مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید به‌منظور طراحی زنجیره تأمین یکپارچه چندسطحی

حمـزه امین طهمـاسبی، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، ایران

سید امین بدری، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، ایران

بهناز رضازاده، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع،دانشگاه غیرانتفاعی کوشیار، رشت، ایران

E-mail: amintahmasbi@guilan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/٤/٤ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۵

چکیده

در قرن حاضر، الگوی رقابت در تولید و خدمات، از رقابت میان شرکت‌های مستقل به رقابت میان زنجیره‌های تأمین تغییر کرده است. در این بین، مسئله طراحی استراتژیک زنجیره تأمین از مسائل مهم در حوزه مدیریت زنجیره تأمین است. در این مسائل عموماً هدف استقرار تعدادی تسهیل تولیدی و مرکز توزیع در سایت‌های کاندیدا (در مناطق جغرافیای مختلف) به‌منظور پوشش تقاضای محصولات مختلف در مناطق مشتریان است. در مدل ارائه‌شده در این پژوهش، تقاضای انواع محصول در مناطق مشتریان از طریق تعدادی مرکز توزیع برآورده می‌گردد درحالی‌که این مراکز توزیع، محصولات را از کارخانه‌های تولیدی تهیه می‌کنند و این کارخانه‌ها، برای طراحی و تولید هر محصول، باید اجزای موردنیاز آن محصول را از تأمین‌کنندگان خریداری نمایند. در اینجا یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه ارائه شده است که همزمان علاوه بر طراحی زنجیره تأمین چند سطحی، مسئله مکان‌یابی تسهیلات را نیز درنظر می‌گیرد. در این مدل اهداف مختلفی مانند کمینه‌سازی هزینه‌های بخش تهیه و تولید اجزای محصولات، تهیه و تولید محصولات، نگهداری و ارسال محصولات به مراکز توزیع، ارسال به مناطق مشتریان و هزینه استقرار کارخانه‌ها و مراکز توزیع وجود دارد. برای ارزیابی مدل پیشنهادی، ابتدا مدل ریاضی با نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز کدنویسی شده و سپس برای مسائل در سایز بزرگ با الگوریتم‌های فراابتکاری ازدحام ذرات و رقابت استعماری حل می‌شود. بررسی‌های آماری نتایج، نشان‌دهنده کیفیت مدل و رویه حل پیشنهادی است.

واژه های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری، برنامه‌ریزی خطی، زنجیره تأمین چندسطحی، مکان‌یابی تسهیلات

۱. مقدمه

زنجیره تأمین مجموعه‌ای از امکانات تولیدی، تأمین‌کنندگان، مشتریان، محصولات و روش‌های کنترل موجودی، خرید و توزیع است که از تولید مواد خام توسط یک تأمین‌کننده آغازشده و با مصرف محصول توسط مشتری پایان می‌یابد. مدیریت زنجیره تأمین بر یکپارچه‌سازی فعالیت‌های زنجیره تأمین و نیز جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌ها از طریق بهبود در روابط زنجیره، برای دستیابی به مزیت رقابتی قابل‌اتکا و مستدام مشتمل می‌شود [Dominguez and Lashkari, 2004]. طراحی شبکه زنجیره تأمین، به‌عنوان مهم‌ترین تصمیم استراتژیک در مدیریت زنجیره تأمین، نقش مهمی را در عملکرد کلی محیطی و اقتصادی زنجیره تأمین ایفا می‌کند. آنچه اهمیت طراحی یک شبکه زنجیره تأمین را روزافزون می‌کند تأثیر آن بر مکان‌یابی تسهیلات و تجهیزات، جریان تولید و خرید کالا و مواد اولیه، حمل و توزیع آن‌ها و میزان رضایتمندی مشتریان است [Saffar, Shakouri and Razmi, 2015].

طراحی یک زنجیره تأمین چند سطحی که از تأمین‌کننده تا مشتری را در نظر بگیرد و به‌علاوه محصولات و مواد اولیه متفاوت نیز در آن قابل‌تعریف باشند یک موضوع مجزا است که بسیار کاربردی و رایج است. از طرفی طرح مسئله مکان‌یابی برای تسهیلات مختلف ازجمله کارخانه‌های تولید و یا مراکز توزیع در سطح یک زنجیره تأمین گسترده، موضوع دیگری بوده است که موردتوجه قرار گرفته است. با بررسی ادبیات موضوع درزمینه طراحی استراتژیک زنجیره تأمین نشان داده شد که در تحقیقات موجود، استفاده از مدل‌های ریاضی خطی برای یکپارچه‌سازی مراحل تهیه، تولید و توزیع با امکان مکان‌یابی هم‌زمان برای تأسیس کارخانه‌ها و مراکز توزیع کمتر موردتوجه واقع‌شده است. با در نظر گرفتن نیازمندی واقعی صنعت، در این پژوهش، ترکیب این دو حوزه با هم مدنظر است. هدف از این تحقیق ارائه مدلی است که بتواند زنجیره تأمین چند سطحی را برای سطوح تهیه، تولید و توزیع، به‌صورت یکپارچه طراحی کند تا با امکان تعیین هم‌زمان مکان تسهیلات تولیدی و توزیعی از بین تعدادی سایت کاندیدا و با توجه به محدودیت‌های بودجه شرکت، هزینه تمام مراحل کمینه گردد. همچنین مدل ارائه‌شده می‌تواند برنامه‌ریزی تهیه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، برنامه‌ریزی تولید محصولات مختلف در کارخانه‌های فعال و همچنین برنامه‌ریزی توزیع محصولات از کارخانه‌های فعال به مراکز توزیع و ازآنجا به مناطق مشتریان را نیز انجام دهد. در اینجا شرکت‌هایی مدنظرند که علاقه‌مندند تا با استقرار تعدادی توزیع‌کننده و تعدادی کارخانه در سایت‌های کاندیدا (در مناطق جغرافیای مختلف)، تقاضای محصولات مختلف را در مناطق مشتریان برآورده سازند. تقاضای هر نوع محصول در مناطق مشتریان مشخص است و کامل برآورده می‌شود. تأمین‌کنندگان، مشتریان، مواد اولیه و انواع محصولات ثابت و مشخص هستند. برای ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی، ابتدا مدل ریاضی با نرم‌افزار بهینه‌سازی مانند گمز کد نویسی شده و سپس در سایز بزرگ با الگوریتم های فرا ابتکاری ازدحام ذرات و رقابت استعماری حل می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین و مدیریت آن همواره یکی از مسائل پیچیده در صنعت بوده است که موردتوجه محققان قرار گرفته است. ملو و همکاران (۲۰۰۵) مکان‌یابی تسهیلات چندمنظوره ظرفیت دار پویا (چارچوب مدل‌سازی برای برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین) را بررسی کردند. در این مقاله بر روی طراحی استراتژیک زنجیره تأمین تمرکز شده، تأثیر یکپارچه‌سازی طرح زنجیره تأمین مطالعه شد. چارچوبی از مدل ریاضی که چندین جنبه عملی از مسائل طراحی شبکه را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد ارائه‌شده است [Melo, Nickel and Saldanha-da-Gama, 2005]. معماری و همکاران (۲۰۱۷) به توسعه مدلی برای مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات پرداختند که در آن رضایت مشتری نیز لحاظ شد. انتخاب بهترین مکان برای تسهیلات

(انبارها) و تعیین زمان‌بندی و مسیر حرکت وسائل نقلیه در جهت کاهش هزینه‌ها از جمله هزینه احداث از اهداف این تحقیق بود. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم ژنتیک مرتب شده نامغلوب استفاده گردید [Memari and et al. 2017].

گبنینی و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل یکپارچه تولید- توزیع برای مسائل تخصیص و مکان‌یابی پویا با بهینه‌سازی موجودی ارائه دادند. در مدل پیشنهادی مراحل تولید و توزیع به‌صورت یکپارچه بررسی‌شده، همچنین مسئله مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات موردتوجه قرار گرفت [Gebennini, Gamberini and Manzini, 2009]. عطائی و همکاران (۲۰۱۷) به بهینه-سازی سیستم حمل و نقل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پرداخته‌اند. در این مقاله محققان به دنبال بهینه کردن سیستم با درنظر گرفتن هزینه حمل و نقل و زمان سفر به عنوان دو فاکتور مهم بوده‌اند. مدل ریاضی طراحی شده دارای پیچیدگی‌های خاص بوده که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل شده است. نتایج تحقیق نشان از کارآمدی روش های بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات داشته است [Ataie, Tavakoli Moghaddam and Azizi, 2017].

التیپارماک و همکاران (۲۰۰۹) الگوریتم ژنتیک حالت پایدار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی را معرفی کردند. در این پژوهش روش حلی بر مبنای حالت پایدار الگوریتم ژنتیک با ساختار کدگذاری نوین برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین تک منبع چند محصولی چندمرحله‌ای ارائه‌شده است. مدل ریاضی طراحی‌شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته است[Altiparmak and et al. 2009].

عثمان و دیمرلی (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه و الگوریتم تجزیه بندرز اصلاح‌شده را برای تنظیم مجدد زنجیره تأمین و انتخاب تأمین‌کننده‌ها بررسی کردند. روش تجزیه بندرز اصلاح‌شده به‌طور موفقیت‌آمیزی مدل‌های برنامه‌ریزی دوهدفه را مدیریت می‌کند که در آن متغیرهای پیچیده صفر و یک، بر ارزش‌های متغیرهای انحرافی برای رسیدن به اهداف تأثیر می-گذارند [Osman and Demirli, 2010].

صفایی و همکاران (۲۰۱۰) یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، توزیع چندسایتی با مدل‌سازی ترکیبی در زنجیره تأمین را مطالعه کردند. در این تحقیق ارائه یک برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع چندمحصوله، چنددوره‌ای و در چند سایت تحت محدودیت‌های تولید و توزیع، سیستم توزیع و تقاضای مشتریان محلی مدنظر بوده است. نویسندگان برای تحقق این هدف از توانایی یک روش شبیه‌سازی ریاضی ترکیبی برای حل مسئله استفاده کرده‌اند [Safaei, husseini and farahani, 2010]. صادیق و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل یکپارچه چندهدفه برای زنجیره تأمین با موقعیت مکانی مراکز توزیع و تصمیم‌گیری‌های انتخاب تأمین‌کننده را مطالعه کردند. سه تابع هدف در چهار زنجیره تکاملی که در آن‌ها مراکز توزیع به‌طور هم‌زمان قرار دارند، موردتوجه قرارگرفته است. در این مقاله یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل یک مدل ریاضی جدید از انتخاب تأمین‌کننده، تعیین طرح مونتاژ، مکان مراکز توزیع و برنامه‌ریزی توزیع تدارکات پیشنهادشده است [Sadigh, Fallah and Nahavandi, 2013].

خلیلی دامغانی و توانا (۲۰۱٤) یک روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه فازی برای حل مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت را بررسی کردند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه فازی برای افزایش جریان مواد در کانال دوگانه، چندمنظوره و چندهدفه زنجیره‌های تأمین در شرایط عدم قطعیت به‌طور هم‌زمان پیشنهادشده است [Khalili-Damghani and Tavana, Amirkhan, 2014]. سلیمانی و کانان (۲۰۱۵) روش‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی و الگوریتم ژنتیک را برای طراحی شبکهٔ زنجیره تأمین حلقه بسته در شبکه‌های بزرگ مطالعه کردند. نتیجه کار آن‌ها توسعه یک مدل قطعی چند دوره-ای، چندمرحله‌ای و چند محصولی است که درنهایت به ارائه یک

روش مناسب برای حل اندازه‌های مختلف مسائل نمونه برای هر دو متغیر تصمیم‌گیری طراحی و برنامه‌ریزی (موقعیت و تخصیص) در شبکه پیشنهادشده منتج شده است [Soleimani and Kannan,2015]. سینگ و همکاران (۲۰۱۳) طراحی شبکه زنجیره تأمین مبتنی بر ظرفیت با توجه به عدم اطمینان تقاضا با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را مطالعه کردند. مسئله به‌عنوان یک فرمول برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شد که به دنبال بهینه‌سازی مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت دار شده و تصمیم‌گیری تخصیص مشتری و مقادیر تولید در این مکان‌ها است[Singh, Jain and Mishra, 2013]. وارلا و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه را برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌های تأمین طراحی کرده‌اند و در تحقیق خود به بررسی عملکرد اقتصادی و محیطی زنجیره تأمین پرداخته‌اند. در مدل ارائه‌شده طراحی زنجیره تأمین به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه در نظر گرفته شده که اهداف آن حداکثر سازی سود و به حداقل رساندن تأثیرات منفی بر روی محیط‌زیست است. مدل پیشنهادی و روش بهینه‌سازی اجازه می‌دهد که سیستم‌های پیچیده به شیوه‌ای بسیار ساده ارائه شوند[Varela and et al. 2011]. پاکسوی و همکاران (۲۰۱۰) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای بهینه‌سازی و طراحی شبکه زنجیره تأمین چند سطحی را بررسی کردند. مدل پیشنهادی تلاش می‌کند هدف چندگانه شبکه زنجیره تأمین را با در نظر گرفتن هزینه‌های حمل‌ونقل عمومی و ظرفیت‌های تمام اجزای مختلف موردنظر قرار دهد [Paksoy, Özceylan and Weber, 2010].

