

# ارائه و بهینه‌سازی یک مدل ریاضی چندهدفه مسئله‌ی بارانداز تقاطعی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

علی محتشمی\* (استادیار)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، قزوین، ایران

علی فلاحیان نجف‌آبادی (کارشناس ارشد)

گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

سعید فرخی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۵ (دوره ۱ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۶۷-۷۹)

در این نوشتار یک مدل جدید چندهدفه‌ی بارانداز تقاطعی ارائه می‌شود. در مدل ریاضی این مقاله سه هدف کمیته‌سازی زمان کل عملیات حمل‌ونقل، کمیته‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل، و کمیته‌سازی تعداد دفعات حمل‌ونقل در کل زنجیره‌ی تأمین در نظر گرفته شده است. از آنجا که مسئله‌ی بارانداز تقاطعی متعلق به رده‌ی NP-hard است و زمان حل مسئله با افزایش ابعاد مسئله به‌شدت افزایش می‌یابد، برای پیدا کردن جواب‌های نزدیک بهینه‌ی مسئله از دو الگوریتم فراابتکاری تکاملی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده شده است. سپس این الگوریتم‌ها با معیارهایی همچون فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل با یکدیگر مقایسه، و الگوریتم برتر در هر معیار مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در بیشتر معیارها به نتایج خوبی رهنمون شده است.

واژگان کلیدی: بارانداز تقاطعی، مدیریت زنجیره‌ی تأمین، الگوریتم‌های فراابتکاری، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل.

## ۱. مقدمه

اخیراً بسیاری از شرکت‌ها پس از رسیدن به پیشرفت‌های قابل توجه در عملیات تولیدی خود، بر بهبود تدارکات و عملیات توزیع متمرکز شده‌اند. بنابراین، مدیریت زنجیره‌ی تأمین و شبکه‌ی توزیع به مسائل چالش‌برانگیز تبدیل شده است. در بیشتر سیستم‌های تولیدی ارسال مستقیم کالا از تولیدکنندگان به مشتریان دشوار است و از این رو، یک مرحله‌ی میانی ویژه برای برقراری ارتباط بین تولیدکننده و مشتری لازم است. یکی از این مراحل میانی در زنجیره‌ی تأمین، مراکز توزیع است. بارانداز تقاطعی نوعی راهبرد انبارداری نوآورانه است که پتانسیل بسیار زیادی برای کنترل تدارکات و هزینه‌های توزیع دارد، و در عین حال به حفظ سطح رضایت مشتری توجه می‌کند. در واقع بارانداز تقاطعی طرفدار توزیع به‌موقع، هماهنگی بهتر میان عرضه و تقاضا، و استفاده‌ی کارآمدتر از دارایی‌های حمل‌ونقل است. مرکز توزیع در اصل به‌عنوان یک مرکز مرتب‌سازی برای چندین تأمین‌کننده و مشتری عمل می‌کند. بنابراین یک سیستم توزیع طراحی شده‌ی خوب، بسیار مهم است. یکی از اجزای

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۵، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۲۸.

mohtashami@qiau.ac.ir  
alifallahian@yahoo.com  
saeedfa@gmail.com

مهم هر سیستم شبکه‌ی توزیع، انبار یا مرکز توزیع است.<sup>[۱]</sup> در واقع بارانداز تقاطعی روشی لجستیک است که در آن محصولات از کارخانه‌ها یا عرضه‌کنندگان به‌طور مستقیم به مشتریان منتقل می‌شود و نه تنها با بخش خرده‌فروشی در ارتباط است بلکه برای تولید و توزیع عمده هم می‌توان آن را لحاظ کرد. بارانداز تقاطعی مرحله‌ی ذخیره‌سازی در انبار را حذف می‌کند ولی مرحله‌ی ارسال و توزیع پابرجاست. پنج فعالیت (عمل) در مراکز توزیع انجام می‌شود: دریافت، مرتب‌سازی، ذخیره‌سازی، گزینش و ارسال. اگر این پنج مؤلفه بهبود یابد هزینه‌های سیستم کاهش و بهره‌وری افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، بارانداز تقاطعی پیامدهای برجسته‌ی دارد نظیر: افزایش توان عملیاتی، افزایش سطح رضایت مشتریان، کاهش سطح موجودی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش زمان تحویل محصولات. در نتیجه این سیستم در زنجیره‌ی تأمین، نوعی روش مدیریت توزیع است و کمک می‌کند تا مدیریت بهتر و مؤثرتری در عملیات توزیع داشته باشیم.

تحقیقات درمورد افزایش توان عملیاتی بارانداز تقاطعی تاکنون مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. مدل‌های تک‌هدفه و چندهدفه برای کمیته‌سازی زمان عملیات و هزینه‌ی حمل‌ونقل در بارانداز تقاطعی از جمله مدل‌هایی است که توسط محققین

مورد بررسی قرار گرفته است. اولین مقاله‌ی فنی درمورد بارانداز تقاطعی<sup>[۲]</sup> در سال ۱۹۹۵ نوشته شد که طی آن درمورد روش‌های مدل‌کردن و کاربرد آن‌ها در بارانداز تقاطعی بحث شده است. در آن نوشتار توصیف شد که چگونه شبیه‌سازی با تعیین بیکربندی بهینه‌ی سخت‌افزاری و کنترل نرم‌افزاری، سیستم بارانداز تقاطعی را تضمین می‌کند. در ادامه، محققین یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی بارانداز تقاطعی دومرحله‌یی را پیشنهاد دادند<sup>[۳]</sup> که برخوردارشان با مدل در دو فاز مختلف بود. برای مسائل کوچک، آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط انتخاب و هر مسئله را با روش CPLEX حل کردند. این در حالی است که برای مسائل متوسط و بزرگ، پیشنهاد حل آن‌ها عبارت بود از به‌کارگیری چهار روش ابتکاری و در نهایت مقایسه‌ی این روش‌ها با یکدیگر. مطالعه‌ی یک مسئله‌ی زمان‌بندی حمل‌ونقل در بارانداز تقاطعی<sup>[۴]</sup> نشان داد که تحویل محصولات به دست مشتری باید مطابق برنامه‌ی زمان‌بندی از پیش تعیین شده باشد. از این رو هر دیرکرد یا زودکردی ممکن است برای مشتری ناخوشایند باشد. بنابراین آن‌ها زمان زودکرد و دیرکرد را به عنوان دو معیار اصلی در مسئله‌ی زمان‌بندی چندمعیاره لحاظ کردند. محققین در ادامه به جست‌وجوی توزیع پویا در شبکه‌های لجستیک پرداختند<sup>[۵]</sup> که طی آن سازمان‌ها برای انتقال محصولات خود از تأمین‌کنندگان به مشتریان از سیستم‌های بارانداز تقاطعی استفاده می‌کنند. در واقع آن‌ها یک مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی سیستم‌های بارانداز تقاطعی و ارزیابی میزان ریسک درگیر در حمل‌ونقل کامیون‌ها ارائه کردند. آنان همچنین مدلی برای کمیته‌سازی هزینه‌های جاری که در مسائل شبکه‌های توزیع بسیار رایج است طراحی کردند<sup>[۶]</sup>، به طوری که بتوانند یک فضای بهینه یا نزدیک به بهینه برای ذخیره‌سازی موقت محصولات در بارانداز تقاطعی تعیین کنند. در واقع هدف آن‌ها کمیته‌سازی کل مسافتی بود که محصولات از کامیون‌های ورودی به انبار و سپس از انبار به کامیون‌های خروجی انتقال پیدا می‌کنند. تأکید آنان بر کاربرد سیستم بارانداز تقاطعی با استفاده از دو روش بود: ۱. توزیع قبل از عملیات بارانداز تقاطعی، که در آن مسئولیت توزیع محصولات به تولیدکنندگان واگذار می‌شود؛ ۲. توزیع پس از عملیات بارانداز تقاطعی، که در آن تولیدکنندگان معمولاً توزیع کالا را به بارانداز تقاطعی واگذار می‌کنند، به خصوص انبارهایی که به مشتریان نزدیک‌تر است. در مطالعه‌ی دیگری<sup>[۸]</sup> مسئله‌ی با هدف کمیته‌سازی تأمین دو فعالیت: ۱. هزینه‌های حمل‌ونقل، ۲. تعداد حمل‌ونقل‌های باقی‌مانده در سیستم در نظر گرفته شد. مسئله‌ی مذکور تحت سه عامل اصلی: «زمان ورود و خروج هر کامیون به داخل بارانداز تقاطعی»، «زمان حمل‌ونقل محصولات از طریق بارانداز تقاطعی» و «کل ظرفیت قابل دسترس بارانداز تقاطعی» بررسی شد.

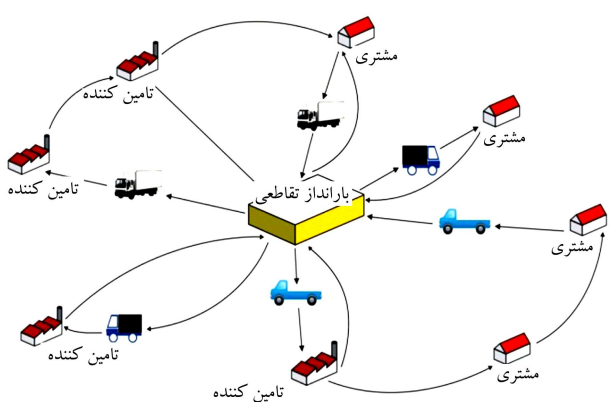
در تشریح الزامات لازم برای موفقیت بارانداز تقاطعی<sup>[۹]</sup>، محققین تأکید داشتند که در بارانداز تقاطعی کارایی از طریق اجرای موفقیت‌آمیز برنامه‌ریزی دقیق نیازها افزایش می‌یابد. به باور آنان بیشتر عیب‌های بارانداز تقاطعی ناشی از این حقیقت است که درک دقیقی از الزامات مورد نیاز برای موفقیت بارانداز تقاطعی و کمبود برنامه‌ریزی‌های اجرایی وجود ندارد. الزامات بارانداز تقاطعی به شش دسته تقسیم شد: ۱. همراهی با دیگر اعضای زنجیره‌ی تأمین؛ ۲. اطمینان کامل از کیفیت و موجود بودن محصول؛ ۳. ارتباط متقابل اعضای زنجیره‌ی تأمین؛ ۴. کنترل و تبادل عملیات بارانداز تقاطعی؛ ۵. کارکنان، تجهیزات و تسهیلات؛ ۶. مدیریت عملیات. با هدف اجرای موفق بارانداز تقاطعی، باید در تنظیم هر برنامه هر شش گروه مذکور مد نظر قرار گیرد. برخی از پژوهش‌گران مسئله‌ی اساسی را تحقق اهداف مختلف عملیاتی -- نظیر کمیته‌سازی زمان جریان، زمان پردازش و زمان تأخیر کامیون‌های خروجی -- می‌دانستند<sup>[۱۱]</sup> و برنامه‌ریزی دقیق و مناسب کامیون‌ها، و اعمال روش‌های اکتشافی را به عنوان راه حل پیشنهاد کردند. ویس و رودبرگن<sup>[۱۲]</sup> تحقیق اصلی خود را به بررسی

