

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

*الهام شادکام^۱

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

رسید مقاله: ۱۲ دی ۱۴۰۰
پذیرش مقاله: ۲۷ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

در طی سال‌های اخیر مساله انتخاب تامین‌کننده مناسب در زنجیره تامین به یک موضوع استراتژیک و مهم تبدیل شده است. به دلیل وجود اهداف متعدد و متناقض، مساله انتخاب تامین‌کننده را می‌توان به صورت یک مساله چندهدفه درنظر گرفت و گاهی یافتن جواب بهینه بسیار دشوار است. انتخاب تامین‌کننده 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 رقابت‌پذیری سازمان‌ها می‌شود. هدف این پژوهش، ارایه روشی جهت حل مسایل چندهدفه است که در ارزیابی و انتخاب تامین‌کننده 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 تامین‌کننده 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 فرابتکاری فاخته (حل مسایل با مقیاس بزرگ) و روش تاپسیس (ارزیابی و انتخاب گزینه کارآمدتر) بهره جست.

کلمات کلیدی: انتخاب تامین‌کننده، 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 (نرديک به بهينه) در زمان حل منطقی برای مسایل بهينه‌سازی پيچide هستند. دسته‌اي از الگوریتم‌های تقریبی، الگوریتم‌های ابتکاری و فرابابتکاری می‌باشند [۱]. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، قرار گرفتن آن‌ها در بهینه‌های محلی و ناتوانی آن‌ها در حل مسایل گوناگون است [۱]. الگوریتم‌های فرابابتکاری، يكی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای بروزنرفت از بهینه محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسایل هستند. يكی از الگوریتم‌های فرابابتکاری جدید که توانایی بسيار بالاي در پيدا کردن نقاط بهينه کلي دارد، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^۱ است. اين الگوریتم يكی از جديدترين و قوي ترین روش‌های بهینه‌سازی تكاملي می‌باشد که تاکنون معرفی شده است [۲]. الگوریتم فاخته با الهام از روش زندگی پرندگي پرندگي به نام فاخته توسعه یافته است و ماهيت اصلی اين الگوریتم، حل مسایل تک‌هدفه می‌باشد. گاهی می‌توان با تلفيق الگوریتم‌های فرابابتکاری و روش‌های ديگر، روش‌های ترکيبي ايجاد کرد و از يك سو از مزايای هردو به صورت همزمان استفاده کرد و از سوی ديگر، محدودیت‌های هر يك از آنها در حالت ترکيبي مرتفع می‌گردد. در اين پژوهش روش ترکيبي جدید فاپسیس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و روش تاپسیس^۲ ايجاد شده است که می‌تواند برای حل مسایل چندهدفه نيز استفاده گردد و محدودیت تک‌هدفه بودن الگوریتم فاخته را برطرف سازد. اکثر مسایل بهینه‌سازی در دنيا واقعي چندهدفه می‌باشند که به صورت همزمان به بهینه‌سازی چنددين هدف که اکثراً با هم در تناقض هستند، پرداخته می‌شود. (به همين دليل معمولاً جواب بهينه در مسایل چندهدفه به دليل وجود اهداف متناقض دست نيافتني است) و تنها می‌توان به مجموعه‌اي از جواب‌های چيره‌نشده تحت عنوان مرزهای بهينه پارتو دست یافت. حال اگر ابعاد مساله چندهدفه بزرگ باشد، به سختي می‌توان روش حل مناسب را پيدا کرد که بتواند با دقت مناسب و در زمان معقول مرزهای بهينه پارتو را تعين نماید. روش فاپسیس می‌تواند مسایل بهینه‌سازی چندهدفه با مقیاس بزرگ را بهينه نماید و محدودیت عدم توانایي روش تاپسیس در حل مسایل با ابعاد بزرگ را برطرف سازد. با توجه به اين که يكی از مسایل مهم و کاربردی در زنجيره تامين، مساله انتخاب تامين کننده می‌باشد [۳] و با افزایش اهميت فعالیت خريد و تدارکات، تصمیمات خريد مهم تر شده است و از آنجا که امروزه سازمان‌ها وابستگی ييشتری به تامين کننده‌گان پيدا کرده‌اند، پیامدهای مستقیم و غيرمستقیم تصمیم-گيري ضعیف، بیشتر خودنمایی می‌کند. در حقیقت، انتخاب مجموعه مناسبی از تامين کننده‌گان، امری بسیار مهم و حیاتی برای موفقیت يك شركت است. اخيراً با ظهور مفهوم مدیریت زنجيره تامين، بیشتر محققین، دانشمندان و مدیران به اين مساله پي برده‌اند که انتخاب تامين کننده مناسب و مدیریت آن، ابزاری است که از آن می‌توان برای افزایش رقابت‌پذیری زنجيره تامين استفاده کرد. لذا انتخاب تامين کننده، تصمیمی مهم و استراتژیک در زنجيره تامين می‌باشد. مساله انتخاب تامين کننده اکثراً به دليل وجود اهداف متنوع و عمدتاً متناقض تصمیم‌گيري به صورت يك مساله چندهدفه بررسی می‌گردد و اگر ابعاد مساله بزرگ باشد، کارایی روش‌های مرسوم حل

¹ Cuckoo Optimization Algorithm² TOPSIS

مسایل چندهدفه کاهاش می‌باید^[۳]. بنابر دلایل ذکر شده در این پژوهش به بررسی این مساله با توجه به روش پیشنهادی فاپسیس پرداخته خواهد شد.

در ادامه، پس از ارایه پیشنهادی پژوهش مربوط به روش‌های ترکیبی و مساله انتخاب تامین کنندگان 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 مسایل آزمایشی و مقایسه با الگوریتم‌های مشابه پرداخته شده است. به منظور بررسی روش پیشنهادی فاپسیس در مسایل کاربردی، مدل ریاضی مساله چندهدفه انتخاب تامین کنندگان 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 ارایه می‌گردد و نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی در یافتن مرز تقریبی پارتو مساله می‌باشد.