آزارن و همکاران (۲۰۰۸) یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن ریسک را معرفی کردند و از روش نیل به آرمان برای به دست آوردن راه‌حل‌های بهینه پارتو استفاده گردید [Azaran et al.2008]. سلیم و همکاران (۲۰۰۸) یک مدل طراحی شبکه توزیع زنجیره تأمین بر اساس راه‌حل مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی تعاملی را مطالعه کردند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای طراحی شبکه توزیع زنجیره تأمین توسعه یافت[Salim and Ozkarahan, 2008]. بدری و همکاران (۲۰۱۷) یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای ارزش‌گذاری طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته معرفی کردند. در اینجا، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکهٔ زنجیره تأمین حلقه بسته مبتنی بر ارزش توسعه داده می‌شود[Badri, Ghomi, Hejazi, 2017]. رویمین و همکاران (۲۰۱٦) طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته زیست‌محیطی استوار تحت عدم قطعیت را معرفی کردند. یک مدل یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس تحت عنوان زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن اثرات محیطی موردمطالعه قرارگرفته است[Ruimin et al. 2016]. فام و ینردی (۲۰۱۷) طراحی شبکه زنجیره تأمین بهینه با شبکه فرایند و لیست مواد اولیه تحت عدم قطعیت را مطالعه کردند. هدف این تحقیق، پیشنهاد یک رویکرد جایگزین برای شکل دادن به مسئله طراحی شبکه تولیدی است[Pham and Yenradee,2017]. جیندال و همکاران (۲۰۱۵) طراحی شبکه و بهینه‌سازی یک زنجیره تأمین توانمند شده حلقه بسته چند محصولی، چند زمانه و چند سطحی تحت عدم قطعیت را مطالعه کردند. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فازی برای تعیین بهینگی مکان‌یابی و تخصیص قطعات و محصولات در هر کارخانه، تعداد محصولاتی که باید بازتولید شوند، تعداد قطعاتی که باید از منابع خارجی خریداری شوند و سطح موجودی که باید از هر محصول و قطعه نگهداری شود تا سود کل سازمان بیشینه شود ارائه‌شده است[Jindal, Sangwan and Saxena, 2015]. پاکسوی و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که شامل جریان‌های جلو و عقب با چند دوره و چند بخش است را معرفی کردند. مدل پیشنهادی ارزش بهینه مقادیر حمل‌ونقل محصولات تولیدشده و جداشده را در یک زنجیره تأمین حلقه بسته

درحالی‌که مکان کارخانه‌های و خرده‌فروشان را تعیین می‌کند، ضمانت می‌کند[Özceylan and Paksoy, 2013].

حسینی ناجیانی و بهشتی‌نیا(۲۰۱۸) برنامه‌ریزی زنجیره تامین با استفاده از یک سیستم حمل و نقل متشکل از مسائل مربوط به مسیریابی خودرو و روش های کراس داکینگ برای انتقال مواد اولیه و قطعات را بررسی کردند. زنجیره تامین شامل تامین کنندگان در نواحی جغرافیایی مختلف و چند وسیله نقلیه مشترک با سرعت‌ها و ظرفیت‌های مختلف برای انتقال سفارشات از تامین کنندگان به تولید کننده است. [Najiani and Beheshtinia, 2017]. بهشتینیا و قاسمی(۲۰۱۷) یک مدل چندهدفه یکپارچه شده برای بهینه‌سازی زمانبندی زنجیره تامین در یک سیستم تولید چندبخشه رائه دادند. این مقاله شامل مسائل زمانبندی حمل‌ونقل و یکپارچه‌سازی تامین‌کننده از نظر تعیین مسیر مسیریابی برای حمل و نقل مواد خام از تامین کنندگان به مراکز تولیدی است. هدف کاهش تمام سفارشات اختصاص داده شده به تامین‌کنندگان و همچنین به طور همزمان کاهش فاصله کل وسایل نقلیه است. [Beheshtinia and Ghasemi, 2017].

بهشتینیا و قاسمی(۲۰۱۷) مسئله زمانبندی زنجیره تامین و مسیریابی در یک سیستم تولید چند بخشه (مطالعه موردی: شرکت تولید دارو) را ارائه دادند. با توجه به سیستم حمل و نقل مشترک در زمانبندی تولید یک تولید کننده چندبخشه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در سیستم تولید چندبخشه، محصولات نهایی توسط مراکز تولید چندگانه در مناطق مختلف جغرافیایی تولید می شود. در این مقاله ، مسائل زمانبندی حمل-ونقل و تولید به صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند. این ادغام در تصمیم گیری پیچیدگی مشکل را افزایش می دهد، اما نتایج بهتری را تولید می‌کند. [Beheshtinia and Ghasemi, 2017]. برومند و بهشتینیا(۲۰۱۸) یک الگوریتم ژنتیک توسعه یافته برای حل مسائل زمانبندی زنجیره تامین چندهدفه ارائه دادند. هدف از این مقاله ارائه یک رویکرد تصمیم گیری یکپارچه برای مسائل زمانبندی تولید و حمل‌ونقل ادغام شده در یک زنجیره‌تامین دومرحله‌ای است. تابع هدف: تاخیرات تحویل، هزینه تولید، انتشار توسط تامین‌کنندگان و وسایل نقلیه را حداقل میکند و همچنین کیفیت تولید را حداکثر می‌کند. [Borumand and Beheshtinia, 2018].

همانطورکه در پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود، مقالات زیادی در رابطه با طراحی زنجیره تامین چندسطحی بدون تمرکز بر بحث مکانیابی کار شده است. به عنوان مثال، ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل یکپارچه برای طراحی استراتژیک زنجیره تأمین طراحی کرده‌اند و روش حل پیشنهادی آن‌ها بر مبنای الگوریتم کلونی زنبورعسل[1] است. در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره‌های تأمین توسعه داده شده است[Zhang, Lee and Zhang, 2016] . تمرکز برخی تحقیق‌ها نیز بر مکانیابی تسهیلات تولیدی و یا تسهیلات توزیعی بوده است. به عنوان مثال حسن‌زاده امین و باکی (۲۰۱۷) یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته[2] با دو هدف را معرفی کردند. هدف اول به حداکثر رساندن زمان تحویل و هدف دوم حداکثر سازی کل سود در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته است. از ویژگی‌های این مقاله عدم‌قطعیت برخی پارامترها مانند تقاضاست. همچنین آن‌ها برای نشان دادن کارا بودن طرح استراتژیک زنجیره تأمین، لزوم ارائه رویه یکپارچه را مطرح نمودند. این مدل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه تحت تقاضای نامطلوب بوده، یک راه‌حل بر اساس برنامه‌ریزی فازی برای حل مسائل بهینه‌سازی توسعه‌یافته است [Hasanzadeh-Amin and Baki, 2017].. اما در این پژوهش، زنجیره تامین چندسطحی طراحی شد که مکانیابی تسهیلات تولیدی و توزیعی را به صورت همزمان با کمینه‌سازی کلیه هزینه های مربوطه، درنظر میگیرد. در واقع ارائه یک مدل ریاضی که به‌صورت هم‌زمان طراحی زنجیره تأمین چند سطحی و مسئله مکان‌یابی تسهیلات را در نظر بگیرد، کمتر موردتوجه بوده است و تحقیق در این

زمینه می‌تواند پوشش مناسبی بر بخشی از شکاف موجود در تحقیقات این بخش باشد.

۳. بیان مسئله و ارائه مدل

مدل ریاضی طراحی‌شده برای بیان مسئله مدیریت زنجیره تأمین چند سطحی و مکان‌یابی تسهیلات تولیدی و توزیعی در این بخش تشریح می‌شود. در این مسئله تسهیلات تولیدی، طیف وسیعی از محصولات را تولید خواهند کرد. به دلیل گستردگی بازار مصرف محصولات تولیدی، به‌منظور کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، تسهیلات تولیدی به‌صورت توزیع‌شده، مستقر خواهند شد. هدف اصلی مسئله انتخاب تعدادی از سایت‌های بالقوه (کاندیدا) برای احداث تسهیلات تولیدی است. علاوه بر این باید مشخص شود که در هر تسهیل تولیدی، چه قطعاتی تولید می‌شوند و مواد اولیه از کدام تأمین‌کنندگان، تأمین می‌گردد. تصمیم‌گیری‌ها در زنجیره باید به نحوی انجام شود که مجموع هزینه‌های کل سیستم شامل هزینه‌های تولید محصولات، هزینه‌های تهیه مواد خام و انتقال درونی[۵] مواد خام به تسهیلات تولیدی، هزینه توزیع خارجی[۶] محصولات به بازارها، هزینه استقرار تسهیلات تولیدی در سایت‌های فعال و مراکز توزیع کمینه گردد. حل همزمان این موارد در زنجیره تامین چندسطحی که مکانیابی در آن هم برای تسهیلات تولیدی و هم تسهیلات توزیعی در نظر گرفته شده است، باعث کاهش در زمان، هزینه، و همچنین بالا رفتن کیفیت تحویل محصول به مشتری می‌شود. در واقع مدل ارائه شده برای صنایعی همچون خودروسازی امکان پیاده سازی را دارد و می‌تواند باعث کاهش هزینه های شرکت در بلندمدت و کوتاه مدت شود و ارائه خدمات نیز باکیفت بالاتری صورت گیرد.

a. مفروضات تحقیق

طراحی هر مدل ریاضـــی و مدل کردن رفتار طبیعی هر سیستم، نیازمند یک سری فرض‌های منطقی و مفروضات ساده ساز دیگر است. در اینجا فرضیات لحاظ شده در طراحی مدل این پژوهش تشریح می‌شود.

۱. ظرفیت هر یک از تأمین‌کنندگان، کارخانه‌های فعال و تسهیلات توزیعی فعال مشخص است.
۲. مواد اولیه از تأمین‌کنندگانی تهیه می‌شود که قابلیت طراحی و تولید آن ماده را داشته باشند.
۳. برای کارخانجات و تسهیلات توزیعی فعال، هزینه ثابت و متغیر در نظر گرفته می‌شود.
٤. هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌های فعال، از کارخانه‌ها به مراکز توزیع و از تسهیلات توزیعی فعال به مناطق مشتریان مشخص است.
۵. کارخانه‌ها وظیفه طراحی و تولید محصولات را بر عهده‌دارند.
٦. کران بالا برای تعداد کارخانه‌ها و همچنین بودجه شرکت وجود دارد.
۷. تسهیلات توزیعی وظیفه ارسال محصولات به مناطق مشتریان را بر عهده‌دارند.
۸. کران بالا برای تعداد تسهیلات توزیعی فعال وجود دارد.