چگونگی طراحی محل انبارش کالاها در بارانداز تقاطعی (که باعث کاهش زمان دسترسی و کاهش زمان انتظار می‌شود) اختصاص دادند. آنها با توجه به زمان ورود کالاها و خروج آنها قفسه‌ها و محل قرارگیری کالاهای سفارشی را به گونه‌ی طراحی کردند که به راحتی و در کوتاه‌ترین زمان به کامیون‌های خروجی انتقال یابند و این موضوع را به عنوان عامل مؤثر در کاهش زمان عملیات مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ی دیگری<sup>[۱۳]</sup> توالی کامیون‌های ورودی و خروجی در بارانداز تقاطعی با هدف کمیته‌سازی زمان کل عملیات یا بهینه‌سازی توان عملیاتی در یک سیستم بارانداز تقاطعی بررسی شد. در ادامه، محققین یک مسئله‌ی زمان‌بندی در بارانداز تقاطعی پیشنهاد کردند<sup>[۱۴]</sup> که در آن یک سکوی دریافت و یک سکوی تحویل با کامیون‌های ورودی و خروجی درگیرند. آن‌ها با در نظر گرفتن مسئله‌ی کمیته‌سازی زمان‌بندی عملیات حمل‌ونقل، مدل را با پنج روش فرایبستگی توسعه داده و حل کردند.

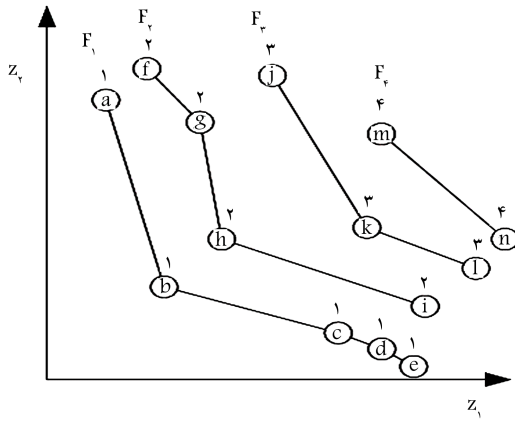
در نوشتار حاضر سعی بر آن است تا با لحاظ کردن مسائل مربوط به عوامل داخلی و خارجی بارانداز تقاطعی، محدودیت‌ها و نواقص مدل‌های قبلی حتی‌الامکان برطرف شود و نیز با اجتناب از در نظر گرفتن مفروضات ساده‌کننده که مدل‌ها را از واقعیت دور می‌کند، مدلی جامع‌تر و کامل‌تر نسبت به مطالعات پیشین ارائه شود. بدین منظور یک مدل ریاضی سه‌هدفه با توابع هدف کمیته‌سازی زمان عملیات، کمیته‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل کامیون‌ها، و کمیته‌سازی تعداد دفعات حمل‌ونقل کامیون‌ها در زنجیره‌ی تأمین با در نظرگیری بارانداز تقاطعی ارائه شده است. جریان عملیات حمل‌ونقل در زنجیره‌ی تأمین با در نظر گرفتن بارانداز تقاطعی در شکل ۱ رسم شده است.

در این مقاله برخلاف تحقیقات پیشین، علاوه بر توابع هدف ذکر شده، محدوده‌ی بیرون از بارانداز تقاطعی نیز در مدل ریاضی ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۱ کامیون‌های ورودی پس از بارگیری محصولات از سوی تأمین‌کنندگان، مستقیماً به سمت مشتریان حرکت، و محصولات را به مشتریان منتقل می‌کنند؛ یا کامیون‌های ورودی به سمت بارانداز تقاطعی حرکت، و محصولات را در بارانداز تقاطعی تخلیه می‌کنند و سپس محصولات از بارانداز تقاطعی در کامیون‌های خروجی بارگیری و به مشتریان منتقل می‌شود. از طرف دیگر یک کامیون می‌تواند محصولات یک یا چند تأمین‌کننده را بارگیری کند و محصول را به یک یا چند مشتری منتقل و تخلیه کند. همچنین مطابق شکل برای حمل‌ونقل محصولات از کامیون‌هایی با ظرفیت‌های متفاوت استفاده خواهد شد.

تابع هدف اول کمیته‌سازی زمان کل عملیات -- شامل زمان‌های حمل‌ونقل کامیون‌ها بین مبادی و مقاصد، زمان‌های بارگیری محصولات از مبادی، زمان تخلیه‌ی



شکل ۱. فرایند عملیات حمل‌ونقل در زنجیره‌ی تأمین با در نظر گرفتن بارانداز تقاطعی.



شکل ۲. نحوه‌ی جبهه‌بندی نقاط در روش NSGA-II.

### ۱.۱.۲. مفهوم غلبه

در روش NSGA-II اعضای جمعیت براساس مفهوم غلبه نداشتن مرتب می‌شوند. در روش مرتب‌سازی غیرغالب، به اعضای از جمعیت که نسبت به سایر اعضای آن نسل غلبه نشده‌اند، رتبه‌ی ۱ نسبت داده شده و در جبهه‌ی اول قرار می‌گیرند و از جمعیت نیز کنار گذاشته می‌شوند. سپس در بین اعضای باقی‌مانده مجدداً اعضای که غلبه نشده باشند انتخاب، و رتبه‌ی ۲ به آنها تعلق می‌گیرد. این اعضا در جبهه‌ی دوم قرار گرفته و موقتاً از جمعیت کنار گذاشته می‌شوند. این روند تا استقرار تمامی اعضای جمعیت (شکل ۲) در جبهه‌های مختلف ادامه می‌یابد. مفهوم غلبه‌ی نقطه‌ی بر نقطه‌ی دیگر در رابطه‌ی ۱ مستتر است. برقراری چنین رابطه‌ی به معنای غلبه‌ی نقطه‌ی  $a$  بر نقطه‌ی  $b$  است.  $f_j$  و  $f_i$  توابع هدف نام و  $Z$  نام هستند.

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : f_i(a) \geq f_j(b), \exists i \in \{1, \dots, n\} : f_j(a) \geq f_i(b) \quad (1)$$

### ۲.۱.۲. مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب

هنگامی که بحث الگوریتم تک‌هدفه مطرح می‌شود، معیار برتری جواب‌ها نسبت به هم بسیار ساده و بدیهی است؛ زیرا تنها یک تابع هدف مد نظر است و چنانچه مسئله‌ی مورد بحث یک مسئله‌ی کمینه‌سازی باشد، جوابی که کم‌ترین مقدار تابع هدف را دارد مطلوب است و بر سایر جواب‌ها برتری دارد. اما زمانی که برای حل مسئله‌ی از یک الگوریتم چندهدفه استفاده می‌شود، به این معناست که حداقل دو تابع هدف مد نظر است و دیگر به‌آسانی نمی‌توان درمورد بعضی از جواب‌ها نظر قطعی داد. در اکثر موارد، نقاطی یافت می‌شود که هیچ‌کدام بر دیگری برتری کامل ندارد و نمی‌توان با مفهوم غلبه، دو به دو بین آنها مقایسه‌ی انجام داد. لذا برای به دست آوردن بهترین جواب‌ها باید آنها را براساس معیاری مشخص مرتب کرد. در این الگوریتم به هر جواب یک رتبه (RANK) اختصاص می‌یابد که براساس تعداد مغلوب شدن آنها نسبت به سایر نقاط انجام می‌شود. در پایان الگوریتم، نقاطی که بهترین رتبه، یعنی رتبه‌ی ۱، را دارا باشد به‌عنوان مجموعه جواب یا نقاط پارتو فرانت انتخاب می‌شود.

### ۳.۱.۲. مفهوم حفظ تنوع پاسخ‌ها (فاصله‌ی ازدحامی)

پس از جبهه‌بندی نقاط، از معیار دیگری به نام «فاصله‌ی ازدحام» برای ارزیابی نقاط موجود در یک جبهه استفاده می‌شود. این معیار جایگزینی برای تسهیم در روش NSGA است و به همین دلیل این روش که در سال ۲۰۰۲ ابداع شده، NSGA-II نام گرفته است. ابتدا برای هر تابع هدف  $K$  نتایج مرتب می‌شود و به نقاطی که بیشترین و کم‌ترین مقدار این تابع هدف را دارند، مقدار فاصله‌ی بی‌نهایت

محصولات در مقاصد و زمان جابه‌جایی محصولات از ورودی بارانداز تقاطعی به خروجی بارانداز تقاطعی جابه‌جایی -- را نشانه می‌گیرد. در واقع زمان کل عملیات از حرکت اولین کامیون از بارانداز تقاطعی به سمت تأمین‌کننده شروع می‌شود و تا انتقال آخرین کامیون از آخرین مشتری به بارانداز تقاطعی ادامه دارد. تابع هدف دوم سوم کمینه‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل کامیون‌ها در کل زنجیره‌ی تأمین است؛ و تابع هدف است. در کل، هدف هر سه مدل رسیدن به بهترین توالی حمل‌ونقل کامیون‌های درون سیستم، نوع و تعداد محصولات بارگیری در هر توالی حمل‌ونقل، و مسیر بهینه‌ی حمل‌ونقل محصولات از تأمین‌کنندگان به مشتریان است. علاوه بر این، راه حل نهایی به این سؤال نیز پاسخ می‌دهد که آیا محصولات مستقیماً از کامیون‌های ورودی به مشتریان منتقل می‌شوند یا از طریق کامیون‌های ورودی به بارانداز تقاطعی حمل، و از آنجا توسط کامیون‌های خروجی به مشتریان منتقل می‌شود.

بخش دوم این مقاله به ارائه‌ی الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی می‌پردازد. در بخش سوم مدل ریاضی مسئله تشریح می‌شود. در بخش چهارم مثال عددی همراه با تولید پارامترهای مدل برای نشان دادن عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود و نیز نتایج به دست آمده تجزیه و تحلیل می‌شود. بخش پنجم به مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌های مورد استفاده در این مقاله، و در نهایت بخش ششم به نتیجه‌گیری کلی موضوع اختصاص یافته است.