۲ پیشنهاد پژوهش

در این بخش به بررسی پژوهش‌های مرتبط با مقاله حاضر پرداخته می‌شود. با توجه به این که نوآوری مقاله در روش حل مساله انتخاب تامین کنندگان می‌باشد، در ادامه به بررسی پیشنهادی پژوهش مربوط به حل مساله انتخاب تامین کنندگان و سپس به بررسی مدل‌ها و روش‌های ترکیبی پرداخته می‌شود. یکی از بخش‌هایی که در زنجیره‌تامین اهمیت ویژه‌ای دارد، انتخاب تامین کنندگان است. از آنجایی که در انتخاب تامین کنندگان 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 تامین کنندگان که در تمامی این اهداف نسبت به سایر تامین کنندگان برتری داشته باشد، ناممکن است. از این رو، یافتن تامین کنندگان با در نظر گرفتن تمام اهداف، مساله‌ای دشوار از نظر تصمیم‌گیری و انتخاب به شمار می‌آید. در حوزه انتخاب تامین کنندگان 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 انتخاب تامین کنندگان چندهدفه

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

همکاران [۸]				فازی
ایهان [۹]	۲۰۱۳	احتمالی	انتخاب تامین کننده و ارایه یک مرور ادبیات جامع از مسایل تصمیم‌گیری چندمعیاره	فرآیند سلسله مراتب تحلیلی فازی
همکاران [۱۰]	۲۰۱۴	قطعی	انتخاب تامین کننده استوار	شبیه سازی تبرید و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و روش تاگوچی
همکاران [۱۱]	۲۰۱۴	احتمالی	ارزیابی تامین کنندگان بروون‌سپاری	تایپسیس فازی
رسنم زاده [۱۲]	۲۰۱۴	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان	فرآیند سلسله مراتب تحلیلی فازی و تایپسیس فازی
همکاران [۱۳]	۲۰۱۴	قطعی	انتخاب تامین کنندگان و کاهش زمان تحويل و هزینه تولید نهایی	شبیه‌سازی کامپیوترا و الگوریتم ژنتیک
همکاران [۱۴]	۲۰۱۴	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان مناسب	فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و تایپسیس فازی
دورسان [۱۵]	۲۰۱۵	احتمالی	یک روش تصمیم‌گیری گروهی چندمعیاره فازی	گسترش عملکرد کیفیت و منطق فازی
همکاران [۱۶]	۲۰۱۵	احتمالی	رویکرد دومرحله‌ای برای انتخاب تامین کننده و برنامه‌ریزی موجودی	ترکیب IT2FS و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید
همکاران [۱۷]	۲۰۱۶	احتمالی	انتخاب تامین کنندگان مناسب سبز	ترکیب تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم ژنتیک
بیجاری [۱۸]	۲۰۱۷	احتمالی	مساله چنددهدفه انتخاب تامین کنندگان و تعیین مقادیر سفارش	بهینه‌سازی شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده‌ها و فاخته
همکاران [۱۹]	۲۰۱۷	احتمالی	ارایه یک رویکرد چندمعیاره فازی برای حل مساله انتخاب تامین کننده	فرآیند تحلیل سلسله مراتب فازی (با استفاده از مدل ریاضی و لینگو)
همکاران [۲۰]	۲۰۲۰	احتمالی	ارزیابی و انتخاب تامین کننده پایدار در محیط فازی دیداری	رویکرد ترکیبی چندمعیاره بهترین بدترین و ویکور
همکاران [۲۱]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده دارویی	تایپسیس فازی
همکاران [۲۲]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده و تخصیص سفارش در یک مدل غیرخطی عدد صحیح و الگوریتم ژنتیک	مدل غیرخطی عدد صحیح و الگوریتم ژنتیک
همکاران [۲۳]	۲۰۲۲	احتمالی	انتخاب تامین کننده چنددهدفه بر اساس ترجیحات کاربر	مدل غیرخطی عدد صحیح 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، تحويل به موقع کالا و سابقه عملکرد عوامل ضروری و بسیار مهمی هستند که در امر انتخاب تامین کننده مطرح می‌گردد. روآ و کیسر^۲ صفت معیار را برای مساله انتخاب تامین کننده در نظر گرفتند [۲۵]. با توجه به

¹ Dickson² Roa and Kiser

پژوهش‌های مذکور قطعاً مساله انتخاب تامین‌کننده یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. ابراهیمی و همکاران یک مدل جدید تحلیل پوششی داده‌ها برای مساله چندهدفه شناسایی کاراترین تامین‌کننده با پارامترهای احتمالی ارایه کردند [۲۶]. در مدل آنها با در نظر گرفتن داده‌های غیردقیق برای هجده تامین‌کننده، تامین‌کنندگان کارا تعیین و رتبه‌بندی گردیدند. همچنین ابراهیمی و همکاران، یک مدل جامع تحلیل پوششی داده‌ها برای مساله چندهدفه تعیین بهترین تامین‌کننده با داده‌های غیردقیق و محدودیت‌های وزنی ارایه کردند. در مدل آنها محدودیت‌های وزنی برای در نظر گرفتن نظر تصمیم‌گیران در مورد وزن معیارها در نظر گرفته شده است. مدل ارایه شده قادر است فقط با حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، بهترین تامین‌کننده را مشخص نماید. تقوی فرد و همکاران، مساله تعیین میزان بهینه سفارش همراه با انتخاب تامین‌کننده 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 تامین‌کننده ارایه 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 تامین‌کننده از تقاضای کل تعیین گردید. نوری و همکاران به بررسی مدل ترکیبی تاپسیس فازی و برنامه‌ریزی آرمانی برای انتخاب تامین‌کننده پرداختند [۲۹]. با توجه به نتایج حاصله از حل دو مرحله‌ای مدل، مدل ارایه شده قادر به در نظر گرفتن همزمان مساله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارشات با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی می‌باشد. وبر و کارت ^۱ به موضوع برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه در مساله انتخاب تامین‌کننده با سه هدف حداقل کردن هزینه، حداقل کردن زمان حمل و نقل حداقل کردن تعداد قطعات برگشتی پرداختند [۳۰]. همچنین محدودیت‌هایی مانند ثابت بودن تعداد تامین‌کنندگانی که باید انتخاب شوند، محدود بودن ظرفیت تولید هر تامین‌کننده و محدود بودن میزان بودجه تخصیص یافته برای خرید از هر تامین‌کننده را به مساله اضافه کردند. در پژوهشی برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان 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. دیگریو و رودهوفت ^۲ یک برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان برای دوره‌های مختلف زمانی ارایه دادند [۳۲]. آن‌ها تاکید کردند که مشخصات تامین‌کنندگان 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، چندمحصوله و چندتامین‌کننده است و اهداف کمینه‌سازی 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، ژنتیک حل شده و نتایج آن در دو حالت عدم قبول کسری و قبول کسری مقایسه گردیدند.