با در نظر گرفتن فرضیات فوق، در ادامه ابتدا مجموعه-ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری معرفی می‌شود و درنهایت مدل ریاضی طراحی‌شده ارائه می‌شود.

b. مجموعه‌های مدل ریاضی

در تعریف مدل مجموعه‌هایی به شرح زیر استفاده شده‌اند:

- I: مجموعه محصولات
- J : مجموعه تأمین‌کنندگان
- K : مجموعه تولیدکنندگان
- L : مجموعه مراکز توزیع
- M: مجموعه نمایندگی فروش و یا مشتریان (که از این پس با نام مشتری معرفی می شود)
- R : مجموعه مواد اولیه

c. پارامترهای مدل ریاضی

در طراحی مدل نیازمند تعریف پارامترهای زیر هستیم:

- fit_l کل ظرفیت دریافت محصول توسط توزیع کننده l ام
- fi_k کل ظرفیت تولید، تولیدکننده kام
- α_j احتمال سالم ماندن مواد (سطح سرویس) تامین-کننده j ام
- β_k احتمال سالم ماندن مواد (سطح سرویس) تولیدکننده k ام
- λ_l احتمال سالم ماندن مواد (سطح سرویس) توزیع-کننده l ام
- pd_{il} هزینه تدارکات محصول i برای توزیع‌کننده l
- pp_{ik} هزینه تولید محصول i برای تولیدکننده k ام
- ps_{rj} هزینه خرید مواد اولیه r برای تولیدکننده از تامین‌کننده j ام
- fid_{lm} ماکزیمم میزان تدارکات برای توزیع‌کننده l
- fip_{ik} ماکزیمم ظرفیت تولید محصول i توسط تولیدکننده k
- fis_{rj} ماکزیمم ظرفیت تولید مواد اولیه r توسط تامین‌کننده j
- λo_{ik} ظرفیت تولید، تولیدکننده k برای محصول i
- λt_{rj} ظرفیت تولید، تأمین‌کننده j در تولید مواد اولیه r
- λr_{ri} میزان مصرف مواد اولیه r در تولید یک واحد محصول i
- no_{rj} هزینه مؤثر در طراحی مواد اولیه r توسط تأمین‌کننده j
- nt_{ik} هزینه مؤثر در طراحی محصول i توسط تولیدکننده k
- d_{im} تقاضای محصول i برای مشتریان
- cdz_{ilm} هزینه حمل‌ونقل محصول i از مراکز توزیع l به مشتری m
- cpd_{ikl} هزینه حمل‌ونقل محصول i از تولیدکننده k به مرکز توزیع l
- csp_{rjk} هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه r از تأمین‌کننده j به تولیدکننده k
- fd_{il}هزینه ثابت جهت تحویل محصول i از مرکز توزیع l
- fs_{rj} هزینه ثابت جهت تولید مواد اولیه r در تامین-کننده j
- fp_{ik} هزینه ثابت جهت تولید محصول i در تولیدکننده k
- Go_k هزینه موردنیاز برای احداث کارخانه در مکان کاندیدای تولیدی
- Gt_l هزینه موردنیاز برای احداث مراکز توزیع در مکان کاندیدای توزیعی
- mn_o حداکثر تعداد مجاز برای تأسیس تسهیلات تولیدی در سایت‌های کاندیدا
- mn_t حداکثر تعداد مجاز برای تأسیس مراکز توزیع در سایت‌های کاندیدای توزیعی
- MB سقف بودجه تعیین‌شده برای احداث تأسیسات تولیدی و توزیعی
- E یک عدد خیلی بزرگ

d. متغیرهای تصمیم

برای اکتساب نتایج موردنیاز از یک مدل ریاضی نیازمند تعریف متغیرهای تصمیم هستیم که تصمیمات اتخاذشده در حل مدل را نشان می‌دهند. در ادامه این متغیرها تعریف شده‌اند.

- X_{ik} مقدار محصول تولیدی i در کارخانه k
- Y_{il} مقدار محصول دریافتی i توسط توزیع‌کننده l

- Z_{rj} مقدار مواد اولیه فراهم‌شده r توسط تأمین‌کننده j
- Q_{ikl} مقدار محصول ارسالی i از تولیدکننده k به مرکز توزیع l
- Ro_{rjk} مقدار مواد اولیه ارسالی r از تأمین‌کننده j به تولیدکننده k
- P_{ilm} مقدار محصول ارسالی i از توزیع‌کننده l به مشتری m
- U_{rj} متغیر باینری برای تولید مواد اولیه r در تأمین‌کننده j
- V_{ik} متغیر باینری برای تولید محصول i در تولیدکننده k
- W_{il} متغیر باینری برای ارسال محصول i از توزیع‌کننده l
- T_{ilm} متغیر باینری برای سرویس توزیع‌کننده l برای مشتری m
- C_{ri} متغیر باینری برای استفاده مواد اولیه r در محصول i
- Vo_k متغیر باینری در صورت احداث کارخانه k در سایت کاندیدای تولیدی
- Vt_l متغیر باینری در صورت احداث مرکز توزیع l در سایت کاندیدای توزیعی

e. مدل ریاضی پیشنهادی

فرضیات، اهداف و محدودیت‌های موجود در سیستم توصیف‌شده برای مدیریت زنجیره تأمین و مکان‌یابی تسهیلات مرتبط در مدل ریاضی به شرح زیر طراحی شده است. رابطه (۱) کل هزینه‌ها را در قالب چهار بخش موردمطالعه و بررسی قرار می‌دهد. در بخش اول هزینه‌های بخش تهیه از تأمین‌کنندگان موردبررسی قرار می‌گیرد. هزینه‌هایی مانند هزینه ثابت جهت تهیه مواد اولیه و هزینه‌های متغیر و همچنین هزینه‌های انتقال درون زنجیره به کارخانه‌ها نیز جزو این بخش از هزینه‌ها است. در بخش دوم هزینه‌های بخش تولید در کارخانه‌های فعال موردبررسی قرار می‌گیرد. هزینه‌هایی مانند هزینه ثابت جهت تولید محصولات و هزینه‌های متغیر موردتوجه است. همچنین هزینه‌های انتقال برون‌مرزی به مراکز توزیع فعال نیز جزو این بخش از هزینه‌ها می‌باشند. در بخش سوم هزینه‌های بخش توزیع از مراکز توزیع فعال موردبررسی قرار می‌گیرد. هزینه‌هایی مانند هزینه ثابت برای این مراکز و هزینه‌های متغیر برای ارسال و نگهداری محصولات و هزینه‌های انتقال محصولات پایانی به مناطق مشتریان جزو این بخش از هزینه‌ها است. در بخش چهارم هزینه‌های مربوط به احداث تسهیلات تولیدی و مراکز توزیع در سایت‌های کاندیدای مربوط به تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان موردبررسی قرار می‌گیرد.

در ادامه می‌توان مدل ریاضی MFLP[۷] توسعه داده شده برای شبکه زنجیره تأمین چند سطحی با در نظر گرفتن مکان‌یابی تسهیلات تولیدی و توزیعی را مشاهده کرد.

$$
\begin{aligned}
min\ Z = & \sum_{r}\sum_{j} U_{rj}.\{(no_{rj}/\lambda t_{rj}) + fs_{rj} + (ps_{rj}.Z_{rj}) + \sum_{k} csp_{rjk}.Ro_{rjk}\} + \\
& \sum_{i}\sum_{k} V_{ik}.\{(nt_{ik}/\lambda o_{ik}) + fp_{ik} + (pp_{ik}.X_{ik}) + \sum_{l} cpd_{ikl}.Q_{ikl}\} + \\
& \sum_{i}\sum_{l} W_{il}.\{fd_{il} + (pd_{il}.Y_{il}) + \sum_{m} cdz_{ilm}.P_{ilm}\}
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

$$+\sum_{k} Go_k . Vo_k + \sum_{l} Gt_l . Vt_l$$

s.t.

$$\sum_{l} P_{ilm}.\lambda_l \geq d_{im} \qquad ,\forall i,m \qquad (۲)$$

$$P_{ilm} \leq M.T_{ilm} \qquad ,\forall i,l,m \qquad (۳)$$

$$P_{ilm} \geq T_{ilm} \qquad ,\forall i,l,m \qquad (۴)$$

$$\sum_{m} P_{ilm} = Y_{il} \qquad ,\forall i,l \qquad (۵)$$

$$Y_{il} \leq E.W_{il} \qquad ,\forall i,l \qquad (۶)$$

$$\sum_{k} Q_{ikl} . \beta_k \geq Y_{il} \qquad ,\forall i,l \qquad (۷)$$

$$\sum_{l} Q_{ikl} \leq X_{ik} \qquad ,\forall i,k \qquad (۸)$$

$$X_{ik} \leq E.V_{ik} \qquad ,\forall i,k \qquad (۹)$$

$$\sum_{j} Ro_{rjk} . \alpha_j \geq \lambda r_{ri}.X_{ik} \qquad ,\forall r,i,k \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{k} Ro_{rjk} \leq Z_{rj} \qquad ,\forall r,j \qquad (۱۱)$$

$$Z_{rj} \leq E.U_{rj} \qquad ,\forall r,j \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{k} Ro_{rjk} \leq fis_{rj} \qquad ,\forall r,j \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{l} Q_{ikl} \leq fip_{ik} \qquad ,\forall i,k \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i} P_{ilm} \leq fid_{lm} \qquad ,\forall l, \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{i}\sum_{l} Q_{ikl} \leq fi_k.Vo_k \qquad ,\forall k \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{i} Y_{il} \leq fit_l.Vt_l \qquad ,\forall l \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{k} Vo_k \leq mn_o \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{l} Vt_l \leq mn_t \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{k} Go_k . Vo_k + \sum_{l} Gt_l . Vt_l \leq MB \qquad (۲۰)$$

$$X_{ik}, Y_{il}, Z_{rj}, Q_{ikl}, Ro_{rjk}, P_{ilm} \in \{1,2,3,\dots\}$$
$$U_{rj}, V_{ik}, W_{il}, T_{ilm}, C_{ri}, Vo_k, Vt_l \in \{0,1\}\ ,\ \forall i,k,l,r,j,m \qquad (۲۱)$$

