

# بهینه‌سازی مسئله‌ی دوهدفه‌ی فازی در زنجیره‌ی تأمین معکوس با استفاده از الگوریتم فاخته

Original Article

محمدرضا رهوی (دانشجوی دکتری)

گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا احتشام رانی\* (استادیار)

صادق عابدی (استادیار)

گروه مدیریت صنعتی، واحد فزون، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

طراحی و استقرار شبکه‌ی لجستیکی، یک تصمیم استراتژیک است که تأثیر آن برای چندین سال طول خواهد کشید؛ پارامترهای تقاضا و برگشتی مشتریان در طی این مدت ممکن است تغییر کند. بنابراین یک شبکه‌ی لجستیکی کارآمد باید به شیوه‌ی طراحی شود که بتواند پاسخگوی عدم قطعیت‌ها باشد. هدف این تحقیق تعیین مقدار محصولات ارسالی بین مراکز در هر دوره‌ی زمانی است، به طوری که هزینه‌ی کل لجستیک معکوس و زمان دیرکرد حداقل شود. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در شبکه‌ی لجستیک معکوس از رویکرد فازی استفاده و در نهایت یک مدل ریاضی فازی ارائه و در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و حل شد. همچنین به منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم فاخته استفاده و در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن با حل دقیق مقایسه شد. در این تحقیق، هدف طراحی مدل ریاضی چندهدفه‌ی است که هزینه‌ی کل و میزان دیرکرد در ارسال سفارشات مشتری در شبکه‌ی لجستیک سه‌سطحی با فرض عدم قطعیت پارامترها را بهینه‌سازی کند، از سوی دیگر کمیته‌سازی زمان انتظار را با در نظر گرفتن میزان دیرکرد ارسال به عنوان تابع هدف دوم اعمال شده است. نتایج حاکی از آن است که مجموع مقادیر ارسالی به تولیدکننده برابر با مقادیر به دست آمده از حل دقیق است و از سوی دیگر مقدار تابع هدف با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابد که این امر حاکی از عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: لجستیک معکوس، بهینه‌سازی زمان و هزینه، مدل‌سازی چندهدفه، نظریه‌ی فازی، الگوریتم فاخته.

## ۱. مقدمه

تداوم و هماهنگ کردن فعالیت‌های تولید، توزیع و جلوگیری از توقف عملیات به سبب کمبود موجودی و نیز قابل استفاده کردن اقلام و کالاهای برگشتی؛ خط‌مشی‌ها، نظام‌ها و روش‌هایی را اتخاذ کنند تا مجموع هزینه‌های مرتبط با زنجیره‌ی تأمین را کاهش دهند.<sup>[۱]</sup> لجستیک معکوس به دلیل مزیت‌های رقابتی فراوانی که با خود به همراه دارد از محبوبیت خاصی برخوردار است. قوانین زیست محیطی و منافع اقتصادی، آگاهی مصرف‌کنندگان و مسئولیت‌های اجتماعی در برابر محیط زیست از محرک‌های اساسی این حوزه‌اند.<sup>[۲]</sup> در این راستا طراحی شبکه‌ی لجستیک به عنوان بخشی از برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. از این رو طراحی مناسب این شبکه می‌تواند نقش مثبتی در اهداف زنجیره‌ی تأمین به خصوص کاهش هزینه‌ها، سطح پاسخگویی و کارایی داشته باشد.<sup>[۳]</sup> کاربرد مسائل طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس دامنه‌ی وسیعی از مدل‌های خطی تا مدل‌های

در محیط پرتلاطم و غیر قابل پیش‌بینی امروز، موفقیت یک بنگاه به توانایی هماهنگی آن در شبکه‌ی پیچیده ارتباطات در میان اعضای زنجیره‌ی تأمین بستگی دارد. امروزه حجم محصولات تولیدی مصرف شده، خسارت‌های قابل ملاحظه‌ی را در جهت تخریب محیط زیست به ارمغان آورده و همگان اعم از مصرف‌کنندگان و مسئولان نگران وضعیت محیط زیست هستند و با دغدغه‌ی فراوان، روند رو به بهبودی را برای وضعیت محیط زیست دنبال می‌کنند. مدیریت لجستیک معکوس حوزه‌ی کوچک و مهمی از زنجیره‌ی تأمین‌کنندگان امروزی است و این اجازه را به مدیریت شرکت‌ها می‌دهد که کالاها و مواد اولیه‌ی بازگشتی را به عرضه‌کنندگان بازگردانند و برای حفظ

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۲، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۲۹، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۱۳

DOI:10.24200/J65.2018.20085

به منظور پیدا کردن مجموعه‌ی از جواب‌های غیر مسلط توسعه دادند.<sup>[۹]</sup> به‌منظور رویارویی با حل مسائل بسیار پیچیده، روش‌های فراابتکاری مختلفی ارائه شده است. یکی از جدیدترین روش‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته است که در چندین مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>[۱۰]</sup> جایارمن و پیرکول (۲۰۰۱) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای یک شبکه‌ی لجستیک چندکالایی و چهاررده‌ی ارائه کرده‌اند. این مدل جزو معدود مدل‌هایی است که به تصمیم‌گیری درباره‌ی رده‌ی تأمین‌کنندگان می‌پردازد. مطالعه‌ی فوق روشی ابتکاری بر مبنای روش لاگرانژ برای حل مسئله ارائه داده است.<sup>[۱۱]</sup> ملاچریونودیس و همکاران (۲۰۰۵) برای طراحی مجدد به ساختار شبکه‌ی انبارها به‌منظور کاهش هزینه‌ها از یک متدولوژی چندهدفه برنامه‌ریزی فیزیکی استفاده کرده است.<sup>[۱۲]</sup> لیستس و دکر (۲۰۰۵) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه‌ی لجستیک مستقیم، در یک زنجیره‌ی دوری با هدف کمیته‌سازی هزینه ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۳]</sup> جایارمن و همکاران (۱۹۹۹) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس با هدف کمیته‌سازی هزینه ارائه داده است. این کار جزو معدود مقالاتی است که به طراحی یک سیستم کشتی در لجستیک معکوس مبتنی بر تقاضای مشتریان برای محصولات احیا شده پرداخته است.<sup>[۱۴]</sup> برای طراحی شبکه‌ی لجستیک حلقه‌بسته‌ی فراهم‌آوردندگان خدمات لجستیک طرف سوم دو و ایوانز (۲۰۰۸) یک مدل پیشرفته‌ی دوده‌ی برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته با ادغام مراکز توزیع با مراکز جمع‌آوری و مراکز احیا ارائه کرده است. البته از حالات مختلف احیا تنها جنبه‌ی تعمیرات را مورد توجه قرار داده است. اهداف این مدل شامل کمیته‌سازی هزینه و کمیته‌سازی زمان خدمت‌دهی به مشتری است. آنها برای حل مدل ارائه‌شده، یک روش ترکیبی جست‌وجوی پراکنده ارائه داده‌اند.<sup>[۱۵]</sup> اما مقالات اندکی نیز در سال‌های اخیر به طراحی یک پارچه‌ی شبکه‌ی توزیع، شامل لجستیک مستقیم و معکوس، به‌طور همزمان پرداخته‌اند و از آن جمله می‌توان به مقاله‌ی کو ایوانز (۲۰۰۷) اشاره کرد. تعداد اندکی از مقالات در سال‌های اخیر به طراحی یک پارچه‌ی شبکه‌ی توزیع لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته‌اند که با وجود پیشتازی در طراحی یک پارچه ضعیف‌هایی نیز دارند؛ از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن تعداد معینی از تسهیلات (مدل‌های برون‌زا) در رده‌های مختلف و عدم ذکر دلایل انتخاب این تعداد، عدم در نظر گرفتن ظرفیت‌های متنوع برای تسهیلات و انتخاب یک سطح ظرفیت، مبتنی بر موردی بودن مدل‌های طراحی شده و عدم قابلیت تعمیم به سایر موارد و عدم در نظر گرفتن تمامی رده‌های لجستیک معکوس به‌خصوص مراکز بازیافت و انهدام اشاره کرد. در مطالعات دیگر نیز مدل‌سازی ریاضی شبکه‌ی لجستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. دو ایوانز (۲۰۰۸) مدل بهینه‌سازی دوده‌ی شامل برون‌سپاری و لجستیک شخص ثالث را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آنها یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوده‌ی برای مسئله‌ی شبکه‌ی طراحی لجستیک معکوس توسعه دادند.<sup>[۱۶]</sup> اولکو و بوکیندرم (۲۰۱۲) در مطالعه‌ی اثرات سناریوهای هزینه‌ی مختلف را در طراحی شبکه‌ی لجستیک مورد بررسی قرار دادند. آنها جواب‌های بهینه‌ی چندگانه برای هزینه و زمان ارسال با هدف بیشینه‌سازی سود تأمین‌کننده به دست آوردند.<sup>[۱۷]</sup> علاوه بر مطالعات فوق می‌توان به مطالعات دیگر نظیر مدل‌سازی فعالیت‌های لجستیک معکوس در پایان دوره‌ی عمر وسایل نقلیه،<sup>[۱۸]</sup> طراحی لجستیک معکوس برای زباله‌های تجهیزات الکترونیکی<sup>[۱۹]</sup> و برون‌سپاری فعالیت‌های لجستیک معکوس<sup>[۲۰]</sup> اشاره کرد. در این مطالعه، یک مدل ریاضی به‌منظور بهینه‌سازی دو هدف زمان و هزینه با استفاده از پارامترهای فازی در شبکه‌ی لجستیک معکوس در سه سطح مراکز بازگشتی، پردازش و تولیدکننده در یک محصول ارائه شده و از سوی دیگر محصول با عمر نهایی

