

ارائه‌ی یک مدل چندهدفه‌ی فازی تصادفی برای انتخاب و تخصیص سفارش به تأمین‌کننده تحت شرایط تخفیف و ریسک (حل با دو الگوریتم فراابتکاری)

بهروز افشارنجفی* (دانشیار)

فروز رحیمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

احمد کاکایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳-۱)
دوری (۳۲-۱)، شماره ۲/۲، ص. ۱۱۳-۱۱۰، (یادداشت فنی)

مسئله‌ی انتخاب و تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان از مهم‌ترین فعالیت‌ها در مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. در این تحقیق یک مدل چندهدفه‌ی انتخاب و تخصیص سفارش به تأمین‌کننده در حالت عدم قطعیت ارائه شده است. این اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ی خرید، حمل و نقل و سفارش، کمینه‌سازی دیرکرد یا همان تأخیرات از جانب تأمین‌کننده (که به دلیل عدم قطعیت به صورت فازی در نظر گرفته شده)، کمینه‌سازی ریسک در انتخاب تأمین‌کننده و در نهایت بیشینه‌سازی وزن تأمین‌کنندگان را شامل می‌شود. وزن تأمین‌کنندگان با روش تاپسیس فازی به دست آمده است. در این مدل محصولات ارائه شده توسط تأمین‌کنندگان از ویژگی «تخفیف در قیمت» برخوردارند. محدودیت‌های تخفیف به صورت تابع علامت در مدل اعمال شده که این عمل از به وجود آمدن یک متغیر تصمیم در مدل جلوگیری می‌کند. به علت پیچیدگی مدل برای حل از دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOPSO استفاده شده است. در نهایت، نتایج با معیارهای کمی اندازه‌گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: انتخاب تأمین‌کننده، چندمحصولی، تاپسیس فازی، ریسک، تخفیف، الگوریتم‌های فراابتکاری.

۱. مقدمه

ساختار زنجیره‌ی تأمین ترکیبی است از تأمین‌کنندگان بالقوه، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان، مشتریان و غیره، که تمرکز اصلی آن بر بهبود خدمت‌دهی به مشتری، سودآوری و عملکرد کسب‌وکار است. ذکر این نکته لازم به نظر می‌رسد که زنجیره‌ی تأمین را زمانی موفق یا کارا می‌نامند که کالا یا خدمات را درست به اندازه، با کیفیت مطلوب و در زمان و مکان مشخص تحویل دهد. قدرت توزیع‌کننده در زنجیره‌ی تأمین به شدت به کارخانه‌ی سازنده بستگی دارد. طراحی زنجیره‌ی تأمین از جمله مباحث جدید و به روز مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. در این‌گونه مسائل معمولاً قسمتی از یک زنجیره‌ی تأمین مورد بررسی قرار می‌گیرد. زنجیره‌ی تأمین چندسطحی، چنددوره‌یی، چندهدفه و چندمحصولی از جمله پارامترهای مهم و کلیدی طراحی یک زنجیره است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۱۹، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۳۱.

۱.۱. مرور ادبیات

تقریباً بیشترین کارهای انجام شده برای این مسئله با استفاده از مدل‌های ریاضی است. در این روش‌ها براساس شرایط مسئله توابع هدف و محدودیت‌ها ساخته می‌شود و با حل مسئله، به‌گونه‌یی که مثلاً تابع هزینه به سود کمینه یا بیشینه برسد، مجموعه‌یی از جواب‌ها برای تصمیم‌گیرنده ایجاد می‌شود.

محققین مسئله‌ی انتخاب عرضه‌کننده‌ی کالا را برای چند سطح قیمت و چند محصول با استفاده از مدل برنامه‌ریزی متقابل دومرحله‌ی فازی و چندهدفه‌ی خطی ارائه کردند.^[۱] آنها در مدل خود هزینه، دیرکرد و ضایعات را به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته و از روش دوفازی پیشنهادی توابع هدف را به یک تابع هدف تبدیل و در نهایت مدل خود را با یک مثال عددی حل کردند. کوکانگول و همکاران^[۲] نیز با در نظر گرفتن ظرفیت، بودجه و شرایط تخفیف، مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده را با ایجاد یک مدل ترکیبی از طریق ترکیب روش‌های تحلیل

سلسله‌مراتبی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی، و مدل برنامه‌ریزی چندهدفه، مدل‌سازی و حل کردند. تان و همکاران^[۳] اعلام کردند که سه روش عمده برای حل مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده وجود دارد: تصمیم‌گیری چندگانه، برنامه‌ریزی ریاضی و فرایندهای هوشمند. همچنین آنها در مدل خود با لحاظ تخفیف مدل را در حالت فازی توسعه دادند. عطاخان و همکاران^[۴] یک مدل چندهدفه با پارامترهای فازی تعریف کردند و سپس مدل خود را از طریق روش بیشینه - کمینه وزن‌دار حل کردند. در ادامه در مدل توسعه‌یافته و چندهدفه‌ی فازی تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان^[۵] برای به دست آوردن وزن تأمین‌کنندگان از تکنیک سلسله‌مراتبی استفاده کردند و در نهایت مدل را با روش بیشینه - کمینه تابع عضویت حل کردند. سمای و همکاران^[۶] تأمین‌کنندگان را با روش‌های تاپسیس فازی و فرایند تحلیل شبکه‌ی فازی رتبه‌بندی کردند؛ آنها روش خود را در شرکت مخابرات به صورت عملی پیاده‌سازی کردند. همچنین، لیانگ^[۷] یک مدل چندهدفه‌ی فازی را توسعه داد که در آن پارامترها و توابع هدف به صورت فازی بیان شده است. وی سپس مدل خود را با استفاده از روش بیشینه - کمینه‌ی تابع عضویت به یک تابع هدف تبدیل و حل کرد. لین^[۸] نیز یک مدل انتخاب تأمین‌کننده تحت شرایط فازی را توسعه داد؛ او در مدل چندهدفه‌ی خود بیشینه‌سازی اوزان تأمین‌کننده‌ها را به عنوان یک تابع هدف در نظر گرفت و در کنار توابع هزینه و نرخ تحویل مدل را حل کرد.