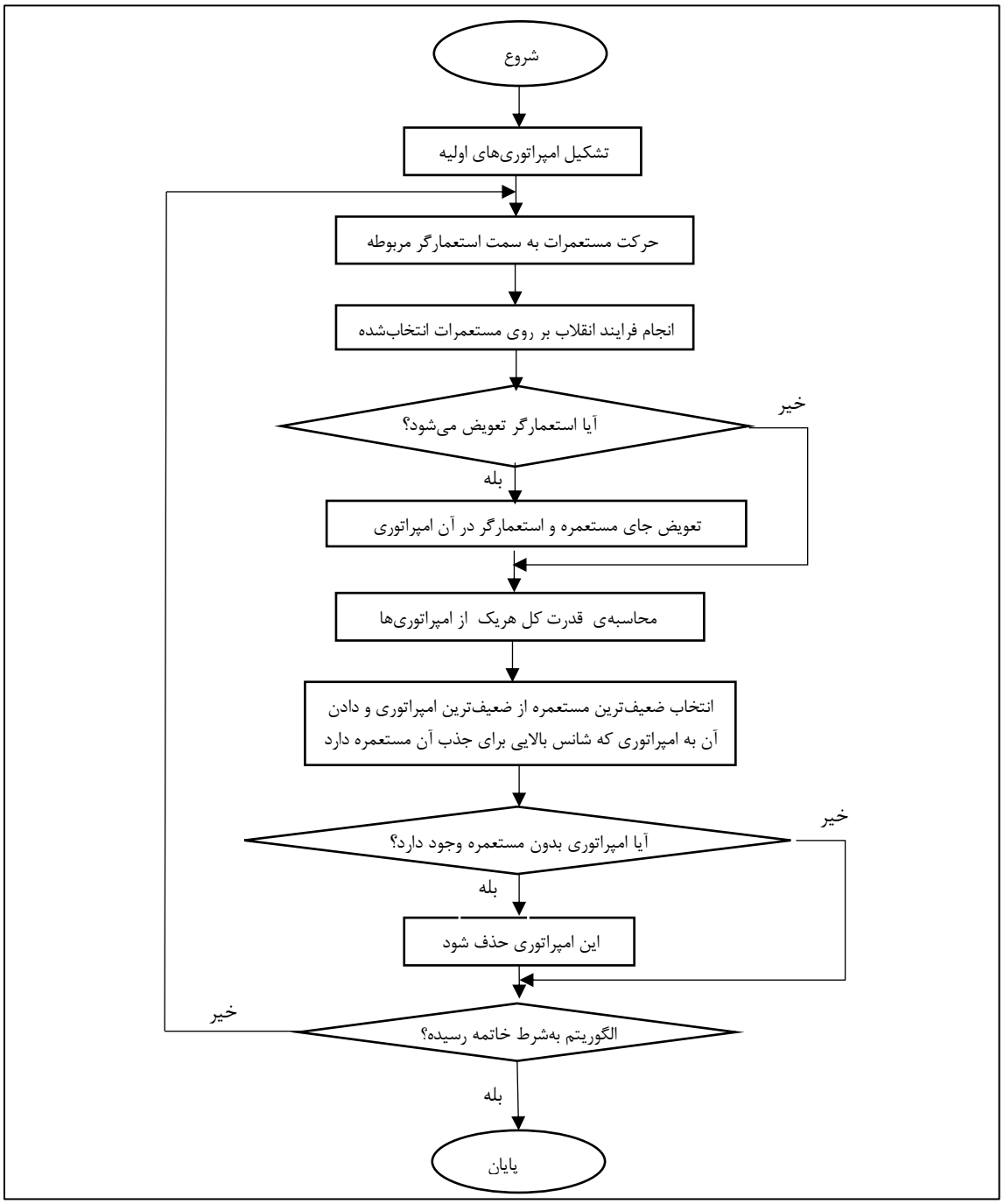
رابطه (۲) تأمین تقا ضای مناطق م شتریان را برآورده می‌کند. در این محدودیت سـعی شـده اسـت تقاضـای مناطق مشـتریان از طریق مراکز توزیع فعال پوشـش داده شـود. روابط (۳) و (٤) ارتباط منطقی بین متغیرهای تصمیم‌گیری باینری و عدد صحیح را برآورده می‌کند. با تو جه بااینکه مدل پیشـنهادی دارای متغیرهای باینری و عدد صـحیح اسـت لذا با این دسـته محدودیت‌ها، ارتباط این دو گونه متغیرها برآورده می‌شـود. رابطه (۵) و (٦) میزان محصـولات ارسـالی در مراکز توزیع را محاسـبه می‌کند و متغیر باینری متناسـب با این متغیر را مقدار می‌دهد. محدودیت (۷) مقدار محصـول ارسـالی از هر یک از تسـهیلات تولیدی به مراکز توزیعی را محاسـبه می‌کند. محدودیت (۸) و (۹) میزان محصـولات تولیدی در تسـهیلات تولیدی را محاسـبه می‌کند و متغیر باینری متناسـب با این متغیر را مقدار می‌دهد. مشـابه محدودیت‌های (۵) و (٦) با توجه به اینکه مدل پیشـنهادی دارای متغیرهای باینری و عدد صـحیح ا ست لذا با این د سته محدودیت‌ها ارتباط این دو گونه متغیرها برآورده خواهد شـد. محدودیت (۱۰) میزان مواد اولیه موردنیاز تولیدی محصـولات را توسـط تأمین‌کنندگان محاسـبه می‌کند. م حدود یت (۱۱) و (۱۲) میزان مواد اول یه تول یدی توسـط تأمین‌کنندگان را محا سبه می‌کند و می‌تواند به کمک آن‌ها تعیین نمود که هر یک از تأمین‌کنندگان چه ماده‌ای را به چه اندازه طراحی و تولید می‌کنند و متغیر باینری متناسـب با این متغیر را م قدار می‌د هد. م حدود یت های (۱۳) الی (۱۵) م حدود یت متناسـب با ظرفیت تأمین‌کنندگان، تسـهیلات تولیدی و مراکز توزیع اسـت. در این مدل فرض شـده که هر یک از تسـهیلات تولیدی و توزیعی دارای ظرفیت می‌باشـند لذا باید در تولید و ارسـال محصـولات این فاکتور لحاظ گردد. به عنوان نمونه محدودیت ١٤ نشـان می‌دهد که مقدار محصـول ارسـالی i از تولیدکننده k به توزیع‌کننده l باید کمتر یا مسـاوی با بیشـترین ظرفیت تولید محصـول i توسـط تولیدکننده k باشـد. محدود یت های (١٦) و (۱۷) م حدود یت متناظر با تأسـیس تسـهیلات تولیدی و مراکز توزیع با توجه به ظرفیت کل آن‌ها ا ست. محدودیت (۱۸) و (۱۹) از یک نوع هستند و در این دو محدودیت سعی شده ا ست کران بالایی برای تعداد تسهیلات تأسیس شده در نظر گرفته شود یعنی از قبل مشخص ا ست که حداکثر تعداد کارخانه ها و مراکز توزیع فعال چه تعدادی می‌تواند باشد. محدودیت (۲۰) حداکثر بودجه و سقف را برای تأ سیس ت سهیلات (هم تولیدی و هم توزیعی) در نظر می‌گیرد؛ یعنی شرکت بودجه مشخصی را برای احداث تسهیلات در نظر گرفته اسـت که نباید هزینه این دو بخش از سـقف تعیین‌شـده بیشتر شود. شروطی که در روابط (۲۱) بیان‌شده‌اند نیز محدوده متغیرهای تصمیم‌گیری را مشخص کرده‌اند.

f. روش‌های حل مسئله

برای حل مدل ارائه‌شـده در این پژوهش، علاوه بر اسـتفاده از روش های دقیق به علت پیچیدگی مسـئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری اسـتفاده شـده اسـت تا بتوان در زمان معقول به ن تایج پذیرفتنی دسـت پ یدا کرد. در ادا مه این الگوریتم‌ها تشریح شده‌اند.

i. الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت اسـتعماری از یک پدیده اجتماعی – انسـانی الـهام گرفـته اسـت، مانـند الگوریتم های تـکاملی دیگر، با مجموعه‌ای به نام جمعیت اولیه تصادفی که هرکدام از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به‌عنوان اسـتعمارگر انتخاب می‌شـوند. باقیمانده‌ی جمع یت نیز به‌عنوان مسـتعمره در نظر گرف ته می‌شـو ند. ا ستعمارگران ب سته به قدرت شان، م ستعمرات را به سمت خود می‌کشـند. قـدرت کـل هر امپراتوری بـه هر دو بخش تشـکیل‌دهنده‌ی آن یعنی کشـور اسـتعمارگر (به‌عنوان هسـته‌ی مرکزی) و مسـتعمرات آن بسـتگی دارد. پایه‌های اصـلی این الگوریتم سـیاسـت جذب و انقلاب اسـت [Atashpaz-Gargari,2008].



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری[Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007]

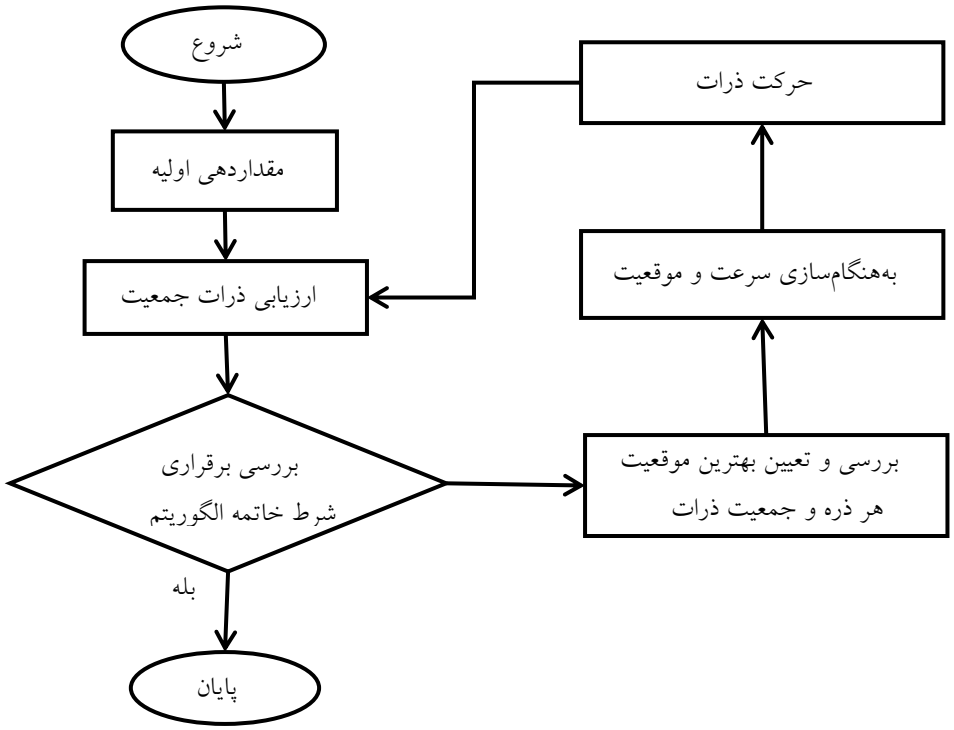
الگوریتم رقابت استعماری ارائه‌شده دو شرط توقف را داراست. اول اینکه الگوریتم هنگامی متوقف می‌شود که همه‌ی امپراتوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراتوری باقی بماند و بقیه‌ی کشورها تحت کنترل این امپراتوری واحد قرار بگیرند و دوم اینکه تعداد تکرارهای الگوریتم به مقدار مشخصی برسد. در صورت رخ دادن هر یک از این دو شرط، الگوریتم خاتمه یافته و مقدار تابع هدف بهترین استعمارگر گزارش می‌شود. در شکل ۱ می‌توان فلوچارت فرآیند الگوریتم رقابت استعماری را مشاهده کرد.

ii. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در سـال ۱۹۹۵ کندی و ابرا هارت[۸]برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سـازی ازدحام ذرات را به‌عنوان یک روش جسـتجوی غیرقطعی برای بهینه‌سـازی تابعی مطرح کردند، این الگوریتم از حرکت دسـته‌جمعی پرندگانی که به دنبال غذا می‌باشـند الهام گرفته شده است. روش بهینه سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم جستجوی سراسری با تابع هدف کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان مسـائلی را که جواب آن‌ها یک نقطه یا سـطح در فضـای n بعدی اسـت، از روی رفتار ذرات مدل‌سـازی نمود[Carvalho and et al.2006]. الگوریتم بهینه‌سـازی ازدحام ذرات یک الگوریتم جسـتجوی اجتماعی اسـت که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. در ابتدا این الگوریتم به‌منظور کشـف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها و تغییر شکل بهینه‌ی دسته بکار گرفته شـد. در این الگوریتم، ذرات در فضـای جسـتجو جاری می‌شـوند؛ تغییر مکان ذرات در فضـای جسـتجو تحت تأثیر تجربه و دانش خود شان و هم سایگان شان است؛ بنابراین موقعیت دیگر توده ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می گذارد. نتیجه‌ی مدل‌سـازی این رفتار اجتماعی فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دسـت‌آمده به سـمت بهترین همسـایگان خود می‌روند اسـاس کار الگوریتم بهینه‌سـازی ازدحام ذرات بر این اصـل اسـتوار اسـت که در هرلحظه هر ذره مکان خود را در فضـای جسـتجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسـایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند [Ahmadi and et al. 2010] و [Ahmadi and et al. 2012]. در شـکل **۲** می‌توان فلوچارت فرآیند الگوریتم بهینه‌سـازی ازدحام ذرات را مشاهده کرد.

۹. یافته‌های پژوهش

در این مرحله به بررسی عددی مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود و برای مسائل نمونه مختلف، نتایج حاصل از حل دقیق و حل فراابتکاری مدل ارائه شده گزارش خواهد شد. بدین منظور ابتدا ۳۰ مسئله نمونه در سطوح مختلف طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار گمز[۹] حل دقیق آن ها انجام شـده و جواب بهینه سراسری به دست می‌آید؛ طبیعتاً به علت ذات پیچیده مسئله، تمام مسـائل نمونه در زمان معقول با حل دقیق به جواب بهینه سراسری نمی‌رسند و برای نمونه‌های بزرگ تااندازه‌ای می‌توان به جواب بهینه نزدیک شد. سپس هر مسئله به‌وسیله الگوریتم های فراابتکاری رقابت اسـتعماری و ازدحام ذرات نیز حل می شـوند و جواب‌های حاصـل از روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه خواهند شد.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [El-Ghazali, 2009]

a. ایجاد مسائل نمونه

برای آزمودن مدل طراحی‌شده در تحقیق نیازمند مسائل نمونه هستیم؛ همان‌طور که اشاره شد ۳۰ مسئله نمونه در ابعاد مختلف طراحی شده است که برای آزمودن مدل و حل آن با روش دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری از آن‌ها استفاده می‌شود.

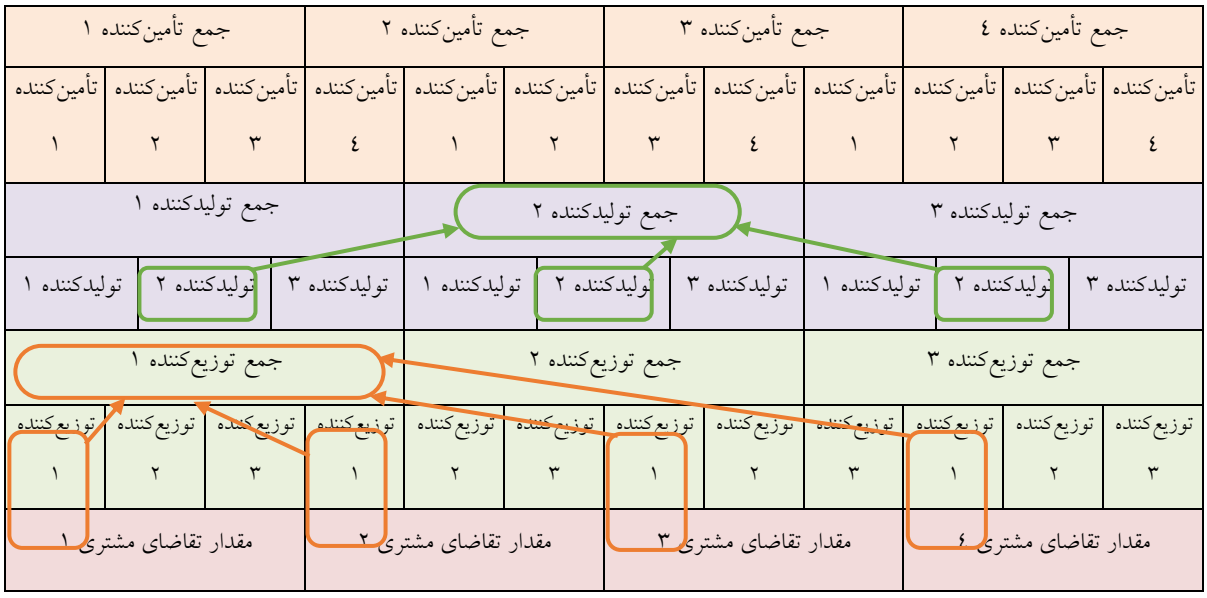
برای طراحی این مسائل از شیوه تولید تصادفی مقادیر پارامترها استفاده می‌شود و با استفاده از شرایط روابط یادشده در جدول ۱ انواع مسائل نمونه در سطوح مختلف طراحی شده است.

b. نمایش جواب

برای برقراری ارتباط با هر الگوریتم فراابتکاری باید نمایش جواب مناسبی که با ماهیت مسئله تناسب دارد در نظر گرفته شود که این فرایند اصطلاحاً رمزگذاری نامیده می‌شود. در طی این فرایند متغیرهای مسئله و رشته پاسخ‌ها با زبانی قابل‌فهم به الگوریتم ارائه می‌شود و تمام مراحل الگوریتم بر اساس این رمزگذاری پیش خواهد رفت. نمایش جواب بر روی اندازه فضای جستجو تأثیرگذار بوده و رمزگشایی نیز جزئی از آن محسوب می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر می‌توان عنوان کرد که رمزگذاری پل ارتباطی بین محیط مسئله و محیط الگوریتم است. در این پژوهش یک زنجیره تأمین چهار سطحی وجود دارد. برای کدگذاری این مجموعه، ماتریسی چندبعدی در نظر خواهیم گرفت که هر بعد آن متناظر با یکی از سطوح فوق است. برای نمونه یک ماتریس دوبعدی با چهار سطر می‌تواند این سطوح را نشان دهد. هر سطح باید به تعداد عناصر آن سطح دارایه داشته باشد که میزان تقاضای آن عناصر را در نظر بگیرد و مجموع این تقاضاها باید به سطح بالاتر انتقال یابد. این فرایند کدگذاری تأمین تقاضای مشتریان که نکته اساسی در مدل موردنظر است را ارضا می‌کند. در این فرایند همچنین بایستی به ظرفیت هر یک از عناصر سطوح توجه گردد تا محدودیت‌های مربوط به سطح ظرفیت عناصر سطح‌های مختلف نیز رعایت شوند. همچنین در هر سطح بسته به تعداد محصولات موردنظر می‌توان ظرفیت های متفاوت در نظر گرفت. به عبارت بهتر ماتریس یادشده می‌تواند به تعداد محصولات تکرار شود زیرا هر محصول تقاضا و ظرفیت سطوح متفاوتی دارند. در سطح تأمین‌کننده نیز ازآنجاکه یک محصول می‌تواند از چندین ماده اولیه تشکیل شود یک زیرماتریس چندسطری خواهیم داشت.

جدول ۱. شرایط در نظر گرفته‌شده برای طراحی مسائل نمونه

نماد	مفهوم	نحوه تولید مقادیر پارامترها در مسئله نمونه
fi_k	کل ظرفیت تولید تولیدکننده	توزیع یکنواخت بین ۲۰۰ تا ۶۰۰
pd_{il}	هزینه تدارکات برای توزیع‌کننده	توزیع یکنواخت بین ۱۰۰ تا ۵۰۰
pp_{ik}	هزینه تولید محصول برای تولیدکننده	توزیع یکنواخت بین ۲۰۰ تا ۳۰۰
fid_{lm}	ماکزیمم میزان تدارکات برای توزیع‌کننده	توزیع یکنواخت بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ ضربدر ۸۰
fip_{ik}	ماکزیمم ظرفیت تولید محصول برای تولیدکننده	توزیع یکنواخت بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ضربدر ۲۵۰
fis_{rj}	ماکزیمم ظرفیت تولید ماده اولیه در تأمین‌کننده	توزیع یکنواخت بین ۳۰۰ تا ۵۰۰
ps_{rj}	هزینه خرید ماده اولیه برای تولید کننده از تأمین‌کننده	توزیع یکنواخت بین ۱۰۰ تا ۲۰۰
λo_{ik}	ظرفیت تولید تولیدکننده k در محصول i	توزیع یکنواخت بین ۱۰ تا ۲۰
λt_{rj}	ظرفیت تولید تأمین‌کننده j در تولید ماده اولیه r	توزیع یکنواخت بین ۵ تا ۱۰
λr_{ri}	میزان مصرف ماده اولیه در تولید یک واحد محصول	توزیع یکنواخت بین ۵ تا ۱۰
no_{rj}	هزینه مؤثر در طراحی ماده اولیه	توزیع یکنواخت بین ۳ تا ۸
nt_{ik}	هزینه مؤثر در طراحی محصول	توزیع یکنواخت بین ۱۰ تا ۱۰۰
d_{im}	تقاضا محصولات برای مشتریان	توزیع یکنواخت بین ۱۰ تا ۵۰
cdz_{ilm}	هزینه حمل‌ونقل از مراکز توزیع به مشتری‌ها	توزیع یکنواخت بین ۱۰ تا ۲۰
cpd_{ikl}	هزینه حمل‌ونقل محصول از تولیدکننده به مراکز توزیع	توزیع یکنواخت بین ۵ تا ۱۵
csp_{rjk}	هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده با تولیدکننده	توزیع یکنواخت بین ۱ تا ۱۰
fd_{il}	هزینه راه‌اندازی جهت تحویل محصول i از مرکز توزیع l	توزیع یکنواخت بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰
fs_{rj}	هزینه راه‌اندازی جهت تولید ماده اولیه r در تأمین‌کننده j	توزیع یکنواخت بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰
fp_{ik}	هزینه راه‌اندازی جهت تولید محصول i در تولیدکننده k	توزیع یکنواخت بین ۸۰۰ تا ۲۱۰۰



شکل ۳. نمایش جواب برای مسئله نمونه

تمام موارد گفته‌شده برای هر مسئله نمونه بسته به مقادیر پارامترها متفاوت است و ممکن است تعداد ماتریس‌های پاسخ و یا درایه‌های آن در مسائل مختلف، بسیار متفاوت باشند. در شکل ۳ نمونه‌ای از این نمایش جواب مشاهده می شود. برای تشریح این شکل، باید توجه داشت که این ماتریس در اصل ٤ سطح زنجیره تأمین طراحی‌شده را نمایش می‌دهد. در هر سطح، تقاضا برای تمام اجزای موجود (مثلاً ٤ مشتری) به سطح بالاتر برای ارضا انتقال داده می‌شود. به زبان ساده‌تر ٤ مشتری موجود در سیستم دارای تقاضای مشخص هستند لذا این تقاضا باید توسط ۳ توزیع‌کننده برآورده شود. از طرفی هر توزیع‌کننده با توجه میزان تقاضایی که از مشتریان متقبل شده است خود به مقدار مشخصی برای سطح بالاتر یعنی تولیدکنندگان ایجاد تقاضا می‌کند که در ماتریس نشان داده شده است و این روال تا بالاترین سطح ادامه دارد و برای تأمین هر محصول و به‌تبع آن هر ماده اولیه این اتفاق تکرار می‌شود.

با استفاده از این رمزگذاری، متغیرهای تصمیم مربوط به تأمین تقاضاها در سطوح مختلف و متغیرهای باینری متناظر آن‌ها و متغیرهای باینری تأسیس تسهیلات تعیین مقدار می‌شوند. با مشاهده ماتریس نمایش جواب می‌توان به‌خوبی مکانیزم فشار تقاضا از سطوح پایین به سطوح بالاتر شبکه زنجیره تأمین را مشاهده کرد.

c. تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها

هر الگوریتم فرااابتکاری دارای پارامترهای مشخصی است که برای اجرا باید این پارامترها از پیش مشخص شوند؛ الگوریتم تنظیم پارامتر استفاده‌شده در این تحقیق روش سعی و خطا[۷] است که با محاسبات سرانگشتی به جستجوی مقادیر بهتری برای پارامترهای الگوریتم‌های استفاده‌شده می‌پردازد. این الگوریتم یک روش ابتکاری است که کاملاً منطبق بر شرایط مسئله و متناسب با ماهیت کار طراحی می‌شود. روش استفاده‌شده بر اساس ماهیت ابتکاری خود در محدوده جستجو بهترین مقادیر را انتخاب می‌کند و گام بعدی را بر اساس آن برخواهد داشت. برای تنظیم این پارامترها فرآیند زیر به کار گرفته شده است که به شرح آن خواهیم پرداخت [Mahdavi and Ahmadi-zar, 2017] و [Eiben and Smit,2011]

گام اول: تعیین مقادیر اولیه برای پارامترهای الگوریتم

گام دوم: به‌صورت تصادفی و به ترتیب، یکی از پارامترها انتخاب می‌شود و مقادیر مختلفی برای آن در نظر گرفته می شود. سپس به ازای هر مقدار پارامتر انتخاب شده، الگوریتم ۱۰ بار اجراشده و میانگین تابع هدف به دست می‌آید.

گام سوم: مقدار پارامتر انتخاب‌شده برای بهترین جواب تابع هدفی که در گام دوم به‌دست‌آمده، مقدار مناسب برای پارامتر مذکور است و جایگزین مقدار قبلی می‌شود.

گام چهارم: گام‌های دوم و سوم را برای پارامترهایی که هنوز تنظیم نشده‌اند، تکرار می‌کنیم.

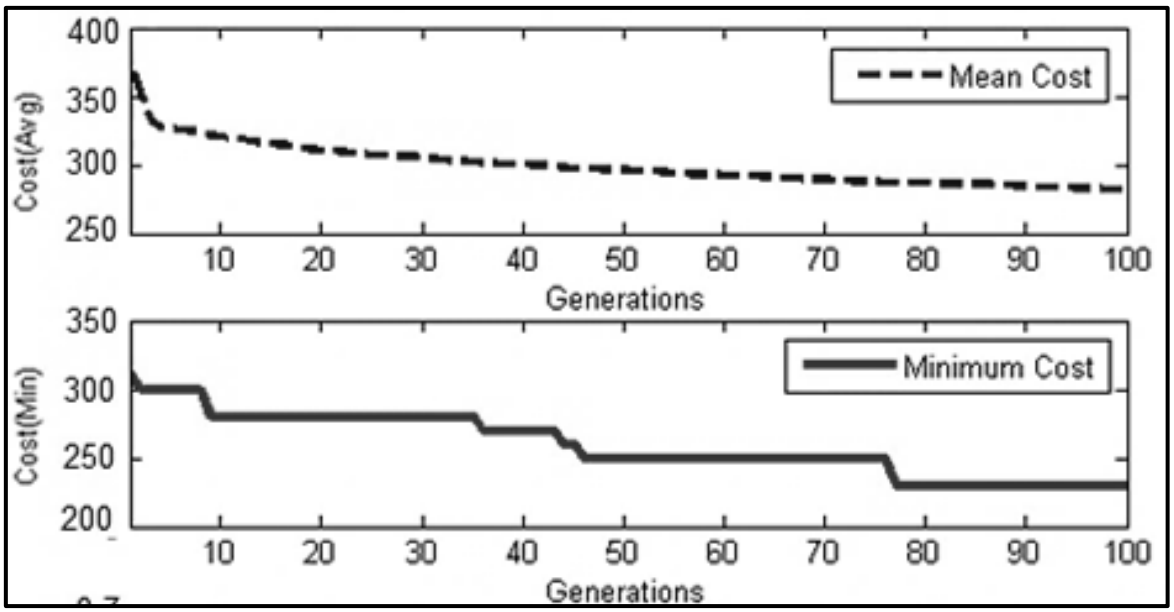
برای هر یک از الگوریتم‌های استفاده‌شده در حل مسائل نمونه و به تفکیک ابعاد مسائل، فرآیند تنظیم پارامتر را انجام شده است. نتایج حاصل برای مقدار پارامترهای الگوریتم‌های رقابت استعماری و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را در جداول ۲ و ۳ می توان مشاهده کرد.

جدول ۲. تنظیم پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری- مسائل کوچک

پارامتر	مسائل کوچک	مسائل متوسط و بزرگ
تعداد کشورهای اولیه	۱۰۰	۱۲۰
تعداد نسل	۷۵	۹۰
نرخ انقلاب	۰/۳	۰/٤
تعداد امپراتوری‌های اولیه	٤	۵

جدول ۳. تنظیم پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات- مسائل کوچک

پارامتر	مسائل کوچک	مسائل متوسط و بزرگ
تعداد ذرات اولیه	۱۰۰	۱۲۰
تعداد تکرار	۸۰	۱۰۰
ضریب ثابت آموزش c_1	۲	۲/۱
ضریب ثابت آموزش c_2	۲	۱/۹
ضریب وزنی اینرسی w	۰/۷	۰/۸

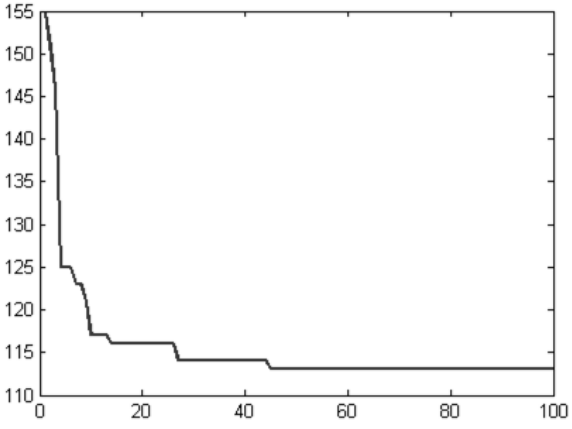


شکل ٤. همگرایی الگوریتم رقابت استعماری برای یکی از مسائل نمونه

۱-۱- نتیجه همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم رقابت استعماری مانند دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری به یک جواب همگرا می شود. بنا به هر مسئله و برای هر مدلی این همگرایی حالت خاص خود را دارد. در شکل ٤ تصویری از همگرایی الگوریتم رقابت استعماری برای یکی از مسائل نمونه را مشاهده می‌نمایید.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز مانند الگوریتم رقابت استعماری به سمت یک جواب خوب همگرا می‌شود. این همگرایی در قالب کاهش مداوم مقدار تابع هدف مسئله کمینه سازی در تکرارهای متوالی خود را نشان می‌دهد. در این مسئله نیز این اتفاق در قالب کاهش مقدار تابع هدف (یا متغیری که آن را نمایندگی می‌کند مانند شاخص درصد انحراف نسبی) قابل‌ملاحظه است. نتیجه همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات برای یکی از مسائل نمونه در شکل ۵ قابل‌مشاهده است.



شکل ۵. همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای یکی از مسائل نمونه

d. تحلیل نتایج

در این پژوهش حجم مسائل، داده‌ها و اطلاعات بسیار بالاست. از طرفی پیچیدگی و زمان اجرای هر مسئله نیز قابل‌توجه است، به همین علت در این بخش و دیگر بخش‌ها به خلاصه‌سازی نتایج به‌صورت جداول و نمودارها پرداخته و همچنین از معیارهای قابل‌فهم برای مخاطب استفاده شده است.

i. شاخص درصد انحراف نسبی

ازآنجاکه مدل در مسائل نمونه مختلف و در سطوح مختلف حل می‌شود و همچنین هر تکرار چند بار اجرا می‌شود، مقایسه نتایج حاصل چندان قابل‌فهم نخواهد بود؛ بنابراین به‌منظور سهولت مقایسه‌ی نتایج، از شاخصی به نام درصد انحراف نسبی[10] که با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد، استفاده شده است.

$$\sigma_{ij}(\%) = \left(\frac{solution_{ij} - solution_{best}}{solution_{best}}\right) \times 100\% \qquad (۲۲)$$

که در این رابطه $solution_{ij}$ مقدار تابع هدف برای اجرای i ام مسئله j ام است و sol_{best} بهترین مقدار تابع هدف از بین جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم و مدل ریاضی برای همان مسئله است. درواقع، این شاخص جواب را با بهترین جواب به‌دست‌آمده برای آن مسئله مقایسه و اختلاف آن‌ها را به‌صورت درصد اعلام می‌کند. بدیهی است که هرچه مقدار شاخص σ به‌دست‌آمده از جواب‌های یک الگوریتم کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی این است که آن الگوریتم عملکرد مناسبی دارد. ۱۵ مسئله اول در سایز کوچک، ۱۰ مسئله بعدی در سایز متوسط و ۵ مسئله آخر در سایز بزرگ است. نتایج محاسباتی در جدول ٤ بیان‌شده‌اند.

ii. مقایسه آماری نتایج دو الگوریتم

برای ارزیابی اینکه آیا دو الگوریتم فراابتکاری استفاده‌شده دارای عملکرد یکسانی در حل این مدل داشته‌اند یا خیر از آزمون فرض آماری t استفاده می‌شود. این آزمون فرض صفر را به برابری میانگین میزان انحراف جواب‌های حاصل از دو الگوریتم به نسبت بهترین جواب به‌دست‌آمده که در ستون‌های میانگین دو الگوریتم فراابتکاری در جدول ٤ آورده شده تعریف می‌کند. برای این کار از آزمون دوطرفه استفاده شده است.

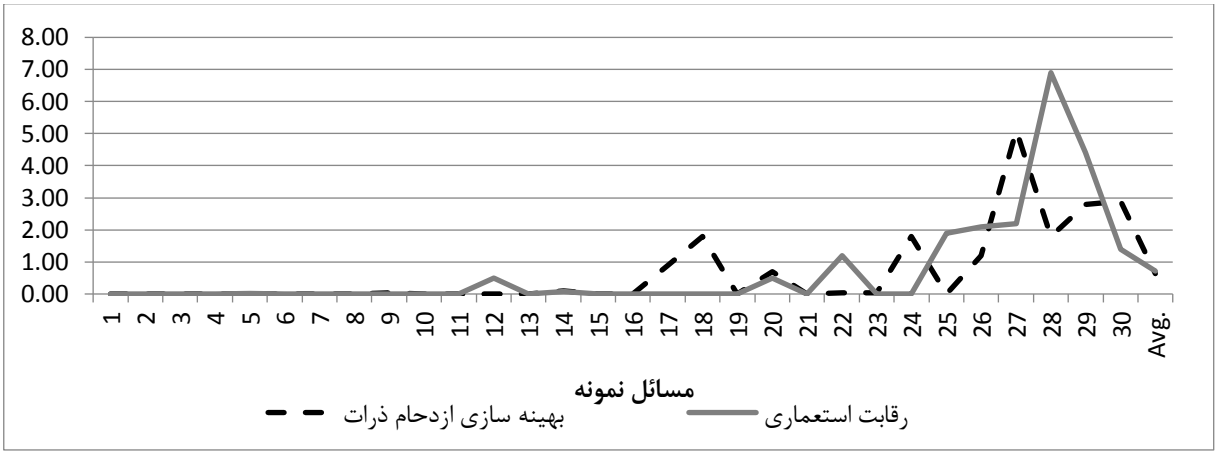
آماره این آزمون به شرح زیر است:

$$T = \frac{\overline{x}_2 - \overline{x}_1}{S_p\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \qquad (۲۳)$$

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \qquad (۲٤)$$

جدول ٤. نتایج محاسباتی (بر حسب درصد طبق رابطه ٢٢)

ردیف	کد مسئله نمونه	مدل ریاضی	الگوریتم رقابت استعماری		الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات			
		کیفیت جواب	کیفیت جواب σ(٪)		کیفیت جواب σ(٪)			
		–	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر
١	S3F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٢	S4F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٣	S5F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٤	S7F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٥	S8F	٠	٠	٠/٠١٢	٠/١٢	٠	٠	٠
٦	S9F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٧	S10F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٨	S14F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٩	S16F	٠	٠	٠	٠	٠	٠/٠٣٣	٠/١٦
١٠	S17F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١١	S18F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١٢	S19F	٠	٠	٠/٥	٠/١٢	٠	٠	٠
١٣	S20F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١٤	S22F	٠	٠	٠/٠٧	٠/١٨	٠	٠/٠٩	٠/١٤
١٥	S26F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١٦	M35F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١٧	M36F	٠	٠	٠	٠	٠	٠/٩	١/٦
١٨	M37F	٠	٠	٠	٠	٠	١/٨	٢/٣
١٩	M38F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٢٠	M39F	٠	٠	٠/٥	١/٥	٠	٠/٧	١/٢
٢١	M40F	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
٢٢	M44F	١/٥	٢/١	١/٢	٤	٠	٠/٠٤	٠/٨
٢٣	M45F	٠	٠	٠	٠	٠	٠/٠٣	٠/٦
٢٤	M46F	٠	٠	٠	٠	٠/٦	١/٨	٣/٢
٢٥	M48F	٠	٠	١/٩	٢/٥	٠	٠	٠
٢٦	B59F	٠	٠	٢/١	٣/٧	٠	١/٢	٣
٢٧	B61F	٨	٠	٢/٢	٣/٣	٤	٥/١	٦/٢
٢٨	B62F	٣/٢	٤/٥	٦/٩	٧/١	٠	١/٨	٣/٢
٢٩	B63F	٣/٤	٣/٤	٤/٤	٦/٥	٠	٢/٨	٦/٤
٣٠	B72F	١/٧	٠	١/٤	٢	٢/٤	٢/٩	٣/٦



شکل ٦. مقایسه نتایج دو الگوریتم فراابتکاری

اعتبارسنجی		
Param.	**PSO**	**IC**
Xbar	0.639766667	0.706066667
S^2	1.463884392	2.353930761
S	1.209910902	1.534252509
n	30	30
آزمون فرض آماری		
Param.		**Value**
SP^2		43.62961275
SP		6.605271588
T		0.038874828
Alfa		0.05
Degree		58
t(α/2, Degree)		2.001717484
نتیجه آزمون: پذیرش فرض صفر		

شکل ۷. نتایج آزمون فرض آماری

نحوه تصمیم‌گیری به این صورت است که اگر شرایط زیر برقرار باشد فرض صفر رد می‌شود، یعنی دو الگوریتم عملکرد برابر ندارند؛ در غیر این صورت نمی‌توان فرض صفر را رد کرد.

$$\left.\begin{matrix} H0: \mu 1 = \mu 2 \\ H1: \mu 1 \neq \mu 2 \end{matrix}\right\} \rightarrow |T| > T\left(\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2\right) \qquad (۲۵)$$

طبق شکل ٦ بیشترین اختلاف میانگین جواب الگوریتم‌های فراابتکاری با بهترین جواب حاصل مربوط به الگوریتم رقابت ا ستعماری ا ست. به نظر می‌ر سد در م سائل بزرگ‌تر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نتایج بهتری داشته و در مسائل متوسط الگوریتم رقابت استعماری. برای اینکه بدانیم واقعاً آیا عملکرد دو الگوریتم در کل فرایند حل متفاوت بوده است یا نه از آزمون فرض آماری استفاده می‌کنیم.

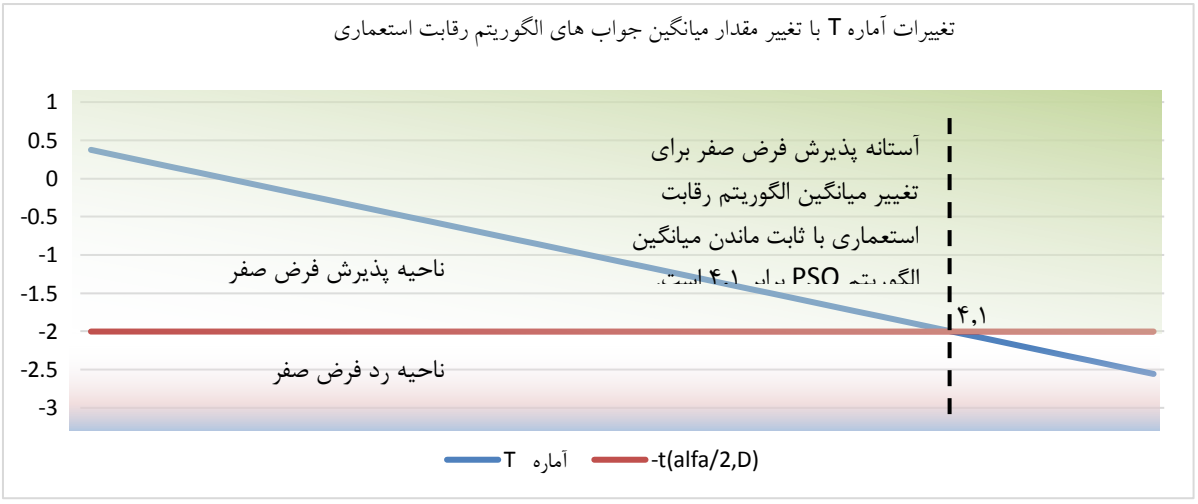
شکل ۷ نشان می‌دهد که ازنظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد میانگین حاصل از میزان انحراف میانگین اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفته‌شده در این تحقیق تفاوت معناداری ندارند و فرض صفر مبنی بر برابری عملکرد این دو الگوریتم (برابری ستون میانگین نتایج انحراف از بهترین جواب) رد نخواهد شد.

iii. تحلیل حساسیت آزمون فرض آماری

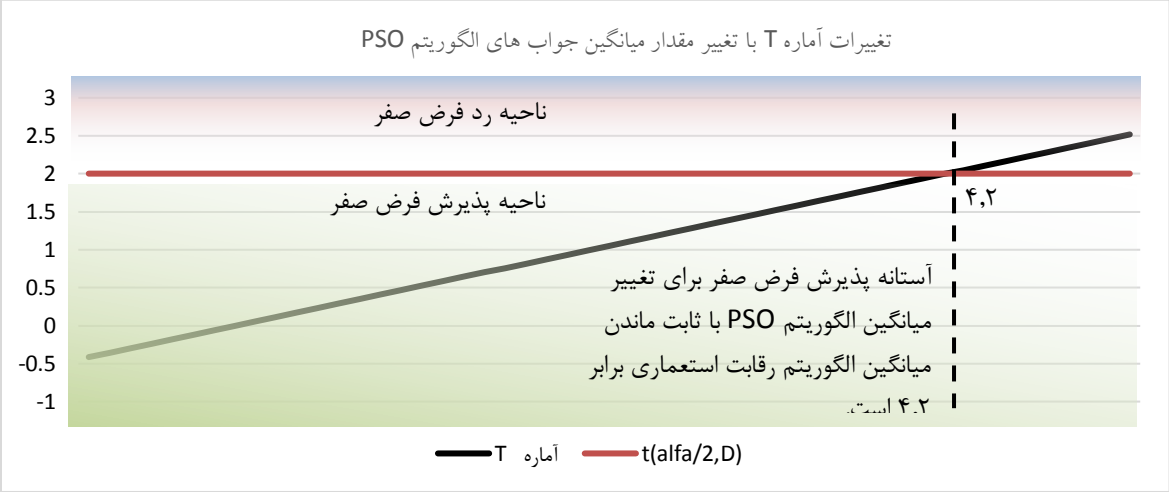
در تحلیل حساسیت آزمون فرض آماری بررسی می‌شود که تفاوت بین میانگین‌های جواب‌های حاصل از دو الگوریتم چه اندازه باشد تا فرض صفر همچنان برقرار بماند. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مقدار میانگین جواب‌های الگوریتم رقابت استعماری در بازه صفرتا پنج تغییر کرده است و بر اساس آن مقدار آماره t نیز تغییر کرده و درزمانی که میانگین الگوریتم رقابت استعماری به ٤/١ رسیده است فرض صفر مبنی بر برابری میانگین جواب‌های دو الگوریتم رد شده است. این تحلیل حساسیت در حالی انجام شده است که فرض بر ثابت ماندن مقدار میانگین جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، مقدار واریانس جواب‌های هر دو الگوریتم و ثابت ماندن تعداد نمونه‌های هر دو روش بوده است. درواقع تمام پارامترهای مؤثر بر مقدار آماره t به‌جز میانگین جواب های الگوریتم استعماری ثابت فرض شده است.

همین کار را برای بررسی میانگین جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام داده می‌شود. مشاهده می‌شود که با ثابت نگه‌داشتن تمام پارامترها و تغییر مقدار میانگین جواب های بهینه‌سازی ازدحام ذرات در جایی که میانگین جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به ٤/٢ برسد وارد ناحیه رد فرض صفر می‌شویم. در شکل ۹ می‌توان این نتیجه را مشاهده نمود.

اکنون اگر اختلاف دو میانگین جواب‌های حاصل از الگوریتم‌ها را (صورت رابطه محاسبه آماره t) با فرض ثابت ماندن دیگر پارامترها به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان تحلیل حساسیت جدیدی را انجام داد. در شکل ۱۰ مشاهده می شود که اختلاف میانگین جواب‌های حاصل از دو الگوریتم اگر مابین ٣/٤- و ٣/٤ شد فرض صفر برقرار است و اگر این اختلاف از حدود یادشده تجاوز نماید وارد ناحیه رد فرض صفر می‌شود.



شکل ۸ تحلیل حساسیت آزمون فرض آماری نسبت به تغییرات نتایج الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۹. تحلیل حساسیت آزمون فرض آماری نسبت به تغییرات نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

شکل ۱۰. تحلیل حساسیت آزمون فرض آماری نسبت به تغییرات اختلاف میانگین جواب دو الگوریتم

۱-۱-۱- تحلیل حساسیت مدل ریاضی

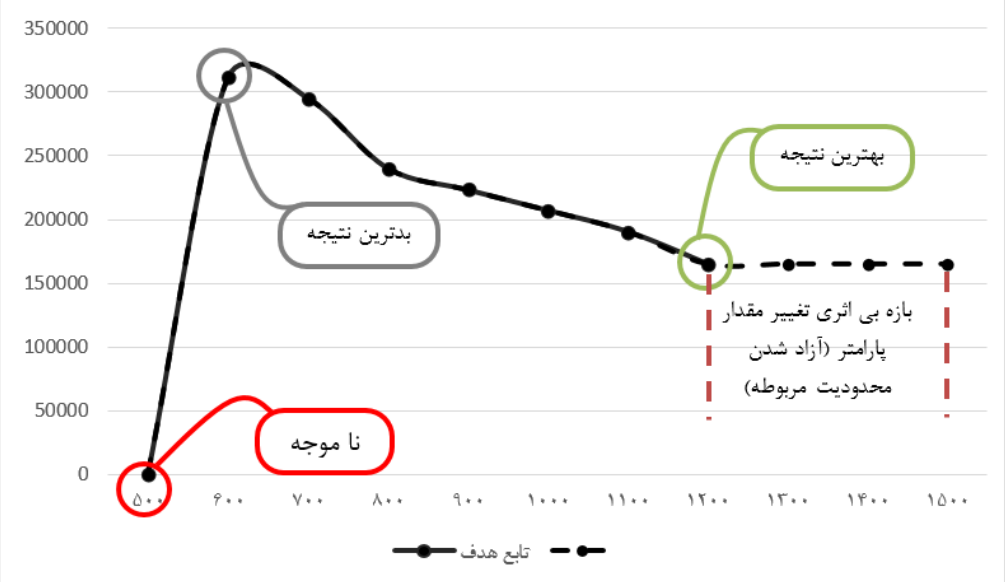
در این بخش تحلیل حساسیت مدل ریاضی برای سنجش اثرگذاری پارامترهای عمومی مسئله بر روی نتایج نهایی انجام می‌شود. با در نظر گرفتن برخی از پارامترهای مدل ریاضی و تغییر آن‌ها می‌توان تأثیر تغییرات بر روی مقدار تابع هدف را بررسی کرد. در اینجا مقدار پارامتر سقف بودجه تعیین‌شده برای احداث تأسیسات تولیدی و توزیعی (MB) برای انجام تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده است. این پارامتر حالت جامع دارد و بر روی تمام مدل برای تمام سطوح و تمام محصولات اثر خواهد گذاشت و نه‌تنها برای یک محصول مشخص. البته می‌توان تحلیل‌های گوناگونی انجام داد ولی با توجه به اهمیت میزان بودجه در تأسیس تسهیلات، بر روی پارامتر MB تمرکز شده است.

نتایج اجرا برای مسئله نمونه S3F ارائه‌شده است. پیش از انجام تحلیل مسئله حل‌شده و سپس با تغییر مقدار پارامتر نتایج دیگر ثبت‌شده است. در حل این مسئله نمونه مقدار اولیه MB برابر با ۱۰۰۰ واحد بوده است و مقدار تابع هدف برای آن مسئله نمونه ۲۰۷۰۳۱ شده است. در ادامه مقدار MB بین مقادیر ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تغییر داده‌شده و مقادیر مربوط به تابع هدف ثبت‌شده‌اند. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با تغییر سقف بودجه در نظر گرفته‌شده

برای احداث تسهیلات، مسئله ممکن است ناموجه شود و همچنین با تغییرات متقابل، از محدوده ناموجه خارج شود. ناموجه بودن در سطح ۵۰۰ برای مقدار پارامتر MB به معنی این است که احداث حداقل یک کارخانه و یک مرکز توزیعی در این مسئله نمونه هزینه‌ای بیشتر از ۵۰۰ واحد دارد. با افزایش این پارامتر در محدودیت (۲۰)، مقدار سمت راست محدودیت بزرگ‌تر می‌شود و درواقع فضای موجه بزرگ‌تر خواهد شد و امکان جستجوی جواب‌های بیشتر و احتمالاً بهتر را ایجاد می‌کند. البته بزرگ‌ترشدن فضای موجه، همواره یا باعث بهبود نتیجه تابع هدف و یا ثابت ماندن آن می‌شود. درواقع این امکان به وجود خواهد آمد که با صرف هزینه بیشتر در تأسیس تسهیلات، هزینه‌های آتی (حمل‌ونقل، تولید و ...) را کاهش دهیم. در ادامه روند کاهش تابع هدف با ریلکس تر شدن محدودیت (۲۰) ادامه می‌یابد تا جایی که مقدار MB آن‌قدر بزرگ می‌شود که مدل می‌تواند حتی همه تسهیلات را احداث نماید و شرایط هزینه‌های آن را بررسی نماید. درواقع محدودیت (۲۰) کاملاً ریلکس می‌شود (آزاد می‌شود) و این به معنی بی‌اثر شدن محدودیت است. از این مرحله به بعد افزایش مقدار MB اثری در بهبود مقدار تابع هدف نخواهد داشت زیرا بهترین مقدار تابع هدف بدون اثر MB پیش‌تر محاسبه‌شده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئله طراحی زنجیره تأمین پیش از احداث و بهره‌برداری به‌طوری که هزینه کل سیستم کمینه گردد موردبرر سی قرار گرفته ا ست. این مدل علاوه بر در نظر گرفتن یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی که جریان تقاضا را از مشتریان تا سطح تأمین‌کنند گان مواد اولیه دنبال می‌کند چگونگی احداث تسهیلات تولیدی و توزیعی به‌نحوی‌که کل هزینه سیستم کمینه شود را مدنظر قرار داده ا ست. این مدل با پوشش شکاف موجود در تحقیقات، علاوه بر مدنظر قراردادن هزینه‌های مر سوم در زنجیره تامین، هزینه‌های تحمیل شده بابت احداث تسهیلات را نیز در نظر گرفته است. درواقع مدل ارائه شده در این پژوهش، این کارایی را دارد که در سطح کلان و برای برنامه‌ریزی‌های ا ستراتژیک در حوزه زنجیره تأمین بکار گرفته شود. همچنین دو الگوریتم فراابتکاری برای حل مسائل سایز بزرگ نیز توسعه داده شده است. طبق نتایج حاصل از حل مسائل در ابعاد مختلف و انجام آزمون آماری متناسب، مشخص شد که عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی ازد حام ذرات و الگوریتم رقابت استعماری در حل مسائل این مدل تفاوت معناداری ندارد.



- **شکل۱۱.نتایج تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامتر MB**

موارد زیر به‌عنوان پیشـــنهادهایی جهت تحقیقات آتی ارائه می‌شود

- اســـتفاده از مفهوم فازی در تعریف پارامتر ها و متغیرهای مســـئله برای پوشـــش منابع دارای عدم قطعیت در مسئله
- اســـتفاده از مفاهیم بهینه‌ســـازی احتمالی برای دقیق‌تر کردن مفهوم احتمالی بودن تقاضا در مسائل واقعی
- در نظر گرفتن امکان تأسیس تأمین‌کنندگان مواد اولیه به‌جای محدود کردن اســـتفاده مدل از تســـهیلات موجود
- استفاده از هاب حمل‌ونقل در بازتعریف مدل ریاضی مسئله
- تفکیک ظرفیت اجزا مختلف شـــبکه برای افزایش دقت مدل

۱۱. پی‌نوشت‌ها

[1] Artificial bee colony algorithm
[2] Close loop supply chain network design
[3] Reference Group Genetic Algoritm
[4] Multiple League Championship Algorithm
[5] Inbound logistics
[6] Outbound logistics
[7] Multi Facility Location Problem
[8] Kennedy & Eberhat
[9] GAMS
[10] Tried and error algorithm

۱۲. منابع

–آتش‌پز گارگاری، ا. (۱۳۸۷) "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، تهران: دانشگاه تهران.

–صفار، م. م.، شکوری گنجوی، ح. و رزمی، ج. (۱۳۹٤) "طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم NSGA II."، نشریه مهندسی صنایع دانشگاه تهران، مقاله ٦، دوره ٤٩، شماره ١، صفحه ٥٥–٦٨.

–عطائی، الف، توکلی مقدم، ر. و عزیزی، ز. (۱۳۹۷) "بهینه سازی سیستم حمل و نقل عمومی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات با بردار ارزیابی – مطالعه موردی در سازمان اتوبوس‌رانی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال نهم شماره ۳، ص. ٤١٣–٤٢٩.

–معماری، پ، پرتوی، م، جولای، ف. و توکلی مقدم، ر. (۱۳۹۷). "توسعه مدل مکان‌یابی– مسیریابی با در نظر گرفتن رضایت مشتری و دریافت و تحویل همزمان". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، در دست چاپ.

–مهدوی، ک. و احمدی زر، ف. (۱۳۹٦) "زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط تک‌هدفه با در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات برای ماشین‌ها و محدودیت‌های پردازش کارها"، سومین کنفرانس مدیریت و مهندسی صنایع.

–Abdolkarimzadeh, L., Azadpour, M., & Zarandi, M. F. (2017) "Two Hybrid Expert System for Diagnosis Air Quality Index (AQI)". In North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference (pp. 315-322). Springer, Cham.

–Ahmadi, A., Fakhri K., and Mohamed S.K. (2010) "Flocking based approach for data clustering", Natural Computing, Vol. 9, No. 3, pp. 767-791.

–Ahmadi, A., Fakhri K., and Mohamed S.K. (2012) "Model order selection for multiple cooperative swarms clustering using stability analysis", Information Sciences, Vol. 182, No. 1, pp. 169-183.

–Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L. & Karaoglan, I. (2009) "A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design", Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, pp. 521–537.

–Hasanzadeh-Amin, S. & Baki, F. (2017) "A facility location model for global closed-loop supply chain network design", Applied

- Carvalho, M., & Teresa B. L. (2006), "An analysis of PSO hybrid algorithms for feed-forward neural networks training", Neural Networks, SBRN'06. Ninth Brazilian Symposium on. IEEE.

- Dominguez, H. & Lashkari, R.S. (2004) "Model for integrating the supply chain of an appliance company: A value of information approach", International Journal of Production Research, Vol. 42, pp. 2113–2140.

- Eiben, A. E., & Smit, S. K. (2011) "Evolutionary Algorithm Parameters and Methods to Tune them", chapter 2, Springer, Berlin, Heidelberg.

- El-Ghazali T. (2009) "Metaheuristics-from Design to Implementation", University of Lille, Wiley publication.

- Gebennini, E., Gamberini, R. & Manzini, R. (2009) "An integrated production-distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization", International Journal of Production Economics, Vol. 122, pp. 286–304.

- Jindal, A., Sangwan, K. S., & Saxena, S. (2015) "Network design and optimization for multi-product, multi-time, multi-echelon closed-loop supply chain under uncertainty", Procedia CIRP, Vol. 29, pp. 656-661.

- Khalili-Damghani, K., Tavana, M., & Amirkhan, M. (2014) "A fuzzy bi-objective mixed-integer programming method for solving supply chain network design problems under ambiguous and vague conditions", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 73, No. (9-12), pp. 1567-1595.

Mathematical Modelling, Vol. 41, pp. 316–330.

- Atashpaz-Gargari E & Lucas C. (2007) "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 4661–4667.

- Azaron, A., Brown, K. N., Tarim, S. A., & Modarres, M. (2008) "A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk", International Journal of Production Economics, Vol. 116, No.1, pp. 129-138.

- Badri, H., Ghomi, S. F., & Hejazi, T. H. (2017) "A two-stage stochastic programming approach for value-based closed-loop supply chain network design", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 105, pp. 1-17.

- Beheshtinia, M. A & Ghasemi, A. (2017) "A multi-objective and integrated model for supply chain scheduling optimization in a multi-site manufacturing system" Engineering optimization, Vol. 50, pp. 1415-1433.

- Beheshtinia, M. A, Ghasemi, A & farokhnia, M. (2017) "Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system (case study: a drug manufacturing company)", Journal of Modelling in Management, Vol. 13, pp. 27-49.

- Borumand, A & Beheshtinia, M. A. (2018) "A developed genetic algorithm for solving the multi-objective supply chain scheduling problem", Kybernetes, Vol. 47, pp. 1401-1419.

environmental performances", Computers & Chemical Engineering, Vol. 35, No.8, pp. 1454-1468.

- Ruimin, M. A., Lifei, Y. A. O., Maozhu, J. I. N., Peiyu, R. E. N., & Zhihan, L. V. (2016) "Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty", Chaos, Solitons & Fractals, Vol. 89, pp. 195-202.

- Sadigh AN, Fallah H, Nahavandi, N (2013), "A multi-objective supply chain model integrated with location of distribution centers and supplier selection decisions", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 69, No. 1, pp. 225–235.

- Safaei, A.S., Husseini, S.M. & Farahani, R.Z. (2010) "Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modeling", International Journal of Production Research, Vol. 48, pp. 4043–4069.

- Selim, H., & Ozkarahan, I. (2008) "A supply chain distribution network design model: an interactive fuzzy goal programming-based solution approach", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 36, No.3-4, pp.401-418.

- Singh, A. R., Jain, R., & Mishra, P. K. (2013) "Capacities-based supply chain network design considering demand uncertainty using two-stage stochastic programming", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 69, No.1-4, pp. 555-562.

- Soleimani, H., & Kannan, G. (2015) "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale

- Melo, M.T., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2005) "Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning", Computers & Operations Research, Vol. 33, pp. 181–208.

- Najian, M. H & Beheshtinia, M. A. (2018). "Supply chain scheduling using a transportation system composed of vehicle routing problem and cross-docking approaches", Transportation Engineering, Vol. 1.

- Osman, H. & Demirli, K. (2010) "A bilinear goal programming model and a modified Benders decomposition algorithm for supply chain reconfiguration and supplier selection", International Journal of Production Economics, Vol. 124, pp. 97–105.

- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013) "A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network", International Journal of Production Research, Vol. 51, No. 3, pp. 718-734.

- Paksoy, T. U. R. A. N., Özceylan, E. R. E. N., & Weber, G. W. (2010) "A multi-objective mixed integer programming model for multi echelon supply chain network design and optimization", Системні дослідження та інформаційні технології.

- Pham, T., & Yenradee, P. (2017) "Optimal supply chain network design with process network and BOM under uncertainties: A case study in toothbrush industry", Computers & Industrial Engineering, Vol. 108, pp. 177-191.

- Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Novais, A. Q. (2011) "Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: economic versus

networks", Applied Mathematical Modelling, Vol. 39, No.14, pp. 3990-4012.
– Zhang, L.L., Lee, C. & Zhang, S. (2016) "An integrated model for strategic supply chain design: Formulation and ABC-based solution approach", Expert Systems with Applications, Vol. 52, No. 15, pp. 39-49.

حمزه امین‌طهما سبی، درجه کار شنا سی در ر شته مهند سی صنایع را در سال ۱۳۸٤ با گرایش تولید صنعتی از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع در گرایش مدیریت تولید و عملیات گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهینه‌سازی چندهدفه، مدیریت زنجیره تامین و مدیریت پروژه می‌باشد. پروژه‌های تحقیقاتی و عملیاتی مختلفی را انجام داده و در حال حا ضر ا ستادیار گروه مهند سی صنایع و رئیس ارتباط با صنعت دانشگاه گیلان است.

سید امین بدری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ با گرایش تولید صنعتی از دانشگاه صنعتی ا صفهان و درجه کار شنا سی ار شد در ر شته مهند سی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحقیق در عملیات کاربردی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید و مدیریت پروژه بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه گیلان و مدیر گروه مهندسی صنایع است.

بهناز رضازاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع-صنایع را در سال ۱۳۹٤از دانشگاه پیام نور ر شت و درجه کار شنا سی ار شد در ر شته مهند سی صنایع-بهینه سازی سیستمها را در سال ۱۳۹۷ ازدانشگاه غیرانتفاعی کوشیار رشت اخذ نموده است. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان مباحث مربوط به مدیریت زنجیره تامین، زنجیره تامین معکوس و استفاده از مسائل بهینه‌سازی در حوزه رشته مهندسی صنایع است.