۰۳۴,۲۳۳	۱۲,۲۵	۳۳۱۵۳۲۳,۸۷۶	۴۱,۵۷
		۳	۳۴۴۸۳۵۱,۶۴۳	۱۴,۳۱	۳۳۰۲۲۰۳,۹۰۳	۳۹,۶۴
		۴	۳۵۵۷۲۶۹,۰۸۳	۱۱,۵۹	۳۳۱۲۳۳۳,۹۴۶	۳۸,۷۲
		۵	۳۴۴۹۸۸۰,۹۷۸	۲۰,۸۲	۳۳۱۰۸۲۷,۱۵	۴۱,۳۳
۳*۷*۷*۲*۳*۳	متوسط	۱	۱۰۱۸۴۵۶۴,۳۶	۵۶,۴۸	۸۹۴۳۵۹۲,۷۲	۳۴۴,۸۱
		۲	۱۰۲۷۹۵۲۰,۵۱	۴۵,۸۸	۸۹۴۸۰۰۲,۹۱	۳۳۱,۳۵
		۳	۱۰۳۸۵۵۵۲,۷۷	۱۲۰,۹۶	۸۹۳۲۹۵۹,۳۱۵	۳۳۱,۳۶
		۴	۱۰۱۵۶۰۴۴,۳	۴۱,۸۷	۸۹۲۹۸۴۹,۰۷۱	۳۳۳,۱۲
		۵	۹۹۸۰۶۲۴,۵۹۳	۶۶,۷۶	۸۹۳۶۴۲۹,۵۴۴	۳۳۳,۵
۶*۱۰*۸*۲*۳*۳		۱	۱۴۴۲۰۳۳۴,۸۱	۱۳۲,۹۱	۱۲۵۵۶۲۹۶,۸۲	۴۶۷,۳۷
		۲	۱۴۵۱۱۶۵۶	۸۹,۵۳	۱۲۵۸۴۳۰۹,۵۸	۴۶۰,۲۸
		۳	۱۴۵۵۱۲۵۳,۷۵	۱۴۳	۱۲۵۵۴۸۰۳,۳۷	۴۶۳,۰۲
		۴	۱۴۳۶۲۴۴۷,۹۳	۶۶,۶۲	۱۲۶۲۷۵۱۳,۳۲	۴۶۰,۸۷
		۵	۱۴۳۶۴۶۹۷,۵۴	۵۵,۵۸	۱۲۵۵۷۲۱۸,۰۶	۴۶۲,۳۴
۶*۱۰*۸*۳*۴*۴		۱	۲۶۴۲۵۲۹۹,۴۳	۱۶۲,۷۸	۲۳۲۵۱۸۲۷,۵۲	۸۰۱,۵۲
		۲	۲۵۹۰۱۲۱۰,۳۹	۲۰۹,۴۵	۲۳۲۴۰۷۴۷,۷۳	۷۹۹,۵۲
		۳	۲۵۸۶۱۵۸۰,۵۱	۸۹,۵۵	۲۳۲۵۳۹۱۲,۲۳	۸۲۴,۴۸
		۴	۲۶۵۳۵۶۴۶,۵	۱۷۱,۹۳	۲۳۲۴۹۹۹۱,۵۸	۸۱۰,۱۹۴
		۵	۲۶۵۳۸۴۲۲,۹	۲۴۶,۳۸	۲۳۲۳۷۰۳۵,۶	۸۰۵,۱۲