روش حل مدل در این مقاله یک روش دو مرحله‌ی بیشینه - کمینه بوده که توابع هدف در فاز دوم اهمیت یکسان دارند. مین و همکاران^[۹] یک مدل چندهدفه برای انتخاب تأمین‌کننده توسعه دادند؛ آنها در مدل خود شرایط ریسک را نیز اعمال کرده‌اند. ساویک^[۱۰] با بررسی مسئله‌ی تخصیص سفارشات برای قطعات در میان تأمین‌کنندگان و مشتری‌محوری در زنجیره‌ی تأمین ریسک عملیاتی را با یک یا دو هدف تصادفی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کرد. با توجه به مجموعه‌ی از مشتریان محصولات، تصمیم‌گیرنده باید برای عرضه‌ی کالا و خرید قطعات مورد نیاز برای سفارش هر مشتری هزینه‌ی کل را به منظور کاهش تأثیر تأخیر ریسک به حداقل برساند. لواستره^[۱۱] در مقاله‌اش که براساس مطالعه‌ی تجربه‌ی ۱۴۲ نفر از مدیران عمومی و تدارکات و مدیران زنجیره‌ی تأمین در ۵۰ شرکت مختلف فرانسه به دست آمده، نشان می‌دهد که مدیریت ریسک در زنجیره‌ی تأمین باید یک تابع مؤثر مدیریت سازمانی در طبیعت و نزدیک به واقعیت‌های استراتژیک و عملیاتی از فعالیت برای سازمان باشد. علاوه بر این، یافته‌های مطالعه‌ی تجربی ما نشان‌گر اثر مدیریت ریسک در زنجیره‌ی تأمین بر همکاری (همکاری براساس جلسات، به موقع و تبادل اطلاعات) و استقرار مشترک و رایج فرایندهای عرضی با شرکای صنعتی است.

در تحقیقات انجام شده تاکنون مدل چندهدفه‌ی که پارامترهای هزینه، تأخیر، وزن تأمین‌کنندگان و ریسک را همزمان در نظر بگیرد وجود نداشته است. در نوشتار حاضر علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده در مدل، همواره به دلیل عدم قطعیت از پارامترهای فازی برای حل مدل استفاده شده است. برای به دست آوردن وزن تأمین‌کنندگان روش تاپسیس فازی به کار رفته است که از نشانه‌های جدید بودن مدل فوق است. همچنین از دیگر ویژگی‌های مدل به کارگیری عامل تخفیف به صورت تابع علامت است. این نوع تخفیف از به وجود آمدن یک متغیر تصمیم در مدل جلوگیری می‌کند. همچنین ریسک در مدل به صورت کمی و با در نظر گرفتن احتمالات ریسک و مقادیر ریسک بیان شده است. در نهایت مدل با دو الگوریتم فراابتکاری حل می‌شود و با معیارهای اندازه‌گیری تعریف شده روش‌های حل مقایسه و اندازه‌گیری می‌شود.

۲. تشریح مدل

فرض می‌کنیم که خریداری قصد تهیه‌ی چندین کالا یا ماده‌ی اولیه را در دوره‌ی t از مجموعه‌ی تأمین‌کنندگان دارد، که هدف آن تخصیص مقدار بهینه‌ی سفارش به تأمین‌کننده‌ی مناسب است.

۱.۲. فرضیات مدل

فرضیات ذیل در تعریف و مدل‌سازی مسئله در نظر گرفته شده است:

- \tilde{t}_{jk} عدد فازی مثلثی است و برای غیر قابل فازی کردن آن از سیاست میانگین (توزیع β) استفاده کرده‌ایم.
- \tilde{w}_j وزن تأمین‌کنندگان از روش تاپسیس فازی به دست آمده است.
- توابع هدف از دید تصمیم‌گیرنده دارای اوزان برابرند.
- تقاضا ثابت و قطعی است.
- کمبود وجود ندارد.
- هرکدام از تأمین‌کنندگان می‌توانند تمام K محصول را تولید و ارائه دهند.
- تخفیف به صورت کلی است.

۲.۲. علائم

- r : سطوح قیمتی تخفیف ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده‌ی k ام برای محصول k ام ($r = 1, \dots, m_{jk}$)؛
- j : اندیس تأمین‌کننده ($j = 1, 2, \dots, J$)؛
- k : اندیس محصول ($k = 1, 2, \dots, K$)؛
- p_{jkr} : هزینه‌ی هر واحد محصول K ام ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده‌ی k ام در سطح قیمتی r ام؛
- m_k : بیشینه انتخاب تأمین‌کننده برای خرید هر محصول k ؛
- p_{jk} : هزینه‌ی خرید هر واحد محصول k ام ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده‌ی k ام؛
- \tilde{t}_{jk} : نرخ دیرکرد محصول k ام توسط تأمین‌کننده‌ی k ام؛
- D_k : تقاضای مشتری از محصول k ؛
- \tilde{w}_j : وزن تأمین‌کننده‌ی k ام؛
- f_{jk} : هزینه‌ی ثابت سفارش از تأمین‌کننده‌ی k ام برای محصول k ام؛
- c_{jk} : ظرفیت تأمین‌کننده‌ی k ام برای محصول k ام؛
- T_j : بیشینه نرخ پذیرش دیرکرد کالاهای خریداری شده از تأمین‌کننده‌ی k ام؛
- v_{jk} : هزینه‌ی حمل به‌ازای هر واحد محصول k ام از تأمین‌کننده‌ی k ام در واحد مسافت؛
- w_j : فاصله‌ی تأمین‌کننده k ام تا مشتری؛
- x_{jk} : مقدار کالای خریداری شده توسط مشتری از تأمین‌کننده‌ی k ام برای محصول k ام در سطح قیمتی r ام؛
- Y_{jk} : اگر مشتری محصول k ام را از تأمین‌کننده k ام خریداری کند 1 ، در غیر این صورت صفر؛
- \tilde{p} : احتمال ریسک خسارت؛
- \tilde{q} : احتمال ریسک سود؛
- IR_{jk}^+ : شدت ریسک سود از تأمین‌کننده‌ی k ام برای محصول k ام؛