پیچیده‌ی غیر خطی، از کمیته‌سازی هزینه‌ی ارسال یک محصول تا مسائل بهینه‌سازی پیچیده‌ی چندهدفه را شامل می‌شود.<sup>[۵]</sup> از آنجا که مسائل مهم در دنیای واقعی بیش از یک هدف را شامل می‌شوند، در نظر گرفتن چند هدف به‌طور همزمان یک انتخاب مناسب برای اکثر تصمیم‌گیرندگان است. همچنین وجود عدم قطعیت در پارامترهای مسئله از دیگر ملاحظات واقعی است که در این تحقیق لحاظ خواهد شد.

با توجه به اهمیت لجستیک معکوس و نقش آن در زنجیره‌ی تأمین، در این مقاله سعی شده شبکه‌ی لجستیکی طراحی شود که توابع اهداف مختلف را در مسئله‌ی لجستیک معکوس مد نظر قرار دهد. بر همین اساس دو تابع هدف زمان و هزینه‌ی عملیات مورد ملاحظه قرار گرفته است. یک شبکه‌ی لجستیکی کارا باید به شیوه‌ی طراحی شود که بتواند پاسخ‌گوی عدم قطعیت‌ها باشد. بنابراین در این مطالعه از نظریه‌ی فازی برای در نظر گرفتن پارامترهای غیر قطعی استفاده می‌شود. در ادامه و در بخش دوم، ادبیات موضوع مربوط به این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم، مسئله‌ی بهینه‌سازی زمان و هزینه‌ی فازی در شبکه‌ی لجستیک معکوس معرفی شده و پارامترها، تابع هدف و محدودیت‌های مرتبط با آن بیان می‌شود. در بخش چهارم، مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی دوده‌ی به‌منظور بهینه‌سازی زمان و هزینه‌ی لجستیک معکوس در محیط فازی ارائه می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته توسعه داده شده برای مسئله‌ی پیشنهادی در بخش پنجم مطرح می‌شود. در بخش ششم نتایج محاسباتی مربوط به حل دقیق و فراابتکاری مسئله گزارش می‌شود. و نهایتاً نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آتی در بخش هفتم بیان می‌شود.

## ۲. مرور ادبیات

هدف اصلی هر زنجیره‌ی تأمین برآورده کردن نیازهای مشتری با بالاترین کارایی ممکن و کم‌ترین هزینه است. در حقیقت از لحاظ ساختاری، زنجیره‌ی تأمین یک شبکه شامل خرده‌فروش، عمده‌فروش، توزیع‌کننده، تولیدکننده و تأمین‌کننده است که هر یک، تأمین‌کننده‌ی عامل پایین‌دست خود بوده و خرده‌فروش نیز برآورده‌کننده‌ی نیاز مشتری نهایی است. در همین راستا لجستیک معکوس، شامل فرایند کالاهای مرجوعی و نحوه‌ی برخورد مناسب با این نوع اقلام و تمام عملیات مرتبط با مصرف مجدد کالا و مواد به منظور افزایش بهره‌وری، سوددهی و کارآمدی بیشتر سازمان لجستیکی است.

در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص مدل‌سازی هزینه‌های لجستیک معکوس انجام شده است. جایارمن و همکاران (۲۰۰۳) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس ارائه دادند. این مدل در سطح استراتژیک پایه‌گذاری شده و تعیین می‌کند که کدام یک از مراکز بازتولید با توجه به محصولات بازگشتی، احداث شوند.<sup>[۶]</sup> مین و همکاران (۲۰۰۵) یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط با هدف کمیته‌سازی هزینه‌ها ارائه کردند. به منظور حل مدل پیشنهادی یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده و از رویکرد باینری استفاده شده است.<sup>[۷]</sup> لی و همکاران (۲۰۰۹) یک شبکه‌ی لجستیک معکوس سه‌رده‌ی را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه کردند که هدف از آن، کمیته‌سازی هزینه‌های لجستیک معکوس است.<sup>[۸]</sup> پیشواپی و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط دوده‌ی برای طراحی شبکه‌ی لجستیک مستقیم و معکوس یک پارچه ارائه کردند. به‌منظور حل مدل پیشنهادی، الگوریتم متیک چندهدفه با سازوکار جست‌وجوی محلی پویا

- هزینه نگه‌داری موجودی تمام مراکز پردازش یکسان است.

### ۲.۳. اندیس‌های مسئله

- $I$ : تعداد مراکز بازگشتی؛
- $M$ : تعداد تولیدکننده؛
- $J$ : تعداد مراکز پردازش؛
- $T$ : افق زمانی.

### ۳.۳. پارامترها و متغیرهای مسئله

- $b_j$ : ظرفیت مرکز پردازش  $j$ ؛
- $c_{jM}$ : هزینه حمل و نقل از مرکز پردازش  $j$  به تولیدکننده  $M$ ؛
- $c_j^H$ : هزینه نگه‌داری موجودی در مرکز پردازش  $j$  در هر دوره؛
- $c_{ij}$ : هزینه حمل و نقل از مرکز بازگشتی  $i$  به مرکز پردازش  $j$ ؛
- $c_j^{op}$ : هزینه ثابت بازگشایی مرکز پردازش  $j$ ؛
- $d_{ij}$ : زمان ارسال از مرکز بازگشت  $i$  به مرکز پردازش  $j$ ؛
- $d_{jM}$ : زمان ارسال از مرکز پردازش  $j$  به تولیدکننده  $M$ ؛
- $d_M(t)$ : میزان تقاضای تولیدکننده  $M$  در دوره  $t$ ؛
- $p_j$ : زمان پردازش محصول قابل استفاده مجدد در مرکز پردازش  $j$ ؛
- $t_E$ : زمان ارسال مورد انتظار مشتری؛
- $r_i(t)$ : میزان محصول با عمر نهایی بازگشتی  $i$  در دوره  $t$ ؛
- $x_{ij}(t)$ : مقدار ارسالی از مرکز بازگشتی  $i$  به مرکز پردازش  $j$  در دوره  $t$ ؛
- $x_{jM}(t)$ : مقدار ارسالی از مرکز پردازش  $j$  به تولیدکننده  $M$  در دوره  $t$ ؛
- $y_j^H(t)$ : مقدار موجودی ارسالی به مرکز پردازش  $j$  در دوره  $t$ ؛
- $z_j$ : اگر از مرکز پردازش  $j$  استفاده شود ۱ و در غیر این صورت صفر است.

### ۴.۳. مدل ریاضی مسئله

با عنایت به سؤال تحقیق در این بخش سعی شده است به سؤال اصلی تحقیق پاسخ داده شود؛ لذا بر این اساس مدل ریاضی تحقیق ارائه خواهد شد. تابع هدف اول به دنبال کمیته‌سازی هزینه‌ی کل شبکه‌ی لجستیک معکوس است که شامل هزینه‌ی ثابت بازگشایی مراکز پردازش، هزینه‌ی حمل و نقل بین مراکز و نگه‌داری موجودی است. تابع هدف دوم کمیته‌سازی «زمان» است که به صورت میزان دیرکرد در ارسال سفارشات مشتری لحاظ شده است. در لجستیک معکوس برآورده‌سازی موعد تحویل مشتری بسیار دشوارتر از لجستیک مستقیم است. دلیل این امر، میزان غیر قطعی بازیابی محصولات با عمر نهایی است. برای رفع این مشکل، می‌توان کمیته‌سازی زمان انتظار را با در نظر گرفتن میزان دیرکرد ارسال به‌عنوان تابع هدف دوم اعمال کرد. در این هدف، زمان ارسال از مرکز بازگشت به مرکز پردازش، از مرکز پردازش به تولیدکننده، زمان پردازش محصول قابل استفاده‌ی مجدد در مرکز پردازش و زمان ارسال مورد انتظار مشتری برای یک محصول در نظر گرفته شده است.

$$\text{Min } f_1 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{j=1}^J c_j^{op} z_j + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}(t) + \sum_{j=1}^J c_{jM} x_{jM}(t) + \sum_{j=1}^J c_j^H y_j^H(t) \right] \quad (1)$$

بازیابی شده در نظر گرفته شده و میزان تقاضای تولیدکننده و میزان محصولات با عمر نهایی جمع‌آوری شده در هر دوره از ابتدا مشخص است. همچنین الگوریتم فاخته برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده که تاکنون در این حوزه انجام نگرفته است.