¹ Weber and Current² Degraeve and Roodhooft

مدلی را طراحی کردند که شامل انواع مختلفی از تخفیفات می‌باشد^[۳۴]. همچنین محدودیت‌هایی از قبیل ظرفیت تامین کننده‌گان و تقاضا در مدل نهایی گنجانده شده است. در پژوهش آنها مدل نهایی طراحی شده با استفاده از روش فراباتکاری جستجوی پراکنده حل شده و نتایج بدست 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، تحويل 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 بررروی حداقل و حداًکثر 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 درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری تامین کننده‌گان است. با توجه به NP-Sخت 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، تحويل، 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 تحويل 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 انبارها و برای همه مسائل 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 درنظر گرفتن چندتابع 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 مسائل بهینه‌سازی بسیار مرسوم و پرکاربرد می‌باشند. در زمینه روش‌های ترکیبی، استفاده از الگوریتم‌های فراباتکاری بسیار رایج می‌باشد 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

^۱ Sharma^۲ Benton

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

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است که الگوریتمی قدرتمند در حل مسایل 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. برهانی فرو شادکام از روش ترکیب روش جمع ساده وزنی با الگوریتم فاخته، روشی ترکیبی تحت عنوان روش کوآو^۱ ارایه کرده‌اند و عملکرد آن را در حل مسایل چندهدفه نشان داده‌اند [۵۲]. در پژوهشی دیگر روش فرآیند تحلیل سلسه مراتبی در کنار الگوریتم فاخته جهت ایجاد روشی جهت حل مسایل چندهدفه به کار برده شده است [۵۳]. در این روش ترکیبی از روش فرآیند تحلیل سلسه مراتبی به منظور ایجاد ماتریس مقایسات زوجی به منظور تبدیل مساله چندهدفه به تک هدفه استفاده شده است. همچنین گرجستانی و همکاران از روش تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم فاخته، یک روش ترکیبی برای مسایل 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 اپسیلون 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 تامین کننده 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.

۱-۳ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی فاخته بر اساس روش زندگی به پرنده‌ای به نام فاخته می‌باشد که در سال ۲۰۰۹ توسط شین اویانگ ودب ساوشن، توسعه یافته است [۵۵]. این الگوریتم در سال ۲۰۱۱ توسط رامین رجیبون به طور کامل با جزیيات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت [۵۶]. عملکرد مطلوب این الگوریتم در مسائل مختلف بررسی شده است [۵۷]. اکثر پرنده‌گان روش یکسانی برای مادرشدن دارند اما پرنده‌گانی مانند فاخته وجود دارند که هرگز برای خود لانه نمی‌سازند و تخمهای خود را در لانه سایر پرنده‌گان قرار داده و تخمهای پرنده میزان را از بین می‌برند و تخمهای خود را لابه لای تخمهای دیگر در لانه میزان با تقلید از رنگ و الگوی تخمهای موجود در هر لانه قرار می‌دهند تا تخمهایش بخوبی بخواهد 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 تخم گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌یابد. جهت کسب اطلاعات بیشتر در مورد این الگوریتم می‌توان به [۵۶] مراجعه نمود.

۲-۳ روش تاپسیس

این روش برای اولین بار در سال ۱۹۸۱، توسط هوانگ و همکاران^۱ ارایه 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.

