

حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه با روش ترکیبی جدید فاپسیس: مساله انتخاب تامین کننده

الهام شادکام*

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خيام، مشهد، ایران

رسید مقاله: ۱۲ دی ۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۲۷ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

در طی سال‌های اخیر مساله انتخاب تامین کننده مناسب در زنجیره تامین به یک موضوع استراتژیک و مهم تبدیل شده است. به دلیل وجود اهداف متعدد و متناقض، مساله انتخاب تامین کننده را می‌توان به صورت یک مساله چندهدفه در نظر گرفت و گاهی یافتن جواب بهینه بسیار دشوار است. انتخاب تامین کننده مناسب از یک سو، به طور قابل توجهی هزینه‌های خرید مواد اولیه و زمان انتظار تا رسیدن محموله سفارش شده را کاهش می‌دهد؛ از سوی دیگر، موجب بالا رفتن سطح رقابت پذیری سازمان‌ها می‌شود. هدف این پژوهش، ارائه روشی جهت حل مسایل چندهدفه است که در ارزیابی و انتخاب تامین کننده مناسب مورد استفاده قرار گرفته است. روش ترکیبی پیشنهادی فاپسیس ترکیبی از روش تاپسیس و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته است. روش پیشنهادی ابتدا برای مسایل آزمایشی مورد آزمون قرار می‌گیرد و در ادامه برای مساله کاربردی چندهدفه انتخاب تامین کننده پیاده‌سازی می‌شود. سرعت و دقت نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی فاپسیس نشان‌دهنده کارایی الگوریتم در حل مسایل چندهدفه می‌باشد و این روش به خوبی می‌تواند جواب‌های پارتو مساله را در مقایسه با روش‌های مشابه شناسایی کند. همچنین به دلیل استفاده از روش ترکیبی می‌توان به صورت همزمان از مزایای الگوریتم فراابتکاری فاخته (حل مسایل با مقیاس بزرگ) و روش تاپسیس (ارزیابی و انتخاب گزینه کارآمدتر) بهره جست.

کلمات کلیدی: انتخاب تامین کننده، زنجیره تامین، روش تاپسیس، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته.

۱ مقدمه

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسایل بهینه‌سازی پیچیده با ابعاد بزرگ کارایی ندارند و زمان حل آن‌ها در این مسایل به صورت قابل توجهی با توجه به تعداد

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس پست الکترونیکی: e.shadkam@khayyam.ac.ir

محدودیت‌ها و متغیرهای مساله افزایش می‌یابد [۱]. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل منطقی برای مسایل بهینه‌سازی پیچیده هستند. دسته‌ای از الگوریتم‌های تقریبی، الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌باشند [۱]. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، قرار گرفتن آن‌ها در بهینه‌های محلی و ناتوانی آن‌ها در حل مسایل گوناگون است [۱]. الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برون‌رفت از بهینه محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسایل هستند. یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید که توانایی بسیار بالایی در پیدا کردن نقاط بهینه کلی دارد، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^۱ است. این الگوریتم یکی از جدیدترین و قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌باشد که تاکنون معرفی شده است [۲]. الگوریتم فاخته با الهام از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته توسعه یافته است و ماهیت اصلی این الگوریتم، حل مسایل تک‌هدفه می‌باشد. گاهی می‌توان با تلفیق الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های دیگر، روش‌های ترکیبی ایجاد کرد و از یک سوا مزایای هر دو به صورت همزمان استفاده کرد و از سوی دیگر، محدودیت‌های هر یک از آنها در حالت ترکیبی مرتفع می‌گردد. در این پژوهش روش ترکیبی جدید فاپسیس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و روش تاپسیس^۲ ایجاد شده است که می‌تواند برای حل مسایل چندهدفه نیز استفاده گردد و محدودیت تک‌هدفه بودن الگوریتم فاخته را برطرف سازد. اکثر مسایل بهینه‌سازی در دنیای واقعی چندهدفه می‌باشند که به صورت همزمان به بهینه‌سازی چندین هدف که اکثراً با هم در تناقض هستند، پرداخته می‌شود. (به همین دلیل معمولاً جواب بهینه در مسایل چندهدفه به دلیل وجود اهداف متناقض دست نیافتنی است) و تنها می‌توان به مجموعه‌ای از جواب‌های چیره‌ننده تحت عنوان مرزهای بهینه پارتو دست یافت. حال اگر ابعاد مساله چندهدفه بزرگ باشد، به سختی می‌توان روش حل مناسبی را پیدا کرد که بتواند با دقت مناسب و در زمان معقول مرزهای بهینه پارتو را تعیین نماید. روش فاپسیس می‌تواند مسایل بهینه‌سازی چندهدفه با مقیاس بزرگ را بهینه نماید و محدودیت عدم توانایی روش تاپسیس در حل مسایل با ابعاد بزرگ را برطرف سازد. با توجه به این که یکی از مسایل مهم و کاربردی در زنجیره تامین، مساله انتخاب تامین کننده می‌باشد [۳] و با افزایش اهمیت فعالیت خرید و تدارکات، تصمیمات خرید مهم‌تر شده است و از آنجا که امروزه سازمان‌ها وابستگی بیشتری به تامین کنندگان پیدا کرده‌اند، پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم تصمیم‌گیری ضعیف، بیشتر خودنمایی می‌کند. در حقیقت، انتخاب مجموعه مناسبی از تامین کنندگان، امری بسیار مهم و حیاتی برای موفقیت یک شرکت است. اخیراً با ظهور مفهوم مدیریت زنجیره تامین، بیشتر محققین، دانشمندان و مدیران به این مساله پی برده‌اند که انتخاب تامین کننده مناسب و مدیریت آن، ابزاری است که از آن می‌توان برای افزایش رقابت‌پذیری زنجیره تامین استفاده کرد. لذا انتخاب تامین کننده، تصمیمی مهم و استراتژیک در زنجیره تامین می‌باشد. مساله انتخاب تامین کننده اکثراً به دلیل وجود اهداف متنوع و عمدتاً متناقض تصمیم‌گیری به صورت یک مساله چندهدفه بررسی می‌گردد و اگر ابعاد مساله بزرگ باشد، کارایی روش‌های مرسوم حل

¹ Cuckoo Optimization Algorithm

² TOPSIS

مسائل چندهدفه کاهش می‌یابد [۳]. بنابه دلایل ذکر شده در این پژوهش به بررسی این مساله با توجه به روش پیشنهادی فاپسیس پرداخته خواهد شد.

در ادامه، پس از ارائه پیشینه پژوهش مربوط به روش‌های ترکیبی و مساله انتخاب‌تأمین‌کنندگان چندهدفه، به بیان مختصری از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، روش تاپسیس و روش پیشنهادی مقاله در بخش سوم پرداخته شده است. سپس در بخش چهارم به بررسی عملکرد روش پیشنهادی فاپسیس برای مسائل آزمایشی و مقایسه با الگوریتم‌های مشابه پرداخته شده است. به منظور بررسی روش پیشنهادی فاپسیس در مسائل کاربردی، مدل ریاضی مساله چندهدفه انتخاب‌تأمین‌کننده در بخش پنجم معرفی می‌گردد و در بخش ششم، مساله بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی حل و نتایج با روش‌های مشابه مقایسه می‌گردد. در نهایت در بخش پایانی، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌گردد و نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی در یافتن مرز تقریبی پارتو مساله می‌باشد.

۲ پیشینه پژوهش

در این بخش به بررسی پژوهش‌های مرتبط با مقاله حاضر پرداخته می‌شود. با توجه به این که نوآوری مقاله در روش حل مساله انتخاب‌تأمین‌کننده می‌باشد، در ادامه به بررسی پیشینه پژوهش مربوط به حل مساله انتخاب‌تأمین‌کنندگان و سپس به بررسی مدل‌ها و روش‌های ترکیبی پرداخته می‌شود. یکی از بخش‌هایی که در زنجیره-تأمین اهمیت ویژه‌ای دارد، انتخاب‌تأمین‌کنندگان است. از آنجایی که در انتخاب‌تأمین‌کنندگان معیارهای زیادی از جمله هزینه، زمان تحویل، اطمینان در پاسخگویی به سفارش و غیره تأثیرگذار هستند؛ لذا این مساله در قالب یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه تعریف می‌گردد. در اکثر موارد، یافتن تأمین‌کننده‌ای که در تمامی این اهداف نسبت به سایر تأمین‌کنندگان برتری داشته باشد، ناممکن است. از این رو، یافتن تأمین‌کننده با در نظر گرفتن تمام اهداف، مساله‌ای دشوار از نظر تصمیم‌گیری و انتخاب به شمار می‌آید. در حوزه انتخاب‌تأمین‌کننده چندهدفه پژوهش‌های فراوانی با رویکردهای مختلف انجام شده است که تعدادی از این مقالات را می‌توان در جدول ۱ مشاهده نمود و در ادامه به بررسی تعدادی پرداخته می‌شود.