۷*۱۵*۹*۳*۴		۱	۳۹۴۷۳۵۱۸,۹۳	۱۱۶,۱۶	۳۳۸۵۲۴۸۰,۰۲	۱۰۸۵,۳۲
		۲	۳۹۲۸۹۲۵۷	۳۳۹,۷۹	۳۲۲۱۹۷۷۴,۷۵	۱۱۳۲,۶۲
		۳	۳۸۸۰۲۳۲۱,۷۱	۱۱۵,۵۱	۳۲۲۰۹۶۳۱,۳۸	۱۱۱۳,۷۸
		۴	۳۸۷۱۹۷۴۸,۳۶	۱۶۳,۰۸	۳۲۲۳۵۰۶۹,۷۸	۱۱۰۹,۷۷
		۵	۳۸۴۹۶۱۵۳,۳۳	۱۱۵,۷۱	۳۲۲۶۹۰۶۲,۶۱۹	۱۰۶۴,۲۳
۱۰*۳۰*۱۶*۲*۴	بزرگ	۱	۴۹۶۱۴۴۱۹,۲۴	۸۸۳,۷۱	۴۳۵۰۴۷۶۸,۴۸	۲۶۶۶,۳۴
		۲	۴۹۶۴۵۵۵۹,۱۲	۲۶۶,۷	۴۳۴۹۸۰۹۴,۷۱	۲۶۳۳,۴۶
		۳	۴۹۴۰۷۱۳۵,۲۷	۲۶۷,۶۶	۴۳۵۲۲۳۰۱,۷۱	۲۶۷۸,۴۳
		۴	۴۹۶۶۱۵۴۸,۸۷	۲۶۰,۲۴	۴۳۸۵۴۶۵۲,۴۱	۲۶۶۸,۲۴
		۵	۴۹۳۸۸۸۳۶,۵۹	۲۵۹,۵	۴۳۷۷۷۲۱۹,۸۴	۲۶۸۵,۴۲
۱۰*۵۰*۲۵*۲*۶		۱	۱۱۴۲۰۹۴۶۱,۹	۶۱۲,۱	۱۰۸۴۰۴۹۹۴,۹	۶۳۰۵,۰۶
		۲	۱۱۳۵۸۱۷۶۲,۲	۶۱۲,۲۱	۱۰۸۸۲۷۶۵۲,۶	۶۲۵۷
		۳	۱۱۳۴۹۱۰۸۹,۲	۶۱۰,۹	۱۰۸۹۹۵۲۴۱,۳	۶۲۸۵
		۴	۱۱۴۳۰۵۵۵۴,۸	۶۱۳,۹۹	۱۰۸۷۴۴۵۸۷,۳	۶۳۰۰
		۵	۱۱۴۰۱۲۸۸۵,۱	۶۱۰,۶۱	۱۰۸۵۵۴۶۹۵,۲	۶۲۵۵
۱۵*۷۰*۳۵*۳*۸		۱	۳۱۴۶۳۳۸۵۹,۷	۱۶۹۵,۸۳	۳۰۱۲۹۳۶۰۴,۹	۱۷۵۸۳,۲
		۲	۳۱۳۵۷۹۴۷۶,۷	۱۶۹۶,۵۱	۳۰۱۲۸۵۵۴۸,۷	۱۹۰۶۷,۳۷
		۳	۳۱۴۳۳۸۴۲۴,۷	۱۷۱۴,۸۳	۳۰۱۶۵۴۲۵۷	۱۷۹۰۳,۲۴
		۴	۳۱۴۲۶۸۶۱۸,۲	۱۷۱۶,۱۱	۳۰۱۵۵۰۴۴۸,۹	۱۷۶۶۵
		۵	۳۱۴۲۵۴۲۸۳,۸	۱۷۲۸,۲	۳۰۱۸۶۴۳۲۱,۷	۱۷۵۶۴
۱۵*۹۰*۴۰*۳*۱۰		۱	۵۰۵۷۳۲۷۳۴,۶	۲۷۱۳,۷۷	۴۹۰۸۹۲۴۶۴,۹	۲۷۸۸۶,۷۵
		۲	۵۰۶۳۳۴۳۶۷,۸	۲۵۵۹,۶۵	۴۹۰۸۶۲۵۰۲,۶	۲۷۵۶۵
		۳	۵۰۵۹۹۸۵۰۰,۹	۲۵۷۵,۴	۴۹۰۸۴۵۶۲۵,۳	۲۷۴۸۵
		۴	۵۰۷۰۸۳۰۵۶,۴	۲۵۶۳,۶۱	۴۹۱۱۵۲۳۲۴,۵	۲۷۴۴۴
		۵	۵۰۵۳۳۰۱۶۱,۹	۲۵۶۷,۴۹	۴۹۰۰۵۴۵۸۷,۱	۲۸۰۵۴

جدول (۶): مقایسه نتایج دو الگوریتم بر اساس مقدار تابع هدف و زمان حل

سایز مسئله (I*K*L*J*T)	گروه	درصد بالاتر بودن مقدار تابع هدف ژنتیک نسبت به زنبور عسل	درصد بالاتر بودن زمان حل زنبور عسل نسبت به ژنتیک
۲*۲*۱*۲	کوچک	٪ ۱۴,۸	٪ ۱۷۱,۹
۲*۳*۱*۳*۲		٪ ۱۷,۱	٪ ۱۷۲,۴
۲*۵*۱*۴*۲		٪۱۳,۹	٪ ۱۷۲,۵
۲*۶*۱*۵*۲		٪ ۶,۲	٪ ۱۵۶,۶
۳*۷*۲*۷*۳	متوسط	٪ ۱۴,۱	٪ ۴۰۴,۳
۶*۱۰*۸*۲*۳		٪ ۱۴,۸	٪ ۳۷۴,۵
۶*۱۰*۸*۳*۴		٪ ۱۲,۹	٪ ۳۵۹,۱
۷*۱۵*۹*۳*۴		٪ ۱۹,۷	٪ ۵۴۷,۶
۱۰*۳۰*۱۶*۲*۴	بزرگ	٪ ۱۳,۶	٪ ۵۸۷,۸
۱۰*۵۰*۲۵*۲*۶		٪ ۴,۸	٪ ۹۲۶,۳
۱۵*۷۰*۳۵*۳*۸		٪ ۴,۲	٪ ۹۴۹,۸
۱۵*۹۰*۴۰*۳*۱۰		٪ ۳,۱	٪ ۹۶۶,۴
میانگین درصد ها		٪ ۱۱,۶	٪ ۴۸۲,۴

