Archive of SID

بررسی مدل احتمالی چندهدفه برای مسئله زنجیرهٔ تأمین حلقه بستهٔ پایدار با در نظرگرفتن مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم نوین ترکیبی بهینه‌سازی نهنگ

آنیتا عبدی[۱]، مصطفی حاجی‌آقایی کشتلی[۲،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۴
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

واژگان کلیدی:
زنجیره تأمین حلقه بسته،
مدل احتمالی،
الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ،
روش‌های ترکیبی فراابتکاری.

چکیده

اخیراً نگرانی‌ها درخصوص آثار زیست‌محیطی و اجتماعی در فعالیت‌های تجاری افزایش یافته است. در حالی که بیشتر مقالات در زمینهٔ طراحی شبکه زنجیره تأمین، بر عملکرد اقتصادی تمرکز دارند، اخیراً برخی مطالعات، ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز مورد توجه قرار داده‌اند. با این حال، هنوز هم شکاف‌هایی در مدل‌سازی آثار اجتماعی همراه با آثار زیست‌محیطی و اقتصادی احساس می‌شود. در این مطالعه، یک مدل احتمالی چندهدفه برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت ارائه می‌شود. اهداف این مدل، کاهش هزینه، افزایش آثار اجتماعی و کاهش آثار زیست‌محیطی است. سپس مدل نه‌تنها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مشهور، نظیر الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی‌شده حل می‌شود، بلکه از الگوریتم جدید بهینه‌سازی نهنگ همراه با روش بهبودیافتهٔ ترکیبی آن نیز برای حل استفاده شده است. با بررسی آزمایش‌های مختلف و مسائل طراحی‌شده، کارایی الگوریتم‌ها با هم مقایسه شده‌اند. نتایج، نشان از اثربخشی الگوریتم جدید ترکیبی بهینه‌سازی نهنگ می‌دهد.

۱- مقدّمه و مرور ادبیات

جامعهٔ بشری در طول تاریخ، همواره به فکر بهبود فرایندها و انجام مسئولیت‌های مختلف بوده است. در این‌باره همواره فلسفه‌هایی در زمینه‌های گوناگون برای بهبود عملکرد و افزایش کارایی در انجام فعالیت‌ها به وجود آمده است. در همین زمینه، نزدیک به سه دهه است که بحث زنجیره تأمین و مدیریت زنجیرهٔ تأمین مطرح شده است. براساس آمار و ارقام موجود، کشورها و سازمان‌هایی که این دانش را به کار گرفته‌اند، پیشرفت‌هایی چشمگیر در حوزه‌های مربوط داشته‌اند و سود سرشار و صرفه‌جویی‌های کلان مالی بابت به‌کارگیری این نگرش نصیبشان شده است. مردم نیز به‌عنوان مشتریان، از این بابت منتفع شده‌اند. با توجه به منفعت‌های زیادی که به خاطر به‌کارگیری مدیریت زنجیرهٔ تأمین حاصل شده است، امروزه این فلسفه در بین سازمان ها و کشورهای مختلف، مقبولیت خاصی یافته، هر روز نیز به مشتاقان آن افزوده می شود. همچنین طی سه دههٔ اخیر، نگرش علمی و آکادمیک به مبحث مدیریت زنجیرهٔ تأمین، بسیار مثبت بوده، مقالات و کتاب‌های بسیاری در این زمینه نوشته شده است.

طراحی شبکه زنجیره تأمین، شامل تصمیمات استراتژیک برای تعیین پیکره کلی زنجیره تأمین است [۱] که به سه ناحیه براساس نوع شبکه طبقه‌بندی شده است: شبکه مستقیم (رو به جلو)، شبکه معکوس (رو به عقب) و شبکه حلقه بسته [۲]. شبکه مستقیم، بیانگر جریان محصولات از تأمین‌کننده به مشتریان است. شبکه معکوس دربردارندهٔ جریان محصولات از مشتریان به مراکز بازیابی است. از این

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mostafahaji@mazust.ac.ir
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

www.SID.ir

Archive of SID

رو مرکز بازیابی محصولات بازگشتی به سه سطح تقسیم می‌شود: ۱. مرکز بازتولید؛ ۲. مرکز بازیافت؛ ۳. مرکز دفع [۳]. متداول‌ترین طراحی شبکه در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین با توجه به مقالات اخیر، شبکهٔ زنجیره تأمین حلقه بسته است [۴]. شبکهٔ حلقه بسته، ترکیبی از شبکهٔ مستقیم و معکوس است. در دو دهه گذشته، بیشتر مقالات با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی، سعی در ایجاد شرایط بهینه در شبکه زنجیره تأمین داشته و در این زمینه از الگوریتم‌های فرابتکاری مختلفی بهره برده‌اند. برای مثال، زهال و سلیمانی در سال ۲۰۱۶، یک مدل زنجیره تأمین مکان‌یابی تخصیص سبز را برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین گسترش دادند و مسئله پیشنهادی خود را با الگوریتم کلونی مورچگان حل کردند [۵]. از طرف دیگر، با توجه به ماهیت داینامیکی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین، پارامترهای مختلف مانند تقاضا، هزینه، فاصله و سایر پارامترهای مرتبط، ممکن است به علت شرایط نامشخص تغییر کند [۶]. از این رو مقالات اخیر بیشتر روی عدم قطعیت در مدل‌های تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین و همچنین ایجاد روش‌های جدید و نو برای حل، متمرکز شده‌اند. در این راه، کوی و گوان در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت در تقاضا و برگشت کالا گسترش دادند [۷]. طلایی و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل فازی عدد صحیح مختلط را برای یک زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه دادند. در دو دهه گذشته مقالات زیادی با تمرکز بر طراحی شبکه زنجیره تأمین، سعی در افزایش اهمیت قابلیت پایداری داشته‌اند. بیشتر مقالات با در نظر گرفتن عوامل محیطی و فاکتورهای اجتماعی، سعی در افزودن هدف در مدل‌های چندهدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین داشتند [۸]. دویکا و همکاران یک مسئله پایدار حلقه بسته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین گسترش دادند و مسئله خود را با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی، حل کردند. [۹].

همان طور که پیش‌تر گفته شد، اخیراً به‌کارگیری الگوریتم های نوین فرابتکاری و روش‌های توسعه‌یافته ترکیبی برای حل مدل‌های تصادفی در طراحی زنجیره تأمین، اهمیت زیادی پیدا کرده است. سلیمانی و کنان در سال ۲۰۱۴، الگوریتم ترکیبی ژنتیک و هوش تجمعی ذرات را برای مسئله پایدار طراحی شبکه زنجیره تأمین پیشنهاد کردند [۱۰]. زهال و سلیمانی در سال ۲۰۱۶، یک مدل پایدار سبز را برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین گسترش دادند و مسئله پیشنهادی خود را با الگوریتم کلونی مورچگان حل کردند [۵]. گویندان و سلیمانی در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای با عنوان طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز ارائه دادند [۱۱]. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای دیگر در حوزهٔ لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته منتشر کردند [۳]. دویکا و همکاران یک مسئله پایدار حلقه بسته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین گسترش دادند و مسئله خود را با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی حل کردند [۹]. موسی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۴ متوجه شدند که لجستیک معکوس و پایداری می تواند تعداد پارامترهای غیرقطعی را در زنجیره تأمین طراحی‌شده افزایش دهد و در نتیجه، بررسی ابهام و عدم قطعیت در چنین شبکه‌هایی بسیار مهم است [۱۲].

اهمیت بررسی عدم قطعیت در SCND[1] در مقالات بسیاری مورد تأکید قرار گرفته است. پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۴ شبکه پایدار زنجیره تأمین پزشکی را تحت شرایط عدم قطعیت ارائه دادند. در مدل پیشنهادی، سه تابع هدف متضاد شامل اقتصادی، زیست‌محیطی و مقررات اجتماعی در زنجیره تأمین سوزن و سرنگ پزشکی بررسی شد. در مدل آن‌ها چهار عامل مقررات اجتماعی، از جمله توسعهٔ محلی، ایجاد فرصت‌های شغلی، ریسک مصرف‌کننده و آسیب به کارگران ارائه شد [۶]. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۱۲ یک رویکرد احتمالی قوی را برای مدل‌سازی زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت اپیستمیک پیشنهاد دادند که فاکتورهای اجتماعی، مانند تعداد محصولات بالقوه خطرناک، تعداد روزهای ازدست‌رفته ناشی از آسیب‌های کاری، میزان ضایعات تولیدشده و تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده را بررسی می‌کرد. بابازاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل چندهدفه در شرایط عدم اطمینان را گسترش دادند و رویکرد پایداری مدل را نیز در نظر گرفتند [۱۳]. حسنی و خسروجردی در سال ۲۰۱۶ یک مدل در شرایط عدم اطمینان برای طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفتند و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله خود پیشنهاد دادند [۱۴]. در همین زمینه، فتح‌اللهی فرد و

[1] Supply Chain Network Design (SCND)