جدول ۱. دسته‌بندی مقالات مرتبط با مساله انتخاب‌تأمین‌کننده چندهدفه

محققین	سال	پارامترها	کاربرد پژوهش	ابزار
کوتا [۴]	۲۰۱۲	قطعی	انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب و تعیین مقدار سفارش یک محصول	الگوریتم کرم شب تاب
صادقیه و همکاران [۵]	۲۰۱۲	قطعی	حل مساله‌ی انتخاب‌تأمین‌کننده	الگوریتم ژنتیک یکپارچه مبتنی بر برنامه نویسی هدف خاکستری
پرهیزکاری و همکاران [۶]	۲۰۱۳	احتمالی	انتخاب تأمین‌کنندگان	NSGA-II و LP-NORM
قربانی و همکاران [۷]	۲۰۱۳	احتمالی	ارایه یک رویکرد سه مرحله‌ای برای انتخاب تأمین‌کنندگان	مدل کانو و تاپسیس فازی
خلیلی دامغانی و	۲۰۱۳	احتمالی	مساله‌ی انتخاب‌تأمین‌کننده	استنتاج فازی شبکه عصبی مصنوعی و

همکاران [۸]				فازی
ایهان [۹]	۲۰۱۳	احتمالی	انتخاب تامین کننده و ارایه یک مرور ادبیات جامع از مسایل تصمیم گیری چندمعیاره	فرآیند سلسله مراتب تحلیلی فازی
قش و همکاران [۱۰]	۲۰۱۴	قطعی	انتخاب تامین کننده استوار	شبیه سازی تبرید و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و روش تاگوچی
هلدر و همکاران [۱۱]	۲۰۱۴	احتمالی	ارزیابی تامین کنندگان برون سپاری	تاپسیس فازی
رستم زاده [۱۲]	۲۰۱۴	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان	فرآیند سلسله مراتب تحلیلی فازی و تاپسیس فازی
آزاده و همکاران [۱۳]	۲۰۱۴	قطعی	انتخاب تامین کنندگان و کاهش زمان تحویل و هزینه تولید نهایی	شبیه سازی کامپیوتری و الگوریتم ژنتیک
جونیر و همکاران [۱۴]	۲۰۱۴	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان مناسب	فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و تاپسیس فازی
کاراسک و دورسان [۱۵]	۲۰۱۵	احتمالی	یک روش تصمیم گیری گروهی چندمعیاره فازی	گسترش عملکرد کیفیت و منطق فازی
تورک و همکاران [۱۶]	۲۰۱۵	احتمالی	رویکرد دومرحله‌ای برای انتخاب تامین کننده و برنامه ریزی موجودی	ترکیب IT2FS و الگوریتم شبیه سازی تبرید
فلاح پور و همکاران [۱۷]	۲۰۱۶	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان مناسب سبز	ترکیب تحلیل پوششی داده ها و الگوریتم ژنتیک
شادکام و بیجاری [۱۸]	۲۰۱۷	احتمالی	مساله چندهدفه انتخاب تامین کنندگان و تعیین مقادیر سفارش	بهینه سازی شبیه سازی و تحلیل پوششی داده ها و فاخته
آلوچه و همکاران [۱۹]	۲۰۱۷	احتمالی	ارایه یک رویکرد چندمعیاره فازی برای حل مساله انتخاب تامین کننده	فرآیند تحلیل سلسله مراتب فازی (بااستفاده از مدل ریاضی و لینگو)
خواجه و همکاران [۲۰]	۲۰۲۰	احتمالی	ارزیابی و انتخاب تامین کننده پایدار در محیط فازی دیداری	رویکرد ترکیبی چندمعیاره بهترین بدترین و ویکور
مودیو و همکاران [۲۱]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده دارویی	تاپسیس فازی
سان و همکاران [۲۲]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده و تخصیص سفارش در یک زنجیره تامین چندلایه	مدل غیرخطی عددصحیح و الگوریتم ژنتیک
توفانو و همکاران [۲۳]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده چندهدفه بر اساس ترجیحات کاربر	مدل غیرخطی عددصحیح و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

دیکسون^۱ برای اولین بار، اهمیت بیست و سه معیار را بر اساس مطالعه بر روی مدیران خرید برای مساله انتخاب تامین کننده، شناسایی کرد و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۲۴]. وی نتیجه گرفت که سه عامل کیفیت استاندارد، تحویل به موقع کالا و سابقه عملکرد عوامل ضروری و بسیار مهمی هستند که در امر انتخاب تامین کننده مطرح می گردد. روآ و کیسر^۲ شصت معیار را برای مساله انتخاب تامین کننده در نظر گرفتند [۲۵]. باتوجه به

¹ Dickson

² Roa and Kiser

پژوهش‌های مذکور قطعاً مساله انتخاب تامین کننده یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. ابراهیمی و همکاران یک مدل جدید تحلیل پوششی داده‌ها برای مساله چندهدفه شناسایی کارا ترین تامین کننده با پارامترهای احتمالی ارائه کردند [۲۶]. در مدل آنها با در نظر گرفتن داده‌های غیردقیق برای هجده تامین کننده، تامین کنندگان کارا تعیین و رتبه‌بندی گردیدند. همچنین ابراهیمی و همکاران، یک مدل جامع تحلیل پوششی داده‌ها برای مساله چندهدفه تعیین بهترین تامین کننده با داده‌های غیردقیق و محدودیت‌های وزنی ارائه کردند. در مدل آنها محدودیت‌های وزنی برای در نظر گرفتن نظر تصمیم‌گیران در مورد وزن معیارها در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده قادر است فقط با حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، بهترین تامین کننده را مشخص نماید. تقوی فرد و همکاران، مساله تعیین میزان بهینه سفارش همراه با انتخاب تامین کننده مناسب را در نظر گرفتند [۲۷] و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل را حل نمودند. از نتایج قابل توجه این پژوهش کاهش چشم‌گیر هزینه‌های موجود بود. رزمی و همکاران، مدل ترکیبی برای مساله تصمیم‌گیری انتخاب تامین کننده ارائه کردند [۲۸] و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل را حل نمودند. در پژوهش آنها علاوه بر در نظر گرفتن عامل‌های کمی و کیفی؛ هزینه‌های نگهداری، سفارش‌دهی و خرید نیز در قالب مدل موجودی بررسی گردیده و سهم هر تامین کننده از تقاضای کل تعیین گردید. نوری و همکاران به بررسی مدل ترکیبی تاپسیس فازی و برنامه‌ریزی آرمانی برای انتخاب تامین کننده پرداختند [۲۹]. با توجه به نتایج حاصله از حل دو مرحله‌ای مدل، مدل ارائه شده قادر به در نظر گرفتن همزمان مساله انتخاب تامین کننده و تخصیص سفارشات با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی می‌باشد. وبر و کارنت^۱ به موضوع برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه در مساله انتخاب تامین کننده با سه هدف حداقل کردن هزینه، حداقل کردن زمان حمل‌ونقل حداقل کردن تعداد قطعات برگشتی پرداختند [۳۰]. همچنین محدودیت‌هایی مانند ثابت بودن تعداد تامین کنندگانی که باید انتخاب شوند، محدود بودن ظرفیت تولید هر تامین کننده و محدود بودن میزان بودجه تخصیص یافته برای خرید از هر تامین کننده را به مساله اضافه کردند. در پژوهشی برای ارزیابی و انتخاب تامین کنندگان ابتدا یک مدل تک هدفه مطرح گردید که هدف اصلی آن حداقل کردن هزینه‌ها بود [۳۱]. در مدل آنها، کیفیت محصول به عنوان یکی از محدودیت‌های مدل در نظر گرفته شده است. در گام دوم، کیفیت نیز به اهداف مدل اضافه گردید و یک مساله چندهدفه تعریف گردید. در هر دو از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح استفاده شده است. دیگر یو و رودهوفت^۲ یک برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای ارزیابی و انتخاب تامین کنندگان برای دوره‌های مختلف زمانی ارائه دادند [۳۲]. آن‌ها تاکید کردند که مشخصات تامین کنندگان از جمله کیفیت، زمان تحویل و غیره در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت است؛ لذا باید این مساله را به صورت پویا در نظر گرفت. رضایی و همکاران، مدل چندهدفه مختلط غیرخطی را توسعه دادند [۳۳]. این مدل، یک مدل چند دوره‌ای، چند محصوله و چند تامین کننده است و اهداف کمیته‌سازی هزینه‌ها، بیشینه‌سازی سطح کیفیت و سطح خدمات را برآورده می‌کند. در نهایت مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده و نتایج آن در دو حالت عدم قبول کسری و قبول کسری مقایسه گردیدند. رزمی و همکاران،

¹ Weber and Current

² Degraeve and Roodhooft

مدلی را طراحی کردند که شامل انواع مختلفی از تخفیفات می‌باشد [۳۴]. همچنین محدودیت‌هایی از قبیل ظرفیت تامین کنندگان و تقاضا در مدل نهایی گنجانده شده است. در پژوهش آنها مدل نهایی طراحی شده با استفاده از روش فراابتکاری جستجوی پراکنده حل شده و نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف تخفیف با یکدیگر مقایسه گردید. شارما^۱ یک مدل مختلط غیرخطی، عدد صحیح و آرمانی را برای انتخاب تامین کننده پیشنهاد کرده است [۳۵]. قیمت، کیفیت، تحویل و خدمات در این مدل لحاظ شده‌اند و همه معیارها در قالب هدف در نظر گرفته شده‌اند. بنتون^۲ یک برنامه غیرخطی و یک روش ابتکاری را برای انتخاب تامین کننده تحت شرایط چندین کالا، چند تامین کننده، محدودیت‌های منابع و تخفیفات بر اساس تعداد خرید ایجاد کرده است [۳۶]. تابع هدف مدل، کمینه کردن هزینه‌های خرید، انبارداری، جابه‌جایی و خرید است. محدودیت‌های موجودی و سرمایه‌گذاری در مدل آورده شده‌اند. در پژوهشی مساله انتخاب تامین کننده تحت شرایط تقاضای احتمالی با محدودیت برروری حداقل و حداکثر اندازه سفارش در نظر گرفته شد و با استفاده از الگوریتم ابتکاری مدل حل شد [۳۷]. سمیع‌زاده و همکاران به ارایه یک مدل دو هدفه انتخاب تامین کننده در زنجیره تامین پرداختند [۳۸]، که هدف از تحقیق آنها توسعه مدل ریاضی جدید در مساله انتخاب تامین کننده با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری تامین کنندگان است. با توجه به NP-سخت بودن مساله، الگوریتمی کارا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل آن به کار گرفته شده است. در مدل آن‌ها از برنامه‌ریزی خطی و مختلط برای انتخاب تامین کننده استفاده گردیده است [۳۹]. در این مدل، قیمت، تحویل، کیفیت و تخفیف لحاظ شده‌اند. تابع هدف این مدل کمینه کردن قیمت ادغامی با در نظر گرفتن هر دو تخفیف تجمعی و نمودی در نظر گرفته شده است و کیفیت و تحویل به صورت محدودیت در مدل لحاظ شده‌اند. مرور ادبیات موضوع نشان می‌دهد گستره وسیعی از رویکردها بر روی مساله انتخاب تامین کننده بررسی شده‌اند و تاکنون از رویکرد ترکیبی الگوریتم فاخته و روش تاپسیس در تحقیقات استفاده نشده است. همان‌طور که ذکر شد، الگوریتم فاخته نسبتاً جدید می‌باشد و هنوز در کنار همه ابزارها و برای همه مسایل مورد استفاده قرار نگرفته است و با توجه به مزایای این الگوریتم و مزایای روش تاپسیس در این مقاله از رویکردی ترکیبی استفاده می‌گردد. سپس این رویکرد ترکیبی برای مساله مذکور با در نظر گرفتن چند تابع هدف، چند کالا، چند دوره، چند خریدار پیاده‌سازی می‌گردد و محدودیت تخفیف و ظرفیت انبار نیز لحاظ می‌گردد. همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، امروزه ارایه روش‌های ترکیبی در جهت حل مسایل بهینه‌سازی بسیار مرسوم و پرکاربرد می‌باشند. در زمینه روش‌های ترکیبی، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بسیار رایج می‌باشند که می‌توان برخی از این روش‌های ترکیبی را در جدول ۲ مشاهده نمود.