### ۳. بیان مسئله

در محیط زنجیره‌ی تأمین زمانی که طراحی لجستیک معکوس مطرح می‌شود، دو فاکتور زمان و هزینه برای میزان محصولات بازیابی شده از سوی مشتری به‌عنوان فاکتورهای کلیدی محسوب می‌شوند. همچنین کنترل موجودی و برنامه‌ریزی توزیع به‌عنوان فرایندهای اساسی پشتیبانی بر روی هزینه‌ی کل زنجیره‌ی تأمین و سطح سرویس مشتری اثر می‌گذارد.<sup>[۱۸]</sup> در این مطالعه یک شبکه‌ی لجستیک معکوس با دو هدف هزینه و زمان به صورت فازی طراحی شده است. در این شبکه یک ناحیه‌ی مشتری، چند مرکز بازیابی، چندین مرکز پردازش و یک تولیدکننده وجود دارد که از طریق لجستیک معکوس، محصولات بازیابی شده را به دست مشتریان می‌رساند. اگر محصولات بازیابی‌شده در زمان مورد انتظار به دست مشتریان برسد، سرویس‌دهی رضایت بخش بوده و در غیر این صورت سرویس‌دهی از جانب مشتری رضایت بخش نخواهد بود. در طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس موازنه‌ی بین هزینه‌ی کل و دیرکرد ارسال وجود دارد. به‌عنوان نمونه، در برخی حالات شرکت ممکن است برای کاهش دیرکرد ارسال و برآورده‌سازی بیشترین رضایت مشتری، از مراکز پردازش بیشتری استفاده کند که این امر منجر به هزینه‌ی ثابت بازگشایی بیشتری می‌شود. سؤال اصلی که در این تحقیق به دنبال پاسخ‌گویی به آن می‌باشیم عبارت است از: «چگونه می‌توان یک مدل ریاضی چندهدفه طراحی کرد که هزینه‌ها و زمان‌های دیرکرد در شبکه‌ی لجستیک سه‌سطحی با فرض عدم قطعیت پارامترها را کمیته (بهینه‌سازی) کند؟»

### ۱.۳. مفروضات تحقیق

در این تحقیق، تعدادی مراکز بازگشتی برای عودت کالاهای مرجوعی و جمع‌آوری شده و همچنین به‌منظور بازیافت نیز تعدادی مراکز پردازش در نظر گرفته شده است و محصولاتی که از رده خارج شده (مثلاً به‌علت ظهور تکنولوژی‌های جدید یا مرجوعی‌ها) و در پایان عمر مفید خود هستند و همچنان ارزشمندند نیز محصول با عمر نهایی بازیابی شده محسوب می‌شوند. مفروضات مربوط به مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی دوهده‌ی زمان و هزینه در سیستم لجستیک معکوس در ادامه بیان می‌شود.

- شبکه‌ی لجستیک معکوس با سه سطح مراکز بازگشتی، پردازش و تولیدکننده در نظر گرفته شده است.
- به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت، پارامترهای ورودی مسئله به صورت اعداد فازی هستند.
- تنها یک نوع محصول مد نظر قرار گرفته است.
- میزان تقاضای تولیدکننده و میزان محصولات با عمر نهایی جمع‌آوری شده در هر دوره از ابتدا مشخص است.
- هزینه‌ی ثابتی برای بازگشایی مراکز پردازش در نظر گرفته شده است.
- بیشترین ظرفیت برای دو مرکز بازگشتی و پردازش مشخص است.

توجه به ویژگی‌های بیان شده و ماهیت مسئله در این مطالعه، به نظر می‌رسد لحاظ کردن رویکرد فازی کمک شایان و قابل توجهی برای ارائه‌ی عدم قطعیت خواهد کرد. در رویکرد فازی می‌توان از اعداد فازی مختلفی مانند عدد فازی مثلثی یا عدد فازی دوزنقه‌یی استفاده کرد. با توجه به ماهیت مسئله‌ی پیشنهادی در این مطالعه از عدد فازی دوزنقه‌یی استفاده شده است. در عدد فازی مثلثی تنها به‌ازای یک مقدار از پارامتر بیشترین مقدار اطمینان به‌دست می‌آید در حالی که در عدد فازی دوزنقه‌یی به‌ازای بازه‌یی از یک پارامتر بیشترین مقدار اطمینان حاصل می‌شود. در این صورت ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان کاهش یافته و می‌توانند با اطمینان بیشتری، عدم قطعیت را در شرایط واقعی بپذیرند. در این مطالعه نیز با توجه به ماهیت مسئله و پیچیدگی آن، تصمیم‌گیرندگان ترجیح می‌دهند به‌ازای بازه‌یی از پارامتر غیر قطعی، بیشترین اطمینان را کسب کنند. مجموعه‌ی فازی  $\tilde{A}$  از مرجع  $X$  یک مجموعه از زوج‌های مرتب است و به‌صورت رابطه‌ی ۹ نوشته می‌شود.<sup>[۲۲]</sup>

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (9)$$

که در آن  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  عبارت است از:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (10)$$

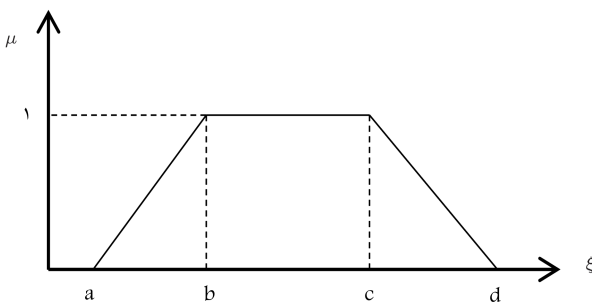
با توجه به رابطه‌ی ۱۰ می‌توان گفت که تابع عضویت هر عضو از مجموعه‌ی  $X$  را به بازه  $[0, 1]$  می‌نگارد. در این مطالعه برای فازی کردن مدل از اعداد دوزنقه‌یی استفاده شده است. اعداد فازی دوزنقه‌یی به‌صورت چهارتایی  $\xi = (a, b, c, d)$  است؛ شیوه‌ی نمایش آن به‌صورت شکل ۱ و تابع عضویت آن به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ است:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{O.W.} \end{cases} \quad (11)$$

#### ۱.۴. معیار امکان، الزام و اعتبار

طبق تعریف، مقدار امکان متغیر فازی دوزنقه‌یی به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ خواهد بود:

$$\text{pos}\{\xi \leq r\} = \sup \mu_x(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (12)$$



شکل ۱. عدد فازی دوزنقه‌یی.

$$\text{Min } f_r = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij}(t) - t_{EDM}(t) \right] + \sum_{j=1}^J (d_{jM} + p_j) x_{jM}(t) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}(t) \leq r_i(t) \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij}(t) + y_j^H(t-1) \leq b_j z_j \quad \forall j, t \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jM}(t) \leq d_M(t) \quad \forall t \quad (5)$$

$$y_j^H(t-1) + \sum_{i=1}^I x_{ij}(t) - x_{jM}(t) = y_j^H(t) \quad \forall j, t \quad (6)$$

$$x_{ij}(t), x_{jM}(t), y_j^H(t) \geq 0 \quad \forall i, j, t \quad (7)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (8)$$

محدودیت ۳ نشان دهنده‌ی آن است که مقدار محصول ارسالی از مرکز بازگشتی  $i$  به مرکز پردازش  $j$  در دوره‌ی  $t$  حداکثر به‌اندازه‌ی میزان محصول با عمر نهایی بازایی شده در مرکز بازگشتی  $i$  در دوره‌ی  $t$  است. محدودیت ۴ و ۵ به‌ترتیب ظرفیت مرکز پردازش و تولیدکننده را نشان می‌دهد. کنترل میزان موجودی در مرکز پردازش در هر دوره با محدودیت ۶ بررسی می‌شود. محدودیت ۷ نشان می‌دهد که متغیرهای تصمیم  $x_{ij}(t)$ ,  $x_{jM}(t)$  و  $y_j^H(t)$  نامنفی هستند و محدودیت ۸ تضمین می‌کند که متغیر  $z_j$  یک متغیر صفر یا ۱ است.