## ۲. الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه

الگوریتم‌های تکاملی زیر مجموعه‌ی بی‌محاسبات تکاملی‌اند که از قابلیت دست‌یابی به جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه در مسائل خطی و غیرخطی، پیوسته یا گسسته، محدب یا غیرمحدب با استفاده از نظریه‌های زیست‌شناختی برخوردارند. دست‌یابی به مجموعه‌ی از جواب‌های غیرمسلط بدون نیاز به استفاده از روش‌های وزن‌دهی به توابع هدف که مستقیماً مرتبط به نظر تصمیم‌گیرنده است، مهم‌ترین مزیت الگوریتم‌های تکاملی در زمینه‌ی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. از همین رو، این نوع الگوریتم‌ها در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی چندهدفه کاربرد دارد. [۱۵] در این مقاله دو نوع از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه -- الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۱</sup> و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۲</sup> -- به‌عنوان ابزارهای بهینه‌سازی برای حل مسئله‌ی بارانداز تقاطعی ارائه شده است.

### ۱.۱.۲ الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

با افزایش اهداف مسائل مختلف بهینه‌سازی، کاربردهای الگوریتم ژنتیک چندهدفه که برگرفته از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه است توسعه یافته است. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) [۱۶] اساساً متفاوت از NSGA است. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده که به جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ی از بهترین جواب‌ها را با نام پارتو فرانت ارائه می‌دهد. این دو عملگر عبارت‌اند از: ۱. عملگری که یک معیار برتری (رتبه) براساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد؛ ۲. عملگری که تنوع جواب‌ها را در میان جواب‌های با رتبه‌ی برابر حفظ می‌کند. در این الگوریتم لازم است مفهوم غلبه، فاصله‌ی ازدحام، و مرتب‌سازی نامغلوب توضیح داده شود.

شد. الگوریتم PSO با گروهی از جواب‌های (ذرات) تصادفی آغاز و سپس با به هنگام‌سازی ذرات در هر تکرار به دنبال جواب بهینه می‌شود. اگر متغیرهای تصمیم و به دنبال آن موقعیت ذرات از نوع صفر و ۱ باشد، بردارهای سرعت و موقعیت هریک از ذرات در هر تکرار الگوریتم، طبق روابط ۵ الی ۸ محاسبه می‌شود.

$$V_{it} = w.V_{it-1} + c_1.r_1.(pBest_i - x_{it}) + c_2.r_2.(nBest_i - x_{it}) \quad (5)$$

$$-V_{max} \leq V_{it} \leq V_{max} \quad (6)$$

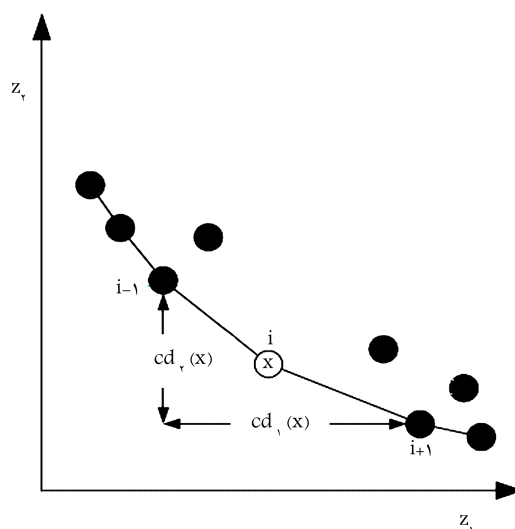
$$s_i = 1 / (1 + e^{V_{it}}) \quad (7)$$

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \rho \leq s_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

طبق رابطه‌ی ۵ بردار سرعت جدید هر ذره براساس سرعت قبلی خود ذره ( $V_{i(t-1)}$ ) بهترین موقعیتی است که ذره تاکنون به آن دست یافته است ( $pBest_i$ ). موقعیت بهترین ذره در همسایگی ذره‌ی که اخیراً به دست آمده ( $nBest_i$ ) محاسبه می‌شود. در صورتی که همسایگی هر ذره شامل تمام ذرات گروه باشد، آنگاه ( $nBest_i$ ) بیانگر موقعیت بهترین ذره ( $gBest$ ) در میان گروه است.  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی (با توزیع یکنواخت بین  $[0, 1]$ ) هستند که مستقل از یکدیگر تولید می‌شوند.  $c_1$  و  $c_2$  که با نام ضرایب یادگیری به آنان اشاره شده است، تأثیر  $pBest$  و  $nBest$  را بر فرایند جست‌وجو کنترل می‌کنند.  $w$  بیانگر ضریب وزنی اینرسی است. بردار سرعت ذرات با مقدار  $V_{max}$  محدود شده است.  $V_{max}$  محدودیتی است که قابلیت جست‌وجوی جهانی گروه ذرات را کنترل می‌کند. با استفاده از رابطه‌ی ۷ بردار سرعت هریک از ذرات به «بردار احتمال تغییر» تبدیل می‌شود. در رابطه‌ی فوق  $s_i$  بیانگر احتمال تساوی  $x_{it}$  با ۱ است. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۸ بردار موقعیت هریک از ذرات به هنگام می‌شود. موقعیت جدید ذره‌ها به‌عنوان ورودی‌های جدید مدل شبیه‌سازی حرکت ذره‌ها در تکرار دوم استفاده شده و تابع هدف مجدداً محاسبه می‌شود. این فرایند تا بیشترین تعداد تکرارها ادامه می‌یابد. در رابطه‌ی فوق  $\rho$  تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و ۱ است. موقعیت هریک از ذرات طبق برازش آن و موقعیت مرتبط آن با ذرات دیگر معین می‌شود.

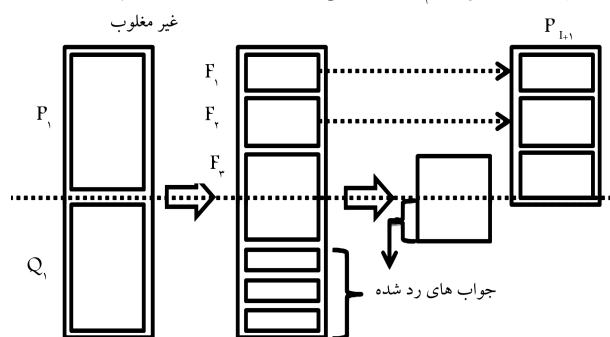
حرکت به سمت نقطه‌ی بهینه در PSO تک‌هدفه (SOPSO) متفاوت از PSO چندهدفه (MOPSO) است. در الگوریتم SOPSO، هر ذره تابع هدف خود را دنبال می‌کند. در الگوریتم MOPSO نیز تعداد توابع هدف بیش از ۱ است. بنابراین، الگوریتم باید با حرکت در راستای هر تابع هدف تطبیق کند. الگوریتم PSO بردار ارزیابی شده (VEPSO) یک الگوریتم چندهدفه است که برای هر تابع هدف از یک دسته استفاده می‌کند. بنابراین، هر ذره در هر دسته Pbest خود را دارد، اما Gbest هر دسته توسط Gbest دسته‌های دیگر برای تکرارهای بعدی جایگزین می‌شود. شکل ۵ مثالی از تبادل Pbest و Gbest در یک مسئله‌ی سه‌هدفه است.<sup>[۱۸]</sup> در روش پیشنهادی این مقاله، یک آرشیو پویا برای تبادل ذرات تولیدشده در هر تکرار ساخته می‌شود. بنابراین، ذرات با یکدیگر مقایسه شده و جواب‌های نامغلوب نگه‌داری شده و بقیه‌ی جواب‌ها در پایان تکرار حذف می‌شود. با این سازوکار، در هر تکرار می‌توان به اعضای آرشیو خارجی دسترسی داشت و همچنین سائز آرشیو خارجی به‌صورت پویا تغییر می‌کند.

این الگوریتم در بسیاری از فیلدهای مطالعاتی از قبیل آموزش شبکه‌های عصبی، مسائل اقتصادی پویا و بهینه‌سازی مسائلی با فاکتورهای بسیار وابسته به‌کار گرفته شده است.



شکل ۳. محاسبه فاصله ازدحام.

مرتب‌سازی براساس مفهوم فاصله ازدحامی      مرتب‌سازی براساس مفهوم جواب‌های غیر مغلوب



شکل ۴. رویه‌ی یک تکرار الگوریتم NSGA-II.

اختصاص می‌یابد. فاصله‌ی ازدحام برای اعضای جمعیت هر جبهه به‌طور جداگانه طبق روابط ۲، ۳ و ۴ و مطابق شکل ۳ محاسبه می‌شود. فاصله‌ها نیز تنها بین اعضای هر جبهه انجام می‌شود.

$$cd_1(x) = \frac{|z_1^{i+1} - z_1^{i-1}|}{z_1^{max} - z_1^{min}} \quad (2)$$

$$cd_2(x) = \frac{|z_2^{i+1} - z_2^{i-1}|}{z_2^{max} - z_2^{min}} \quad (3)$$

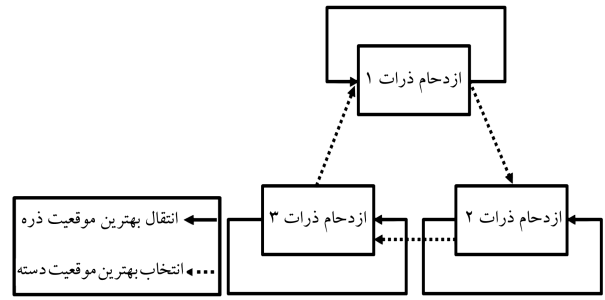
$$cd(x) = cd_1(x) + cd_2(x) \quad (4)$$

علت ایجاد این دو عملگر در الگوریتم ژنتیک چندهدفه، به مرحله‌ی انتخاب برمی‌گردد که از بین کروموزوم‌های والدین و فرزندان باید تعدادی را برای آغاز مرحله‌ی بعد انتخاب و تعدادی از جواب‌ها را حذف کرد. در شکل ۴ یکی از تکرارهای الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است.

## ۲.۲. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

الگوریتم PSO یک الگوریتم جست‌وجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. این الگوریتم برای اولین بار توسط ابره‌ارت و کندی<sup>[۱۷]</sup> معرفی شد. در ابتدا این الگوریتم به‌منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه‌ی دسته به‌کار گرفته

- کامیون‌های ورودی و خروجی نمی‌توانند بیش از ظرفیت مجاز محصولات را بارگیری کنند.
- نوع و مقدار محصولات حمل شده توسط کامیون‌های ورودی باید برابر با تقاضاهای مشتریان باشد.
- اگر مقدار زیادی از محصولات در بارانداز تقاطعی توسط کامیون‌های ورودی تخلیه شود می‌توان موقتاً آنها را در انبار ذخیره کرد تا زمان حمل و نقل آنها به مقصد فرا رسد.



شکل ۵. طرح شماتیک تبادل Pbest و Gbest در یک مسئله‌ی سه‌هدفه.

جدول ۱. بازه داده‌های تصادفی برای هر مسئله‌ی نمونه.