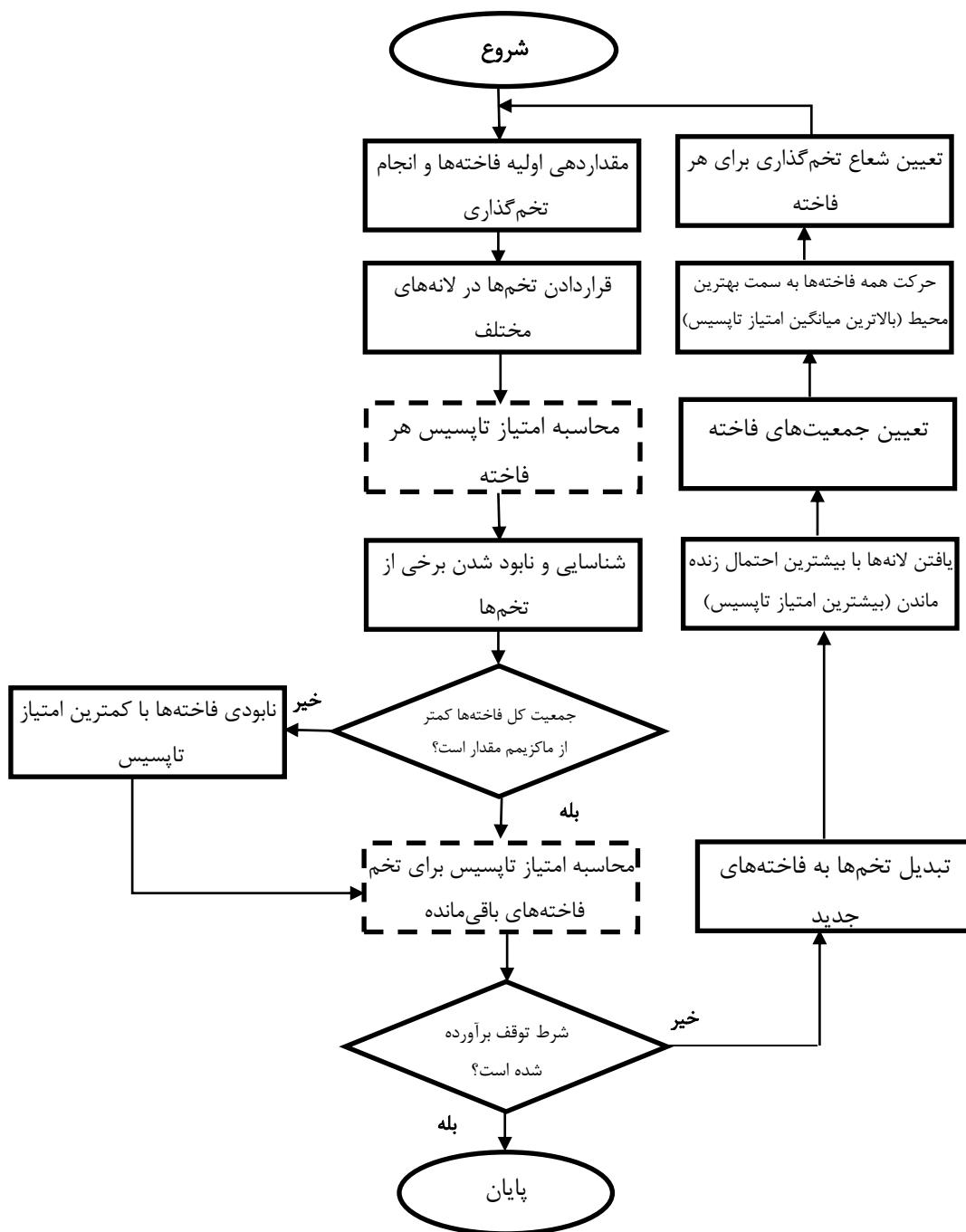
۳-۳ روش ترکیبی جدید فاپسیس

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 مسائل غیرخطی و عدد صحیح با مقیاس بزرگ می‌باشد که قادر به حل مسائل 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 مسائل چندهدفه با مقیاس بزرگ ارایه 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 تابع هدف مساله می‌باشد.

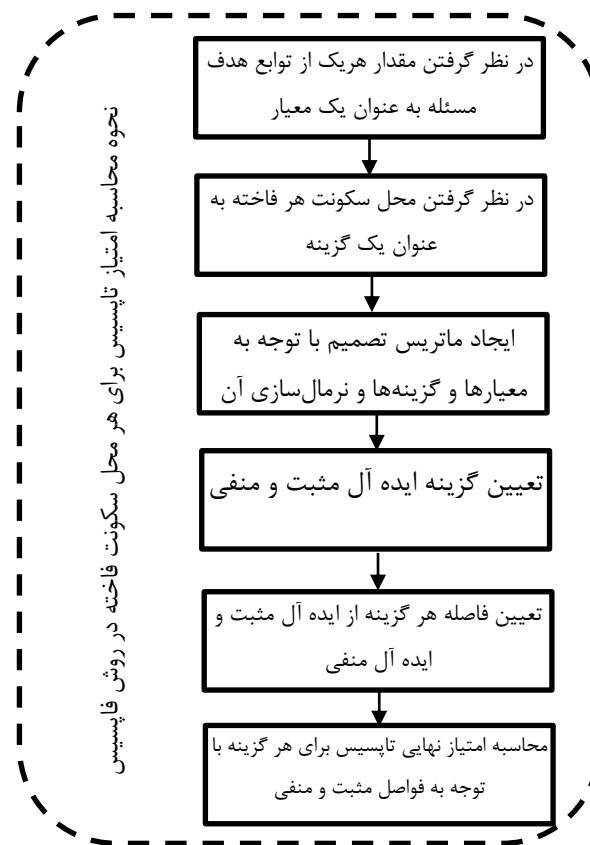
روش تاپسیس بر روی ماتریس تصمیم مذکور اعمال می‌شود و برای هر محل سکونت یک امتیاز تاپسیس محاسبه می‌گردد که این امتیاز مبنای برتری محل سکونت فاخته‌ها می‌باشد. به دلیل این که فاخته توانایی در نظر گرفتن همزمان مقادیر مربوط به تابع هدف را ندارد، امتیاز تاپسیس به عنوان نماینده این مقادیر تابع هدف جایگزین می‌گردد. 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 با توجه 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 پرنده‌گان 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 ایده‌آل مثبت و منفی، با توجه به ماتریس تصمیم ایجاد شده از تابع هدف مساله که قبل از شرح داده شد، بهترین و بدترین مقادیر با توجه به بیشینه و کمینه بودن تابع هدف مساله تعیین می‌گردد و سپس با توجه به مقدار فاصله هر محل سکونت از ایده‌آل مثبت و منفی، مقدار امتیاز تاپسیس برای هر منطقه سکونت محاسبه می‌گردد. ماکریم 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 خوشبندی 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 غیراین صورت فرآیند تخم‌گذاری تکرار می‌شود.