www.SID.ir

Archive of SID

همکاران در سال ۲۰۱۷، یک زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت و با در نظر گرفتن ریسک نزولی گسترش دادند. برای حل مسئله، سه الگوریتم مشهور فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم رقابت استعماری، مورد استفاده واقع شده بود [۱۵]. کوی و گوان در سال ۲۰۱۷ مقاله‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت در تقاضا و برگشت کالا ارائه کردند [۷]. سرویدی و سرانکا در سال ۲۰۱۷ در مقاله‌ای با عنوان عدم قطعیت و ریسک در زنجیره تأمین، به بررسی این دو عامل در زنجیره تأمین پرداختند [۱۶]. همان طور که پیش‌تر اشاره شد، بیشتر مقالات در این حوضه از برنامه‌ریزی اعداد مختلط برای توسعهٔ مدل‌های خود استفاده کردند. این مدل‌ها یا به صورت تک‌هدفه برای تخصیص تسهیلات در زنجیره یا به صورت چندهدفه در مدل‌های حلقه بسته است. پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی مختلط خطی برای یک شبکه لجستیک معکوس چندمرحله‌ای که در آن دو نوع هزینه حمل‌ونقل (یکی ثابت و دیگری متغیر) در یک سیستم رفت و بازگشتی در نظر گرفته شده، توسعه دادند. چون مدل ارائه‌شده از جنس NP-hard بود، آن‌ها الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده را با یک روش جست‌وجوی همسایگی خاص ارائه دادند. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱، یک مدل پایدار در طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند. در مدل پیشنهادی آن‌ها از بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد که نیاز به ایجاد تعاملی بین هزینه کل زنجیره و شرایط زیست‌محیطی به‌عنوان توابع هدف مسئله بود. کنان و همکاران در سال ۲۰۱۲، مانند کار پیشوایی و همکاران یک شبکه لجستیک معکوس را در نظر گرفتند که در آن، تأثیرات گازهای گلخانه‌ای را نیز منظور شده بود. علاوه بر این، آن‌ها مدل ارائه‌شدهٔ خود را روی یک مطالعه موردی در صنعت پلاستیک ارزیابی کردند. فونسکا و همکاران، یک مدل دوهدفه ارائه دادند که در آن تمام هزینه‌های محیطی و هزینه کل زنجیره را که در یک شبکه لجستیک معکوس به کار گرفته شده بود، کمینه کردند. همچنین آن‌ها از یک برنامه‌ریزی دومرحله‌ای با عدم قطعیت استفاده کردند که در آن، هزینه‌های خرید و هزینه‌های ضایعات سیستم نیز محاسبه شده بود [۱۷]. الهدلهی و مریک در سال ۲۰۱۲، یک مسئله هزینه ثابت و متغیر را برای تخصیص تسهیلات در یک سیستم تولیدی برای مسئله رو به جلو طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفتند. آن‌ها در مدل خود تأثیرات گازهایی مانند دی اکسید کربن را که از وسایل نقلیه انتشار می‌یابد، کمینه کردند. به دلیل اینکه در مدل آن‌ها رسیدن به جواب به صورت مستقیم ممکن نبود، از آزادسازی لاگرانژین در مقاله خود بهره گرفتند [۱۸]. پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل در شرایط اطمینان فازی برای یک SCND رو به جلو با سه مرحله از تولیدکننده تا مصرف‌کننده گسترش دادند. مدل آن‌ها بر مبنای اهمیت بر کمینه‌سازی هزینه‌های زیست‌محیطی و هزینه کل زنجیره شکل گرفته بود. آنان به‌خوبی نشان دادند که مدل آن‌ها و روش تولید جواب برای یک مطالعه موردی، بسیار کارآمد است [۱۹]. وحدانی و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک شبکه معتبر لجستیکی مستقیم/معکوس را تحت شرایط عدم قطعیت در صنعت آهن و فولاد پیشنهاد دادند [۲۰]. طلایی و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل فازی عدد صحیح مختلط را برای یک SCND حلقه بسته توسعه دادند. آن‌ها همچنین از دو تابع کمینه‌سازی برای کمینه کردن تأثیرات گاز منوکسید کربن بر وسایل نقلیه استفاده کردند. علاوه بر این، بازرسی و نظارت و سیستم‌های پاک برای کاهش صدمات زیست محیطی بر اهمیت تولید پایدار می‌افزود [۲۱]. ایی و همکاران در سال ۲۰۱۶، گزارشی را بر مبنای نقش پایداری بر یک لجستیک معکوس کارا در زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه دادند. در سال‌های گذشته، طراحی یک شبکه لجستیک معکوس، بسیار مورد علاقه محققان بوده است. فلیشمن و همکاران یک برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد دادند [۲۲]. عملیات لجستیک معکوس قابلیت اجرا در سیستم‌های رو به جلو را نیز دارد. اسکولتمن و همکاران مطالعه‌ای موردی از شبکه ذکرشده را در کشور آلمان پیاده‌سازی کردند. زهال و سلیمانی در سال ۲۰۱۶، یک مدل SCND حلقه بسته سبز را برای بررسی مقدار دی‌اکسید کربن در صنعت طلا مورد بررسی قرار دادند [۵]. پیشوایی و همکاران یک مدل چندهدفه فازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری سنتی، مانند جست‌وجوی ممنوع و روش آزادسازی لانگرانژین را ارائه کردند. فقط دهقانیان و منصور و همچنین پیشوایی و همکاران، فاکتورهای اجتماعی را برای مدل SCND خود منظور کردند.

با توجه به بررسی جامع گویندان و همکاران در سال ۲۰۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

در لجستیک معکوس و CLSC[1]، اتخاذ روش‌های غیرمتمرکز برای بررسی عدم قطعیت به روش‌های واقعی‌تر و توجه به پارامترهای غیرقطعی جدید، دو مسئله‌ای هستند که باید در مطالعات جدید صورت‌گرفته در حوزهٔ لجستیک معکوس و CLSC بررسی شوند. روش برنامه‌ریزی تصادفی- احتمالی، روشی کارآمد است که می‌تواند عدم قطعیت فازی و فازی-تصادفی را بررسی کند. این روش با موفقیت در کاربردهای متعدد مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. در سال ۲۰۱۸، مدل‌های زیادی برای زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده شده است. در مرجع شماره [۳۰]، فتح‌اللهی فرد و همکاران، الگوریتم‌های ترکیبی را برای حل یک مدل سه‌سطحی برای زنجیره تأمین حلقه بسته به کار گرفتند. آن‌ها در مقاله‌ای دیگر به بررسی آثار اجتماعی در شبکه زنجیره تأمین حلقه با استفاده از یک مدل احتمالی چندهدفه پرداختند [۳۱]. فتح‌اللهی فرد و حاجی‌آقایی کشتلی یک مدل چندهدفه احتمالی برای مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن آثار زیست‌محیطی توسعه دادند [۳۲]. در کاری جامع‌تر، با در نظر گفتن آثار زیست‌محیطی و اجتماعی، صمدی و همکاران یک مدل قطعی سه‌هدفه را در این‌باره گسترش دادند. در نظر گرفتن عملیات مسیریابی نقلیه و همچنین توسعه یک مدل احتمالی، از تفاوت‌های عمدهٔ کار آن‌ها با این مقاله است.

با توجه به پژوهش‌های بیان‌شده و مقالات مروری در این حوزه، از میان بیش از ۱۰۰ مقالهٔ به چاپ رسیده در دهه اخیر، تنها تعداد کمی به بیان عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی پرداخته‌اند و مدل‌های احتمالی، بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است، به طوری که تعداد تحقیقاتی که از مدل‌های احتمالی در این حوزه استفاده کرده‌اند، به کمتر از ۱۰ مورد می‌رسد. علاوه بر این، موضوع پایداری در زنجیره تأمین، در سال‌های اخیر مطرح شده، مقالات معدودی به بررسی هم‌زمان فاکتورهای زیست‌محیطی و اجتماعی در کنار عوامل اقتصادی پرداخته‌اند. همچنین بحث زنجیره تأمین حلقه بسته و اهمیت دادن به جریان های بازگشتی کالا در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این جریان‌ها اثری مستقیم بر سودهای اقتصادی حاصل از زنجیره و بررسی عوامل زیست‌محیطی دارد. به طور کلی در بحث زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته، تعداد کارها و مقالات بسیار کم و نیازمند توجه بیشتری است. در کنار همهٔ این‌ها، بررسی تأثیر وسایل نقلیه و بحث مسیریابی در زنجیره تأمین، یک عنوان جدید است. این مقاله نه‌تنها به بررسی پایداری زنجیره تأمین حلقه بسته با یک مدل احتمالی می‌پردازد، بلکه با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه و عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی آن و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی، یکی از جامع‌ترین و کامل ترین کارهای انجام‌شده در این حوزه را گزارش می‌دهد که به بررسی آن خواهیم پرداخت.

برای کنار آمدن با مسئله شرح داده شده و گپ تحقیق گفته‌شده، نوآوری‌های این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- توسعه یک مدل جدید احتمالی تصمیم‌گیری مکان‌یابی-تخصیص-مسیریابی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت
- در نظر گرفتن نرخ ضایعات مختلف برای فناوری‌های مختلف محصولات
- استفاده از روش بهینه‌سازی نهنگ برای اولین بار در این حوزه و ارائه یک روش نوین ترکیبی از آن
- تجزیه و تحلیل مسئله و الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفته شده با استفاده از معیارهای مختلف

علاوه بر این، با توجه به مطالب بیان‌شده، بحث زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و اهمیت دادن به جریان‌های بازگشتی کالا در سال‌های اخیر، مورد توجه قرار گرفته است و یک موضوع به‌روز در این حوزه به حساب می‌آید. این جریان‌ها اثری مستقیم بر سودهای حاصل از زنجیره برای مدیران و تصمیم‌گیران این زنجیره دارد. همچنین بررسی تأثیر وسایل نقلیه و بحث مسیریابی در زنجیره تأمین، یک عنوان جدید است که کمتر در کارهای گذشته مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه این امر تا حد زیادی بر طراحی شبکه تأثیر می‌گذارد، عدم قطعیت باید در زنجیره تأمین مورد توجه قرار گیرد. با توجه به ملاحظات توضیح داده شده در بالا، این مطالعه قصد دارد با ارائه یک مدل احتمالی چندهدفه، شامل هزینه کل، آثار زیست‌محیطی و اجتماعی، مدل تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی در زنجیره تأمین حلقه بسته را توسعه دهد. سایر بخش‌های این مقاله به این عبارت است از: در بخش

[1] Closed-loop Supply Chain (CLSC)

www.SID.ir

Archive of SID

دوم، مدل برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار برای تصمیمات، مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی را نشان می دهیم. روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های پیشنهادشده در بخش سوم آمده است. بخش چهارم به ارزیابی و تجزیه و تحلیل عملکرد الگوریتم‌های معرفی‌شده می‌پردازد و نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم آورده شده است.

۲- تشریح مسئله و مدل پیشنهادی

این مطالعه به بررسی یک مدل احتمالی چندهدفه در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار می‌پردازد که به طور هم‌زمان عدم قطعیت و وجود وسایل نقلیه را بین سطوح مختلف زنجیره در نظر می‌گیرد. همچنین مدل پیشنهادی بر جریان معکوس تأکید دارد که شامل مراکز بازتولید، بازیافت و مرکز مواد دورریختنی است.

مدل ارائه‌شده، فرضیات و محدودیت‌های زیر را مورد توجه قرار می دهد:

۱. موقعیت تأمین‌کننده و مصرف‌کننده، شناخته‌شده و ثابت است.

۲. موقعیت بالقوهٔ تجهیزات سازنده، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و مراکز دفع، مشخص است.

۳. تنها مجوز انتقال جریان بین دو مرحله متوالی وجود دارد. به‌علاوه هیچ جریانی بین تجهیزات موجود در یک مرحله وجود ندارد.

۴. تعداد تسهیلات قابل احداث و ظرفیت آن‌ها محدود است.

۵. میزان قیمت، هزینه‌های تولید، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های جمع‌آوری، هزینه‌های دفع، نرخ تقاضا و بازگشت، غیرقطعی است. همچنین نرخ بازگشت در هر مشتری، به تقاضای مشتری وابستگی دارد.

۶. سایر هزینه‌ها (مانند هزینه ثابت و هزینه حمل‌ونقل) مشخص است.

برای توصیف شبکه لجستیک مذکور، از نمادها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری در جداول ۱ تا ۳ استفاده شده است:

تابع هدف اقتصادی:

هدف اول مدل ارائه‌شده عبارت است از به حداقل رساندن هزینه‌ها که به شرح زیر است:

مجموع هزینه‌های ثابت احداث} Min = کمینه‌سازی هزینه‌ها تسهیلات+ مجموع هزینه‌های متغیر میان تسهیلات+ مجموع هزینه‌های خرید و فروش+ مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل}

روابط (۲) - (۵) مربوط به تابع هدف اول هستند.

