

## بهینه‌سازی چندهدفه مسائله مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی باز در طراحی زنجیره تأمین مصالح ساختمانی: مدل ریاضی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری

محمد رضا جعفری<sup>۱\*</sup>

دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

### چکیده

در این تحقیق مسئله مکان‌یابی و مسیریابی باز در زنجیره تأمین چهار سطحی شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و خرده‌فروشان به‌عنوان یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن عوامل توسعه پایدار ارائه شده است. حمل‌ونقل مواد بین تمام سطوح به‌صورت مستقیم بوده و بین مراکز توزیع و مشتریان و همچنین تولیدکنندگان با مشتریان مسیریابی انجام می‌شود. جریان مواد خام بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان بر اساس مشخصات فنی محصولات نهایی خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، برای هر محصول نهایی، ترکیب موردنیاز از مواد خام به‌عنوان پارامتر ورودی مشخص شده و بر اساس آن میزان موردنیاز از مواد خام برای تولید هر محصول تعیین می‌گردد. در بسیاری از تحقیقات، فرض بر این است که وسایل حمل‌ونقل متعلق به خود سازمان بوده و پس از ارائه خدمت باید به مرکز توزیع بازگردند. در مراکز توزیع نیز به‌منظور ایجاد انعطاف‌پذیری در تأمین تقاضای مشتریان، سطوح مختلف ظرفیتی در نظر گرفته شده که استفاده از هر سطح ظرفیتی دارای میزان هزینه، اثرات زیست‌محیطی و اثرات اجتماعی متفاوتی است جهت حل مدل ریاضی از روش محدودیت اسپیلون در ابعاد کوچک؛ و الگوریتم‌های فرا ابتکاری PESAI، NSGAI و MOGWO در حل مسائل با ابعاد بزرگ استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تأمین ساخت‌وساز پایدار، بهینه‌سازی چندهدفه، ارسال مستقیم، الگوریتم‌های فرا ابتکاری

### ۱- مقدمه

متنوع‌ترین بخش‌های اقتصاد است. این صنعت شامل نصب، نگهداری، تعمیر سازه‌های متحرک، تخریب سازه‌های موجود و توسعه زمین است [۲] و دارای خصوصیات است که آن را از سایر صنایع مجزا می‌کند. طبیعت فیزیکی محصول و غیرقابل انتقال بودن آن، ساختار صنعت، پرهزینه بودن و فرآیندهای ساخت از جمله این خصوصیات می‌باشند.

در دهه گذشته، به‌ویژه در سال‌های اخیر، بسیاری از محققین بر مزایای فلسفه مدیریت زنجیره تأمین در صنعت ساخت‌وساز تأکید کرده‌اند تا بهبود عملکرد ساخت ساز و کاهش ضایعات ناشی از مدیریت و کنترل ناکارآمد مواد را مورد توجه قرار دهند [۱]. صنعت ساخت‌وساز یکی از

<sup>۱\*</sup> عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، نویسنده پاسخگو، پست الکترونیکی jafari\_mohammadreza@yahoo.com نشانی: تهران، مینی سیتی، بلوار ارتش، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵

محصول در این صنعت به درخواست مشتری و بر اساس نیازهای آن طراحی و تولید می‌شود. این صنعت از سه بخش اصلی مشتری/کارفرما، طراحی و ساخت تشکیل می‌شود. یکی از اصلی‌ترین مشکلات در صنعت ساخت‌وساز مجزا بودن این سه بخش و عدم وجود ارتباط مؤثر بین آنها است. نبود ارتباط مؤثر و در نتیجه عدم درک نیازهای مشتری توسط طراح باعث عدم رضایت مشتری از محصول نهایی می‌گردد. این صنعت با ماهیتی پروژه‌ای و موقتی با مشکلاتی از قبیل جدایی بخش‌ها از یکدیگر، اتلاف بالا، بهره‌وری پایین، هزینه و زمان بیش‌ازحد، ارتباط ضعیف، عدم هماهنگی بین بخش‌ها و تعارض ناشی از تأخیر در انجام پروژه مواجه است.

از اواخر دهه ۱۹۸۰، صنعت ساخت‌وساز شاهد راه‌اندازی تعدادی از ابتکارات و نوآوری‌ها در مدیریت زنجیره تأمین بوده است [۳]. به‌طور کلی صنعت معماری، مهندسی و ساخت‌وساز شامل طراحی در زنجیره تأمین ساخت، تعمیر و تکمیل محیط‌زیست ساخته‌شده است [۴]. دو مسئله مورد بحث در مورد زنجیره تأمین ساخت‌وساز عبارت‌اند از: توسعه کارایی عقب‌مانده و افزایش وزن اقتصادی زنجیره تأمین. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حدود ۷۵٪ از گردش سرمایه پیمانکاران اصلی صرف هزینه مواد و نیروی کار می‌شود [۳]. به‌کارگیری مدیریت زنجیره تأمین می‌تواند سبب کاهش هزینه تأمین مواد و نیروی کار و بهبود بهره‌وری و عملکرد در صنعت ساختمان گردد. اصطلاح زنجیره تأمین در اینجا به‌منظور تأمین منابع ساخت‌وساز (مواد، تجهیزات و کارکنان) از نقاط عرضه به محل‌های ساخت‌وساز که مورد استفاده قرار می‌گیرد است [۱]. زنجیره تأمین در ساخت‌وساز بیشتر مربوط به برنامه‌ریزی و هدایت مقادیر مجزای مواد به محل ساخت‌وسازی است که هدف جمع‌آوری مواد ورودی است [۵].

مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز رویکردهای جدیدی برای کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان و سرعت در فرآیندهای ساخت پیشنهاد می‌دهد. مدیریت زنجیره تأمین

همان‌گونه که در صنایع تولیدی باعث صرفه‌جویی هزینه‌ها شده است، می‌تواند در صنعت ساختمان نیز مزایای مشابهی به همراه داشته باشد. هرچند شرکت‌های ساختمانی برخلاف شرکت‌های تولیدی، به‌صورت تولیدکنندگان محصول یکتا و منحصربه‌فرد در یک کارخانه موقت توصیف می‌شوند [۶]. این موقتی بودن پروژه‌ها باعث عدم ایجاد روابط بلندمدت و نبود روابط مؤثر در زنجیره ساخت‌وساز شده است. اهمیت توسعه و حفظ روابط خوب با مشتریان و تأمین‌کنندگان یک عامل کلیدی در عملکرد موفق پروژه‌ها است. مدیریت زنجیره تأمین ساختمان هماهنگی تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین ساختمان و یکپارچه‌سازی فرآیندهای کسب‌وکار و اعضای زنجیره تأمین شامل کارفرما، پیمانکار اصلی، پیمانکار فرعی، تأمین‌کنندگان و غیره را بر عهده دارد.

در این تحقیق تمرکز بر روی یافتن مکان‌های بهینه جهت احداث تسهیلات در سطوح مختلف یک زنجیره تأمین مصالح ساختمانی چهار رده‌ای و انجام مسیریابی مناسب جهت ارسال کالا به مشتریان است. همان‌طور که بیان شد، مسیریابی به‌صورت بازبین سطوح توزیع‌کننده و مشتری و همچنین تولیدکننده و مشتری انجام خواهد شد. توابع هدف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های احداث تسهیلات، تهیه مواد اولیه و تولید محصولات و همچنین ارسال محصول نهایی به مشتریان به‌عنوان تابع هدف اول؛ کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات به‌عنوان تابع هدف دوم و کمینه‌سازی اثرات مخرب اجتماعی به‌عنوان تابع هدف سوم است. از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به در نظر گرفتن امکان ارائه تخفیف در چند سطح از پیش تعیین‌شده و همچنین در نظر گرفتن تقاضای چندحالتی اشاره نمود. به‌منظور ایجاد سهولت در امر انتقال محصول، امکان ارسال محصولات از تولیدکننده به مشتری نهایی نیز به‌عنوان یکی از جنبه‌های گسترشی تحقیق در نظر گرفته شده است. از آنجاکه مسئله مکان‌یابی و مسیریابی جز مسائل NP-Hard است، در این تحقیق سه الگوریتم فرا ابتکاری

تحلیل‌های زمانی مختلف برای تصمیمات تاکتیکی و استراتژیکی پرداختند. آن‌ها به منظور حل مدل از یک روش مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ<sup>۶</sup> استفاده کردند.

شانکار و همکاران (۲۰۱۳) [۱۱] به بررسی یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برای زنجیره تأمین تک کالایی چهارسطحی با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و مکان‌یابی تسهیلات و برآورده شدن حداکثر تقاضای مشتریان پرداختند. در نهایت نیز از الگوریتم MOPSO برای حل مسئله استفاده نمودند. کانزاین و همکاران (۲۰۱۳) [۱۲] در پژوهشی به ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی چندمعیاره و مدلی برای شبکه‌های تأمین زیست‌توده پرداختند. اهداف در نظر گرفته‌شده در این پژوهش شامل بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی انتشار گاز CO<sub>2</sub> است. وو و ژانگ (۲۰۱۴) [۱۳] به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین متشکل از یک منبع خارجی، مجموعه مراکز توزیع بالقوه و مجموعه خرده‌فروشی‌ها تحت شرایط عدم قطعیت در تقاضا برای محصولات چندگانه باهدف کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم پرداختند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای مسئله ارائه نمودند.

سارافها و همکاران (۲۰۱۵) [۱۴] به ارائه یک مدل دوهدفه غیرخطی آمیخته عدد صحیح با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی متوسط دیرکرد محصولات به مراکز توزیع در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پرداختند. در نهایت نیز به منظور حل مدل از سه الگوریتم MOBO<sup>۷</sup>، MOSA و NSGA-II استفاده نمودند. سلیمانی و کنان (۲۰۱۵) [۱۵] از الگوریتم‌های GA و PSO به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شبکه‌های با سایز بزرگ بهره بردند. فتاحی و همکاران (۲۰۱۵) [۱۶] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی آمیخته عدد صحیح خطی در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پویای چندپله‌ای چندکالایی با افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای<sup>۸</sup>

چندهدفه جهت حل مسئله در شرایط دنیای واقعی ارائه شده است.

در ادامه ساختار پژوهش به شرح زیر تقسیم‌بندی شده است: بخش دوم به مرور ادبیات پژوهش می‌پردازد، بخش سوم به بیان مدل پیشنهادی می‌پردازد، در بخش چهارم روش‌های حل مدل پیشنهادی شرح داده می‌شود، بخش پنجم و ششم نتایج محاسباتی را ارائه می‌دهد در نهایت در بخش هفتم نیز به جمع‌بندی و ارائه برخی پیشنهادات برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات

در این بخش به بررسی مهم‌ترین تحقیقات در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و همچنین طراحی شبکه زنجیره تأمین در حوزه ساخت‌وساز پرداخته شده است.

### ۲-۱- طراحی شبکه زنجیره تأمین

در این بخش به ارائه برخی از مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در حوزه‌های مختلف طراحی شبکه زنجیره تأمین پرداخته می‌شود.

تووزکایا و همکاران (۲۰۱۱) [۷] در پژوهشی به ارائه یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه لجستیک معکوس براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP-FTOPSIS و الگوریتم GA در صنعت محموله‌های سفید<sup>۱</sup> ترکیه پرداختند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) [۸] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه فازی جهت طراحی زنجیره تأمین زیست‌محیطی ارائه دادند. اهداف در نظر گرفته‌شده در این پژوهش شامل کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌ها است. در نهایت نیز جهت حل مدل یک رویکرد فازی تعاملی<sup>۲</sup> توسعه داده شده است. در ادامه نیز پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) [۹] به ارائه یک رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی استوار<sup>۳</sup> دوهدفه به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین اجتماعی پرداختند. بدری و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی [۱۰] به ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چندپله‌ای<sup>۴</sup> چندکالایی<sup>۵</sup> با در نظر گرفتن

1- White goods  
2- Interactive fuzzy approach  
3- Robust possibilistic programming  
4- multi-echelon

5-multi-product  
6- Lagrangian Relaxation (LR)  
7- Multi-objective biogeography based optimization  
8- multi-period

پرداختند. به منظور حل مدل نیز از الگوریتم SA بهره برده شده است. حسنی و خسروجردی (۲۰۱۶) [۱۷] در پژوهشی به توسعه یک مدل آمیخته عدد صحیح غیرخطی جهت طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سراسری استوار تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. علاوه بر این نیز از الگوریتم MA مبتنی بر تاگوچی جهت حل مدل استفاده کرده‌اند. چیلس-مارتینز و همکاران (۲۰۱۶) [۱۸] به ارائه یک الگوریتم جدید چندهدفه مبتنی بر SA برای حل یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه خطی آمیخته عدد صحیحی در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین سبز پرداختند. زحل و سلیمانی (۲۰۱۶) [۱۹] به توسعه الگوریتم ACA در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز به منظور حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه و انتشار گاز CO2 پرداختند.

کومار و همکاران (۲۰۱۷) [۲۰] در پژوهش خود از الگوریتم NSGA-II به منظور حل مسئله چندهدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن مسائل روابط اجتماعی، انتشار کربن و ریسک‌های زنجیره تأمین استفاده نمودند. فهیم‌نیا و همکاران (۲۰۱۸) [۲۱] در پژوهش خود یک مدل عدد صحیح غیرخطی آمیخته برای برنامه‌ریزی تاکتیکی زنجیره تأمین سبز ارائه دادند. به منظور حل مدل نیز عملکرد

سه الگوریتم SA، GA و Cross-Entropy را مورد مقایسه قرار دادند که بر این اساس الگوریتم SA می‌تواند نتایج بهتری در زمان محدود تولید کند. تسائو و همکاران (۲۰۱۸) [۲۲] در پژوهشی به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن اهداف پیشینه‌سازی منافع اجتماعی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی پرداختند. در نهایت نیز جهت حل مدل از برنامه‌ریزی چندهدفه احتمالی فازی بهره بردند. قهرمانی-نهر و همکاران (۲۰۱۹) [۲۳] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی استوار جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند. به منظور حل مدل نیز یک الگوریتم جدید مبتنی بر WOA<sup>۱</sup> باهدف کاهش هزینه‌های کل شبکه پیشنهاد دادند. همدان و دیاباب (۲۰۱۹) [۲۴] در پژوهش خود به ارائه مسئله برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای در شبکه زنجیره تأمین خود پرداختند. در نهایت نیز جهت حل مسئله از روش  $\epsilon$ -constraint مسئله سه هدفه را به یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته تک هدفه تبدیل نمودند. در ادامه در جدول (۱) برخی از مهم‌ترین انواع روش‌های حل بکار گرفته‌شده جهت حل مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین اشاره شده است:

جدول (۱) روش‌های حل در طراحی شبکه زنجیره تأمین

| رفرنس | سال  | تابع هدف |    | محیط مسئله |         |      | روش حل |                    |         |
|-------|------|----------|----|------------|---------|------|--------|--------------------|---------|
|       |      | SO       | MO | قطعی       | غیرقطعی |      | دقیق   | غیردقیق            |         |
|       |      |          |    |            | احتمالی | فازی |        | استوار             | ابتکاری |
| [۲۵]  | ۲۰۰۹ |          | ✓  | ✓          |         |      |        |                    | ژنتیک   |
| [۲۶]  | ۲۰۱۰ |          | ✓  | ✓          |         |      |        | روش وزنی           |         |
| [۲۷]  | ۲۰۱۰ |          | ✓  | ✓          |         |      |        | برنامه‌ریزی آرمانی |         |
| [۲۸]  | ۲۰۱۰ |          | ✓  | ✓          |         |      |        | برنامه‌ریزی آرمانی |         |
| [۲۹]  | ۲۰۱۱ |          | ✓  |            |         | ✓    |        | رویکرد فازی        |         |
| [۸]   | ۲۰۱۲ |          | ✓  |            |         | ✓    |        | رویکرد فازی        |         |
| [۹]   | ۲۰۱۲ |          | ✓  |            |         | ✓    |        | بهینه‌سازی استوار  |         |
| [۳۰]  | ۲۰۱۲ |          | ✓  | ✓          |         |      |        |                    | ممتیک   |

1- Whale optimization algorithm (WOA)

ادامه جدول (۱) روش‌های حل در طراحی شبکه زنجیره تأمین

| رفرنس | سال  | تابع هدف |    | محیط مسئله |         |         | روش حل                     |                          |             |
|-------|------|----------|----|------------|---------|---------|----------------------------|--------------------------|-------------|
|       |      | SO       | MO | قطعی       | غیرقطعی |         | دقیق                       | غیردقیق                  |             |
|       |      |          |    |            | فازی    | احتمالی |                            | ابتکاری                  | فرا ابتکاری |
| [۳۱]  | ۲۰۱۳ |          | ✓  | ✓          |         |         | اپسیلون-<br>محدودیت        |                          |             |
| [۳۲]  | ۲۰۱۳ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | ژنتیک چندهدفه            |             |
| [۳۳]  | ۲۰۱۳ |          | ✓  | ✓          |         |         | اپسیلون-<br>محدودیت        |                          |             |
| [۳۴]  | ۲۰۱۳ |          | ✓  |            | ✓       |         | اپسیلون-<br>محدودیت        |                          |             |
| [۳۵]  | ۲۰۱۴ |          | ✓  |            |         | ✓       | رویکرد فازی                |                          |             |
| [۳۶]  | ۲۰۱۴ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | جستجوی<br>همسایگی        |             |
| [۳۷]  | ۲۰۱۴ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | ژنتیک چند هدفه           |             |
| [۳۸]  | ۲۰۱۵ |          | ✓  |            |         | ✓       | برنامه ریزی آرمانی<br>فازی |                          |             |
| [۱۵]  | ۲۰۱۵ | ✓        |    | ✓          |         |         |                            | ازدحام ذرات              |             |
| [۱۷]  | ۲۰۱۶ | ✓        |    |            |         | ✓       |                            | ممتیک                    |             |
| [۱۸]  | ۲۰۱۶ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | شبیه سازی تبرید          |             |
| [۱۹]  | ۲۰۱۶ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | ژنتیک                    |             |
| [۲۰]  | ۲۰۱۷ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | ژنتیک چند هدفه           |             |
| [۲۱]  | ۲۰۱۸ |          | ✓  | ✓          |         |         |                            | ژنتیک-شبیه<br>سازی تبرید |             |
| [۲۲]  | ۲۰۱۸ |          |    |            | ✓       | ✓       | برنامه ریزی آرمانی<br>فازی |                          |             |
| [۲۳]  | ۲۰۱۹ | ✓        |    |            |         | ✓       | ✓                          | گرگ خاکستری              |             |
| [۲۴]  | ۲۰۱۹ |          | ✓  |            | ✓       |         | اپسیلون-<br>محدودیت        |                          |             |

## ۲-۲- طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز

تحقیقات ساختمانی با موضوع زنجیره تأمین زمینه نسبتاً جدیدی است که از اواسط دهه ۱۹۹۰ پدیدار شد. زنجیره تأمین ساخت و ساز شامل تمام فرآیندهای ساختمانی از تقاضای اولیه مشتری/کارفرما، طراحی، ساخت، نگهداری و تخریب نهایی را در برمی گیرد. زنجیره تأمین ساختمان شامل سازمان‌ها و شرکت‌هایی همچون کارفرما، طراح، پیمانکار اصلی، پیمانکاران فرعی، مشاورین و تأمین‌کنندگان است.

با توجه به نتایج حاصل از مرور ادبیات روش‌های مختلفی جهت برخورد با مسائل مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین استفاده شده است؛ اما با توجه به پیچیدگی و گستردگی مسائل شبکه زنجیره تأمین، در سال‌های اخیر تمرکز بیشتر محققین به کارگیری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که در این بین الگوریتم‌های SA، PSO، NSGA-II، GA و SA نسبت به سایر الگوریتم‌ها بیشتر مورد کاربرد قرار گرفته‌اند.

زنجیره تأمین ساختمان شبکه‌ای از سازمان‌ها و روابط بین آن‌ها است که شامل جریان اطلاعات، جریان مواد و خدمات و جریان سرمایه بین اعضای زنجیره تأمین ساختمان است. اریک اریکسن (۲۰۱۰) [۳۹] در پژوهشی به بهبود همکاری و عملکرد زنجیره تأمین ساخت‌وساز برای دستیابی به اهداف کوتاه‌مدت کسب‌وکار و همچنین مزیت‌های رقابتی بلندمدت پرداختند. چنگ و همکاران (۲۰۱۰) [۴۰] به ارائه یک چارچوب سرویس‌گرا به منظور ادغام زنجیره تأمین ساخت‌وساز پرداختند. منگ و همکاران (۲۰۱۱) [۴۱] در پژوهشی به مطالعه ویژگی‌های صنعت ساخت‌وساز و توسعه مدل بلوغ برای اندازه‌گیری و بهبود روابط بین شرکای کلیدی یک زنجیره تأمین ساخت‌وساز پرداختند. ایریزاری و همکاران (۲۰۱۳) [۱] در پژوهشی یک مدل یکپارچه مبتنی بر GIS-BIM ارائه دادند به طوری که قادر است جریان مواد، در دسترس بودن منابع و نقشه زنجیره‌های تأمین را به صورت بصری نشان می‌دهد.

ویمبو و شولهه (۲۰۱۵) [۴۲] در پژوهشی به تجزیه و تحلیل عملکرد زنجیره تأمین در پروژه‌های جاده‌ای پرداختند. این اندازه‌گیری با استفاده از مدل SCOR<sup>۱</sup> به عنوان یک شاخص عملکرد کلیدی با استفاده از روش AHP<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود. لیو و تائو (۲۰۱۵) [۴۳] یک مدل بهینه چندهدفه به منظور خرید و موجودی در شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز سه سطحی ارائه دادند به طوری که هدف کاهش هزینه خرید و تأمین و همچنین زمان تدارک است. وو و بارنز (۲۰۱۶) [۴۴] در پژوهشی به مسئله انتخاب شرکت سبز و زنجیره تأمین ساخت‌وساز با ترکیب روش‌های ANP و برنامه‌ریزی چندهدفه پرداختند به طوری که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند علاوه بر حداکثر رساندن عملکرد تجاری خود، اثرات منفی زیست‌محیطی را نیز به حداقل رسانند. دل-آمیگو و نولانی (۲۰۱۷) [۴۵] به ارائه مسئله مکانیابی تسهیلات دو-پله‌ای<sup>۳</sup> با تقاضای احتمالی برای

معرفی مراکز تثبیت<sup>۴</sup> در زنجیره تأمین ساخت‌وساز در نواحی شهری پرداختند. فنگ و همکاران (۲۰۱۸) [۴۶] به ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر بازی استکلبرگ<sup>۵</sup> جهت یک سیستم ساخت‌وساز-توزیع-تولید در شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز پرداختند. آن‌ها از یک مدل برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای دو-سطحی<sup>۶</sup> به منظور دستیابی به استراتژی تعادلی استفاده نمودند. در نهایت نیز به منظور حل یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر ژنتیک تکامل یافته و بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهاد دادند. در جدیدترین پژوهش گلپیرا (۲۰۲۰) [۴۷] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح به منظور ادغام کردن استراتژی مدیریت موجودی توسط فروشنده در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز چند پروژه‌ای چند منبعی با چند تأمین‌کننده پرداخت. از دیگر تحقیقات می‌توان به ([۴۸]، [۴۹]، [۵۰]، [۵۱]، [۵۲]) اشاره نمود. به طور کلی با مرور تحقیقات ارائه شده در این حوزه مشاهده می‌شود طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز مبتنی بر مدل‌های برنامه‌ریزی و استفاده از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری تاکنون به صورت جامع و کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است.

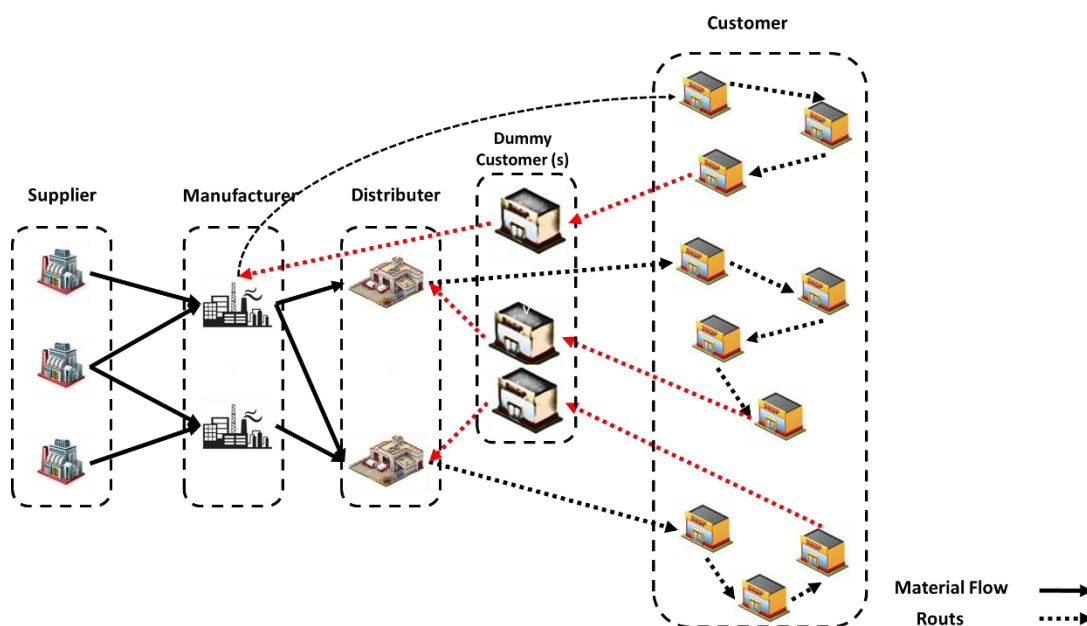
### ۳- بیان مسئله

در این تحقیق مسئله مکان‌یابی و مسیریابی باز در زنجیره تأمین چهار سطحی شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و خرده‌فروشان به عنوان یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظر گرفتن عوامل توسعه پایدار ارائه شده است. ساختار شبکه زنجیره مورد مطالعه به صورت شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. حمل و نقل مواد بین تمام سطوح به صورت مستقیم بوده و بین مراکز توزیع و مشتریان و همچنین تولیدکنندگان با مشتریان مسیریابی انجام می‌شود. جریان مواد خام بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان براساس

1- Supply Chain Operations References  
2- Analytical Hierarchy Process  
3- two-echelon  
4- Consolidation  
5- Stackelberg  
6- Bi-level

واضح است که هر فناوری دارای مزایا و معایب نسبی در هزینه، اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی نسبت به سایر فناوری‌ها است که فناوری نهایی مورد استفاده در هر مرکز تولید، توسط توابع هدف مسئله تعیین می‌گردد. در مراکز توزیع نیز به منظور ایجاد انعطاف‌پذیری در تأمین تقاضای مشتریان، سطوح مختلف ظرفیتی در نظر گرفته شده که استفاده از هر سطح ظرفیتی دارای میزان هزینه، اثرات زیست‌محیطی و اثرات اجتماعی متفاوتی است. همچنین مشتریان می‌توانند با توجه به نوع سفارش‌های خود (خرید دسته‌ای یا تکی) و همچنین حجم خرید، از تخفیف‌های مشخصی برخوردار شوند. این موضوع باعث می‌شود آن‌ها بتوانند بیشتر از سطح تقاضای اولیه خود خرید کنند. مسلماً قیمت فروش محصولات بسته به حجم خرید، نوع تقاضا و سطح تخفیف دریافتی متفاوت بوده که این موضوع توسط مدل تعیین خواهد شد. در سطح تولیدکنندگان و مراکز توزیع، با توجه به معیارهای توسعه پایدار که در قالب توابع هدف مسئله ارائه شده، مکان‌یابی تسهیلات صورت می‌پذیرد.

مشخصات فنی محصولات نهایی خواهد بود. به عبارت دیگر، برای هر محصول نهایی، ترکیب مورد نیاز از مواد خام به عنوان پارامتر ورودی مشخص شده و براساس آن میزان مورد نیاز از مواد خام برای تولید هر محصول تعیین می‌گردد. محصولات نهایی از تولیدکنندگان به سمت مراکز توزیع به صورت مستقیم حمل شده و در نهایت از طریق مسیریابی بهینه، تقاضای نهایی مشتریان ارسال می‌گردد. در بسیاری از تحقیقات، فرض بر این است که وسایل حمل‌ونقل متعلق به خود سازمان بوده و پس از ارائه خدمت باید به مرکز توزیع بازگردند؛ اما در دنیای واقعی بسیاری از شرکت‌ها توانایی خرید و یا مدیریت وسایل حمل‌ونقل شخصی را نداشته و جهت انجام امور حمل‌ونقل از وسایل نقلیه اجاره‌ای استفاده می‌کنند. در این حالت دیگر نیاز به برگشت وسیله نقلیه به مرکز توزیع نبوده و وسایل نقلیه می‌تواند بعد از سرویس‌دهی، سیستم را ترک کنند. در این حالت مسئله مسیریابی باز مطرح می‌شود. در مراکز تولید، از طریق استفاده از فناوری‌های مختلف می‌توان محصولات نهایی را تولید نمود.



شکل (۱) ساختار زنجیره تأمین چهار سطحی تحقیق

محصولات نهایی است. تابع هدف دوم به کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات، احداث تسهیلات و انجام عملیات حمل‌ونقل بین سطوح مختلف می‌پردازد. در نهایت تابع هدف سوم سعی بر بیشینه‌سازی اثرات مثبت

مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق شامل سه تابع هدف است که تابع هدف نخست شامل کمینه‌سازی هزینه‌های احداث تسهیلات، انتقال مواد بین مراکز، استفاده از وسایل نقلیه و هزینه‌های مربوط به تأمین مواد خام و تولید



اجتماعی شامل ایجاد فرصت‌های شغلی ثابت و متغیر از طریق فعال نمودن مراکز تولید و توزیع دارد. محدودیت‌های مسئله شامل محدودیت‌های تضمین ظرفیت تسهیلات و وسایل نقلیه، محدودیت‌های مربوط به ایجاد جریان مناسب کالا بین سطوح مختلف و همچنین محدودیت‌های مربوط به مکان‌یابی مناسب تسهیلات و انجام مسیریابی به صورت باز است. باید توجه داشت که مدل‌سازی ریاضی همواره دارای محدودیت‌هایی بوده و نمی‌توان تمامی شرایط موجود در شرایط دنیای واقعی را در ساختار مدل وارد نمود؛ بنابراین نیاز به تعیین مفروضاتی است که در نهایت محیط مورد مطالعه مسئله تحقیق را تعیین می‌نماید.