#### ۴. مدل‌سازی دوده‌فازی فازی

در دنیای واقعی هیچ‌کدام از داده‌های این‌گونه مسائل که دارای پیچیدگی زیادی هستند، از فاکتورهای عدم قطعیت مصون نیستند. به‌عنوان مثال، مدت زمان ارسال یک محصول وابسته به شرایط اجرای آن، به‌خصوص نیروی انسانی و تجهیزات است. بنابراین زمان ارسال محصولات صرف‌نظر از فاکتورهای تصادفی که ممکن است باعث ایجاد اختلال در ارسال آنها شوند، غیر قطعی‌اند. در این مطالعه نیز به‌منظور ارائه‌ی مدل واقعی‌تر، تمام پارامترهای مسئله غیر قطعی در نظر گرفته شده است. در مواجهه با عدم قطعیت موجود در مسائل، رویکردهای مختلفی مانند مدل‌های احتمالی، فازی و پایدار ارائه شده است. در این مطالعه از رویکرد نظریه‌ی مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی و حل مسئله استفاده شده است. نظریه‌ی مجموعه‌های فازی به دلیل مزیت‌هایی که در مطالعات مختلف بیان شده، بیشتر از سایر رویکردها مورد استفاده قرار می‌گیرد. رویکرد فازی به دلیل عدم نیاز به اطلاعات دقیق و کافی مدلی کارآمدتر نسبت به سایر روش‌ها مانند رویکرد احتمالی که نیاز به دانش کافی نسبت به توزیع پارامترهای غیر قطعی دارد، ارائه می‌دهد. بدین‌معنا که در رویکردهای احتمالی، نیاز به مشخص کردن توزیع پارامترهای مسئله و سپس تعیین مقدار آن است که در مقایسه با رویکرد فازی کار بسیار دشواری است.<sup>[۱۹]</sup> در شرایطی که پارامترهای مسئله غیر قطعی‌اند، ارائه‌ی الگوریتم زمان‌بندی فازی باعث ایجاد یک سیستم واقعی انعطاف‌پذیر می‌شود.<sup>[۲۰]</sup> همچنین پیچیدگی محاسباتی حاصل از مدل‌سازی فازی نسبت به سایر رویکردها به‌مراتب کم‌تر است.<sup>[۲۱]</sup> با

در رابطه‌ی ۲۰، پارامتر  $\alpha$  (برش)، اعداد حقیقی مثبت و به ترتیب گستره‌ی چپ و راست نامیده می‌شود. زیرمجموعه‌ی عناصری از مجموعه‌ی فازی  $A$  که درجه‌ی عضویت آنها حداقل به بزرگی  $\alpha$  باشد، ( $\alpha > 0$ ) آلفا برش  $A$  می‌نامیم. مهم‌ترین کاربرد آلفا/برش تبدیل مجموعه‌ی فازی به مجموعه‌ی قطعی است و منظور از  $\inf$ ، ترکیب در جهان محدود است که در آن معادلات با استفاده از عملیات جبری بیان می‌شود. به‌طور کلی هنگامی که رویکرد زبانی فازی بتواند خوش‌بینانه یا بدبینانه بودن را در تصمیم‌گیری لحاظ کند، اعداد فازی مثلی برای ارزیابی اولویت‌ها به جای روش معادل‌های عددی قراردادی توصیه می‌شوند. در این بخش به منظور تخصیص اعداد به  $\alpha$  از دو رویکرد خوش‌بینانه و بدبینانه (گستره‌ی چپ و راست) استفاده شده است. در رویه‌ی بدبینانه گزینه‌ی  $a$  به صورت متوالی از بالاترین طبقه با پروفایل‌های  $b_i$  می‌شود. اول‌بار که رابطه‌ی  $aSb_h$  برقرار شود، گزینه‌ی  $a$  به طبقه‌ی  $C_{h+1}$  تخصیص می‌یابد. در رویه‌ی خوش‌بینانه گزینه‌ی  $a$  به صورت متوالی از پایین‌ترین طبقه با پروفایل‌های  $b_i$  مقایسه می‌شود. اولین بار که  $b_h$  بزرگ‌تر از آلفا برقرار شود، گزینه‌ی  $a$  به  $C_h$  تخصیص می‌یابد. برای فازی‌زادایی می‌توان مقدار خروجی را به‌عنوان میانگین وزنی با تخمین‌های خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل با استفاده از روابط ذیل محاسبه کرد:

$$A_a^U = a_r\alpha + a_l(1 - \alpha)$$

$$A_a^L = a_r\alpha + a_l(1 - \alpha)$$

$$A_{1-a}^U = b_r(1 - \alpha) + b_l\alpha$$

$$A_{1-a}^L = b_r(1 - \alpha) + b_l\alpha$$

با توجه به تعاریف ارائه شده، به منظور غیر فازی سازی پارامترهایی که در تابع هدف مسئله به‌صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند از میانگین چهار عدد فازی مطابق رابطه‌ی ۲۱ استفاده شده و برای غیر فازی سازی پارامترهایی که در محدودیت‌های مسئله قرار دارند با توجه به نوع محدودیت از دو رابطه‌ی ۲۲ و ۲۳ استفاده می‌شود. [۳۱۳، ۳۱۵]

$$\xi = \frac{(a + b + c + d)}{4} \quad (21)$$

$$Cr\{\xi \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (2 - 2\alpha)c + (2\alpha - 1)d \quad (22)$$

$$Cr\{\xi \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (2\alpha - 1)a + (2 - 2\alpha)b \quad (23)$$

از آنجا که سمت راست محدودیت‌ها فازی‌اند، مطابق روش برنامه‌ریزی غیر خطی فازی هر تابع با حد بالا و سپس با حد پایین عدد فازی بزرگ در نظر گرفته و حل می‌شوند. در این مرحله باید به حل مدل چندهدفه‌ی قطعی بپردازیم. بدین‌منظور روش‌های مختلفی ارائه شده است که در اینجا از روش منطق فازی که براساس درجه‌ی عضویت هر یک از اهداف مدل است، استفاده می‌کنیم. به‌طوری که ابتدا مقادیر بیشینه و کمینه‌ی هر یک از اهداف تعیین شده را محاسبه کرده و سپس با تعیین درجه‌ی عضویت هر یک از اهداف میزان  $\alpha$  که همان درجه‌ی تحقق اهداف است، به‌دست می‌آید. [۲۱] با توجه به مفاهیم ارائه شده، عدم قطعیت موجود در مسئله‌ی لجستیک معکوس، نظریه‌ی مجموعه‌ی فازی و رویکرد اعتبار، در این بخش مدل ریاضی دوهدفه‌ی فازی ارائه می‌شود. چنان که در مفروضات مسئله ارائه شد، به‌منظور توسعه‌ی مدلی واقعی‌تر، تمام پارامترهای ورودی مسئله به‌صورت غیر قطعی و از نوع عدد فازی ذوزنقه‌یی در نظر گرفته

همچنین مقدار الزام متغیر فازی ذوزنقه‌یی با توجه به تعریف، چنین به دست می‌آید:

$$Nec\{\xi \leq r\} = 1 - \sup_{\xi \geq r} \mu_x(x) = \begin{cases} 0 & x \leq c \\ 1 - \frac{d-x}{d-c} = \frac{x-c}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 1 & x \geq d \end{cases} \quad (13)$$

فرض کنید  $P(x)$  مجموعه‌ی توانی  $x$  باشد، هر پیمانانه امکان ( $Pos$ ) بر روی  $P(x)$  توسط یک تابع توزیع امکان تعیین شده است: [۲۳]

$$Pos(x) : P(x) \rightarrow [0, 1] \quad (14)$$

معیار امکان از طریق رابطه‌ی ۱۵ نشان داده می‌شود:

$$Pos(\xi \leq r) = \sup_{\xi \leq r} \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (15)$$

همچنین معیار جمعی دیگری همانند معیار امکان برای ارتباط با دوگان آن تعریف شده که بیانگر ضرورت رخداد رویداد فازی است که آن را معیار الزام می‌نامند و به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ بیان می‌شود: [۲۴]

$$Nec(A) = 1 - Pos(A^c) = 1 - \sup_{\xi > r} \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (16)$$