در جدول (۶) مقایسه بین دو الگوریتم بر مبنای مقدار تابع هدف و زمان حل صورت گرفته است. بدین ترتیب کـه ابتـدا بـراسـاس جدول (۶)، مقدار میانگین تابع هدف و زمان حل برای هر یـک از ۱۲ مسئله موجود ومحاسبه و با توجه به‌حداقل بودن تـابع هـدف (هزینه) و بیشتر بودن مقادیر تولید شده توسط الگوریتم ژنتیـک برای کلیه مسائل نسبت به الگوریتم زنبـور عسـل، درصـد بـالاتر بودن مقدار تابع هدف ژنتیک نسبت به زنبور عسل در ستون سوم برای هر مسئله به‌صورت مجزا ارائه شده است. با توجه به جـدول (۶)، با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسائل این درصـد کـاهش مـی‌یابـد و نشان می‌دهد عملکرد این دو الگوریتم در ابعاد بـزرگ‌تـر بـه هـم نزدیک می‌شود. میانگین درصد یاد شده ۱۱/۶ درصد می‌باشد.

همچنین میانگین زمان اجرای هر دو الگوریتم برای هر یـک از ۱۲ مسئله محاسبه و نهایتا در ستون سـوم جـدول (۶) درصـد بالاتر بودن زمان حل الگوریتم زنبور عسل نسبت به ژنتیـک ارائـه شده است. با توجه به جدول (۶)، با بزرگ‌تر شـدن ابعـاد مسـائل این درصد افزایش می‌یابد و نشان می‌دهـد. میـانگین درصـد یـاد شده ۴۸۲/۴ درصد می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یـک شـبکه زنجیـره تـأمین حلقـه بسـته شـامل تعدادی مرکز تولید، بازارهای تقاضا یا مصرف، مراکـز جمـع‌آوری محصولات برگشتی و مرکز امحاء در نظر گرفته شد. مراکز تولیـد می‌توانستند محصولات جدیدی تولید و یا محصولات بازگشتی را بازتولید[1] نمایند. محصولات تولیدی به بازارهـای تقاضـا ارسـال و بخشی از آنها با مدیریت صورت گرفته به زنجیره اصـلی بازگشـت داده می‌شود و محصولات بازگشتی در مراکز جمـع‌آوری تجمیـع می‌شوند. هر مرکز جمع‌آوری مسئولیت‌های زیر را بر عهده دارند: جمع‌آوری محصولات برگشت داده شده از بازارهای تقاضا، تعیین شرایط بازگشتی‌ها به‌وسیله بازرسی و/ یـا جـداسـازی، فرسـتادن بازگشتی‌های قابل بازیافت بـه مراکـز تولیـد و همچنـین ارسـال بازگشتی‌های غیر قابل بازیافت (به‌دلائل اقتصادی و یـا فنـی) بـه مراکز امحاء. به‌دلیل زمان قابل توجه احتمالی محصولات برگشتی در مراکز جمع‌آوری، هزینه نگهداری ایـن محصـولات در آنهـا در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل مکان‌یابی موجـودی در نظـر گرفته شده در این تحقیق، ضمن مکان‌یابی تسهیلات مـرتبط بـا تولید و جمع‌آوری، میزان موجودی اقتصـادی قابـل نگهـداری در مراکز جمع‌آوری را نیز مشخص نمود. همچنین کلیه جریان‌هـای محصولات جدید و برگشتی بین اعضای این شبکه نیـز مشـخص گردید. بـه‌منظـور حـل از دو الگـوریتم GA و BA اسـتفاده و در محیط متلب کدنویسی گردید. نتایج حاصل از آنهـا بـا توجـه بـه مسائل عددی تولید شده (در سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ) بر اساس مقدار تابع هدف و زمان حل مقایسه گردید.

