



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۵، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صص ۱۳۷-۱۶۴

مدلسازی و حل مسئله مسیریابی تولید چند محصولی مبتنی بر برونسپاری و ریسک تصادف در حمل و نقل

مرتضی صالحی سربیزن^۱، جواد بهنامیان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹ / ۰۱ / ۲۵

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸ / ۱۱ / ۲۱

چکیده

سازمان‌هایی که برنامه‌یکپارچه تولید و مسیریابی دارند، هنگامی که برای توزیع از وسایل نقلیه استفاده می‌کنند، گاهی با ترافیک مواجه‌اند. بنابراین ریسک‌هایی مانند تصادف وجود دارد که منجر به خسارت، از دست دادن کیفیت محصول، تاخیر اجتناب‌ناپذیر در تحویل و یا حتی اثرات جبران‌ناپذیر شود که بر هزینه‌ها و زمان خدمت‌رسانی تأثیر دارد. لذا با در نظر گرفتن ریسک تصادف در مسئله مسیریابی تولید مدل به واقعیت نزدیکتر می‌شود. در این مطالعه یک مدل مسیریابی تولید با دو هدف کاهش هزینه‌ها و ریسک تصادف در حمل و نقل، با در نظر گرفتن برونسپاری، چند محصولی و چند دوره‌ای پیشنهاد شده است. از آنجاییکه این مسئله NP-hard می‌باشد، به منظور حل مسئله از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب ۲ (NSGA II) استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل جواب‌های به دست آمده از روش محدودیت اسپیلون در ابعاد کوچک با جواب‌های به دست آمده از الگوریتم مقایسه شده است. همچنین برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی و بررسی کارایی آن در ابعاد بزرگ، نتایج حاصل از NSGA II روی مسائل نمونه در مقایسه با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) با استفاده از چندین شاخص مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با وجود زمان اجرای کمتر در الگوریتم پیشنهادی، در شاخص پراکندگی الگوریتم NSGA II و در شاخص تعداد جواب‌های لایه پارتو الگوریتم MOGA دارای کارایی مناسب‌تری است.

کلمات کلیدی: مسیریابی تولید، برونسپاری، ریسک تصادف، بهینه‌سازی چند هدفه

۱- مقدمه



بسیاری از سازمان‌های بزرگ که تولیدات وسیع و توزیع گسترده به شهرها و کشورهای مختلف را در دستور کار خود دارند، به دلیل هزینه‌های بالا به دنبال صرفه‌جویی هزینه‌ها می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد مسئله مسیریابی تولید از راه کارهایی است که منجر به کاهش هزینه این سازمان‌ها می‌شود زیرا تصمیم‌های تولید و مسیریابی بر روی یکدیگر اثر گذار می‌باشند و یکپارچه بررسی کردن این تصمیم‌ها نقش بسزایی در تصمیم‌گیری بهتر و در نتیجه کاهش هزینه‌ها دارد. مسئله مسیریابی تولید عموماً تعمیمی از مسئله تعیین اندازه انباشته با انتقال مستقیم و مسئله مسیریابی موجودی^۱ است. مسئله یکپارچه تعیین اندازه انباشته با انتقال مستقیم و مسئله مسیریابی موجودی هر کدام یک جنبه مهم از فرآیند برنامه‌ریزی عملیاتی زنجیره تأمین را نادیده گرفته‌اند. مسئله تعیین اندازه انباشته با انتقال مستقیم تصمیم‌گیری در مورد مسیریابی انجام نمی‌دهد، در حالی که مسیریابی موجودی بخش تولید را مورد توجه قرار نمی‌دهد. در مسئله مسیریابی تولید^۲ کارخانه باید در هر دوره در مورد اینکه محصول تولید شود یا نه تصمیم‌گیری کند و متعاقباً اندازه دسته را تعیین کند. اگر تولید وجود داشته باشد هزینه‌های ثابت آماده‌سازی و هزینه متغیر هر واحد تولید شده اضافه می‌شود. در ضمن اندازه دسته از ظرفیت تولید نیز نبایستی فراتر رود. تحویل کالا از کارخانه به سمت مشتریان با در نظر گرفتن محدودیت تعداد وسایل نقلیه با ظرفیت محدود و هزینه‌های مسیریابی رخ می‌دهد [۱]. از آنجاییکه در حمل کالا به سمت مشتریان همواره مسیرهای با ترافیک وجود دارد و در جریان این حمل و نقل ریسک‌هایی مانند تصادف وجود دارد که وقوع تصادف ممکن است منجر به خسارت، از دست دادن مزایای محصولات، تأخیر اجتناب ناپذیر در تحویل و یا حتی اثرات جبران ناپذیر شود. با توجه به اهمیت این موضوع و تأثیری که این ریسک بر هزینه‌ها و زمان خدمت رسانی دارد لذا در اینجا ریسک تصادف در مسئله مسیریابی تولید مسئله در نظر گرفته شده تا مساله بیشتر به واقعیت نزدیکتر شود. به منظور حل نیز بعد از مدلسازی و الگوریتم فرابتکاری چند هدفه‌ای پیشنهاد شده است. در ادامه در بخش دوم ادبیات تحقیق و در بخش سوم مدلسازی انجام خواهد گرفت. الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب در بخش بعدی تشریح در انتها نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه شده است.