رابطه‌ی ۱۶ بیان می‌کند که اگر امکان مکمل رخداد رویداد  $A$  کم باشد، الزام (ضرورت) رخداد  $A$  بالا می‌رود. به منظور تعیین یک معیار خود دوگان و دوستانش مفهوم معیار اعتبار را ارائه دادند. [۲۵] علاوه بر این شرایط لازم و کافی برای معیار اعتبار توسط لی و لیو ارائه شد. [۲۶] لیو معیار اعتبار را به‌عنوان شاخه‌یی از ریاضیات برای مطالعه‌ی رفتار پدیده‌های فازی کامل کرد. [۲۴] تعریف معیار اعتبار با توجه به معیارهای امکان و الزام به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ است: [۲۸، ۲۷]

$$Cr(A) = \frac{1}{2} \{Pos(A) + Nec(A)\} \quad (17)$$

با توجه به موارد فوق و تعریف  $Cr$ ، تابع اعتبار عدد فازی ذوزنقه‌یی به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ خواهد بود: [۲۹]

$$Cr\{\xi \leq r\} = \frac{1}{2} \{pos\{\xi \leq r\} + Nec\{\xi \leq r\}\} = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{r(b-a)} & a \leq x \leq b \\ \frac{1}{2} & b \leq x \leq c \\ \frac{1}{2}(1 + \frac{x-c}{d-c}) & c \leq x \leq d \\ 1 & x \geq d \end{cases} \quad (18)$$

با توجه به تعاریف انجام گرفته، مقدار  $\alpha$  خوش‌بینانه که با نماد  $\xi_{sup}(\alpha)$  نشان داده شده، به ازای  $\frac{1}{2}$  چنین محاسبه می‌شود: [۳۵]

$$\xi_{sup}(\alpha) = \sup \{x | Cr\{\xi \geq x\} \geq \alpha\} = (2\alpha - 1)a + (2 - 2\alpha)b \quad (19)$$

به‌طور مشابه مقدار  $\alpha$  بدبینانه که با نماد  $\xi_{inf}(\alpha)$  نشان داده شده، برای  $\frac{1}{2}$  محاسبه شده و برابر است با: [۲۹]

$$\xi_{inf}(\alpha) = \inf \{x | Cr\{\xi \leq x\} \geq \alpha\} = (2 - 2\alpha)c + (2\alpha - 1)d \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij}(t) + y_j^H(t-1) \leq z_j [(2\beta - 1) b_{j1} + (2 - 2\beta) b_{j2}] \quad \forall j, t \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jM}(t) \leq [(2\gamma - 1) d_{M1}(t) + (2 - 2\gamma) d_{M2}(t)] \quad \forall t \quad (26)$$

### ۵. الگوریتم فاخته‌ی توسعه داده شده

از آنجا که بیشتر مسائل طراحی شبکه‌ی لجستیک NP-hard هستند، [۳۳، ۳۴، ۳۵] روش‌های دقیق قابلیت حل این‌گونه مسائل در ابعاد بزرگ را نداشته است؛ از این رو روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسائل با ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. از این رو در این مطالعه به منظور بهینه‌سازی زمان و هزینه در مدل چندهدفه‌ی فازی یک الگوریتم بهینه‌سازی فاخته<sup>۱</sup> توسعه داده شده است. برخی از پرندگان خود را از در دسر هرگونه لانه‌سازی و وظایف والدین رها کرده و به نوعی زیرکی برای پرورش جوجه‌های خود متوسل شدند. این پرندگان هرگز برای خود لانه نمی‌سازند و به جای آن تخم‌های خود را در لانه‌ی سایر پرندگان قرار داده و صبر می‌کنند تا آنها در کنار تخم‌های خود به تخم‌های این پرندگان نیز رسیدگی کنند. جوجه‌های فاخته زودتر از تخم‌های پرنده‌ی میزبان از تخم بیرون می‌آیند و زودتر هم رشد می‌کنند. [۳۴] در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته رسم شده است. [۳۵] در طبیعت هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ تخم می‌گذارد. از این اعداد به عنوان حد بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف استفاده می‌شود. عادت دیگر هر فاخته این است که آنها در یک دامنه‌ی مشخص تخم‌های خود را می‌گذارند که به آن بیشترین دامنه‌ی تخم‌گذاری (ELR)<sup>۲</sup> گفته می‌شود. [۱۹] بیشترین دامنه‌ی تخم‌گذاری براساس تعداد کل تخم‌ها، تعداد تخم‌های فعلی فاخته و همچنین حد بالا و پایین متغیرهای مسئله طبق رابطه‌ی ۳۷ تعیین می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (\text{var}_{hi} - \text{var}_{low}) \quad (37)$$

در رابطه‌ی فوق  $\alpha$  پارامتری است که بیشترین مقدار ELR بر اساس آن تنظیم می‌شود. همچنین  $\text{var}_{low}$  و  $\text{var}_{hi}$  به ترتیب حد بالا و حد پایین متغیر است. بعد از هر تخم‌گذاری  $P\%$  از تمام تخم‌ها (معمولاً ۱۰٪) که مقدار تابع سود آنها کم‌تر است، نابود می‌شوند. بقیه‌ی جوجه‌ها در لانه‌های میزبان تغذیه شده و رشد می‌کنند. پس از تشکیل گروه‌های فاخته، گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) است، به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه‌های دیگر به سمت آن مهاجرت می‌کنند. هنگام مهاجرت به سمت نقطه‌ی هدف فاخته‌ها تمام مسیر را به سمت محل هدف طی نمی‌کنند. آنها فقط قسمتی از مسیر را طی کرده و در آن مسیر هم انحرافی دارند. این نحوه‌ی حرکت در شکل ۲ به توضیح مشاهده می‌شود. هر فاخته فقط  $\lambda\%$  از کل مسیر را به سمت هدف ایده‌آل فعلی طی می‌کند و یک انحراف  $\varphi$  رادین نیز دارد. این دو پارامتر به فاخته‌ها کمک می‌کند تا محیط بیشتری را جست‌وجو کنند. [۳۵] طراحی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته‌ی پیشنهادی در این تحقیق،  $\lambda$  عددی تصادفی بین ۱ و صفر تولید شده و  $\varphi$  نیز عددی بین  $\pi/6$  و  $-\pi/6$  تولید شده است. حد بالا و پایین متغیر در محاسبه‌ی ELR به ترتیب برابر صفر و ۱ و بیشترین تعداد

شده‌اند. بدین ترتیب مدل ریاضی فازی دودهدفی پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{j=1}^J \tilde{c}_j^{op} z_j + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{c}_{ij} x_{ij}(t) + \sum_{j=1}^J \tilde{c}_{jM} x_{jM}(t) + \sum_{j=1}^J \tilde{c}_j^H y_j^H(t) \right] \quad (24)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{d}_{ij} x_{ij}(t) - t_E \tilde{d}_M(t) + \sum_{j=1}^J (\tilde{d}_{jM} + \tilde{p}_j) x_{jM}(t) \right] \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}(t) \leq \tilde{r}_i(t) \quad \forall i, t \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij}(t) + y_j^H(t-1) \leq \tilde{b}_j z_j \quad \forall j, t \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jM}(t) \leq \tilde{d}_M(t) \quad \forall t \quad (28)$$

$$y_j^H(t-1) + \sum_{i=1}^I x_{ij}(t) - x_{jM}(t) = y_j^H(t) \quad \forall j, t \quad (29)$$

$$x_{ij}(t), x_{jM}(t), y_j^H(t) \geq 0 \quad \forall i, j, t \quad (30)$$

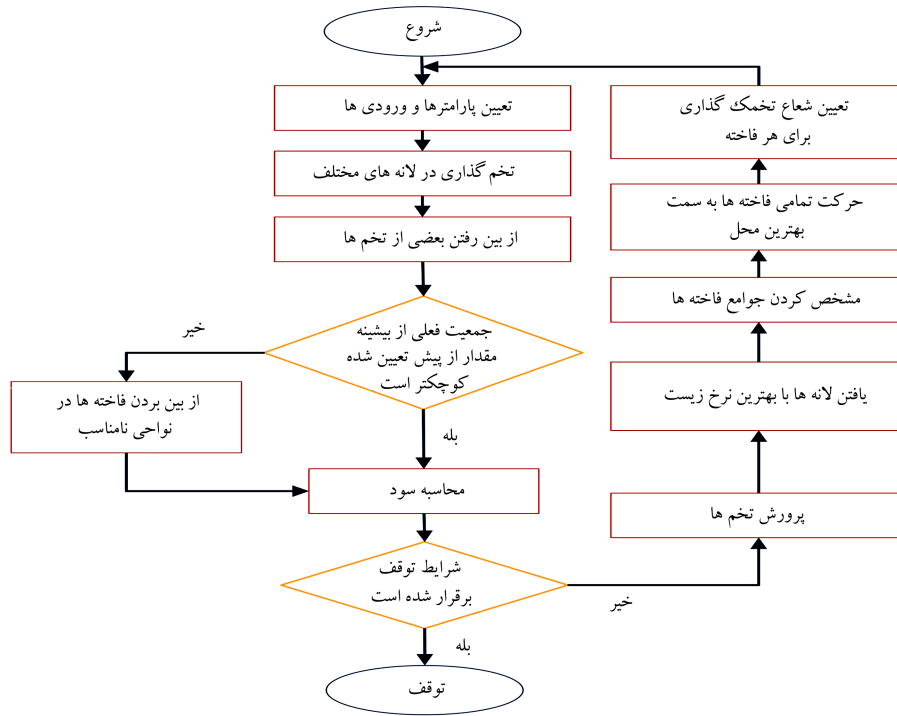
$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (31)$$