۴. مدل سازی محدودیت ها

۱.۴. محدودیت برطرف کردن تقاضا

رابطه ی ۵ نشان می دهد که تقاضای مشتری باید برطرف شود:

$$\sum_{j=1}^J x_{jk} \geq D_k; \quad \forall k \quad (5)$$

۲.۴. محدودیت ظرفیت تأمین کننده

رابطه ی ۶ نشان می دهد که میزان سفارش نباید بیشتر از ظرفیت تأمین کننده باشد.

$$x_{jk} \leq c_{jk}; \quad \forall k, \forall j \quad (6)$$

۳.۴. محدودیت تعداد محصولات دارای دیرکرد

رابطه ی ۷ نشانگر میزان تأخیر مجازی است که باید رعایت شود:

$$\sum_{k=1}^K \tilde{t}_{jk} \cdot x_{jk} \leq \sum_{k=1}^K T_j \cdot D_k; \quad \forall j \quad (7)$$

۴.۴. محدودیت بیشینه انتخاب تأمین کننده

مشتری برای هر محصول تنها از تعداد مشخصی تأمین کننده می تواند استفاده کند؛ همچنین برای هر محصول حداقل از یک تأمین کننده می تواند استفاده کند. این رابطه با معادله ی ۸ نشان داده می شود:

$$1 \leq \sum_{j=1}^J Y_{jk} \leq n_k; \quad \forall k \quad (8)$$

۵.۴. محدودیت سرمایه

رابطه ی ۹ بیان می دارد که جمع کل هزینه ها از مقدار سرمایه ی در دست مشتری نباید بیشتر شود.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Y_{jk} \cdot (p_{jkr} + (w_j \cdot v_{jk}) + f_{jk}) \leq \circ \quad (9)$$

۶.۴. محدودیت بیشینه ریسک منفی مورد قبول

رابطه ی ۱۰ نشان می دهد که مقدار ریسک مجاز قابل قبول چقدر باشد.

$$\sum_{j=1}^J (R_{jk}^- \cdot Y_{jk}) \leq R_{\max}^-; \quad \forall k \quad (10)$$

۷.۴. محدودیت تخفیف

رابطه های ۱۱ و ۱۲ نشان می دهند که تخفیف قیمتی برای محصولات از جانب تأمین کننده است.

IR_{jk}^- : شدت ریسک خسارت از تأمین کننده ی زام برای محصول k ام؛

R_{jk}^+ : امید ریاضی ریسک مثبت از تأمین کننده ی زام برای محصول k ام؛

R_{jk}^- : امید ریاضی ریسک منفی از تأمین کننده ی زام برای محصول k ام.

۳. مدل سازی توابع هدف

۱.۳. تابع هزینه

هزینه های خرید را می توان به دو دسته ی کلی تقسیم کرد: هزینه های وابسته به میزان سفارش مانند هزینه ی خالص خرید کالا، هزینه ی حمل و نقل و غیره. دسته ی دیگر هزینه های مستقل از میزان سفارش که آنها را به عنوان هزینه های ثابت در نظر می گیریم. رابطه ی ۱ نشانگر هزینه است.

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jk} \cdot p_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jk} \cdot w_j \cdot v_{jk} \cdot Y_{jk} \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K f_{jk} \cdot Y_{jk} \end{aligned} \quad (1)$$

۲.۳. تابع نرخ دیرکرد محصولات

با استفاده از تابع ۲ تعداد کل محصولات دیر تحویل داده شده را کمینه می کنیم. نرخ دیرکرد مطابق رابطه ی ۲ محاسبه می شود:

$$\text{Min } z_2 = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \tilde{t}_{jk} \cdot x_{jk} \quad (2)$$

در نوشتار حاضر برای به دست آوردن \tilde{t}_{jk} از کدنویسی در نرم افزار متلب استفاده کرده ایم.

۳.۳. تابع اوزان تأمین کنندگان

این تابع هدف میزان سفارش به هر تأمین کننده را برحسب وزن آن تأمین کننده که از روش تاپسیس فازی به دست آمده تعیین می کند. با توجه به معیارهای ارزیابی و نظر تصمیم گیرندگان وزن هر گزینه به دست می آید. رابطه ی ۳ بیانگر اوزان تأمین کنندگان است.

$$\text{Max } z_3 = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \tilde{w}_j \cdot x_{jk} \quad (3)$$

در نوشتار حاضر برای به دست آوردن \tilde{w}_j از کدنویسی در نرم افزار متلب استفاده کرده ایم.

۴.۳. تابع ریسک تأمین کنندگان

با توجه به امید ریاضی ریسک منفی و مثبت که از احتمال ریسک و شدت ریسک به دست می آیند، همواره می توان تأمین کننده یی را برگزید که از ریسک منفی کم تر و ریسک مثبت بیشتر برخوردار باشد. این تابع مطابق رابطه ی ۴ مشخص می شود.

$$\text{Min } z_4 = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (R_{jk}^- - R_{jk}^+) \cdot Y_{jk} \quad (4)$$

درایه متناظر آن در ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده در ضریب اهمیت مربوطه ضرب شود (رابطه ۱۹):

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_{ij}; \quad \tilde{v} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

مرحله ششم: تعیین حل ایده‌آل و غیر ایده‌آل فازی برای معیارها. حل ایده‌آل فازی و غیرایده‌آل فازی به صورت روابط ۲۰ و ۲۱ تعریف می‌شود:

$$A^* = \{\tilde{V}_1^*, \dots, \tilde{V}_n^*\} \quad (20)$$

$$A^- = \{\tilde{V}_1^-, \dots, \tilde{V}_n^-\} \quad (21)$$

\tilde{V}_j^* بهترین مقادیر معیار i از بین تمام گزینه‌ها و \tilde{V}_j^- بدترین مقادیر معیار i از بین تمام گزینه‌هاست. این مقادیر از روابط ۲۲ و ۲۳ به دست می‌آید:

$$\tilde{V}_j^* = \max\{\tilde{v}_{ij}\}; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$\tilde{V}_j^- = \min\{\tilde{v}_{ij}\}; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

مرحله هفتم: تعیین فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و غیر ایده‌آل فازی و شاخص شباهت. فاصله بین دو عدد فازی دوزنقه‌یی از رابطه ۲۴ به دست می‌آید:

$$dv = \sqrt{\frac{1}{4}[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2 + (m_4 - n_4)^2]} \quad (24)$$

شاخص شباهت از رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$cc_i = \frac{s_i^-}{s_i^* + s_i^-}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

همچنین برای غیرفازی کردن اعداد فازی مثلثی در توابع هدف تأخیرات و ریسک از رابطه ۲۶ (میانگین توزیع بتا) استفاده شده است:

$$\tilde{B} = (B^p, B^m, B^o); \quad B = \left(\frac{B^p + 2B^m + B^o}{6} \right) \quad (26)$$

۶. محاسبه امید ریاضی ریسک منفی و ریسک مثبت

معادلات ۲۷ و ۲۸ نشان‌گر امید ریاضی ریسک منفی و مثبت مطرح شده در مدل هستند:

$$R_{jk}^- = IR_{jk}^- * \tilde{p} \quad (27)$$

$$R_{jk}^+ = IR_{jk}^+ * \tilde{q} \quad (28)$$

۷. حل مدل

تعدد توابع هدف، غیرخطی بودن مدل، و نیز وجود متغیرهای باینری و عدد صحیح از جمله مواردی هستند که باعث پیچیدگی مدل می‌شوند و حل مدل را در ابعاد بزرگ بسیار دشوار و پیچیده می‌سازند. تیان و همکارانش^[۱۳] در مطالعات خود ثابت کردند که حل چنین مسائلی با روش‌های دقیق مشکل است. همچنین برک و همکاران^[۱۴] NP-HARD بودن مسائلی را که تخفیف در آنها به صورت کمی است اثبات کردند. از این رو، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات به عنوان دو الگوریتم فرابتکاری برای حل مدل ارائه شده استفاده می‌کنیم.

$$a(j, k, r) = \text{sign}[\text{sign}(x_{jk} - q_{jk(r-1)}) + \text{sign}(q_{jkr} - x_{jk})]; \quad \forall k, \forall j, \forall r \quad (11)$$

$$p_{jk} = p_{jk1} * a(j, k, 1) + p_{jk2} * a(j, k, 2) + \dots + p_{jkr} * a(j, k, r); \quad \forall k, \forall j \quad (12)$$

۸.۴. محدودیت متغیرهای تصمیم

رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ متغیرهای تصمیم مدل هستند.

$$x_{jk} \geq 0; \quad \forall k, \forall j \quad (13)$$

$$Y_{jk} : 0, 1; \quad \forall k, \forall j \quad (14)$$

۵. روش تاپسیس فازی برای به دست آوردن وزن

تأمین‌کنندگان^[۱۲]

مرحله اول: ارزیابی اهمیت معیارها. اعداد در این روش به صورت فازی دوزنقه‌یی در نظر گرفته شده است.

مرحله دوم: رتبه‌بندی گزینه‌ها. برای محاسبه عدد فازی دوزنقه‌یی از نظر تصمیم‌گیرندگان (رابطه ۱۵) استفاده می‌شود.

$$\tilde{w} = (t_1, t_2, t_3, t_4)$$

$$t_1 = \min\{t_{k1}\}; \quad \forall k$$

$$t_2 = \frac{1}{K}$$

$$t_3 = \frac{1}{K}$$

$$t_4 = \max\{t_{k4}\}; \quad \forall k \quad (15)$$

K تعداد تصمیم‌گیرندگان است.

مرحله سوم: تشکیل ماتریس تصمیم و بردار وزن معیارها. پس از آن که متغیرهای زبانی ماتریس تصمیم و بردار وزن، به اعداد فازی دوزنقه‌یی تبدیل شدند باید ماتریس تصمیم فازی و بردار وزن فازی را شکل داد.

مرحله چهارم: تشکیل ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده. برای معیارهای مثبت و منفی به منظور بی‌مقیاس کردن از رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ استفاده می‌شود:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{d_{j^*}}, \frac{b_{ij}}{d_{j^*}}, \frac{c_{ij}}{d_{j^*}}, \frac{d_{ij}}{d_{j^*}} \right) \quad \text{معیارهای مثبت} \quad (16)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}^-}{d_{ij}}, \frac{a_{ij}^-}{c_{ij}}, \frac{a_{ij}^-}{b_{ij}}, \frac{a_{ij}^-}{a_{ij}} \right) \quad \text{معیارهای منفی} \quad (17)$$

رابطه ۱۸ نشان‌گر ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده است.

$$\tilde{R}_{jk} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

که در آن m بیان‌گر تعداد گزینه‌ها و n بیان‌گر تعداد معیارهاست.

مرحله پنجم: تشکیل ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده و وزن‌دار. برای محاسبه درایه‌های ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده و وزن‌دار باید

می‌گیرند. در انتخاب، خانه‌ی برگزیده می‌شود که شرط شایسته‌سالاری را داشته باشد. از این رو داریم:

$$n_i \leq n_j \Rightarrow p_i \geq p_j$$

n_i جمعیت خانه‌ی i ام؛ p_i احتمال انتخاب خانه‌ی i ام. برای تعیین p از روش بولتزمن استفاده می‌کنیم (رابطه‌ی ۳۱):

$$p_i \propto \exp(-\beta n_i), \quad p_i = \frac{e^{-\beta n_i}}{\sum_j e^{-\beta n_j}} \quad (31)$$

۳.۸. جهش^۱

در تعیین مقدار ذرات جهش‌یافته از توزیع یکنواخت استفاده شده است. احتمال جهش به صورت رابطه‌ی ۳۲ به دست می‌آید:

$$p_m = \left(1 - \frac{it - 1}{\max it - 1}\right)^\mu \quad (32)$$

μ نرخ جهش که کنترل‌کننده‌ی شیب نمودار است؛ it تکرار^۲.

۹. الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

(NSGA-II)

الگوریتم NSGA-II توسط دب و همکارانش^[۱۸] معرفی شد. معیارهای انتخاب در این الگوریتم در درجه‌ی اول، رتبه‌ی جواب و در درجه‌ی دوم فاصله‌ی تراکمی است. هر قدر رتبه‌ی جواب کم‌تر باشد و فاصله‌ی تراکمی آن بیشتر باشد مطلوب‌تر است. با تکرار عملگر انتخاب دودویی روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ی افراد آن نسل برای شرکت در تقاطع و جهش انتخاب می‌شود. جمعیت ایجاد شده از فرزندان و جهش‌یافتگان با جمعیت اصلی ادغام شده و اعضای جمعیت تازه تشکیل یافته، ابتدا برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شود. اعضای از جمعیت که رتبه‌شان یکسان است برحسب فاصله‌ی تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شود. حال اعضای جمعیت در درجه اول برحسب رتبه، و در درجه دوم برحسب فاصله‌ی تراکمی مرتب‌سازی شده‌اند. برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضای از بالای فهرست مرتب شده انتخاب، و بقیه‌ی اعضای جمعیت دور ریخته می‌شود. اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند؛ چرخه‌ی مذکور تا محقق شدن شرایط خاتمه تکرار می‌شود.

۱.۹. ساختار کروموزوم

چگونگی نمایش جواب‌های مسئله مهم‌ترین بخش در طراحی هرچه بهتر الگوریتم ژنتیک است. از آنجا که هر کروموزوم بیان‌گر حلی برای مسئله است، کروموزوم باید قادر باشد ویژگی‌های مسئله را به خوبی نشان دهد. در این تحقیق شکل جواب یا کروموزوم مسئله از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول کروموزوم نشان‌دهنده‌ی مقدار سفارش محصول k و بخش دوم کروموزوم نیز متغیر باینری برای انتخاب تأمین‌کننده در نظر گرفته شده است.

۲.۹. استراتژی انتخاب

جمعیت والد برای به‌کارگیری عملگرهای تقاطع و جهش بر روی آنها با استفاده از عملگر مسابقه‌ی ازدحام صورت می‌گیرد. این عملگر دو جواب را مقایسه کرده و

۸. الگوریتم بهینه‌یابی گروه ذرات

بهینه‌یابی گروه ذرات (PSO) یک روش بهینه‌یابی تصادفی بر مبنای جمعیت و تکامل است که توسط ابره‌ارت و کندی^[۱۵] توسعه داده شد. ویژگی این روش تبادل اطلاعات بین ذرات برای حل مسئله است. در PSO هر جواب مانند یک پرنده در فضای جست‌وجو است، که «ذره» نامیده می‌شود. تمامی ذرات دارای مقادیری برازندگی هستند که با توابع برازندگی قابل ارزیابی است. هر ذره دارای بردار سرعتی است که جهت پرواز ذره را مشخص می‌کند. به طور خلاصه ذرات در فضای جست‌وجو به دنبال بهترین نقطه پرواز می‌کنند. PSO از جمعیتی تشکیل شده که در ابتدا به صورت تصادفی تولید می‌شود. هر جزء این جمعیت در فضای D بعدی مسئله با سرعتی که به طور پویا و با توجه به تجربیات خود و همراهانش براساس روابط ۲۹ و ۳۰ تنظیم می‌شود به حرکت درمی‌آیند:

$$v_{i,t} = w * v_{i,t-1} + c_1 * \text{Rand} * (p_i - x_{i,t-1}) + c_2 * \text{Rand} * (p_g - x_{i,t-1}) \quad (29)$$

$$x_{i,t} = (x_{i,t-1} + v_{i,t}) \quad (30)$$

که در آن $v_{i,t}$ سرعت ذره‌ی i ام در تکرار، t نشان‌دهنده‌ی فاصله و جهتی است که به وسیله‌ی ذره طی می‌شود و $x_{i,t}$ موقعیت ذره‌ی i ام در تکرار t ام است. p_i بهترین جوابی است که ذره در مسیر خود به آن رسیده است (p_{best}) و p_g بهترین جواب جهانی در بین ذرات (g_{best}) است. w وزن ماندگاری است و ماندگاری سرعت قبلی و موازنه‌ی بین جست‌وجوی جهانی و محلی را مشخص می‌کند؛ پرکاربردترین نحوه‌ی استفاده از وزن ماندگاری کاهش خطی براساس دو پارامتر w_{max} و w_{min} است.^[۱۶] c_1 و c_2 ثابت‌هایی هستند که شتاب ذره را به سمت p_i و p_g مشخص می‌کنند؛ برای پوشش کل منطقه، p_{best} و g_{best} معمولاً برابر ۲ قرار داده می‌شود. Rand نیز دو عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. بخش اول معادله‌ی ۲۹ نشان‌گر ماندگاری سرعت پیشین، بخش دوم بیان‌گر آگاهی ذره از خود و تکرار خصوصاً ذره، و بخش سوم نمایان‌گر آگاهی اجتماعی و همکاری بین ذرات است.^[۱۷]

۱.۸. بهینه‌یابی گروه ذرات چندمعیاره (MOPSO)

مهم‌ترین بخش در بهینه‌یابی گروه ذرات چندمعیاره (MOPSO) تعیین بهترین ذره‌ی جهانی برای ذره‌ی i از بین جمعیت است. در MOPSO مجموعه‌ی جواب‌های بهینه‌ی پارتو وجود دارد که هر ذره باید یکی از آنها را به عنوان g_{best} خود انتخاب کند؛ این فرایند به تعیین «بهترین راهنمای محلی» موسوم است. اما تعیین راهنما از بین جواب‌های پارتو مشکل است و یکی از مهم‌ترین مسائل در همگرایی جواب‌هاست. در واقع تفاوت روش‌های مختلف بهینه‌یابی گروه ذرات چندمعیاره، در انتخاب بهترین راهنمای محلی برای هر ذره از بین مجموعه جواب‌های پارتو است. اولین تلاش برای اصلاح PSO برای کاربرد در مسائل بهینه‌یابی چندهدفه توسط مور و چاپمن صورت گرفت. در ادامه روش‌های متفاوت و کاربردی همچون روش هو و ابره‌ارت، کنلوکتلو و لچگا، فیلدسند و سینگ و سیگما در MOPSO پیشنهاد شده است.^[۱۸]

۲.۸. چرخه‌ی اصلی MOPSO

انتخاب رهبر اولین گام در چرخه‌ی اصلی MOPSO است. در اینجا ضمن مشخص کردن یک توزیع احتمال، با استفاده از چرخه‌ی رولت از آن توزیع احتمال نمونه برداری می‌کنیم تا مشخص شود چه خانه‌ی انتخاب می‌شود. سپس بین اعضای آن خانه موردی را انتخاب می‌کنیم. اعضای ذرات نامغلوب در آرشیوی به نام مخزن قرار

پروژه مسابقه را مشخص می‌کند. پروژه مسابقه جوابی است که یکی از دو شرط: ۱. برخورداری از رتبه بهتر، ۲. برخورداری از فاصله‌ی ازدحامی بیشتر در بین جواب‌های هم‌رتبه را داشته باشد انتخاب می‌شود.

۳.۹. عملگر تقاطع^۲

در عملگر تقاطع جمعیت اولیه با تعداد n عملگر تقاطع تولید شده و سپس به صورت تصادفی انتخاب صورت می‌پذیرد. تقاطع در واقع تابعی است که موقعیت دو والد را گرفته و دو فرزند تولید می‌کند؛ به عبارت دیگر به ازای هریک از والدین دو فرزند تولید می‌شود. برای عملیات تقاطع از نوع حسابی^۲ است که برای فضای پیوسته است. روابط ۳۳ و ۳۴ والدین و روابط ۳۵ و ۳۶ فرزندان تولید شده از والدین هستند که در حالت کلی به صورت روابط ۳۷ و ۳۸ تعریف می‌شوند.

$$x_1 = (X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n}) \quad (33)$$

$$x_2 = (X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n}) \quad (34)$$

از ترکیب والدین فرزندان تولید می‌شوند:

$$y_1 = (y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}) \quad (35)$$

$$y_2 = (y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}) \quad (36)$$

در حالت کلی:

$$y_{1i} = \alpha_i \cdot x_{1i} + (1 - \alpha_i) \cdot x_{2i} \quad (37)$$

$$y_{2i} = \alpha_i \cdot x_{2i} + (1 - \alpha_i) \cdot x_{1i} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (38)$$

α به اندازه‌ی المان‌های والدین است که تقریبی از تقاطع یک‌نواخت در فضای گسسته است.

۴.۹. عملگر جهش

در عملگر تقاطع جمعیت اولیه با تعداد n عملگر جهش تولید شده سپس به صورت تصادفی انتخاب صورت می‌پذیرد. برای عملگر جهش از روش گاوسی در فضای پیوسته استفاده شده است. بدین صورت که مقدار متغیر انتخاب شده‌ی x بین x_{\min} و x_{\max} است و متغیر x می‌خواهد به x' منتقل شود. مقدار Δx باید تعیین شود که در اینجا Δx دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 است (رابطه‌ی ۳۹) داریم:

$$\Delta x \sim N(0, \sigma^2)$$

$$x' = x + \Delta x \sim N(x, \sigma^2) \Rightarrow x + \sigma N(0, 1) \quad (39)$$

Δx توسط تابع تصادفی نرمال تعریف می‌شود.^[۱۸]

σ به عنوان پارامتری در خود الگوریتم تعریف می‌شود که می‌توانیم درصدی از اختلاف متغیرها را در نظر بگیریم (P عملگر جهش). به عنوان مثال ۰/۱ از اختلاف حد بالا و پایین متغیرها را:

$$\sigma = 0.1 * (\text{var}_{\max} - \text{var}_{\min})$$

برای انتخاب تعداد المان‌ها، یا متغیرهای انتخابی نرخ را به عنوان نرخ جهش یا میزان اثرگذاری جهش تعریف می‌کنیم و آن را با μ نمایش می‌دهیم. μ درصد جمعیت را انتخاب کرده و عملیات ذکر شده در روابط ۳۹ را روی جمعیت انجام می‌دهیم.

در مرحله‌ی بعد جمعیت اصلی را همراه با جمعیت ناشی از تقاطع و جهش تلفیق کرده و سپس عملیات‌های رتبه‌بندی و فاصله‌ی ازدحامی و مرتب‌سازی را انجام می‌دهیم تا جایی که نقاط پارتو به دست آید.^[۱۸]

۱۰. مثال‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج

۱۰ مسئله‌ی آزمایشی به‌طور تصادفی تولید می‌شود. در جدول ۱ پارامترهای ورودی ۱۰ مسئله‌ی آزمایشی برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری بر روی این نوع مسائل ارائه شده است. پارامترهای مربوط به دو الگوریتم فراابتکاری در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. الگوریتم‌ها با نرم‌افزار (R2012a) (version 7.14.0.739) MATLAB برنامه‌نویسی شده و بر روی یک PC تحت سیستم عامل GB RAM، CPU 2/40 GHz، Windows 7 اجرا شده است.

۱۱. معیارهای اندازه‌گیری کارایی الگوریتم

در این تحقیق برای مقایسه از سه معیار اندازه‌گیری کارایی استفاده شده است. این معیارها عبارت‌اند از:

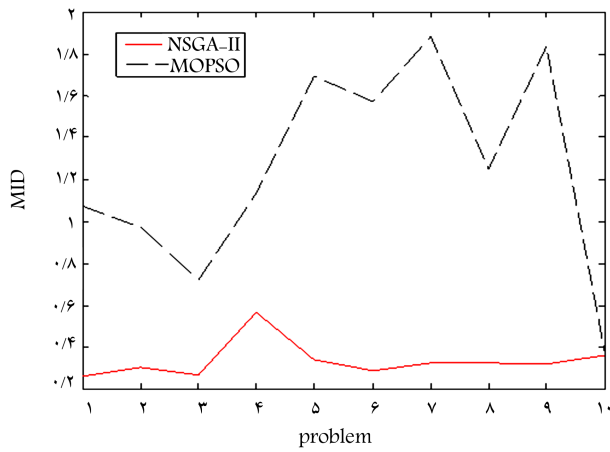
۱. فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل: این معیار فاصله‌ی تمام نقاط را از بهترین مقدار جمعیت محاسبه می‌کند.
۲. پراکندگی جواب‌ها: این معیار میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های متوالی را محاسبه می‌کند.
۳. زمان حل الگوریتم: روابط ۴۰ و ۴۱ رویه‌ی محاسباتی این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مسائل آزمایشی تولید شده.

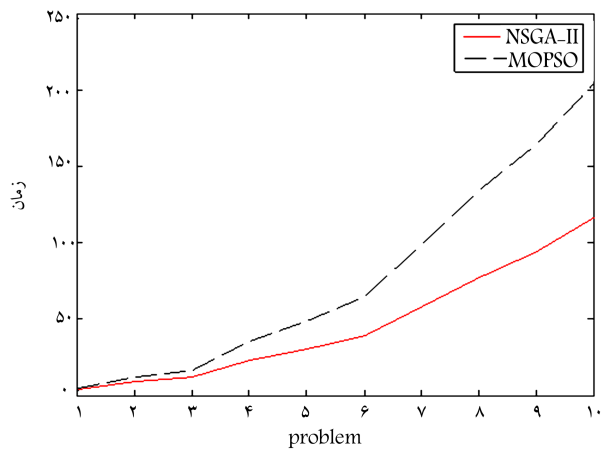
شماره مسئله	تعداد تأمین‌کنندگان	تعداد محصولات
۱	۳	۵
۲	۵	۸
۳	۷	۹
۴	۱۲	۱۲
۵	۱۴	۱۵
۶	۱۶	۱۸
۷	۲۱	۱۹
۸	۲۵	۲۰
۹	۲۸	۲۱
۱۰	۳۰	۲۵

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم NSGA-II.

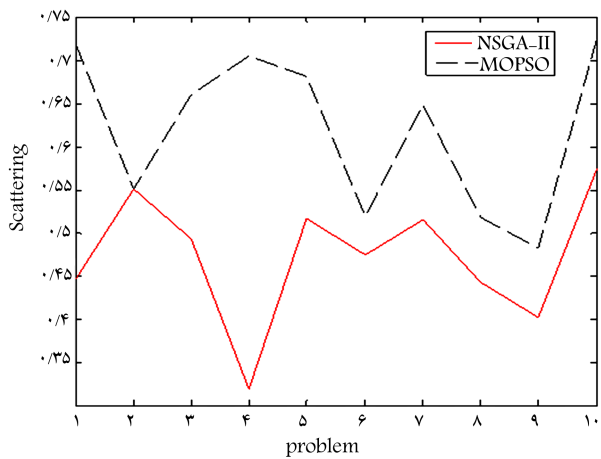
پارامترها	بیشترین تکرار نسل	اندازه جمعیت	درصد تقاطع	درصد جهش	نرخ جهش
NSGA-II	۱۰	۵۰	۰/۷	۰/۴	۰/۲



شکل ۱. نمودار فاصله از نقطه ایده آل.



شکل ۲. نمودار زمان حل.



شکل ۳. نمودار پراکندگی جواب‌ها.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم MOPSO.

پارامترها	بیشترین تکرار نسل	اندازه جمعیت	اندازه آرشیو	احتمال جهش	نرخ جهش
MOPSO	۱۰	۵۰	۵۰	۰٫۴	۰٫۱

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i n}{n} \quad (40)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (41)$$

که داریم:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{|n|}$$

$$d_i = \min\{k \in N \& k \neq 1\} \sum_{m=1}^k |f_m^i - f_m^k|$$

معیارها برای تک تک مسائل آزمایشی تولید شده محاسبه، و نتایج آن در جدول ۴ به صورت میانگین معیارها گزارش شده است.

نتایج حاصل از ارزیابی معیارها توسط نرم‌افزار متلب به این صورت است: شکل ۱ نشان‌گر معیار فاصله از نقطه ایده آل، شکل ۲ نشان‌گر معیار زمان حل برای دو الگوریتم فراابتکاری، و در نهایت شکل ۳ معیار پراکندگی جواب‌ها در دو الگوریتم فراابتکاری است.

۱۲. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل چندهدفه انتخاب و تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان با پارامترهای فازی در شرایط ریسک ارائه شد. از جنبه‌ی نوآوری و عملیاتی مدل حاضر دارای مزیت‌های متعددی نسبت به تحقیقات صورت گرفته در ادبیات موضوع است. یکی از تفاوت‌های عمده بین تحقیق جاری و مطالعات پیشین بیان و تفسیر مسئله‌ی انتخاب و تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان در شرایط ریسک، تخفیف تابع علامت و پارامترهای فازی است. نکات و اهداف برجسته‌ی مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

۱. در نظر گرفتن تخفیف تابع علامت برای جلوگیری از اضافه شدن متغیر تصمیم.
۲. در نظر گرفتن وزن تأمین‌کنندگان به صورت تابع هدف مجزا و به دست آوردن وزن از روش تاپسیس فازی.

۳. در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی در مدل به صورت عدد فازی مثلثی تصادفی.
۴. در نظر گرفتن ریسک به‌طور کمی در تابع هدف مدل.

برای حل مدل پیشنهادی در ابعاد بزرگ، از رویکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه‌ی مرتب‌سازی نامعلوب و تجمع ذرات استفاده شده است. هر دو این

جدول ۴. نتایج محاسباتی معیارهای مقایسه الگوریتم‌ها.

MOPSO		NSGA-II		الگوریتم معیار
زمان حل	پراکندگی جواب‌ها	زمان حل	پراکندگی جواب‌ها	
۷۸٫۴۲۳	۰٫۶۲۰۶۷	۴۶٫۲۴۴	۰٫۴۷۳۴۷	میانگین ۱۰ مسئله
	۱٫۲۴۸۳		۰٫۳۳۴۳	

برتری دارد و الگوریتم فراابتکاری تجمع ذرات دارای پراکندگی است. پس از نظر مثال نمونه و در حالت عددی الگوریتم NSGA-II در معیارهای زمان و فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل برتر است و الگوریتم MOPSO در معیار پراکندگی برتری دارد.

الگوریتم‌ها مجموعه جواب‌های نامغلوب قابل قبولی را در مرز پارتو ارائه می‌دهد. پس از انجام آزمایش‌ها و ارزیابی جواب‌های دو الگوریتم توسط سه معیار فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل، پراکندگی و زمان حل این نتیجه به دست آمد که الگوریتم فراابتکاری مرتب‌سازی نامغلوب در معیارهای زمان حل و فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل

پانوشته‌ها

1. mutation
2. iteration
3. crossover
4. arithmetic crossover

منابع (References)

1. Nazari Shirkouhi, S., Shakouri, H., Javadi, B. and Keramati, A. "Supplier selection and order allocation problem using a two-phase fuzzy multi-objective linear programming", *Applied Mathematical Modelling*, **73**(22), pp. 9308-9323 (2013).
2. Kokangul, A. and Susuz, Z. "Integrated analytical hierarchy process and mathematical programming to supplier selection problem with quantity discount", *Applied Mathematical Modeling*, **33**(3), pp. 1417-142 (2009).
3. Wang, T.-Y. and Yang, Y.-H. "A fuzzy model for supplier selection in quantity discount environments", *Expert Systems with Applications*, **36**(10), pp. 12179-12187 (2009).
4. Yücel, A. and Güneri, A.F. "A weighted additive fuzzy programming approach for multi-criteria supplier selection", *Expert Systems with Applications*, **38**, pp. 6281-6286 (2011).
5. Haleh, H. and Hamidi, A. "A fuzzy MCDM model for allocating orders to suppliers in a supply chain under uncertainty over a multi-period time horizon", *Expert Systems with Applications*, **38**(8), pp. 9076-9083 (2011).
6. Önüt, S., Selin, S.K. and Isik, E. "Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company", *Expert Systems with Applications*, **36**(2), pp. 3887-3895 (2009).
7. Liang, T.F. "Application of fuzzy sets to manufacturing/distribution planning decisions in supply chains", *Information Sciences*, **181**, pp. 842-854 (2011).
8. Lin, J.E. and Singh, S. "A multi-objective algorithm based upon particle swarm optimization, an efficient data structure and turbulence", *In: Proceedings of the UK Workshop on Computational Intelligence*, pp. 37-44 (2002).
9. YU, M.-C. and Goh, M. "A multi-objective approach to supply chain visibility and risk", *European Journal of Operational Research*, **233**(1), pp. 125-130 (2014).
10. Sawik, T. "Supplier selection in make-to-order environment with risks", *Mathematical and Computer Modelling*, **53**, pp. 1670-1679 (2011).
11. Lavastre, O., Gunasekaran, A. and Spalanzani, A. "Supply chain risk management in French companies", *Decision Support Systems*, **52**, pp. 828-838 (2012).
12. Chen, C.T. "Extensions of TOPSIS for group decision – making under fuzzy environment", *Fuzzy Set and System*, **114**, pp. 1-9 (2000).
13. Tian, P., Ma, J. and Zhang, D.-M. "Non-linear integer programming by Darwin and Boltzmann mixed strategy", *European Journal of Operational Research*, **105**(1) pp. 224-235 (1998).
14. Burke, G.J., Carrillo, J. and Vakharia, A.J. "Heuristics for sourcing from multiple suppliers with alternative quantity discounts", *European Journal of Operational Research*, **181**(1), pp. 317-329 (2008).
15. Eberhart, R. and Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory", *In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39-43 (1995).
16. Hu, X., Shi, Y. and Eberhart, R. "Recent advances in particle swarm", *In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 90-97 (2004).
17. Coello, C.A. and Lechuga, M.S. "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization", *in: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1051-1056 (2002).
18. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2), pp. 182-197 (2002).