طبق بررسی‌های انجام‌شده، چندین نوع مختلف مدل‌سازی ریاضیاتی مسئله مکان‌یابی-مسیریابی باز، ارائه شده است که در این بین استفاده از گره مجازی دارای دامنه کاربرد بیشتری است. در این پژوهش نیز جهت دستیابی به مفهوم مکان‌یابی مسیریابی باز، از گره‌ای تحت عنوان گره (مشتری) مجازی استفاده گردید. در هر تور، وسیله نقلیه پس از خدمت‌رسانی به گره‌های منتخب، به گره مجازی، بازمی‌گردد. از آنجاکه فاصله این گره تا سایر گره‌ها و تقاضای آن صفر است، عملاً فاصله‌ی آخرین مشتری تا مشتری مجازی در نظر گرفته نشده و هزینه‌ای بابت جابجایی به سیستم تحمیل نمی‌کند.

#### مفروضات مسئله

- مجموعه‌ای مکان بالقوه برای احداث و فعال‌سازی مراکز توزیع، تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگان وجود دارد.
- تعداد و مکان مشتریان مشخص است.
- ناوگان حمل‌ونقل، ناهمگن و با ظرفیت‌های متفاوت و مشخص است.
- زنجیره‌ی تأمین چهار لایه‌ای (تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری) در نظر گرفته می‌شود.
- مسئله در حالت چند کالایی و تک دوره‌ای بررسی می‌شود.

- مجموع میزان تقاضای تمامی مشتریانی که در یک تور قرار دارند، باید کمتر و یا مساوی ظرفیت وسیله تخصیص‌یافته به آن تور باشد.
  - تقاضای هر مشتری تنها از یک مرکز توزیع که ظرفیت معینی دارد، تأمین گردد.
  - هر مشتری تنها یک‌بار و تنها توسط یک وسیله نقلیه (تور) و به‌طور کامل خدمت‌دهی می‌شود.
  - تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از فعال‌سازی تسهیلات و جابجایی مواد مشخص هستند.
  - هر مرکز توزیع تعداد مشخصی موقعیت کاری (شغلی) ایجاد می‌نماید.
  - برای هر یک از مراکز توزیع، چند سطح ظرفیت محدود و مشخص در نظر گرفته شده است.
  - برای هر یک از تولیدکنندگان، چندین فناوری محدود و مشخص در نظر گرفته شده است.
  - تورها باز هستند.
  - محصولات به دو صورت ارسال از توزیع‌کننده و یا ارسال مستقیم از تولیدکننده به دست مشتریان می‌رسد.
  - بسته به نوع سفارش و حجم خرید، قیمت محصولات بر اساس سطح تخفیف متفاوت خواهد بود.
- با توجه به توضیحات فوق و مفروضات در نظر گرفته شده، مدل ریاضی به صورت زیر ارائه می‌شود.

#### مجموعه‌ها و نمادها

|                                  |  |       |
|----------------------------------|--|-------|
| $i \in \{1, 2, \dots,  I \}$     | مجموعه<br>تأمین‌کنندگان                                      | $I$   |
| $j \in \{1, 2, \dots,  J \}$     | مجموعه مکان‌های<br>بالقوه<br>تولیدکنندگان                    | $J$   |
| $r \in \{1, 2, \dots,  R \}$     | مجموعه مکان‌های<br>بالقوه مراکز توزیع<br>مشتری مجازی         | $R$   |
| $o \in \{O\}$                    |  | $O$   |
| $m, w \in \{1, 2, \dots,  C \}$  | مجموعه مشتریان   | $C$   |
| $v^a \in \{1, 2, \dots,  V^a \}$ | مجموعه وسایل<br>نقلیه بین سطح<br>تأمین‌کننده و<br>تولیدکننده | $V^a$ |
| $v^b \in \{1, 2, \dots,  V^b \}$ | مجموعه وسایل<br>نقلیه بین سطح                                | $V^b$ |



|   |  |  |
|---|--|--|
| هزینه‌ی تولید هر واحد محصول $g$ در تولیدکننده‌ی $j$ با سطح فناوری $e$   | $Cost_{gje}^{Pro}$   | تولیدکننده و توزیع‌کننده                             |
| هزینه‌ی توزیع، پردازش و نگهداری هر واحد محصول $g$ در مرکز توزیع $r$ با سطح ظرفیت $l$ هزینه اجاره وسیله نقلیه $v$                | $Cost_{grl}^{Dis}$   | $V^c$ مجموعه وسایل نقلیه بین سطح توزیع‌کننده و مشتری |
| هزینه‌ی حمل توسط وسیله‌ی $v$ در واحد مسافت (از تأمین‌کننده به تولیدکننده)   | $Cost_v^{rent}$  | $V$ وسایل نقلیه $V^a \cup V^b \cup V^c$              |
| هزینه‌ی حمل توسط وسیله‌ی $v$ در واحد مسافت (از تولیدکننده به مرکز توزیع)  | $Cost_v^{S2P}$   | $L$ مجموعه سطوح ظرفیت مراکز توزیع                    |
| هزینه‌ی حمل توسط وسیله‌ی $v$ در واحد مسافت (از مرکز توزیع / تولیدکننده به مشتری)  | $Cost_v^{P2D}$   | $G$ مجموعه محصولات                                   |
| مقدار ماده خام $k$ موردنیاز برای تولید محصول $g$ تقاضای مشتریان و گره مجازی برای محصول $g$ در حالت $f$ ( $Demand_{s=0,g} = 0$ ) | $Cost_v^{CC}$  | $K$ مجموعه مواد اولیه                                |
| ظرفیت تولید محصول $g$ در تولیدکننده‌ی $j$ با سطح فناوری $e$   | $NED_{gk}$   | $H$ محصولات و مواد خام $K \cup G$                    |
| ظرفیت تأمین‌کننده $i$ برای تأمین ماده خام $k$   | $Demand_{sgf}$   | $E$ مجموعه سطوح فناوری در تولیدکنندگان               |
| ظرفیت وسیله‌ی نقلیه $v$ برای حمل ماده خام $k$ (از تأمین‌کننده به تولیدکننده)  | $Cap_{jeg}$  | $S$ مجموعه مشتریان و مشتری شامل $O \cup C$           |
| ظرفیت وسیله‌ی نقلیه $v$ برای حمل محصول $g$ (از تولیدکننده به مرکز توزیع)  | $CAP_{ik}^S$   | $U$ مجموعه مبادی انتقال کالا برای مشتریان            |
| ظرفیت وسیله‌ی نقلیه $v$ برای حمل محصول $g$ (از مرکز توزیع به مشتری)   | $CAP_{vk}^{S2P}$   | $A$ مجموعه تمام نقاط زنجیره                          |
| ظرفیت ثابت فعال‌سازی تولیدکننده‌ی $j$ با سطح فناوری $e$ برای تولید محصول $g$  | $CAP_{vg}^{P2D}$   | $F$ ارائه تقاضا برای مشتریان                         |
| ظرفیت ثابت فعال‌سازی مرکز توزیع $r$ با سطح ظرفیت $l$ برای محصول $g$   | $CAP_{vg}^{D2C}$   | $D$ مجموعه سطوح تخفیف                                |
| هزینه‌ی ثابت فعال‌سازی تولیدکننده‌ی $j$ با سطح فناوری $e$ برای تولید محصول $g$  | $CAP_{rlg}^D$  | $M_u$ مجموعه گره‌های تحت $U$                         |
| هزینه‌ی ثابت فعال‌سازی مرکز توزیع $r$ با سطح ظرفیت $l$ برای تولیدکننده $j$  | $Cost_{jeg}^{ActP}$  | $MP_u$ مجموعه مبادی توزیع کالا تحت $U$               |
| فاصله‌ی تأمین‌کننده‌ی $i$ از تولیدکننده $j$   | $Cost_{rlg}^{ActD}$  |  |
| فاصله‌ی تولیدکننده $j$ از توزیع‌کننده $r$   | $Dist_{ij}^{S2P}$  |  |
| فاصله‌ی بین نقاط مشتریان $(m, w) \in C$ درصد تخفیف ارائه‌شده در سطح $d$   | $Dist_{jr}^{P2D}$  |  |
| حداکثر بودجه در دسترس مشتری $c$ برای خرید محصول $g$   | $Dist_{mw}^{CC}$   |  |
| قیمت فروش محصول $g$ در حالت تقاضای $f$  | $PD_d$   |  |
| اثرات زیستی در واحد مسافت ناشی از حمل و نقل از تأمین‌کننده $i$ به تولیدکننده $j$  | $Budget_{cg}$  |  |
| اثرات زیستی در واحد مسافت ناشی از حمل و نقل از تولیدکننده $j$ به توزیع‌کننده $r$  | $Pr_{gf}$  |  |
| اثرات زیستی در واحد مسافت ناشی از حمل و نقل از مرکز توزیع $r$ به مشتری $c$  | $ENV_v^{S2P}$  |  |
|   | $ENV_v^{P2D}$  |  |
|   | $ENV_v^{D2C}$  |  |
|   | $M_{u=J} = \{O \cup J \cup C\}, M_{u=R} = \{O \cup R \cup C\}$     |  |
|   | $MP_{u=J} = \{1, 2, \dots,  J \}, MP_{u=R} = \{1, 2, \dots,  R \}$ |  |
|   | $Cost_{ik}^{raw}$  | هزینه‌ی خرید مواد خام $k$ از تأمین‌کننده $i$         |

پارامترها

|   |                      |   |                     |
|---|----------------------|---|---------------------|
|   |                      | اثرات زیستی ناشی از تولید هر واحد محصول $g$ در تولیدکننده $j$ با سطح فناوری $e$                                       | $ENV_{jeg}^P$       |
|   |                      | اثرات زیستی ناشی از جابجایی و پردازش هر واحد محصول $g$ در مرکز توزیع $r$ با سطح ظرفیت $l$                             | $ENV_{rlg}^D$       |
|   |                      | اثرات زیستی ناشی از فعال‌سازی تولیدکننده $j$ با سطح فناوری $e$ برای تولید محصول $g$                                   | $ENV_{jeg}^{P-E}$   |
|   |                      | اثرات زیستی ناشی از فعال‌سازی توزیع‌کننده $r$ با سطح ظرفیت $l$ برای توزیع محصول $g$                                   | $ENV_{rlg}^{D-L}$   |
|   |                      | تعداد موقعیت‌های ثابت شغلی ایجادشده با تأسیس تولیدکننده $j$ با فناوری $e$ برای تولید محصول $g$                        | $Job_{jeg}^{P-E}$   |
|   |                      | تعداد موقعیت‌های ثابت شغلی ایجادشده با تأسیس مرکز توزیع $r$ با ظرفیت $l$ برای توزیع محصول $g$                         | $Job_{rlg}^{D-L}$   |
|   |                      | تعداد موقعیت‌های متغیر شغلی ایجادشده از طریق تولید در تولیدکننده $j$ با فناوری $e$ برای تولید محصول $g$               | $VJob_{jeg}^{P-E}$  |
|   |                      | تعداد موقعیت‌های متغیر شغلی ایجادشده از طریق کار در مرکز توزیع $r$ با ظرفیت $l$ برای توزیع محصول $g$                  | $VJob_{rlg}^{D-L}$  |
|   |                      | میزان اثرات مخرب ایجادشده در جامعه به دلیل استفاده از فناوری‌های مختلف تولیدی   | $Soc_{jrveg}^{P-D}$ |
|   |                      | <b>متغیرهای تصمیم</b>   |                     |
|   |                      | مقدار تقاضای نهایی پاسخ‌داده‌شده برای مشتری $s$ در حالت $f$ برای محصول $g$  | $N_{sfg}$           |
|   |                      | $(N_{(s=0,g)fg} = 0)$   |                     |
|   |                      | برابر با ۱ است اگر برای مشتری $s$ محصولات $g$ در حالت تقاضای $f$ برآورده شده باشد و در غیر این صورت برابر با صفر است. | $XN_{sfg}$          |
|   |                      | برابر با ۱ اگر تخفیف سطح $d$ به مشتری $c$ برای محصول $g$ در حالت $f$ داده شود و در غیر این صورت برابر با صفر است.     | $DS_{dcgf}$         |
|   |                      | قیمت نهایی ارائه محصول $g$ به مشتری $s$ در حالت تقاضای $f$ در سطح تخفیف $d$   | $FP_{sfgd}$         |
| اگر تولیدکننده $j$ با فناوری $e$ برای تولید محصول $g$ فعال شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است   | $Y_{jeg}^{P-E}$      |   |                     |
| اگر مرکز توزیع $r$ با ظرفیت $l$ برای توزیع محصول $g$ فعال شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است  | $Y_{rlg}^{D-L}$      |   |                     |
| اگر وسیله نقلیه $v$ مسیر موردنظر را که متعلق به مجموعه $(w, m \in M_u)$ است را برای حمل مواد $h$ طی کند برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است. | $X_{mwvh}$           |   |                     |
| اگر مشتری $s$ به گره‌های مجموعه $a \in MP_u$ با سطح ظرفیت $l$ جهت دریافت محصول $g$ تخصیص یابد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.           | $A_{astg}$           |   |                     |
| اگر وسیله نقلیه $v$ برای ماده $h$ اجاره گرفته شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است  | $Rent_{vh}$          |   |                     |
| مقدار ماده خام $k$ منتقل شده از تأمین‌کننده $i$ به تولیدکننده $j$ توسط وسیله $v$  | $Flow_{ijvk}^{S-P}$  |   |                     |
| مقدار محصول $g$ منتقل شده از تولیدکننده $j$ با فناوری $e$ به مرکز توزیع $r$ توسط وسیله $v$  | $Flow_{jrveg}^{P-D}$ |   |                     |
| تعداد وسایل نقلیه نوع $v$ جابجا شده از تأمین‌کننده $i$ به تولیدکننده $j$ برای ماده خام $k$  | $Q_{ijvk}^{S-P}$     |   |                     |
| تعداد وسایل نقلیه نوع $v$ جابجا شده از تولیدکننده $j$ به مرکز توزیع $r$ برای محصول $g$  | $Q_{jrvg}^{P-D}$     |   |                     |
| مقدار محصول $g$ تولیدشده با فناوری $e$ در تولیدکننده $j$  | $Pd_{gje}$           |   |                     |
| متغیر کمکی حذف زیر تور  | $ST_{svh}$           |   |                     |

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \zeta = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V^a} \sum_{k \in K} \text{Cost}_{ik}^{\text{raw}} \times \text{Flow}_{ijvk}^{S-P} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in P} \sum_{v \in V^a} \sum_{k \in K} \text{Dist}_{ij}^{S2P} \times \text{Cost}_v^{S2P} \times Q_{ijvk}^{S-P} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{Cost}_{gje}^{\text{Pro}} \times \text{Pd}_{gje} \\
 & + \sum_{j \in P} \sum_{v \in V^b} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \text{Cost}_v^{P2D} \times \text{Dist}_{jr}^{P2D} \times Q_{jrv}^{P-D} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{Cost}_{jeg}^{\text{Act}} \times Y_{jeg}^{P-E} \\
 & + \sum_{u \in U} \sum_{a \in \text{MP}_u} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \text{Cost}_{grl}^{\text{Dis}} \times N_{sfg} \times A_{aslg} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} \text{Cost}_{rlg}^{\text{ActD}} \times Y_{rlg}^{D-L} \\
 & + \sum_{v \in V^c} \sum_{h \in H} \left( \text{Cost}_v^{\text{rent}} \times \text{Rent}_{vh} \right. \\
 & \left. + \sum_{u \in U} \sum_{m \in M_u} \sum_{w \in M_u} \text{Cost}_v^{\text{CC}} \times \text{Dist}_{mw}^{\text{CC}} \times X_{mwvh} \right) \\
 & - \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \sum_{f \in F} N_{sfg} \times \sum_{d \in D} \text{FP}_{sfgd}
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \xi = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V^a} \sum_{k \in K} \text{ENV}_v^{S2P} \times \text{Dist}_{ij}^{S2P} \times Q_{ijvk}^{S-P} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V^b} \sum_{g \in G} \text{ENV}_v^{P2D} \times \text{Dist}_{jr}^{P2D} \times Q_{jrv}^{P-D} \\
 & + \sum_{m \in C} \sum_{w \in C} \sum_{v \in V^c} \sum_{g \in G} \text{ENV}_v^{D2C} \times \text{Dist}_{mw}^{C2C} \times X_{mwvg} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{ENV}_{jeg}^{P-E} \times Y_{jeg}^{P-E} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} \text{ENV}_{rlg}^{D-L} \times Y_{rlg}^{D-L} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{ENV}_{jeg}^P \times \text{Pd}_{gje} \\
 & + \sum_{u \in U} \sum_{a \in \text{MP}_u} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \text{ENV}_{rlg}^D \times N_{sfg} \times A_{aslg}
 \end{aligned} \tag{1-2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Max } \psi = & \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{Job}_{jeg}^{P-E} \times Y_{jeg}^{P-E} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} \text{Job}_{rlg}^{D-L} \times Y_{rlg}^{D-L} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \left( \frac{V \text{Job}_{jeg}^{P-E} \times \text{Pd}_{gje}}{\text{Cap}_{jeg}} \right) \\
 & + \sum_{u \in U} \sum_{a \in \text{MP}_u} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \left( \frac{V \text{Job}_{rlg}^{D-L} \times (N_{sfg} \times A_{aslg})}{\text{CAP}_{rlg}^D} \right) \\
 & - \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V^a} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} \text{Soc}_{jrveg}^{P-D} \times \text{Flow}_{jrveg}^{P-D}
 \end{aligned} \tag{1-3}$$

s. t.