¹ K-means



شكل ۱. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی فاپسیس



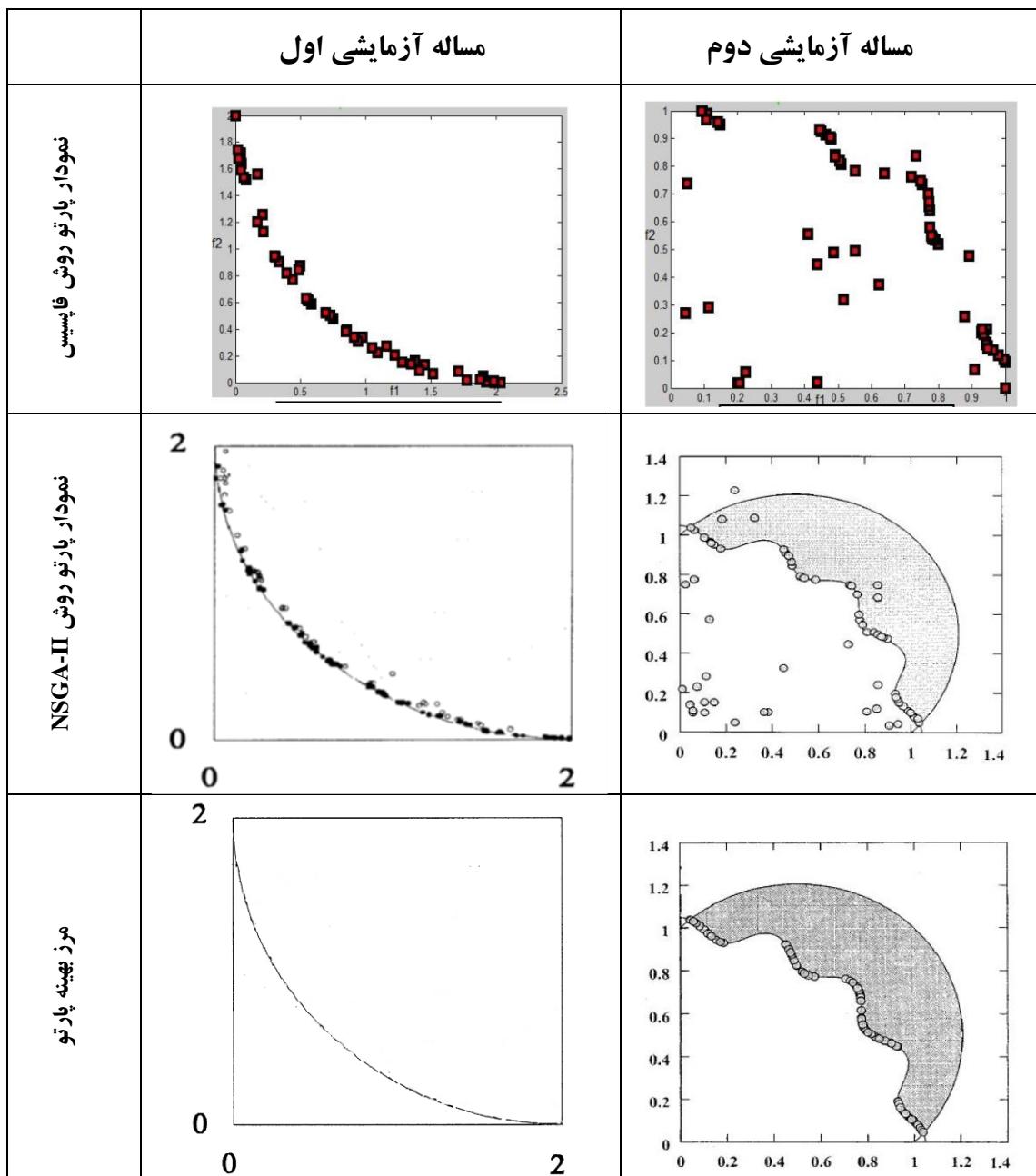
شکل ۲. محاسبه مطلوبیت محل سکونت فاخته به کمک روش تاپسیس

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 شناخته شده NSGA-II^۲ نیز استفاده شده است و مرز پارتو ایجاد شده از این الگوریتم در شکل ۳ آورده شده است.

¹ Test function² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

$$\begin{array}{ll} \min f_1 = x_1 & \min f_1 = x_1 \\ \min f_2 = x_2 & \min f_2 = x_2 \\ s.t. & s.t. \\ (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 2)^2 \geq 4 & \text{Cos}(18 \arctan(\frac{x_1}{x_2})) \geq x_1^2 - 0.1x_2^2 - 1 \\ x_2 \geq \varepsilon & \\ x_1, x_2 \geq 0 & (x_2 - 0.5)^2 + (x_1 - 0.5)^2 \geq -0.5 \\ & x_1 \geq 0, x_2 \geq \pi \end{array} \quad (1) \quad (2)$$



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

مسایلی با مرزهای پارتواست که همیشه از چالش برانگیزترین مسایل در حوزه چنددهدله میباشد و همان طور که در شکل ۳ مشاهده میگردد، روش فاپسیس عملکردی مشابه با روش NSGAII در تعیین مرز پارتواست مسایل آزمایشی دارد و با تقریب خوبی قادر به تشخیص مرز پارتواست دقیق مسایل میباشد. به منظور مقایسه کمی نمودارهای حاصل از هر دو روش از شاخصهایی شناخته شده، استفاده گردیده است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته میشود. اولین شاخص حداکثر گسترش میباشد و هر قدر نقاط در فضای وسیع تری گسترش یافته باشد، این شاخص بزرگتر است. بنابراین مقادیر بالاتر این شاخص مطلوب تر خواهد بود. دومین شاخص فاصله متريک است که يکنواختی نقاط ناچيره را اندازه گيری میکند و در حالتی که نقاط به طور يکنواخت و نزديك به هم قرار بگيرند، مقدار اين شاخص کاهش میيابد. بنابراین هرچه اين شاخص کوچکتر باشد، عملکرد روش بهتر خواهد بود. شاخص سوم تعداد پاسخهای موثر یا شاخص پارتواست میباشد که تعداد نقاط ناچيره حاصل از روش را نشان میدهد و بدويه است که مقادیر بالاتر برای اين شاخص ترجیح داده میشود. برای مطالعه بيشتر در مورد اين شاخصها و مشاهده روابط رياضي مربوطه میتوان به منبع [۶۱] مراجعه نمود.