۲- ادبیات تحقیق

مسئله مسیریابی تولید در مطالعات نویسندگان این حوزه به صورت یکپارچه مورد بررسی



قرار گرفته است. این مسئله در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه واقع شده است. اولین بار چاندرا [۲] در سال ۱۹۹۳ و چاندرا فیشتر [۳] در ۱۹۹۴ نشان دادند که می‌توان با حل PRP در مقایسه با حل مجزای مسائل در هزینه‌ها صرفه جویی کرد. آنها از رویکرد تجزیه برای حل مسئله PRP چند محصولی استفاده کردند. فومرو و ورسلیس [۴] یک رویکرد آزاد سازی لاگرانژ برای PRP با مفروض کردن هزینه‌های حمل و نقل واحد ارائه کردند. آنها نمونه‌هایی با ۸ دوره، ۱۲ مشتری و ۱۰ محصول را امتحان کردند و الگوریتم توانست حدود پایینی فراهم کند که در مقایسه با حدود بالای بدست آمده توسط یک روش ابتکاری، متوسط خطای ۵/۵ درصد را داشته باشد. بودیا، لولی و پرینس [۵] از روش فرا ابتکاری جست و جوی تطبیقی تصادفی حریصانه^۲ برای حل مدل در ابعاد بزرگ استفاده کردند. بودیا و پرینس یک الگوریتم فرا ابتکاری ممتیک برای مسئله توزیع و تولید یکپارچه ارائه کردند. مسئله مسیریابی تولید با یک کارخانه و بایک وسیله نقلیه (با ظرفیت نامحدود) توسط رثوکوکوسکی و همکاران [۶] بررسی شد. آنها یک روش حل شاخه و برش برای مسئله ارائه دادند و کیفیت کران پائین را با استفاده از طرح‌های مدلسازی متفاوت LSP نسبت به مدلسازی پایه LSP بررسی کردند. آرچتی و همکاران [۷] سیستم جایگزینی موجودی ML را برای مسئله یکپارچه توزیع و تولید با ظرفیت تولید نامحدود تجزیه و تحلیل کردند. الگوریتم ابتکاری آنها راه‌حلی با یک درصد خطا نسبت به جواب بهینه بدست می‌آورد. آرسی و همکاران [۸] یک رویکرد تکرارکننده دوفازی برای مسئله مسیریابی تولید ارائه دادند. یک ابتکاری برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تکرار شونده^۴ برای حل PRP با تولید بدون ظرفیت محدود معرفی کردند. MIP با جایگزین کردن متغیرها و هزینه‌های مسیریابی در مدل PRP اصلی با هزینه‌های ثابت، که هزینه تقریبی بازدید مشتری در یک دوره با یک وسیله مشخص را نشان می‌دهد، مدلسازی شده است. آدولیا ساسک و همکاران [۹] برای اولین بار مسئله مسیریابی تولید را تحت شرایط عدم قطعیت بررسی کردند. در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فازی ارائه شده است که هزینه‌های غیر قطعی و نیز ظرفیت موجودی و تولید غیر قطعی را بررسی کردند. آنها از یک رویکرد تجزیه برای حل مسئله استفاده کردند. دیاز و مدرونرو و همکاران [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی فازی برای تصمیم‌گیری یکپارچه برنامه‌ریزی مسیریابی و تولید ارائه کردند و یک مطالعه موردی برای مسئله بررسی کردند. آدولیا ساسک و همکاران [۱۱] یک مقاله مروری برای مسئله مسیریابی تولید ارائه دادند. آنها مدل‌های ریاضی ارائه شده برای مسئله را بررسی