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V^a} \text{Flow}_{ijvk}^{S-P} \leq \text{CAP}_{ik}^S \quad \forall i \in I, k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{v \in V^b} \sum_{e \in E} Flow_{jrveg}^{P-D} = \sum_{k \in K} NED_{gk} \times \sum_{v \in V^a} \sum_{i \in I} Flow_{ijvk}^{S-P} \quad \forall j \in J, g \in G \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{v \in V^b} \sum_{e \in E} Flow_{jrveg}^{P-D} \leq \sum_{e \in E} Cap_{jeg} \cdot Y_{jeg}^{P-E} \quad \forall j \in J, g \in G \quad (4)$$

$$Flow_{ijvk}^{S-P} \leq CAP_{vk}^{S2P} \times Q_{ijvk}^{S-P} \quad \forall i \in I, j \in J, v \in V^a, k \in K \quad (5)$$

$$Flow_{jrveg}^{P-D} \leq CAP_{vg}^{P2D} \times Flow_{jrveg}^{P-D} \quad \forall i \in I, r \in R, v \in V^b, e \in E, g \in G \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V^b} \sum_{e \in E} Flow_{jrveg}^{P-D} \leq \sum_{l \in L} CAP_{rlg}^D \times Y_{rlg}^{D-L} \quad \forall r \in R, g \in G \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V^b} \sum_{e \in E} Flow_{jrveg}^{P-D} = \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} N_{sfg} \times A_{asl}g \quad \forall a \in MP_w, u \in U, g \in G \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{m \in C} X_{mrvh} = 1 \quad \forall w \in C, h \in H \quad (9)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{m \in M_u} \sum_{s \in S/\{C\}} X_{msvg} \times N_{sfg} \leq CAP_{vg}^{D2C} \quad \forall v \in V^c, g \in G \quad (10)$$

$$ST_{svh} - ST_{s'vh} + |M| \times X_{s'vh} \leq |M| - 1 \quad \forall s, s' \in S, \forall v \in V, h \in H \quad (11)$$

$$\sum_{w \in C} X_{mrvh} - \sum_{w \in C} X_{wmrvh} = 0 \quad \forall m \in M_u, u \in U, \forall v \in V, h \in H \quad (12)$$

$$\sum_{w \in M_u} X_{awvg} + \sum_{w \in M_u} X_{wavg} - \sum_{l \in L} A_{asl}g \leq 1 \quad \forall a \in MP_w, u \in U, s \in S/\{C\}, v \in V^c, g \in G \quad (13)$$

$$\sum_{l \in L} Y_{rlg}^{D-L} \leq 1 \quad \forall r \in R, g \in G \quad (14)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{e \in E} \sum_{v \in V^b} Flow_{jrveg}^{P-D} = \sum_{e \in E} Pd_{gje} \quad \forall j \in J, g \in G \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} NED_{gk} \times \sum_{i \in I} \sum_{v \in V^a} Flow_{ijvk}^{S-P} \leq \sum_{e \in E} Cap_{jeg} \times Y_{jeg}^{P-E} \quad \forall j \in J, g \in G \quad (16)$$

$$\sum_{e \in E} Y_{jeg}^{P-E} \leq 1 \quad \forall j \in J, g \in G \quad (17)$$

$$Pd_{jeg} \leq Cap_{jeg} \quad \forall j \in J, e \in E, g \in G \quad (18)$$

$$X_{rovh} = 0 \quad \forall v \in V, r \in R, h \in H \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} X_{osvh} = 0 \quad \forall v \in V, h \in H \quad (20)$$

$$\sum_{m \in C} X_{movh} = 1 \quad \forall v \in V, h \in H \quad (21)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{a \in MP_u} \sum_{s \in S} X_{asvh} \leq Rent_{vh} \quad \forall v \in V, h \in H \quad (22)$$

$$Demand_{sgf} \leq N_{sgf} \quad \forall s \in S, g \in G, f \in F \quad (23)$$

$$FP_{sfga} = PD_d \times D_{sdcgf} \times Pr_{gf} \quad \forall c \subseteq s, s \in S, g \in G, f \in F, d \in D \quad (24)$$

$$\sum_{f \in F} N_{sgf} \times FP_{sgf} \leq Budget_{cg} \quad \forall c \subseteq s, s \in S, g \in G \quad (25)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{a \in MP_u} A_{aslg} \leq 1 \quad \forall s \in S, g \in G, l \in L \quad (26)$$

$$X_{mwvg} \leq 1 \quad \forall v \in V^c, g \in G, m, w \in M_u \quad (27)$$

$$N_{sgf} \leq |M| \times XN_{sgf} \quad \forall s \in S, g \in G, f \in F \quad (28)$$

$$XN_{sgf} \leq N_{sgf} \quad \forall s \in S, g \in G, f \in F \quad (29)$$

$$\sum_{f \in F} XN_{sgf} = 1 \quad \forall s \in S, g \in G \quad (30)$$

$$Rent_{vh}, Flow_{ijvk}^{S-P}, Flow_{jrvge}^{P-D}, Pd_{jeg} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R, v \in V, e \in E, h \in H, g \in G, k \in K \quad (31)$$

$$Q_{ijvk}^{S-P}, Q_{jrvge}^{P-D} \in integer \quad \forall i \in I, j \in J, v \in V, g \in G, k \in K \quad (32)$$

$$ST_{mvh} \in free \quad \forall m \in M, v \in V, h \in H \quad (33)$$

$$X_{mwvh}, Y_{jeg}^{P-E}, Y_{rlg}^{D-L}, A_{rstg} \in \{0,1\} \quad \forall m, w \in M, v \in V, r \in R, l \in L, s \in S, e \in E, j \in J, h \in H, g \in G \quad (34)$$

چهارم هزینه حمل‌ونقل از تولیدکننده به مرکز توزیع را نشان می‌دهد. این هزینه نیز هم‌راستای هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به تولیدکننده برابر است با مجموع حاصل ضرب مقدار محصول جهت انتقال در هزینه انتقال در مسافت موردنظر بین تولیدکننده و مرکز توزیع. واضح است به دلیل ناهمگن بودن ناوگان حمل‌ونقل، مقادیر در نظر گرفته برای هزینه حمل‌ونقل در هر سه سطح متفاوت هستند. جمله پنجم هزینه فعال‌سازی تولیدکننده را نشان می‌دهد. این هزینه دربرگیرنده تمامی هزینه‌های ساخت‌وساز مرکز تولید

در تابع هدف اول، جمله اول هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کننده را محاسبه می‌کند. این هزینه برابر است با مجموع حاصل ضرب مقدار محصول منتقل شده از تأمین‌کننده در هزینه خرید. جمله دوم هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به تولیدکننده را محاسبه می‌کند. جمله سوم به محاسبه هزینه تولید در تولیدکننده می‌پردازد. واضح است که این هزینه از طریق مجموع حاصل ضرب مقدار محصول تولیدشده در هزینه تولید هر واحد محاسبه می‌شود. جمله

است که متناسب با فناوری مورد استفاده است. جمله ششم، هزینه توزیع در مرکز توزیع را محاسبه می‌کند. واضح است که این هزینه به ازای هر مشتری تخصیص یافته به مرکز توزیع محاسبه می‌شود. جمله هفتم، هزینه فعال‌سازی مرکز توزیع را هم‌راستا با هزینه احداث تولیدکننده محاسبه می‌کند. که این هزینه متناسب با سطح ظرفیتی مرکز توزیع در نظر گرفته شده است. جمله هشتم، هزینه مسیریابی و هزینه اجاره وسیله نقلیه را محاسبه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیریابی با توجه به  $M_{II}$  موجود در این جمله، هم برای ارتباط بین سطح توزیع‌کننده و مشتری و هم برای سطح تولیدکننده و مشتری در نظر گرفته می‌شود. هزینه مسیریابی جزء هزینه‌های عملیاتی سیستم و هزینه اجاره جزء هزینه برنامه‌ریزی سیستم هستند. در نهایت جمله نهم به محاسبه میزان فروش محصولات با توجه به نوع تقاضا (کلی و یا جزئی) و همچنین سطح تخفیف ارائه شده می‌پردازد.

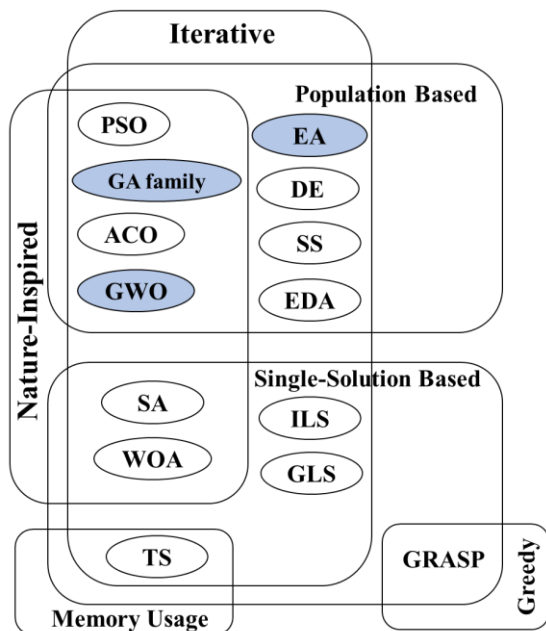
در تابع هدف دوم، جمله اول، به محاسبه اثرات زیستی ناشی از حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به تولیدکننده می‌پردازد. جمله دوم، اثرات زیستی ناشی از حمل‌ونقل از تولیدکننده به مرکز توزیع را نشان می‌دهد. جمله سوم، اثرات زیستی ناشی از حمل‌ونقل در سطح آخر (بین مرکز توزیع و مشتریان) را محاسبه می‌کند. جمله چهارم، به محاسبه اثرات زیستی ناشی از فعال‌سازی تولیدکننده می‌پردازد. جمله پنجم، اثرات زیستی ناشی از فعال‌سازی مرکز توزیع را نشان می‌دهد. جمله ششم، اثرات زیستی ناشی از تولید محصول در تولیدکننده و جمله (۷-۲) اثرات زیستی ناشی از توزیع و پردازش در مرکز توزیع را محاسبه می‌کند. جمله هفتم، تعداد روزهای ازدست‌رفته ناشی از خسارت کاری در طول استفاده از فناوری در تولیدکننده و فعال‌سازی تولیدکننده را محاسبه می‌کند. این موضوع همواره جزء مهم‌ترین اثرات مخرب اجتماعی در سیستم خدمت‌رسانی است.

در تابع هدف سوم، جمله اول، تعداد موقعیت‌های ثابت شغلی ایجاد شده با تأسیس تولیدکننده را محاسبه می‌کند.

جمله دوم، تعداد موقعیت‌های ثابت شغلی ایجاد شده با تأسیس مرکز توزیع، جمله سوم، تعداد موقعیت‌های متغیر شغلی ایجاد شده در طول تولید و جمله چهارم تعداد موقعیت‌های متغیر شغلی ایجاد شده در مرکز توزیع را محاسبه می‌کند. جمله پنجم به کمینه‌سازی اثرات مخرب اجتماعی ایجاد شده توسط استفاده از فناوری‌های تولیدی می‌پردازد.

محدودیت‌های موجود در مسئله نیز بدین صورت است که محدودیت (۲) بیانگر رعایت ظرفیت تأمین‌کننده است. محدودیت (۳) نشان می‌دهد که جریان بین تأمین‌کننده و تولیدکننده برابر جریان بین تولیدکننده و مرکز توزیع است. معادله (۴) رعایت ظرفیت تولیدکننده با توجه به فعال بودن آن را تضمین می‌کند و به عبارتی هنگامی محصول از تولیدکننده به مرکز توزیع جریان خواهد داشت که هم آن تولیدکننده فعال باشد و هم ظرفیت مثبتی داشته باشد. محدودیت (۵) رعایت ظرفیت وسایل نقلیه ارسالی بین تأمین‌کننده و تولیدکننده را تضمین می‌کند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که رعایت ظرفیت وسایل نقلیه ارسالی بین تولیدکننده و مرکز توزیع در نظر گرفته شود. معادله (۷) به رعایت ظرفیت مرکز توزیع با توجه به فعال بودن آن می‌پردازد. محدودیت (۸) برآوردن تقاضای تمام مشتریان را تضمین می‌کند. محدودیت (۹) الزام می‌کند که هر مشتری در یک مسیر قرار گرفته و با یک وسیله نقلیه خدمت داده شود. محدودیت (۱۰) رعایت ظرفیت وسایل نقلیه ارسالی بین مرکز توزیع و مشتریان را تضمین می‌کند. معادله (۱۱) باعث می‌شود که در مسیرهای تشکیل شده، زیر تور به وجود نیاید. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که وسیله نقلیه به هر نقطه‌ای وارد شود از همان خارج می‌شود. محدودیت (۱۳) ارتباط بین مسئله مکان‌یابی و مسیریابی را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند هر مرکز توزیع فقط با یک سطح ظرفیت فعال می‌شود. محدودیت (۱۵) مجموع مقدار محصولات تحویل داده شده به تولیدکننده را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که ظرفیت تولیدکننده

با توجه به ماهیت و ساختار عملکردی در یافتن پاسخ‌های نهایی است. در این تحقیق مطابق با دسته‌بندی ارائه شده در شکل (۲) الگوریتم‌های مناسب جهت حل مسئله انتخاب می‌شود.