جدول ۲. دسته‌بندی مقالات مرتبط با روش‌های ترکیبی الگوریتم فاخته

محققین	سال	پارامترها	کاربرد پژوهش	ابزار
دژام و	۲۰۱۲	قطعی	تخصیص تسهیلات به مکان	الگوریتم فاخته و جستجوی ممنوعه برای حل

¹ Sharma

² Benton

مسائل تخصیص درجه ۲				همکاران [۴۰]
الگوریتم فاخته و فازی انطباقی	تخمین استحکام فشرده بتن ۲۸ روزه	احتمالی	۲۰۱۳	ابوالپور و محبی [۴۱]
الگوریتم فاخته و سایر الگوریتم‌های مشابه	مسائل بهینه‌سازی چندهدفه	قطعی	۲۰۱۴	شادکام و بیجاری [۴۲]
الگوریتم فاخته و تحلیل پوششی داده‌ها	مسائل بهینه‌سازی چندهدفه	قطعی	۲۰۱۵	گرجستانی و همکاران [۴۳]
الگوریتم فاخته و ژنتیک	مسائل برنامه‌ریزی تولید	قطعی	۲۰۱۵	اکبرزاده و شادکام [۴۴]
الگوریتم فاخته و روش جمع ساده وزنی	مسائل آزمایشی و عددی چندهدفه	قطعی	۲۰۱۶	برهانی‌فر و شادکام [۴۵]
بهینه‌سازی شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده‌ها و فاخته	مساله چندهدفه انتخاب تامین‌کنندگان و تعیین مقادیر سفارش	احتمالی	۲۰۱۷	شادکام و بیجاری [۴۶]
الگوریتم فاخته و روش محدودیت اسیلون	مساله چندهدفه انتخاب تامین‌کنندگان	قطعی	۲۰۲۱	شادکام و همکاران [۴۷]
الگوریتم فاخته و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی	انتخاب ماشین‌آلات دیجیتال	قطعی	۲۰۲۱	طیرانی و شادکام [۴۸]
الگوریتم فاخته و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	مساله مکان‌یابی تدافعی چندهدفه	قطعی	۲۰۲۲	خاندوزی و همکاران [۴۹]
تجزیه و تحلیل پوششی داده و الگوریتم فاخته	پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای یک ماشین تخلیه الکتریکی	قطعی	۲۰۲۲	قلی‌زاده و همکاران [۵۰]

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است که الگوریتمی قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد [۵۱]. با توجه به مطالعات انجام شده از ابزارهای حوزه تصمیم‌گیری در کنار الگوریتم فاخته در مقالات زیادی به منظور ایجاد روش‌های ترکیبی استفاده شده است. برهانی‌فر و شادکام از روش ترکیب روش جمع ساده وزنی با الگوریتم فاخته، روشی ترکیبی تحت عنوان روش کوآ و^۱ ارایه کرده‌اند و عملکرد آن را در حل مسائل چندهدفه نشان داده‌اند [۵۲]. در پژوهشی دیگر روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در کنار الگوریتم فاخته جهت ایجاد روشی جهت حل مسائل چندهدفه به کار برده شده است [۵۳]. در این روش ترکیبی از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به منظور ایجاد ماتریس مقایسات زوجی به منظور تبدیل مساله چندهدفه به تک‌هدفه استفاده شده است. همچنین گرجستانی و همکاران از روش تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم فاخته، یک روش ترکیبی برای مسائل چندهدفه ارایه کرده‌اند. در رویکرد آنها علاوه بر بهینه‌سازی مساله به بررسی کارایی آن به صورت همزمان پرداخته می‌شود [۵۴]. پرویزی و همکاران از روش محدودیت اسیلون به منظور چندهدفه‌سازی الگوریتم فاخته استفاده نموده‌اند. آنها رویکرد ترکیبی را برای تعدادی مساله عددی آزمایشی پیاده‌سازی نموده‌اند و روش ترکیبی عملکرد مطلوبی را در مقایسه با سایر روش‌های مشابه نشان داده است [۵۵]. با توجه به بررسی‌های

^۱ COAW

انجام شده تاکنون از روش تاپسیس در کنار الگوریتم فاخته به منظور ایجاد رویکردی ترکیبی استفاده نشده است و در این پژوهش به منظور حل مساله انتخاب تامین‌کننده بررسی می‌گردد.

۳ بیان روش پیشنهادی فاپسیس

در این بخش به منظور بیان دقیق‌تر روش پیشنهادی فاپسیس، به شرح مختصری از الگوریتم‌های فاخته و تاپسیس پرداخته می‌شود.

۳-۱ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی فاخته بر اساس روش زندگی به پرنده‌ای به نام فاخته می‌باشد که در سال ۲۰۰۹ توسط شین اوپانگ و دب ساوش، توسعه یافته است [۵۵]. این الگوریتم در سال ۲۰۱۱ توسط رامین رجیبون به طور کامل با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت [۵۶]. عملکرد مطلوب این الگوریتم در مسایل مختلف بررسی شده است [۵۷]. اکثر پرندگان روش یکسانی برای مادرشدن دارند اما پرندگانی مانند فاخته وجود دارند که هرگز برای خود لانه نمی‌سازند و تخم‌های خود را در لانه سایر پرندگان قرار داده و تخم‌های پرنده میزبان را از بین می‌برند و تخم‌های خود را لابه لای تخم‌های دیگر در لانه میزبان با تقلید از رنگ و الگوی تخم‌های موجود در هر لانه قرار می‌دهند تا تخم‌ها شبیه به تخم‌های پرنده میزبان باشد. بعد از این که جوجه‌های فاخته به فاخته بالغ تبدیل شدند، گروه‌هایی تشکیل می‌دهند که هر گروه، منطقه‌ای برای زیست خود دارد و بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. این فرآیند تا رسیدن به بهترین محل برای تخم‌گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌یابد. جهت کسب اطلاعات بیشتر در مورد این الگوریتم می‌توان به [۵۶] مراجعه نمود.

۳-۲ روش تاپسیس

این روش برای اولین بار در سال ۱۹۸۱، توسط هوانگ و همکاران^۱ ارائه گردید و با اصلاحاتی که بر روی آن انجام شد، به عنوان یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در بین برنامه‌ریزان می‌باشد [۵۸]. پایه‌های نظری این روش بر این رابطه استوار است که ابتدا ایده‌آل‌های مثبت (کارآمدترین گزینه) و ایده‌آل‌های منفی (ناکارآمدترین گزینه) را برای هر یک از معیارها محاسبه می‌کند و سپس فاصله هر گزینه از ایده‌آل‌های مثبت و منفی محاسبه می‌شود. گزینه منتخب، گزینه‌ای است که کمترین فاصله را از ایده‌آل‌های مثبت و بیشترین فاصله را از ایده‌آل‌های منفی داشته باشد. این روش به گونه‌ای طراحی شده که می‌توان نوع معیارها را از لحاظ تأثیر مثبت یا منفی داشتن بر هدف تصمیم‌گیری در مدل دخالت داد و همچنین وزن‌ها و درجه اهمیت هر معیار را در مدل وارد نمود.

¹ Hwang et al.