با توجه به نحوه‌ی غیر فازی‌سازی ارائه شده در بخش قبلی بسته به نوع استفاده از پارامتر، از روابط ۲۱ تا ۲۳ استفاده شده و مدل ریاضی فازی دودهدفی زمان و هزینه در سیستم لجستیک معکوس چنین بازنویسی می‌شود:

$$\text{Min } f_1 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{j=1}^J \left( \frac{c_{j1}^{op} + c_{j2}^{op} + c_{j3}^{op} + c_{j4}^{op}}{4} \right) z_j + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left( \frac{c_{ij1} + c_{ij2} + c_{ij3} + c_{ij4}}{4} \right) x_{ij}(t) + \sum_{j=1}^J \left( \frac{c_{jM1} + c_{jM2} + c_{jM3} + c_{jM4}}{4} \right) x_{jM}(t) + \sum_{j=1}^J \left( \frac{c_{j1}^H + c_{j2}^H + c_{j3}^H + c_{j4}^H}{4} \right) y_j^H(t) \right] \quad (32)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left( \frac{d_{ij1} + d_{ij2} + d_{ij3} + d_{ij4}}{4} \right) x_{ij}(t) + \sum_{j=1}^J \left( \frac{d_{jM1} + d_{jM2} + d_{jM3} + d_{jM4}}{4} \right) x_{jM}(t) + \left( \frac{p_{j1} + p_{j2} + p_{j3} + p_{j4}}{4} \right) x_{jM}(t) - t_E \left( \frac{d_{M1}(t) + d_{M2}(t) + d_{M3}(t) + d_{M4}(t)}{4} \right) \right] \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}(t) \leq [(2\alpha - 1) r_{i1}(t) + (2 - 2\alpha) r_{i2}(t)] \quad \forall i, t \quad (34)$$



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم فاخته.

مربوط به آن توسط نرم افزار MATLAB به ترتیب در مدت زمان کم تر از یک ثانیه و ۲۰ ثانیه حل شده و برابر با ۶۴۸۰/۱۲۵ و ۶۴۹۶/۹۵۸ واحد هزینه است که پس از مراجعه به جواب های حاصل از حل الگوریتم به ازای تمامی مقادیر مشاهده می شود که مقادیر فازی زدایی شده ی زمان و هزینه ی کل همه پاسخ ها، از مقادیر ذکر شده در فوق کم ترند که این مورد می تواند برای تأیید اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است تابع هدف زمان با ضریب ۱۰۰۰ واحد پولی به ازای هر دقیقه به هزینه تبدیل شده است و با توجه به نظر خیرگان لجستیک در ایران، ضریب وزنی بالاتری از میانگین نظرات آنان به هزینه ها تخصیص داده شد. همچنین از هر سه مرکز پردازش استفاده شده است. سایر خروجی های مثال نمونه در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است. میزان موجودی ارسالی به هر مرکز پردازش در هر دوره در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به جواب به دست آمده از مدل ریاضی (جدول ۵) مشاهده می شود که در دوری اول، موجودی به مرکز پردازش ۱ ارسال نمی شود، در حالی که در دوری دوم ۴۶ واحد موجودی به مرکز پردازش ۱ ارسال می شود. به همین ترتیب میزان موجودی ارسالی در هر دوره به دو مرکز دیگر نشان داده شده است. با توجه به جواب الگوریتم فاخته مشاهده می شود که موجودی ارسالی به مراکز پردازش در دوری اول به مراتب کم تر از میزان موجودی ارسالی در دوری دوم است. در جدول ۶ میزان محصول با عمر نهایی ارسالی از مرکز بازگشتی  $i$  به مرکز پردازش  $j$  در دو دوره نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از حل مدل ریاضی مشاهده می شود مرکز بازگشتی ۱ در دو دوره به دو مرکز پردازش ۱ و ۲ محصولی ارسال نکرده است، در حالی که در دوری اول و دوم به ترتیب ۳۲ و ۳۵ واحد محصول به مرکز پردازش ۳ ارسال می کند. به همین ترتیب میزان محصول ارسالی در هر دوره نشان داده شده است. از طرفی با توجه به حل مدل توسط الگوریتم فاخته مشاهده

فاخته ها برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده و همچنین تعداد جمعیت اولیه برابر ۱۰ فاخته است. در نهایت تعداد تکرارها در این الگوریتم برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است.

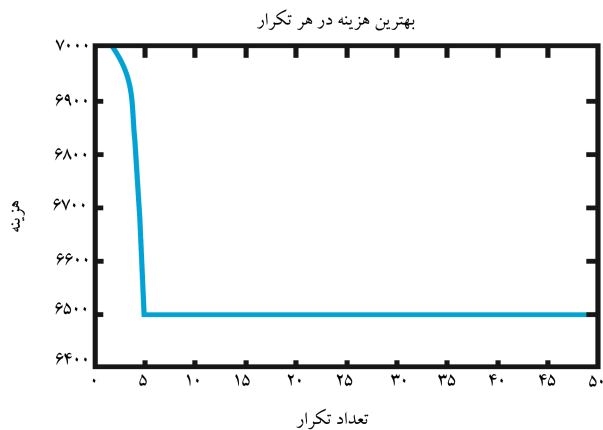
## ۶. طراحی مسائل نمونه

برای ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم فراابتکاری بهینه سازی فاخته و اثبات کارایی و صحت آنها، مدل مسئله در یک رایانه با مشخصات ۴GB RAM، Intel Core i5-۲۴۳۰M CPU و ۲/۴۰ GH و به ترتیب در نرم افزار برنامه نویسی GAMS و MATLAB Version ۲۰۱۴ پیاده سازی و حل شد. مثالی تولید شده که در آن ۴ مرکز بازگشتی، ۳ مرکز پردازش و یک تولیدکننده و دو دوره زمانی در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به مرکز پردازش شامل ظرفیت هر مرکز  $(b_j)$ ، هزینه ثابت بازگشتی هر مرکز  $(c_j^{sp})$ ، زمان پردازش محصول در هر مرکز  $(p_j)$ ، هزینه نگاهداری موجودی در هر مرکز  $(c_j^H)$ ، هزینه حمل و نقل و زمان ارسال از مرکز پردازش به تولیدکننده  $(c_{jM}$  و  $d_{jM}$ ) در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین تقاضای تولیدکننده  $M$  در هر دوره  $(d_M(t))$  در جدول ۲ نشان داده شده است.

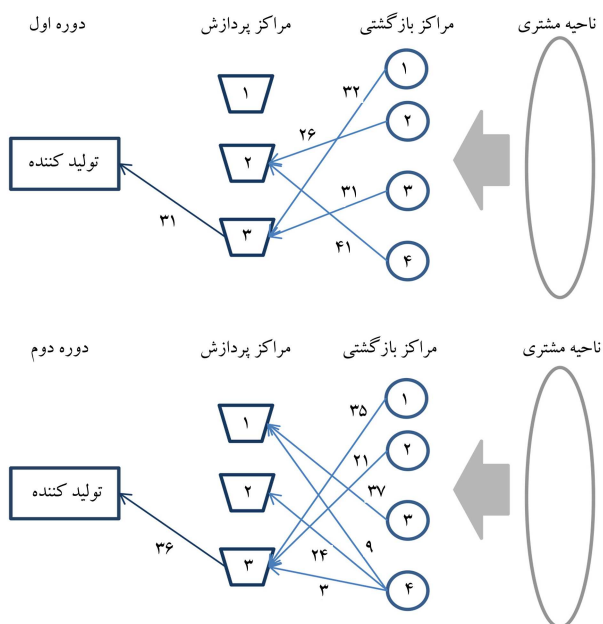
علاوه بر این، میزان هزینه حمل و نقل و زمان ارسال از مرکز بازگشتی  $i$  به مرکز پردازش  $j$   $(c_{ij}$  و  $d_{ij}$ ) در جدول ۳ نشان داده شده است. در نهایت جدول ۴ میزان محصول با عمر نهایی بازایی شده در مراکز بازگشتی در هر دوره  $(r_i(t))$  را نشان می دهد.