شکل (۲) دسته‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری براساس ساختار طراحی و نحوه عملکرد

مطابق با مرور ادبیات تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت، دارای سطح عملکرد مناسب-تری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری هستند، بنابراین در این تحقیق نیز از این الگوریتم‌های استفاده می‌شود. خانواده ژنتیک معمولاً در تمامی مسائل بهینه‌سازی دارای عملکرد مناسبی هستند و می‌توانند به‌عنوان یک معیار مقایسه‌ای خوب مورد استفاده قرار گیرند. در این خانواده، نسخه دوم الگوریتم ژنتیک ۱ به‌عنوان شاخص‌ترین الگوریتم چندهدفه در تمام حوزه‌های بهینه‌سازی مطرح است. الگوریتم‌های مبتنی بر ساختارهای تکاملی ۲ نیز در اغلب مسائل بهینه‌سازی قادر به تولید پاسخ‌های مناسب هستند. قابل توجه است که الگوریتم توسعه داده شده از این خانواده جهت حل مسائل چندهدفه مانند SPEA-II در حوزه‌های

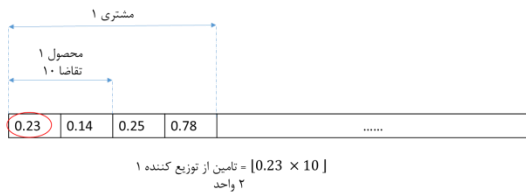
برحسب فعال بودنش، رعایت می‌شود. محدودیت (۱۷) ملزم می‌کند که هر تولیدکننده با یک فتاوری فعال شود. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که یک تولیدکننده، زمانی می‌تواند محصول تولید کند که ظرفیت تولید داشته باشد و به عبارتی ظرفیت تولید آن بزرگ‌تر از صفر باشد. محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که از مرکز توزیع به گره مجازی نباید مسیری باشد. محدودیت (۲۰) ممنوعیت وجود مسیر از گره مجازی به مشتریان را تضمین می‌کند. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که آخرین مسیر هر وسیله نقلیه از مشتری به مشتری مجازی است. محدودیت (۲۲) عنوان می‌کند که اگر مسیری بین هر گره در سطوح مختلف طی شده است، حتماً باید از یک وسیله نقلیه که نرخ مشخص اجاره هم دارد، استفاده شده باشد. محدودیت (۲۳) تضمین می‌کند که مقدار سفارش‌های نهایی مشتری از مقدار سفارش اولیه (تقاضای اولیه) کمتر نباشد. محدودیت (۲۴) به محاسبه قیمت نهایی محصول با توجه به نوع سفارش و سطح تخفیف می‌پردازد. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که کل خرید مشتری از سطح بودجه در دسترس بیشتر نشود. محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) تضمین می‌کنند که هر مشتری حداکثر از یک مبدأ (توزیع‌کننده یا تولیدکننده) محصول دریافت کند. محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۰) تضمین می‌کنند که تقاضای هر مشتری فقط در یک حالت برطرف شود. محدودیت‌های ۳۱ تا ۳۴ دامنه متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

#### ۴- روش حل

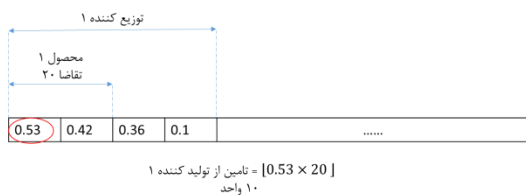
با توجه به اینکه مسئله طراحی زنجیره تأمین عمل از رده مسائل NP-hard است، بنابراین در این تحقیق به‌منظور حل مدل ریاضی در ابعاد کوچک از حل‌کننده Cplex 12.1 با روش محدودیت افسیلون استفاده می‌شود. همچنین جهت حل نموده‌های عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود؛ اما یکی از موضوعات بسیار مهم در استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، انتخاب مناسب آن‌ها

1- NSGA-II  
2- Evolutionary Algorithms (EA)

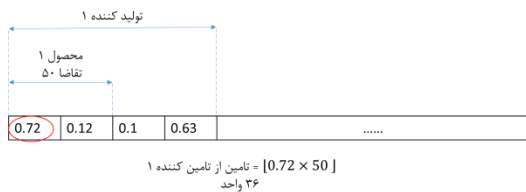




پس از تعیین سهم توزیع‌کننده‌ها و تأمین‌کننده‌ها در تأمین تقاضای مشتری‌ها، میزان تقاضای کالا برای توزیع‌کننده‌ها مشخص می‌گردد. حال بخش دوم نمایش جواب میزان سهم هر تولیدکننده را در تأمین تقاضای توزیع‌کننده‌ها مشخص می‌کند.



پس از مشخص شدن میزان تولید برای تولیدکننده‌ها، میزان مواد اولیه موردنیاز برای هر تولیدکننده مشخص می‌گردد. در بخش سوم نمایش جواب سهم هر تأمین‌کننده در تأمین نیاز هر تولیدکننده مشخص می‌گردد. بدین ترتیب مشخص می‌شود که از هر تأمین‌کننده چه میزان مواد باید درخواست گردد.



در طی این سه بخش، برای توزیع‌کننده، تولیدکننده، و تأمین‌کننده‌ها، اگر این تسهیلات مورد استفاده قرار گیرند، به معنی احداث شدن آنهاست و باید در محاسبات در نظر گرفته شوند. اما اگر مورد استفاده قرار نگیرند، احداث نشده فرض می‌شوند. بخش بعدی از نمایش جواب مربوط به مسیریابی وسیله نقلیه در مسیر مشتری‌ها است.

مختلف دارای برتری نسبی به سایر الگوریتم‌های شناخته‌شده مانند MOPSO و MOSA است؛ اما در بین الگوریتم‌های ارائه‌شده در سال‌های اخیر، الگوریتم گرگ خاکستری<sup>۱</sup> دارای قدرت محاسباتی بسیار بالایی بوده و تقریباً در تمامی مسائلی که مورد استفاده قرار گرفته است، بر سایر الگوریتم‌ها برتری نسبی یا مطلق داشته است. نسخه چندهدفه این الگوریتم نیز دارای کارایی بسیار بالایی بوده و قادر است به صورت کاملاً مناسبی از فاز Exploration وارد فاز Exploitation شده و پاسخ‌های نهایی مناسبی را گزارش دهد؛ بنابراین در این تحقیق جهت حل مدل ریاضی، الگوریتم‌های NSGA-II، PESA-II و MOGWO مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در ادامه ساختار ریاضی این الگوریتم‌ها تشریح می‌شود. لازم به ذکر است که طبق اطلاعات نویسندگان، الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه برای نخستین در این حوزه تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴-۱- ساختار نمایش پاسخ‌ها

به منظور نمایش پاسخ‌های مسئله از یک رشته عدد اعشاری بین صفر و یک می‌شود که با نگاشتی از این رشته اعداد، می‌توان متغیرهای تصمیم مدل را مقداردهی و تابع برازندگی را محاسبه کرد. این نمایش جواب شامل چند پنج بخش اصلی است.

|                                     |      |      |      |      |       |
|-------------------------------------|------|------|------|------|-------|
| بخش اول                             | 0.23 | 0.14 | 0.25 | 0.78 | ..... |
| مشتري * (توزیع کننده + تولید کننده) |      |      |      |      |       |
| بخش دوم                             | 0.42 | 0.34 | 0.77 | 0.33 | ..... |
| توزیع کننده * تولید کننده           |      |      |      |      |       |
| بخش سوم                             | 0.78 | 0.36 | 0.14 | 0.21 | ..... |
| تولید کننده * تامین کننده           |      |      |      |      |       |
| بخش چهارم                           | 1    | 2    | 4    | 3    | ..... |
| مشتري * وسیله نقلیه                 |      |      |      |      |       |
| بخش پنجم                            | 0    | 1    | 2    | 1    | ..... |
| مشتري                               |      |      |      |      |       |

بخش اول مشخص می‌کند که هر توزیع‌کننده یا تأمین‌کننده (مستقیم) چه کسری از تقاضای مشتری را تأمین می‌کنند.

1- Grey Wolf Optimizer (GWO)

MID

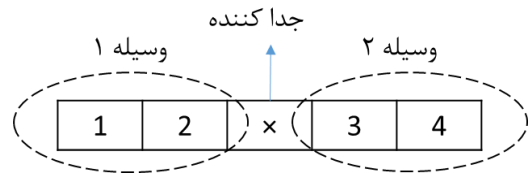
$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{|Q|} \left( \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{obj}} \left( \frac{f_i^j - f_{best}^j}{f_{max}^j - f_{min}^j} \right)^2} \right)}{|Q|} \quad (48)$$

در آن بیانگر  $f_i^j$  -امین پاسخ و  $f_{best}^j$  -امین تابع هدف است. همچنین  $f_{best}^j$  نقطه ایده‌آل تابع هدف  $f_{max}^j$  و  $f_{min}^j$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بین تمام پاسخ‌های پارتویی برای تابع هدف  $f_{max}^j$  است.  $|Q|$  تعداد نقاط موجود در ناحیه بهینه پارتویی و  $n_{obj}$  تعداد توابع هدف است. همچنین معیارهای زمان حل (CPU Time) و تعداد پاسخ‌های پارتویی (NPS) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۴- تنظیم پارامتر الگوریتم‌های پیشنهادی

با توجه به اینکه الگوریتم GWO از رده الگوریتم هوشمند در نظر گرفته می‌شود، بنابراین دارای پارامترهای تنظیم‌کننده مشخصی نبوده و تمامی عملگرهای آن براساس معادلات با پارامترهای مشخص به انجام محاسبات می‌پردازند. تنها پارامترهای موجود در این الگوریتم شامل تعداد اعضای جمعیت (Agents) و تعداد تکرارهای الگوریتم است. اما الگوریتم‌های NSGAI و SPEAII دارای چهار عملگر کلیدی تعداد جمعیت، تعداد تکرارها، نرخ جهش و نرخ هم‌گذری است. به منظور بهبود عملکرد الگوریتم‌ها در حل مثال‌های عددی مختلف نیاز است که سطوح بهینه این پارامترها برای هر الگوریتم تعیین شود. در این تحقیق از روش طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ (RSM) استفاده است. با توجه به اینکه مسئله تحقیق دارای دو تابع هدف است، بنابراین نمی‌توان به‌طور مستقیم از یک پاسخ واحد به منظور مقاداردهی به متغیر پاسخ استفاده نمود. بنابراین در این تحقیق، متغیر پاسخ ترکیبی از ۵ معیار مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه مطابق با فرمول (۵۰) در نظر گرفته می‌شود.

$$R_i = \frac{w_1 \overline{RPD}_1 + w_2 \overline{RPD}_2 + \dots + w_n \overline{RPD}_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \quad (50)$$



در این بخش پس از مرتب‌سازی نزولی و رتبه‌بندی مقادیر داخل رشته جواب یک جایگشت حاصل می‌شود که مقادیر آن در هر مسیر، ترتیب شهرها در آن مسیر را مشخص می‌کند. در بخش آخر تصمیم مربوط به تخفیف کالاها گرفته شده است. بدین ترتیب که برای هر مشتری تعیین می‌گردد که چه سطحی از تخفیف اعمال شود.

### ۲-۴- معیارهای مقایسه الگوریتم پیشنهادی

از آنجایی که الگوریتم‌های چندهدفه به جای داشتن یک پاسخ واحد دارای مجموعه‌ای از پاسخ‌ها تحت عنوان جبهه پارتویی هستند، بنابراین به منظور مقایسه آن‌ها نیاز به تعریف معیارهایی است که بتواند تصویری از کیفیت اعضای پارتویی را نشان دهد. در این تحقیق با استفاده از شاخص‌های Spread of Non-dominance Solution (SNS) [۵۸] و Maximum Spread (MS) [۵۹] به بررسی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود. ساختار ریاضی شاخص‌های SNS و MS به صورت معادلات (۴۶) و (۴۷) محاسبه می‌شود.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{|Q|} \left( MID - \sum_{j=1}^{n_{obj}} f_i^j \right)^2}{|Q| - 1}} \quad (46)$$

$$MS = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{obj}} \left( f_{max}^j - f_{min}^j \right)^2} \quad (47)$$

معیار دیگری نیز جهت مقایسه پاسخ‌های تولیدی توسط الگوریتم‌های پیشنهادی و Cplex وجود دارد که فاصله اقلیدسی بین پاسخ‌های غیر مغلوب نهایی تولیدشده توسط الگوریتم و مجموعه پارتو بهینه تولیدشده توسط Cplex را مطابق با رابطه (۴۸) محاسبه می‌نماید.

جدول (۳) سطوح پایین، متوسط و بالای پارامترهای

|             | الگوریتم‌های پیشنهادی |                    |                  |
|-------------|-----------------------|--------------------|------------------|
|             | سطح پایین<br>(-۱)     | سطح<br>میانگین (۰) | سطح بالا<br>(+۱) |
| تعداد       | ۵۰                    | ۱۲۵                | ۲۰۰              |
| تکرارها     | ۳۰                    | ۶۵                 | ۱۰۰              |
| اندازه      | ۰,۵                   | ۰,۷                | ۰,۹              |
| جمعیت       | ۰,۱                   | ۰,۲۵               | ۰,۴              |
| نرخ جهش     |                       |                    |                  |
| نرخ هم‌گذری |                       |                    |                  |

پس از انجام آزمایش‌های لازم به روش RSM توسط نرم-افزار Design Expert 12، سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی به صورت جدول (۴) ارائه می‌شود.

جدول ۴. سطح بهینه پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

|       | نرخ هم‌گذری | نرخ جهش | اندازه جمعیت | تعداد تکرارها | الگوریتم | ابعاد مسئله |
|-------|-------------|---------|--------------|---------------|----------|-------------|
| کوچک  | ۰,۲         | ۰,۷     | ۵۰           | ۱۰۰           | NSGAI    |             |
|       | -           | -       | ۳۰           | ۸۰            | MOGWO    |             |
|       | ۰,۱         | ۰,۸     | ۵۰           | ۱۲۰           | SPEAI    |             |
| متوسط | ۰,۲         | ۰,۷     | ۵۰           | ۱۰۰           | NSGAI    |             |
|       | -           | -       | ۳۰           | ۱۰۰           | MOGWO    |             |
|       | ۰,۲         | ۰,۷     | ۵۰           | ۱۲۰           | SPEAI    |             |
| بزرگ  | ۰,۳         | ۰,۷     | ۱۰۰          | ۱۵۰           | NSGAI    |             |
|       | -           | -       | ۴۰           | ۱۰۰           | MOGWO    |             |
|       | ۰,۲         | ۰,۷     | ۱۰۰          | ۱۵۰           | SPEAI    |             |

۵- نتایج عددی  
 نمود عددی تصادفی تولید و به کمک شاخص MID، کارایی الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی موردسنجش قرار می‌گیرد. ابعاد این مثال‌های در جدول ۵ ارائه می‌شود.

اما این معیارها نیز از نظر تصمیم‌گیرنده دارای اهمیت یکسانی نیستند، بنابراین در جدول (۲) ضرایب وزنی مربوط به هر معیار نیز تشریح می‌شود.