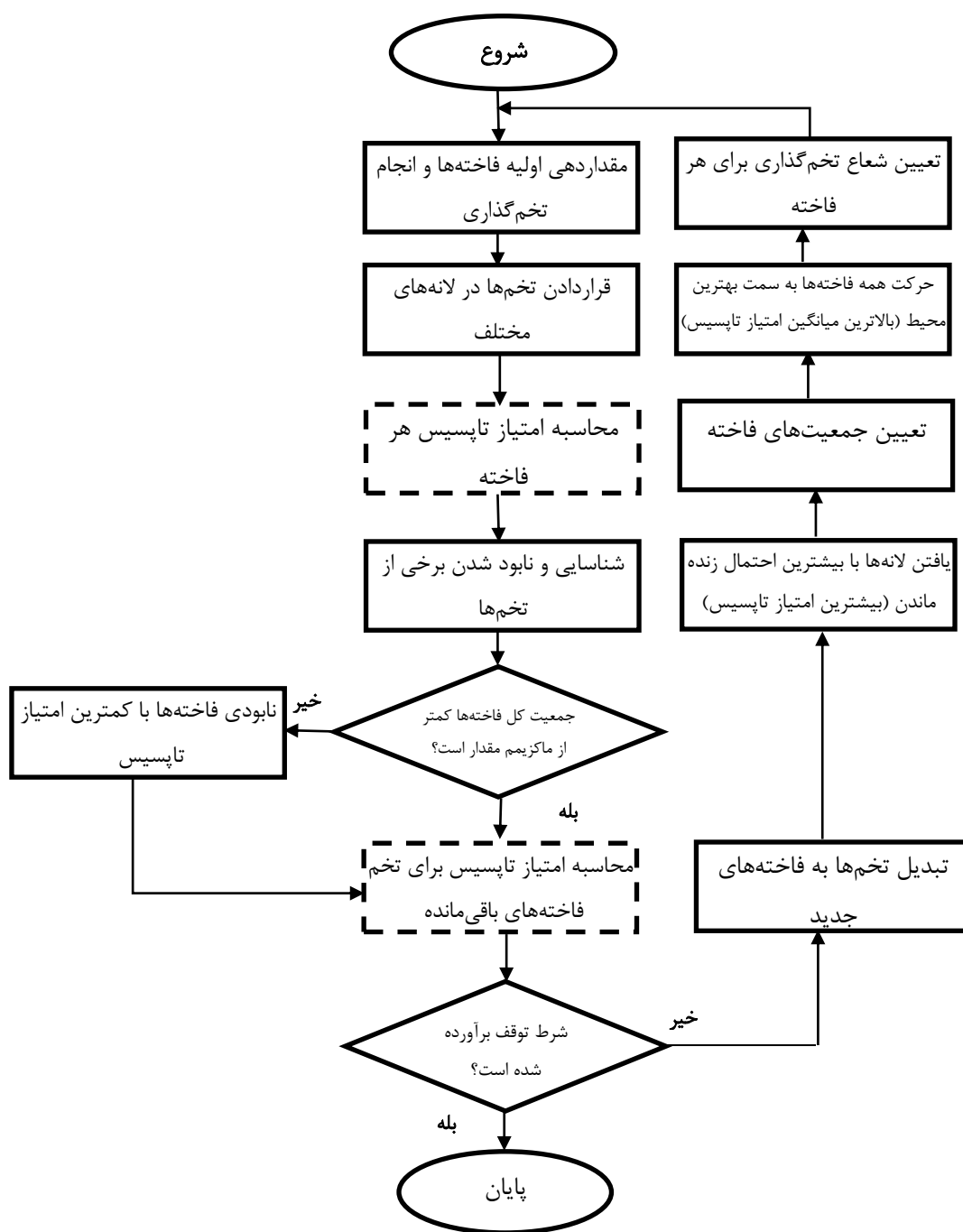
۳-۳ روش ترکیبی جدید فاپسیس

روش پیشنهادی فاپسیس به صورت هم‌زمان از مزایای هر دو روش تاپسیس و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته جزء روش‌های بهینه‌سازی کاربردی و کارا در زمینه حل مسایل غیرخطی و عدد صحیح با مقیاس بزرگ می‌باشد که قادر به حل مسایل چندهدفه نمی‌باشد [۵۵]. به همین دلیل با ترکیب این الگوریتم با روش تاپسیس می‌توان این محدودیت را بر طرف کرد و روش حل مطلوبی جهت حل مسایل چندهدفه با مقیاس بزرگ ارائه نمود. گام‌های روش جدید فاپسیس مشابه با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته می‌باشد با این تفاوت که در گام ارزیابی محل سکونت فاخته‌ها بجای در نظر گرفتن مقدار تابع هدف از امتیاز تاپسیس استفاده می‌شود. در واقع در این گام، ماتریس تصمیمی ایجاد می‌گردد که گزینه‌های آن محل سکونت فاخته‌ها (یا جواب‌های مساله) و معیارهای آن توابع هدف مساله می‌باشد.

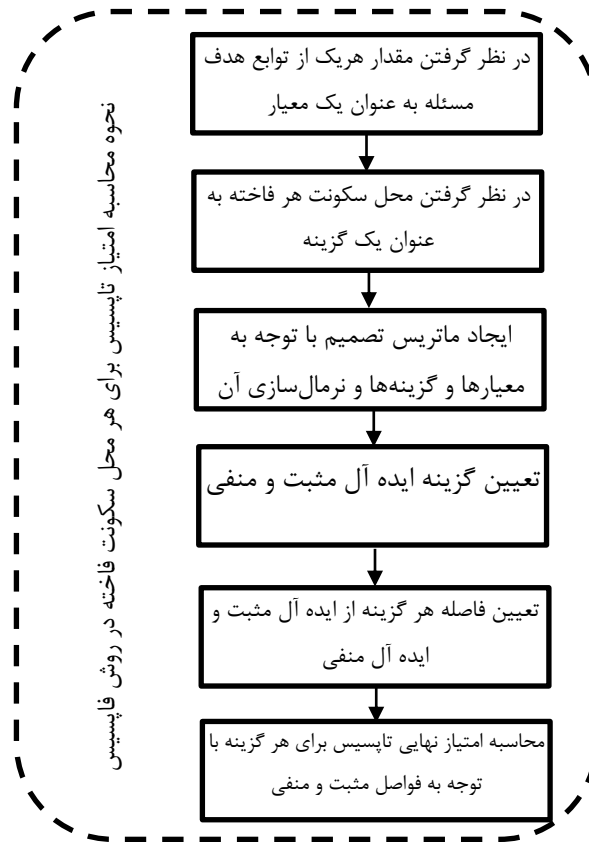
روش تاپسیس بر روی ماتریس تصمیم مذکور اعمال می‌شود و برای هر محل سکونت یک امتیاز تاپسیس محاسبه می‌گردد که این امتیاز مبنای برتری محل سکونت فاخته‌ها می‌باشد. به دلیل این که فاخته توانایی در نظر گرفتن هم‌زمان مقادیر مربوط به توابع هدف را ندارد، امتیاز تاپسیس به عنوان نماینده این مقادیر توابع هدف جایگزین می‌گردد. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی فاپسیس در شکل ۱ آورده شده است. همچنین زیربخش مربوط به محاسبه امتیاز تاپسیس در شکل ۲ شرح داده شده است. شایان ذکر است باتوجه به این که بهترین مقدار امتیاز تاپسیس عدد یک می‌باشد، زمانی که مقدار تابع هدف مساله به عدد یک همگرا شود، جواب بهینه حاصل شده است.

در ابتدا مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها بصورت تصادفی تعیین می‌گردد، سپس تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص می‌یابد و شعاع تخم‌گذاری هر فاخته تعیین می‌شود. فاخته‌ها در لانه‌های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند. تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند و تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند پرورش می‌یابند. سپس محل سکونت فاخته‌های جدید با استفاده از امتیاز تاپسیس رتبه‌بندی می‌گردد. شایان ذکر است که به منظور محاسبه گزینه ایده آل مثبت و منفی، با توجه به ماتریس تصمیم ایجاد شده از توابع هدف مساله که قبلاً شرح داده شد، بهترین و بدترین مقادیر باتوجه به بیشینه و کمینه بودن توابع هدف مساله تعیین می‌گردد و سپس با توجه به مقدار فاصله هر محل سکونت از ایده آل مثبت و منفی، مقدار امتیاز تاپسیس برای هر منطقه سکونت محاسبه می‌گردد. ماکزیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند، مشخص می‌شود و آن‌هایی که در مکان‌های نامناسب (امتیاز تاپسیس پایین) هستند از بین می‌روند. فاخته‌ها با استفاده از روش خوشه‌بندی k -میانگین^۱ گروه‌بندی می‌گردند و بهترین گروه فاخته به عنوان مکان سکونت هدف مشخص می‌گردد. جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان جدید هدف حرکت می‌کنند. در نهایت اگر شرط توقف برقرار گردد، الگوریتم به پایان می‌رسد و در غیر این صورت فرآیند تخم‌گذاری تکرار می‌شود.

^۱ K-means



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی فاپسیس



شکل ۲. محاسبه مطلوبیت محل سکونت فاخته به کمک روش تاپسیس

۴ مسایل عددی آزمایشی

در این بخش به بررسی تعدادی مساله عددی پرداخته می‌شود. این مدل‌ها، توابع آزمایشی^۱ نامیده می‌شوند و برای ارزیابی عملکرد روش‌های حل چندهدفه استفاده می‌شوند [۵۹]. در این مقاله از دو مساله آزمایشی استفاده شده است که این توابع به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آورده شده‌اند. روش پیشنهادی فاپسیس بر روی این مدل‌ها پیاده‌سازی گردیده است و با استفاده از مجموعه نقاط ایجاد شده، مرز تقریبی پارتو مطابق شکل ۳ ترسیم گردیده است. به منظور مقایسه عملکرد روش فاپسیس، برای این مسایل آزمایشی از الگوریتم شناخته‌شده *NSGA-II*^۲ نیز استفاده شده است و مرز پارتو ایجاد شده از این الگوریتم در شکل ۳ آورده شده است.

¹ Test function

² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

$$\min f_1 = x_1$$

$$\min f_2 = x_2$$

s.t.

$$(x_2 - 2)^2 + (x_1 - 2)^2 \geq 4 \quad (1)$$

$$x_2 \geq \varepsilon$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$\min f_1 = x_1$$

$$\min f_2 = x_2$$

s.t.

$$\cos(1.6 \arctan(\frac{x_1}{x_2})) \geq x_1^2 - 0.1x_2^2 - 1 \quad (2)$$

$$(x_2 - 0.5)^2 + (x_1 - 0.5)^2 \geq -0.5$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq \pi$$

	مساله آزمایشی اول	مساله آزمایشی دوم
نمودار پارتو روش فاپسیس		
نمودار پارتو روش NSGA-II		
مرز بهینه پارتو		

شکل ۳. مرز پارتوی حاصل از روش‌های فاپسیس و NSGAII [۶۰] برای مسایل آزمایشی اول و دوم

مسایلی با مرزهای پارتو گسسته و نامحدب همیشه یکی از چالش برانگیزترین مسایل در حوزه چندهدفه می‌باشند و همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، روش فاپسیس عملکردی مشابه با روش NSGAI در تعیین مرز پارتوی مسایل آزمایشی دارد و با تقریب خوبی قادر به تشخیص مرز پارتو دقیق مسایل می‌باشد. به منظور مقایسه کمی نمودارهای حاصل از هر دو روش از شاخص‌هایی شناخته‌شده، استفاده گردیده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. اولین شاخص حداکثر گسترش می‌باشد و هر قدر نقاط در فضای وسیع‌تری گسترش یافته باشد، این شاخص بزرگ‌تر است. بنابراین مقادیر بالاتر این شاخص مطلوب‌تر خواهد بود. دومین شاخص فاصله متریک است که یکنواختی نقاط ناچیره را اندازه‌گیری می‌کند و در حالتی که نقاط به طور یکنواخت و نزدیک به هم قرار بگیرند، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد. بنابراین هرچه این شاخص کوچک‌تر باشد، عملکرد روش بهتر خواهد بود. شاخص سوم تعداد پاسخ‌های موثر یا شاخص پارتو می‌باشد که تعداد نقاط ناچیره حاصل از روش را نشان می‌دهد و بدیهی است که مقادیر بالاتر برای این شاخص ترجیح داده می‌شود. برای مطالعه بیشتر در مورد این شاخص‌ها و مشاهده روابط ریاضی مربوطه می‌توان به منبع [۶۱] مراجعه نمود.