(۱) = مجموع هزینه های ثابت احداث تسهیلات

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} FC_{jt}^{J} \cdot Y_{jt}^{J} + \sum_{d=1}^{D} FC_{d}^{D} \cdot Y_{d}^{D} + \sum_{c}^{C} FC_{c}^{C} \cdot Y_{c}^{C} + \sum_{m}^{M} C_{m}^{M} \; Y_{m}^{M} + \sum_{r}^{R} FC_{r}^{R} \cdot r_{r}^{R} + \sum_{n}^{N} FC_{n}^{N} \cdot Y_{n}^{N}$$

(۲) = مجموع هزینه‌های متغیر میان تسهیلات

$$\sum_{f=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{d=1}^{D} X_{jdt}^{JD} \cdot (1-WAS_{t}) VC_{jt}^{J} + \sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L} X_{dl}^{DL} . VC_{d}^{D} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R} X_{cr}^{CR} . VC_{c}^{C} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{N=1}^{N} x_{cn}^{CN} \; . VC_{c}^{C} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} X_{cml}^{CM} . VC_{c}^{C} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J} x_{rj}^{Rj} . VC_{r}^{R} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D} X_{md}^{MD} . VC_{m}^{M} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I} X_{ni}^{NI} . VC_{n}^{N} . VC_{n}^{N}$$

(۳) = مجموع هزینه‌های خرید و فروش

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} PC_{i}^{I} . X_{ijt}^{IJ} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{d=1}^{D}\sum_{t=1}^{T} PC_{j} . X_{jdt}^{JD} . (1-WAS_{t}) + \sum_{j=1}^{L}\sum_{d=1}^{C} PC_{l} . X_{lc}^{LC} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R} PC_{c} . X_{cr}^{CR} . X_{cr}^{CR} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} PC_{c} . X_{cm}^{CM} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} PC_{c} . X_{cm}^{CM} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N} PC_{c} . X_{cm}^{CM} - \sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J} PC_{r} . X_{rj}^{RJ} - \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I} PC_{n} . X_{ni}^{NI} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D} PC_{m} . X_{md}^{MD}$$

(۴) = مجموع هزینه‌های حمل و نقل

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} DIS_{ij}^{IJ} . TC_{k} . Z_{ijk}^{IJ} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{d=1}^{D}\sum_{k=1}^{K} DIS_{jd}^{JD} . TC_{k} . Z_{jdk}^{JD} + \sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K} DIS_{dl}^{DL} . TC_{k} . Z_{dlk}^{DL} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{c=1}^{C}\sum_{k=1}^{K} DIS_{lc}^{LC} . TC_{k} . Z_{lck}^{LC} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} DIS_{cm}^{CM} . TC_{k} . Z_{cmk}^{CM} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} DIS_{nc}^{NC} . TC_{k} . Z_{nck}^{NC} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R}\sum_{k=1}^{K} DIS_{cr}^{CR} . TC_{k} . Z_{crk}^{CR} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D}\sum_{k=1}^{K} DIS_{md}^{MD} . TC_{k} . Z_{mdk}^{MD} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} DIS_{rj}^{RJ} . TC_{k} . Z_{rjk}^{RJ} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} DIS_{ni}^{NI} . TC_{k} . Z_{nik}^{NI}$$

www.SID.ir

Archive of SID

هدف، به حداقل رساندن هزینه‌هاست. هزینه‌های زنجیره تأمین به شرح زیر است: هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات، هزینه‌های متغیر میان تسهیلات، هزینه‌های خرید و فروش و هزینه‌های حمل‌ونقل.

جدول ۱. اندیس‌های تعریف مدل

i : اندیس مراکز تأمین $i \in \{1,2,...,I\}$	m : اندیس مراکز بازتولید $m \in \{1,2,...,M\}$
j : اندیس مراکز تولید $j \in \{1,2,...,J\}$	r : اندیس مراکز بازیافت $r \in \{1,2,...,R\}$
d : اندیس مراکز پخش $d \in \{1,2,...,D\}$	n : اندیس مراکز دور ریختنی $n \in \{1,2,...,N\}$
l : اندیس مرکز فروش $l \in \{1,2,...,L\}$	t : تکنولوژی تولید $t \in \{1,2,...,T\}$
c : اندیس مراکز جمع‌آوری (نظارت و بازرسی) $c \in \{1,2,...,C\}$	k : اندیس وسایل نقلیه $k \in \{1,2,...,K\}$

جدول ۲. پارامترها

α_l : حداکثر درصد محصولات قابل بازگشت (استفاده‌شده توسط مشتری که قابل برگشت است) توسط مرکز فروشl	β : درصد بازگشت محصولات به هریک از بخش‌های بازتولید، بازیافت و دفع که عددی بین صفر و یک است و مجموع سه عدد برابر یک است.
D_l^L : تقاضای مرکز فروش l	Fc_{jt}^J : هزینهٔ ثابت احداث کارخانهٔ j با تکنولوژی t
WAS_t : درصد ضایعات برای تکنولوژی t برای تولید	Fc_n^N : هزینه ثابت احداث مرکز دفع n
Fc_m^M : هزینه ثابت احداث مرکز بازتولید m	Fc_c^C: هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری (نظارت و بازرسی)
Fc_d^D: هزینهٔ ثابت احداث مرکز پخش d	Vc_{jt}^J: هزینهٔ متغیر مرکز تولید j با تکنولوژی t به‌ازای هر واحد محصول
Vc_d^D : هزینهٔ متغیر توزیع به‌ازای هر واحد از محصول	Vc_r^R : هزینهٔ متغیر مرکز بازیافت r به‌ازای هر واحد از محصول
Vc_m^M : هزینهٔ متغیر مرکز باز تولید m به‌ازای هر واحد از محصول	Vc_n^N : هزینهٔ متغیر مرکز دفع n به‌ازای هر واحد از محصول
Vc_c^C : هزینهٔ متغیر مرکز جمع‌آوری (نظارت و بازرسی) c	Pc_i : هزینهٔ خرید مواد اولیه از تأمین کننده ی i
Pc_j: هزینهٔ خرید محصول از تولیدکنندهٔ j	Pc_d : هزینهٔ خرید محصول از مرکز پخش d
Pc_l: هزینهٔ خرید محصول بازگشتی از مرکز فروش l	Pc_c: هزینهٔ خرید محصول بازگشتی از مرکز جمع‌آوری c
Pc_n: هزینهٔ خرید محصول از مرکز دفع n	Pc_r : هزینهٔ خرید محصول بازگشتی از مرکز بازیافت r
Pc_m : هزینهٔ خرید از مرکز بازتولید m	CAP_i^I : ظرفیت تأمین‌کننده i
CAP_{jt}^J : ظرفیت مرکز تولید j با تکنولوژی تولیدی t	CAP_d^D : ظرفیت مرکز پخش d
CAP_c^C : ظرفیت مرکز جمع‌آوری c	CAP_m^M : ظرفیت مرکز بازتولید m
CAP_n^N : ظرفیت مرکز دفع n	CAP_r^R : ظرفیت مرکز بازیافت r
CAP_{Rj}^J : ظرفیت کارخانه ی j برای محصول بازگشتی و بازسازی آن‌ها	TC_K: هزینه وسیله نقلیه k به‌ازای هر واحد مسافت
DIS_{ij}^{IJ} : فاصله بین مرکز تأمین i و مرکز تولید j (برحسب km)	DIS_{id}^{JD} : فاصله بین مرکز تولید j مرکز پخش d
DIS_{dl}^{DL} : فاصله بین مرکز پخش d و مرکز فروش l	DIS_{lc}^{LC} : فاصله بین مرکز فروش l و مراکز جمع‌آوری c
DIS_{cm}^{CM}: فاصله بین مرکز جمع‌آوری c و مرکز باز تولید m	DIS_{cn}^{CN}: فاصله بین مرکز جمع‌آوری c و مرکز دفع n
DIS_{cr}^{CR}: فاصله بین مرکز جمع‌آوری c و مرکز بازیافت r	DIS_{rj}^{RJ}: فاصله بین مرکز بازیافت r و مرکز تولید j
DIS_{ni}^{NI} : فاصله بین مرکز دفع n و مرکز تأمین i	DIS_{md}^{MD}: فاصله بین مرکز بازتولید m و مرکز پخش d

www.SID.ir

Archive of SID

ET_k: آثار زیست‌محیطی مربوط به حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد از مسافت جابه‌جایی مربوط به وسیله نقلیه k	EF_{jt}^{J}: : اثر زیست‌محیطی مربوط احداث کارخانه j با تکنولوژی t
EF_r^R: اثر زیست‌محیطی مربوط به احداث مرکز بازیافت r	EF_n^N: اثر زیست‌محیطی مربوط به احداث مرکز دفع n
EF_m^M: اثر زیست‌محیطی مربوط به احداث مرکز بازتولید m	EF_c^C: اثر زیست‌محیطی مربوط به احداث مرکز جمع‌آوری c
EF_d^D: اثر زیست‌محیطی مربوط به احداث مرکز پخش d	ED: آثار زیست‌محیطی آن واحد از محصول که بعد از مصرف توسط مراکز جمع‌آوری و نظارت و بازرسی جمع‌آوری نشده است.
EP_{jt}^{J}: آثار زیست‌محیطی متغیر مربوط به تولید هر واحد از محصول در مرکز تولید j با تکنولوژی t	EP_r^R: اثر زیست‌محیطی بازیافت هر واحد از محصول در مرکز بازیافت r
EP_m^M:: اثر زیست‌محیطی باز تولید هر واحد از محصول جمع‌آوری شده در مرکز بازتولید m	EP_n^N: آثار زیست‌محیطی دفع هر واحد از محصول در مرکز دفع n
EP_d^D: آثار زیست‌محیطی پخش هر واحد محصول در مرکز پخش d	FJ_{jt}^{J}: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مرکز تولید j با تکنولوژی تولید t
FJ_c^C: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مرکز جمع‌آوری	FJ_n^N: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مرکز دفع
FJ_m^M: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مرکز باز تولید	FJ_r^R: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مرکز بازیافت
FJ_d^D: تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده به‌ازای تأسیس مراکز پخش	VJ_{jt}^{J}: تعداد شغل‌های متغیر (وابسته به حجم تولید) برای مرکز تولید j و تکنولوژی t
VJ_r^R: تعداد شغل‌های متغیر وابسته به حجم بازیافت برای مرکز بازیافت r	VJ_n^N: تعداد شغل‌های متغیر وابسته به حجم دفع برای مرکز دفع n
VJ_m^M: تعداد شغل‌های متغیر وابسته به حجم بازتولید برای مرکز بازتولید m	VJ_d^D: تعداد شغل‌های متغیر وابسته به حجم توزیع برای مرکز پخش d
VJ_c^C: تعداد شغل‌های متغیر وابسته به حجم جمع‌آوری مربوط به مرکز جمع‌آوری c	FL_{jt}^{J}: تعداد روزهای ازدست‌دادهٔ کاری برای احداث مرکز تولید j با تکنولوژی t
FL_r^R: تعداد روزهای از دست داده ی کاری برای احداث مرکز بازیافت r	FL_m^M: تعداد روزهای ازدست‌دادهٔ کاری برای احداث مرکز باز تولید m
FL_n^N: تعداد روزهای ازدست‌دادهٔ کاری برای احداث مرکز دفع n	FL_c^C: تعداد روزهای ازدست‌دادهٔ کاری برای احداث مرکز جمع‌آوری c
FL_d^D: تعداد روزهای ازدست‌دادهٔ کاری برای احداث مرکز پخش d	VL_{jt}^{J}: تعداد روزهای ازدست‌داده برای تولید محصولات مورد سفارش با توجه به حجم در مراکز تولید j با تکنولوژی t
VL_r^R: تعداد روزهای ازدست‌داده برای بازیافت در مرکز بازیافت r	VL_n^N: تعداد روزهای ازدست‌داده برای دفع در مرکز دفع n
VL_m^M: تعداد روزهای ازدست‌داده برای باز تولید در مرکز بازتولید m	VL_c^C: تعداد روزهای ازدست‌داده برای جمع‌آوری در مرکز جمع‌آوری c
VL_d^D: تعداد روزهای ازدست‌داده برای توزیع در مرکز پخش d	

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. متغیر های تصمیم گیری:

Y_{jt}^{J} : اگر مرکز تولید j با تکنولوژی تولید t احداث گردد ۱، در غیر این صورت صفر	Y_{d}^{D} : اگر مرکز پخش d احداث گردد ۱، در غیر این صورت صفر
Y_{c}^{C} : اگر مرکز جمع‌آوری c احداث گردد ۱، در غیر این صورت صفر	Y_{r}^{R} : اگر مرکز بازیافت r احداث گردد ۱، در غیر این صورت صفر
Y_{m}^{M} : اگر مرکز بازتولید m احداث گردد ،۱ در غیر این صورت صفر	Y_{n}^{N} : اگر در مرکز دفع n احداث گردد ۱، در غیر این صورت صفر
Z_{ijk}^{IJ} : اگر انتقال از تأمین‌کننده i ام به تولیدکنندهٔ j ام با استفاده از وسیلهٔ نقلیهٔ k ام انجام گیرد ۱، در غیر این صورت صفر.	Z_{jdk}^{JD} : اگر انتقال از تولیدکنندهٔ j ام به مرکز توزیع d ام با استفاده از وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر.
Z_{dlk}^{DL} : اگر انتقال از مرکز توزیع dام به مرکز فروش l ام با استفاده از وسیله نقلیه K ام صورت گیرد ،۱ در غیر این صورت صفر	Z_{lck}^{LC} : اگر انتقال از مرکز فروش l ام به مرکز جمع‌آوری c ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر
Z_{crk}^{CR} : اگر انتقال از مرکز جمع‌آوری cام به مرکز بازیافت r ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر.	Z_{cmk}^{CM} : اگر انتقال از مرکز جمع‌آوری c ام به مرکز بازتولید m ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر
Z_{cnk}^{CN} : اگر انتقال از مرکز جمع‌آوری cام به مرکز دفع n ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر	Z_{nik}^{NI} : اگر انتقال از مرکز دفع n ام به تأمین‌کنندهٔ iام با وسیله نقلیه kام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر
Z_{mdk}^{MD} : اگر انتقال از مرکز بازتولید m ام به مرکز توزیع d ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر	Z_{rjk}^{RJ} : اگر انتقال از مرکز بازیافت r ام به مرکز تولید j ام با وسیله نقلیه k ام صورت گیرد ۱، در غیر این صورت صفر
X_{ijt}^{IJ} : حجم مواد اولیه منتقل‌شده از مرکز تأمین‌کنندهٔ i به مرکز تولیدکننده j با تکنولوژی تولید t	X_{jdt}^{JD} : حجم محصول منتقل‌شده از تولیدکنندهٔ j ام با تکنولوژی t به مرکز توزیع d ام
X_{dl}^{DL} : حجم محصول توزیع‌شده از مرکز توزیع d ام به مرکز فروش lام	X_{lc}^{LC} : حجم محصول جمع‌آوری‌شده از مرکز فروش l به مرکز جمع‌آوری c ام
X_{cr}^{CR} : حجم محصول منتقل‌شده از مرکز جمع‌آوری c ام به مرکز بازیافت r ام	X_{cm}^{CM} : حجم محصول منتقل‌شده از مرکز جمع‌آوری c ام به مرکز باز تولید m ام
X_{cn}^{CN} : حجم محصول منتقل‌شده از مرکز جمع‌آوری c ام به مرکز دفع n ام	X_{rj}^{RJ} : حجم محصول بازیافتی منتقل‌شده از مرکز بازیافت r ام به تولیدکننده j ام
X_{md}^{MD} : حجم محصول بازتولیدی منتقل‌شده از مرکز باز تولید m ام به مرکز پخشd ام	X_{ni}^{NI} : حجم محصول دورریختنی منتقل‌شده از مرکز دفع n ام به تأمین‌کننده i ام

تابع هدف مربوط به اثر زیست‌محیطی:

$$\text{Min} = \begin{bmatrix} \text{اثر زیست محیطی اثر فعالیت تسهیل} \\ + \\ \text{اثرات زیست محیطی اکوسیستم} \\ + \\ \text{مجموع اثرات مربوط به احداث} \\ + \\ \text{مجموع اثرات مربوط به حمل و نقل} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

روابط هدف (۱۰) – (۷) مربوط به تابع هدف دوم است.

= مجموع آثار مربوط به حمل‌ونقل

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k-1}^{K} DIS_{ij}^{IJ}.ET_k.Z_{ijk}^{IJ} + \sum_{i=1}^{J}\sum_{d=1}^{D}\sum_{k-1}^{K} DIS_{jd}^{JD}.ET_k.Z_{jdk}^{JD} + \sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K} DIS_{dl}^{DL}.ET_K.Z_{dlk}^{DL} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{c=1}^{C}\sum_{k-1}^{K} DIS_{lc}^{LC}.ET_k.Z_{lck}^{LC}$$

$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} DIS_{cm}^{CM}.ET_K.Z_{cmk}^{CM} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N}\sum_{k-1}^{K} DIS_{cn}^{CN}.ET_k.Z_{cnk}^{CN} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R}\sum_{k=1}^{K} DIS_{cr}^{CR}.ET_K.Z_{crk}^{CR} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D}\sum_{k-1}^{K} DIS_{md}^{MD}.ET_k.Z_{mdk}^{MD} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k-1}^{K} DIS_{rj}^{RJ}.ET_k.Z_{rjk}^{RJ} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} DIS_{ni}^{NI}.ET_K.Z_{nik}^{NI} \quad (۷)$$

www.SID.ir

Archive of SID

= مجموع آثار مربوط به احداث تسهیلات

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}EF_{jt}^{J}.Y_{jt}^{J}+\sum_{d=1}^{D}EF_{d}^{D}Y_{d}^{D}$$
$$\sum_{c}^{C}EF_{c}^{C}Y_{c}^{C}+\sum_{m=1}^{M}EF_{m}^{M}Y_{m}^{M}$$
$$+\sum_{r=1}^{R}EF_{r}^{R}Y_{r}^{R}+\sum_{n=1}^{N}EF_{n}^{N}Y_{n}^{N}$$

(۸)

(اثر اکوسیستم) آثار زیست‌محیطی عدم جمع‌آوری محصول

$$= ED\times\langle\sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}X_{dl}^{DL}-\sum_{l=1}^{L}\sum_{c=1}^{C}X_{lc}^{LC}\rangle \qquad (۹)$$

= مجموع آثار فعالیت‌های تسهیلات

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{d=1}^{D}X_{jd}^{JD}.(1-WAS_{t}).EP_{jt}^{J}$$
$$+\sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}X_{dl}^{DL}.EP_{d}^{D}+\sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R}x_{cr}^{CR}.EP_{c}^{C}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}X_{cm}^{CM}.EP_{c}^{C}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N}X_{cn}^{CN}.EP_{c}^{C}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J}x_{rj}^{RJ}.EP_{r}^{R}$$
$$+\sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D}X_{md}^{MD}.EP_{m}^{M}+\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}X_{ni}^{NI}.EP_{n}^{N}$$

(۱۰)

تابع هدف مربوط به اثر اجتماعی:

این تابع هدف، از بیشینه‌سازی اختلاف دو عامل آثار اجتماعی مربوط به شغل‌های ثابت و متغیر ایجادشده و آثار اجتماعی مربوط به روزهای کاری ازدست‌رفته ثابت و متغیر، به دست می‌آید. روابط زیر مربوط به تابع هدف سوم است.

=تعداد شغل‌های ثابت ایجادشده

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}Fj_{jt}^{J}.Y_{j}^{J}+\sum_{d=1}^{D}FJ_{d}^{D}Y_{d}^{D}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}FJ_{c}^{C}Y_{c}^{C}+\sum_{m=1}^{M}FJ_{m}^{M}Y_{m}^{M}$$
$$+\sum_{n=1}^{N}FJ_{n}^{N}Y_{n}^{N}+\sum_{r=1}^{R}FJ_{r}^{R}Y_{r}^{R}$$

(۱۱)

= تعداد شغل‌های متغیر ایجادشده

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}VJ_{jt}^{J}.(\sum_{d=1}^{D}(\frac{X_{jdt}^{JD}+(1-WAS_{t})}{CAP_{jt}^{J}}))$$
$$+\sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}VJ_{d}^{D}.\frac{X_{dl}^{DL}}{CAP_{d}^{D}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R}VJ_{c}^{C}.\frac{X_{cr}^{CR}}{CAP_{c}^{C}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N}VJ_{c}^{C}.\frac{X_{cn}^{CN}}{CAP_{c}^{C}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}VJ_{c}^{C}.\frac{X_{cm}^{CM}}{CAP_{c}^{C}}+$$
$$+\sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J}VJ_{r}^{R}.\frac{X_{rj}^{RJ}}{CAP_{r}^{R}}$$
$$+\sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D}VJ_{m}^{M}.\frac{X_{md}^{MD}}{CAP_{m}^{M}}+\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}Vj_{n}^{N}.\frac{X_{ni}^{NI}}{CAP_{n}^{N}}$$

(۱۲)

= تعداد روزهای ازدست‌رفته برای احداث

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}FL_{jt}^{J}.Y_{jt}^{J}+\sum_{d=1}^{D}FL_{d}^{D}.Y_{d}^{D}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}FL_{c}^{C}Y_{c}^{C}+\sum_{r=1}^{R}FL_{r}^{R}Y_{r}^{R}$$
$$+\sum_{n=1}^{N}FL_{n}^{N}Y_{n}^{N}+\sum_{m=1}^{M}FL_{m}^{M}Y_{m}^{M}$$

(۱۳)

=تعداد روزهای متغیر ازدست‌رفته براساس حجم فعالیت

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}VL_{jt}^{J}.(\sum_{d=1}^{D}(\frac{x_{jdt}^{JD}\times(1-WAS_{t})}{cap_{jt}^{J}}))$$
$$+\sum_{d=1}^{D}\sum_{l=1}^{L}VL_{d}^{D}.\frac{X_{dl}^{DL}}{CAP_{d}^{D}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{r=1}^{R}VL_{c}^{C}.\frac{X_{cr}^{CR}}{CAP_{c}^{C}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{n=1}^{N}VL_{c}^{C}.\frac{X_{cn}^{CN}}{CAP_{c}^{C}}$$
$$+\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}VL_{c}^{C}.\frac{X_{cm}^{CM}}{CAP_{c}^{C}}$$
$$+\sum_{r=1}^{R}\sum_{j=1}^{J}VL_{r}^{R}.\frac{X_{rj}^{RJ}}{CAP_{r}^{R}}$$
$$+\sum_{m=1}^{M}\sum_{d=1}^{D}VL_{m}^{M}.\frac{X_{md}^{MD}}{CAP_{d}^{D}}$$
$$+\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}VL_{n}^{N}.\frac{X_{ni}^{NI}}{CAP_{n}^{N}}$$

(۱۴)

محدودیت‌ها:

این بخش، محدودیت‌های پیشنهادی را بیان می‌کند.