جدول (۲) وزن معیارهای ارزیابی برای محاسبه متغیر پاسخ

| معیارها | NPS | MID | SNS | MS | CPU Time |
|---------|-----|-----|-----|----|----------|
| وزن‌ها  | ۲   | ۲   | ۲   | ۲  | ۱        |

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت محاسبه متغیر پاسخ  $R_i$  از درصد انحراف نسبی (RPD) مطابق با رابطه (۵۱) برای هر مسئله استفاده می‌شود.

$$RPD = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \quad (51)$$

حدود پارامترهای هر الگوریتم نیز مطابق با جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

#### ۵-۱- مقایسه کارایی الگوریتم‌ها با Cplex

در این بخش به منظور بررسی نتایج حاصل از حل الگوریتم‌های پیشنهادی در مقایسه با نتایج مدل ریاضی، ۵

جدول (۵) مشخصات مثال‌های عددی در ابعاد کوچک

| نمود<br>عددی | I | J | R | C  | V <sup>a</sup> | V <sup>b</sup> | V <sup>c</sup> | L | G | K | E | F | D |
|--------------|---|---|---|----|----------------|----------------|----------------|---|---|---|---|---|---|
| SM1          | 2 | 2 | 3 | 10 | 2              | 3              | 3              | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| SM2          | 2 | 3 | 3 | 10 | 2              | 3              | 3              | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| SM3          | 3 | 3 | 4 | 12 | 3              | 3              | 4              | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| SM4          | 3 | 3 | 4 | 14 | 3              | 4              | 4              | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SM5          | 3 | 4 | 5 | 15 | 3              | 4              | 4              | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |

تولیدی در اجراهای مختلف نیز توجه داشت. به عبارت دیگر یک الگوریتم کارا علاوه بر تولید پاسخ‌های نهایی با کیفیت بالا، باید قادر به تولید پاسخ‌های نسبتاً نزدیک به یکدیگر، در تکرارهای مستقل مختلف باشد. بدین منظور در این تحقیق، بدترین، میانگین و بهترین پاسخ حاصل از اجرای هر الگوریتم گزارش می‌شود.

باید توجه داشت که با توجه به اینکه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از یک فضای اولیه تصادفی اقدام به حل مسئله و یافتن پاسخ بهینه می‌نمایند، بنابراین لازم است که به منظور حصول بهترین پاسخ ممکن، هر الگوریتم به تعداد دفعات مختلف به صورت مستقل اجرا شده و بهترین پاسخ حاصله به عنوان جواب نهایی گزارش شود. البته باید به استواری پاسخ‌های

جدول (۶) مقایسه نتایج حاصل از حل مدل ریاضی و الگوریتم‌های پیشنهادی

| بهترین پاسخ‌ها |       |        |                   |       |        |       | پاسخ میانگین |       |        |                   |       |        |       | بدترین پاسخ‌ها |       |        |                   |       |        |       | Instance    |
|----------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------|--------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------|----------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|-------|-------------|
| MID            |       |        | Run time (second) |       |        |       | MID          |       |        | Run time (second) |       |        |       | MID            |       |        | Run time (second) |       |        |       |             |
| SPEAII         | MOGWO | NSGAII | SPEAII            | MOGWO | NSGAII | Cplex | SPEAII       | MOGWO | NSGAII | SPEAII            | MOGWO | NSGAII | Cplex | SPEAII         | MOGWO | NSGAII | SPEAII            | MOGWO | NSGAII | Cplex |             |
| 186            | 155   | 171    | 172               | 126   | 127    | 4872  | 443          | 341   | 409    | 150               | 131   | 150    | 4704  | 414            | 376   | 3.76   | 141               | 148   | 125    | 4194  | S<br>M<br>1 |
| 171            | 171   | 171    | 173               | 143   | 132    | 5383  | 414          | 376   | 376    | 177               | 137   | 153    | 5146  | 490            | 490   | 4.90   | 154               | 179   | 146    | 4425  | S<br>M<br>2 |
| 287            | 261   | 261    | 197               | 183   | 169    | 6267  | 689          | 574   | 689    | 184               | 162   | 172    | 5660  | 848            | 652   | 6.52   | 163               | 213   | 221    | 5400  | S<br>M<br>3 |
| 404            | 367   | 440    | 200               | 198   | 199    | 6883  | 863          | 664   | 664    | 170               | 275   | 2211   | 6111  | 807            | 807   | 8.07   | 188               | 270   | 178    | 5528  | S<br>M<br>4 |
| 576            | 443   | 576    | 251               | 228   | 208    | 7830  | 746          | 746   | 821    | 181               | 282   | 233    | 7078  | 1268           | 975   | 10.73  | 194               | 286   | 189    | 6811  | S<br>M<br>5 |

را می‌توان در وجود ساختار تصادفی پاسخ‌های اولیه و تلاش در یافتن بخشی از فضای پاسخ دانست که پاسخ بهینه در آن محیط قرار دارد. در واقع هر چقدر پاسخ‌های با کیفیت بالاتر در

مطابق اطلاعات جدول (۶) مشاهده می‌شود که در مقایسه بدترین پاسخ میانگین و بهترین پاسخ، روند تغییرات زمان حل مسئله دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود. دلیل این امر

بخش Exploration حاصل شود، در بخش Exploitation، محاسبات کمتری انجام شده و پاسخ نهایی به صورت مناسب‌تر و در زمان کمتری حاصل می‌شود. در مثال‌های با ابعاد کوچک و متوسط در حالت بدترین پاسخ و پاسخ میانگین، الگوریتم MOGWO دارای بالاترین زمان حل است. این موضوع را می‌توان در وجود ساختارهای چندعاملی (Multi agent) در یافتن پاسخ‌های اولیه و بهبود آن‌ها در تکرارهای متوالی دانست. در حقیقت این الگوریتم در هر تکرار، سه عضوی که دارای بالاترین سطح کارایی است را به عنوان پاسخ‌های تعیین‌کننده در تولید اعضای نسل بعد در نظر گرفته و بنابراین زمان اجرای محاسبات آن بالاتر خواهد بود؛ اما در بهترین پاسخ‌های حاصله، مشاهده می‌شود که الگوریتم SPEAII دارای بالاترین زمان حل است که نشان‌دهنده افزایش سطح محاسبات در این الگوریتم، در یافتن بهترین پاسخ است. در واقع این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً الگوریتم SPEAII در اجراهایی که موفق به یافتن پاسخ‌های نسبتاً بهتر شده، زمان زیادی را در فاز Exploration صرف کرده است. در حقیقت این الگوریتم نمی‌تواند به صورت استوار، پاسخ‌هایی با کیفیت بالا در فاز Exploration تولید کند که

باعث می‌شود در فاز Exploitation نیز توفیق کامل حاصل نشده و پاسخ‌های آن در مقایسه با MOGWO از نظر معیار MID قابل‌رقابت نیست. در مورد الگوریتم NSGAI می‌توان مشاهده نمود که زمان اجراها در حالات بدترین، میانگین و بهترین همواره در پایین‌ترین سطح بوده اما از لحاظ معیار MID عملکرد ضعیف‌تری نسبت به الگوریتم MOGWO دارد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که همواره پاسخ‌های تولیدشده بهترین اجرا تا حد بیشتری به مقدار MID آن‌ها بسیار کمتر از بدترین حالت و میانگین است؛ اما مشخص است که الگوریتم MOGWO در تمامی مثال‌ها دارای مقادیر MID کمتری بوده و پاسخ‌هایی با کیفیت بالاتر ارائه داده است.

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی در تولید پاسخ‌های مناسب، ۱۰ نمود در ابعاد متوسط و ۱۰ نمود در ابعاد بزرگ متناسب با داده‌های ارائه شد در جدول (۸) ارائه و به کمک شاخص‌های SNS و MS مورد بررسی قرار گرفته می‌گیرد. قابل به ذکر است که پارامترهای ورودی نمودهای عددی در بازه‌های تصادفی تولید شده است. ابعاد مثال‌های عددی مختلف نیز در جدول (۷) ارائه می‌شود.

جدول (۷) ابعاد نموده‌های عددی تصادفی تولیدشده

|        | Code | $prob(D, F, E, K, G, L, V^c, V^b, V^a, C, R, J, I, D)$          |
|--------|------|---|
| Medium | M1   | $prob(4, 4, 4, 4, 6, 4, 6, 6, 4, 20, 6, 4, 4, 4)$               |
|        | M2   | $prob(4, 6, 4, 4, 6, 4, 6, 6, 4, 20, 6, 6, 4, 4)$               |
|        | M3   | $prob(4, 4, 4, 4, 8, 4, 8, 8, 4, 24, 8, 4, 4, 4)$               |
|        | M4   | $prob(6, 6, 6, 6, 8, 6, 8, 8, 6, 28, 8, 6, 6, 6)$               |
|        | M5   | $prob(6, 6, 6, 6, 8, 6, 8, 8, 6, 30, 8, 6, 6, 6)$               |
|        | M6   | $prob(8, 8, 8, 8, 12, 8, 12, 12, 8, 40, 12, 8, 8, 8)$           |
|        | M7   | $prob(8, 12, 8, 8, 12, 8, 12, 12, 8, 40, 12, 12, 8, 8)$         |
|        | M8   | $prob(8, 8, 8, 8, 16, 8, 16, 16, 8, 48, 16, 8, 8, 8)$           |
|        | M9   | $prob(12, 12, 12, 12, 16, 12, 16, 16, 12, 56, 16, 12, 12, 12)$  |
|        | M10  | $prob(12, 12, 12, 12, 16, 12, 16, 16, 12, 60, 16, 12, 12, 12)$  |
| Large  | L1   | $prob(16, 16, 16, 16, 24, 16, 24, 24, 16, 80, 24, 16, 16, 16)$  |
|        | L2   | $prob(16, 24, 16, 16, 24, 16, 24, 24, 16, 80, 24, 24, 16, 16)$  |
|        | L3   | $prob(16, 16, 16, 16, 32, 16, 32, 32, 16, 96, 32, 16, 16, 16)$  |
|        | L4   | $prob(24, 24, 24, 24, 32, 24, 32, 32, 24, 112, 32, 24, 24, 24)$ |
|        | L5   | $prob(24, 24, 24, 24, 32, 24, 32, 32, 24, 120, 32, 24, 24, 24)$ |
|        | L6   | $prob(24, 24, 24, 24, 36, 24, 36, 36, 24, 120, 36, 24, 24, 24)$ |
|        | L7   | $prob(24, 36, 24, 24, 36, 24, 36, 36, 24, 120, 36, 36, 24, 24)$ |
|        | L8   | $prob(24, 24, 24, 24, 48, 24, 48, 48, 24, 144, 48, 24, 24, 24)$ |
|        | L9   | $prob(36, 36, 36, 36, 48, 36, 48, 48, 36, 168, 48, 36, 36, 36)$ |
|        | L10  | $prob(36, 36, 36, 36, 48, 36, 48, 48, 36, 180, 48, 36, 36, 36)$ |

کمک الگوریتم‌های پیشنهادی، نتایج در قالب جدول (۸) ارائه شده است.

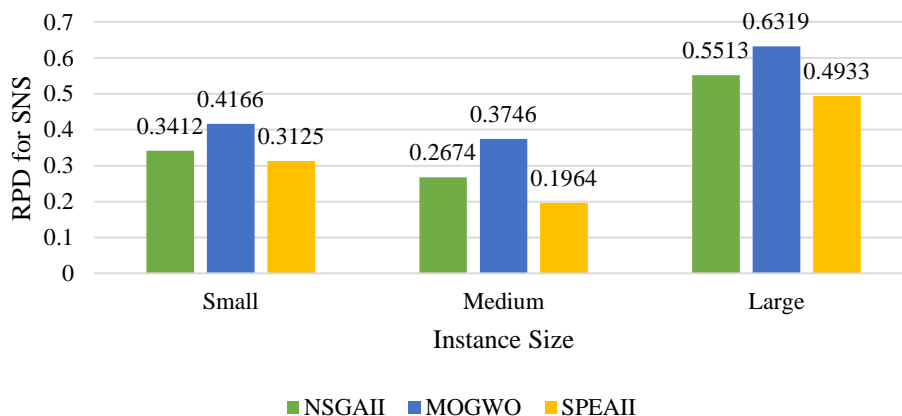
قابل توجه است که پارامترهای ورودی نمودهای عددی مطابق با بازه‌های عددی برای پارامترهای تولیدشده به صورت تصادفی تولید شده است. پس از حل نمودهای عددی به

جدول (۸) نتایج حاصل حل نمودهای عددی متوسط و بزرگ توسط الگوریتم‌های پیشنهادی

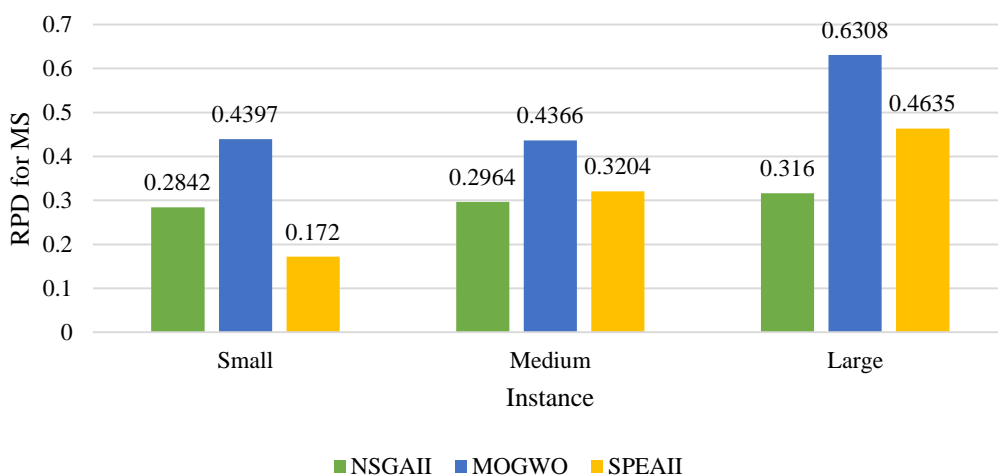
| Instance | NSGAI      |            |     | PESAI    |          |     | MOGWO       |             |     |
|----------|------------|------------|-----|----------|----------|-----|-------------|-------------|-----|
|          | SNS        | MS         | NPS | SNS      | MS       | NPS | SNS         | MS          | NPS |
| M1       | 1998/7695  | 2829/1923  | 71  | 1708/35  | 2503/71  | 56  | 2298/584925 | 3253/571145 | 88  |
| M2       | 3154/2672  | 3042/252   | 101 | 2816/31  | 2535/21  | 81  | 3375/065904 | 3316/05468  | 145 |
| M3       | 3601/6725  | 6549/6534  | 46  | 3244/75  | 5745/31  | 36  | 3997/856475 | 7401/108342 | 52  |
| M4       | 5382/8414  | 6732/8172  | 40  | 4561/73  | 5905/98  | 30  | 5813/468712 | 7540/755264 | 47  |
| M5       | 6029/2276  | 8944/515   | 87  | 5197/61  | 7915/5   | 66  | 6692/442636 | 10286/19225 | 100 |
| M6       | 6214/2435  | 10168/378  | 52  | 5403/69  | 9243/98  | 46  | 6897/810285 | 11083/53202 | 61  |
| M7       | 6823/32    | 11741/296  | 88  | 5686/1   | 10483/3  | 65  | 7573/8852   | 13032/83856 | 99  |
| M8       | 7693/308   | 13015/38   | 62  | 6411/09  | 11417    | 55  | 8385/70572  | 14967/687   | 85  |
| M9       | 7952/149   | 19591/1151 | 53  | 7037/3   | 17337/27 | 39  | 8588/32092  | 20962/49316 | 70  |
| M10      | 9862/322   | 19514/8323 | 32  | 8357/9   | 17580/93 | 26  | 11243/04708 | 20490/57392 | 43  |
| L1       | 9341/094   | 25575/6256 | 43  | 8415/4   | 22835/38 | 34  | 10742/2581  | 26854/40688 | 61  |
| L2       | 10102/014  | 26256/4512 | 78  | 8634/2   | 23443/26 | 67  | 11011/19526 | 28882/09632 | 97  |
| L3       | 10481/6544 | 29060/3556 | 95  | 9358/62  | 24627/42 | 80  | 11949/08602 | 32256/99472 | 109 |
| L4       | 10567/0208 | 29330/221  | 73  | 9434/84  | 25504/54 | 61  | 11729/39309 | 33729/75415 | 84  |
| L5       | 12945/8224 | 37482/6081 | 90  | 11558/77 | 31497/99 | 63  | 14369/86286 | 40856/04283 | 119 |
| L6       | 13156/6352 | 38171/5776 | 116 | 11643/04 | 32625/28 | 95  | 14077/59966 | 43897/31424 | 136 |
| L7       | 13441/131  | 49355/8265 | 104 | 12219/21 | 42918/11 | 75  | 14382/01017 | 54784/96742 | 116 |
| L8       | 15506/064  | 56484/5416 | 100 | 13844/7  | 49986/32 | 75  | 17056/6704  | 62132/99576 | 136 |
| L9       | 18423/8592 | 62490/432  | 67  | 15613/44 | 52075/36 | 59  | 20818/9609  | 66864/76224 | 84  |
| L10      | 79923/7361 | 60992/6956 | 70  | 70728/97 | 52579/91 | 60  | 91113/05915 | 65262/18429 | 101 |

نسبی بالاتری است. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود، الگوریتم MOGWO به‌طور چشم‌گیری از دو الگوریتم دیگر کارایی بالاتری دارد؛ بنابراین به‌منظور حل مورد مطالعاتی تحقیق از الگوریتم MOGWO استفاده خواهد شد.