پس از طراحی مسـائل بـا انـدازه‌هـای متفـاوت، بـه تنظـیم مؤلفه‌های مورد نیاز الگوریتم‌ها با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفت. با توجه به آزمون‌های فرض صورت گرفته، مشاهده شد که الگوریتم زنبور عسل از لحاظ مقدار تابع هدف و بـه‌دسـت آوردن جواب بهتر (کمتر)، عملکرد بهتر از الگوریتم ژنتیک دارا می‌باشد، در حالیکه از لحاظ زمان رسیدن به جواب نهایی، الگوریتم ژنیتک عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم زنبور عسل از خـود نشـان داده است. از منظر مدیریتی برای مدیران صـنایع مـرتبط نتـایج ایـن تحقیق می‌تواند از منظر نحوه مواجهه با عـدم قطعیـت تقاضـا بـا روش احتمالی، امکان انتخاب از بـین سـطوح ظرفیتـی مختلـف، امکان در نظر گرفتن چندین دوره و چندین محصـول در مـدل و نهایتا یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی و موجودی جذاب باشد. از موضوعاتی که در تحقیقات آینده می‌توان به آنها پرداخت:

- در نظر گرفتن اهداف دیگر برای مسئله از جمله اهداف زیست محیطـی ماننـد کمینـه کـردن میـزان انتشـار گازهای گلخانه‌ای.
- اضافه نمودن سطوح جدید بـه شـبکه زنجیـره تـأمین مانند مراکز توزیع قبل از بازارهای مصرف.
- در نظر گرفتن گزینه‌های مشـوق بـرای جـذب بیشـتر مقدار برگشتی‌ها.
- در نظر گرفتن کیفیت متفاوت بـرای محصـولات نـو و بازگشتی
- در نظر گرفتن سایر رویکردها بـرای مواجهـه بـا عـدم قطعیت در مسئله مانند فازی، فازی استوار.

۵- مراجع

[1] N. Darabi, F. Barzinpour, and A. Makui, "A model for designing an integrated forward and reverse logistics network considering returned products pricing. 2th International Conference of Logistics and Supply Chain," 2011. (In Persian)

[1]Remanufacturing

[2] L. Meade, J. Sarkis, and A. Presley, "The theory and practice of reverse logistics," International Journal of Logistics Systems and Management, vol. 3, pp. 56-84, 2007.

[3] E. Keyvanshokooh, M. Fattahi, S. Seyed-Hosseini, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design," Applied Mathematical Modelling, vol. 37, pp. 10182-10202, 2013.

[4] A. Amiri, "Designing a distribution network in a supply chain system. formulation and efficient solution procedure," European Journal of Operational Research, vol.171, pp. 567-576, 2006.

[5] M. Fleischmann P. Beullens, J. M. Bloemhof ruwaard, and L. Wassenhove, "The impact of product recovery on logistics network design, Production and Operations Management, vol. 10, no. 6, pp. 156–173, 2001.

[6] M. S. Pishvaee, R. Z. Farahani, and W. A. Dullaert, "memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. Computers and Operations Research," vol. 37, no. 6, pp. 1100 1112, 2010.

[7] D. H. Lee and M. A. Dong, "heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery," Transportation Research: Part E, vol. 44, pp. 455–474, 2008.

[8] M. J. Tarokh, M. EsmaeiliGookeh, and Sh. Torabi, "A model to optimize the design of a reverse logistic network under uncertainty," Advances in Industrial Engineering, vol. 46, no. 2, pp. 159-173, 2012. (In Persian)

[9] J. Razmi and M. S. Pishvaee, "Quantitative methods for reverse logistics management," The Institution of Trade Studies and Researches, Tehran, Iran, 2021. (In Persian)

[10] S. Hasanzadeh Amin and G. Zhang, "A multi objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. Applied Mathematical Modeling," vol. 37, pp. 4165–4176, 2013.

[11] L. Kroon and G. Vrijens, "Returnable containers: An example of reverse logistics. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management," vol. 25, pp. 56–68, 1995.

[12] A. I. Barros, R. Dekker, and V. Scholten, "A two level network for recycling sand: a case study," European Journal of Operational Research, vol. 110, pp.199–214, 1998.

[13] V. Jayaraman, V. Guide, and R. Srivastava, "A closed-loop logistics model for remanufacturing," Journal of the operational research society, vol. 50, pp. 497-508, 1999.

[14] H. R. Krikke, A. Van Harten, P. C. Schuur, "Business caseOcé: reverse logistic network redesign for copiers. OR Spectrom," vol. 21, no. 6, pp. 381-409, 1999.

[15] V. Jayaraman, R. A. Patterson, and E. Rolland, "The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures," European Journal of Operational Research, vol. 150, pp. 128–149, 2003.