پارامترها	توابع توزیع
تعداد کامیون‌ها	(۵, ۱۵) یکنواخت
ظرفیت کامیون‌ها	(۵۰, ۱۵۰) یکنواخت
مسافت جابه‌جایی کامیون‌ها	(۵۰, ۵۰۰) یکنواخت
زمان بارگیری محصولات	(۵, ۲۵) یکنواخت
زمان تخلیه محصولات	(۱۰, ۳۰) یکنواخت
زمان جابه‌جایی محصولات در بارانداز تقاطعی	(۵, ۳۰) یکنواخت

### ۳. مسئله‌ی چندهدفه‌ی بارانداز تقاطعی

سه هدف کمینه‌سازی مسئله‌ی بارانداز تقاطعی در این مقاله عبارت‌اند از: زمان کل عملیات حمل و نقل، هزینه‌ی حمل و نقل کامیون‌ها و تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها بین مبادی و مقاصد. همچنین برای هر مسئله تعداد و ظرفیت کامیون‌ها، مسافت جابه‌جایی کامیون‌ها بین مبادی و مقاصد، زمان‌های بارگیری و تخلیه‌ی محصولات در تأمین‌کنندگان، مشتریان و بارانداز تقاطعی و زمان جابه‌جایی محصولات در بارانداز تقاطعی به صورت تصادفی و از تابع توزیع یکنواخت طبق جدول ۱ محاسبه می‌شود.

#### ۱.۳. مفروضات مدل

مدل مسئله از فرضیات زیر پیروی می‌کند:

- تمامی کامیون‌های ورودی و خروجی در زمان صفر در دسترس است.
- کامیون‌های ورودی را می‌توان در نقش کامیون‌های خروجی تلقی کرد.
- همه‌ی محصولات در بارانداز تقاطعی باید به مشتریان انتقال یابد و زمان طولانی برای ذخیره مجاز نیست.
- ظرفیت بارانداز تقاطعی نامحدود است.
- نوع و تعداد محصولات عرضه شده توسط تأمین‌کنندگان مشخص و ثابت است.
- نوع و تعداد محصولات تقاضای مشتریان مشخص و ثابت است.
- تعداد تأمین‌کنندگان، مشتریان و بارانداز تقاطعی مشخص و ثابت است.
- در توالی حمل و نقل یک کامیون می‌تواند محصولات بیش از یک تأمین‌کننده را بارگیری و محصولات بیش از یک مشتری را تخلیه کند.
- در توالی حمل و نقل یک کامیون با توجه به ظرفیت مجاز می‌تواند کل یا قسمتی از سفارش مشتری را بارگیری کند.
- تقاضاهای یک مشتری ممکن است از یک یا چندین تأمین‌کننده برآورده شود.

#### ۲.۳. نمادگذاری

متغیرهای اصلی و پارامترهای مهم استفاده شده در مدل و الگوریتم‌های ارائه شده در این مقاله عبارت‌اند از:

##### ۱.۲.۳. اندیس‌ها

$N$ : تعداد تأمین‌کنندگان؛

$M$ : تعداد مشتریان؛

$R$ : تعداد کامیون‌های ورودی (دریافت)؛

$H$ : تعداد کامیون‌های خروجی (ارسال)؛

$U$ : تعداد کامیون‌های ورودی و خروجی؛

$Q$ : ظرفیت کامیون‌ها؛

$E$ : عدد بزرگ؛

$P_{c\alpha}$ : تعداد واحد محصولات حالت  $(\alpha)$  که مشتری  $(c)$  نیاز دارد؛

$P_{s\alpha}$ : تعداد واحد محصولات حالت  $(\alpha)$  که تأمین‌کننده  $(s)$  تولید می‌کند؛

$T_{cd\alpha}^g$ : زمانی که آخرین کامیون ورودی یا خروجی  $g$  از آخرین مشتری مقصد  $(c_n)$  به بارانداز تقاطعی  $(cd)$  رسیده باشد در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را تخلیه کرده باشد؛

$T_{cd\alpha}^i$ : زمان حمل و نقل و ورود کامیون ورودی  $i$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری می‌کند؛

$T_{cd\alpha}^j$ : زمان حمل و نقل و ورود کامیون ورودی  $j$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری می‌کند؛

$T_{cd\alpha}^g$ : زمان حمل و نقل و ورود کامیون خروجی  $g$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به مشتری  $(c)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را از بارانداز تقاطعی بارگیری کرده است؛

$T_{sc\alpha}^g$ : زمان حمل و نقل و ورود  $g$  از تأمین‌کننده  $(s)$  به مشتری  $(c)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده است؛

$B_{s_m s_n \alpha}^i$ : زمان خروج کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s_m)$ ، در حالی که کامیون به سمت تأمین‌کننده  $(s_n)$  حرکت می‌کند و سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری می‌کند؛

$B_{sc\alpha}^i$ : زمان خروج کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد و به سمت مشتری  $(c)$  حرکت کند؛

$B_{cd\alpha}^i$ : زمان خروج کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد و به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند؛

$B_{s_m s_n \alpha}^j$ : زمان خروج کامیون ورودی  $j$  از تأمین‌کننده  $(s_m)$ ، در حالی که کامیون به سمت تأمین‌کننده  $(s_n)$  حرکت می‌کند و سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری می‌کند؛

$B_{sc\alpha}^j$ : زمان خروج کامیون ورودی  $j$  از تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد و به سمت مشتری  $(c)$  حرکت کند؛

$B_{cd\alpha}^j$ : زمان خروج کامیون ورودی  $j$  از تأمین‌کننده  $(s)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد و به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند؛

### ۳.۳. مدل ریاضی

مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله طبق سه تابع هدف متضاد یکدیگر تنظیم شده است. اگر  $\vec{x} = [x^i, x^j]$  بردار تصمیم مسئله و

$$\vec{Z} = [T(x^i, x^j), C(x^i, x^j), F(x^i, x^j)]$$

بردار هدف در نظر گرفته شود، توابع هدف و حدود متغیرهای تصمیم را می‌توان چنین تعریف کرد:

$$\text{Min } Z_1 = T \quad (9)$$

$$\text{Min } Z_2 = C \quad (10)$$

$$\text{Min } Z_3 = F \quad (11)$$

s.t :

$$T \geq T_{c_n c_d \alpha}^g * X_{c d \alpha}^g \quad \forall g \& g \in \{i \text{ or } j\} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N q_{\alpha s} * X_{c d s \alpha}^i = P_{s \alpha} \quad \forall \alpha \in K \& \forall c \in M \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M q_{\alpha c d} * X_{c d c \alpha}^j + \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N \sum_{c=1}^M q_{\alpha s} * X_{s c \alpha}^i = P_{c \alpha} \quad \forall \alpha \in K \& \forall s \in N \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N X_{c d s \alpha}^i \geq 1 \quad \forall \alpha \in K, \forall s \in N \& \forall i \in R \quad (15)$$

$$X_{c d s \alpha}^i = \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N X_{s_m s_n \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N X_{s c d \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N \sum_{c=1}^M X_{s c \alpha}^i \quad \forall \alpha \in K \& \forall i \in R \quad (16)$$

$$X_{s_m s_n \alpha}^i = \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N X_{s_n s_k \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N X_{s_n c d \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N \sum_{c=1}^M X_{s c \alpha}^i \quad \forall \alpha \in K \& \forall i \in R \quad (17)$$

$$X_{c d c \alpha}^j = \sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M X_{c_m c_n \alpha}^j + \sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M X_{c c d \alpha}^j \quad \forall \alpha \in K \& \forall j \in H \quad (18)$$

$$X_{c_m c_n \alpha}^i = \sum_{i=1}^R \sum_{c=1}^M X_{c_n c_k \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{c=1}^M X_{c c d \alpha}^i \quad \forall \alpha \in K \& \forall i \in R \quad (19)$$

$$X_{c_m c_n \alpha}^j = \sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M X_{c_n c_k \alpha}^j + \sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M X_{c c d \alpha}^j \quad \forall \alpha \in K \& \forall j \in H \quad (20)$$

$$X_{s c \alpha}^i = \sum_{i=1}^R \sum_{c=1}^M X_{c_m c_n \alpha}^i + \sum_{i=1}^R \sum_{c=1}^M X_{c c d \alpha}^i \quad \forall \alpha \in K \& \forall i \in R \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{s=1}^N q_{\alpha s} * X_{s c d \alpha}^i = \sum_{j=1}^H \sum_{c=1}^M q_{\alpha c d} * X_{c d c \alpha}^j \quad \forall \alpha \in K \quad (22)$$

$A_{c d \alpha}^g$ : زمان خروج کامیون ورودی یا خروجی  $g$  از مشتری  $(c)$ ، در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را تخلیه کرده باشد و به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند؛  $A_{c_m c_n \alpha}^g$ : زمان خروج کامیون ورودی یا خروجی  $g$  از مشتری مبدأ  $(c_m)$ ، در حالی که کامیون به سمت مشتری مقصد  $(c_n)$  حرکت می‌کند و سفارش نوع  $(\alpha)$  را تخلیه می‌کند؛  $K$ : تعداد حالت‌های بارگیری و تخلیه محصولات.

### ۲.۲.۳. متغیرهای عدد صحیح

$q_{\alpha s}$ : تعداد واحد محصولات حالت  $(\alpha)$  که از تأمین‌کنندگان در کامیون ورودی  $i$  بارگیری می‌شود؛  $q_{\alpha c d}$ : تعداد واحد محصولات حالت  $(\alpha)$  که از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  در کامیون خروجی  $j$  بارگیری می‌شود.

### ۳.۲.۳. متغیرهای صفر و ۱

$X_{c d s \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به سمت تأمین‌کننده  $(s)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری می‌کند، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{s_m s_n \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s_m)$  مبدأ به سمت تأمین‌کننده مقصد  $(s_n)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{s c d \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s)$  به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{s c \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s)$  به سمت مشتری  $(c)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{c_m c_n \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از مشتری مبدأ  $(c_m)$  به سمت مشتری مقصد  $(c_n)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{c_m c_n \alpha}^j$ : اگر کامیون خروجی  $j$  از مشتری مبدأ  $(c_m)$  به سمت مشتری مقصد  $(c_n)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده باشد، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{c d c \alpha}^j$ : اگر کامیون خروجی  $j$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به سمت مشتری  $(c)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را بارگیری کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{c c d \alpha}^i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  از مشتری  $(c)$  به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را تخلیه کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$X_{c c d \alpha}^j$ : اگر کامیون خروجی  $j$  از مشتری  $(c)$  به سمت بارانداز تقاطعی  $(cd)$  حرکت کند در حالی که سفارش نوع  $(\alpha)$  را تخلیه کرده است، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$P_i$ : اگر کامیون ورودی  $i$  بر کامیون ورودی  $j$  مقدم باشد، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر؛

$q_{g1g2}$ : اگر کامیون  $g1$  بر کامیون  $g2$  مقدم باشد، برابر ۱، در غیر این صورت، برابر صفر.