مطابق اطلاعات جدول فوق می‌توان به‌وضوح مشاهده نمود که الگوریتم MOGWO دارای مقادیر بزرگ‌تری از معیارهای SNS و MS است که نشان از کارایی بالاتر این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های پیشنهادی دارد. در مقایسه الگوریتم‌های NSGAI و SPEAI نیز می‌توان به این جمع‌بندی رسید که الگوریتم NSGAI دارای کارایی

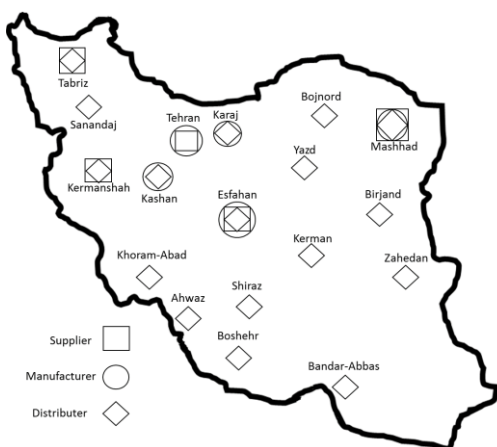


شکل (۲-الف) مقایسه مقادیر RPD(SNS) برای الگوریتم‌های مختلف



شکل (۲-ب). مقایسه مقادیر RPD(SNS) برای الگوریتم‌های مختلف

فعال تأمین، تولید و توزیع کالاهای تولیدی در گروه صنعتی سمیه به صورت شکل (۳) است.



شکل (۳) ساختار فعلی مراکز تأمین، تولید و توزیع

پس از حل مسئله به کمک الگوریتم MOGWO جبهه پارتویی به صورت شکل (۴) تولید شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، جبهه پارتویی حاصل از حل مسئله به کمک الگوریتم پیشنهادی تعداد ۹۷ نقطه پارتویی را تولید کرده است. این پاسخ‌ها در بازه  $7.1 \times 10^9$  تا  $10^9$  برای تابع هدف اول، در بازه  $7 \times 10^3$  تا  $10^3$  برای تابع هدف دوم و در بازه  $50 \times 10^4$  تا  $80 \times 10^4$  برای تابع هدف سوم پراکنده شدند. اما تمرکز اکثریت پاسخ‌ها در بازه  $7.4 \times 10^9$  تا  $7.7 \times 10^9$  برای تابع هدف اول و در بازه  $7 \times 10^3$  تا  $8 \times 10^3$  برای

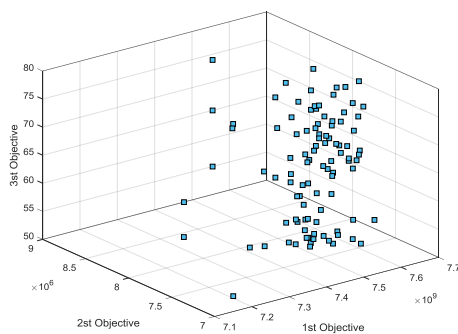
### ۶-مورد مطالعاتی تحقیق

در این بخش به منظور ارائه کاربردی بودن مدل پیشنهادی تحقیق، زنجیره تأمین محصولات تولیدی کارخانه تولید مصالح ساختمانی ایران سازه که محصولات خود را با نام‌های تجاری مختلف وارد بازار می‌نماید به عنوان مورد مطالعاتی تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. این کارخانه علاوه بر اینکه اقدام به تولید مصالح ساختمانی به صورت مستقل می‌کند، از طریق انعقاد قراردادهای همکاری با سایر کارخانه‌ها سعی در این همکاری در ساختار زنجیره‌ای خود دارد. بدین منظور این گروه تولیدی دارای کارگاه‌های مختلف تولید مصالح ساختمانی در شهرهای مختلف ایران است. مطابق با اطلاعات در دسترس از این مورد مطالعاتی، ۴ تأمین‌کننده اصلی مواد اولیه، ۵ مرکز بالقوه جهت افتتاح به عنوان مرکز تولید، ۱۵ مرکز توزیع بالقوه و تعداد ۴۸ شهر به عنوان مصرف‌کننده نهایی (مشتری) موجود است. جهت انتقال کالا از تأمین‌کنندگان به مراکز تولید ۳ نوع وسیله نقلیه، جهت انتقال محصولات از مراکز تولید به مراکز توزیع ۳ نوع وسیله نقلیه و جهت انتقال محصولات به مشتریان نهایی تعداد ۵ نوع وسیله نقلیه مختلف موجود است. هر مشتری می‌تواند در ۳ حالت مختلف تقاضای خود را به مرکز توزیع با تولیدکننده ارائه دهد. شرکت مادر نیز به منظور جذب مشتریان، دو سطح تخفیف متفاوت در نظر گرفته است. تمامی تقاضاها محدود به ۱۵ نوع مصالح ساختمانی مختلف است و باید در یک ساختار بهینه به محل مشتریان انتقال داده شود. برخی از مهم‌ترین اطلاعات مرتبط با مورد مطالعاتی از طریق لینک [https://1drv.ms/u/s!AvL\\_6iHVm2o1hSrjdrWr\\_Is8R0Dq](https://1drv.ms/u/s!AvL_6iHVm2o1hSrjdrWr_Is8R0Dq) قابل دسترسی است. ساختار فعلی مراکز

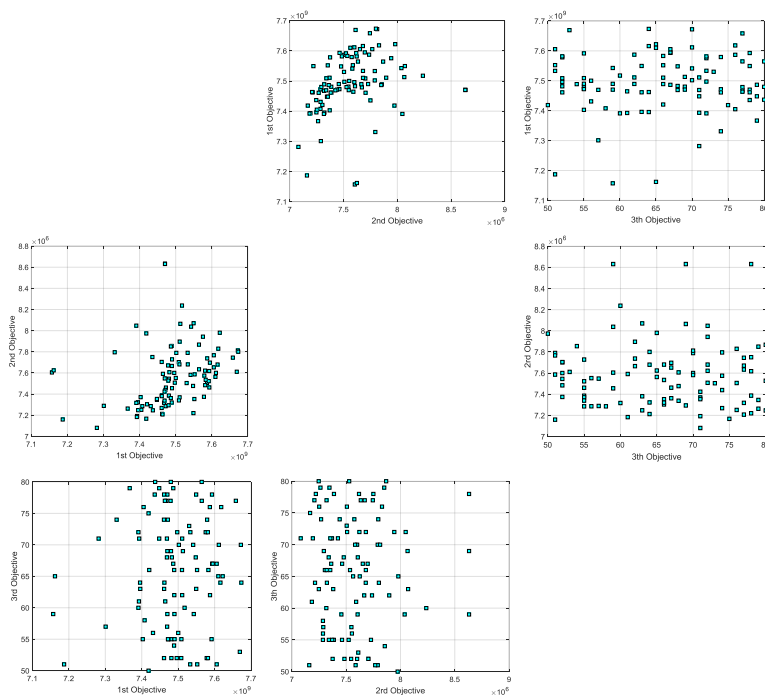


به عبارت دیگر اکثر پاسخها تحت تأثیر توابع اول و دوم بوده و مقادیر تابع هدف سوم آنها به‌طور تقریباً یکسان در تمام بازه موردنظر وجود دارد. به همین دلیل در نمودار دوبعدی تابع هدف اول نسبت به تابع هدف دوم، تمرکز پاسخها متمایل به نقاط گوشه‌ای فضا است.

تابع هدف دوم است. این موضوع در شکل (۴ الف)) که ساختار سه‌بعدی جبهه را نشان می‌دهد به‌صورت مشخص قابل مشاهده است. اما مطابق با شکل (۴ ب)) نیز مشخص است که تأثیرگذاری تابع هدف اول و دوم نسبت به تابع هدف سوم در ایجاد پاسخهای پارتویی بیشتر است.



(الف)



(ب)

شکل (۴) جبهه پارتویی سه‌بعدی (الف) و تصویر آن بر روی محورهای دوبعدی (ب) حاصل از حل مورد مطالعاتی تحقیق

می‌شود ۹۷ عضو پارتویی از طریق حل مدل تولید شده است.

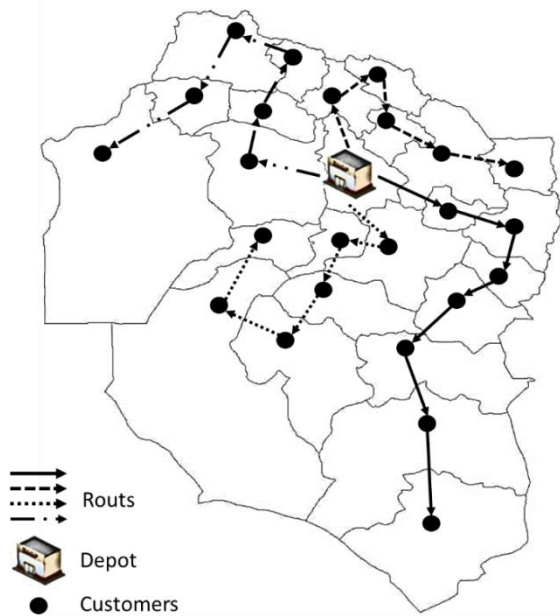
در ادامه در جدول (۹) مقادیر تمام اعضای پارتویی تولیدشده را گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده

جدول (۹) مقادیر توابع هدف اعضای پارتویی

| Pareto Member        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Obj 1 \times 10^7$  | 751.1 | 748.2 | 754.9 | 750.1 | 739.5 | 733.1 | 758.6 | 751.7 | 755.2 | 747.8 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 78.9  | 76.1  | 80.7  | 77.8  | 72.4  | 77.9  | 75.1  | 82.3  | 75.8  | 76.7  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 62    | 68    | 63    | 70    | 63    | 74    | 76    | 60    | 51    | 77    |
| <b>Pareto Member</b> | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 748.1 | 748.1 | 739.5 | 746.7 | 761.1 | 756.4 | 718.6 | 751.2 | 744.7 | 767.9 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 75.4  | 73.8  | 73.2  | 73.2  | 76.1  | 78.6  | 71.6  | 80.6  | 73.4  | 78.1  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 52    | 55    | 64    | 77    | 70    | 80    | 51    | 69    | 79    | 70    |
| <b>Pareto Member</b> | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 747.3 | 758.7 | 740.2 | 715.7 | 757.8 | 730.1 | 747.9 | 747.1 | 765.8 | 753.3 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 74.6  | 77.3  | 73.7  | 76.1  | 73.7  | 72.8  | 75.2  | 74.4  | 77.4  | 77.9  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 55    | 62    | 55    | 59    | 52    | 57    | 80    | 74    | 77    | 51    |
| <b>Pareto Member</b> | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    | 37    | 38    | 39    | 40    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 746.9 | 751.0 | 747.2 | 748.8 | 746.9 | 750.8 | 757.5 | 754.8 | 761.5 | 762.2 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 75.4  | 73.6  | 72.8  | 78.5  | 73.3  | 77.1  | 79.4  | 74.7  | 76.7  | 79.8  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 57    | 71    | 55    | 54    | 68    | 52    | 72    | 68    | 64    | 65    |
| <b>Pareto Member</b> | 41    | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49    | 50    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 754.2 | 759.2 | 748.1 | 748.6 | 760.5 | 742.1 | 750.8 | 749.7 | 759.3 | 747.0 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 80.3  | 76.1  | 72.9  | 78.5  | 77.6  | 73.1  | 73.4  | 75.1  | 74.6  | 86.3  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 59    | 78    | 69    | 79    | 51    | 66    | 55    | 72    | 67    | 78    |
| <b>Pareto Member</b> | 51    | 52    | 53    | 54    | 55    | 56    | 57    | 58    | 59    | 60    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 748.6 | 759.4 | 746.2 | 743.1 | 767.3 | 741.8 | 759.1 | 741.8 | 755.1 | 756.4 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 73.6  | 76.9  | 72.1  | 72.8  | 78.1  | 79.7  | 75.2  | 71.6  | 73.5  | 76.3  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 67    | 67    | 64    | 56    | 64    | 50    | 55    | 75    | 66    | 77    |
| <b>Pareto Member</b> | 61    | 62    | 63    | 64    | 65    | 66    | 67    | 68    | 69    | 70    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 754.1 | 740.4 | 743.6 | 748.8 | 743.5 | 746.1 | 746.1 | 747.0 | 758.1 | 746.1 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 75.8  | 72.5  | 72.4  | 73.2  | 77.5  | 77.1  | 73.8  | 86.3  | 74.8  | 72.6  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 70    | 76    | 80    | 66    | 78    | 52    | 78    | 69    | 52    | 74    |
| <b>Pareto Member</b> | 71    | 72    | 73    | 74    | 75    | 76    | 77    | 78    | 79    | 80    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 748.9 | 766.9 | 751.1 | 746.9 | 746.2 | 865.7 | 758.3 | 746.4 | 747.1 | 739.3 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 77.2  | 76.2  | 76.8  | 74.2  | 73.8  | 80.7  | 75.4  | 75.9  | 86.3  | 71.9  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 55    | 53    | 66    | 71    | 62    | 67    | 66    | 61    | 59    | 71    |
| <b>Pareto Member</b> | 81    | 82    | 83    | 84    | 85    | 86    | 87    | 88    | 89    | 90    |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 761.8 | 754.9 | 753.3 | 749.6 | 750.1 | 761.1 | 740.7 | 736.7 | 760.6 | 744.8 |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 78.3  | 72.2  | 76.8  | 76.1  | 75.5  | 75.6  | 72.8  | 72.6  | 76.5  | 73.5  |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 76    | 78    | 72    | 52    | 56    | 65    | 58    | 79    | 67    | 71    |
| <b>Pareto Member</b> | 91    | 92    | 93    | 94    | 95    | 96    | 97    |       |       |       |
| $Obj 1 \times 10^7$  | 757.9 | 716.2 | 753.1 | 739.2 | 748.9 | 758.1 | 739.1 |       |       |       |
| $Obj 2 \times 10^5$  | 75.7  | 76.2  | 75.1  | 71.8  | 74.5  | 76.2  | 73.1  |       |       |       |
| $Obj 3 \times 10^4$  | 74    | 65    | 73    | 61    | 59    | 72    | 60    |       |       |       |