با توجه به شاخص‌های مذکور و نمودارهای پارتو هر دو روش جدول ۳ ایجاد می‌گردد و همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، روش فاپسیس در برخی شاخص‌ها برای هر دو مساله آزمایشی عملکردی مشابه و در برخی شاخص‌ها عملکردی بهتر از روش مشابه دارد.

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های مرز پارتو برای هر دو روش

شاخص	حداکثر گسترش	فاصله متریک	تعداد پاسخ‌های موثر
مساله آزمایشی اول	روش فاپسیس	۰/۷۶۸	۴۶
	روش NSGA-II	۰/۸۶۵	۴۰
مساله آزمایشی دوم	روش فاپسیس	۰/۷۹۶	۹۵
	روش NSGA-II	۰/۷۹۹	۸۷

۵ مساله انتخاب تامین‌کننده

در این مقاله، مساله انتخاب تامین‌کننده با هدف کمینه‌سازی اهداف هزینه خرید و سفارش و نرخ معیوب در نظر گرفته می‌شود. این مدل توسط وادوا^۱ و همکاران ارائه شده است که در ادامه شرح داده می‌شود [۶۲]. مدل ارائه‌شده یک مدل چندمعیاره از مساله انتخاب تامین‌کنندگان با چندین خریدار و چندین تامین‌کننده می‌باشد که این مدل برای حالت تک خریدار نیز قابل استفاده است. در این مدل هر خریدار می‌تواند یک یا چند محصول از

¹ Wadhwa

فروشنندگان خریداری نماید. این مدل به طور خلاصه می‌تواند به هر سازمان در جهت تصمیم‌گیری‌های زیر کمک نماید:

- انتخاب زیر مجموعه‌ای از فروشنندگان مورد علاقه به منظور برون‌سپاری
- تعیین تعداد سفارش اختصاص یافته به هر یک از تامین‌کنندگان به منظور برآورده‌سازی تقاضا مطابق برنامه تولید سازمان

داده‌های استفاده شده در مدل به شرح زیر می‌باشد:

اندیس‌ها:

I	تعداد نوع محصول
J	تعداد خریدار
K	تعداد کل فروشنندگان بالقوه
M	تعداد نقاط شکست (تخفیف) قیمت

پارامترها:

p_{ikm}	هزینه خرید یک واحد محصول نوع i از فروشنده k در سطح قیمت m
b_{ikm}	حداقل تعداد واحدی از محصول نوع i که در صورت سفارش از فروشنده k در سطح قیمت m
d_{ij}	تقاضای خریدار j از محصول نوع i
l_{ijk}	زمان تحویل محصول نوع i
q_{ik}	درصد خطا فروشنده k برای تامین محصول نوع i
CAP_k	ظرفیت تامین فروشنده k
F_k	هزینه ثابت سفارش دهی از فروشنده k
N	حداکثر تعداد فروشنده‌ای که می‌توان انتخاب کرد

متغیرهای تصمیم‌گیری:

X_{ijkm}	تعداد واحد محصول نوع i که در سطح قیمت m توسط خریدار j از فروشنده k تامین می‌گردد
Z_k	متغیر صفر و یک، در صورتی که فروشنده k انتخاب شود ۱ و در غیر این صورت ۰
Y_{ijkm}	متغیر صفر و یک، در صورتی که سطح قیمت m مورد استفاده قرار گیرد ۱ و در غیر این صورت ۰

مدل ریاضی:

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m p_{ikm} \cdot X_{ijkm} + \sum_k F_k \cdot Z_k \quad (۳)$$

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m q_{ijk} \cdot X_{ijkm} \quad (۴)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_m X_{ijkm} \leq (CAP_k) \cdot Z_k \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_k \sum_m X_{ijkm} = d_{ij} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_K Z_K \leq N \quad (7)$$

$$X_{ijkm} \leq (b_{ikm} - b_{ikm-1}) * Y_{ijkm+1} \quad \forall i, j, k, \quad 1 \leq m \leq m_k \quad (8)$$

$$X_{ijkm} \geq (b_{ikm} - b_{ikm-1}) * Y_{ijkm+1} \quad \forall i, j, k, \quad 1 \leq m \leq m_{k-1} \quad (9)$$

$$X_{ijkm} \geq 0, Z_k, Y_{ijkm} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

در این مدل ریاضی، رابطه (۳)، تابع هدف اول مساله می‌باشد که هزینه خرید و هزینه سفارش دهی محصول از تامین کنندگان را کمینه می‌کند و رابطه (۴)، تابع هدف دوم است که نرخ معیوب‌ها را کمینه می‌نماید. رابطه (۵) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت تامین کنندگان می‌باشد و رابطه (۶) تضمین می‌نماید که هر خریدار به اندازه تقاضای خود از تامین کنندگان مختلف کالا دریافت نماید. رابطه (۷) حداکثر تعداد تامین کنندگان را مشخص می‌نماید و رابطه (۸) و (۹) ارتباط صحیحی جهت تامین مقادیر سفارش بین متغیرها را مشخص می‌کند. در نهایت رابطه (۱۰) نوع متغیرهای استفاده شده در مدل را نشان می‌دهد.

۶ پیاده‌سازی روش پیشنهادی فاپسیس برای مساله انتخاب تامین کننده

در این بخش به حل مساله انتخاب تامین کننده که در بخش قبلی ارایه گردید، توسط رویکرد پیشنهادی فاپسیس پرداخته می‌شود. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم، داده‌های مساله انتخاب تامین کننده به شرح زیر می‌باشد:

فرض می‌شود که دو نوع محصول (۱، ۲) ، دو خریدار (۱، ۲) و سه فروشنده یا تامین کننده (۳، ۲، ۱) وجود دارند. همچنین جدول ۴ مقادیر هزینه خرید (دلار) یک واحد از محصول نوع i را از فروشنده k نشان می‌دهد و در جدول ۵ مقادیر هزینه ثابت انتخاب هر فروشنده به همراه ظرفیت فروشنده آورده شده است. جدول ۶ مقادیر تقاضای خریداران از هر نوع محصول را نشان می‌دهد و در جدول ۷ درصد معیوب کالاهای دریافتی از تامین کنندگان (فروشنده‌گان) مختلف را برای هر نوع محصول آورده شده است. همچنین توابع هدف مساله f_1 و f_2 به ترتیب عبارت از کمینه‌سازی هزینه و کمینه‌سازی نرخ معیوب می‌باشند.

جدول ۴. هزینه خرید محصول از فروشنده‌گان (دلار)

		نوع محصول
۱	۲	فروشنده
۴	۲	۱

۱/۵	۳	۲
۰/۵	۰/۶	۳

جدول ۵. هزینه ثابت انتخاب فروشندگان و ظرفیت فروشندگان

فروشنده	۱	۲	۳
هزینه ثابت انتخاب فروشنده (دلار)	۸	۷	۵
ظرفیت فروشنده	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰

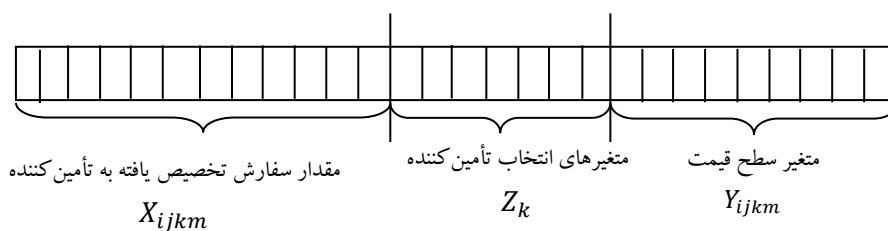
جدول ۶. مقدار تقاضای خریداران از انواع محصولات

خریدار	۱	۲
نوع محصول	۱	۲
	۲۰۰۰	۲۰۰۰
	۱۵۰۰	۳۰۰۰

جدول ۷. نرخ معیوب اقلام دریافتی از فروشندگان

فروشنده	۱	۲	۳
نوع محصول	۱	۲	۳
	۰/۹	۰/۷	۰/۵
	۰/۶	۰/۸	۰/۴۵

رمزگذاری محل سکونت فاخته‌ها اولین سوالی است که باید در هنگام آغاز حل مساله با فاپسیس بررسی شود. برای هر محل سکونت فاخته که متناظر با یک پیکربندی تامین کنندگان می‌باشد، یک ماتریس سطری مطابق شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود و هر درایه، متناظر با یکی از پارامترهای ورودی سیستم می‌باشد که باید تعیین گردد.



شکل ۴. رمزگذاری محل سکونت فاخته‌ها

در بخش اول ماتریس محل سکونت فاخته‌ها، یک رشته برای مقدار درصد سفارش اختصاص یافته به تامین کنندگان در نظر گرفته شده است، که عددی بین صفر تا یک را شامل می‌شود و اگر مقدار صفر بگیرد به معنی عدم تخصیص سفارش به تامین کننده مربوطه می‌باشد و هر قدر بزرگ تر باشد درصد سفارش اختصاص یافته به تامین کننده مربوطه نیز بیشتر خواهد شد. بخش دوم و سوم مربوط به متغیرهای صفر و یک مساله می‌باشند که به ترتیب مربوط به انتخاب تامین کننده و سطح قیمت تامین کننده می‌باشد. بنابراین تمامی متغیرها به صورت بازه