[16] H. Min, H. J. Ko, and B. I. Park, "A lagrangian relaxation heuristic for solving the multi-echelon, multi-commodity, closed-loop supply chain network design problem," International Journal of Logistics Systems and Management,vol. 1, no. 4, pp. 382–404, 2005.

[17] H. Min, H. J. Ko, and C. S. Ko, "A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. Omega," vol. 34, pp. 56 – 69, 2006.

[18] K. Kim, I. Song, J. Kim, and B. Jeong, "Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment," Computers and Industrial Engineering, vol. 51, no. 2, pp. 279–287, 2006.

[19] H. Üster, G. Easwaran, E. Akçali, and S. Çetinkaya, "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi product closed loop supply chain network design model," Naval Research Logistics, vol. 54, no. 8, pp. 890-907, 2007.

[20] J. Q. Frota Neto, J. Bloemhof, A. A. E. Van Nunen, and E. VanHeck, "Designing and evaluating sustainable logistics network," International journal of production Economics, vol. 111, no. 3, pp. 195-208, 2008.

[21] R. K. Pati, P. Vrat, and P. Kumar, "A goal programming model for paper recycling system," Omega, vol. 36, pp. 405–417, 2008.

[22] B. Vahdani, M. Sharifi, "An inexact-fuzzy-stochastic optimization model for a closed loop supply chain network design problem," Journal of Optimization in Industrial Engineering, vol. 6, no. 12, pp.7-16, 2013.

[23] E. Roghanian and P. Pazhoheshfar, "An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm," Journal of Manufacturing Systems, vol.33, no. 3, pp. 348-356, 2014

[24] H. Soleimani, M. Seyyed-Esfahani, and M. Shirazi, "Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology," vol. 68, pp. 917-931, 2013.

[25] A. Ç. Suyabatmaz, F. T. Altekin, and G. Şahin, "Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a thirdparty logistics provider. Computers and Industrial Engineering, vol.70, pp. 74-89, 2014.

[26] H. Soleimani and G. Kannan, "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. Applied Mathematical Modelling," vol. 39, pp. 3990-4012, 2015.

[27] E. Ahmadzadeh and B. Vahdani, "A location inventory-pricing model in a closed loop supply chain network with correlated demands and shortages under a periodic review system. Computers and Chemical Engineering", vol.101, pp.148-166, 2017.

[28] M. Fathi, M. Khakifirooz, A. Diabat, and H. Chen, "An integrated queuing-stochastic optimization hybrid Genetic Algorithm for a location-inventory supply chain network," International Journal of Production Economics, vol. 237, pp. 108109, 2021.

[29] M. Seifbarghy and S .Malekpour Kolbadinejhad, "Development of a closed loop supply chain network considering environmental factors and location-inventory decisions under uncertainty," Iranian Journal of Supply Chain Management, vol. 22, no. 67, pp. 4-22, 2020. (In Persian)

[30] S. Hasanzadeh Amin and G. Zhang, "A multi objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return," Applied Mathematical Modeling, vol. 37, no. 6, pp. 4165-4176, 2013.

Journal of Supply Chain Management

Vol. 23, No. 72, 2021

A Mathematical Location-Inventory Model for Designing a Forward /Backward Logistic Network under Demand and Return Uncertainty with Multiple Capacity Levels

M. Seifbarghy*, M. Karbalaei Esmaeili

*Assistant Proffesor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

(Received: 16/08/2021; Accepted: 30/01/2022)

Abstract

Today, the competitive business environment has led to increasing cooperation among companies as the members of supply chain networks. In this area, the supply chain logistics network design is an important subject due to its effect on the responsiveness and efficiency. Over the past few years, due to environmental issues, their legal requirements and economic benefits, great attention has been paid to inverse logistics. In this paper, a mixed integer stochastic location-inventory model has been proposed for the integrated design of the network of a multi-period multi-product closed loop supply chain considering multiple capacity levels for facilities. The market demand and correspondingly the return value are considered to be uncertain in order to make the model close to the real-life conditions. Since the capacitated facility location problem considered in this research is an NP-hard type problem, we have used two meta-heuristic algorithms including the genetic algorithm (GA) and the Bees algorithms (BA) for solving this problem. Some numerical problems are designed and solved to assess the performance of the model and solution heuristics. From the viewpoint of solution quality, the BA outperforms the GA (by an average of 11.6%) whilst from the viewpoint of solution time, the GA is five times faster than the BA on average.

Keywords: Closed Loop Supply Chain, Network Design, Uncertainty, Genetic Algorithm, Bees Algorithm

*Corresponding Author E-mail: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir