

# ارائه‌ی مدل دوهدفه مکانیابی - موجودی برای طراحی شبکه لجستیک مستقیم / معکوس یکپارچه

سپیده ملک‌پور کلبادی نژاد<sup>۱</sup>، جعفر باقری نژاد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸ نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

در این مقاله، مدل جدید برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط برای مساله مکانیابی - موجودی مستقیم/ معکوس با ظرفیت محدود ارائه شده است، که تصمیمات استراتژیک را در کنار تصمیمات تاکتیکی بهینه می‌کند. مدل پیشنهادی دوهدفه بوده و هزینه‌های کل را به عنوان تابع هدف اول و کمبود را به عنوان تابع هدف دوم کمینه می‌کند. با حل یک مثال عددی، برتری مدل یکپارچه بر مدل غیریکپارچه اثبات شده است و تحلیل حساسیت نیز جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی انجام شده است. با توجه به ماهیت NP-hard<sup>۳</sup> مساله و وجود دو تابع هدف که در تضاد با یکدیگر هستند، دو الگوریتم فراابتکاری به نام‌های الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم<sup>۴</sup> و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم<sup>۵</sup> برای حل مسائل در ابعاد بزرگ استفاده شده است. تحلیل معیارهای ارزیابی مختلف معرفی شده گویای عملکرد بهتر الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم نسبت به الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** شبکه زنجیره‌تأمین مستقیم/ معکوس یکپارچه، برنامه‌ریزی دوهدفه، مکانیابی - موجودی، الگوریتم‌های فراابتکاری.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا تهران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا تهران

jbagheri@alzahra.ac.ir

<sup>۳</sup> Non-deterministic Polynomial-time hard

<sup>۴</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

<sup>۵</sup> Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II (SPEA-II)

## ۱- مقدمه

زنجیره‌تامین شبکه‌ای از تامین‌کنندگان، مراکز تولید، توزیع و سازماندهی ارتباطات بین آنها جهت فراهم آوردن مواد خام، تبدیل آنها به محصولات نهایی و توزیع محصولات نهایی به شیوه‌ای کارا به مشتریان می‌باشد. طراحی شبکه‌ی زنجیره‌تامین یکی از مهمترین تصمیمات استراتژیک در مدیریت زنجیره‌ی تامین است که تعیین تعداد، مکان، ظرفیت تسهیلات و مقادیر جریان بین آنها را شامل می‌شود (امیری<sup>۶</sup>، ۲۰۰۶). مدیریت زنجیره‌تامین حلقه‌بسته (CLSC)، ادغام مدیریت زنجیره‌تامین رو به جلو سنتی و لجستیک معکوس می‌باشد که در آن سیستم توزیع شرکت یک حلقه‌ی بسته را تشکیل داده و کالاهای بازگشتی یا به خوبی کالای جدید تولید مجدد شده و یا به عنوان قطعه‌ی یدکی و کالای دست دوم در بازار ثانویه فروخته می‌شوند (دیابت<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). علاقه رو به رشد در ترکیب تصمیمات مکانیابی استراتژیک با تصمیمات موجودی تاکتیکی وجود دارد. شرکت‌ها دریافته‌اند که به منظور دستیابی به یک زنجیره‌تامین کارآمد که رضایت مشتری را نیز در بر داشته باشد، بهینه‌سازی فرآیند به عنوان یک کل به یک ضرورت تبدیل شده است. بنابراین به وضوح نیاز به یکپارچگی تصمیمات سطح استراتژیک و سطح تاکتیکی برای حل همزمان مسائل مکانیابی تسهیلات، توزیع و مدیریت موجودی وجود دارد. در محیط کسب و کار رقابتی امروز، کاهش هزینه و بهبود خدمات مشتریان، به دو چالش عمده برای شرکت‌ها تبدیل شده‌اند. در سال‌های اخیر، مدیریت موجودی به عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای مواجهه با این چالش‌ها، به یک نگرانی بزرگ تبدیل شده است. این حوزه بیشتر با تصمیمات مکانیابی به منظور تصمیم‌گیری‌های استراتژیک - تاکتیکی یکپارچه، ادغام شده است که منجر به نگرش جامع کارا (از نظر کاهش هزینه‌های تولید، افزایش رضایت مشتری و ...) در زنجیره‌ی تامین می‌شود. دو تصمیم مهمی که عمدتاً در مسائل مکانیابی - موجودی گرفته می‌شود: اولی، تصمیمات مکانیابی و تخصیص که مکان تسهیلات و چگونگی تخصیص تسهیلات به مشتریان را مشخص می‌کند و دومی، به مدیریت موجودی مرتبط است که میزان پاسخگویی زنجیره‌تامین را بر حسب سرویس‌دهی به مشتریان مشخص می‌کند (گذارا<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). از آنجا که تصمیمات تاکتیکی بعد از تصمیمات استراتژیک گرفته می‌شوند، پیکربندی شبکه لجستیک یک محدودیت برای تصمیم‌گیری در سطح تاکتیکی خواهد بود. با توجه به تأثیرات متقابلی که تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی در سطح شبکه لجستیک بر یکدیگر دارند، در نظرگیری همزمان آن‌ها در مسائل طراحی شبکه در جلوگیری از به وجود آمدن جواب‌های محلی

<sup>۶</sup> Amiri

<sup>۷</sup> Diabat,

<sup>۸</sup> Gzara,

امری مهم تلقی می‌شود. علاوه بر این، از آنجا که باز و بسته کردن امکانات زمان‌بر و گران است، تغییر پیکربندی شبکه به راحتی امکان پذیر نیست. از این رو، پیکربندی زنجیره‌تامین یک مسئله استراتژیک کلیدی موثر بر فعالیت‌های تاکتیکی است و نیازمند بهینه‌سازی برای عملکرد کارآمد کل زنجیره‌تامین در طولانی‌مدت است.

همچنین بازار ثانویه، یک موضوع در حال ظهور و قابل توجه در مدیریت زنجیره‌تامین است و به یک بازار مهم برای سازمان‌های تجاری، برای فروش موجودی اضافی و محصولات دست دوم تبدیل شده است. بازارهای ثانویه به سرعت در حال رشد هستند. در صنعت داروسازی، بازار ثانویه در سال ۲۰۰۷ حدود ۲۰ میلیارد دلار یا ۶ درصد از کل بازار محصولات دارویی ارزش داشت (لینینگر<sup>۹</sup>، ۲۰۰۷). افزون بر این، مصرف‌کنندگان، محصولات بازسازی شده را در بازارهای ثانویه به طور فزاینده‌ای خریداری می‌کنند (لیو<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). بر اساس یک نظرسنجی از Liquidity Services<sup>۱۱</sup>، ۹۴ درصد از افرادی که محصولات بازسازی شده را خریداری کرده‌اند از عملکرد محصول و از قیمت پرداخت شده در برابر ارزش دریافت شده راضی بوده‌اند (بیزینس‌وایر<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۴).

برای بهبود پایداری CLSC ها، محصولات بازگشتی را می‌توان با در نظر گرفتن چرخه‌های زندگی آنها مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، در صنایع الکترونیک مصرفی، محصولی که عمر آن به پایان رسیده، معمولاً دمونتاژ می‌شود، اما یک محصول بازگشتی که در شرایط خوب است، می‌تواند بازسازی شود و سپس به بازار ثانویه برای سود بیشتر فروخته شود. بنابراین، CLSC ها از دیدگاه عملی به بازار ثانویه خیلی نزدیک هستند، اما ارتباطات آنها به ندرت در ادبیات زنجیره‌تامین بررسی شده است.

در این مقاله مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مساله مکانیابی - موجودی مستقیم/معکوس با ظرفیت محدود ارائه شده است. به منظور اثبات برتری مدل یکپارچه، مدل‌سازی این مسئله بصورت غیر یکپارچه نیز ارائه شده است. همچنین فرض شده که شبکه پیشنهادی چندمنبعی<sup>۱۲</sup> و مکان‌تامین‌کننده و مشتریان مشخص بوده و هزینه‌های حمل وابسته به مسافت می‌باشد.

بر اساس توضیحات داده شده، نوآوری‌های این تحقیق عبارتند از:

- ارائه‌ی مسئله مکانیابی - موجودی مستقیم و معکوس دوهدفه جدید

<sup>۹</sup> Leininger

<sup>۱۰</sup> Liu

<sup>۱۱</sup> Businesswire

<sup>۱۲</sup> Multi sourcing

– امکان تامین تقاضا از چندین منبع در تمامی لایه‌های شبکه

– کنترل موجودی در دو مرکز توزیع و تعمیر

ادامه‌ی این مقاله به شرح زیر می‌باشد. در بخش بعدی ادبیات مرتبط با مدل‌های مکانیابی-موجودی و لجستیک معکوس مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل پیشنهادی برای شبکه زنجیره‌تامین مستقیم و معکوس یکپارچه و همچنین مدلسازی غیریکپارچه‌ی شبکه در بخش سوم ارائه شده‌اند. در بخش چهارم تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم جهت اعتبار سنجی مدل انجام شده است. در بخش پنجم به حل مدل با دو الگوریتم فراابتکاری به نام‌های الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم پرداختیم. نهایتاً، نتایج و پیشنهادات آتی در بخش ششم آمده است.

## ۲- مرور ادبیات

ادبیات مرتبط با طراحی زنجیره‌تامین کارآمد به سه گروه اصلی تقسیم می‌شود: نظریه موجودی، نظریه مکانیابی رو به جلو سنتی و نظریه لجستیک معکوس. نظریه موجودی بر روی بهبود استراتژی‌های بازپرسازی در مراکز توزیع و خرده‌فروشان تمرکز دارد که معمولاً بر اساس سطوح سرویس، هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های موجودی، هزینه‌های کمبود و ... ارزیابی می‌شوند. این استراتژی‌ها فرض می‌کنند که تصمیمات مکانیابی استراتژیک قبلاً گرفته شده‌اند (دیابت و همکاران، ۲۰۱۵). لجستیک رو به جلو سنتی بر روی تعیین مکان و تعداد بهینه مراکز توزیع تمرکز دارد که تنها هزینه‌های ارسال از کارخانه به خرده‌فروش را در نظر می‌گیرد. داسکین<sup>۱۳</sup> (۱۹۹۵) و درز نر<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۵) خلاصه‌ای از مدل‌های مکانیابی را ارائه کرده‌اند. بر خلاف نظریه لجستیک رو به جلو سنتی، نظریه لجستیک معکوس توجه زیادی را به خود جلب کرده است. نظریه لجستیک معکوس بهبودی از نظریه لجستیک رو به جلو سنتی است که شامل مکان‌های جمع‌آوری برای تولید مجدد، دوباره‌کاری، بازیافت و انهدام می‌شود.

مرور ادبیات مربوطه نشان می‌دهد که مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مدل‌های رایج مورد استفاده در این حوزه می‌باشند. این مدل‌ها، مدل‌های مکانیابی تسهیلات ساده با ظرفیت نامحدود تا مدل‌های پیچیده چندمرحله‌ای یا چندکالایی با ظرفیت محدود را شامل می‌شوند. هدف رایج این مدل‌ها طراحی سیستمی با حداقل هزینه می‌باشد، که معمولاً مستلزم برقراری تعادل میان هزینه‌های

<sup>۱۳</sup> Daskin

<sup>۱۴</sup> Drezner

ثابت باز شدن تسهیلات و هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد (پیشوایی<sup>۱۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه، ادبیات موضوع در سه حوزه‌ی مرتبط مورد بررسی قرار گرفته است: ۲-۱) طراحی شبکه زنجیره‌تامین معکوس و حلقه‌بسته ۲-۲) مدل‌های مکانیابی- موجودی ۲-۳) مدل‌های مکانیابی- موجودی حلقه‌بسته.

## ۱-۲- طراحی شبکه زنجیره‌تامین معکوس و حلقه‌بسته

یکی از کارهای پیشین در این حوزه ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با هدف حداقل‌سازی هزینه است (جایرامان<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۱۹۹۹). کار مشابهی نیز در سال ۲۰۰۳ ارائه شد با این تفاوت که برای حل مدل در ابعاد بزرگ از الگوریتم هیورستیک استفاده شد (جایرامان<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). لو و بوستل<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۷) از الگوریتم ابتکاری بر مبنای لاگرانژ برای حل مدل پیشنهادی خود استفاده کردند. کو و ایوانس<sup>۱۹</sup> (۲۰۰۷) به طراحی شبکه‌ی لجستیک مستقیم/ معکوس یکپارچه‌ی پویا<sup>۲۰</sup> برای فراهم‌آوردندگان لجستیک طرف سوم<sup>۲۱</sup> پرداخته و آن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند. آستر<sup>۲۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷) از روش حل دقیق بر مبنای روش تجزیه بندرز<sup>۲۳</sup> برای حل مدل حلقه‌بسته‌ی پیشنهادی خود استفاده کردند. آراس<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۰۸) به ارائه‌ی مدل غیرخطی برای تعیین محل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف شده در شبکه لجستیک معکوس پرداختند. نکته قابل توجه در این مقاله، توانایی مدل در تعیین قیمت خرید محصولات مصرف شده از دارندگان آن با هدف ماکزیمم کردن سود حاصله است. دو و ایوانس<sup>۲۵</sup> (۲۰۰۸) به ارائه مدل دوهدفه برای ارائه خدمات پس از فروش، پرداختند و برای بازگشتی‌هایی که به خدمات تعمیراتی نیاز داشتند، از فراهم‌آوردندگان لجستیک طرف سوم استفاده کردند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل دوهدفه به منظور مینیمم کردن هزینه‌ها و ماکزیمم‌سازی پاسخگویی شبکه لجستیک ارائه داده و مدل پیشنهادی خود را با استفاده از الگوریتم ممتیک چندهدفه کارا حل

<sup>۱۵</sup> Pishvae

<sup>۱۶</sup> Jayaraman

<sup>۱۷</sup> Jayaraman

<sup>۱۸</sup> Lu & Bostel

<sup>۱۹</sup> Ko, Evans

<sup>۲۰</sup> Dynamic integrated forward/reverse logistics network

<sup>۲۱</sup> Third-party logistics (۳PLs)

<sup>۲۲</sup> Üster

<sup>۲۳</sup> Benders Decomposition

<sup>۲۴</sup> Aras

<sup>۲۵</sup> Du & Evans

کردند. آل سید<sup>۲۶</sup> و همکاران (۲۰۱۰) شبکه حلقه‌بسته چند دوره‌ای را معرفی کرده و فرض کردند که کیفیت محصولات تولیدمجدد شده و محصولات تعمیر شده متفاوت از کیفیت محصولات نو می‌باشد و برای محصولات با کیفیت کمتر مناطق مشتریان ثانویه را در نظر گرفتند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) مدل بهینه‌سازی استوار را برای در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته با ظرفیت محدود پیشنهاد دادند. امین و ژانگ<sup>۲۷</sup> (۲۰۱۲) به ارائه شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته سه‌هدفه دو مرحله‌ای پرداختند و ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان بر اساس معیارهای کیفی را نیز در مدل در نظر گرفتند. پیشوایی و رزمی<sup>۲۸</sup> (۲۰۱۲) از برنامه‌ریزی ریاضی فازی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین سبز استفاده کردند. مدل پیشنهادی علاوه بر کاهش هزینه، توانایی حداقل نمودن اثرات زیست محیطی را نیز دارد. امین و ژانگ<sup>۲۹</sup> (۲۰۱۳) در شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پیشنهادی خود که تابع هدف زیست‌محیطی را نیز شامل می‌شود، اثر عدم قطعیت تقاضا و محصولات بازگشتی بر روی ساختار شبکه توسط برنامه‌ریزی احتمالی (بر مبنای سناریو) را بررسی کردند. هاتفی و جولای<sup>۲۹</sup> (۲۰۱۴) در مقاله خود به طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس استوار تحت قابلیت اطمینان پرداختند که به طور همزمان عدم‌قطعیت پارامترها و اختلال در تسهیلات شبکه را در نظر می‌گیرد. کیوان‌شکوه<sup>۳۰</sup> و همکاران (۲۰۱۳) رویکرد قیمت-گذاری پویا برای محصولات بازگشتی را در طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس، به منظور تعیین قیمت خرید محصولات استفاده شده ایجاد کردند تا درصد محصولات بازگشتی جمع‌آوری شده از مناطق مشتری را بدست آورند. دویکا<sup>۳۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) اثرات اجتماعی، محیط زیستی و اقتصادی را برای طراحی زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پایدار در نظر گرفتند. رضانی<sup>۳۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) به ارائه‌ی یک رویکرد مالی در طراحی زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پرداختند که در آن جنبه‌های مالی به عنوان متغیرهای بیرونی در نظر گرفته شده‌اند. طلائی<sup>۳۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) مدل برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط فازی را برای شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته سبز معرفی کردند. فتح‌الهی فرد<sup>۳۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷) رویکردهای جدیدی را در متاهوریستیک‌ها و روش‌های دقیق به عنوان روش‌های

<sup>۲۶</sup> El-Sayed

<sup>۲۷</sup> Amin, Zhang

<sup>۲۸</sup> Pishvaei & Razmi

<sup>۲۹</sup> Hafeti & Jolai

<sup>۳۰</sup> Keyvanshokoh

<sup>۳۱</sup> Devika

<sup>۳۲</sup> Ramezani

<sup>۳۳</sup> Talaei

<sup>۳۴</sup> Fathollahi Fard

حل شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پیشنهاد کردند. علاوه بر این، ریسک اختلال به عنوان یک معیار در تابع هدف قرار گرفته است. پایدار<sup>۳۵</sup> و همکاران (۲۰۱۷) فرآیند جمع‌آوری و توزیع روغن موتور، که از یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی می‌باشد را در مقاله خود در نظر گرفتند و به مطالعه موردی شرکت پالایشگاه نفت برای بررسی کاربرد این مدل پرداختند. صفائی<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۱۷) زنجیره-تامین حلقه‌بسته برای شبکه بازیافت مقوا با چند تامین‌کننده را در نظر گرفتند. همچنین، کاربرد مدل پیشنهادی با طراحی زنجیره‌تامین حلقه‌بسته مقوا در دنیای واقعی بررسی شده است. فتح الهی فرد و همکاران (۲۰۱۸) جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی را به طور همزمان در مقاله خود در نظر گرفتند و تعدادی الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید برای ایجاد یک تعامل بهتر بین مراحل جستجو ارائه دادند. قمی اوپلی<sup>۳۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹) مدل چندهدفه را برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته با تقاضای وابسته به قیمت ارائه دادند، در حالی که اختلالات تصادفی و کمبود را نیز در مدل خود در نظر گرفتند. در این مدل فرض شده که تابع تقاضا، تابعی از قیمت پیشنهادی به مشتریان می‌باشد. بعلاوه، کاربرد مدل پیشنهادی در صنعت تولید و توزیع شیشه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۲- مدل‌های مکانیابی - موجودی

بامول و ولف<sup>۳۸</sup> (۱۹۵۸) اولین نفراتی بودند که ایده‌ی در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی و مکانیابی در یک مدل واحد را پیشنهاد کردند. داسکین و همکاران (۲۰۰۲) مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح را برای مسئله‌ی موجودی - مکانیابی ارائه کردند و برای حل مدل از روش ابتکاری بر مبنای آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است. بعدها این مدل توسط شن<sup>۳۹</sup> و همکاران (۲۰۰۳) بصورت مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مجموعه پوشش مجدداً فرموله شده و تکنیک تولید ستون برای حل مورد استفاده قرار گرفت. میراندا و گاریدو<sup>۴۰</sup> (۲۰۰۴) مسئله‌ی یکپارچه‌سازی مکانیابی تسهیلات و کنترل موجودی را در انبارهای دارای ظرفیت ثابت و تقاضای دارای توزیع نرمال، مورد مطالعه قرار دادند و برای حل مدل از الگوریتم ابتکاری لاگرانژ استفاده کردند. سوریراجان<sup>۴۱</sup> و همکارانش (۲۰۰۷) به ارائه‌ی مدل دو مرحله‌ای برای مطالعه‌ی ارتباط بین زمان تدارک، جریان کالاها و موجودی

<sup>۳۵</sup> Paydar

<sup>۳۶</sup> Safaei

<sup>۳۷</sup> Ghomi-Avili

<sup>۳۸</sup> Baumol & Wolfe

<sup>۳۹</sup> Shen

<sup>۴۰</sup> Miranda & Garrido

<sup>۴۱</sup> Sourirajan

اطمینان، پرداختند و برای حل مدل از الگوریتم ابتکاری لاگرانژ استفاده کردند. آنها در مقاله‌ی مشابه دیگری (۲۰۰۹) به حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک پرداخته تا عملکرد این دو الگوریتم را با یکدیگر مقایسه کنند. لین<sup>۴۲</sup> و همکارانش (۲۰۰۹) به ارائه الگوریتم تکاملی ترکیبی برای تعیین مکان بهینه مراکز توزیع و خرده‌فروشان و سطوح موجودی در یک شبکه‌ی توزیع چهارسطحی پرداختند. پارک<sup>۴۳</sup> و همکارانش (۲۰۱۰) استراتژی ریسک اشتراکی و زمان‌های تدارک وابسته را در زنجیره‌تامین در نظر گرفتند و مدل پیشنهادی خود را با استفاده از الگوریتم ابتکاری دومرحله‌ای برگرفته از رویکرد آزادسازی لاگرانژ را حل کردند. احمدی‌جاوید و آزاد<sup>۴۴</sup> (۲۰۱۰) برای اولین بار، مدلی که به طور همزمان تصمیمات مکانیابی، تخصیص، ظرفیت، موجودی و مسیریابی را در سیستم زنجیره‌تامین احتمالی بهینه می‌کند، ارائه کردند و برای حل مدل، ابتدا یک روش حل دقیق ارائه داده و سپس روش ابتکاری بر مبنای ترکیب الگوریتم‌های جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید را ارائه کردند. دیابت و همکاران (۲۰۱۳) مدل مکانیابی - موجودی که به طور همزمان مکان انبارهای با ظرفیت نامحدود و سیاست‌های موجودی به کار گرفته شده در انبارها و برای خرده‌فروشان را مشخص می‌کند، مطالعه کردند. چن<sup>۴۵</sup> و همکارانش (۲۰۱۱) مدل موجودی - مکانیابی که تصمیمات مکانیابی، تخصیص مشتریان و مدیریت موجودی را برای تسهیلات در معرض ریسک اختلال بهینه می‌کند، مورد مطالعه قرار دادند. احمدی‌جاوید و صدیقی<sup>۴۶</sup> (۲۰۱۲) مساله‌ای که تصمیمات مکانیابی، موجودی و مسیریابی را به طور همزمان در طراحی شبکه‌ی توزیع با چندین منبع بهینه می‌کند، مدل کردند. تانکرز<sup>۴۷</sup> و همکارانش (۲۰۱۲) مسئله‌ی بهینه‌سازی مکان مراکز توزیع و تصمیمات مدیریت موجودی با توجه به مکان کارخانجات و مشتریان را مورد مطالعه قرار دادند. سیلوا و گاو<sup>۴۸</sup> (۲۰۱۳) به ارائه مدل موجودی - مکانیابی پرداخته و مساله پیشنهادی خود را با روش جستجوی انطباقی تصادفی حریصانه حل کردند.

<sup>۴۲</sup> Lin

<sup>۴۳</sup> Park

<sup>۴۴</sup> Ahmadi Javid & Azad

<sup>۴۵</sup> Chen

<sup>۴۶</sup> Ahmadi-Javid, Seddighi,

<sup>۴۷</sup> Tancrez

<sup>۴۸</sup> Silva, Gao



## ۲-۳- مدل‌های مکانیابی - موجودی حلقه‌بسته

مرور ادبیات انجام شده نشان می‌دهد در حالی که طراحی شبکه لجستیک معکوس کارا توجه زیادی را به خود جلب کرده، کار زیادی بر روی ترکیب تصمیمات سطوح استراتژیک و تاکتیکی در لجستیک معکوس صورت نگرفته است.

عبدالله و همکاران (۲۰۱۲) برای اولین بار در مقاله خود به طراحی زنجیره تأمین پایدار پرداختند و مدل مکانیابی - موجودی حلقه‌بسته و تک محصولی با ظرفیت نامحدود را ارائه دادند. در این مقاله تقاضای خرده‌فروشان احتمالی بوده و این تقاضا از توزیع نرمال پیروی می‌کند. همچنین در این مقاله فرض شده که هر خرده‌فروش تنها می‌تواند از یک مرکز توزیع خدمت دریافت کند و محصولات بازگشتی را تنها می‌تواند به یک مرکز تولید مجدد ارسال می‌کند (تک منبعی) که این محصولات پس از بازساخت به عنوان قطعه یدکی در بازار توزیع می‌شود. مدل ارائه شده در این مقاله سه تئوری (تئوری مکانیابی، تئوری موجودی و تئوری لجستیک معکوس) را در یک مدل ریاضی غیرخطی عددصحیح مختلط ترکیب کرده و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده است. دیابت و همکاران (۲۰۱۵) در سال ۲۰۱۵ مساله مکانیابی - موجودی حلقه‌بسته ارائه شده در مقاله عبدالله و همکاران (۲۰۱۲) را با استفاده از الگوریتم دقیق آزادسازی لاگرانژ دو مرحله‌ای حل کردند. اصل نجفی<sup>۴۹</sup> و همکارانش (۲۰۱۵) مساله مکانیابی - موجودی حلقه‌بسته پویا را که به طور همزمان تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی را بهینه می‌کند، ارائه دادند. آنها ریسک اختلال تسهیلات را نیز در مقاله خود در نظر گرفتند. مدل ارائه شده آنها دوهدفه بوده و از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II، MOPSO و الگوریتم فراابتکاری ترکیبی بر مبنای NSGA-II و MOPSO برای حل مدل پیشنهادی خود استفاده کردند. در پایان کاربرد مدل پیشنهادی از طریق مطالعه موردی واقعی در ایران آزمایش شده است. وحدانی و احمدزاده<sup>۵۰</sup> (۲۰۱۹) شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته در صنعت فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) را به منظور حداکثرسازی سود کل حاصل از فروش محصولات جدید ICT یا جمع‌آوری محصولات استفاده شده ICT پیشنهاد داده‌اند. برای تحلیل عملکرد مدل پیشنهادی و رویکردهای حل، یک مورد واقعی از زنجیره تأمین حلقه‌بسته ICT در ایران مورد بررسی قرار دادند. احمد زاده و وحدانی (۲۰۱۷) در مقاله خود تصمیمات مکانیابی - موجودی - قیمت‌گذاری را در شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته سه سطحی در نظر گرفتند به طوریکه تقاضای مشتریان دارای همبستگی بوده و سیاست مرور دوره‌ای موجودی (R,T) و کمبود نیز در آن در نظر گرفته شده است. این شبکه به صورت مساله برنامه‌ریزی غیرخطی مدلسازی شده و سه الگوریتم فراابتکاری به

<sup>۴۹</sup> Asl-Najafi

<sup>۵۰</sup> Vahdani & Ahmadzadeh

نام‌های الگوریتم ژنتیک<sup>۵۱</sup>، الگوریتم رقابت استعماری<sup>۵۲</sup> و الگوریتم کرم شب تاب<sup>۵۳</sup> برای حل آن استفاده شده است. گوا<sup>۵۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) برای طراحی زنجیره‌تامین پایدار، به مطالعه مساله مکانیابی - موجودی در زنجیره‌تامین حلقه‌بسته با نظر گرفتن فروش محصولات نو و دست دوم در بازارهای اولیه و ثانویه پرداختند.

### ۳- توصیف مساله پیشنهادی

شبکه یکپارچه مستقیم / معکوس طراحی شده در این مقاله یک شبکه یک دوره‌ای، تک محصولی و چند سطحی شامل یک تأمین‌کننده قطعات بیرونی، چندین مرکز تعمیر، مراکز توزیع، جمع‌آوری، مراکز دفع محصولات قراضه، مشتریان بازار اولیه و ثانویه می‌باشد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، کالاهای بازگشتی از مشتریان اولیه توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری می‌شوند. این مراکز مسئولیت بازرسی کالاهای بازگشتی را نیز بر عهده دارند. کالاهای بازرسی شده به سه گروه تقسیم می‌شوند:

- ۱) کالاهایی که نیاز به هیچگونه تعمیر (تعویض قطعه) نداشته و قابل استفاده مجدد می‌باشند. این کالاها به مراکز توزیع فرستاده می‌شوند تا پاسخگوی تقاضای مشتریان بازار ثانویه باشند.
  - ۲) کالاهایی که پس از تعمیر قابلیت استفاده مجدد را دارند. این کالاها به مراکز تعمیر فرستاده می‌شوند تا پس از تعمیر از طریق مراکز توزیع به دست مشتریان ثانویه برسند.
  - ۳) کالاهای قراضه‌ای که قابلیت تعمیر نداشته و به مراکز انهدام فرستاده می‌شوند.
- با به کارگیری استراتژی ذکر شده در بالا از حمل و نقل غیرضروری جلوگیری می‌شود و کالاهای بازگشتی مستقیماً به تسهیلات مناسب فرستاده می‌شوند.

کالای قابل تعمیر کالایی است که با تعویض تعدادی قطعه از پیش تعریف شده قابلیت استفاده مجدد را داشته باشند به طوری که این تعویض از نظر اقتصادی و عمر محصول مقرون به صرفه باشد (در مرحله بازرسی تشخیص داده می‌شود). همچنین فرض بر این می‌باشد که کیفیت محصولات تعمیر شده کمتر از کیفیت محصولات نو است بنابراین محصولات تعمیر شده به عنوان کالای دست‌دوم پاسخگوی نیاز مشتریان ثانویه هستند.

<sup>۵۱</sup> Genetic algorithm

<sup>۵۲</sup> Imperialist competitive algorithm

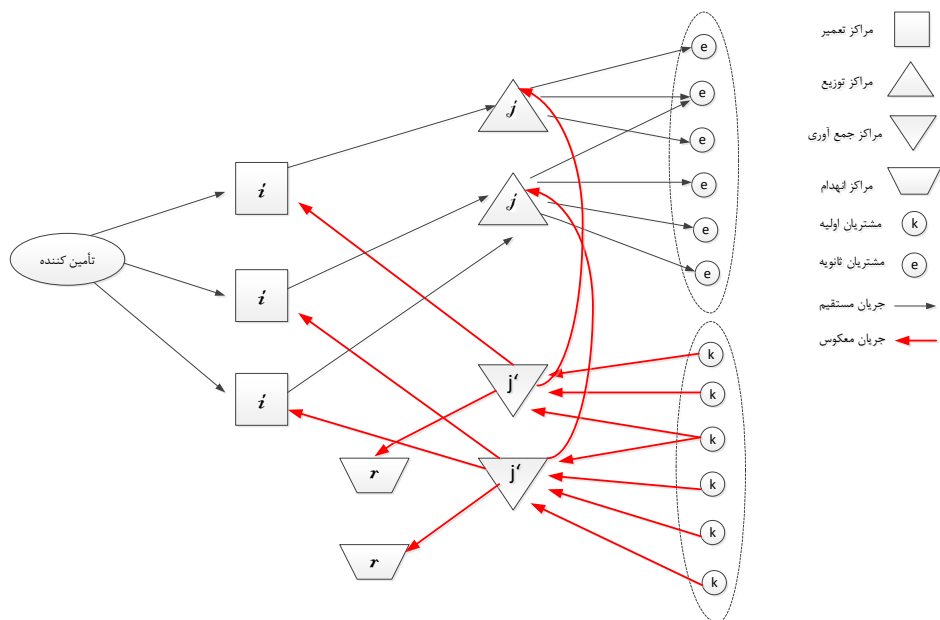
<sup>۵۳</sup> Firefly algorithm

<sup>۵۴</sup> Guo

فرضیات زیر در پیکربندی شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

- (۱) تقاضای سالانه‌ی مشتریان ثانویه دارای توزیع نرمال با میانگین  $\mu_e$  و واریانس  $\sigma_e^2$  است.
- (۲) در برآورده کردن تقاضای بازار ثانویه، کمبود مجاز است.
- (۳) مکان مشتریان، تامین‌کننده و مراکز انهدام، مکانی ثابت و از پیش تعیین شده است.
- (۴) تأمین‌کننده قطعات دارای ظرفیت نامحدود است و می‌تواند تمامی قطعات مورد نیاز برای تعمیر را فراهم کند. مراکز دفع نیز ظرفیت نامحدود دارند.
- (۵) هزینه حمل هر واحد بار متناسب با مسافت می‌باشد.
- (۶) زمان تدارک از تامین‌کننده به مراکز تعمیر و از مراکز تعمیر به مراکز توزیع وجود دارد که به مکان (مسافت) آنها بستگی دارد.
- (۷) در این مطالعه هزینه کمبود در نظر گرفته نشده و سطح سرویس داده شده است.
- (۸) کنترل موجودی در مراکز تعمیر و مراکز توزیع در نظر گرفته شده و این مراکز از سیاست موجودی مرور دائم پیروی می‌کنند. در این سیستم در هر لحظه‌ای که سطح موجودی به نقطه سفارش مجدد برسد، یک سفارش به مقدار ثابت  $Q$  صادر می‌شود. همچنین در هر مرکز توزیع و تعمیر مقداری موجودی اطمینان برای مقابله با تغییرات تقاضای مشتریان ثانویه، نگهداری می‌شود.
- (۹) به منظور اضافه کردن هزینه‌های موجودی به مدل مکانیابی، از تقریب مقدار سفارش اقتصادی<sup>۵۵</sup> برای کالاهای موجود در مراکز جمع‌آوری، توزیع و قطعات موردنیاز در تعمیر، استفاده می‌شود. هزینه موجودی اطمینان بر اساس سطح سرویس نوع ۱ با زمان تدارک وابسته به مسافت محاسبه شده است.
- (۱۰) امکان اشتراک مشتریان بازارهای اولیه و ثانویه وجود دارد.

<sup>۵۵</sup> Economic order quantity



شکل (۱): شبکه لجستیک مستقیم / معکوس یکپارچه

### ۱-۳- مدل ریاضی مساله پیشنهادی

این شبکه را می‌توان به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط به دو صورت یکپارچه و غیریکپارچه فرمول‌بندی کرد. منظور از مدل یکپارچه در نظر گرفتن همزمان هزینه‌های مکانیابی و موجودی در یک مدل و سپس حل آن است در حالی که در مدل غیریکپارچه، ابتدا مسئله مکانیابی (یعنی در نظر گرفتن تمامی هزینه‌ها به جز هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی) را حل کرده، سپس با توجه به تخصیص‌های بدست آمده، برای هر یک از مراکز توزیع و تعمیر هزینه‌های سفارش‌دهی و هزینه‌های نگهداری را بدست می‌آوریم. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر تعریف شده‌اند:

**مجموعه‌ها:**

$I$ : اندیس مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز تعمیر ( $i \in I$ )

$J$ : اندیس مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع ( $j \in J$ )

$J'$ : اندیس مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز جمع‌آوری ( $j' \in J'$ )

$K$ : اندیس مکان‌های ثابت مشتریان اولیه ( $k \in K$ )

$E$ : اندیس مکان‌های ثابت مشتریان ثانویه ( $e \in E$ )

$R$ : اندیس مکان‌های ثابت مراکز انهدام محصولات قراضه ( $r \in R$ )

$L$ : اندیس سطوح ظرفیت ممکن برای تسهیلات ( $l \in L$ )

$M$ : اندیس قطعه قابل تعویض برای تعمیر محصول ( $m \in M$ )

پارامترها:

$\mu_e$ : میانگین تقاضای سالانه مشتری ثانویه  $e$  برای محصول دست دوم

$\partial_e^x$ : واریانس تقاضای سالانه مشتری ثانویه  $e$  برای محصول دست دوم

$D_e$ : تقاضای سالانه مشتری ثانویه  $e$  برای محصول دست دوم

$$D_e \sim N(\mu_e, \partial_e^x)$$

$R_k$ : مقدار بازگشتی‌های سالانه‌ی مشتری اولیه  $k$

$A^l$ : هزینه ثابت هر بار سفارش‌دهی توسط مراکز تعمیر

$A^j$ : هزینه ثابت هر بار سفارش‌دهی توسط مراکز توزیع

$h_{mi}$ : هزینه نگهداری سالیانه هر واحد قطعه  $m$  در مرکز تعمیر  $i$

$h$ : هزینه نگهداری سالیانه هر واحد محصول در مراکز توزیع و تعمیر

$LT_i$ : زمان تدارک از تأمین‌کننده قطعات به مرکز تعمیر  $i$

$LT_{ij}$ : زمان تدارک از مرکز تعمیر  $i$  به مرکز توزیع  $j$

$Z_\alpha$ : سطح اطمینان از موجودی کالا

$OP_j$ : هزینه‌های عملیاتی هر واحد محصول در مرکز توزیع  $j$

$IC_j'$ : هزینه جمع‌آوری و بازرسی هر واحد در مرکز جمع‌آوری  $j'$

$REP_{mi}$ : هزینه تعمیر هر واحد قطعه  $m$  در مرکز تعمیر  $i$

$DC_r$ : هزینه دفع هر واحد در مرکز انهدام  $r$

$T_m^c$ : هزینه حمل هر واحد قطعه  $m$  به ازای هر کیلومتر

$T^c$ : هزینه حمل هر واحد محصول به ازای هر کیلومتر

$\theta$ : ضریب هزینه نگهداری

$FCW_i^l$ : هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر  $i$  با ظرفیت  $l$

$FCY_j^l$ : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع  $j$  با ظرفیت  $l$

$FCZ_j'$ : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری  $j'$  با ظرفیت  $l$

$CapW_j^l$ : ظرفیت مرکز تعمیر  $i$  با سطح ظرفیت  $l$

$CapY_j^l$ : ظرفیت مرکز توزیع  $j$  با سطح ظرفیت  $l$

$CapZ_j^l$ : ظرفیت مرکز جمع‌آوری  $J'$  با سطح ظرفیت  $l$   
 $D_i^l$ : مسافت (کیلومتر) از تأمین‌کننده به مرکز تعمیر  $i$   
 $D_{ij}^{ll}$ : مسافت (کیلومتر) از مرکز تعمیر  $i$  به مرکز توزیع  $j$   
 $D_{je}^{JE}$ : مسافت (کیلومتر) از مرکز توزیع  $J$  به مشتری ثانویه  $e$   
 $D_{kj}^{KJ'}$ : مسافت از مشتری اولیه  $k$  به مرکز جمع‌آوری  $J'$   
 $D_{j'j}^{J'J}$ : مسافت (کیلومتر) از مرکز جمع‌آوری  $J'$  به مرکز توزیع  $j$   
 $D_{j'i}^{J'I}$ : مسافت (کیلومتر) از مرکز جمع‌آوری  $J'$  به مرکز تعمیر  $i$   
 $D_{j'r}^{J'R}$ : مسافت (کیلومتر) از مرکز جمع‌آوری  $J'$  به مرکز انهدام  $r$   
 $R^Y$ : نسبتی از محصولات بازگشتی که نیاز به هیچگونه تعمیر نداشته و برای تأمین تقاضای مشتریان ثانویه از مراکز جمع‌آوری به مراکز توزیع فرستاده می‌شوند.  
 $R^R$ : نسبتی از محصولات بازگشتی که از مراکز جمع‌آوری به مراکز تعمیر فرستاده می‌شوند.  
 $R^D$ : نسبتی از محصولات بازگشتی که از مراکز جمع‌آوری به مراکز انهدام فرستاده می‌شوند.  
 $\alpha_m$ : نسبتی از محصولات مراکز تعمیر که با تعویض قطعه  $m$  تعمیر می‌شوند.

#### متغیرها:

$F_{ij}$ : مقدار جریان رو به جلو محصولات تعمیر شده بین مرکز تعمیر  $i$  و مرکز توزیع  $j$   
 $X_{je}$ : مقدار جریان رو به جلو محصولات بین مرکز توزیع  $J$  و مشتری ثانویه  $e$   
 $S_{kj}^k$ : مقدار جریان معکوس محصولات دست‌دوم بین مشتری اولیه  $k$  و مرکز جمع‌آوری  $J'$   
 $Z_{j'j}$ : مقدار جریان از مرکز جمع‌آوری  $J'$  به مرکز توزیع  $j$   
 $Y_{j'i}$ : مقدار جریان از مرکز جمع‌آوری  $J'$  به مرکز تعمیر  $i$   
 $K_{j'r}$ : مقدار جریان از مرکز جمع‌آوری  $J'$  که به مرکز انهدام  $r$   
 $\sigma_j^j$ : واریانس تقاضای سالانه مرکز توزیع  $J$   
 $S_e$ : مقدار تقاضای پاسخ داده نشدهی (کمبود) مشتری  $e$   
 $Q_{im}$ : مقدار سفارش اقتصادی مرکز تعمیر  $i$  برای قطعه  $m$   
 $Q_j$ : مقدار سفارش اقتصادی مرکز توزیع  $J$   
 $S_{im}^I$ : میزان ذخیره احتیاطی محصول تعمیر شده در مرکز تعمیر  $i$   
 $S_j^J$ : میزان ذخیره احتیاطی محصول در مرکز توزیع  $J$

متغیرهای صفرو یک برای احداث تسهیلات:

$$W_i^l = \begin{cases} 1 & \text{اگر مرکز تعمیر با سطح ظرفیت } l \text{ در مکان } i \text{ احداث شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$Y_j^l = \begin{cases} 1 & \text{اگر مرکز توزیع با سطح ظرفیت } l \text{ در مکان } j \text{ احداث شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$Z_{j'}^l = \begin{cases} 1 & \text{اگر مرکز جمع آوری با سطح ظرفیت } l \text{ در مکان } j' \text{ احداث شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

### توابع هدف:

۱- تابع هدف اول در صدد کمینه کردن کل هزینه‌های شبکه است. هزینه‌های زنجیره تأمین متشکل از هزینه‌های تعریف شده در زیر می‌باشد:

۱-۱- هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات:

$$\sum_i \sum_l FCW_i^l \times W_i^l + \sum_j \sum_l FCY_j^l \times Y_j^l + \sum_{j'} \sum_l FCZ_{j'}^l \times Z_{j'}^l \quad (1)$$

۱-۲- هزینه‌های بازرسی محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری، هزینه‌های تعمیر محصولات در مراکز تعمیر، هزینه‌های عملیاتی (بسته‌بندی) در مراکز توزیع و هزینه‌های دفع محصولات قراضه در مراکز انهدام:

$$\sum_k \sum_{j'} S_{kj'} IC_{j'} + \sum_i \sum_m \bar{D}_{im} REP_{mi} + \sum_j \sum_e X_{je} OP_j + \sum_r \sum_{j'} K_{j'r} DC_r \quad (2)$$

$\bar{D}_{im}$  میانگین تقاضای سالانه مرکز تعمیر  $i$  برای قطعه  $m$  می‌باشد.

$$\bar{D}_{im} = \alpha_m \sum_j F_{ij} \quad (3)$$

۱-۳- هزینه حمل و نقل محصولات در جریان مستقیم و معکوس:

$$\sum_i \sum_m \sum_j D_i^I \alpha_m F_{ij} T_m^C + \sum_i \sum_j D_{ij}^{II} F_{ij} T^C + \sum_j \sum_e D_{je}^{JE} X_{je} T^C + \sum_k \sum_{j'} D_{kj'}^{KJ'} S_{kj} T^C + \sum_j \sum_{j'} D_{jj'}^{JJ'} Z_{j'j} T^C + \sum_{j'} \sum_i D_{j'i}^{J'I} Y_{j'i} T^C + \sum_{j'} \sum_r D_{j'r}^{J'R} K_{j'r} T^C \quad (4)$$

۱-۴- هزینه‌ی قطعات سفارش داده شده توسط مراکز تعمیر که متشکل از هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی می‌باشد:

$$\sum_i \sum_m \left( \frac{\bar{D}_{im} A^I}{Q_{im}} + \frac{\theta h_{mi} Q_{im}}{r} \right) \quad (5)$$

$Q_{im}$  مقدار سفارش اقتصادی مرکز تعمیر  $i$  برای قطعه  $m$  می‌باشد. با مشتق گرفتن از عبارت بالا نسبت به  $Q_{im}$  و مساوی صفر قرار دادن عبارت حاصل از مشتق مقدار  $Q_{im}$  را بدست می‌آوریم:

$$Q_{im} = \sqrt{\frac{r A^I \alpha_m \sum_j F_{ij}}{\theta h_{mi}}} \quad (6)$$

با جایگذاری  $Q_{im}$  در معادله (۵) هزینه بهینه موجودی در جریان<sup>۵۶</sup> را بدست می‌آوریم:

$$\sum_i \sum_m \sqrt{r A^I \theta h_{mi} \alpha_m \sum_j F_{ij}} \quad (7)$$

$Q_j$  انحراف از معیار تقاضا در مرکز توزیع  $j$  و  $S_{im}^I$  میزان ذخیره احتیاطی<sup>۵۷</sup> قطعه نوع  $m$  در مرکز تعمیر  $i$  می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\sigma_j = \sum_e \frac{X_{je}}{\mu_e} \theta_e \quad \forall j \quad (8)$$

$$S_{im}^I = Z_{\alpha}^I \sqrt{LT_i \alpha_m \sum_i \left( \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j \right)^2} \quad \forall i, m \quad (9)$$

۱-۵- هزینه نگهداری ذخیره احتیاطی در مرکز تعمیر  $i$ :

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_m S_{im}^I h_{mi} \\ &= Z_{\alpha}^I \theta \sum_i \sum_m h_{mi} \sqrt{LT_i \alpha_m \sum_i \left( \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j \right)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

۱-۶- هزینه‌ی سفارش محصولات دست‌دوم که متشکل از هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی بوده و  $\bar{D}_j$  میانگین تقاضای سالانه مرکز توزیع  $j$  می‌باشد:

$$\bar{D}_j = \sum_e X_{je} \quad (11)$$

$$\sum_i \left( \frac{\bar{D}_j A^I}{Q_j} + \frac{\theta h Q_j}{r} \right) \quad (12)$$

<sup>۵۶</sup> Optimal working inventory cost

<sup>۵۷</sup> Safety Stock



$Q_j$  مقدار سفارش اقتصادی مرکز توزیع  $J$  است و با مشتق گرفتن از عبارت بالا نسبت به  $Q_j$  و مساوی صفر قرار دادن عبارت حاصل از مشتق مقدار  $Q_j$  را بدست می‌آوریم:

$$Q_j = \sqrt{\frac{\sqrt{A^J} \sum_e X_{je}}{\theta h}} \quad (13)$$

با جایگذاری  $Q_j$  در معادله (۱۲) هزینه بهینه موجودی در جریان را بدست می‌آوریم:

$$\sum_j \sqrt{\sqrt{A^J} \theta h \sum_e X_{je}} \quad (14)$$

میزان ذخیره احتیاطی محصول در مرکز توزیع  $J$  نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_j^l = Z_\alpha^l \sqrt{\sum_i LT_{ij} \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j^2} \quad \forall j \quad (15)$$

۱-۷- هزینه نگهداری ذخیره احتیاطی در مرکز توزیع  $J$ :

$$\sum_j S_j^l \theta h = Z_\alpha^l \theta h \sum_j \sqrt{\sum_i LT_{ij} \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j^2} \quad (16)$$

حال می‌توان تابع هدف و محدودیت‌های مساله را برای دو مدل یکپارچه و غیریکپارچه به صورت زیر نوشت:

### ۱) مدل یکپارچه مکانیابی - موجودی

تابع هدف اول از مجموع معادلات (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۷)، (۱۰)، (۱۴) و (۱۶) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1 = & \left[ \sum_i \sum_l FCW_i^l \times W_i^l + \sum_j \sum_l FCY_j^l \times Y_j^l + \sum_{j'} \sum_l FCZ_{j'}^l \times \right. \\ & \left. Z_{j'}^l \right] + \left[ \sum_k \sum_{j'} S_{kj'} IC_{j'} + \sum_i \sum_m \bar{D}_{im} REP_{mi} + \sum_j \sum_e X_{je} OP_j + \right. \\ & \left. \sum_r \sum_{j'} K_{j'r} DC_r \right] + \left[ \sum_i \sum_m \sum_j D_i^l \alpha_m F_{ij} T_m^c + \sum_i \sum_j D_{ij}^{ll} F_{ij} T^c + \right. \\ & \left. \sum_j \sum_e D_{je}^{JE} X_{je} T^c + \sum_K \sum_{j'} D_{kj'}^{KJ'} S_{kj} T^c + \sum_j \sum_{j'} D_{jj'}^{JJ'} Z_{j'} T^c + \right. \\ & \left. \sum_{j'} \sum_i D_{ji}^{J'l} Y_{j'i} T^c + \sum_{j'} \sum_r D_{j'r}^{J'R} K_{j'r} T^c \right] + \\ & \left[ \sum_i \sum_m \sqrt{\sqrt{A^J} \theta h_{mi} \alpha_m \sum_j F_{ij}} \right] + \left[ Z_\alpha^l \theta \sum_i \sum_m h_{mi} \sqrt{LT_i \alpha_m \sum_j \left( \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j \right)^2} \right] + \\ & \left[ \sum_j \sqrt{\sqrt{A^J} \theta h \sum_e X_{je}} \right] + \\ & \left[ Z_\alpha^l \theta h \sum_j \sqrt{\sum_i LT_{ij} \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j^2} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

۲- تابع هدف دوم در صدد کمینه کردن مجموع تقاضای پاسخ داده نشده‌ی مشتریان ثانویه می‌باشد.

$$\text{Min} f_r = \sum_e S_e \quad (18)$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_i X_{je} = \mu_e - S_e \quad \forall e \quad (19)$$

$$\sum_e X_{je} \leq \sum_l \text{Cap} Y_j^l \times Y_j^l \quad \forall j \quad (20)$$

$$\sum_{j'} S_{kj'} \leq R_k \quad \forall k \quad (21)$$

$$\sum_{j'} S_{kj'} \leq \sum_l \text{Cap} Z_{j'}^l \times Z_{j'}^l \quad \forall j' \quad (22)$$

$$\sum_e X_{je} \leq \sum_i F_{ij} + \sum_{j'} Z_{j'}^l \quad \forall j \quad (23)$$

$$\sum_i Z_{j'}^l = \sum_k S_{kj'} R^Y \quad \forall j' \quad (24)$$

$$\sum_i Y_{j'i} = \sum_k S_{kj'} R^R \quad \forall j' \quad (25)$$

$$\sum_{j'} Y_{j'i} \leq \sum_l \text{Cap} W_i^l \times W_i^l \quad \forall i \quad (26)$$

$$\sum_i F_{ij} \leq \sum_{j'} Y_{j'i} \quad \forall i \quad (27)$$

$$\sum_r K_{j'r} = \sum_k S_{kj'} R^D \quad \forall r \quad (28)$$

$$\sum_i W_i^l \leq 1 \quad \forall i \quad (29)$$

$$\sum_j Y_j^l \leq 1 \quad \forall j \quad (30)$$

$$\sum_{j'} Z_{j'}^l \leq 1 \quad \forall j' \quad (31)$$

$$W_i^l, Y_j^l, Z_{j'}^l \in \{0, 1\} \quad (32)$$

$$F_{ij}, X_{je}, S_{kj'}, Z_{j'}^l, Y_{j'i}, K_{j'r}, S_e \geq 0 \quad (33)$$

محدودیت (۱۹) میزان تقاضای پاسخ داده نشده مشتری ثانویه  $e$  را محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۰) بیان می‌کند که مقدار جریان خروجی از مرکز توزیع  $J$  (تقاضایی که توسط مرکز توزیع  $J$  پاسخ داده شده است) نبایستی بیشتر از ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت (۲۱) بر این موضوع تاکید دارد که میزان جریان‌های بازگشتی از هر مشتری به تمامی مراکز جمع‌آوری نبایستی از مقدار بازگشتی‌های مشتری اولیه  $k$  تجاوز کند. محدودیت (۲۲) بیانگر این است که میزان جریان‌های ورودی به هر مرکز

جمع‌آوری نایبستی بیشتر از ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت (۲۳) بیان می‌کند که مجموع جریان خروجی از هر مرکز توزیع به تمامی مشتریان بایستی کمتر یا مساوی با مجموع جریان ورودی به آن مرکز (از مراکز جمع‌آوری و تعمیر) باشد. محدودیت (۲۴) بیان می‌کند که مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز جمع‌آوری به تمامی مراکز توزیع بایستی مساوی با نسبتی از کل محصولات ورودی به هر مرکز جمع‌آوری که نیازی به تعمیر ندارند، باشد. همچنین محدودیت (۲۵) نیز بیان می‌کند که مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز جمع‌آوری به تمامی مراکز تعمیر بایستی مساوی با نسبتی از کل محصولات ورودی به هر مرکز جمع‌آوری که نیازمند تعمیر هستند، باشد. محدودیت (۲۶) بیانگر این است که میزان جریان‌های ورودی به هر مرکز تعمیر نایبستی بیشتر از ظرفیت آن مرکز باشد. محدودیت (۲۷) بیان می‌کند که مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز تعمیر بایستی کمتر یا مساوی با مجموع جریان‌های ورودی به آن مرکز باشد. محدودیت (۲۸) نیز بیان می‌کند که مجموع جریان‌های خروجی از هر مرکز جمع‌آوری به تمامی مراکز انهدام بایستی مساوی با نسبتی از کل محصولات ورودی به هر مرکز جمع‌آوری که قراضه تشخیص داده شده‌اند، باشد. محدودیت‌های (۲۹) و (۳۰) و (۳۱) محدودیت‌های سطح ظرفیت می‌باشند و بر این موضوع تاکید دارند که در هر مکان بالقوه حداکثر یک تسهییل با یک سطح ظرفیت می‌تواند احداث شود.

همانطور که مشاهده می‌کنید این مدل دارای تابع هدف غیرخطی و محدودیت‌های خطی است. همچنین امکان خطی‌سازی جملات غیر خطی مربوط به هزینه‌های موجودی در تابع هدف وجود ندارد. همانطور که در ادبیات موضوع آمده، این مساله NP-hard است و برای حل آن از رویکردهای ابتکاری نظیر آزادسازی لاگرانژ، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. در این مقاله، الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه برای حل مدل پیشنهادی، توسعه داده شده‌اند.

## ۲) مدل غیریکپارچه مکانیابی و موجودی

محدودیت‌های این مدل همانند مدل یکپارچه می‌باشد و تفاوت آنها فقط در تابع هدف است. در این حالت ابتدا مساله را با تابع هدف زیر حل می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \text{Min} f_1 = & \left[ \sum_i \sum_l FCW_i^l \times W_i^l + \sum_j \sum_l FCY_j^l \times Y_j^l + \sum_{j'} \sum_l FCZ_{j'}^l \times \right. \\ & \left. + [\sum_k \sum_{j'} S_{kj'} IC_{j'} + \sum_i \sum_m \bar{D}_{im} REP_{mi} + \sum_j \sum_e X_{je} OP_j + \sum_r \sum_{j'} K_{j'r} DC_r] + Z_j^l \right] \\ & \left[ \sum_i \sum_m \sum_j D_{ij}^I \alpha_m F_{ij} T_m^C + \sum_i \sum_j D_{ij}^{JJ} F_{ij} T^C + \sum_j \sum_e D_{je}^{JE} X_{je} T^C + \sum_K \sum_{j'} D_{kj'}^{KJ} S_{kj} T^C + \right. \\ & \left. \sum_j \sum_{j'} D_{jj'}^{JJ'} Z_{j'} T^C + \sum_{j'} \sum_i D_{ji}^{J'I} Y_{ji} T^C + \sum_{j'} \sum_r D_{j'r}^{J'R} K_{j'r} T^C \right] \end{aligned}$$

سپس با توجه به تخصیص‌های بدست آمده، برای هر یک از مراکز توزیع و تعمیر هزینه‌های سفارش - دهی و هزینه‌های نگهداری را بدست می‌آوریم.

$$+ \left[ Z_{\alpha}^l \theta \sum_i \sum_m h_{mi} \sqrt{LT_i \alpha_m \sum_j \left( \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j \right)^2} \right] + \left[ \sum_i \sum_m \sqrt{\sqrt{A^l} \theta h_{mi} \alpha_m \sum_j F_{ij}} \right]$$

$$\left[ \sum_j \sqrt{\sqrt{A^l} \theta h \sum_e X_{je}} \right] + \left[ Z_{\alpha}^l \theta h \sum_j \sqrt{\sum_i LT_{ij} \frac{F_{ij}}{\sum_e X_{je}} \sigma_j^2} \right]$$

### ۲-۳- برتری مدل یکپارچه بر مدل غیریکپارچه

در این قسمت با حل یک مثال عددی، صرفه‌جویی در هزینه‌ها، در صورت یکپارچه‌سازی تصمیمات مکانیابی و موجودی را نشان می‌دهیم و بدین ترتیب برتری مدل یکپارچه اثبات می‌شود. جدول (۱) داده‌ها را با جزئیات نشان می‌دهد. به این منظور یک مساله کوچک با ابعاد  $3 \times 5 \times 2 \times 4 \times 7 \times 2$  (به ترتیب  $i, j, z, r, e, l, m$ ) توسط روش حدی حل شده است. برای حل مساله با روش حدی تابع هدف دوم با مقدار کمبود کمتر مساوی ۳۶۵ به محدودیت‌ها اضافه شده است و برای  $T_m^c = T_m^c = 5$ ، مقدار  $\theta$  را افزایش داده و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. ستون آخر این جدول، تفاوت بین تابع هزینه مسئله غیریکپارچه و یکپارچه می‌باشد. مسائل توسط نرم‌افزار GAMS حل شده‌اند. تمام کارهای محاسباتی بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات ۶۴-bit operating system, Pentium(R) Daul-core CPU RAM: ۳GB انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید میزان صرفه‌جویی در هزینه‌ها همواره مثبت بوده و این امر نشان‌دهنده این است که امکان کاهش هزینه‌ها با یکپارچه‌سازی تصمیمات سطح استراتژیک و تاکتیکی وجود دارد.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای ورودی

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
$h$	۱۰۰	$R_k$	~ یکنواخت (۲۰۰ و ۳۵۰)
$h_{mi}$	۵۰	$LT_i, LT_{ij}$	~ یکنواخت (۰.۱ و ۰.۵)
$A^l, A^j$	۵۰۰	$OP_j, IC_j, DC_r$	~ یکنواخت (۵ و ۲۰)
$Z_{\alpha}$	۱.۹۶	$REP_{mi}$	~ یکنواخت (۳۰ و ۷۰)
$R^Y$	۰.۴	$FCW_j^l, FCY_j^l, FCZ_j^l$	~ یکنواخت (۵۰۰۰ و ۲۵۰۰۰۰)
$R^R$	۰.۵	$CapW_j^l, CapY_j^l, CapZ_j^l$	~ یکنواخت (۲۰۰ و ۸۰۰)
$R^D$	۰.۱	$D_i^l, D_{ij}^l, D_{je}^{JE}, D_{kj}^{KJ}, D_{j'j}^{J'J}, D_{j'i}^{J'I}, D_{j'r}^{J'R}$	~ یکنواخت (۱۰ و ۲۰۰)
$\mu_e$	~ یکنواخت (۱۵۰ و ۳۰۰)	$\alpha_m$	~ یکنواخت (۰.۵ و ۰.۹)

جدول (۲): تعداد مراکز باز شده در نتیجه افزایش  $\theta$

مدل غیر یکپارچه				مدل یکپارچه			
میزان صرفه‌جویی در هزینه (تابع هزینه مدل غیر یکپارچه - تابع هزینه مدل یکپارچه)	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد مراکز توزیع	تعداد مراکز تعمیر	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد مراکز توزیع	تعداد مراکز تعمیر	
$\theta = 10$	۴	۲	۲	۴	۴	۲	۳۱۰۵۰۲۱
$\theta = 30$	۴	۳	۲	۳	۴	۲	۱۸۵۶۰۴۴
$\theta = 60$	۴	۲	۲	۳	۴	۲	۱۲۵۰۹۹۸

#### ۴- تحلیل حساسیت جهت اعتبارسنجی مدل

##### ۴-۱- اثر هزینه‌های حمل و نقل

به منظور بررسی اثر هزینه‌های حمل و نقل  $\theta = 1$  تنظیم کردیم. جدول (۳) میزان حساسیت تعداد مراکز احداث شده در نتیجه تغییرات مقادیر پارامترهای  $T^c, T_m^c$  را نشان می‌دهد.

جدول (۳): افزایش تعداد مراکز احداث شده با افزایش  $T^c, T_m^c$

$T^c = T_m^c$	۰.۵	۱	۲	۴	۶
تعداد مراکز تعمیر احداث شده	۲	۲	۲	۳	۳
تعداد مراکز توزیع احداث شده	۲	۳	۳	۳	۳
تعداد مراکز جمع‌آوری احداث شده	۲	۲	۳	۳	۴

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش در مقادیر پارامترهای  $T^c, T_m^c$  تعداد مراکز تعمیر، توزیع و جمع‌آوری احداث شده به منظور کمتر شدن فاصله بین تسهیلات در لایه‌های مختلف که جریان کالا بین آنها برقرار است و کاهش هزینه‌های حمل و نقل، افزایش می‌یابد.

#### ۲-۴- اثر هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات

برای انجام این تحلیل حساسیت  $T^c = T_m^c = ۶$  و  $\theta = ۱$  در نظر گرفتیم. جدول (۴): کاهش مراکز احداث شده با افزایش هزینه‌های ثابت

$FCW_i^l = FCY_j^l = FCZ_{j'}^l$	$\begin{pmatrix} 6 \\ \vdots \\ 6 \\ \vdots \\ 6 \\ \vdots \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ \vdots \\ 6 \\ \vdots \\ 6 \\ \vdots \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5 \\ \vdots \\ 5 \\ \vdots \\ 5 \\ \vdots \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5 \\ \vdots \\ 5 \\ \vdots \\ 5 \\ \vdots \end{pmatrix}$
این هزینه‌ها دارای توزیع یکنواخت در بازه‌های تعریف شده می‌باشند				
تعداد مراکز تعمیر احداث شده	۳	۳	۲	۲
تعداد مراکز توزیع احداث شده	۴	۳	۳	۲
تعداد مراکز جمع‌آوری احداث شده	۴	۴	۲	۲

همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌های ثابت تسهیلات تعداد مکان‌های احداث شده کاهش می‌یابد. همچنین به علت محدودیت ظرفیت تسهیلات هر چقدر هم که این هزینه زیاد شود تعداد مراکز تعمیر، توزیع و جمع‌آوری احداث شده نمی‌تواند کمتر از ۲ شود.

#### ۳-۴- اثر هزینه‌های موجودی

به منظور مطالعه اثر این هزینه  $T^c = T_m^c = ۲$  در نظر گرفتیم و ضریب هزینه نگهداری یعنی  $\theta$  را تغییر داده‌ایم.

جدول (۵): کاهش تعداد مراکز احداث شده با افزایش  $\theta$

$\theta$	۱	۱۰	۲۰	۵۰
تعداد مراکز تعمیر احداث شده	۳	۳	۲	۲
تعداد مراکز توزیع احداث شده	۳	۳	۳	۲
تعداد مراکز جمع‌آوری احداث شده	۴	۴	۳	۲

همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود با افزایش  $\theta$  تعداد مراکز احداث شده به منظور کم شدن هزینه‌های موجودی و هزینه‌های نگهداری موجودی اطمینان (مفهومی از ریسک اشتراکی)، کاهش می‌یابد.

## ۵- حل مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری NSGA-II و SPEA-II

در این مقاله دو الگوریتم برای حل مدل غیرخطی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود دو تابع هدف در مدل ریاضی تعریف شده، که در آن تابع هدف اول دارای عبارات غیرخطی می‌باشد، ترجیح دادیم که از الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه استفاده کنیم. همچنین از آنجایی که این اهداف در تضاد با یکدیگر می‌باشند، الگوریتم‌هایی که بتوانند جبهه پارتو را بدست آورند، برای حل این مسئله در اولویت هستند. مشخصه‌های ذاتی الگوریتم‌های ژنتیک نشان می‌دهد که چرا این الگوریتم‌ها می‌توانند رویکردی مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه باشند. مشخصه‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک، جستجوی چندبعدی و سراسری با نگهداری جمعیت جواب‌ها از نسلی به نسل دیگر می‌باشد. ماهیت بر مبنای جمعیت بودن الگوریتم ژنتیک برای جستجوی جواب‌های پارتو مفید می‌باشد [۵۷]. چندین الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه شده که موفق‌ترین آنها الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم می‌باشند.

### ۱-۵- الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نوع دوم

مجموعه جواب‌های بهینه پارتوی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف متضاد توسط الگوریتم تکاملی چندهدفه با ماهیت بر مبنای جمعیت قابل ارائه می‌باشد (Sadeghi, Sadeghi, ۲۰۱۴). (Akhavan Niaki, ۲۰۱۴).

الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نوع دوم یکی از کاراترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است که توسط دب و همکارانش (Deb et al, ۲۰۰۰) ارائه شده است. جزئیات بیشتر این الگوریتم در زیر آمده است:

پارامترهای NSGA-II بدین صورت تنظیم شده‌اند: تعداد نسل‌ها ( $T_{max}=100$ ) که معیار توقف را تعیین می‌کند، اندازه جمعیت ( $PopSize=50$ )، احتمال تقاطع ( $P_c=0.6$ )، به عبارت دیگر، یک کروموزوم با احتمال  $P_c=0.6$  تقاطع خواهد کرد و احتمال جهش برای هر ژن  $P_m=0.3$  است. همچنین کروموزوم‌ها طوری طراحی شده‌اند که محدودیت‌های مساله را پوشش می‌دهند (Pishvae et al, ۲۰۱۰). کروموزوم طراحی شده برای حل مساله دارای دو بخش می‌باشد. بخش اول کروموزوم ماتریسی با ابعاد  $1 \times k$  و بخش دوم آن ماتریسی با ابعاد  $(K+J'+J'+R+J'+J'+J'+I+I+J+J+E)$  می‌باشد. برای انجام عمل تقاطع بر روی بخش اول کروموزوم از عملگر تقاطع تک نقطه‌ای<sup>۵۸</sup> استفاده شده است. همچنین برای انجام عمل جهش بر روی قسمت اول کروموزوم، ابتدا یکی از ژن‌ها را به تصادف انتخاب کرده و به جای عدد موجود در

<sup>۵۸</sup> Single-Point Crossover

ژن انتخابی، عدد تصادفی تولید شده در بازه‌ی ۰ و ۱ را قرار می‌دهیم. بایستی دقت شود که این عدد تولید شده مشابه عدد موجود درون آن ژن نباشد. همچنین برای انجام عمل تقاطع و جهش بر روی قسمت دوم کروموزوم از مقاله پیشوایی و همکارانش استفاده شده است [۲۱]. نحوه‌ی انتخاب والد نیز به این صورت می‌باشد: ۱- ابتدا دو عضو از جمعیت به تصادف انتخاب می‌شوند ۲- اگر رتبه‌ی دو عضو انتخاب شده یکسان نبود، عضوی که دارای رتبه‌ی کمتر است برنده می‌شود ۳- در غیر این صورت عضوی که دارای فاصله ازدحامی<sup>۹</sup> بیشتر است انتخاب می‌شود. فاصله‌ی ازدحامی برای مسئله‌ی دوهدفه توسط رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد. در رابطه‌ی زیر  $X_{i-1}, X_i, X_{i+1}$  سه جواب متوالی متعلق به یک مرز مشخص می‌باشند.  $f_1(X_i), f_2(X_i)$  نیز به ترتیب مقدار تابع هدف اول و دوم برای  $X_i$  می‌باشند.

$$CD_i = \frac{|f_1(x_{i+1}) - f_1(x_{i-1})|}{f_1^{max} - f_1^{min}} + \frac{|f_2(x_{i+1}) - f_2(x_{i-1})|}{f_2^{max} - f_2^{min}} \quad (34)$$

$f_1^{max}, f_1^{min}, f_2^{max}, f_2^{min}$  مقادیر ماکزیمم توابع هدف اول و دوم در مرز مربوطه و  $f_1^{min}, f_2^{min}$  مقادیر مینیمم توابع هدف اول و دوم در مرز مربوطه می‌باشند.

## ۲-۵- الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم

الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم (Zitzler, Laumanns, Thiele, ۲۰۰۱) عمل جستجو را به خوبی انجام می‌دهد. الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم عملیات مهمی نظیر آرشو کروموزوم-های با میزان برازندگی خوب، تخمین تراکم و تخصیص برازندگی را شامل می‌شود و قادر به بدست آوردن جمعیتی با دقت و تنوع است.

پارامترهای الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم بدین صورت تنظیم شده‌اند: تعداد نسل‌ها ( $Tmax=100$ ) که معیار توقف را تعیین می‌کند، اندازه جمعیت ( $PopSize=90$ )، اندازه آرشو ( $ArcSize=50$ )، احتمال تقاطع ( $Pc=0.7$ )، به عبارت دیگر، یک کروموزوم با احتمال  $Pc=0.7$  تقاطع خواهد کرد و احتمال جهش برای هر ژن ( $Pm=0.3$ ) که نشان می‌دهد که یک ژن با احتمال  $Pm=0.3$  جهش خواهد یافت.

<sup>۹</sup> Crowding distance



### ۳-۵- اعتبارسنجی الگوریتم‌های فراابتکاری

در این بخش عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. این الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل با اندازه کوچک (نمونه مسائل ۲،۱ و ۳) با رویکرد حدی (که توسط نرم‌افزار گمز حل می‌شوند)، مقایسه شده‌اند. روش حدی یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به تقریب خوبی از جواب‌های بهینه پارتو است که تصمیم‌گیری در مسائل چندهدفه را تسهیل می‌کند (Mousazadeh, Torabi, Zahiri, ۲۰۱۵).

هر دو الگوریتم فراابتکاری بر روی مسائل آزمایشی ۲،۱ و ۳ تست شده‌اند (جدول (۶) را ببینید)، پارامترهای ورودی برای حل مسائل نیز مطابق جدول (۷) می‌باشد.

به منظور آزمودن کارایی جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم، این الگوریتم‌ها در محیط نرم افزار متلب پیاده‌سازی و نتایج حاصل از اجرای آنها در مسائل آزمایشی ۲،۱ و ۳، با نتایج حل دقیق بدست آمده از نرم‌افزار گمز مقایسه گردیده است. هر یک از نمونه مسائل ۳ بار اجرا شده و متوسط نتایج ثبت شده‌اند.

برای مقایسه‌ی جواب‌های پارتوی بدست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی با جواب دقیق حاصله از نرم‌افزار گمز، یک مدل تک‌هدفه، با ثابت نگه‌داشتن تابع هدف اول (هزینه) به عنوان تابع هدف اصلی و انتقال تابع هدف دوم (کمبود) به محدودیت‌ها، در نظر گرفته می‌شود. مقدار بهینه‌ی تابع هدف دوم در هر جواب بدست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی، به عنوان مقدار سمت راست محدودیت اضافه شده در گمز در نظر گرفته می‌شود. مدل حاصله برای هر جواب بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم، به وسیله‌ی نرم‌افزار گمز حل شده و مقدار بهینه‌ی بدست آمده، با مقدار متناظر آن که از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم بدست می‌آید، مقایسه می‌شوند. بنابراین زمان محاسباتی گزارش شده برای نرم‌افزار گمز، مجموع زمان‌های محاسباتی این مسائل بهینه‌سازی برای یک مجموعه جواب پارتو می‌باشد. بنابراین برای محاسبه‌ی خطای جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم از فرمول زیر استفاده می‌شود.

به منظور آزمودن کارایی جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم، این الگوریتم‌ها در محیط نرم افزار متلب پیاده‌سازی و نتایج حاصل از اجرای آنها در مسائل آزمایشی ۲،۱ و ۳، با نتایج حل دقیق بدست آمده از نرم‌افزار گمز مقایسه گردیده است. هر یک از نمونه مسائل ۳ بار اجرا شده و متوسط نتایج ثبت شده‌اند.

برای مقایسه‌ی جواب‌های پارتوی بدست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی با جواب دقیق حاصله از نرم‌افزار گمز، یک مدل تک‌هدفه، با ثابت نگه‌داشتن تابع هدف اول (هزینه) به عنوان تابع هدف اصلی

و انتقال تابع هدف دوم (کمبود) به محدودیت‌ها، در نظر گرفته می‌شود. مقدار بهینه‌ی تابع هدف دوم در هر جواب بدست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی، به عنوان مقدار سمت راست محدودیت اضافه شده در گمز در نظر گرفته می‌شود. مدل حاصله برای هر جواب بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم، به وسیله‌ی نرم‌افزار گمز حل شده و مقدار بهینه‌ی بدست آمده، با مقدار متناظر آن که از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم بدست می‌آید، مقایسه می‌شوند. بنابراین زمان محاسباتی گزارش شده برای نرم‌افزار گمز، مجموع زمان‌های محاسباتی این مسائل بهینه‌سازی برای یک مجموعه جواب پارتو می‌باشد. بنابراین برای محاسبه‌ی خطای جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$\%erro = \sum_{i=1}^{|P_{NS}|} \frac{W_1^i_{NSGA2} - W_1^i_{OPT}}{W_1^i_{OPT}} \times \frac{100}{|P_{NS}|} \quad (35)$$

جدول (۶): اندازه مسائل آزمایشی

تعداد سطوح ظرفیت ممکن	تعداد قطعات قابل تعویض	تعداد مشتریان ثانویه	تعداد مشتریان اولیه	تعداد مراکز بالقوه باز یافت	تعداد مراکز بالقوه جمع-آوری	تعداد مراکز بالقوه توزیع	تعداد مراکز	تعداد شماره‌ی مساله نمونه
۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱
۲	۲	۴	۳	۲	۵	۴	۳	۲
۲	۲	۶	۴	۲	۶	۵	۴	۳
۲	۳	۸	۷	۳	۱۰	۱۰	۷	۴
۳	۳	۱۰	۸	۳	۱۵	۱۴	۱۲	۵
۳	۴	۱۴	۱۲	۴	۱۵	۱۵	۱۵	۶
۳	۴	۱۸	۱۵	۴	۲۰	۲۰	۱۵	۷
۳	۵	۲۰	۱۸	۵	۲۰	۲۵	۲۰	۸
۴	۵	۲۵	۲۲	۵	۳۰	۳۰	۲۵	۹
۴	۶	۳۰	۲۵	۵	۴۰	۳۵	۳۰	۱۰

جدول (۷): مقادیر پارامترهای ورودی برای حل مسائل آزمایشی

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
$h$	۱۰۰	$R_k$	~ یکنواخت (۳۵۰ و ۵۰۰)
$A^I, A^J$	۹۰۰۰	$h_{mi}$	~ یکنواخت (۴۰ و ۸۰)
$Z_\alpha$	۱.۹۶	$LT_i, LT_{ij}$	~ یکنواخت (۰.۰۵ و ۰.۱)
$\theta$	۱	$OP_j, IC_j', DC_r$	~ یکنواخت (۲۰ و ۵۰)

$T^c$	۰.۵	$REP_{mi}$	~ یکنواخت (۱۰۰ و ۲۰۰)
$T_m^c$	۰.۳	$FCW_i^l$	~ یکنواخت (۵۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰)
$R^Y$	۰.۴	$FCY_{j'}^l, FCZ_{j'}^l$	~ یکنواخت (۱۰۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰۰)
$R^R$	۰.۵	$CapW_{j'}^l$	~ یکنواخت (۲۰۰ و ۸۰۰)
$R^D$	۰.۱	$CapY_{j'}^l, CapZ_{j'}^l$	~ یکنواخت (۵۰۰ و ۱۵۰۰)
$\mu_e$	~ یکنواخت (۴۰۰ و ۵۵۰)	$D_i^l, D_{ij}^{IJ}, D_{je}^{JE}, D_{kj'}^{KJ'}, D_{j'j}^{J'J}, D_{j'i}^{J'I}, D_{j'r}^{J'R}$	~ یکنواخت (۱۰ و ۲۰۰)
$\theta_e$	~ یکنواخت (۵ و ۸)	$\alpha_m$	~ یکنواخت (۰.۵ و ۰.۹)

جدول (۸): محاسبه میانگین انحراف الگوریتم‌های استفاده شده

شماره مساله نمونه	متوسط تعداد جواب -		متوسط زمان اجرا				میانگین خطا (%)	
	های پارتو		NSGA-II		SPEA-II		NSGA-II	SPEA-II
	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	GAMS	SPEA-II	GAMS		
۱	۳۳.۳	۴۳.۷	۹۰.۶۳۷	۱۰۷۳.۷۵	۱۶۳.۹۳۶	۱۲۷۸.۹۸	۱.۱۳	۱.۴۱
۲	۳۶.۷	۴۷	۹۶.۳۵۵	۲۷۶۵.۳۳	۱۷۵.۴۵۷	۳۰۵۶.۶۱	۲.۸۵	۴.۸۵
۳	۳۹.۶	۴۸	۱۰۱.۴۷۱	۷۶۰۷.۴۳	۱۷۹.۴۷۵	۸۹۲۰.۹۶	۵.۷۵	۷.۴۳

جدول (۹): مقایسه‌ی الگوریتم‌های پیشنهادی

مساله	NSGA-II						SPEA-II					
	MSI	QM	SI	MID	CPU time	NPI	MSI	QM	SI	MID	CPU	NPI
۱	۱۰۲۵۷۴۴.	۰.۵۵۷	۱۶	۰.۸۹۶۱	۹۰.۶۳	۳۳	۱۰۲۵۷۴	۰.۵۱۲	۱۹	۰.۸۱۴۹	۱	۴
	۴	۱	۳۸.				۴.۴	۲	۵۰.			۶
			۳۸						۶۸			۳
												۹
۲	۱۳۷۳۳۰۰.	۰.۵۸۹	۲۷	۰.۸۰۲۴	۹۶.۳۵	۳۳	۳۱۲۵۶۴	۰.۴۱۵	۴۹	۰.۷۷۵۵	۱	۴
	۱	۵	۰۰.				۷	۵	۰۲.			۷
			۳۲						۱۷			۵
												۴
											۵	

۳	۱۷۹۹۶۶۶.	۰.۵۷۳	۱۸	۰.۸۵۵۳	۱۰۱.۴۱	۳۶	۱۸۴۷۴۴	۰.۴۲۹	۱۳	۰.۷۵۱۸	۱	۴
	۱	۳	۳۱.				۷.۵	۷	۷۶.		۷	۸
			۵						۸		۹	
											.	
											۴	
											۷	
۴	۲۱۶۲۵۵۹	۰.۵۷۸	۲۹	۰.۷۷۶۹	۱۰۹.۰۴	۴۲	۲۲۴۳۷۳	۰.۴۲۱	۱۶	۰.۷۲۲۴	۱	۵
		۱	۱۷.				۷.۸	۹	۶۹.		۹	.
			۱۲						۱۵		۶	
			۱								.	
											۷	
											۹	
۵	۲۸۱۴۱۸۳.	۰.۵۲۳	۴۳	۰.۷۶۸۳	۱۱۵.۰۵	۴۷	۲۹۷۶۹۲	۰.۴۷۶	۲۲	۰.۷۱۲۸	۲	۵
	۷	۱	۵۰.				۷.۱	۹	۵۷.		۱	.
			۴۲						۷۱		۲	
											.	
											۵	
											۴	
۶	۳۹۳۶۲۱۵.	۰.۴۸۴	۵۶	۰.۷۳۲۲	۱۲۲.۹۴	۴۷	۳۹۳۹۱۱	۰.۵۱۵	۳۷	۰.۷۱۶۳	۲	۵
	۲	۵	۰.۳.				۲.۸	۵	۴۶.		۱	.
			۵۹						۲۶		۹	
											.	
											.	
											۷	
۷	۴۴۴۶۶۳۵.	۰.۴۸۴	۶۰	۰.۷۱۲۰	۱۳۶.۸۶	۴۹	۵۵۲۴۷۶	۰.۵۱۵	۶۶	۰.۶۶۶۸	۲	۵
	۱	۵	۰.۷.				۱.۷	۵	۲۷.		۲	.
			۱۸						۳۵		۸	
											.	
											۸	
											۶	
۸	۶۳۴۵۵۴۸	۰.۴۹۴	۶۳	۰.۷۵۴۰	۱۴۵.۶۹	۴۷	۵۲۶۷۵۲	۰.۵۰۵	۷۰	۰.۶۶۲۳	۲	۵
		۹	۳۲.				۹.۱	۱	۱۳.		۴	.
			۵۸						۸۳		.	
											.	
											۱	
											۳	
۹	۴۴۳۶۶۵۲.	۰.۴۸۹	۱۰	۰.۷۹۱۲	۱۴۸.۸	۴۸	۶۷۸۵۶۳	۰.۵۱۰	۹۳	۰.۷۶۶۳	۲	۵
	۳	۸	۳۲				۲.۱	۲	۱۹.		۷	.
			۱۰						۵۹		۳	
			۴								.	
											۱	
											۷	

۱	۶۴۰۴۴۸۴.	۰.۴۷۹	۱۲	۰.۷۹۲۲	۱۵۷.۵۸	۴۷	۸۲۲۳۹۵	۰.۵۲۰	۹۴	۰.۷۹۶۲	۳	۵
۰	۹	۲	۵۵				۹۶	۸	۶۷.		۱	۰
			۶.۵						۸		۰	۰
			۹								۹	۷

در رابطه‌ی (۳۵)،  $P_{NS}$  مجموعه‌ی جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم را مشخص می‌کند و  $W_1^i_{NSGA2}$  و  $W_1^i_{OPT}$  به ترتیب مقادیر بدست آمده‌ی تابع هدف اول توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و نرم‌افزار گمز برای جواب پارتوی  $i$ -ام می‌باشند. همچنین خطای جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم توسط فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\%erro = \sum_{i=1}^{|P_{SP}|} \frac{W_1^i_{SPEA2} - W_1^i_{OPT}}{W_1^i_{OPT}} \times \frac{100}{|P_{SP}|} \quad (36)$$

در رابطه‌ی (۳۶)،  $P_{SP}$  مجموعه‌ی جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم را مشخص می‌کند و  $W_1^i_{SPEA2}$  و  $W_1^i_{OPT}$  به ترتیب مقادیر بدست آمده‌ی تابع هدف اول توسط الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم و نرم‌افزار گمز برای جواب پارتوی  $i$ -ام می‌باشند.

نتایج مقایسه‌ها و محاسبات در جدول (۸) آمده است. حال اگر بخواهیم مقایسه‌ای بین دو الگوریتم استفاده شده در مسائل کوچک از لحاظ انحراف از مقدار بهینه داشته باشیم، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم میزان خطای کمتری را نسبت به الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم، نشان می‌دهد.

#### ۴-۵- ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری

شاخص‌های مختلفی مانند تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو<sup>۶۰</sup>، کیفیت جواب‌های بهینه پارتو<sup>۶۱</sup>، زمان اجرا (CPU time) و ... برای اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵۲].

<sup>۶۰</sup> Number of Pareto optimal solutions: NPI

<sup>۶۱</sup> Quality Metric: QM

اولین شاخص، شاخص فاصله‌گذاری<sup>۶۲</sup> یا به عبارتی توزیع یکنواخت جواب‌های بهینه پارتو می‌باشد که چگونگی نزدیکی جواب‌های بهینه پارتو را نشان می‌دهد و توسط رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود:

$$SI = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2\right)} \quad (37)$$

که در آن  $n$  تعداد جواب‌های بهینه پارتو،  $\bar{d}$  میانگین مقادیر  $d_i$ ،  $d_i$  فاصله تا  $i$ امین نزدیک‌ترین جواب بهینه می‌باشد که توسط معادله (۳۸) قابل محاسبه است. اگر در یک مدل دوهدفه مجموعه جواب‌های کارای مسئله به صورت زیر بدست آمده باشد:

$$d_i = \min(|f_1^i - f_1^j| + |f_2^i - f_2^j|) \quad (38)$$

$(f_1^1, f_2^1) \quad (f_1^2, f_2^2) \quad \dots \quad (f_1^n, f_2^n)$

واضح است که مقادیر کوچکتر  $SI$  نشان‌دهنده مقادیر بهتر است.

کیفیت جواب‌ها شاخص دوم می‌باشد. اگر  $P_{NS}$  مجموعه جواب‌های بهینه پارتو بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و  $P_{SP}$  مجموعه جواب‌های بهینه پارتو بدست آمده توسط الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم را مشخص کند، آنگاه  $P$  اجتماع این دو مجموعه می‌باشد  $(P = P_{NS} \cup P_{SP})$ . اگر  $P_{ND}$  مجموعه‌ی جواب‌های غیرمغلوب  $P$  را مشخص کند، آنگاه نرخ جواب‌های بهینه پارتو برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم  $(RP_{NS})$  و الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم  $(RP_{SP})$  توسط روابط زیر محاسبه می‌شود که این نرخ هرچقدر بیشتر باشد بیانگر کیفیت بالاتر جواب‌های بدست آمده توسط الگوریتم مربوطه است.

$$PR_1 = \frac{|\{(x \in P_1 | x \in P_{ND})\}|}{|P_1|} \quad (39)$$

$$PR_2 = \frac{|\{(x \in P_2 | x \in P_{ND})\}|}{|P_2|} \quad (40)$$

شاخص دیگر، شاخص بیشترین گسترش<sup>۶۳</sup> جواب‌ها می‌باشد که می‌تواند توسط رابطه (۴۱) محاسبه شود. این شاخص طول قطر مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب ساخته می‌شود را اندازه‌گیری می‌کند.

<sup>۶۲</sup> Spacing Index: SI

<sup>۶۳</sup> Maximum spread Index: MSI

$$MSI = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_j^{max} - f_j^{min})^2} \quad (41)$$

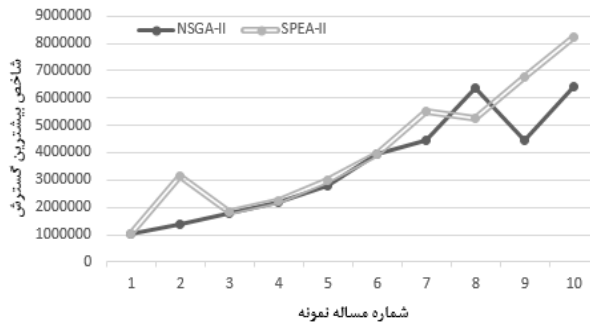
که در آن  $n$  تعداد توابع هدف است و واضح می‌باشد که مقادیر بیشتر برای این شاخص نشان‌دهنده مقادیر بهتر است

شاخص دیگر متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل<sup>۶۴</sup> می‌باشد که توسط معادله (۴۲) قابل محاسبه است. مقدار این شاخص برابر با فاصله‌ی نقاط پارتو الگوریتم مورد بررسی از نقطه‌ی ایده‌آل می‌باشد. با توجه به اینکه تابع هدف اول و دوم هر دو از نوع کمینه‌سازی هستند، در نتیجه نقطه‌ی ایده‌آل برابر مینیمم توابع هدف اول و دوم بدست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی است که در آن  $n$  برابر تعداد نقاط پارتو و همچنین  $f_{i,told}^{min}$  و  $f_{i,told}^{max}$  به ترتیب بیشینه‌ترین و کمینه‌ترین مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف بدست آمده از الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشد.

$$MID = \quad (42)$$

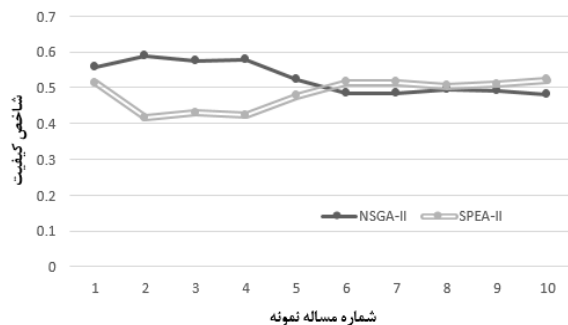
$$\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{i,told} - f_{i,told}^{best}}{f_{i,told}^{max} - f_{i,told}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{i,told} - f_{i,told}^{best}}{f_{i,told}^{max} - f_{i,told}^{min}}\right)^2}$$

در رابطه‌ی بالا مختصات نقطه ایده‌آل برابر با  $(f_1^{best}, f_2^{best})$  می‌باشد. پایین‌تر بودن مقدار این شاخص بیانگر بهتر بودن الگوریتم است. الگوریتم‌ها بر اساس شاخص‌های معرفی شده در بالا ارزیابی شده‌اند و نتایج در جدول (۹) و شکل‌های ۲ تا ۷ گزارش شده است

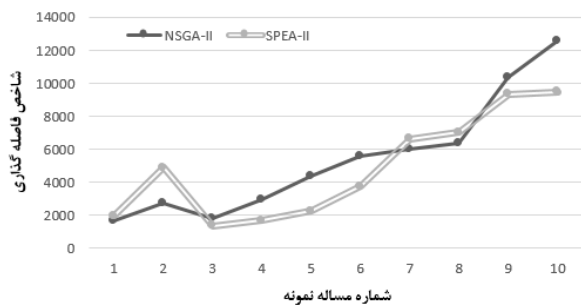


شکل (۲): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر اساس MSI

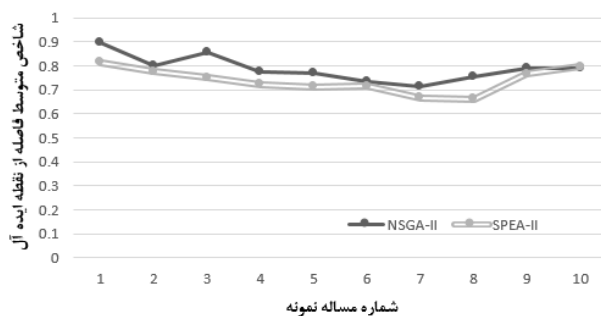
<sup>۶۴</sup> Mean Ideal Distance: MID



شکل (۳): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر اساس QM

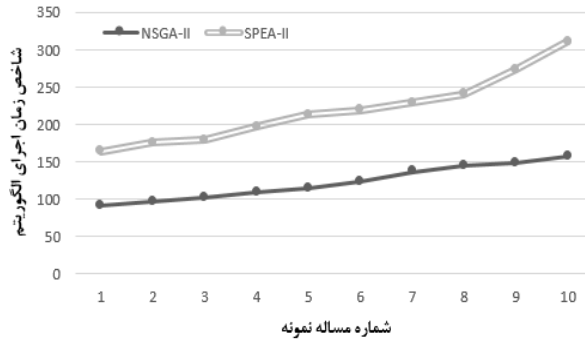


شکل (۴): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر اساس SI

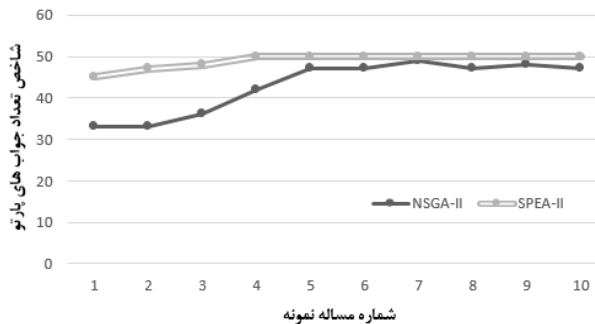


شکل (۵): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر اساس MID





شکل (۶): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر اساس time



شکل (۷): مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II براساس NPI

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بر حسب شاخص بیشترین گسترش الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم به جز در مساله نمونه ۸ بهتر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم عمل کرده است. همچنین در مسائل سایز کوچک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم بر حسب شاخص کیفیت بهتر از الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم عمل کرده و با افزایش سایز مسئله عملکرد این دو الگوریتم به یکدیگر نزدیک شده و در مسائل سایز بزرگ کیفیت جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم بهتر می‌باشد. همانطور که قبلاً گفته شد شاخص فاصله - گذاری هرچه کمتر باشد بهتر است و در مدل ارائه شده‌ی این مقاله به نظر می‌رسد که الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم بر حسب شاخص فاصله‌گذاری عموماً بهتر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم عمل کرده است. بر حسب شاخص‌های متوسط فاصله از نقطه ایده آل و تعداد جواب‌های پارتوی تولید شده الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم همواره بهتر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم عمل کرده است. همچنین بر حسب شاخص زمان اجرای

الگوریتم، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم همواره بهتر از الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم می‌باشد. نتایج حاصل از شاخص‌ها نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ نسبت به الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

در دنیای تجارت امروز، بازارهای ثانویه به یک بازار مهم تبدیل شده‌اند تا کالاهای اضافی و دست دوم را به فروش برسانند. در این مقاله، مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین مکانیابی- موجودی مستقیم/معکوس با ترکیب بازار ثانویه، ارائه شده است. در جریان معکوس، کالاهای مصرف شده از مشتریان اولیه به مراکز جمع‌آوری/بازرسی (جداسازی) منتقل شده و پس از جداسازی بر حسب کیفیت، به مراکز توزیع، تعمیر و یا انهدام منتقل می‌گردند. کالاهای تعمیر شده مجدداً در چرخه‌ی مستقیم به جریان در می‌آیند و از طریق مراکز توزیع به دست مشتریان ثانویه می‌رسند.

در فرمول‌بندی مساله، فرض شده که گرفتن خدمت از چندین منبع در تمامی لایه‌های شبکه مجاز بوده و تمامی تسهیلات دارای محدودیت ظرفیت می‌باشند. همچنین کمبود در برآورده کردن تقاضای مشتریان بازار ثانویه مجاز است.

تحلیل حساسیت جهت اعتبارسنجی مدل انجام شده است. مشاهده کردیم که افزایش در هزینه‌های حمل و نقل منجر به غیرمتمرکز شدن زنجیره‌تأمین در حالی که افزایش در هزینه‌های موجودی منجر به طراحی زنجیره‌تأمین متمرکز می‌شود. در نتیجه‌ی تاثیرات معکوس این دو هزینه، دو مساله مکانیابی و موجودی به صورت توأم در نظر گرفته شده‌اند تا هرچه بهتر بتوانیم به طراحی زنجیره‌تأمین برای مدت طولانی بپردازیم. همچنین تغییر در تعداد مراکز باز شده در نتیجه‌ی افزایش هزینه‌های موجودی نیز برتری مدل یکپارچه بر مدل غیر یکپارچه را اثبات می‌کند زیرا که تغییر در هزینه‌های موجودی توانسته بر تصمیمات استراتژیک اثرگذار باشد.

مساله‌ی پیشنهادی بصورت مدل غیرخطی عددصحیح مختلط فرمول‌بندی شده است. با توجه به ادبیات موضوع، این مساله در ابعاد بزرگ NP-hard می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مساله در ابعاد بزرگ، الگوریتم‌های ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و تکاملی پارتوی قوی نوع دوم برای حل استفاده شدند که پس از حل مسائل نمونه توسط این الگوریتم‌ها و تحلیل نتایج بدست آمده برتری الگوریتم تکاملی پارتوی قوی نوع دوم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ اثبات شد. برای مطالعات آینده نیز بسط مدل با اضافه کردن حالت‌های چندمحصولی و چند دوره‌ای، در نظر گرفتن مسئله‌ی مسیریابی در زنجیره تامین، استفاده از رویکردهای فازی و برنامه‌ریزی استوار برای پارامترهای

غیرقطعی، انجام مطالعه موردی و همچنین استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری کارا برای حل مسائل جدید پیشنهاد می‌گردد.

## ۷- منابع

- Amiri, A. (۲۰۰۶). Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure, *European Journal of Operational Research*, ۱۷۱: ۵۶۷-۵۷۶.
- Diabat, A., Abdallah, T., Henschel, A. (۲۰۱۵). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration, *Computers & Operations Research*, ۵۴: ۲۴۵-۲۵۶.
- Gzara, F., Nematollahi, E., Dasci, A. (۲۰۱۴). Linear location-inventory models for service parts logistics network design, *Computers & Industrial Engineering*, ۶۹: ۵۳-۶۳.
- Leininger, K. (۲۰۰۷). *The U.S. pharmaceutical secondary market. White paper*. Princeton, NJ: IntegriChain.
- Liu, H., Lei, M., Huang, T., & Leong, G. K. (۲۰۱۸). Refurbishing authorization strategy in the secondary market for electrical and electronic products. *International Journal of Production Economics*, ۱۹۵, ۱۹۸-۲۰۹.
- Businesswire. (۲۰۱۴). Consumers choosing refurbished products to be environmentally responsible, according to Liquidity Services' survey. Accessed.
- Diabat, A., Abdallah, T., Henschel, A. (۲۰۱۵). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration, *Computers and Operations Research*, ۵۴: ۲۴۵-۲۵۶.
- Daskin, M.S. (۱۹۹۵). *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*, John Wiley & Sons.
- Drezner, Z. (۱۹۹۵). *Facility location: a survey of applications and methods*, Springer Verlag.
- Pishvaei, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A. (۲۰۱۱). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*, ۳۵: ۶۳۷-۶۴۹.
- Jayaraman, V., Guige Jr, V.D.R., Servastava, R. (۱۹۹۹). A Closed-loop logistics model for Remanufacturing, *Operational Research Society*, ۵۰: ۴۹۷-۵۰۸.

- Jayaramann. V, Paherson. R.A, Rolland. E, (۲۰۰۳), "The design of reverse distribution networks: Models and Solution Procedures, European Journal of operational Research, ۱۵۰: ۱۲۸-۱۴۹.
- Lu, Z., Bostel, N. (۲۰۰۷). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities, Computers & Operations Research, ۳۴: ۲۹۹-۳۲۳.
- Ko, H., Evans, G. (۲۰۰۷). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for ۳PLs, Computers & Operations Research, ۳۴: ۳۴۶-۳۶۶.
- Üster, H., Easwaran, G., Akcali, E., Çetinhaya, S. (۲۰۰۷). Benders decomposition with Alternative Multiple Cuts for a Multi-Product Closed-Loop Supply chain Network design Model, Naval Research Logistics, ۵۴: ۸۹۰-۹۰۷.
- Aras, N., Aksen, D., Tanuur, A.G. (۲۰۰۸). Locating Collection Centers For incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles, European journal of operational Research, ۱۹۱: ۱۲۲۳-۱۲۴۰.
- Du, F., Evans, G.W. (۲۰۰۸). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-Sale service," Computers & operations Research, ۳۵: ۲۶۱۷- ۲۶۳۴.
- Pishvae, M.S., Zanjirani Farahani, R., Dullaert, W. (۲۰۱۰), A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design, Computers & Operations Research, ۳۷: ۱۱۰۰-۱۱۱۲.
- El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (۲۰۱۰). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk, Computers & Industrial Engineering, ۵۸: ۴۲۳-۴۳۱.
- Amin, S.H., Zhang, G. (۲۰۱۲). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach, Expert Systems with Applications, ۳۹: ۶۷۸۲-۶۷۹۱.
- Pishvae, M.S., Razmi, J. (۲۰۱۲), Environment supply chain network design using multi-objective using multi-objective fuzzy mathematical programming, Applied Mathematical Modelling, ۳۶: ۳۴۳۳-۳۴۴۶.
- Amin, S.H., Zhang, G. (۲۰۱۳). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, Applied Mathematical Modelling, ۳۷: ۴۱۶۵-۴۱۷۶.

- Hafeti, S.M., Jolai, F. (۲۰۱۴). Robust and Reliable Forward-Reverse Logistics Network Design under Demand Uncertainty and Facility Disruptions, *Applied Mathematical Modelling*, ۳۸: ۲۶۳۰-۲۶۴۷.
- Keyvanshokoh, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (۲۰۱۳). A Dynamic Pricing Approach for Returned Products in Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design. *Applied Mathematical Modelling*, ۳۷: ۱۰۱۸۲-۱۰۲۰۲.
- Devika, K., Jafarian, A., Nourbakhsh, V. (۲۰۱۴). Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Based on Triple Bottom Line Approach: A Comparison of Metaheuristics Hybridization Techniques, *European Journal of Operational Research* ۲۳۵: ۵۹۴-۶۱۵.
- Ramezani, M., Kimiagari, A.M., Karimi, B. (۲۰۱۴). Closed-loop supply chain network design: A financial approach, *Applied Mathematical Modelling*, ۳۸: ۴۰۹۹-۴۱۱۹.
- Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi- Amiri, A., and Gholamnejad, S. (۲۰۱۶), A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closedloop supply chain network design problem: A numerical illustration in electronics industry, *Journal of Cleaner Production*, ۱۱۳, ۶۶۲-۶۷۳.
- Fathollahi Fard, A.M., Gholian-Jouybari, F., Paydar, M.M., Hajiaghaei-Keshteli, M., (۲۰۱۷). A Bi-Objective Stochastic Closed-loop Supply Chain Network Design Problem Considering Downside Risk. *Industrial engineering & Management systems*, ۱۶: ۳۴۲-۳۶۲.
- Paydar, M.M., Babaveisi, V., Safaei, A.S., (۲۰۱۷). An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. *Computers & Chemical Engineering*, ۱۰۴: ۳۸-۵۵.
- Safaei, A.S., Roozbeh, A., Paydar, M.M., (۲۰۱۷). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain, *Journal of Cleaner Production*, ۱۶۶: ۱۱۵۴-۱۱۶۸.
- Fathollahi-Fard A, Hajiaghaei-Keshteli M, Mirjalili S.,(۲۰۱۸), Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations, *Applied Soft Computing*, ۷۱: ۵۰۵-۵۲۵
- Ghomi-Avili, M Khosrojerdi, A Tavakkoli-Moghaddam, R, (۲۰۱۹), A multi-objective model for the closed-loop supply chain network design with a price-dependent demand, shortage and disruption, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, ۳۶: ۵۲۶۱-۵۲۷۲.
- Baumol, W.J., Wolfe, P. (۱۹۵۸). A warehouse-location problem, *Operations Research*, ۶: ۲۵۲-۲۶۳.

- Daskin, M.S., Coullard, C.R., Shen, Z.M. (۲۰۰۲). An inventory-location model: formulation, solution algorithm and computational results, *Annals of Operational Research*, ۱۱۰: ۸۳-۱۰۶.
- Shen, Z.M., Coullard, C.R., Daskin, M.S. (۲۰۰۳). A joint location-inventory model, *transportation science*, ۳۷: ۴۰-۵۵.
- Miranda, P.A., Garrido, R.A. (۲۰۰۴). Incorporating Inventory Control Decisions into a Strategic Distribution Network Design Model with Stochastic Demand, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, ۴۰: ۱۸۳-۲۰۷
- Sourirajan, K., Ozsen, L., Uzsoy, R. (۲۰۰۷). A single-product network design model with lead time and safety stock considerations, *IIE Transactions*, ۳۹: ۴۱۱-۴۲۴.
- Sourirajan, K., Ozsen, L., Uzsoy, R. (۲۰۰۹). A genetic algorithm for a single product network design model with lead time and safety stock considerations, *European Journal of Operational Research*, ۱۹۷: ۵۹۹-۶۰۸.
- Lin, L., Gen, M., Wang, X. (۲۰۰۹). Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, ۵۶: ۸۵۴-۸۷۳.
- Park, S., Lee, T.E., Sung, C.S. (۲۰۱۰). A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, ۴۶: ۵۶۳-۵۸۱.
- Ahmadi Javid, A., Azad, N. (۲۰۱۰). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, ۴۶: ۵۸۲-۵۹۷.
- Diabat, A., Richard, J., Codrington, C.W. (۲۰۱۳). A Lagrangian relaxation approach to simultaneous strategic and tactical planning in supply chain design, *Annals of Operations Research*, ۲۰۳: ۵۵-۸۰.
- Chen, Q., Li, X., Ouyang, Y. (۲۰۱۱). Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions, *Transportation Research Part B: Methodological*, ۴۵: ۹۹۱-۱۰۰۳.
- Ahmadi-Javid, A., Seddighi, A. (۲۰۱۲). A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks, *Engineering Optimization*, ۴۴: ۶۳۷-۶۵۶.
- Tancrez, J., Lange, J., Semal, P. (۲۰۱۲). A location-inventory model for large three-level supply chains, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, ۴۸: ۴۸۵-۵۰۲.

- Silva, F., Gao, L. (۲۰۱۳). A joint replenishment inventory-location model, *Networks and Spatial Economics*, ۱۳: ۱۰۷-۱۲۲.
- Abdallah, T., Diabat, A., Simchi-Levi, D. (۲۰۱۲). Sustainable supply chain design: a closed-loop formulation and sensitivity analysis, *Production Planning & Control: The Management of Operations*, ۲۳: ۱۲۰-۱۳۳.
- Diabat, A., Abdallah, T., Henschel, A. (۲۰۱۵). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration, *Computers & Operations Research*, ۵۴: ۲۴۵-۲۵۶.
- Asl-Najafi J, Zahiri B, Bozorgi-Amiri A, Taheri-Moghaddam A. (۲۰۱۵). A dynamic closed-loop location inventory problem under disruption risk, *Computers & Industrial Engineering*, ۹۰: ۴۱۴-۴۲۸.
- Ahmadzadeh E, Vahdani B. (۲۰۱۷). A location-inventory pricing model in a closed loop supply chain network with correlated demands and shortages under a periodic review system, *Computers & Chemical Engineering*, ۱۰۱: ۱۴۸-۱۶۶
- Guo H, Li C, Zhang Y, Zhang C and Lu M. (۲۰۱۸). A Location-Inventory Problem in a Closed-Loop Supply Chain with Secondary Market Consideration, *Sustainability*, volume ۱۰, issue ۶.
- Vahdani B, Ahmadzadeh E. (۲۰۱۹). Designing a realistic ICT closed loop supply chain network with integrated decisions under uncertain demand and lead time, *Knowledge-Based Systems*, ۱۷۹: ۳۴-۵۴.
- Gen, M., Cheng, R. (۲۰۰۰). *Genetic algorithms and engineering optimization*, New York: Wiley.
- Sadeghi, J., Sadeghi, S., Akhavan Niaki, S.T. (۲۰۱۴). A hybrid vendor managed inventory and redundancy allocation optimization problem in supply chain management: An NSGA-II with tuned parameters, *Computers & Operations Research*, ۴۱: ۵۳-۶۴.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T. (۲۰۰۰). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, *Lecture notes in computer science*, ۱۹۱۷: ۸۴۹-۸۵۸.
- Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L. (۲۰۰۱). SPEA۲: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, *Technical Report ۱۰۳*, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.

Mousazadeh, M., Torabi, S., Zahiri, B. (۲۰۱۵). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design, *Computers & Chemical Engineering*, ۸۲: ۱۱۵-۱۲۸.