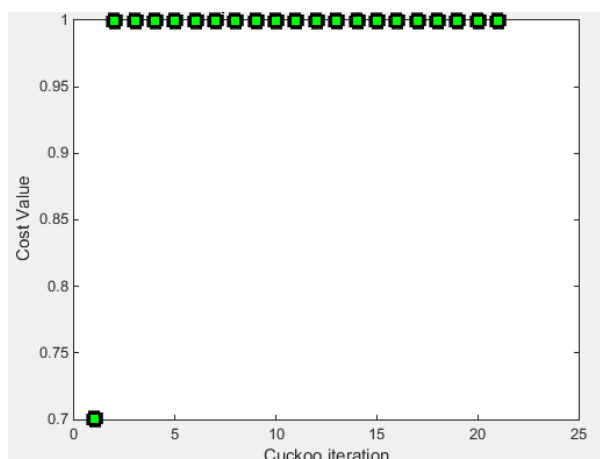
پیوسته صفر تا یک در نظر گرفته می‌شوند و رشته اول که مربوط به میزان سفارش اختصاص یافته است باید از درصد به مقدار سفارش تبدیل شود و در مورد متغیرهای دسته دوم و سوم این عدد به نزدیک‌ترین عدد صحیح صفر یا یک تبدیل می‌گردد. یکی دیگر از مسایلی که در پیاده‌سازی الگوریتم باید بررسی گردد، تنظیم پارامترها می‌باشد. تنظیم مطلوب پارامترها در الگوریتم‌های فراابتکاری در عملکرد الگوریتم تأثیرگذار است. جدول ۸ نشان‌دهنده مقادیر پارامترهای مطلوب الگوریتم فاپسیس می‌باشد که به صورت تجربی به دست آمده‌اند. به عنوان نمونه نحوه ایجاد یکی از این پارامترها (جمعیت اولیه فاخته‌ها) در جدول ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۵ مشاهده می‌گردد با تعداد ۵ فاخته برای پارامتر جمعیت فاخته‌های اولیه می‌توان در تکرارهای کم الگوریتم به جواب بهینه دست یافت. شایان ذکر است در فرآیند تنظیم پارامتر، با توجه به اینکه تابع هدف مساله نشان‌دهنده امتیاز تاپسیس می‌باشد و حداکثر مقدار برای امتیاز تاپسیس یک است، بنابراین به محض اینکه نمودار به عدد یک همگرا شود، جواب قابل قبول به دست آمده است و حل مساله به پایان می‌رسد. همچنین سایر پارامترهای این روش در جداول ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است و شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان‌دهنده شماره تکرار الگوریتم در رسیدن به بهترین جواب می‌باشد.

جدول ۸. مقادیر بهینه پارامترهای روش فاپسیس

شرح پارامتر	بازه قابل انتخاب برای پارامتر	مقدار بهینه پارامتر
تعداد جمعیت اولیه	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰	۵
حداقل تعداد تخم برای هر فاخته	۲، ۴ و ۵	۲
حداکثر تعداد تخم برای هر فاخته	۴، ۵ و ۱۰	۶
حداکثر تعداد تکرار حلقه داخلی	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰	۲۰
تعداد خوشه‌بندی	۲، ۳، ۴ و ۵	۲
ضریب حرکت	۲، ۳ و ۴	۴
حداکثر تعداد فاخته در یک زمان زمان	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰	۴۰
پارامتر کنترل شعاع تخم‌گذاری	۳، ۴ و ۵	۵

جدول ۹. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه با توجه به پارامتر جمعیت اولیه

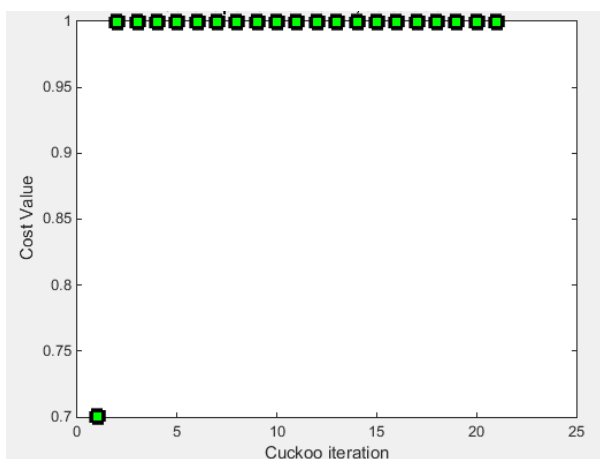
شماره اجرا	تعداد جمعیت اولیه			
	۵	۱۰	۱۵	۲۰
۱	۱۳	۵	۲۵	۵
۲	۲	۱۳	۲	۴
۳	۸	۳	۷	۴۳
۴	۲	۶	۹	۲
۵	۱	۹	۳	۲۱
۶	۱۶	۵	۱۰	۲



شکل ۵. نمودار مربوط به پارامتر تعداد جمعیت اولیه

جدول ۱۰. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه با توجه به پارامتر حداکثر و حداقل تعداد تخم

حداقل تعداد تخم برای هر فاخته	۲	۲	۲	۲	۴	۵
حداکثر تعداد تخم برای هر فاخته	۴	۶	۵	۱۰	۱۰	۱۰
اجرا ۱	۱۰	۶	۲۵	۱۷	۱	۲
اجرا ۲	۱	۴	۲۳			
اجرا ۳	۲	۱				

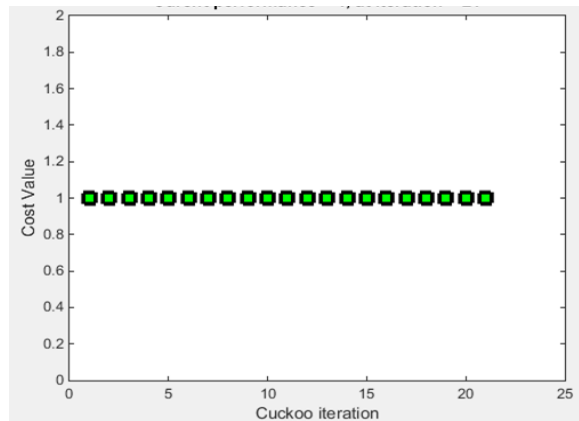


شکل ۶. نمودار مربوط به حداقل و حداکثر تعداد تخم برای هر فاخته

با توجه به جدول ۹ بازه [۲,۶] برای حداقل و حداکثر تعداد تخم انتخاب گردید، زیرا در تکرار اول (مساله چندین بار حل شده است) به جواب یک همگرا گردید. لازم به ذکر است در بازه [۴,۱۰] و [۵,۱۰] زمان رسیدن به جواب بسیار طولانی بود. برای سایر پارامترها این فرآیند به صورت مشابه تکرار می‌گردد. شایان ذکر است با توجه به ماهیت تقریبی الگوریتم‌های فراابتکاری، مساله چندین بار اجرا می‌گردد و در نهایت بهترین جواب‌ها انتخاب می‌شوند (جداول ۸، ۹ و ۱۰ و شکل‌های ۶، ۷ و ۸) و پارامتری انتخاب می‌گردد که بتواند در کمترین تکرار به جواب همگرا گردد.

جدول ۱۱. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه با توجه به پارامتر حداکثر تکرار

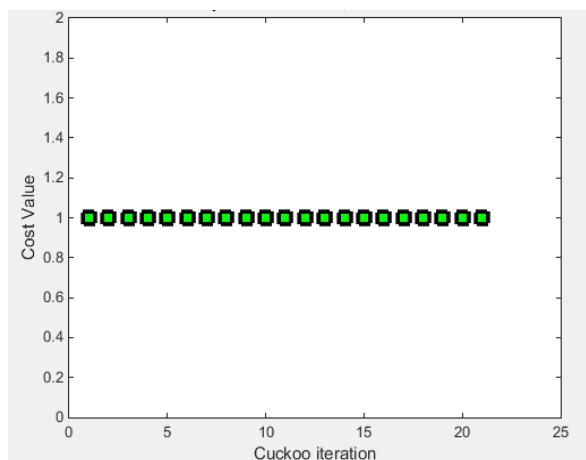
شماره اجرا	حداکثر تعداد تکرار حلقه داخلی				
	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
۱	۲	۵	۳۰	۲۳	۶
۲	۲	۱	۱	۱	۸
۳	---	۶	۱	۴	۱۴



شکل ۷. نمودار مربوط به حداکثر تعداد تکرار

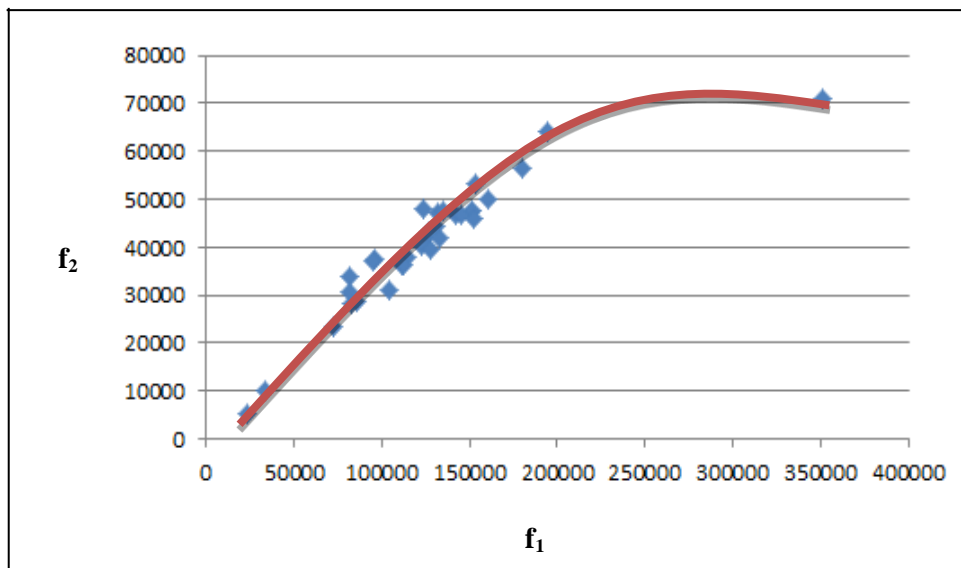
جدول ۱۲. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه با توجه به پارامتر حداکثر تعداد فاخته که در یک زمان می تواند زنده بماند

شماره اجرا	حداکثر تعداد فاخته که در یک زمان می تواند زنده بماند				
	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
۱	---	۲	---	۲	۱
۲	---	۲	۱۴	۱	۱۰
۳	---	---	---	۲	۱۳
۴	---	---	---	۱۲	---



شکل ۸. نمودار مربوط به حداکثر تعداد فاخته که در یک زمان می تواند زنده بماند

در جداول ۱۱ و ۱۲ نیز پارامترهای مربوط به یک تکرار انتخاب شده‌اند، یعنی در تکرار اول با استفاده از این پارامترها به جواب بهینه همگرا شده است. در نهایت با توجه به پارامترهای بهینه تعیین شده برای الگوریتم فاخته مطابق با جدول ۷، الگوریتم فاپسیس روی مساله انتخاب تامین کننده (مطابق با مشخصات ذکر شده در جداول ۳ تا ۶) پیاده‌سازی می‌گردد و با استفاده از نتایج به دست آمده، جواب‌های مساله به صورت نمودار تقریبی پارتو شکل ۹ ایجاد می‌گردد. منحنی قرمز رنگ نشان‌دهنده مرز دقیق این مساله می‌باشد و همان گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، روش پیشنهادی فاپسیس نقاط زیادی از این مرز پارتو را ایجاد کرده است و اکثرا با فاصله کمی از مرز پارتو دقیق مساله قرار دارند که نشان‌دهنده دقت بالای این روش می‌باشد.