## ۷. نتایج محاسباتی

مدل ریاضی این مسئله توسط نرم افزار GAMS و الگوریتم فراابتکاری فاخته



شکل ۳. نحوه تغییرات تابع هدف.



شکل ۴. نحوه ارسال محصولات بین مراکز بازگشتی، پردازش و تولیدکننده.

دو دوره محصولی دریافت نکرده در حالی که از مرکز پردازش ۳ در دوره‌ی اول و دوم به ترتیب ۳۱ و ۳۶ واحد محصول دریافت کرده است. همچنین نتایج مربوط به الگوریتم فراابتکاری نشان می‌دهد که تولیدکننده از دو مرکز پردازش ۱ و ۲ در دوره‌ی دوم محصولی دریافت نکرده است در حالی که از مرکز پردازش ۳ در دوره دوم به ترتیب ۳۶ واحد محصول دریافت کرده است. در این جدول نیز مجموع مقادیر ارسالی به تولیدکننده برابر با مقادیر به دست آمده از حل دقیق است. در شکل ۳ نحوه‌ی تغییرات تابع هدف نسبت به تعداد تکرارها، براساس الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابد که این امر حاکی از عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی است. از سوی دیگر مقدار تابع هدف در چند تکرار اول به ترتیب کاهش یافته و از تکراری به بعد این مقدار ثابت می‌ماند که این امر نیز حاکی از عملکرد خوب الگوریتم فاخته پیشنهادی است زیرا در تعداد تکرار کمی به همگرایی می‌رسد.

در شکل ۴ میزان محصول ارسالی از مراکز بازگشتی به مراکز پردازش و تولیدکننده در هر دوره نشان داده شده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مراکز پردازش.

نوع پارامتر	شماره مرکز	میزان هزینه یا زمان (عدد فازی دوزنقه‌یی)			
		d	c	b	a
ظرفیت	۱	۱۰۰	۹۵	۸۰	۸۰
	۲	۱۰۵	۱۰۰	۹۵	۹۰
	۳	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۰
هزینه ثابت بازگشایی	۱	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲
	۲	۲۰	۱۶	۱۴	۱۰
	۳	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳
زمان پردازش	۱	۱۵	۱۲	۱۰	۹
	۲	۱۹	۱۸	۱۵	۱۲
	۳	۱۴	۱۳	۱۱	۱۰
هزینه نگره‌داری موجودی	۱	۲۵	۲۱	۱۸	۱۴
	۲	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲
	۳	۲۱	۱۸	۱۶	۱۵
هزینه حمل و نقل	۱	۲۲	۱۸	۱۴	۱۱
	۲	۲۴	۱۹	۱۷	۱۴
	۳	۱۷	۱۶	۱۴	۱۰
زمان ارسال	۱	۱۴	۱۳	۱۱	۱۰
	۲	۱۵	۱۲	۱۰	۹
	۳	۱۱	۱۰	۸	۷

جدول ۲. میزان تقاضای تولیدکننده در هر دوره.

دوره	میزان تقاضا			
	d	c	b	a
۱	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰
۲	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵

می‌شود مرکز بازگشتی ۱ در دو دوره به مرکز پردازش ۱ محصولی ارسال نکرده است، در حالی که در دوره‌ی اول و دوم به ترتیب ۱۶ و ۱۷٫۵ واحد محصول به دو مرکز پردازش ۲ و ۳ ارسال می‌کند. به همین ترتیب میزان محصول ارسالی در هر دوره نشان داده شده است. لازم به ذکر است مجموع میزان محصول ارسالی از مرکز بازگشتی به مراکز پردازش در هر دوره برابر با مقدار به دست آمده از حل دقیق است که نشان از محاسبه‌ی صحیح این متغیر در الگوریتم فاخته است. نهایتاً، در جدول ۲ میزان محصول ارسالی از مرکز پردازش به تولیدکننده نشان داده شده است.

در جدول ۲ مشاهده می‌شود که تولیدکننده از دو مرکز پردازش ۱ و ۲ در



جدول ۳. هزینه حمل و نقل و زمان ارسال بین مرکز بازگشتی و پردازش.

زمان ارسال				هزینه حمل و نقل				مرکز پردازش	مرکز بازگشتی
d	c	b	a	d	c	b	a		
۱۹	۱۷	۱۶	۱۵	۱۸	۱۵	۱۳	۱۰	۱	
۱۹	۱۸	۱۷	۱۴	۲۰	۱۷	۱۵	۱۲	۲	۱
۱۲	۱۱	۸	۶	۱۹	۱۴	۱۳	۱۰	۳	
۱۴	۱۳	۱۱	۱۰	۲۰	۱۷	۱۵	۱۲	۱	
۱۵	۱۲	۱۰	۹	۱۹	۱۴	۱۳	۱۰	۲	۲
۱۱	۱۰	۸	۷	۲۵	۲۱	۱۸	۱۴	۳	
۱۳	۱۱	۱۰	۸	۱۹	۱۴	۱۳	۱۰	۱	
۱۴	۱۳	۱۱	۱۰	۲۱	۱۸	۱۶	۱۵	۲	۳
۱۵	۱۲	۱۰	۹	۲۰	۱۷	۱۵	۱۲	۳	
۱۵	۱۲	۱۰	۹	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۱	
۱۱	۱۰	۸	۷	۱۵	۱۴	۱۲	۱۰	۲	۴
۱۳	۱۱	۱۰	۸	۱۸	۱۶	۱۳	۱۱	۳	

جدول ۶. مقدار محصول ارسالی بین دو مرکز بازگشتی و پردازش.

الگوریتم فاخته (MATLAB)		مدل ریاضی (GAMS)		مرکز پردازش	مرکز بازگشتی
دوره		دوره			
۲	۱	۲	۱		
-	-	-	-	۱	
۱۷٫۵	۱۶	-	-	۲	۱
۱۷٫۵	۱۶	۳۵	۳۲	۳	
-	-	-	-	۱	
۱۰٫۵	۲۶	-	۲۶	۲	۲
۱۰٫۵	-	۲۱	-	۳	
۳۷	۱۰٫۳	۳۷	-	۱	
-	۱۰٫۳	-	-	۲	۳
-	۱۰٫۳	-	۳۱	۳	
۱۲	۱۳٫۶	۹	-	۱	
۱۲	۱۳٫۶	۲۴	۴۱	۲	۴
۱۲	۱۳٫۶	۳	-	۳	

جدول ۷. میزان محصول ارسالی به تولیدکننده.

الگوریتم فاخته (MATLAB)		مدل ریاضی (GAMS)		مرکز پردازش
دوره		دوره		
۲	۱	۲	۱	
-	۱۵٫۵	-	-	۱
-	۱۵٫۵	-	-	۲
۳۶	-	۳۶	۳۱	۳

جدول ۴. میزان محصول با عمر نهایی بازیابی شده.

دوره	میزان محصول بازیابی شده				مرکز بازگشتی
	d	c	b	a	
۱	۵۰	۴۵	۴۰	۳۰	۱
	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲
	۵۰	۴۰	۳۵	۳۰	۳
	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۴
۲	۴۵	۴۰	۳۵	۳۵	۱
	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۲
	۵۵	۵۰	۴۵	۳۵	۳
	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۴

جدول ۵. میزان موجودی ارسالی به مراکز پردازش.

الگوریتم فاخته (MATLAB)		مدل ریاضی (GAMS)		مرکز پردازش
دوره		دوره		
۲	۱	۲	۱	
۵۷٫۵	۸٫۵	۴۶	-	۱
۹۰٫۵	۵۰٫۵	۹۱	۶۷	۲
۸۰	۴۰	۵۵	۳۲	۳

## ۸. نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل بهینه سازی دوهدفه ی فازی در سیستم لجستیک معکوس ارائه شد. هدف این تحقیق تعیین مقدار محصولات ارسالی بین مراکز در هر دوره زمانی است به طوری که هزینه کل لجستیک معکوس و زمان دیرکرد کمینه شود. در این تحقیق، مدل ریاضی چندهدفه یی طراحی شد که هزینه کل و میزان دیرکرد در ارسال سفارشات مشتری در شبکه ی لجستیک سه سطحی با فرض عدم قطعیت

مقادیر ارسالی به تولیدکننده برابر با مقادیر به دست آمده از حل دقیق است و از سوی دیگر مقدار تابع هدف با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابد که این امر حاکی از عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی است، این موضوع با نتایج تحقیقات پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰) و لی و همکاران (۲۰۱۵) تطبیق دارد.