کردند و الگوریتم‌های بکار برده شده برای PRP از جمله الگوریتم‌های حل دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری در تحقیقات گذشته را معرفی کردند. دیاز مدرونرو و همکاران [۱۲] مدل‌های بررسی شده در مسئله مسیریابی تولید را مرور کردند. آنها بر اساس مشخصه‌های مسیریابی و تولید و موجودی یک چوب طبقه‌بندی ارائه دادند. در این مطالعه بر اساس شاخصه‌های مذکور مدل‌های ریاضی و روش‌های حل، طبقه‌بندی شده‌اند. کومار و همکاران [۱۳] مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را با بررسی همزمان مسئله مسیریابی تولید و مسئله مسیریابی آلودگی با پنجره های زمانی توسعه داده‌اند. تابع هدف مدل دو هدفه پیشنهادی آنها، کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و کمینه‌سازی کل انتشار کربن (مقدار کل مصرف سوخت) می‌باشد. در مدل آنها ردپای کربن در بخش مسیریابی در نظر گرفته شده است. بلو فیلهو و همکاران [۱۴] یک روش جست و جوی محلی گسترده انطباقی برای مسئله تولید و توزیع یکپارچه با در نظر گرفتن محصولات فاسد شدنی ارائه کردند. در مدل آنها توالی قبل از حرکت کامیون‌ها از کارخانه به سمت مسیرهای توزیع مشخص می‌شود اما میزان موجودی ذخیره شده در انبارها معین نمی‌شود. هین و آلمدر [۱۵] مسیریابی وسیله نقلیه و مسئله برنامه‌ریزی تولید را بصورت یکپارچه بررسی کردند. آنها در قسمت برنامه ریزی تولید از مدل تعیین اندازه دسته با ظرفیت محدود (CLSP) که فقط اندازه دسته تولید را تعیین می‌کند، استفاده کردند و توالی تولید در مطالعات آنها مشخص نمی‌شود. براهیمی و آیوئم [۱۶] مسئله مسیریابی تولید با امکان سفارش عقب افتاده برای مشتری و در نظر گرفتن جریمه برای آن، را بررسی کردند. آنها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله خود ارائه دادند و یک روش ابتکاری که با یک الگوریتم جست و جوی محلی ترکیب شده است، برای حل مسئله پیشنهاد دادند. رحیمی و همکاران [۱۷] یک مدل جدید برای مسئله مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن همزمان معیارهای اقتصادی، سطح رضایت مشتری و جنبه های زیست محیطی پرداختند. برای این منظور یک مدل ریاضی چند هدفه توسعه داده شده است. هدف اول هزینه های موجودی، توزیع و هزینه ی بازیافت محصولات فاسد شده، هدف دوم رضایت مشتری را با سه معیار تعداد تاخیرها، مقدار سفارشات عقب افتاده و تعداد دفعات سفارشات عقب افتاده و هدف سوم حداقل کردن میزان انتشار گازهای گلخانه ای تولید شده را در نظر می‌گیرند. از آنجا که مسئله NP-hard است مدل NSGA-II برای حل استفاده شده است و نتایج تحلیل حساسیت معیارهای رضایت مشتری و جنبه های سبز بر شاخص های اقتصادی بررسی شده است. سولالیال و سورال [۱۸]



از یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی برای مسئله PRP استفاده کردند که این الگوریتم با یک تور اولیه شروع می‌شود و در هر مرحله با استفاده از عملگرهای گذاشت و برداشت بهبود داده می‌شود. برای حل یک الگوریتم ابتکاری چندمرحله‌ای، مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که الگوریتم ارائه شده در مقایسه با الگوریتم‌های موجود در ادبیات موضوع از نظر زمان محاسباتی در نمونه‌هایی با مقیاس بزرگ که بررسی شدند موثرتر عمل می‌کند. کیو و همکاران [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسائل مسیریابی تولید با تدارکات معکوس و بازسازی را معرفی می‌کند و الگوریتم جستجو شاخه و برش برای حل آن توسعه دادند. در این مسئله مسیریابی تولید الگوریتم برای مسئله مسیریابی تولید حلقه بسته با بازسازی، بارگیری و تحویل همزمان ارائه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم موثرتر است وقتی درخواست‌های دریافت‌کننده (گذاشتن - تحویل دادن) نسبتاً بالا هستند. تصمیمات بهینه به مکان قرارگیری انبار بازسازی (تولید مجدد) حساس نیست. هنگامی که میزان بازسازی به اندازه کافی بالا است، فعالیت‌های تولیدی می‌تواند به طور کامل توسط تولیدات بازسازی شده جایگزین شود و در نتیجه هزینه‌های کل را کاهش دهد. کیو و همکاران [۲۰] فرمولاسیون و الگوریتم شاخه و برش برای مسائل مسیریابی تولید چند محصول چند وسیله‌ای نقلیه با هزینه راه‌اندازی را در نظر گرفتند. هدف این تحقیق مدلسازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله با هزینه راه‌اندازی بود و الگوریتم شاخه و برش برای حل مسئله استفاده شده است. نتایج تجربی نشان داد که مدل مربوطه باعث کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌ها در مسئله شده است. کیو و همکاران [۲۱] الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر را برای مسائل مسیریابی تولید پیشنهاد داده‌اند. نتایج محاسباتی نشان داد که الگوریتم ارائه شده در مقایسه با الگوریتم‌های دقیق از نظر هزینه حمل و نقل و انحراف استاندارد بهتر عمل کرده است. همچنین نتایج نشان داد الگوریتم‌های دقیق فقط می‌توانند برای ۲۵ مشتری و ۳ دوره و ۳ وسیله نقلیه کارایی داشته باشند. موریرا و همکاران [۲۲] یک مسئله مسیریابی تولید چند محصولی بزرگ با در نظر گرفتن پنجره زمانی را حل کردند. در این مسئله از رویکرد تجزیه برای کاهش اندازه مسئله و تقسیم مسئله به چند زیر مجموعه قابل حل استفاده شده است. نتایج تجربی نشان داد که برای مطالعه موردی یک شرکت در اروپا مدل ارائه شده باعث صرفه جویی ۲۱/۷۳ درصدی در هزینه‌ها شده است. اوسی و توپالغلو [۲۳] یک رویکرد حل فرا ابتکاری تکراری برای مسئله مسیریابی تولید با در نظر گرفتن سیاست فاصله ملاقات ارائه نمودند. نتایج نشان داد که کارایی