ورودی  $i$  از بارانداز تقاطعی به سمت تأمین‌کننده‌ی  $(s)$  ورود پیدا کند، برای خروج از تأمین‌کننده  $(s)$  یکی از سه مقصد تأمین‌کننده  $(s_n)$ ، مشتری  $(c)$ ، یا بارانداز تقاطعی را انتخاب می‌کند.

بر اساس محدودیت ۱۷ اگر کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده‌ی مبدأ  $(s_m)$  به سمت تأمین‌کننده‌ی مقصد  $(s_n)$  حرکت کند، یکی از سه مقصد را برای خروج از تأمین‌کننده‌ی مقصد  $(s_n)$  انتخاب می‌کند. محدودیت ۱۸ تضمین می‌کند که اگر کامیون خروجی  $j$  از بارانداز تقاطعی به سمت مشتری  $(c)$  حرکت کند، یکی از دو مقصد را برای خروج از مشتری  $(c)$  انتخاب می‌کند. محدودیت ۱۹ تضمین می‌کند که اگر کامیون ورودی  $i$  از مشتری مبدأ  $(c_m)$  به سمت مشتری مقصد  $(c_n)$  حرکت کند، یکی از دو مقصد را برای خروج از مشتری مقصد  $(c_n)$  انتخاب می‌کند. محدودیت ۲۰ مشابه محدودیت ۱۹، کامیون خروجی  $j$  را مورد بررسی قرار می‌دهد. محدودیت ۲۱ تضمین می‌کند که اگر کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده  $(s)$  به سمت مشتری  $(c)$  وارد شود، یکی از این دو مقصد را برای خروج از مشتری  $(c)$  انتخاب می‌کند. محدودیت ۲۲ تضمین می‌کند تعداد واحد محصولاتی که کامیون‌های ورودی  $i$  در بارانداز تقاطعی تخلیه می‌کنند، دقیقاً برابر است با تعداد واحد محصولاتی که در کامیون‌های خروجی  $j$  برای مشتری  $(c)$  بارگیری می‌شود. محدودیت ۲۳ تضمین می‌کند که زمان ورود کامیون ورودی  $j$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  به تأمین‌کننده  $(s)$  باید بزرگ‌تر یا مساوی زمان خروج کامیون ورودی  $i$  از تأمین‌کننده‌ی  $(s)$  باشد. محدودیت ۲۴ مشابه محدودیت ۲۳ است، با این تفاوت که کامیون ورودی  $i$  بر کامیون ورودی  $j$  مقدم نباشد. محدودیت ۲۵ تضمین می‌کند که زمان ورود کامیون ورودی یا خروجی  $g$  از بارانداز تقاطعی  $(cd)$  یا تأمین‌کننده  $(s)$  به مشتری  $(c)$  باید بزرگ‌تر یا مساوی زمان خروج کامیون ورودی یا خروجی  $g$  از مشتری  $(c)$  باشد. محدودیت ۲۶ مشابه محدودیت ۲۵ است، با این تفاوت که کامیون  $g$  بر کامیون  $g$  مقدم نباشد. محدودیت ۲۷ و ۲۸ مربوط به ظرفیت کامیون‌های ورودی و کامیون‌های خروجی است.

#### ۴. طراحی مسئله و نتایج محاسباتی

##### ۴.۱. تولید داده‌ها

برای اجرای دو الگوریتم مورد استفاده در این مقاله، ۲۰ مسئله‌ی نمونه تولید و سعی شده است مثال عددی در ابعاد بزرگ آورده شود. به همین منظور از چهار تأمین‌کننده و پنج مشتری و یک بارانداز تقاطعی و ۱۰ نوع محصول مختلف در مدل مسئله استفاده شده است. در تمامی ۲۰ مسئله‌ی نمونه تعداد تأمین‌کنندگان، مشتریان، بارانداز تقاطعی، نوع و تعداد محصولات ثابت فرض شده است. عرضه‌ی تأمین‌کنندگان در جدول ۲ و تقاضای مشتریان در جدول ۳ برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه ارائه شده است.

جدول ۲. عرضه‌ی تأمین‌کنندگان برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه.

تأمین‌کننده	عرضه									
	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
۱	۰	۳۵۰	۰	۰	۵۰	۴۰۰	۰	۳۰۰	۰	۲۰۰
۲	۳۰۰	۰	۲۰۰	۰	۱۵۰	۰	۲۰۰	۰	۳۰۰	۰
۳	۵۰	۰	۰	۴۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۱۵۰	۵۰	۰
۴	۰	۰	۱۰۰	۰	۳۰۰	۰	۲۰۰	۰	۰	۱۵۰

$$T_{cds\alpha}^j * X_{cds\alpha}^j \geq (B_{s_m s_n \alpha}^i * X_{s_m s_n \alpha}^i + B_{s c \alpha}^i * X_{s c \alpha}^i + B_{s c d \alpha}^i * X_{s c d \alpha}^i) - E(1 - P_{ij})$$

$$\forall \alpha \in K, \forall i \in R, \forall j \in H, \forall s \in N \ \& \ \forall c \in M \quad (23)$$

$$T_{cds\alpha}^i * X_{cds\alpha}^i \geq (B_{s_m s_n \alpha}^j * X_{s_m s_n \alpha}^j + B_{s c \alpha}^j * X_{s c \alpha}^j + B_{s c d \alpha}^j * X_{s c d \alpha}^j) - (E * P_{ij})$$

$$\forall \alpha \in K, \forall i \in R, \forall j \in H, \forall s \in N \ \& \ \forall c \in M \quad (24)$$

$$T_{cd\alpha}^{g\uparrow} * X_{cd\alpha}^{g\uparrow} + T_{s c \alpha}^{g\uparrow} * X_{s c \alpha}^{g\uparrow} \geq (A_{cd\alpha}^{g\downarrow} * X_{cd\alpha}^{g\downarrow} + A_{c_m c_n \alpha}^{g\downarrow} * X_{c_m c_n \alpha}^{g\downarrow}) - E(1 - q_{g\downarrow g\uparrow})$$

$$\forall \alpha \in K, \forall s \in N, \forall c \in M, \forall g \ \& \ \in \{i \text{ or } j\} \quad (25)$$

$$T_{cd\alpha}^{g\downarrow} * X_{cd\alpha}^{g\downarrow} + T_{s c \alpha}^{g\downarrow} * X_{s c \alpha}^{g\downarrow} \geq (A_{cd\alpha}^{g\uparrow} * X_{cd\alpha}^{g\uparrow} + A_{c_m c_n \alpha}^{g\uparrow} * X_{c_m c_n \alpha}^{g\uparrow}) - (E * q_{g\downarrow g\uparrow})$$

$$\forall \alpha \in K, \forall s \in N, \forall c \in M, \forall g \ \& \ g \in \{i \text{ or } j\} \quad (26)$$

$$\sum_{s=1}^N X_{cds\alpha}^i * q_{\alpha s} \leq Q^i \quad \forall \alpha \in K \ \& \ \forall i \in R \quad (27)$$

$$\sum_{c=1}^M X_{cd\alpha}^j * q_{\alpha cd} \leq Q^j \quad \forall \alpha \in K \ \& \ \forall j \in H \quad (28)$$

$$(X_{cds\alpha}^i, X_{s_m s_n \alpha}^i, X_{s c d \alpha}^i, X_{s c \alpha}^i, X_{c_m c_n \alpha}^i, X_{cd\alpha}^j, X_{c_m c_n \alpha}^j, X_{cd\alpha}^i, X_{cd\alpha}^j) \in \{0 \text{ or } 1\}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, R, \quad j = 1, 2, 3, \dots, H, \quad s = 1, 2, 3, \dots, N,$$

$$c = 1, 2, 3, \dots, M, \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots, \alpha$$

All variables  $\geq 0, \forall i, j, s, c \ \& \ \alpha$

تابع هدف اول مربوط به کمینه‌کردن زمان کل عملیات در داخل زنجیره‌ی تأمین است که از مجموع زمان‌های حمل‌ونقل کامیون‌ها برای ارسال سفارش محصولات از تأمین‌کنندگان به مشتریان، زمان‌های بارگیری محصولات از تأمین‌کنندگان و بارانداز تقاطعی در کامیون‌ها، زمان‌های تخلیه‌ی محصولات از کامیون‌ها برای مشتریان و بارانداز تقاطعی، و زمان جابه‌جایی محصولات از ورودی بارانداز تقاطعی به خروجی آن به دست می‌آید.

تابع هدف دوم مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل در کل زنجیره‌ی تأمین است که از مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل کامیون‌های ورودی و خروجی برای انتقال محصولات از تأمین‌کنندگان به مشتریان به دست می‌آید.

تابع هدف سوم مربوط به کمینه کردن تعداد دفعات حمل‌ونقل است. محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که زمان کل عملیات حمل‌ونقل از زمانی که آخرین کامیون ورودی یا خروجی زمان‌بندی شده از مشتری به بارانداز تقاطعی می‌رسد باید بزرگ‌تر یا مساوی باشد. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند که مجموع محصولاتی که از تأمین‌کنندگان در کامیون‌های ورودی  $i$  بارگیری می‌شود، دقیقاً برابر تقاضاهای مشتریان است. محدودیت ۱۴ تضمین می‌کند که مجموع تقاضاهای مشتریان دقیقاً برابر مجموع محصولاتی است که تأمین‌کنندگان تولید می‌کنند. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند که حداقل یکی از کامیون‌های ورودی  $i$  به سمت تأمین‌کننده‌ی  $(s)$  برای بارگیری سفارش نوع  $(\alpha)$  حرکت کند. محدودیت ۱۶ برای تضمین این است که اگر کامیون

جدول ۳. تقاضای مشتریان برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه.

مشتری	تقاضا									
	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
۱	۰	۰	۰	۰	۱۵۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۱۵۰	۰	۰	۱۵۰	۲۵۰	۰	۱۰۰	۰	۵۰
۳	۳۵۰	۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۰	۰	۵۰	۲۰۰	۰
۴	۳۵۰	۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰	۰	۰	۵۰	۲۰۰	۰
۵	۰	۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۲۵۰	۰	۳۰۰	۰	۲۰۰

۱۰۰ و در هر بار اجرا تعداد تکرار ۲۰۰ بار در نظر گرفته شده است. مقادیر c1، c2 و w به ترتیب ۱/۴۹۴، ۱/۴۹۴ و ۰/۷۲۹ انتخاب شده است. لازم به ذکر است که تمامی پارامترهای الگوریتم‌ها به صورت تجربی/آزمایشی تنظیم شده است. حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های مطرح شده با رایانه‌ی شخصی و مشخصات Intel® Core™ DUE CPU processor Ram ۴ GB توسط برنامه‌ی (R۲۰۱۱a) MATLAB ۷/۱۲/۰ به دست آمده است.