اول  $7.8 \times 10^9$ ، تابع هدف دوم ۷۷۲۵ و تابع هدف سوم ۶۳۱۴ به‌عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته خواهد شد که در شکل (۵) ساختار نهایی مکان‌یابی تسهیلات و در شکل (۶)

به‌منظور پیاده‌سازی نتایج در شرایط دنیای واقعی، باید یکی از اعضای جبهه پارتو به‌عنوان پاسخ نهایی انتخاب شود. در این تحقیق عضو پارتویی شماره ۷۶ با مقدار تابع هدف



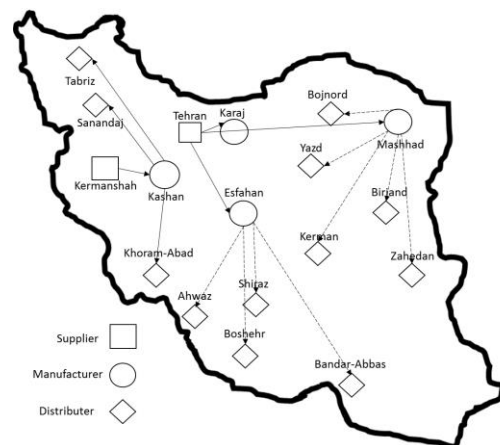
شکل (۶) مسیررسانی صورت گرفته در یک بخش از منطقه مورد مطالعه

#### ۷- جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

در این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه به منظور بهینه‌سازی مسئله طراحی زنجیره تأمین مواد ساختمانی ارائه شده است. این مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمکی برای مدیران جهت اتخاذ تصمیمات نهایی مورد استفاده قرار گیرد؛ اما با توجه به اینکه مدل ارائه شده از رده مسائل ناچندجمله‌ای سخت است، به منظور حل آن در ابعاد واقعی باید از الگوریتم‌های فرا ابتکاری شود. بدین منظور سه الگوریتم NSGAII، SPEAII و MOGWO ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌های ارائه شده، معیارهای مقایسه مناسبی در نظر گرفته شده است. پس از بررسی نتایج مشاهده می‌شود که الگوریتم MOGWO دارای بالاترین سطح کارایی نسبت به دو الگوریتم دیگر است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان مشاهده نمود که اعضای جبهه پارتویی حاصله دارای ساختاری نامغلوب است. پس از مقایسه الگوریتم‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که الگوریتم SPEAII دارای فاصله بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها با جبهه تولید شده توسط Cplex است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از عملگرهای موجود در الگوریتم‌های

مسیررسانی انجام شده در یک بخش از مورد مطالعاتی نشان داده می‌شود. دلیل تفکیک شکل‌های (۵) و (۶) به دلیل تراکم بالای نقاط بوده که مانع از ایجاد ساختار گرافیکی مناسب می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، دو مرکز تأمین، چهار مرکز تولید و ۱۲ مرکز توزیع احداث شده است. نحوه تخصیص مراکز تولید به مراکز تأمین به‌گونه‌ای است که حداقل فاصله ممکن لحاظ شود تا هزینه‌های انتقال در کنار هزینه احداث کمینه گردد. همچنین معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در این مکان‌ها مطلوب است. با توجه اینکه نشان دادن تمام نقاط مشتریان بر روی شکل باعث ایجاد اختلال در تهیه ساختار گرافیکی می‌شود، در ادامه تنها مسیررسانی انجام شده در بخشی از مورد مطالعاتی ارائه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، چهار مسیر حرکت مجزا توسط چهار وسیله نقلیه از مرکز توزیع خارج شده تا کالاهای مورد نیاز را به دست مشتریان برسانند. همان‌طور که

مشاهده می‌شود تمامی مسیرها دارای ساختاری پیوسته است.



شکل (۵) ساختار بهینه مراکز تأمین، تولید و توزیع

- [2]. Eccles, R.G., Bureaucratic versus craft administration: the relationship of market structure to the construction firm. *Administrative science quarterly*, 1981: p. 449-469.
- [3]. Vrijhoef, R. and L. Koskela, The four roles of supply chain management in construction. *European journal of purchasing & supply management*, 2000. 6(3-4): p. 169-178.
- [4]. Segerstedt, A. and T. Olofsson, Supply chains in the construction industry. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2010. 15(5): p. 347-353.
- [5]. O'Brien, W.J., et al., *Construction supply chain management handbook*. 2008: CRC press.
- [6]. Frodel, M. and P.-E. Josephson, Perceived Constraints when Establishing and Maintaining Contractor-Supplier Relations in Construction. *Construction Management, Chalmers University of Technology*, 2009.
- [7]. Tuzkaya, G., B. Gülsün, and Ş. Önsel, A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry. *International Journal of Production Research*, 2011. 49(15): p. 4543-4571.
- [8]. Pishvaei, M.S. and J. Razmi, Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 2012. 36(8): p. 3433-3446.
- [9]. Pishvaei, M.S., J. Razmi, and S.A. Torabi, Robust possibilistic programming for socially

MOGWO و SPEAI می‌تواند باعث حصول نتایج مناسب‌تری شود؛ اما پس از مقایسه نتایج حاصل حل چندین مثال عددی در ابعاد مختلف مشاهده می‌شود که الگوریتم MOGWO دارای بالاترین سطح عملکرد بوده و می‌تواند به‌عنوان الگوریتم نهایی مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور گسترش ابعاد تحقیق و ارائه پیشنهادات در راستای ارائه پژوهش‌های وسیع‌تر، پیشنهادهایی در قالب موارد زیر ارائه می‌شود.

استفاده از موارد مطالعاتی مختلف و پیاده‌سازی نتایج حاصله در محیط‌های واقعی بزرگ‌تر می‌توان به‌عنوان اولین پیشنهاد تحقیق مدنظر قرار گیرد. این موضوع از آن جهت دارای اهمیت است که بررسی نتایج حاصله از پیاده‌سازی خروجی ساختار پیشنهادی در محیط‌های واقعی می‌تواند دامنه کارایی مدل و الگوریتم‌ها را به‌طور مشخصی نشان دهد.

- استفاده از سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری جدید و مقایسه نتایج را می‌توان به‌عنوان پیشنهاد پژوهشی دیگری در نظر گرفت. این موضوع می‌تواند باعث فراهم شدن زمینه مناسب جهت تولید پاسخ‌های بهتر توسط سایر الگوریتم‌ها و همچنین مقایسه کارکرد الگوریتم‌های مختلف در این مسئله شود.
- استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی استوار جدید می‌تواند کاربرد مناسبی را ایجاد نماید. با توجه به اینکه همواره تخمین برخی از پارامترهای مسئله دارای عدم قطعیت ذاتی بوده و یا اینکه به هر دلیلی مقداردهی آن مشکل است، بنابراین استفاده از رویکردهای برخورد با شرایط عدم قطعیت می‌تواند باعث گسترش سطح کاربرد مسئله گردد. یکی از معتبرترین روش‌های برخورد با عدم قطعیت نیز استفاده از برنامه‌ریزی استوار است که منجر به ایجاد پاسخ‌هایی استوار در مقابل تغییرات می‌شود.

#### ۸- منابع و مأخذ

- [1]. Irizarry, J., E.P. Karan, and F. Jalaei, Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. *Automation in Construction*, 2013. 31: p. 241-254.

- [16]. Fattahi, M., et al., Dynamic supply chain network design with capacity planning and multi-period pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015. 81: p. 169-202.
- [17]. Hasani, A. and A. Khosrojerdi, Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016. 87: p. 20-52.
- [18]. Chibeles-Martins, N., et al., A multi-objective meta-heuristic approach for the design and planning of green supply chains-MBSA. *Expert Systems with Applications*, 2016. 47: p. 71-84.
- [19]. Zohal, M. and H. Soleimani, Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 133: p. 314-337.
- [20]. Kumar, R.S., et al., Designing multi-period supply chain network considering risk and emission: A multi-objective approach. *Annals of Operations Research*, 2017. 250(2): p. 427-461.
- [21]. Fahimnia, B., H. Davarzani, and A. Eshragh, Planning of complex supply chains: A performance comparison of three meta-heuristic algorithms. *Computers & Operations Research*, 2018. 89: p. 241-252.
- [22]. Tsao, Y.-C., et al., Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: fuzzy responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 2012. 206: p. 1-20.
- [10]. Badri, H., M. Bashiri, and T.H. Hejazi, Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method. *Computers & Operations Research*, 2013. 40(4): p. 1143-1154.
- [11]. Shankar, B.L., et al., Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network—A multi-objective evolutionary approach. *Expert Systems with Applications*, 2013. 40(2): p. 551-562.
- [12]. Kanzian, C., et al., Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. *biomass and bioenergy*, 2013. 58: p. 294-302.
- [13]. Wu, T. and K. Zhang, A computational study for common network design in multi-commodity supply chains. *Computers & Operations Research*, 2014. 44: p. 206-213.
- [14]. Sarrafha, K., et al., A bi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of a multi-echelon supply chain network design: A new tuned MOEA. *Computers & Operations Research*, 2015. 54: p. 35-51.
- [15]. Soleimani, H. and G. Kannan, A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. *Applied Mathematical Modelling*, 2015. 39(14): p. 3990-4012.

- environmental performances. Computers & Chemical Engineering, 2011. 35(8): p. 1454-1468.
- [30]. Jamshidi, R., S.F. Ghomi, and B. Karimi, Multi-objective green supply chain optimization with a new hybrid memetic algorithm using the Taguchi method. Scientia Iranica, 2012. 19(6): p. 1876-1886.
- [31]. Xifeng, T., Z. Ji, and X. Peng, A multi-objective optimization model for sustainable logistics facility location. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013. 22: p. 45-48.
- [32]. Hiremath, N.C., S. Sahu, and M.K. Tiwari, Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013. 24(6): p. 1071-1084.
- [33]. Yue, D., M.A. Kim, and F. You, Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit: general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2013. 1(8): p. 1003-1014.
- [34]. Ruiz-Femenia, R., et al., Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. Chemical Engineering Science, 2013. 95: p. 1-11.
- [35]. Özceylan, E. and T. Paksoy, Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop multi-objective programming. Journal of Cleaner Production, 2018. 174: p. 1550-1565.
- [23]. Ghahremani-Nahr, J., R. Kian, and E. Sabet, A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. Expert Systems with Applications, 2019. 116: p. 454-471.
- [24]. Hamdan, B. and A. Diabat, A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem. Computers & Operations Research, 2019. 101: p. 130-143.
- [25]. Dehghanian, F. and S. Mansour, Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. Resources, Conservation and Recycling, 2009. 53(10): p. 559-570.
- [26]. Galante, G., et al., A multi-objective approach to solid waste management. Waste Management, 2010. 30(8): p. 1720-1728.
- [27]. Ramudhin, A., A. Chaabane, and M. Paquet, Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. International Journal of Management Science and Engineering Management, 2010. 5(1): p. 30-38.
- [28]. Chaabane, A., A. Ramudhin, and M. Paquet, Designing supply chains with sustainability considerations. Production Planning & Control, 2011. 22(8): p. 727-741.
- [29]. Pinto-Varela, T., A.P.F. Barbosa-Póvoa, and A.Q. Novais, Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: economic versus



- [42]. Wibowo, M.A. and M.N. Sholeh, The analysis of supply chain performance measurement at construction project. *Procedia Engineering*, 2015. 125: p. 25-31.
- [43]. Liu, Q. and Z. Tao. A multi-objective optimization model for the purchasing and inventory in a three-echelon construction supply chain. in *Proceedings of the Ninth International Conference on Management Science and Engineering Management*. 2015. Springer.
- [44]. Wu, C. and D. Barnes, An integrated model for green partner selection and supply chain construction. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 112: p. 2114-2132.
- [45]. Dell'Amico, M. and S. Novellani. A two-echelon facility location problem with stochastic demands for urban construction logistics: An application within the SUCCESS project. in *2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*. 2017. IEEE.
- [46]. Feng, C., et al., Stackelberg game optimization for integrated production-distribution-construction system in construction supply chain. *Knowledge-Based Systems*, 2018. 157: p. 52-67.
- [47]. Golpîra, H., Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource Construction Supply Chain network design under the vendor managed inventory strategy. *Expert Systems with Applications*, 2020. 139: p. 112841.
- [36]. Govindan, K., et al., Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 2014. 152: p. 9-28.
- [37]. Bandyopadhyay, S. and R. Bhattacharya, Solving a tri-objective supply chain problem with modified NSGA-II algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014. 33(1): p. 41-50.
- [38]. Subulan, K., A.S. Taşan, and A. Baykasoğlu, Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, 2015. 39(9): p. 2661-2702.
- [39]. Erik Eriksson, P., Improving construction supply chain collaboration and performance: a lean construction pilot project. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2010. 15(5): p. 394-403.
- [40]. Cheng, J.C., et al., A service oriented framework for construction supply chain integration. *Automation in construction*, 2010. 19(2): p. 245-260.
- [41]. Meng, X., M. Sun, and M. Jones, Maturity model for supply chain relationships in construction. *Journal of Management in Engineering*, 2011. 27(2): p. 97-105.



- evolutionary computation, 2002. 6(2): p. 182-197.
- [54]. Deb, K., et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. in International Conference on Parallel Problem Solving From Nature. 2000. Springer.
- [55]. Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 2014. 69: p. 46-61.
- [56]. Mirjalili, S., et al., Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, 2016. 47: p. 106-119.
- [57]. Zitzler, E., M. Laumanns, and L. Thiele, SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK-report*, 2001. 103.
- [58]. Maghsoudlou, H., et al., Bi-objective optimization of a three-echelon multi-server supply-chain problem in congested systems: Modeling and solution. *Computers & Industrial Engineering*, 2016. 99: p. 41-62.
- [59]. Samadi, A., et al., Heuristic-based metaheuristics to address a sustainable supply chain network design problem. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2018. 35(2): p. 102-117.
- [48]. Meng, X., Change in UK construction: moving toward supply chain collaboration. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013. 19(3): p. 422-432.
- [49]. Tennant, S. and S. Fernie, Organizational learning in construction supply chains. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2013. 20(1): p. 83-98.
- [50]. Ke, H., et al., The impact of contractual governance and trust on EPC projects in construction supply chain performance. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 2015. 26(4): p. 349-363.
- [51]. Moon, S., P.R. Zekavat, and L.E. Bernold, Dynamic control of construction supply chain to improve labor performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2015. 141(6): p. 05015002.
- [52]. Zhai, Y., R.Y. Zhong, and G.Q. Huang, Buffer space hedging and coordination in prefabricated construction supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 2018. 200: p. 192-206.
- [53]. Deb, K., et al., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on*