الگوریتم در نمونه های مختلف بالاست. شانگ و همکاران [۲۴] یک مدل مسیریابی لجستیک معکوس تصادفی را با انتخاب سیاست های کنترل کربن ارائه دادند. مدل پیشنهادی به عنوان مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط یکپارچه دو مرحله ای تصادفی و قطعی برای مطالعه ی موردی در یک زنجیره تامین معکوس فرمول بندی شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت برای اثر پارامترهای مختلف در راه حل بهینه انجام شده است. نتایج نشان داد که سیاست های انتخاب شده کربن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد زنجیره تامین داشته و قیمت کربن مهمترین پارامتر آن است. لی و همکاران [۲۵] یک ابتکار سه مرحله ای کارا برای مسئله مسیریابی تولید تعمیم یافته با حالت چند محصولی و با برونسپاری بررسی شده است. هدف این مطالعه حداقل کردن کلیه هزینه های تولید، موجودی، مسیریابی و هزینه های برونسپاری بود. از آنجاییکه در مسئله مسیریابی تولید حمل و نقل با استفاده از وسایل نقلیه انجام می پذیرد. اثرات مخرب ناشی از حمل و نقل شامل مواردی مثل مصرف منبع، استفاده از زمین، اسیدی سازی، اثرات سمی بر اکوسیستم و انسان ها، سر و صدا و تأثیرات ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای می باشد. اثرات مخرب دی اکسید کربن رابطه مستقیمی با میزان سوخت مصرف شده توسط وسایل نقلیه دارد که این میزان به نوع وسیله نقلیه، پارامترهای ترافیک و محیط (مثل: سرعت وسیله نقلیه، بار وسیله نقلیه، شیب خیابان) وابسته است. با افزایش نگرانی ها در مورد اثرات حمل و نقل بر محیط زیست، محققان به برنامه ریزی حمل و نقل جاده ای با در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه ای پرداختند. همانطور که اشاره شد مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مهمترین و شناخته ترین مسائل برنامه ریزی حمل و نقل است، که تعیین کننده مسیر برای وسایل نقلیه می باشد تا تقاضای مشتریان در نقاط پراکنده فراهم گردد. در این میان با افزایش میزان حمل و نقل احتمال وقوع حوادث افزایش می یابد برخی از محققین در مطالعات خود ریسک های موجود در تصادف را نیز به مدلسازی مسئله اضافه کرده اند. آلفردو و همکاران با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر به حل مسئله مسیریابی خودرو با ناوگان ناهمگن برای حمل و نقل مواد خطرناک پرداختند. هدف این مطالعه تعیین مجموعه مسیرهایی بود که کل ریسک های مسیریابی مورد انتظار را حداقل کند [۲۶]. گوستاو و بولا به مسئله مسیریابی دو هدفه، جهت مینیم کردن کل ریسک مسیر و هزینه حمل و نقل برای مواد خطرناک با استفاده از الگوریتم های مبتنی بر سلطه چند هدفه و الگوریتم فرا ابتکاری اپسیلون پرداختند [۲۷]. بهنامیان و ادبی مسئله مسیریابی تولید رقابتی با فرض اطلاع از زودترین و



دیرترین زمان تأمین تقاضا توسط رقیب مدل‌سازی نمودند. [۲۸]. تیماچی و همکاران مسئله مسیریابی موجودی دو هدفه را برای کالاهای خطرناک و فاسد شدنی با وجود ریسک تصادف را در نظر گرفتند. مدل پیشنهادی برای این مسئله دوهفته برنامه ریاضی عدد صحیح مختلط بود چندین مثال عددی تولید شده و با سیپلکس حل شده‌اند و با یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی کارا مقایسه شده اند [۲۹].

در ادبیات تحقیق مسئله مسیریابی تولید مطالعه‌ای که در آن ریسک‌های تصادف وجود داشته باشد یافت نشد. از این رو در این مطالعه مسئله مسیریابی تولیدچند دوره‌ای، چند محصولی، دوهفته با در نظر گرفتن برونسپاری و ریسک تصادف در حمل و نقل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- بیان مسئله و مدل‌سازی

مسئله مورد مسیریابی تولید چند محصولی، چند دوره‌ای و چند وسیله نقلیه با در نظر گرفتن برونسپاری و ریسک تصادف در حمل و نقل در حالتی که دو هدف کاهش هزینه‌های سیستم و تلفات ناشی از تصادف در حمل و نقل را به دنبال دارد، می‌باشد. در این مطالعه طبق تحقیقات گذشته برای محاسبه ریسک تصادف از مطالعه‌ی [۲۹] استفاده شده است.