محدودیت مربوط به جریان محصول:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N} X_{ni}^{NI} + \sum_{i=1}^{I} X_{ijt}^{IJ} = \sum_{d=1}^{D} X_{jdt}^{JD}.(1-WAS_t) + \sum_{r=1}^{R} X_{rjt} \quad \forall j,t \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{r=1}^{M}\sum_{d=1}^{D} (X_{dl}^{DL} + X_{md}^{D}) = D_l \quad \forall l \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{l=1}^{L} X_{lc}^{LC} = x_l . D_L \quad \forall l \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{c=1}^{C} X_{lc}^{LC} = \sum_{m=1}^{M} \beta_m . X_{cm}^{CM} + \sum_{r=1}^{R} \beta_R . X_{cr}^{CR} + \sum_{n=1}^{N} \beta_N . X_{cn}^{CN} \quad \forall c \qquad (۱۸)$$

محدودیت (۱۵) بیان می‌کند که مجموع مواد ارسالی از مرکز تأمین به مرکز تولید و مواد ارسالی از مرکز دفع به مرکز تأمین، برابر با مقدار جریان موادی است که از مراکز تولید به مراکز توزیع می رود (به انضمام مواد بازیافتی که به تولیدکننده بازمی‌گردد). محدودیت (۱۶) بیان می‌کند که میزان محصولاتی که مرکز پخش آن را توزیع می‌کند (بعلاوهٔ محصولاتی که از مرکز بازتولید به مرکز توزیع باز می‌گردد) برابر با میزان تقاضای مصرف‌کننده است. محدودیت (۱۷) بیان می‌کند که جریان محصولاتی که مرکز جمع‌آوری از مراکز فروش جمع‌آوری می‌کند، به اندازهٔ درصدی از تقاضای مصرف‌کنندگان است. محدودیت (۱۸) می‌گوید که مجموع محصولاتی را که مرکز جمع‌آوری از مراکز فروش دریافت می‌کند، برابر است با مجموع درصدی از محصولاتی که به سه مرکز بازتولید، بازیافت و دفع ارسال می‌کند.

محدودیت ظرفیت تسهیلات:

محدودیت‌های (۱۹)-(۲۵) بیان می‌کند که جریان محصولات بین تسهیلات، حداکثر به اندازهٔ ظرفیت تسهیل مقصد است.

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} X_{ijt}^{IJ} \le CAP_j^I \ \forall_i \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{d=1}^{D} X_{jdt}^{JD} \le CAP_{jt}^{J} Y_{jt}^{J} \forall_{j,t} \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{l=1}^{L} X_{dl}^{DL} \le CAP_d^D Y_d^D \ \forall_d \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{l=1}^{L} X_{lc}^{LC} \le CAP_c^C Y_c^C \ \forall_c \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{c=1}^{C} X_{cm}^{CM} \le CAP_m^M Y_m^M \ \forall_m \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{c=1}^{C} X_{cr}^{CR} \le CAP_r^R Y_c^R \ \forall_r \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{c=1}^{C} X_{cn}^{CN} \le CAP_n^N Y_n^N \ \forall_n \qquad (۲۵)$$

محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه برای جابه‌جایی مواد و محصولات:

محدودیت‌های (۲۶) – (۳۵) بیانگر این است که بار تخصیص‌یافته میان دو تسهیل نباید از ظرفیت بارگذاری وسیله نقلیه مورد استفاده برای سیستم، بیشتر باشد.

$$X_{ijt}^{IJ} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{ijk}^{IJ} . CAP_k^K \quad \forall_{i,j,t} \qquad (۲۶)$$

$$X_{jdt}^{JD} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{jdk}^{JD} . CAP_k^K \quad \forall_{j,d} \qquad (۲۷)$$

$$X_{dl}^{DL} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{dlk}^{DL} . CAP_k^K \quad \forall_{d,l} \qquad (۲۸)$$

$$X_{lc}^{LC} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{lck}^{LC} . CAP_k^K \quad \forall_{l,c} \qquad (۲۹)$$

$$X_{cr}^{CR} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{crk}^{CR} . CAP_k^K \quad \forall_{c,r} \qquad (۳۰)$$

$$X_{cm}^{CM} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{cmk}^{CM} . CAP_k^K \quad \forall_{c,m} \qquad (۳۱)$$

$$X_{cn}^{CN} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{cnk}^{CN} . CAP_k^K \quad \forall_{c,n} \qquad (۳۲)$$

$$X_{rj}^{RJ} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{rjk}^{RJ} . CAP_k^K \quad \forall_{r,j} \qquad (۳۳)$$

$$X_{md}^{MD} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{mdk}^{MD} . CAP_k^K \quad \forall_{m,d} \qquad (۳۴)$$

$$X_{ni}^{NI} \le \sum_{k=1}^{K} Z_{nik}^{NI} . CAP_k^K \quad \forall_{n,i} \qquad (۳۵)$$

محدودیت‌های(۳۶) - (۴۵) بیان می‌کند که فقط یک نوع وسیله نقلیه برای انتقال میان تسهیلات انتخاب می‌شود.

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{jdk}^{JD} = 1 \quad \forall_{j,d} \qquad (۳۶)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{dlk}^{DL} = 1 \quad \forall_{d,l} \qquad (۳۷)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{lck}^{LC} = 1 \quad \forall_{d,l} \qquad (۳۸)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{crk}^{CR} = 1 \qquad \forall_{c,r} \qquad (۳۹)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{cmk}^{CM} = 1 \qquad \forall_{c,m} \qquad (۴۰)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{cnk}^{CN} = 1 \qquad \forall_{c,n} \qquad (۴۱)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{nik}^{NI} = 1 \qquad \forall_{n,i} \qquad (۴۲)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{mdk}^{MD} = 1 \qquad \forall_{m,d} \qquad (۴۳)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{rjk}^{RJ} = 1 \qquad \forall_{r,j} \qquad (۴۴)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{ijk}^{IJ} = 1 \qquad \forall_{i,j} \qquad (۴۵)$$

محدودیت زیر بیان می‌کند که تنها یک تکنولوژی برای هر مرکز، قابل احداث است.

$$\sum_{t=1}^{T} Y_{jt} = 1 \qquad \forall_{j} \qquad (۴۶)$$

محدودیت (۴۷) - (۵۲) بیانگر بیشینهٔ تسهیلات مورد نیاز برای هر سطح از تسهیلات است که برای هر سطح، تنها مجاز به احداث کدام یک از تسهیلات هستیم.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J} Y_{jt} \leq MaxJ \qquad (۴۷)$$

$$\sum_{d=1}^{D} Y_{d}^{D} \leq MaxD \qquad (۴۸)$$

$$\sum_{c=1}^{C} Y_{c}^{C} \leq MaxC \qquad (۴۹)$$

$$\sum_{r=1}^{R} Y_{r}^{R} \leq MaxR \qquad (۵۰)$$

$$\sum_{m=1}^{M} Y_{m}^{M} \leq MaxM \qquad (۵۱)$$

$$\sum_{n=1}^{N} Y_{n}^{N} \leq MaxN \qquad (۵۲)$$

و در پایان، علامت متغیرهای تصمیم‌گیری تضمین شده است.

$$Z_{rjk}^{RJ}, Z_{mdk}^{MD}, Z_{nik}^{NI}, Z_{cnk}^{CN}, Z_{cmk}^{CM}, Z_{crk}^{CR}, Z_{dlk}^{DL}, Z_{lck}^{LC},$$

$$Z_{jdk}^{JD}, Z_{ijk}^{IJ}, Y_{n}^{N}, Y_{m}^{M}, Y_{r}^{R}, Y_{c}^{C}, Y_{d}^{D},$$

$$Y_{jt} \in \{0,1\} \qquad (۵۳)$$

$$X_{ijt}^{IJ}, X_{lc}^{LC}, X_{dl}^{DL}, X_{cr}^{CR}, X_{cm}^{CM}, X_{cn}^{CN}, X_{rj}^{RJ}, X_{md}^{MD},$$

$$X_{ni}^{NI} \geq 0 \qquad (۵۴)$$

۳- روش حل

این مقاله به منظور حل مسئله شرح داده شده، از روش‌های نوین فراابتکاری استفاده می‌کند. به طور کلی روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های فراابتکاری، به جواب نزدیک به بهینه در زمان مناسبی می رسند. این الگوریتم‌ها معمولاً از قدرت حل بالایی برخوردارند و برای مسائل با ابعاد بزرگ نیز به جواب قابل قبولی می‌رسند [۱۵]. این مطالعه از دو روش سنتی فراابتکاری، نظیر الگوریتم‌های ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده که مبتنی بر علم فیزیک است [۲۳]، استفاده می‌کند. این دو الگوریتم، از مشهورترین روش‌های فراابتکاری استفاده‌شده در مقالات است. توضیحات مربوط به این الگوریتم‌ها در مقاله‌های متعدد پیش‌گفته، آورده شده است. برای توضیحات مربوط به الگوریتم‌های ذکرشده، این مقالات پیشنهاد می‌شود. [۲۴ و ۲۵]. علاوه بر این، همان طور که پیش‌تر بیان شد، این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ که به‌تازگی ابداع شده و الگوریتم ترکیبی آن با بهبود الگوریتم در فازهای جست‌وجو استفاده می‌کند. این الگوریتم‌ها در ادامه بیان می‌شود. شایان ذکر است برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها، از روش کروموزوم استفاده شده در مقالهٔ فتح‌اللهی فرد و حاجی‌آقایی کشتلی [۲] استفاده شده است.

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ[1]

نکته جالب زندگی نهنگ‌ها که منبع الهام این الگوریتم بوده، شیوهٔ تغذیه و شکار در نهنگ‌های گوژپشت است که به نام شکار حبابی شناخته می‌شود. در این روش، هر نهنگ حباب‌های هوا را در زیر دریا آزاد می‌کند و دیوارهایی از هوای بالارونده در آب پدید می‌آورد. کریل‌ها و ماهیانی که درون دیوار هوایی هستند، از ترس به مرکز محدودهٔ دایره‌شکل حبابی می‌روند و در این هنگام نهنگ با باز کردن دهان خود تعداد بسیاری از آن‌ها را در یک بار بالا آمدن از آب می‌بلعد. سیدعلی میرجلالی در سال ۲۰۱۶ این الگوریتم را ارائه کرد. برای توضیحات بیشتر، خواننده محترم می‌تواند به مقاله مذکور مراجعه کند [۲۶]. شبه کد الگوریتم مورد نظر در شکل (۱) آورده شده است.