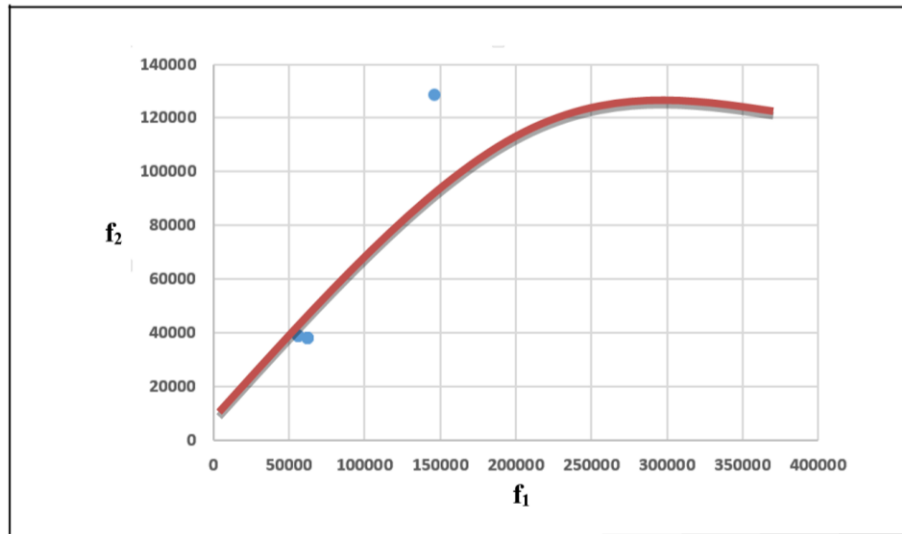
شکل ۹. نمودار تقریبی پارتو ایجاد شده از روش فاپسیس

به منظور اعتبارسنجی روش فاپسیس، مساله انتخاب تامین کننده با روش محدودیت اپسیلون^۱ که یکی از روش‌های شناخته شده در زمینه حل مسایل چندهدفه می‌باشد بهینه‌سازی گردید [۶۳] و مرز تقریبی پارتو مساله به صورت شکل ۱۰ ترسیم شده است.

جدول ۱۳. مقادیر به دست آمده برای توابع هدف با توجه به روش اپسیلون

f_1	۵۶۰۰۰۰۱۲	۶۲۰۰۰۰۱۳	۱۴۶۰۰۰۱۲	۶۲۰۰۰۰۱۳	۶۲۰۰۰۰۱۳	۵۶۰۰۰۰۱۲	۵۶۰۰۰۰۱۲	۶۲۰۰۰۰۱۳
f_2	۳۸۷۵۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰۰	۱۲۸۷۵۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰۰	۳۸۷۵۰۰۰۰	۳۸۷۵۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰۰

^۱ ϵ -constraint



شکل ۱۰. نمودار تقریبی پارتو ایجاد شده از روش محدودیت اپسیلون

همان گونه که مشاهده می گردد با توجه به مرز دقیق پارتو مساله (منحنی قرمز رنگ) تعداد جواب های تکراری طبق جدول ۱۳ در این روش زیاد است و نتوانسته است مرز واقعی مساله را به خوبی شناسایی کند و تنها سه نقطه از مرز را ایجاد کرده است که با فاصله زیادی از مرز دقیق پارتو قرار دارند و نشان دهنده دقت پایین این روش می باشد. به منظور بررسی عملکرد روش های حل مسایل چندهدفه سه معیار دقت، سرعت و تعداد نقاط غیر تکراری پارتو بررسی می گردند. همان طور که ملاحظه می گردد جواب های ایجاد شده از روش فاپسیس به مرز دقیق مساله نزدیک است و نشان دهنده دقت روش می باشد. همچنین زمان حل این مساله با روش فاپسیس به دلیل استفاده از الگوریتم های فراابتکاری بسیار کوتاه تر (تقریباً ۳۵۰ ثانیه) از روش حل محدودیت اپسیلون (تقریباً ۷۲۰ ثانیه) می باشد. در مورد تعداد نقاط پارتو به وضوح می توان از شکل های ۸ و ۹، برتری روش فاپسیس را نسبت به روش محدودیت اپسیلون مشاهده نمود.

۷ نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پژوهش از الگوریتم بهینه سازی فاخته و روش تاپسیس برای ایجاد روش ترکیبی جدید فاپسیس جهت حل مسایل چندهدفه استفاده گردید. روش ترکیبی پیشنهادی به صورت هم زمان از مزایای هر دو روش استفاده می کند و محدودیت های هر یک از این روش ها را برطرف می سازد. بنابراین از روش ترکیبی فاپسیس می توان برای حل دقیق و سریع مسایل بهینه سازی چندهدفه در مقیاس بزرگ استفاده نمود. در ابتدا به منظور بررسی عملکرد روش، تعدادی مساله عددی آزمایشی [۵۹] بررسی و نتایج آن با الگوریتم NSGAIII مقایسه گردید [۶۰] که نتایج نشان دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی می باشد. سپس از روش پیشنهادی فاپسیس برای حل مساله انتخاب تامین کننده که یکی از مسایل چندهدفه با اهمیت در دنیای واقعی است، استفاده شده است. منع یابی و تخصیص سفارش به تامین کنندگان مناسب، هزینه های تامین را به شکل قابل ملاحظه ای کاهش و قابلیت رقابت پذیری

سازمان را افزایش می‌دهد. دو معیار با اهمیت در انتخاب تامین کنندگان هزینه تامین و کیفیت اقلام دریافتی از تامین کنندگان می‌باشد. از این رو در این پژوهش مساله انتخاب تامین کننده با هدف کمینه‌سازی هزینه و نرخ کالا معیوب دریافتی از تامین کنندگان به منظور بررسی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته چندهدفه، انتخاب گردید [۶۲]. نتایج حاصل از حل مساله و مقایسه آن با روش محدودیت اپسیلون [۶۳]، عملکرد مطلوب الگوریتم ترکیبی فاپسیس را برای حل مسایل چندهدفه از نظر معیارهای سرعت، دقت و تعداد نقاط پارتوی ایجادشده به خوبی نشان داد. روش محدودیت اپسیلون تنها نقاط بسیار محدودی از مرز بهینه پارتو را ایجاد کرد درحالی که روش پیشنهادی تعداد زیادی از این نقاط را برای مساله مورد نظر تولید نمود که بر اساس نظر تصمیم گیرنده می‌توان هر کدام از این نقاط پاسخ به عنوان پاسخ بهینه در نظر گرفته شود. در این مقاله تمام پارامترهای مساله مورد بررسی قطعی بودند و می‌توان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مساله مورد بررسی و استفاده از روش‌های موجود در این حوزه به صورت ترکیبی با روش فاپسیس، مساله را توسعه داد. همچنین می‌توان مساله انتخاب تامین کننده را با در نظر گرفتن سایر اهداف از جمله مدت زمان تحویل، هزینه حمل و نقل و غیره توسعه داد و به دنیای واقعی نزدیک نمود. با توجه به کاربردهای متعدد روش پیشنهادی مقاله، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی فاپسیس در حل سایر مسایل چندهدفه واقعی دیگر مانند مسایل زمانبندی، برنامه‌ریزی تولید و غیره استفاده نمود. به منظور تحقیقات آتی می‌توان به کمک سایر روش‌های تصمیم‌گیری مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، رویکردهای ترکیبی دیگری ایجاد نمود.

منابع

- [1] Sihi, Maedeh, Najafi, Seyed Ismail, Tavakoli Moghaddam, Reza, Haji Aghaei Keshtali, Mostafa. (2021), Taguchi combined method and data envelopment analysis to determine the parameters and operators of metaheuristic algorithms - Genetic algorithm to solve the problem of re-input permutation workshop flow. *Journal of Operational Research and Its Applications (Applied Mathematics)*, 18 (2), 124-107 (In Persian).
- [2] Yang, X. S., & Deb, S. (2013). Multi-objective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research*, 40(6), 1616-1624.
- [3] Kanagaraj, G., & Jawahar, N. (2009). A simulated annealing algorithm for optimal supplier selection using the reliability-based total cost of ownership model. *International Journal of Procurement Management*, 2(3), 244-266.
- [4] Kota, L. (2012). Optimization of the supplier selection problem using discrete firefly algorithm. *Advanced Logistic Systems*, 6(1), 117-126.
- [5] Sadeghieh, A., Dehghanbaghi, M., Dabbaghi, A., & Barak, S. (2012). A genetic algorithm based grey goal programming (G3) approach for parts supplier evaluation and selection. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4612-4630.
- [6] Parhizkari, M., Amirib, M., & Mousakhani, M. (2013). A multiple criteria decision making for supplier selection and inventory management strategy: A case of multi-product and multi-supplier problem. *Decision Science Letters*, 2(3), 185-190.
- [7] Ghorbani, M., Mohammad Arabzad, S., & Shahin, A. (2013). A novel approach for supplier selection based on the Kano model and fuzzy MCDM. *International Journal of Production Research*, 51(18), 5469-5484.
- [8] Khalili-Damghani, K., Dideh-Khani, H., & Sadi-Nezhad, S. (2013). A two-stage approach based on ANFIS and fuzzy goal programming for supplier selection. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 6(1), 1-14.
- [9] Ayhan, M. B. (2013). A fuzzy AHP approach for supplier selection problem: A case study in a Gear motor company. *arXiv preprint arXiv:1311.2886*.