### ۳.۴. تجزیه و تحلیل نتایج

یکی از فرضیات مسئله این بود که کامیون‌ها پس از بارگیری محصولات از تأمین‌کنندگان به سمت مشتریان یا بارانداز تقاطعی حرکت می‌کردند و محصولات بارگیری شده را در مقصدهای مورد نظر تخلیه می‌کردند. برای درک بهتر نحوه‌ی عملکرد دو الگوریتم، جزئیات خروجی مسئله‌ی نمونه ۴، که تقریباً ساده‌ترین مسئله‌ی نمونه است نشان داده شده است. بر این اساس توالی عملیات حمل‌ونقل کامیون‌ها در مسئله‌ی نمونه ۴ برای هر دو الگوریتم به‌عنوان متغیرهای تصمیم طبق جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

مسئله‌ی نمونه ۴ شامل ۱۰ کامیون با ظرفیت‌های (۶۱، ۵۸، ۱۳۰، ۱۶۷، ۱۹۰، ۶۹، ۱۳۵، ۱۲۰، ۵۲ و ۱۰۱) است. در جدول ۵ توالی حمل‌ونقل کامیون ۱ در مسئله‌ی نمونه ۴ با روش الگوریتم NSGA-II و در جدول ۶ توالی حمل‌ونقل کامیون ۱ در مسئله‌ی نمونه ۴ با روش MOPSO آورده شده است. به‌عنوان مثال طبق جدول ۵ کامیون ۱ دارای ۷ توالی حمل‌ونقل است و در هر توالی از حمل‌ونقل نوع و تعداد محصولات و همچنین مبادی بارگیری و مقاصد تخلیه‌ی محصولات

در هر ۲۰ مسئله‌ی نمونه تعداد کامیون‌ها و همچنین ظرفیت آن‌ها به صورت تصادفی و با استفاده از جدول ۱ و طبق تابع توزیع یکنواخت تولید شده است؛ مقادیر به دست آمده برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین زمان‌های بارگیری محصولات از مبدأ در کامیون‌ها، زمان‌های تخلیه محصولات از کامیون‌ها در مقصد، زمان‌های جابه‌جایی محصولات از ورودی بارانداز تقاطعی به خروجی بارانداز تقاطعی، و نیز مسافت جابه‌جایی کامیون‌ها بین مبادی و مقاصد طبق جدول ۱ برای هر مسئله‌ی نمونه تولید شده است.

### ۲.۴. پارامترهای الگوریتم‌ها

برای حل این مسئله از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO استفاده شده است. در مورد الگوریتم NSGA-II اندازه جمعیت برابر ۱۰۰ و در هر بار اجرا تعداد تکرار ۲۰۰ بار در نظر گرفته شده است. همچنین احتمال عمل تقاطع ۰/۹ و احتمال عمل جهش ۰/۵ انتخاب شده است. در مورد الگوریتم MOPSO اندازه جمعیت برابر

جدول ۴. مقادیر تصادفی برای تعداد و ظرفیت کامیون‌ها برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه.

مسئله‌ی نمونه	تعداد کامیون‌ها	ظرفیت کامیون‌ها															
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	
۱	۱۱	۵۸	۵۵	۱۰۳	۱۲۸	۱۴۳	۱۰۷	۹۷	۶۳	۱۴۳	۱۲۸	۱۰۳	۵۵	۵۸	۱۱	-	-
۲	۱۳	۶۰	۷۶	۸۴	۱۱۸	۶۴	۱۲۲	۶۱	۱۲۲	۶۴	۱۱۸	۸۴	۷۶	۶۰	۱۳	-	-
۳	۱۲	۱۰۴	۱۲۰	۱۱۷	۶۸	۶۳	۶۸	۵۲	۱۵۰	۶۳	۶۸	۱۱۷	۱۲۰	۱۰۴	۱۲	-	-
۴	۱۰	۶۸	۵۸	۱۳۰	۱۶۷	۶۹	۱۳۵	۱۲۰	۶۹	۱۹۰	۱۶۷	۱۳۰	۵۸	۶۸	۱۰	-	-
۵	۱۱	۱۲۷	۱۴۳	۱۴۷	۶۹	۶۹	۱۴۷	۱۲۷	۱۲۰	۶۴	۶۹	۱۴۷	۱۴۳	۱۲۷	۱۱	-	-
۶	۱۵	۱۰۳	۹۸	۱۳۰	۷۳	۱۳۰	۱۰۷	۱۳۵	۱۴۰	۱۰۰	۷۳	۱۳۰	۹۸	۱۰۳	۱۵	-	-
۷	۸	۹۵	۵۵	۶۸	۱۱۶	۸۳	۱۴۰	۶۲	۱۴۰	۸۳	۱۱۶	۶۸	۵۵	۹۵	۸	-	-
۸	۱۱	۱۲۴	۶۰	۶۳	۱۰۵	۹۹	۱۳۹	۱۳۰	۱۳۹	۹۹	۱۰۵	۶۳	۶۰	۱۲۴	۱۱	-	-
۹	۱۲	۱۲۲	۱۰۳	۶۱	۱۱۳	۶۳	۶۳	۶۰	۶۳	۶۳	۱۱۳	۶۱	۱۰۳	۱۲۲	۱۲	-	-
۱۰	۱۳	۱۴۹	۵۷	۱۴۴	۵۲	۱۱۸	۱۲۸	۱۰۳	۱۲۸	۱۱۸	۵۲	۱۴۴	۵۷	۱۴۹	۱۳	-	-
۱۱	۹	۵۵	۱۰۰	۹۳	۱۵۰	۱۳۱	۹۹	۱۳۹	۹۹	۱۳۱	۱۵۰	۹۳	۱۰۰	۵۵	۹	-	-
۱۲	۸	۸۳	۶۵	۸۵	۶۲	۱۳۸	۵۹	۱۴۳	۵۹	۱۳۸	۶۲	۸۵	۶۵	۸۳	۸	-	-
۱۳	۱۵	۱۴۹	۱۴۹	۸۹	۱۳۶	۱۳۶	۱۲۸	۱۳۸	۱۲۸	۷۵	۱۳۸	۱۲۸	۸۹	۱۳۶	۱۵	-	-
۱۴	۱۴	۱۰۹	۱۰۰	۱۱۱	۱۳۲	۱۱۱	۱۰۳	۹۵	۷۰	۱۰۳	۱۳۲	۱۱۱	۱۰۰	۱۰۹	۱۴	-	-
۱۵	۷	۱۰۸	۱۳۷	۹۱	۶۱	۹۱	۹۰	۸۰	۸۰	۹۴	۶۱	۹۱	۱۳۷	۱۰۸	۷	-	-
۱۶	۵	۱۴۲	۱۱۴	۵۰	۵۳	۷۱	-	-	-	۷۱	۵۳	۵۰	۱۱۴	۱۴۲	۵	-	-
۱۷	۱۲	۱۳۳	۶۶	۹۶	۱۱۲	۱۴۳	۱۳۴	۱۴۰	۱۳۴	۱۴۳	۱۱۲	۹۶	۶۶	۱۳۳	۱۲	-	-
۱۸	۶	۱۲۴	۱۰۱	۷۰	۹۳	۷۰	۱۲۵	-	۱۲۵	۶۷	۹۳	۷۰	۱۰۱	۱۲۴	۶	-	-
۱۹	۱۰	۱۱۵	۱۳۹	۱۰۴	۷۸	۱۴۸	۸۳	۱۴۷	۵۴	۱۴۸	۷۸	۱۰۴	۱۳۹	۱۱۵	۱۰	-	-
۲۰	۱۱	۶۱	۱۰۲	۱۳۴	۱۴۲	۱۳۴	۱۱۵	۱۴۲	۷۸	۱۰۰	۱۴۲	۱۳۴	۱۰۲	۶۱	۱۱	-	-



جدول ۴. توالی حمل و نقل کامیون ۱ با الگوریتم MOPSO برای مسئله‌ی نمونه ۴.

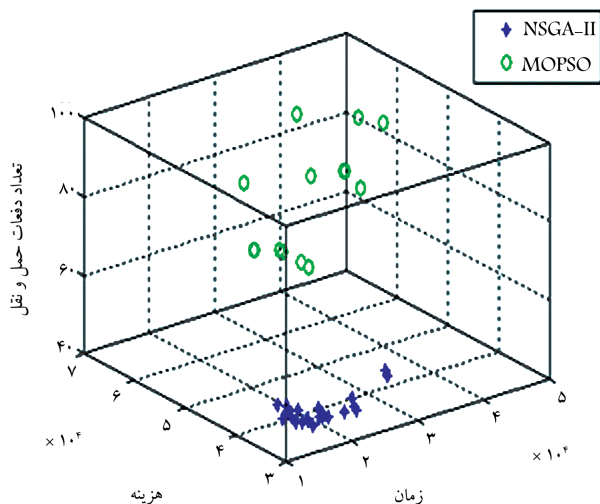
توالی حمل و نقل	نوع محصول	تعداد محصول	مبدأ	مقصد
	B	۹	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۵
	C	۹	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
۱	D	۱۲	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۵
	E	۱۲	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
	I	۹	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۵
	A	۳	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	B	۳	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	C	۳	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
۲	D	۳	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	E	۳	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	F	۳	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	G	۳	تأمین‌کننده ۳	بارانداز تقاطعی
	H	۳	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	A	۸	تأمین‌کننده ۴	بارانداز تقاطعی
	C	۷	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
۳	E	۵	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	G	۴	تأمین‌کننده ۳	بارانداز تقاطعی
	J	۳	تأمین‌کننده ۳	بارانداز تقاطعی
	A	۶	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
	C	۶	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
	D	۶	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
۴	E	۶	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
	F	۶	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
	H	۶	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۴
	I	۶	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۵
	A	۹	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	C	۱۰	تأمین‌کننده ۳	بارانداز تقاطعی
۵	D	۹	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	H	۹	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	I	۹	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	A	۱۰	بارانداز تقاطعی	مشتری ۴
	C	۱۰	بارانداز تقاطعی	مشتری ۴
۶	J	۱۳	بارانداز تقاطعی	مشتری ۳
	G	۷	بارانداز تقاطعی	مشتری ۳
	B	۸	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۳
۷	F	۸	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
	H	۸	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۳
	A	۱۱	تأمین‌کننده ۴	بارانداز تقاطعی
	C	۱۰	تأمین‌کننده ۳	بارانداز تقاطعی
۸	I	۸	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	J	۱۰	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	C	۲۱	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۴
۹	F	۲۱	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۲
	D	۱۸	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
۱۰	H	۱۴	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۳
	I	۲۰	تأمین‌کننده ۱	مشتری ۵
	B	۵	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۳
۱۱	F	۲۱	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۳

جدول ۵. توالی حمل و نقل کامیون ۱ با الگوریتم NSGA-II برای مسئله‌ی نمونه ۴.