[1] Whale Optimization Algorithm (WOA)

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲- الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

الگوریتم‌های ترکیبی با به‌کارگیری دو یا چند الگوریتم و استفاده از مزایای آن‌ها، فرصتی را برای ایجاد روشی هوشمند فراهم می‌کنند. در HWISA[1]، ویژگی‌های بهره برداری WOA را با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به‌عنوان یک جست‌وجوی محلی افزایش می‌دهیم. این الگوریتم، قوانین تبرید شبیه‌سازی‌شده در جست‌وجو و پذیرفتن جواب را در نظر می‌گیرد تا عوامل جست‌وجو را در مرحله تودرتوی الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ به‌روز کنند. هدف از این الگوریتم ترکیبی، بهبود خواص WOA است. جزئیات بیشتر در شبه کد زیر توضیح داده شده است (شکل ۲).

```
Initialize the whale's population.
Calculate the fitness of each search agents by considering the proposed RK.
Set the Pareto optimal solutions.
X*=the best search agents.
while (t< maximum number of iteration)
    for each search agent
        Update A, a, C, l, and p;
        if1 (p<0.5)
            if2 (|A|< l)
                Update the position of current search agent by Encircle prey (exploitation phase)
            elseif2 (|A|> l)
                Select a random search agent;
                Update the position of current search agent by search for prey (exploration phase).
            endif2
        elseif1 (p≥0.5)
            Update the position of current search agents by spiral updating position.
        endif1
    endfor
    Check if any search agents goes beyond the search space and amend it.
    Update the X* if there is better solution.
    t=t+1;
endwhile
return X*
```

شکل۱. شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

```
Initialize the whale's population.
Calculate the fitness of each search agents by considering the proposed RK.
Set the Pareto optimal solutions.
X*=the best search agents.
while (t< maximum number of iteration)
    for each search agent
        Update A, a, C, l, and p;
        if1 (p<0.5)
            if2 (|A|< l)
                Generate a neighbor by using local searches
            elseif2 (|A|> l)
                Select a random search agent;
                Compare with the current agent. If there is no imrpoevment occurred, remove it.
            endif2
        elseif1 (p≥0.5)
            Update the position of current search agents by spiral updating position.
        endif1
    endfor
    Check if any search agents goes beyond the search space and amend it.
    Update the X* if there is better solution.
    t=t+1;
endwhile
return X*
```

شکل۲. شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی نهنگ

[1] Hybrid Whale optimization Improved with Simulated annealing Algorithm (HWISA)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. سطح، شماره و اندازه مسائل

سطح مسئله	شماره مسئله	اندازه مسئله (I , J , D, T , K , L , C , M , N , R)
کوچک	p_1	(۷, ۵, ۹, ۲, ۲, ۱۰, ۲, ۳, ۲, ۲)
	p_2	(۱۱, ۷, ۱۰۲, ۲, ۱۰, ۳, ۵, ۵, ۳)
	p_3	(۱۵, ۹, ۱۱, ۲, ۲, ۱۲, ۴, ۷, ۶, ۴)
	p_4	(۱۹, ۱۱, ۱۲, ۲, ۲, ۱۴, ۵,۹,۸, ۵)
	p_5	(۲۳, ۱۳, ۱۴, ۳, ۳, ۱۶, ۶, ۱۱, ۱۰, ۶)
	p_6	(۲۷, ۱۵, ۱۵, ۳,۳, ۱۸, ۷, ۱۳, ۱۰, ۷)
	p_7	(۳۱, ۱۷ ,۱۸, ۳, ۳, ۲۰, ۸, ۱۵, ۱۲, ۸)
	p_8	(۳۵, ۱۹, ۲۵, ۳, ۳, ۲۲, ۹, ۱۷, ۱۲, ۹)
متوسط	p_9	(۵۵, ۲۹, ۲۸, ۴, ۴, ۳۱, ۱۴, ۱۹, ۱۸, ۱۶)
	p_{10}	(۵۹, ۳۱, ۳۰, ۴, ۴, ۳۳, ۱۵, ۲۱, ۲۰, ۱۷)
	p_{11}	(۶۳, ۳۳, ۴۰, ۴, ۵, ۳۵, ۱۶, ۲۳, ۲۰, ۱۸)
	p_{12}	(۶۷, ۳۵, ۴۵, ۵, ۵, ۳۷, ۱۷, ۲۵, ۲۲, ۱۹)
	p_{13}	(۷۱, ۳۷, ۴۹, ۵, ۶, ۳۹, ۱۸, ۲۷, ۲۲, ۲۰)
	p_{14}	(۷۵, ۳۹, ۵۶, ۶, ۶, ۴۱, ۱۹, ۲۹, ۲۴, ۲۱)
	p_{15}	(۷۹, ۴۱, ۶۳, ۶, ۶, ۴۳, ۲۰, ۳۱, ۲۴, ۲۲)
	p_{16}	(۸۳, ۴۳, ۷۰, ۶, ۶, ۴۵, ۲۱, ۳۳, ۲۶, ۲۳)
بزرگ	p_{17}	(۱۰۳, ۵۳, ۷۵, ۷, ۷, ۵۷, ۲۷, ۳۵, ۳۴, ۲۸)
	p_{18}	(۱۰۷, ۵۵, ۸۰, ۷, ۷, ۵۹, ۲۸, ۳۶, ۳۵, ۲۹)
	p_{19}	(۱۱۱, ۵۷, ۸۵, ۷, ۷,۶۱, ۲۹,۳۷, ۳۷, ۳۰)
	p_{20}	(۱۱۵, ۵۹, ۹۰, ۷, ۸, ۶۳, ۳۰, ۳۸, ۳۹, ۳۱)
	p_{21}	(۱۱۹, ۶۱, ۹۵, ۷, ۸, ۶۵, ۳۱, ۳۹, ۴۰, ۳۲)
	p_{22}	(۱۲۳, ۶۳, ۱۰۰, ۸, ۸, ۶۷, ۳۲, ۴۰, ۴۲, ۳۳)
	p_{23}	(۱۲۷, ۶۵, ۱۰۵, ۸, ۸, ۶۹, ۳۳, ۴۱, ۴۲, ۳۴)
	p_{24}	(۱۳۱, ۶۷, ۱۱۰, ۸, ۸, ۷۱, ۳۴, ۴۲, ۴۳, ۳۵)

جدول ۵. هزینه‌های مربوط به وسایل نقلیه

شماره	مشخصات وسیله نقلیه	هزینه	آثار زیست‌محیطی	ظرفیت وسیله نقلیه
۱	ماشین کوچک تک‌سرنشین	۱	۰,۱۲۷۶	۲۰۰
۲	ماشین کوچک با دو سرنشین	۲	۰,۰۶۳	۲۵۰
۳	ماشین بزرگ تک سرنشین	۲,۵	۰,۲۵۷	۳۰۰
۴	ماشین بزرگ با دو سرنشین	۵	۰,۱۲۸۸	۵۰۰
۵	ماشین بزرگ با چهار سرنشین	۱۰	۰,۰۶۴	۱۰۰۰
۶	قطار	۵۰	۰,۰۶	۱۰۰۰۰
۷	اتوبوس	۲۰۰	۰,۰۸۹	۵۰۰۰۰
۸	هواپیما	۱۰۰۰	۰,۱۷۵۳	۱۰۰۰۰۰

۴- نتایج محاسباتی

برای تولید و محاسبهٔ مقادیر پارامترها، ما با استفاده از مقالهٔ دویکا و همکاران [۹]، پارامترها را تولید کردیم. برای طراحی مسائل، ۲۴ اندازهٔ مختلفهٔ شامل هشت اندازه کوچک، هشت اندازه متوسط و هشت اندازه بزرگ در نظر گرفته شده است. این اندازه‌ها در جدول ۴ و مقادیر مهم پارامترهای حمل‌ونقل از مقاله پایه توسط دویکا و همکاران [۹]، به‌صورت ریز نمایش داده شده است. برای اعتبارسنجی

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم‌ها در اندازه کوچک، از روشی دقیق با پیاده‌سازی با نرم‌افزار گمز[1] استفاده شده است. شایان ذکر است برای افزایش اثربخشی الگوریتم‌ها مقادیر الگوریتم‌ها، پارامترهای الگوریتم‌ها، روش سطح پاسخ در نظر گرفته شده است.

همان طور که در جدول ۵ می‌بینید، برای وسایل نقلیه مورد استفاده در این تحقیق، پارامترهای مربوط آورده شده تا بتوانیم در مورد انتخاب درست وسایل نقلیه با توجه به ظرفیت، هزینه مورد نظر و آثار زیست‌محیطی، تصمیمات بهینه را انتخاب کنیم. همچنین تقاضای تقاضای مشتریان از توزیع نرمال N(100,20) تولید شده است. علاوه بر این، بیشینه تعداد واحدها در هر سطح برابر نیمی از تعداد بالقوه است. برای هزینه ثابت بازگشایی تسهیلات، از تابع زیر استفاده شده است:

$$FC_p^{mean} = \frac{a \times MAX_p}{P} \times \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{K} D_{ip}^{P} \times TC_k}{P \times M \times K} \quad (۵۵)$$

$$FC_p^{\min} = [(1-\delta) \times FC_p^{mean}] \quad (۵۶)$$

$$FC_p^{\max} = [(1+\delta) \times FC_p^{mean}] \quad (۵۷)$$

$$FC_p = U(FC_p^{\min}, FC_p^{\max}) \quad (۵۸)$$

جایی که $\delta \sim U(0, 0.1)$ و $\propto \sim U(35, 45)$ است. هزینه بازگشایی هر تسهیل بر هزینه حمل‌ونقل و فاکتورهای آن تأثیرگذار است. علاوه بر ای،ن ظرفیت تسهیلات را با تخمین تقاضای مورد انتظار به‌صورت زیر تخمین زده، برآورد می‌کنیم:

$$CAP_f^{mean} = \frac{\gamma \times (1+\beta)}{max_f}, \forall\, f = \{j, k, m, n, p, r, s\} \quad (۵۹)$$

$$CAP_f^{min} = \left[(1-\delta) \times p_f^{mean}\right]$$

and $$CAP_f^{max} = \left[(1+\delta) \times p_f^{mean}\right], \forall\, f = \{j, k, m, n, p, r, s\} \quad (۶۰)$$

$$CAP_f = U\left(CAP_f^{min}, CAP_f^{max}\right), \forall\, f = \{j, k, m, n, p, r, s\} \quad (۶۱)$$

γ مجموع تقاضاهایی است که توسط کمینه تقاضای هر سطح محدود شده است. β و δ متغیرهایی هستند که با توزیع $U(0, 0.1)$ توزیع شده‌اند. علاوه بر این، پارامترهای sc_d، sc_m، sc_r و sc_u براساس میانگین هزینه‌های خرید، تولید، حمل دستی و حمل‌ونقل هر محصول تقریب زده شده‌اند که بر پایهٔ هزینه‌های بازگشتی در هر زنجیره رو به جلو محاسبه شده‌اند. در پایان، ω_{em}, ω_{dp} به‌ترتیب برابر ۰,۴ و ۰,۶ هستند. همچنین $\varepsilon_{ld}, \varepsilon_{jo}$ برابر ۰,۳ و ۰,۷ فرض شده‌اند.

۴-۱- پارامترهای اندازه‌گیری

در این بخش، به معرفی چهار شاخص ارزیابی کیفیت جواب های بهینه پارتو (شاخص تنوع (DM)، پراکندگی پاسخ نامغلوب (SNS)، تحلیل پوششی داده (DEA) و درصد غلبه (POD)) می‌پردازیم. این پارامترها در مطالعات پیشین معرفی شده‌اند [۳۱-۳۴].

۴-۲- تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم‌ها

امروزه تنظیم صحیح پارامترها در هر الگوریتمی، نقشی بسزا برای بررسی صحیح آن الگوریتم دارد. ما این عملیات را قبل از اجرای الگوریتم‌ها برای مسائل طراحی، انجام می دهیم. همان طور که قبلاً اشاره شد، در هر الگوریتم نیاز است که فازهای جست‌وجو به‌خوبی تنظیم و تعاملی میان آن‌ها اجرا شود. در این پژوهش برای انتخاب صحیح پارامترها و عملگرها از روش سطح پاسخ (RSM[2]) استفاده شده است. این تکنیک به‌عنوان یکی از تکنیک‌های مشهور برای تنظیم پارامترها به کار می‌رود. این مقاله از روش سطح پاسخ که توسط باکس و ویلسون پیشنهاد شده بود استفاده می‌کند [۲۷]. فاکتورها و سطح‌های مربوط به آن‌ها و آزمایش‌های طراحی‌شده، در جدول ۶ آمده است. در این جدول، مقادیر داخل پرانتز به‌ترتیب بیانگر سطح پایین و بالا برای فاکتور مورد نظر است. علاوه بر این، تمام الگوریتم ها برای یک مسئله اندازه متوسط، مسئله شماره ۱۳ ($p_{۱۳}$) تنظیم شده است. همان‌طور که اشاره شد، روش سطح پاسخ می‌تواند با پارامترهای مناسبی از توابع هدف، کارایی و اثربخشی آن مورد ارزیابی قرار گیرد. متغیرهای داخلی که مقادیرشان در توابع هدف تخمین زده می‌شود، مورد تصمیم گیری واقع می‌شوند. در این‌باره، از یک مدل چندهدفه با منطق فازی استفاده می‌شود. مدل شرح‌داده‌شده در ادامه آمده است:

[1] GAMS

[2] Response Surface Method

www.SID.ir

Archive of SID

$$\max \sum_{i=1}^{s} w_i \propto_i$$
$$s.t. Y_i \le U_i - \propto_i (U_i - L_i) \quad (۶۲)$$
$$-1 \le X_i \le 1$$
$$0 \le \propto_i \le 1$$

s تعداد توابع هدف است، Y_i، w_i و $\propto_i$ همگی ضرایبی مربوط به ith تابع هدف هستند که به‌ترتیب بیانگر وزن مربوط به هر سطح است. U_i و L_i بیانگر کمترین و بیشترین مقدار مربوط به هر فاکتور است که در جدول ذکر شده است. مقادیر تنظیم‌شده پارامترهای الگوریتم و R مربع آن‌ها (R^2) در جدول ۷ آمده است.

جدول ۶. الگوریتم‌ها و فاکتورها و سطح‌های آنان و تعداد آزمایش‌ها

الگوریتم	فاکتورها و سطوح آنان					تعداد آزمایش‌ها، تعداد کل = (n_f, n_{ax}, n_{cp})
الگوریتم نهنگ	MaxIt (۱۵۰، ۳۰۰)	nPop (۱۰۰، ۲۰۰)				۱۳=(۲۲, ۴, ۵)
الگوریتم ترکیبی	MaxIt (۱۵۰، ۳۰۰)	nPop (۱۰۰، ۲۰۰)	Sb-It (۲۰، ۵۰)	T0 (۵۰۰، ۱۰۰۰)	R_α (۰,۹، ۰,۹۹۹)	۴۷=(۲۵, ۱۰, ۵)
الگوریتم ژنتیک	MaxIt (۱۵۰، ۳۰۰)	nPop (۱۰۰، ۲۰۰)	p_c (۰,۵، ۰,۷۵)	p_m (۰,۰۵، ۰,۳)		۲۹=(۲۴, ۸, ۵)
الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	MaxIt (۲۵۰، ۵۰۰)	Sb-It (۲۰، ۵۰)	T0 (۵۰۰، ۱۰۰۰)	R_α (۰,۹، ۰,۹۹۹)		۲۹=(۲۴, ۸, ۵)

جدول ۷. مقادیر نهایی پارامترها و R مربع آن‌ها

الگوریتم	پارامترها	تابع هدف R^2 (%)	زمان پردازش R^2 (%)
الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ	MaxIt =۲۴۰, nPop =۱۶۰	۶۸	۷۶
الگوریتم ترکیبی	MaxIt =۲۱۰, Sb-It =۳۲, T0=۷۰۰, R_α=۰,۹۳۹۶	۷۲	۷۸
الگوریتم ژنتیک	MaxIt =۲۷۵, nPop =۱۸۰, Pc =۰,۷, Pm =۰,۲۵	۶۶	۷۲
الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	MaxIt=۳۵۰, Sb-It=۳۲, T0 =۷۰۰, R_α=۰,۹۳۹۶	۶۶	۶۸

* بیشترین تعداد تکرار = MaxIt، تعداد جمعیت = nPop ، حلقه تکرار درونی = Sb-It ، دمای اولیه = T0 ، نرخ تغییرات = R_α ، احتمال تقاطع= Pc ، احتمال جهش = Pm

۴-۳- مقایسه کارایی و اثربخشی الگوریتم‌ها

روش حل محدودیت اپسیلون [۲۸] و حل در ابعاد کوچک به‌صورت تک‌هدفه با استفاده از نرم‌افزار گمز، از جمله روش‌های پیشنهادی برای حل مسائل به روش دقیق است. در این مقاله در مسائل اندازه کوچک به بررسی اعتبار نتایج الگوریتم‌ها می‌پردازیم. تنها با در نظر گرفتن هزینه‌های اقتصادی، بدون در نظر گرفتن توابع پایداری، به محاسبه تابع هدف می‌پردازیم و نتایج را برای هشت مسئله در سایز کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز حل کرده، با نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری مقایسه می‌کنیم. خروجی این نتایج در جدول ۸ آورده شده است. نتایج یادداشت‌شده خروجی الگوریتم‌ها در ۱۰ تکرار و در نظر گرفتن بهترین مقدار هستند. گپ[1] و فاصلهٔ جواب الگوریتم‌ها از بهترین جواب که توسط روش دقیق پیدا شده است، نشان از اعتبار نتایج الگوریتم‌ها دارد. با این جدول می‌توان ادعا کرد که الگوریتم ترکیبی مقادیر کمتری برای انحرافات از بهترین جواب ممکن داشته است. شایان ذکر است زمان حل برای روش دقیق، چند برابر روش فراابتکاری بوده است. بنابراین می‌توان برای اندازه‌های بزرگ، روش‌های فراابتکاری را در نظر گرفت.

در این مطالعه، کارایی و اثربخشی الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا شایستگی الگوریتم‌های پیشنهادی ترکیبی مشخص شود. در این راه در ابتدا چهار پارامتر ارزیابی‌کننده الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

[1] Gap

www.SID.ir

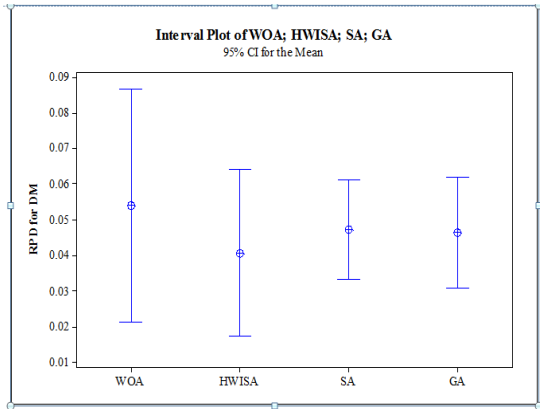
Archive of SID

پارامترهای DM, POD, SNSو DEA براساس مقادیر مجموعه پارتو در هر الگوریتم محاسبه شده که با توجه به محدودیت صفحه مجله در اینجا ذکر نشده است.

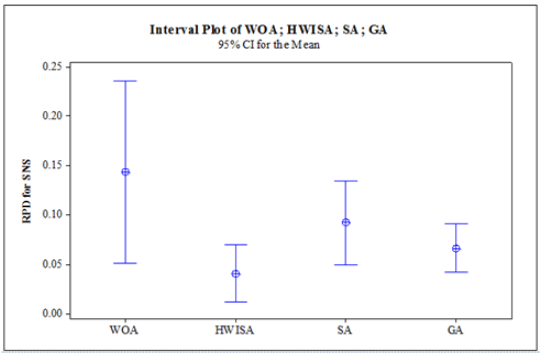
به‌منظور مقایسه رفتار الگوریتم‌ها در هر پارامتر ارزیابی‌کننده، از پارامتر میانگین انحرافات (RPD[1]) استفاده شده است که عبارت زیر، نحوه محاسبهٔ آن را نشان می‌دهد:

$$RPD = \left|\frac{Best_{sol} - Alg_{sol}}{Best_{sol}}\right| \qquad (۶۳)$$

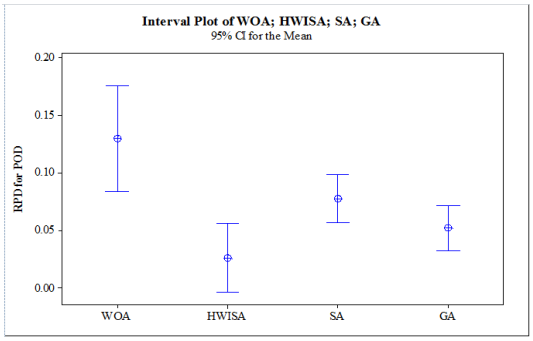
همان طور که در شکل‌های (۳) و (۴) قابل مشاهده است، تفاوتی مشهود میان کارایی و توانایی الگوریتم‌های پیشنهادی قابل استناد است. الگوریتم‌های پیشنهادی، دارای کیفیت جواب‌های بهتری هستند؛ اما نیاز به زمان بیشتری برای محاسبات دارند، نظیر الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی وال و الگوریتم بهینه‌سازی وال. در میان الگوریتم‌ها، بنا بر پارامترهای ارزیاب کیفی الگوریتم‌ها می توان بررسی مشهود ترکیبی بهینه‌سازی وال را از سایر روش‌های فراابتکاری کاملاً حس کرد.



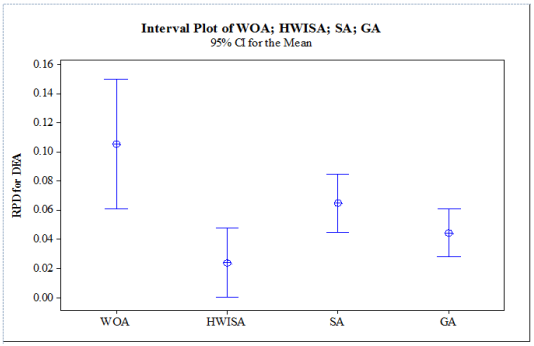
(الف)



(ب)

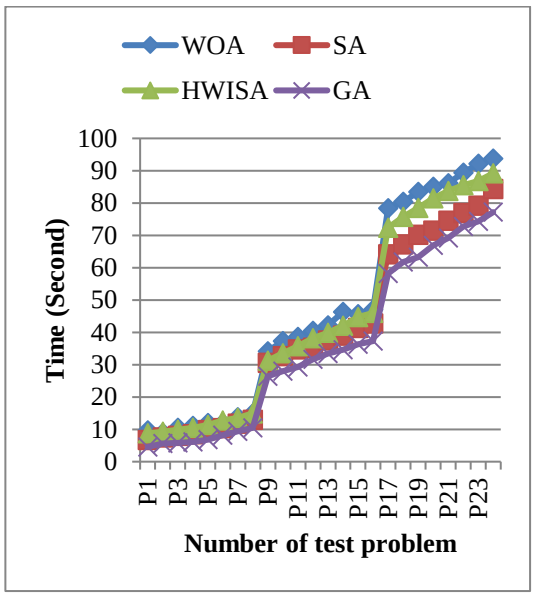


(ج)



(د)

شکل ۳. نمودار انوا با پارامتر انحراف پراکندگی برای مشخصه‌های ارزیابی‌کننده (الف: DM، ب:SNS، ج: POD، د: DEA)



شکل ۴. نمودار مقایسه رشد مسئله و افزایش رشد زمان مسئله

1. Relative Percent Divertion

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۸. اعتبارسنجی مقادیر الگوریتم‌ها با استفاده از روش دقیق