در این مطالعه از روش فراابتکاری بهینه‌سازی فاخته برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده است. بدین ترتیب می‌توان از روش‌های فراابتکاری جدید دیگر مانند الگوریتم ایمنی، الگوریتم تخییر قطرات آب استفاده کرد. همچنین چون هزینه‌ی تأمین و هزینه‌ی دیرکرد ماهیت یکسانی دارند، در این مطالعه از رویکرد وزنی برای ترکیب دو هدف استفاده شده است. علاوه بر این روش می‌توان از رویکرد چندهدفه مانند الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSG A-II)<sup>۳</sup>، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه (MOPSO)<sup>۴</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان (ACO)<sup>۵</sup> استفاده کرد. در نهایت در این مطالعه عدم قطعیت موجود در مسئله با استفاده از رویکرد فازی در نظر گرفته شد. در این راستا می‌توان از رویکردهای دیگر مانند رویکردهای احتمالی و حل مبتنی بر سناریوسازی استفاده کرد.

پارامترها را کمینه (بهینه‌سازی) کند. از سوی دیگر کمینه‌سازی زمان انتظار را با در نظر گرفتن میزان دیرکرد ارسال به‌عنوان تابع هدف دوم اعمال شده است. در این هدف، زمان ارسال از مرکز بازگشت به مرکز پردازش، از مرکز پردازش به تولیدکننده، زمان پردازش محصول قابل استفاده مجدد در مرکز پردازش و زمان ارسال مورد انتظار مشتری برای یک محصول در نظر گرفته شده است. به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در شبکه‌ی لجستیک معکوس از رویکرد فازی دوزنقه‌ی استفاده شد. در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه و با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی فاخته حل ارائه شد. مدل ریاضی پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده و قادر به حل مسئله به‌صورت بهینه بوده است. همچنین برای حل مسئله در ابعاد بالا الگوریتم فاخته‌ی پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. مدل پیشنهادی قابلیت محاسبه‌ی تعداد مراکز بازگشتی، تعداد مراکز پردازش، میزان محصول جابه‌جا شده بین این دو مرکز و میزان محصول ارسالی به تولیدکننده را به‌صورت بهینه داشته است. نتایج محاسباتی حاکی از عملکرد صحیح و کارا رویکردهای پیشنهادی است. نتایج حاکی از آن است که مجموع

## پانوشته‌ها

1. cuckoo optimization algorithm
2. egg laying radius
3. non-dominated sorting genetic algorithm
4. multi-objective particle swarm optimization
5. ant-colony optimization

## منابع (References)

1. McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M. and Whitehead, A., *Green Logistics, Improving the Environmental Sustainability of Logistics*, Kogan page, London Philadelphia New Delhi. (2010).
2. Bagheri-neghad, Z., Kazemzadeh, R. and Asadi, R., "Identifying and ranking of success factors in automotive reverse logistics through interpretive structural modeling (ISM)", *Jourrnal of Management Research in Iran*, **17**(1), pp. 21-40 (2013).
3. Keskin, B.B. and Uster, H. "Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem", *European Journal of Operational Research*, **182**, pp. 663-682 (2007).
4. Chopra, S. "Designing the distribution network in a supply chain", *Transportation Research - Part E*, **39**(2), pp. 123-140 (2003).
5. Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L. and Paksoy, T. "A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks", *Computers & Industrial Engineering*, **51**, pp. 196-215 (2006).
6. Jayaraman, V., Patterson, R.A. and Rolland, E. "The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures", *European Journal of Operational Research*, **150**, pp. 128-149 (2003).
7. Min, H., Ko, H.J. and Park, B.-I., "A Lagrangian relaxation heuristic for solving the multi-echelon, multi-commodity, close-loop supply chain network design problem", *International Journal of Logistics Systems and Managemen*, **1**, pp. 382-404 (2005).
8. Lee, J.-E., Gen, M. and Rhee, K.-G. "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, **56**, pp. 951-964 (2009).
9. Pishvaei, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W. "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 1100-1112 (2010).
10. Akbari, M. and Rashidi, H. "A multi-objectives scheduling algorithm based on cuckoo optimization for task allocation problem at compile time in heterogeneous systems", *Expert Systems with Applications*, **60**, pp. 234-248 (2016).
11. Wood, D.A. "Hybrid cuckoo search optimization algorithms applied to complex wellbore trajectories aided by dynamic, chaos-enhanced, fat-tailed distribution sampling and metaheuristic profiling", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, pp. 236-252 (2016).
12. Amiri, E. and Mahmoudi, S. "Efficient protocol for data clustering by fuzzy Cuckoo optimization algorithm", *Applied Soft Computing*, **41**, pp. 15-21 (2016).
13. Du, F. and Evans, G.W. "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, **35**, pp. 2617-2634 (2008).
14. Ülkü, M.A. and Bookbinder, J.H. "Optimal quoting of delivery time by a third party logistics provider: The

- impact of shipment consolidation and temporal pricing schemes”, *European Journal of Operational Research*, **221**, pp. 110-117 (2012).
15. Demirel, E., Demirel, N. and Gökçen, H. “A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey”, *Journal of Cleaner Production, Part 3*, **112**, pp. 2101-2113 (2016).
  16. Kilic, H.S., Cebeci, U. and Ayhan, M.B. “Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey”, *Resources, Conservation and Recycling*, **95**, pp. 120-132 (2015).
  17. Agrawal, S., Singh, R.K. and Murtaza, Q. “Outsourcing decisions in reverse logistics: Sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach”, *Resources, Conservation and Recycling*, **108**, pp. 41-53 (2016).
  18. Farahani, R.Z. and Elahipanah, M. “A genetic algorithm to optimize the total cost and service level for just-in-time distribution in a supply chain”, *International Journal of Production Economics*, **111**, pp. 229-243 (2008).
  19. Balin, S. “Parallel machine scheduling with fuzzy processing times using a robust genetic algorithm and simulation”, *Information Sciences*, **181**, pp. 3551-3569 (2011).
  20. Behnamian, J. and Ghomi, S.M.T.F. “Multi-objective fuzzy multiprocessor flowshop scheduling”, *Applied Soft Computing*, **21**, pp. 139-148 (2014).
  21. Slowinski, R. and Hapke, M., *Scheduling Under Fuzziness*, Physica-Verlag Editions, New York (2000).
  22. Zadeh, L.A. “Fuzzy sets”, *Infection Control*, **8**, pp. 338-353 (1965).
  23. Zadeh, L.A. “Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility”, *Fuzzy Sets and Systems*, **1**, pp. 3-28 (1978).
  24. Liu, B., *Uncertainty Theory*, Springer-Verlag, Berlin (2007).
  25. Liu, B. and Liu, Y. “Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value model”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **141**, pp. 259-271 (2002).
  26. Li, X. and Liu, B. “A sufficient and necessary condition for credibility measures”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness & Knowledge-Based Systems*, **14**, pp. 527-535 (2006).
  27. Mehlatat, M.K. and Gupta, P. “Credibility-based fuzzy mathematical programming model for portfolio selection under uncertainty”, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, **13**, pp. 101-135 (2014).
  28. Zhang, Y.M., Huang, G., Lu, H.W. and He, L. “Planning of water resources management and pollution control for Heshui River watershed, China: A full credibility-constrained programming approach”, *Science of The Total Environment*, **524-525**, pp. 280-289 (2015).
  29. Lee, J.-E., Chung, K.-Y., Kang, D. and Lee, M.G. “A multi-objective hybrid genetic algorithm to minimize the total cost and delivery tardiness in a reverse logistics”, *Multimed Tools Appl*, **74**, pp. 9067-9085 (2015).
  30. Pishvaei, M.S., Torabi, S.A. and Razmi, J. “Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty”, *Computers & Industrial Engineering*, **62**, pp. 624-632 (2012).
  31. Lu, H., Du, P., Chen, Y. and He, L. “A credibility-based chance-constrained optimization model for integrated agricultural and water resources management: A case study in South Central China”, *Journal of Hydrology*, **537**, pp. 408-418 (2016).
  32. Pishvaei, M.S. and Torabi, S.A. “A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty”, *Fuzzy Set and Systems*, **161**, pp. 2668-2683 (2010).
  33. Lee, D.-H. and Dong, M. “Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **45**, pp. 61-71 (2009).
  34. Payne, B.R., *The Cuckoos*, Oxford University Press (2005).
  35. Rajabioun, R. “Cuckoo optimization algorithm”, *Applied Soft Computing*, **11**, pp. 5508-5518 (2011).