۳-۱ مدل مسئله مسیریابی تولید

یک گراف کامل $G = \{N, A\}$ با مجموعه‌ای از گره‌ها $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ با کمان‌های ارتباطی $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ وجود دارد. یک کارخانه مجموعه‌ای از محصولات $P = \{0, 1, 2, \dots, |P|\}$ با محدودیت ظرفیت C و ظرفیت نگهداری U_0 که در گره صفر قرار دارد تولید می‌کند. یک ناوگان وسایل حمل و نقل همگن $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ با ظرفیت V در کارخانه در دسترس هستند. مجموعه‌ای از مشتریان $R = \{1, 2, \dots, n\}$ بر روی گراف پراکنده شده‌اند. هر مشتری $i \in R$ دارای ظرفیت انبار U_i و تقاضای d_i^{pt} برای محصول $p \in P$ در دوره $t \in T$ که $T = \{0, 1, 2, \dots, |T|\}$ است. سایر مفروضات مساله به شرح زیر است.

۱. شروع و پایان مسیر هر وسیله نقلیه کارخانه است.

۲. هر وسیله نقلیه در هر دوره فقط یک مسیر را طی می‌کند.



۳. در برخی از دوره‌ها ممکن است تعدادی از محصولات تولید نشود.
 ۴. ممکن است در یک دوره برخی از مشتریان بازدید نشوند.
 ۵. احتمال وقوع حادثه برای هر مسیر مشخص شده است.
 ۶. ناوگان حمل و نقل همگن است و ظرفیت وسایل نقلیه محدود است.
 ۷. کمبود مجاز نمی‌باشد.
 ۸. در هر دوره امکان نگهداری موجودی در انبار کارخانه و مشتریان وجود دارد.
 ۹. انبار کارخانه و انبار مشتریان ظرفیت محدودی برای نگهداری دارند.
 ۱۰. در هر دوره مشتری حداکثر با یک وسیله نقلیه بازدید می‌شود.
 ۱۱. امکان برونسپاری برای محصولات وجود دارد.
- با توجه به فرض‌های گفته شده در ادامه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل معرفی می‌شوند.

اندیس‌ها

i, j اندیس گره $i, j \in N$

$t \in T$ اندیس دوره زمانی،

$k \in K$ اندیس وسیله نقلیه،

$p \in P$ اندیس محصول،

پارامترها

c_{ij} : هزینه سفر برای مسیر i و j

a_p : هزینه تولید هر واحد از محصول p

e_p : هزینه برونسپاری هر واحد از محصول p

b_p : هزینه راه اندازی محصول p

C : ظرفیت تولید،

d_i^{pt} : تقاضای محصول p برای مشتری i در دوره t

U_i : ظرفیت انبار i

h_i^p : هزینه نگهداری هر واحد محصول p در محل مشتری i

I_i^{p0} : موجودی اولیه محصول p نگهداری داشته شده در محل مشتری i



V : کل ظرفیت وسایل نقلیه

Pr_{ij} : احتمال وقوع حادثه بر روی مسیر i و j

f_k : ارزش وسیله نقلیه k

Υ_{ij} : شاخص درصد شدت حادثه بین مسیر i و j

m : ارزش هر واحد محصول

متغیرهای تصمیم

q_{pt} : مقدار تولید محصول p در دوره t

Z^{pt} : مقدار برونسپاری محصول p در دوره t

w_{pt} : برابر است با ۱ اگر محصول p در دوره t تولید شود و در غیر اینصورت صفر

I_i^{pt} : موجودی محصول p نگهداشته شده در محل مشتری i در انتهای دوره t

y_i^{pkt} : مقدار محصول p که به مشتری i در دوره t توسط وسیله نقلیه k حمل شده است.

v_i^{kt} : برابر است با ۱ اگر مشتری i توسط وسیله نقلیه k در دوره t ملاقات شود و در غیر

اینصورت صفر است.

x_{ij}^{kt} : برابر است با ۱ اگر کمان i و j با وسیله نقلیه k در دوره t طی شود و در غیر

اینصورت صفر می‌باشد.