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

جدول ۳. مقایسه شاخصهای مرز پارتواست برای هر دو روش

شاخص	حداکثر گسترش	فاصله متريک	تعداد پاسخهای موثر
روش فاپسیس	۱۲/۷۸۹	۰/۷۶۸	۴۶
	۱۶/۸۷۶	۰/۸۶۵	۴۰
روش NSGA-II	۱۳/۹۸۷	۰/۷۹۶	۹۵
	۱۷/۹۸۶	۰/۷۹۹	۸۷

۵ مساله انتخاب تامین کننده

در اين مقاله، مساله انتخاب تامين کننده با هدف کميته سازی اهداف هزينه خريد و سفارش و نرخ معیوب در نظر گرفته میشود. اين مدل توسط وادوا^۱ و همکاران ارایه شده است که در ادامه شرح داده میشود [۶۲]. مدل ارایه شده يك مدل چندمعياره از مساله انتخاب تامين کننده گان با چندين خريدار و چندين تامين کننده میباشد که اين مدل برای حالت تک خريدار نيز قابل استفاده است. در اين مدل هر خريدار میتواند يك يا چند محصول از

^۱ Wadhwa

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

- انتخاب زیر مجموعه‌ای از فروشنده‌گان مورد علاقه به منظور برونشاری
- تعیین تعداد سفارش اختصاص‌یافته به هر یک از تامین کننده‌گان به منظور برآورده‌سازی تقاضا مطابق برنامه تولید سازمان

داده‌های استفاده شده در مدل به شرح زیر می‌باشد:

اندیس‌ها:

تعداد نوع محصول	I
تعداد خریدار	J
تعداد کل فروشنده‌گان بالقوه	K
تعداد نقاط شکست (تحفیف) قیمت	M

پارامترها:

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

متغیرهای تصمیم‌گیری:

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

مدل ریاضی:

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m p_{ikm} \cdot X_{ijkm} + \sum_k F_k \cdot Z_k \quad (3)$$

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m q_{ijk} \cdot X_{ijkm} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

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

۶ پیاده‌سازی روش پیشنهادی فاپسیس برای مساله انتخاب تامین‌کننده

در این بخش به حل مساله انتخاب تامین‌کننده که در بخش قبلی ارایه گردید، توسط رویکرد پیشنهادی فاپسیس پرداخته می‌شود. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم، داده‌های مساله انتخاب تامین‌کننده به شرح زیر می‌باشد: فرض می‌شود که دو نوع محصول ($i = 1, 2$)، دو خریدار ($j = 1, 2$) و سه فروشنده یا تامین‌کننده ($K = 1, 2, 3$) 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 تامین‌کنندگان (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 فروشنده‌گان و ظرفیت فروشنده‌گان

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

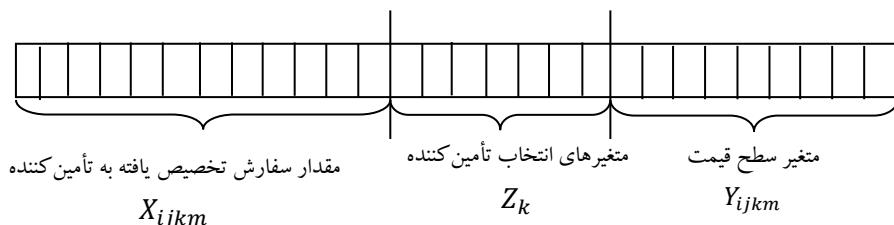
جدول ۶. مقدار تقاضای خریداران از انواع محصولات

۲	۱	خریدار
۲۰۰۰	۲۰۰۰	نوع محصول
۳۰۰۰	۱۵۰۰	۱

جدول ۷. نرخ معیوب اقلام دریافتی از فروشنده‌گان

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

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 تامین‌کننده‌گان می‌باشد، یک ماتریس سطري 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 تامین‌کننده‌گان درنظر گرفته شده است، که عددی بین صفر تا یک را شامل می‌شود و اگر مقدار صفر بگیرد به معنی عدم تخصیص سفارش به تامین‌کننده مربوطه می‌باشد و هر قدر بزرگ‌تر باشد درصد سفارش اختصاص یافته به تامین‌کننده مربوطه نیز بیشتر خواهد شد. بخش دوم و سوم مربوط به متغیرهای صفر و یک مساله می‌باشند که به ترتیب مربوط به انتخاب تامین‌کننده و سطح قیمت تامین‌کننده می‌باشد. بنابراین تمامی متغیرها به صورت بازه

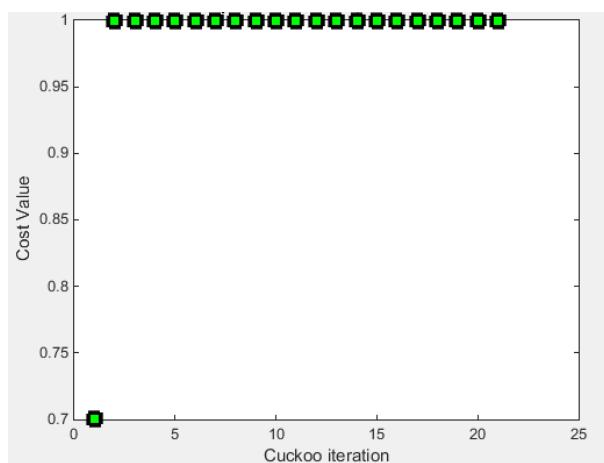
پیوسته صفر تا یک در نظر گرفته می‌شوند و رشتہ اول که مربوط به میزان سفارش اختصاص یافته است باید از درصد به مقدار سفارش تبدیل شود و در مورد متغیرهای دسته دوم و سوم این عدد به نزدیک‌ترین عدد صحیح صفر یا یک تبدیل می‌گردد. یکی دیگر از مسائلی که در پیاده‌سازی الگوریتم باید بررسی گردد، تنظیم پارامترها می‌باشد. تنظیم مطلوب پارامترها در الگوریتم فرالبتکاری 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 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