P_i	روش اپسیلون محدودیت	الگوریتم ژنتیک		الگوریتم شبیه‌سازی تبرید		الگوریتم نهنگ		الگوریتم ترکیبی HWISA	
		جواب	میزان شکاف	جواب	میزان شکاف	جواب	میزان شکاف	جواب	میزان شکاف
P۱	۲۳۴۵	۲۷۸۶	۰,۱۸۸۰۵۹۷	۲۵۴۶	۰,۰۸۵۷۱۴۲۹	۲۴۰۸	۰,۰۲۶۸۶۵۶۷	۲۵۱۸	۰,۰۷۳۷۷۳۹۹
P۲	۳۶۵۷	۳۸۶۷	۰,۰۵۷۴۲۴۱۲	۴۰۷۵	۰,۱۱۴۳۰۱۳۴	۳۷۸۶	۰,۰۳۵۲۷۴۸۲	۳۷۱۲	۰,۰۱۵۰۳۹۶۵
P۳	۴۸۱۲	۵۴۲۶	۰,۱۲۷۵۹۷۶۷	۴۹۶۵	۰,۰۳۱۷۹۵۵۱	۴۹۶۵	۰,۰۳۱۷۹۵۵۱	۵۰۶۴	۰,۰۵۲۳۶۹۰۸
P۴	۵۶۹۹	۶۳۵۴	۰,۱۱۴۹۳۲۴۴	۶۷۲۳	۰,۱۷۹۶۸۰۶۵	۶۱۴۵	۰,۰۷۸۲۵۹۳۴	۵۸۲۵	۰,۰۲۲۱۰۹۱۴
P۵	۶۸۴۳	۷۴۴۵	۰,۰۸۷۹۷۳۱۱	۷۱۲۴	۰,۰۴۱۰۶۳۸۶	۷۰۸۲	۰,۰۳۴۹۲۶۲	۷۱۸۴	۰,۰۴۹۸۳۱۹۵
P۶	۹۱۵۴	۹۶۰۷	۰,۰۴۹۴۸۶۵۶	۱۰۵۸۹	۰,۱۵۶۷۶۲۰۷	۱۰۲۵۳	۰,۱۲۰۰۵۶۸۱	۹۸۳۱	۰,۰۷۳۹۵۶۷۴
P۷	۱۰۲۶۷	۱۱۸۳۴	۰,۱۵۲۶۲۴۹۱	۱۲۸۶۵	۰,۲۵۳۰۴۳۷۳	۱۱۰۷۱	۰,۰۷۸۳۰۹۱۵	۱۰۸۴۹	۰,۰۵۶۶۸۶۴۷
P۸	۱۲۸۶۹	۱۳۸۵۳	۰,۰۷۶۴۶۲۸۲	۱۳۹۶۷	۰,۰۸۵۳۲۱۳۱	۱۳۵۴۷	۰,۰۵۲۶۸۴۷۵	۱۳۵۲۶	۰,۰۵۱۰۵۲۹۲
میانگین			۰,۱۰۶۸۲۰۱۷	-	۰,۱۱۸۴۶۰۳۵	-	۰,۰۵۷۲۷۱۵۳	-	۰,۰۴۹۳۵۲۴۹

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای اولین بار از یک روش جدید ترکیبی فراابتکاری از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ برای مسئله احتمالی زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن وسایل نقلیه استفاده شد. در مدل پیشنهادی برای اولین بار بحث ضایعات فناوری‌های مختلف در تولید محصول در فرضیات مدل نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، به منظور نشان دادن کارایی بیشتر الگوریتم معرفی‌شده نه‌تنها خود الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ به‌صورت استاندارد به کار گرفته شده، بلکه از دو الگوریتم قدیمی فراابتکاری، نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده استفاده شده است. در اندازه‌های کوچک، روش دقیق به منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، الگوریتم‌های معرفی‌شده در مسائل استاندارد با استفاده از روش سطح پاسخ تنظیم شده، پس از ۱۰ بار اجرا آنالیزهای مختلفی بر روی الگوریتم‌ها اجرا شد. در پایان، توانایی و اثربخشی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در مسئله فوق به اثبات رسید.

برای مقالات آینده:

- می‌توان تجزیه و تحلیل و آزمایش‌های بیشتری بر روی الگوریتم پیشنهادی انجام داد.
- سایر مسائل بهینه‌سازی می‌تواند برای راستی‌آزمایی نتایج الگوریتم‌ها مورد بررسی قرار گیرد.
- دیگر مدل‌های احتمالی، مانند برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای تصادفی و برنامه‌ریزی فازی می‌تواند برای این مسئله پیشنهادی اعمال شود.
- می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگری چون الگوریتم مورچگان، جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم کشتل و... برای حل مسئله مورد نظر استفاده کرد.
- اضافه کردن محدودیت‌های جدید. به‌عنوان مثال می‌توان مسئله را با اضافه کردن محدودیت بودجه، حل کرد.
- اضافه کردن نوع حمل‌ونقل به‌صورت سه‌بعدی یا فازی.
- اضافه کردن پنجره‌های زمانی سخت برای مدل.
- انجام یک مطالعه موردی.
- ترکیب مسائل کنترل موجودی با مسئله مورد بررسی.
- افزایش توابع هدف، مانند کاهش زمان حمل و... .

مراجع

[۱] احمد ماکوئی، حمید صفاری، میرسامان پیشوایی و وحید محمودیان، «یک مدل چندهدفه استوار برای طراحی زنجیره تأمین با درنظرگیری جریان رو به جلو و عقب و مسئولیت‌پذیری اجتماعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۴، شماره۴۷، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱۷۱-۱۸۵.

[2] A.M.F. Fard and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A tri-level location-allocation model for forward/reverse supply chain", Applied Soft Computing, Vol. 62, 2018, pp. 328-346.

www.SID.ir

Archive of SID

[3] K. Govindan and H. Soleimani, "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains. a journal of cleaner production focus", Journal of Cleaner Production, Vol. 142, 2017, pp. 371-384

[4] M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri and M. Mohammadi, "Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 89, 2016, pp. 182-214

[5] M. Zohal and H. Soleimani, "Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry", Journal of Cleaner Production, Vol. 133, 2016, pp. 314-337.

[6] M.S. Pishvaee, J. Razmi and S.A. Torabi, "An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 67, 2014, pp. 14-38

[7] Y.Y. Cui, Z. Guan, U. Saif, L. Zhang, F. Zhang and J. Mirza, "Close Loop Supply Chain Network Problem with Uncertainty in Demand and Returned Products: Genetic Artificial Bee Colony Algorithm Approach", Journal of Cleaner Production, Article in Press, 2018.

[8] D.M. Lambert, J.R. Stock and L.M. Ellram, "Fundamentals of logistics management", McGraw-Hill/Irwin, Vol. 44, 1998, pp. 243-277.

[9] K. Devika, A. Jafarian and V. Nourbakhsh, "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques", European Journal of Operational Research, Vol. 235, No. 3, 2014, pp. 594-615.

[10] H. Soleimani and G. Kannan, "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks", Applied Mathematical Modelling, Vol. 39, No. 14, 2016, 3990-4012

[11] H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi and H. Jafari, "Fazzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design", Computers and Industrial engineering, Vol. 109, 2017, pp. 191-203

[12] M. Mousazadeh, S.A. Torabi and M.S. Pishvaee, "Green and reverse logistics management under fuzziness. In Supply Chain Management under Fuzziness", Springer Berlin Heidelberg Vol. 23, 2014, pp. 607-637.

[13] R. Babazadeh, J. Razmi, M.S. Pishvaee and M. Rabbani, "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk", Omega, Vol. 66, 2017, pp. 258-277.

[14] A. Hasani and A. Khosrojerdi, "Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 87, 2016, pp. 20-52.

[15] A.M.F. Fard, F. Gholian-Jouybari, M.M. Paydar and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A Bi-objective stochastic closed-loop supply chain network design problem considering downside risk", Industrial Engineering & Management Systems, Vol. 16, No. 1, 2017, pp. 342-62.

[16] R. Sreedevi and H. Saranga, "Uncertainty and supply chain risk: The moderating role of supply chain flexibility in risk mitigation", International journal of production Economics, Vol. 193, 2017, pp. 332-342

[17] M.C. Fonseca, A. García-Sánchez, M. Ortega-Mier and F. Saldanha-da-Gama, "A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics", Top, Vol. 18, No. 1, 2010, pp. 158-184.

[18] S. Elhedhli and R. Merrick, "Green supply chain network design to reduce carbon emissions", Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 17, No. 5, 2012, pp. 370-379.

[19] M.S. Pishvaee, S.A. Torabi and J. Razmi, "Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty", Computers & Industrial Engineering, Vol. 62, No. 2, 2012, pp. 624-632.

[20] B. Vahdani, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Modarres and A. Baboli, "Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 48, No. 6, 2012, pp. 1152-1168.

[21] M. Talaei, B.F. Moghaddam, M.S. Pishvaee, A. Bozorgi-Amiri and S. Gholamnejad, "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry", Journal of Cleaner Production, Vol. 113, 2016, pp. 662-673

www.SID.ir

Archive of SID

[22] M. Fleischmann, P. Beullens, J.M. BLOEMHOF-RUWAARD and L.N. Wassenhove, "The impact of product recovery on logistics network design", Production and operations management, Vol. 10, No. 2, 2001, pp. 156-173.

[۲۳] فرشاد حکیم‌پور، سیامک طلعت اهری و ابوالفضل رنجبر، «ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و فاخته‌ها در مکان‌یابی رقابتی تسهیلات (مطالعه موردی: بانک‌ها)»، مجلهٔ مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۵، شماره ۴۸، ۱۳۹۶، صفحه ۲۳۱-۲۴۶.

[24] M. Hajiaghaei-Keshteli and M. Aminnayeri, "Solving the integrated scheduling of production and rail transportation problem by Keshtel algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 25, 2014, pp. 184-203.

[25] S. Sadeghi-Moghaddam, M. Hajiaghaei-Keshteli and M. Mahmoodjanloo, "New approaches in metaheuristics to solve the fixed charge transportation problem in a fuzzy environment", Neural Computing and Applications, Vol. 68, 2017, pp. 1102-11023.

[26] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm", Advances in Engineering Software, Vol. 95, 2016, pp. 51-67.

[27] R.H. Mayers, C.D. Montgomery and C.M. Anderson-Cook, Response surface methodology, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Vol. 2, 2009, pp. 38-45.

[۲۸] ساناز خطیبی, مرتضی خاکزار بفروئی و مرتضی رحمانی، «مدل‌سازی چندهدفه مسئله تخصیص گیت با استفاده از الگوریتم NSGA-II و محدودیت اپسیلون»، مجلهٔ مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره۵۱، ۱۳۹۶، صفحه ۳۹۷-۴۱۰.

[29] M. Hajiaghaei-Keshteli and A.M. Fathollahi-Fard, "A set of efficient heuristics and metaheuristics to solve a two-stage stochastic bi-level decision-making model for the distribution network problem", Computers & Industrial Engineering, vol. 123, 2018, pp. 378-395.

[30] A.M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghaei-Keshteli and S. Mirjalili, "Hybrid optimizers to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem", Applied Soft Computing. Vol. 70, 2018, pp. 701-722.

[31] A.M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghaei-Keshteli and S. Mirjalili, "Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations", Applied Soft Computing, Vol. 71, 2018, pp. 505-525.

[32] A.M. Fathollahi-Fard and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations", Applied Soft Computing, Vol. 69, 2018, pp. 232-249.

[33] A. Samadi, N. Mehranfar, A.M. Fathollahi Fard and M. Hajiaghaei-Keshteli, "Heuristic-based metaheuristic to address a sustainable supply chain network design problem", Journal of Industrial and Production Engineering. Vol. 35, No. 2, 2018, pp. 102-117.

[34] Y. Fu, Y.G. Tian, A.M. Fathollahi-Fard, A. Ahmadi and C. Zhang, "Stochastic multi-objective modelling and optimization of an energy-conscious distributed permutation flow shop scheduling problem with the total tardiness constraint", Journal of Cleaner Production, Vol. 226, 2019, pp. 515-525.

www.SID.ir