Q_{ij}^{kt} : مقدار محصول حمل شده توسط وسیله نقلیه k بر روی کمان i و j در دوره t

با توجه به نمادهای معرفی شده فوق، مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود.

$$\min z_1 = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (a_p q_{pt} + b_p w_{pt}) + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_p Z^{pt} + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_i^p I_i^{pt} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{ij}^k x_{ij}^{kt} \quad (1)$$

$$\min z_2 = \max_t \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \Upsilon_{ij} (m \times Q_{ij}^{kt} + f_k) \times \text{Pr}_{ij} \times x_{ij}^{kt} \quad (2)$$

$$I_0^{pt} = I_0^{p,t-1} + q_{pt} - \sum_{i \in R} \sum_{k \in K} y_i^{pkt}, \quad \forall p \in P, t \in T \quad (3)$$

$$I_i^{pt} = I_i^{p,t-1} + Z^{pt} + \sum_{k \in K} y_i^{pkt} - d_i^{pt}, \quad \forall i \in R, p \in P, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} q_{pt} \leq C, \quad \forall t \in T \quad (5)$$



$$q_{pt} \leq Cw_{pt}, \forall p \in P, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} I_i^{pt} \leq U_i, \forall i \in N, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} y_i^{pkt} \leq V, \forall k \in K, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} y_i^{pkt} \leq Vv_i^{kt}, \forall i \in R, k \in K, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} v_i^{kt} \leq 1, \forall i \in R, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} = \sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ji}^{kt}, \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} = v_i^{kt}, \forall i \in R, k \in K, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{j, t \neq j} x_{ij}^{kt} = v_i^{kt}, \forall i \in R, k \in K, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{i \in R} x_{0i}^{kt} \leq 1, \forall k \in K, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq R, |S| \geq 2, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$q_{pt} \geq 0, \forall p \in P, t \in T \quad (16)$$

$$Z_i^{pt} \geq 0, \forall i \in R, p \in P, t \in T \quad (17)$$

$$I_i^{pt} \geq 0, \forall i \in N, p \in P, t \in T \quad (18)$$

$$y_i^{pkt} \geq 0, \forall i \in R, p \in P, k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$w_{pt} \in \{0, 1\}, \forall p \in P, t \in T \quad (20)$$

$$v_i^{kt} \in \{0, 1\}, \forall i \in R, k \in K, t \in T \quad (21)$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, k \in K, t \in T \quad (22)$$

$$Q_{ij}^{kt} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, k \in K, t \in T \quad (23)$$

در مدل معرفی شده معادله (۱) اولین تابع هدف مسئله برای حداقل کردن کل هزینه های مسئله می باشد که از چهار بخش تشکیل شده است. بخش اول مربوط به کل هزینه های تولید