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

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

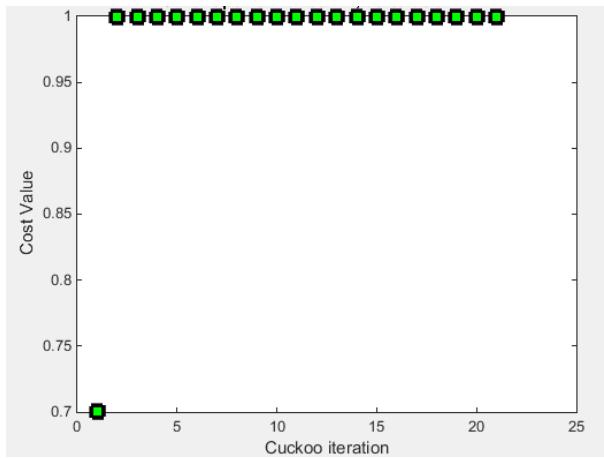
شماره اجرا	تعداد جمعیت اولیه			
	۵	۱۰	۱۵	۲۰
۱	۱۳	۵	۲۵	۵
۲	۲	۱۳	۲	۴
۳	۸	۳	۷	۴۳
۴	۲	۶	۹	۲
۵	۱	۹	۳	۲۱
۶	۱۶	۵	۱۰	۲



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	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				

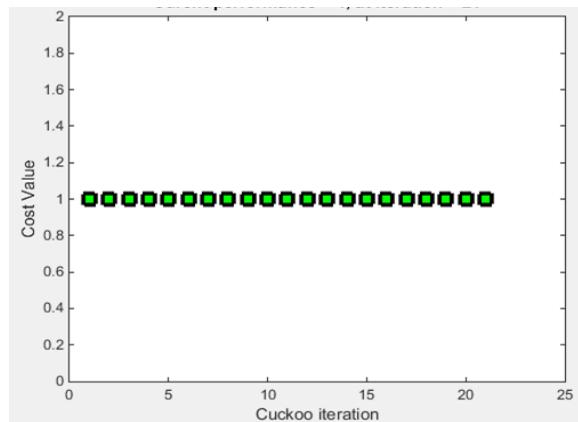


شکل ۶. نمودار مربوط به حداقل و حداکثر تعداد تخم برای هر فاخته

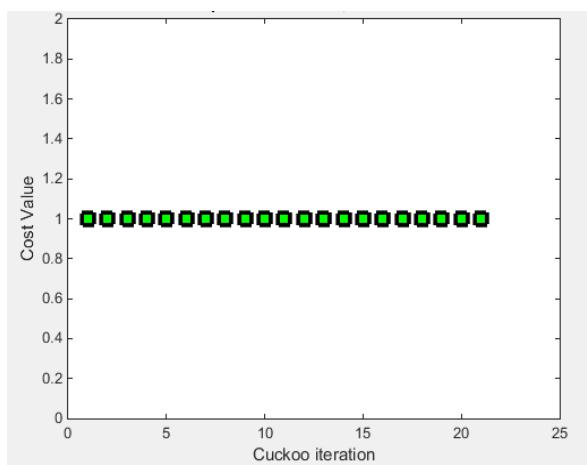
با توجه به جدول ۹ بازه [۲,۶] برای حداقل و حداکثر تعداد تخم انتخاب گردید، زیرا در تکرار اول (مساله چندین بار حل شده است) به جواب یک همگرا گردید. لازم به ذکر است در بازه [۴,۱۰] و [۵,۱۰] زمان رسیدن به جواب بسیار طولانی بود. برای سایر پارامترها این فرآیند به صورت مشابه تکرار می‌گردد. شایان ذکر است با توجه به ماهیت تقریبی الگوریتم‌های فراتکاری، 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

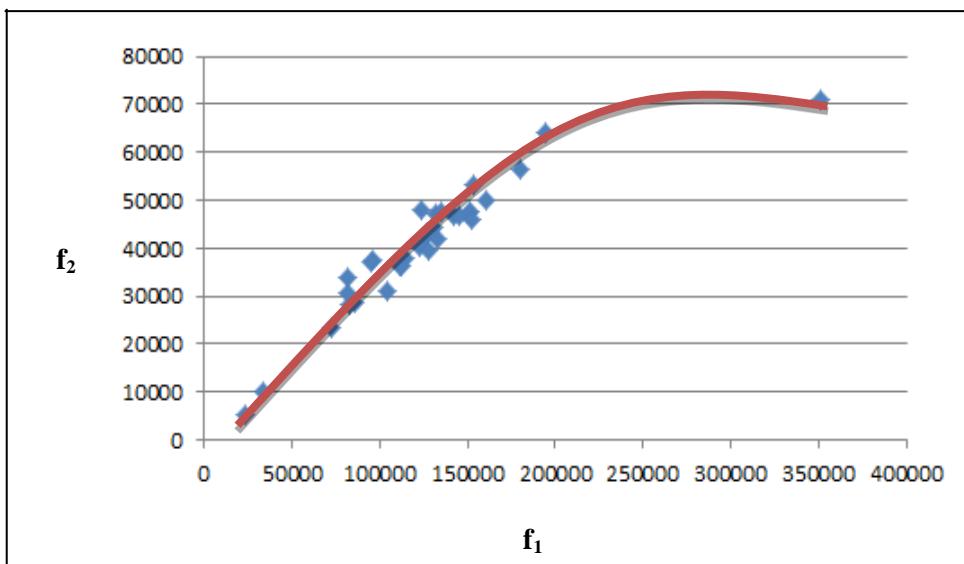
شماره اجرا	حداکثر تعداد تکرار حلقه داخلی				
	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
۱	۲	۵	۳۰	۲۳	۶
۲	۲	۱	۱	۱	۸
۳	---	۶	۱	۴	۱۴

**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 می‌تواند زنده بماند

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

**شکل ۸.** نمودار مربوط به حداکثر تعداد فاخته که در یک زمان می‌تواند 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 همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، روش پیشنهادی فاپسیس نقاط زیادی از این مرز پارتو را ایجاد کرده است و اکثراً با فاصله کمی از مرز پارتو دقیق مساله قرار دارند که نشان‌دهنده دقت بالای این روش می‌باشد.