- [10] Ghosh, T., Chakraborty, T., & Dan, P. K. (2014). An effective AHP-based metaheuristic approach to solve supplier selection problem. arXiv preprint arXiv:1404.4067.
- [11] Haldar, A., Ray, A., Banerjee, D., & Ghosh, S. (2014). Resilient supplier selection under a fuzzy environment. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 9(2), 147-156.
- [12] Rostamzadeh, R. (2014). A new approach for supplier selection using fuzzy MCDM. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 19(1), 91-114.
- [13] Azadeh, A., Keramati, A., Karimi, A., Sharahi, Z. J., & Pourhaji, P. (2014). Design of integrated information and supply chain for selection of new facility and suppliers by a unique hybrid metaheuristic computer simulation algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 71(5-8), 775-793.
- [14] Junior, F. R. L., Osiro, L., & Carpinetti, L. C. R. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, 194-209.
- [15] Karsak, E. E., & Dursun, M. (2015). An integrated fuzzy MCDM approach for supplier evaluation and selection. *Computers & Industrial Engineering*, 82, 82-93.
- [16] Turk, S., Miller, S., Özcan, E., & John, R. (2015). A simulated annealing approach to supplier selection aware inventory planning.
- [17] Fallahpour, A., Olugu, E. U., Musa, S. N., Khezrimotlagh, D., & Wong, K. Y. (2016). An integrated model for green supplier selection under fuzzy environment: application of data envelopment analysis and genetic programming approach. *Neural Computing and Applications*, 27(3), 707-725.
- [18] Shadkam, E., & Bijari, M. (2017). Multi-objective simulation optimization for selection and determination of order quantity in supplier selection problem under uncertainty and quality criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 93(1-4), 161-173.
- [19] Allouche, A. M., & Jouili, T. (2017). Supplier selection problem: A fuzzy multicriteria approach. *Southern African Business Review*, 21(1), 429-445.
- [20] Khajeh, Mostafa, Amiri, Maghsoud, Ulfat, Laia, Zandieh, Mostafa. (2020), Evaluation and selection of stable suppliers in intuitive fuzzy environment with a combined multi-criteria approach of the best worst and Vicor. *Journal of Operational Research and Its Applications (Applied Mathematics)*. 17 (1): 48-25 (In Persian)
- [21] Modibbo, Umar Muhammad, et al. (2022). Multi-criteria decision analysis for pharmaceutical supplier selection problem using fuzzyTOPSIS. *Management Decision*.
- [22] Sun, Yulin, Simon Cong Guo, and Xueping Li. (2022). An order-splitting model for supplier selection and order allocation in a multi-echelon supply chain. *Computers & Operations Research* 137, 105515.
- [23] Toffano, Federico, et al. (2022). A multi-objective supplier selection framework based on user-preferences." *Annals of Operations Research* 308(1), 609-640.
- [24] Dickson, G. W., (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of Purchasing*, 2, 5-17.
- [25] Roa, C.P., Kiser, G.E (1980). Educational Buyers' Perceptions of Vendor Attributes. *Journal of Purchasing and material management* 16, 25-30.
- [26] Ebrahimi, B. Rahmani, M. Khakzad, M. (2016). Development of a comprehensive model of data envelopment analysis to determine the best supplier with inaccurate data and weight constraints, *Production and Operations Management*, 101-118. (In Persian)
- [27] Taghavifard, Seyed Mohammad Taghi, Dehghani, Mohammad Hassan, Aghaei, Mojtaba (2015), Development of order quantification model by selecting the appropriate supplier and solving using genetic algorithm method, *Management Research in Iran*, 66- 89. (In Persian)
- [28] Razmi, Jafar, July, Fariborz, Niaei, Majid (2007), Presenting a Combined Model for Supplier Selection Decision Problem and Solving It by Genetic Algorithm, *Quarterly Journal of Business Research*, 121-152. (In Persian)
- [29] Nouri Raj, E. Lotfi, M. R. Rashidi, G. (2012). Combined model of fuzzy TOPSIS and ideal planning for supplier selection and order allocation, *Industrial Management Quarterly*, 30-45. (In Persian)
- [30] Weber, C. A., Current J. R., (1993). A multi objective approach to vendor selection. *European journal of Operational Research*, 68(1), 173-184.
- [31] Ghodsypour S.H., C. O'Brien. (2001). The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, 15-27.

- [32] Degraeve, Z, Roodhooft, F. (2000). A Mathematical Programming Approach for Procurement Using Activity Based Costing. *Journal of Business Finance and Accounting*, 27 (1-2), 69-9.
- [33] Rezaei, J., Davoodi, M. (2011). Multi-objective models for lot-sizing with supplier selection, *Int. J. Production Economics* 130, 77–86.
- [34] Razmi, J., Mohammad Ebrahim, R., Haleh, H. (2009). Scatter search algorithm for supplier selection and order lot sizing under multiple price discount environment, *Advances in Engineering Software*. 40, 766–776.
- [35] Sharma, D., W. C. Benton, and R. Srivastava (1989). Competitive strategy and purchasing decision, *Proceedings of the 1989 Annual Conference of the Decision Sciences Institute*, 1088-1090.
- [36] Benton, W. C. (1991); Quantity discount decision under conditions of multiple items, multiple suppliers and resource limitation, *International Journal of production Research*, 29 (10), 1953-1961.
- [37] Awasthi, A., Chauhan, S.S., Goyal, S.K., Proth, J. (2009). Supplier selection problem for a single manufacturing unit under stochastic demand. *Production Economics*, 117, 229-233.
- [38] Samizadeh, R., Afshari, P. (2017). A Two-Objective Supplier Selection Model in Supply Chain and Solving by Meta-Heuristic Algorithm, *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 391-404.
- [39] Chaudhry, S. S., F. G. Forst, and J. L. Zydiak (1993); Vendor selection with price breaks, *European Journal of Operational Research*, 70 (1), 52-66.
- [40] Dejam, S., Sadeghzadeh, M., & Mirabedini, S. J. (2012). Combining cuckoo and tabu algorithms for solving quadratic assignment problems. *Journal of and Applied Studies*, 2(12), 1-8.
- [41] Abolpour, B., & Mohebbi, A. (2013). Estimation of the compressive strength of 28-day-old concrete by use of an adaptive cuckoo–fuzzy logic model. *Research on Chemical Intermediates*, 39(9), 4001-4009.
- [42] Shadkam, E., & Bijari, M. (2014). Evaluation the efficiency of cuckoo optimization algorithm. *arXiv preprint arXiv:1405.2168*.
- [43] Gorjestani, M., Shadkam, E., Parvizi, M., & Aminzadegan, S. (2015). A hybrid COA-DEA method for solving multi-objective problems. *arXiv preprint arXiv:1509.00595*.
- [44] Akbarzadeh, Afsane, and Elham Shadkam. (2015). The study of cuckoo optimization algorithm for production planning problem. *arXiv preprint arXiv: 1508.01310*.
- [45] Borhanifar, Z., & Shadkam, E. (2016). The new hybrid COAW method for solving multi-objective problems. *arXiv preprint arXiv:1611.00577*.
- [46] Shadkam, E., & Bijari, M. (2017). Multi-objective simulation optimization for selection and determination of order quantity in supplier selection problem under uncertainty and quality criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 93(1-4), 161-173.
- [47] Shadkam, E., Parvizi, M., Rajabi, R. (2021). The study of multi-objective supplier selection problem by a novel hybrid method: COA/ ϵ -Constraint, *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 10(3), 223 – 237.
- [48] Shadkam, E., Tayarani Homayoni, A. (2021). Machine scheme selection of digital manufacturing based on COA algorithm and AHP method, 18th International Conference on Industrial Engineering, Tehran 17-18.
- [49] Khandoozi, R., Maleki, H. R. (2022). Modeling a multi-objective defensive location problem with construction cost and capacity and solving using an efficient cuckoo search algorithm, *Journal of Operational Research and Its Applications (Applied Mathematics)*, 18 (1), 19-1.
- [50] Gholizadeh, H., et al. (2022). Fuzzy data-driven scenario-based robust data envelopment analysis for prediction and optimisation of an electrical discharge machine's parameters. *Expert Systems with Applications*, 116419.
- [51] Borhanifar, Z., Shadkam, E. (2015). The new hybrid coaw method for solving multi-objective problems, *International Journal in Foundations of Computer Science & Technology (IJFCST)*, 5, 15-22.
- [52] Shokoohi M., Shiva, Vessali, S., Ahmadi, M. Shadkam, E. (2020). AHP-COA Combined Algorithm for Selecting a Digital Production Machine Design. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15, 1421-1425.

- [53] Gorjestani, M. Shadkam, E. Parvizi, M. Aminzadegan, S. (2015). A hybrid COA-DEA method for solving multi-objective problem, *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*, 5, 1-1.
- [54] Gorjestani, M. Shadkam, E. Parvizi, M., Aminzadegan, S. (2015). A hybrid COA-DEA method for solving multi-objective problem, *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*, 5, 2015, 1-10.
- [55] Yang, Xin-She, and Suash Deb. (2009). Cuckoo search via Lévy flights. *World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)*. IEEE..
- [56] Rajabioun, Ramin. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied soft computing* 11.8, 5508-5518.
- [57] Liu, Chang, et al. (2022). Solving the Multi-Objective Problem of IoT Service Placement in Fog Computing Using Cuckoo Search Algorithm. *Neural Processing Letters*, 1-32.
- [58] Hwang, Ching-Lai, and Kwangsun Yoon. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making*. Springer, Berlin, Heidelberg, 58-191.
- [59] Tanaka, Masahiro, Hikaru Watanabe, Yasuyuki Furukawa, and Tetsuzo Tanino. (1995). GA-based decision support system for multicriteria optimization. In *1995 IEEE international conference on systems, man and cybernetics. Intelligent systems for the 21st century*, 2, 1556-1561. IEEE.
- [60] Deb, K., Associate Member, IEEE, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6 (2).
- [61] Stanojević, Bogdana, and Fred Glover. (2020). A new approach to generate pattern-efficient sets of non-dominated vectors for multi-objective optimization. *Information Sciences* 530, 22-42.
- [62] Wadhwa, Vijay, and A. Ravi Ravindran. (2007). Vendor selection in outsourcing. *Computers & operations research* 34.12, 3725-3737.
- [63] Zarouk, Yaser, et al. (2022). A novel multi-objective green vehicle routing and scheduling model with stochastic demand, supply, and variable travel times. *Computers & Operations Research*, 105698.