توالی حمل و نقل	نوع محصول	تعداد محصول	مبدأ	مقصد
۱	C	۳۱	تأمین‌کننده ۱	بارانداز تقاطعی
	F	۳۰	تأمین‌کننده ۴	بارانداز تقاطعی
۲	F	۳۰	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۱
	H	۳۰	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۳
۳	D	۶۱	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
۴	B	۳۰	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
	J	۳۰	تأمین‌کننده ۲	بارانداز تقاطعی
۵	D	۳۱	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۵
	J	۲۴	تأمین‌کننده ۳	مشتری ۳
۶	G	۶۱	تأمین‌کننده ۳	مشتری ۵
۷	B	۹	تأمین‌کننده ۲	مشتری ۳
	D	۲۱	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۵
	H	۲۱	تأمین‌کننده ۴	مشتری ۳

مشخص شده است. در اولین توالی حمل و نقل کامیون ۱ برای مسئله‌ی نمونه ۴ با الگوریتم NSGA-II طبق جدول ۵، محصول C از تأمین‌کننده‌ی ۱ به تعداد ۳۱ و محصول F از تأمین‌کننده‌ی ۴ به تعداد ۳۰ در کامیون ۱ بارگیری شده‌اند و هر دو محصول برای بارانداز تقاطعی فرستاده شده است. به همین ترتیب برای ۹ کامیون دیگر با در نظر گرفتن ظرفیت مجاز هر کامیون این توالی ادامه پیدا می‌کند تا این که تمام محصولات از تأمین‌کنندگان برای مشتریان فرستاده شود.

جواب‌های پارتوی به دست آمده در مسئله‌ی نمونه‌ی ۴ توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است. در شکل ۶ جواب‌های به دست آمده از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در فضای دوبعدی، توأمان برای توابع هدف زمان عملیات و هزینه حمل و نقل کامیون‌ها نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش زمان عملیات، هزینه‌های حمل و نقل سیر نزولی دارد. از آنجا که مدل پیشنهادی تحقیق با سه هدف تنظیم شده، در نمودارهای دوبعدی برخی از جواب‌ها همدیگر را مغلوب می‌کنند. در شکل ۷ جواب‌های به دست آمده از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در فضای دوبعدی، توأمان برای توابع هدف زمان عملیات و تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها، زمان عملیات به طور نسبی افزایش می‌یابد. در شکل ۸ جواب‌های به دست آمده از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در فضای دوبعدی، توأمان برای توابع هدف هزینه حمل و نقل کامیون‌ها و تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با کاهش تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها، هزینه حمل و نقل کامیون‌ها به طور نسبی افزایش می‌یابد. نهایتاً در شکل ۹ جواب‌های بهینه‌ی پارتوی به دست آمده توسط دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO با در نظر گرفتن هر سه تابع هدف نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ با کاهش تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها، هزینه حمل و نقل کامیون‌ها کاهش یافته و زمان عملیات افزایش می‌یابد. چنان که مشاهده می‌شود جواب‌های به دست آمده در



شکل ۹. نمودار تلفیقی زمان عملیات - هزینه‌ی حمل و نقل کامیون‌ها - تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها (NSGA-II و MOPSO).

فضای سه بعدی نامغلوب است و هیچ جوابی جواب دیگر را مغلوب نمی‌کند. بنابراین تصمیم‌گیرنده می‌تواند براساس ترجیح نسبی مورد نظر از اهداف، یکی از جواب‌ها را برای اجرا انتخاب کند.

### ۵. مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌ها

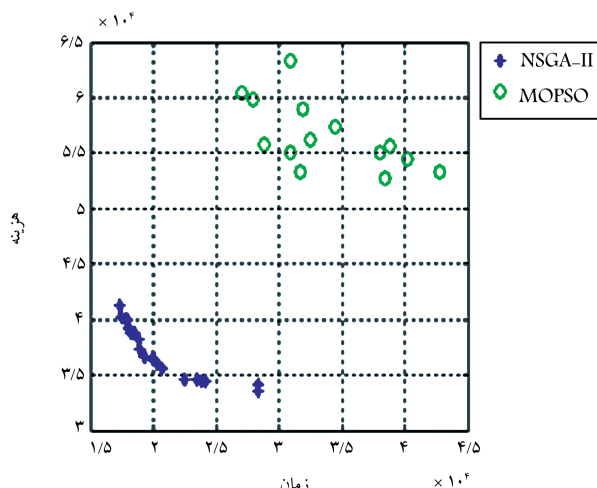
همگرایی به جواب‌های بهینه‌ی پارتو و فراهم کردن چگالی و تنوع در میان مجموعه جواب‌های به دست آمده دو هدف اصلی هر الگوریتم تکاملی چندهدفه است، ولی چون این سه هدف تا حدودی در تضاد با یکدیگرند، معیاری که بتواند به تنهایی و به صورت مطلق در مورد عملکرد الگوریتم‌ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد. اگر دست‌یابی به چنین معیاری ممکن بود، اظهار نظر در مورد برتری یک الگوریتم نسبت به الگوریتم دیگر نیز امکان‌پذیر می‌شد. برای مقایسه‌ی کیفیت جواب‌های به دست آمده دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO، چهار معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است: تعداد جواب‌های پارتوی به دست آمده، فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل، فاصله‌گذاری و بیشترین گسترش. همچنین به منظور مقایسه‌ی الگوریتم‌ها و شناسایی الگوریتم کارا، هریک از الگوریتم‌های طراحی شده ۲۰ بار اجرا، و مقدار میانگین هریک از معیارها برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه محاسبه شده است.

#### ۱.۵. تعداد جواب‌های به دست آمده‌ی پارتو (NPS)<sup>۲</sup>

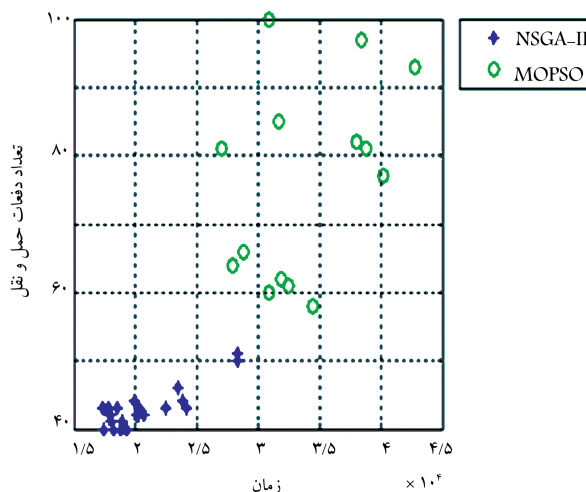
الگوریتمی که بتواند تعداد جواب‌های نامغلوب بیشتری در آرشو پارتو ارائه دهد، در ترسیم سطح بهینه‌ی پارتو واقعی موفق‌تر بوده و تصمیم‌گیرنده را با گزینه‌های بیشتری مواجه می‌سازد.<sup>[۱۹]</sup> میانگین تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه توسط الگوریتم NSGA-II برابر با ۳۴٫۵ و میانگین تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو برای ۲۰ مسئله‌ی نمونه توسط الگوریتم MOPSO برابر با ۸٫۵۵ است. بنابراین با در نظر گرفتن شاخص NPS، پارتوی به دست آمده توسط NSGA-II مناسب‌تر از الگوریتم MOPSO است.

#### ۲.۵. فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل (MID)<sup>۴</sup>

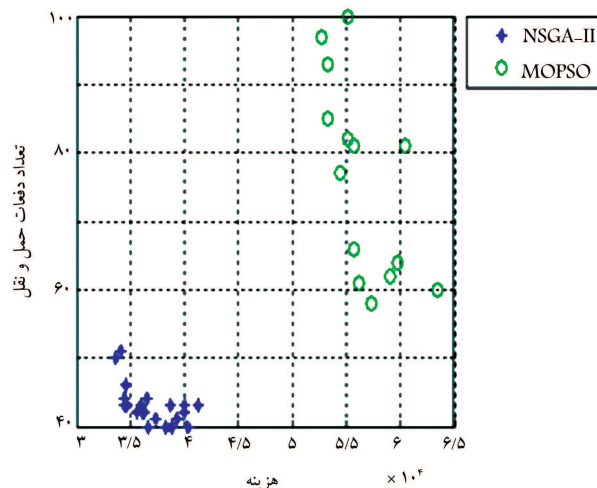
این معیار که برای اندازه‌گیری میزان نزدیکی به سطح بهینه‌ی پارتو واقعی، به کار



شکل ۶. نمودار تلفیقی زمان عملیات - هزینه‌ی حمل و نقل کامیون‌ها (NSGA-II و MOPSO).



شکل ۷. نمودار تلفیقی زمان عملیات - تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها (NSGA-II و MOPSO).



شکل ۸. نمودار تلفیقی هزینه‌ی حمل و نقل کامیون‌ها - تعداد دفعات حمل و نقل کامیون‌ها (NSGA-II و MOPSO).

$$d_i = \min_{k \in Q \wedge k \neq i} \sum_{m=1}^M |f_m^i - f_m^k| \quad (32)$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{|Q|} \frac{d_i}{|Q|} \quad (33)$$

در واقع معیار فاصله‌گذاری، انحراف معیار مقادیر مختلف  $d_i$  را اندازه‌گیری می‌کند. زمانی که جواب‌ها به‌طور یکسوخ در کنار هم قرار گرفته باشند، مقدار فاصله‌گذاری ( $S$ ) نیز کوچک خواهد بود. بنابراین الگوریتمی که جواب‌های نامغلوب نهایی آن فاصله‌گذاری کوچکی داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود. بر این اساس شاخص فاصله‌گذاری برای پارتوی الگوریتم NSGA-II برابر با ۱۰۷۲۲۷۵ و برای الگوریتم MOPSO برابر با ۲۵۳۹۳۱۷ است، و برای معیار فاصله‌گذاری الگوریتم NSGA-II نمره بهتری را نسبت به الگوریتم MOPSO کسب کرده است.