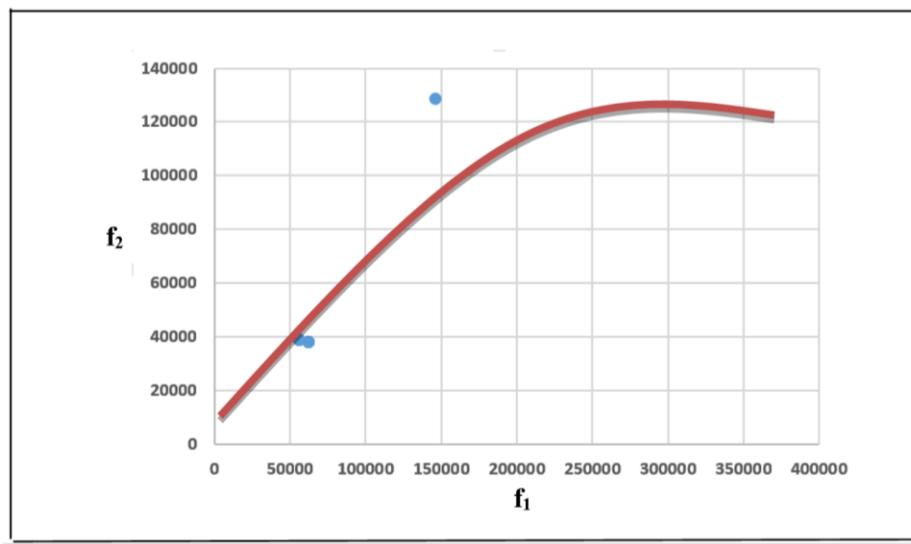
شکل ۹. نمودار تقریبی پارتو ایجاد شده از روش فاپسیس

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 تابع هدف با توجه به روش اپسیلون

f_1	۵۶۰۰۰۰	۱۲۵۶۰۰۰۰	۱۲۶۲۰۰۰۰	۱۳۰۵۶۰۰۰۰	۱۳۱۴۶۰۰۰۰	۱۳۱۶۲۰۰۰۰	۱۳۱۶۲۰۰۰۰
f_2	۳۸۷۵۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰	۱۲۸۷۵۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰	۳۸۷۵۰۰۰	۳۸۷۵۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰

^۱ ε -constraint



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

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با توجه به مرز دقیق پارتواج مساله (منحنی قرمزنگ) تعداد جواب‌های 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 پارتواج دارند و نشان‌دهنده دقت پایین این روش می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد روش‌های حل مسایل چنددهدفه سه معیار دقت، سرعت و تعداد نقاط غیرتکراری پارتواج بررسی می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد جواب‌های ایجادشده از روش فاپسیس به مرز دقیق مساله نزدیک است و نشان‌دهنده دقت روش می‌باشد. همچنین زمان حل این مساله با روش فاپسیس به دلیل استفاده از الگوریتم‌های فراتکاری بسیار کوتاه‌تر (تقریباً ۳۵۰ ثانیه) از روش حل محدودیت اپسیلون (تقریباً ۷۲۰ ثانیه) می‌باشد. در مورد تعداد نقاط پارتواج به وضوح می‌توان از شکل‌های ۸ و ۹، برتری روش فاپسیس را نسبت به روش محدودیت اپسیلون مشاهده نمود.

۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و روش تاپسیس برای ایجاد روش ترکیبی جدید فاپسیس جهت حل مسایل چنددهدفه استفاده گردید. روش ترکیبی پیشنهادی به صورت همزمان از مزایای هر دو روش استفاده می‌کند و محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها را برطرف می‌سازد. بنابراین از روش ترکیبی فاپسیس می‌توان برای حل دقیق و سریع مسایل بهینه‌سازی چنددهدفه در مقیاس بزرگ استفاده نمود. در ابتدا به منظور بررسی عملکرد روش، تعدادی مساله عددی آزمایشی [۵۹] بررسی و نتایج آن با الگوریتم NSGAII مقایسه گردید [۶۰] که نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی می‌باشد. سپس از روش پیشنهادی فاپسیس برای حل مساله انتخاب تامین کننده که یکی از مسایل چنددهدفه با اهمیت در دنیای واقعی است، استفاده شده است. منبع‌یابی و تخصیص سفارش به تامین کنندگان مناسب، هزینه‌های تامین را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش و قابلیت رقابت‌پذیری

سازمان را افزایش می‌دهد. دو معیار با اهمیت در انتخاب تامین کننده‌گان هزینه تامین و کیفیت اقلام دریافتی از تامین کننده‌گان می‌باشد. از این رو در این پژوهش مساله انتخاب تامین کننده با هدف کمینه‌سازی هزینه و نرخ کالا معیوب دریافتی از تامین کننده‌گان 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 در حالی که روش پیشنهادی تعداد زیادی از این نقاط را برای مساله مورد نظر تولید نمود که بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده 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 درنظر 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 درنظر 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., Dabbagh, 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., Khezrimotagh, 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, Niaezi, 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 Modelin 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.