#### ۴.۵. بیشترین گسترش

این معیار که توسط زیتلر<sup>[۲۲]</sup> ارائه شد طول قطر مکعب فضایی ساخته شده از مقادیر انتهایی مجموعه جواب‌های نامغلوب در فضای هدف را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه این معیار بزرگ‌تر باشد، نشان‌گر گسترش بیشتر جواب‌های آرشیو پارتو است. رابطه‌ی ۳۴ رویه‌ی محاسباتی این شاخص را بیان می‌کند:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^M (\max_{i=1:|Q|} f_m^i - \min_{i=1:|Q|} f_m^i)^2} \quad (34)$$

این معیار بیشترین گسترش چگالی جواب‌های آرشیو پارتو را اندازه می‌گیرد و در محاسبه‌ی آن از روش ساده‌ی استفاده شده است. یعنی بدون در نظر گرفتن جواب‌های میانی، تنها جواب‌های مرزی برای ترسیم گستردگی جواب‌های آرشیو پارتو به کار می‌رود. در این معیار نیز میانگین محاسبات برای الگوریتم NSGA-II برابر ۷۷۲۳۶۶۹ و برای الگوریتم MOPSO برابر ۱۶۶۳۰۳۲ است. طبق محاسبات الگوریتم MOPSO جواب‌های گسترده‌تری را نسبت به الگوریتم NSGA-II ارائه می‌دهد.

#### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در تحقیقات انجام شده در خصوص عملیات بارانداز تقاطعی، هیچ‌یک از مدل‌های پیشین قابلیت در نظرگیری توابع توزیع برای تمامی پارامترهای مبتنی بر زمان مانند مدت زمان بارگیری محصولات از مبادی کامیون‌ها، مدت زمان تخلیه‌ی محصولات از کامیون‌ها در مقاصد، و مدت زمان جابه‌جایی محصولات از ورودی بارانداز تقاطعی به خروجی بارانداز تقاطعی و همچنین مسافت جابه‌جایی کامیون‌ها بین مبادی و مقاصد، تعداد و ظرفیت کامیون‌ها را نداشته‌اند. از این رو این تحقیق با ارائه‌ی یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظرگیری اهداف کمینه‌سازی زمان عملیات کل، هزینه حمل‌ونقل کامیون‌ها، و تعداد دفعات حمل‌ونقل کامیون‌ها در زنجیره‌ی تأمین و بارانداز تقاطعی پرداخته است. برای حل مسئله با بهره‌گیری از دو الگوریتم فراابتکاری تکاملی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) برای حل مدل استفاده شده است. به علاوه برای مقایسه و انتخاب جواب‌های پارتوی مناسب‌تر از شاخص‌های تعداد جواب‌های به دست آمده

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (29)$$

که در آن  $n$  تعداد جواب‌ها در مجموعه بهینه پارتو است و  $c_i$  فاصله‌ی اقلیدسی هر عضو مجموعه‌ی پارتو از نقطه‌ی ایده‌آل است:

$$c_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + (f_{2i} - f_2^*)^2 + (f_{mi} - f_m^*)^2} \quad (30)$$

در رابطه‌ی ۳۰ منظور از  $f_{mi}$  مقدار  $m$ امین تابع هدف در جواب نام است. بدیهی است برای مجموعه‌های بهینه‌ی پارتو مورد مقایسه، هرچه مقدار این معیار کوچک‌تر باشد، مطلوبیت آن مجموعه بیشتر خواهد بود.<sup>[۲۰]</sup> در شکل ۱۰ معیار فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

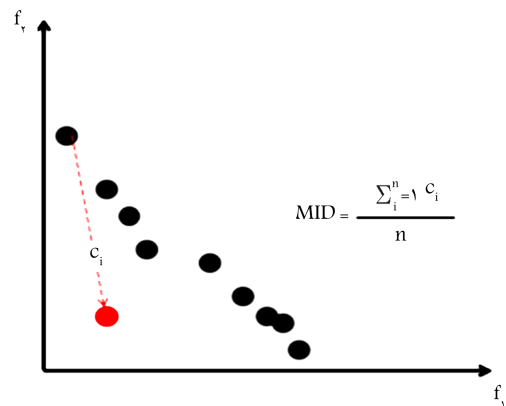
از آنجا که مدل ریاضی این مسئله برای اولین بار مطرح شده و پارتوی شناخته شده بهینه برای این مسئله وجود ندارد، یک نقطه‌ی ایده‌آل با کم‌ترین مقدار ممکن زمان عملیات، هزینه‌ی حمل‌ونقل کامیون‌ها و تعداد دفعات حمل‌ونقل کامیون‌ها به‌عنوان جواب ایده‌آل بهینه‌ی پارتو در نظر گرفته شده است. در این مسئله، بهترین زمان عملیات برابر با ۳۶۶۴۵/۳۵، بهترین مقدار هزینه‌ی حمل‌ونقل کامیون‌ها برابر با ۱۹۲۶۵، و بهترین مقدار تعداد دفعات حمل‌ونقل کامیون‌ها برابر با ۴۰ است. بر این اساس شاخص MID برای پارتوی NSGA-II برابر با ۳۵۹۷۰۸۶ و برای پارتوی MOPSO برابر با ۹۸۷۱/۸۸۵ است. بر این اساس، شاخص MID پارتوی الگوریتم NSGA-II مناسب‌تر است.

#### ۳.۵. فاصله‌گذاری<sup>۵</sup>

این معیار که توسط اسکات<sup>[۲۱]</sup> ارائه شد، میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه‌ی ۳۱ محاسبه می‌کند:

$$s = \sqrt{\frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})^2} \quad (31)$$

که در آن  $|Q|$  معرف اندازه آرشیو پارتو است و مقادیر  $d_i$  و  $\bar{d}$  را می‌توان از روابط



شکل ۱۰. معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل.

۱. بر بهترین مکان استقرار بارانداز تقاطعی در این مدل نیست. بنابراین جانمایی بارانداز تقاطعی در زنجیره‌ی تأمین برای مسئله در نظر گرفته شود.
۲. تابع هدف‌هایی همچون کمیته‌سازی زمان‌های دیرکرد و زودکرد و کمیته‌سازی زمان‌های انتظار کامیون‌ها در مبادی و مقاصد به مدل ریاضی اضافه شود.
۳. اهدافی مانند زمان دیرکرد و زودکرد به مدل اضافه شود.
۴. علاوه بر هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های موجودی محصولات در بارانداز تقاطعی در مدل لحاظ شود.
۵. از الگوریتم‌های رقیب برای حل مدل مسئله استفاده شود.
۶. برای بهبود جواب‌ها، از طراحی آزمایشات به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود.

۱. در این تحقیق استقرار بهینه‌ی بارانداز تقاطعی معین نشده است و هیچ تضمینی با توجه به بستر مناسب در تحقیق فوق، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:
۲. پارو (NPS)، فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل (MID)، فاصله‌گذاری و بیشترین گسترش استفاده شده است. نتایج حل دو الگوریتم نشان می‌دهد که در معیار اندازه آرشیو پارو الگوریتم NSGA-II از الگوریتم MOPSO برتر است. در معیار فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل، که میزان نزدیکی به بهینه‌ی پارو واقعی را اندازه‌گیری می‌کند، NSGA-II بهتر از MOPSO بوده است. در معیار فاصله‌گذاری، که میزان چگالی جواب‌های آرشیو پارو را اندازه‌گیری می‌کند، الگوریتم NSGA-II از الگوریتم MOPSO نمرات بهتری کسب کرده است و در معیار بیشترین گسترش الگوریتم MOPSO جواب‌های گسترده‌تری در مقایسه با الگوریتم NSGA-II ارائه می‌دهد.
۳. با توجه به بستر مناسب در تحقیق فوق، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:
۴. در این تحقیق استقرار بهینه‌ی بارانداز تقاطعی معین نشده است و هیچ تضمینی

### پانویس‌ها

1. non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)
2. multiple objective particle swarm optimization (MOPSO)
3. the number of pareto solutions (NPS)
4. mean ideal distance measure
5. spacing measure

### منابع (References)

1. Liao, T.W., Egbelu, P.J. and Chang, P.C. "Two hybrid differential evolution algorithms for optimal inbound and outbound truck sequencing in cross docking operations", *Applied Soft Computing*, **12**, pp. 3683-3697 (2012).
2. Rohrer, M. "Simulation and cross docking", *In: Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, pp. 846-849 (1995).
3. Chen, F. and Song, K.L. "Minimizing makespan in two-stage hybrid cross-docking scheduling problem", *Computers and Operations Research*, **36**(6). pp. 2066-2073 (2009).
4. Boloori Arabani, A.R., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "A multi-criteria cross-docking scheduling with just-in-time approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **49**(5-8) pp. 741-756, doi:10.1007/s00170-009-2429-5 (2010).
5. Magableh, G.M., Rosetti, M.D. and Mason, S. "Modeling and analysis of a generic cross docking facility", *In Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando, Florida, pp. 1613-1620 (2005).
6. Vis, I.F.A. and Roodbergen, K.J. "Positioning of goods in a cross-docking environment", *Computers and Industrial Engineering*, **54**(3) pp. 677-689 (2008).
7. Tang, S.L. and Yan, H. "Pre-distribution vs. post-distribution for cross-docking with transshipments", *Omega*, **38**(3-4) pp. 192-202 (2010).
8. Miao, Z., Lim, A. and Ma, H. "Trailer dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks", *European Journal of Operational Research*, **192**(1), pp. 105-115 (2009).
9. Schaffer, B. "Cross docking can increase efficiency", *Automatic I.D. News.*, **14**(8), pp. 34-37 (July 1998).
10. Witt, C.E. "Crossdocking: Concepts demand choice", *Material Handling Engineering*, **53**(7), pp.44-53(1998).
11. Boysen, N. "Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals", *Computers & Operations Research*, **37** pp. 32-41 (2010).
12. Iris, F.A.V. and Roodbergen, K.J. "Layout and control policies for cross docking operations", *Computers & Industrial Engineering*, **61**, pp. 911-919 (2011).
13. Liao, T.W., Egbelu, P.J. and Chang, P.C. "Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations", *Int. J. Production Economics*, **141**, pp. 212-229 (2013).
14. Boloori Arabani, A.R., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "Meta-heuristics implementation for scheduling of trailers in a cross-docking system with temporary storage", *Expert Systems with Applications*, **38**(3), pp. 1964-1979 (2011).
15. Deb, K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley and Sons, New York (2001).
16. Deb, K. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions Evolutionary Computations*, **6**, pp. 182-97 (2002).
17. Eberhart, R.C. and Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory", *In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya Japan, pp. 39-43 (1995).
18. Parsopoulos, K.E. and Vrahatis, M.N. "Particle swarm optimization method in multiobjective problems", *In Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing*, Madrid, Spain, pp. 603-607 (2002).

19. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., Rezapour Tabari, M. and Mario, A. "Extraction of decision alternatives in construction management projects: Application and adaptation of NSGA-II and MOPSO", *Expert Systems with Applications*, **39**, pp. 2794-2803 (2012).
20. Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "A multi-phase covering paretooptimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flowshop using a hybrid meta-heuristic", *Expert Systems with Applications*, **36**(8), pp. 11057-11069 (2009).
21. Schott, J.R. "Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithms optimization", Master's Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1995).
22. Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. "Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results", *Evolutionary Computation Journal*, **8**(2), pp. 125-148 (2000).