محصولات می‌باشد. بخش دوم هزینه‌های برونسپاری را نشان می‌دهد. بخش سوم هزینه‌های نگهداری موجودی در انبار کارخانه و مشتریان را در طول افق زمانی محاسبه می‌کند. بخش چهارم نیز مربوط به کل هزینه‌های مسیریابی در تمام دوره‌های افق زمانی می‌باشد. قسمت دوم مربوط به حداقل کردن ریسک تصادف در مسئله می‌باشد. معادله (۲) دومین تابع هدف مسئله می‌باشد و تلاش می‌کند که حداکثر تلافیات محتمل را در بین همه ی دوره‌ها به حداقل برساند. در این تابع تلافیات تصادفات بر اساس ارزش خودرو و مقدار محموله ای که جابه جا می‌کند ضربدر شاخص شدت تصادف (Y_{ij})، که برای هر مسیر تخمین زده می‌شود محاسبه می‌شود [۲۹]. محدودیت (۳) و (۴) به ترتیب موازنه موجودی را برای کارخانه و برای مشتریان بررسی می‌کنند. محدودیت (۵) نشان می‌دهد مقدار تولید کل هر دوره از ظرفیت تولید نمی‌تواند بیشتر شود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که اگر خط تولید راه‌اندازی نشود محصولی تولید نمی‌شود. محدودیت (۷) محدود بودن ظرفیت انبار کارخانه‌ها و انبار مشتری را برای نگهداری موجودی نشان می‌دهد. محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه توسط محدودیت (۸) ایجاد می‌شود. محدودیت (۹) تضمین می‌کند در صورتی که مشتری i در دوره t توسط وسیله نقلیه k ملاقات شود کالای به آن تحویل داده می‌شود. محدودیت (۱۰) ممنوعیت تحویل قطعه از کارخانه را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند اگر وسیله نقلیه به گره‌ای وارد شود حتماً از آن خارج گردد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند اگر مشتری z در یک دوره مشخص بازدید شود تنها یک مشتری قبل از مشتری z در مسیر تحویل کالا در آن دوره می‌تواند باشد. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که یک وسیله نقلیه می‌تواند حداکثر یک سفر را در هر دوره انجام دهد. حذف زیر تور را محدودیت (۱۴) در نظر می‌گیرد. محدودیت های ۱۵ تا ۱۸ دامنه‌ی متغیرهای تصمیم مدل را نشان می‌دهند.

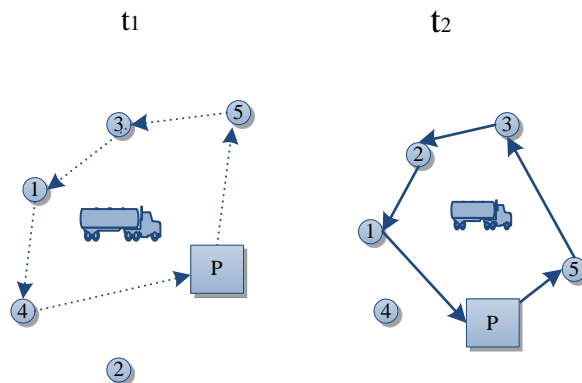
در اینجا و به منظور بررسی صحت مدل، مثالی با ۵ مشتری، ۲ وسیله نقلیه در ۲ دوره با تقاضا در دوره زمانی با جزییات زیر با نرم‌افزار گمز حل شده است. لازم به ذکر است در این مثال مقادیر احتمال تصادف بین مسیر i و z دارای توزیع یکنواخت در بازه ی [۰،۱]، شدت تصادف دارای توزیع یکنواخت بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، هزینه ی حمل و نقل دارای توزیع یکنواخت در بازه‌ی ۱۰ و ۵۰ واحد پولی، ظرفیت تولید ۲۰۰۰ و ظرفیت هر وسیله نقلیه ۱۰۰ عدد محصول می‌باشد.

جدول ۱. جزییات یک مثال عددی



$T=2, p=2$	$T=2, p=1$	$T=1, p=2$	$T=1, p=1$	مشتری
۱۱	۲۳	۲۳	۸	۱
۱۶	۱	۲	۱۷	۲
۱۷	۴	۲۸	۲۴	۳
۵	۱۰	۰	۱۴	۴
۵	۱۶	۹	۲۴	۵

همانطور مشاهده می شود خودرو اول در دوره زمانی اول بعد از خدمت رسانی به ترتیب به مشتری ۵، ۳، ۱ و ۴ در نهایت به محل کارخانه بر می گردد و در این دوره زمانی مشتری ۲ را بازدید نمی کند. همچنین خودرو دوم در دوره زمانی دوم به ترتیب مشتری های ۵، ۳، ۱، ۲ را بازدید و مشتری ۴ را بازدید نمی کند. در این مثال میانگین مقدار تابع هدف اول برای هزینه حمل و نقل ۲۰۸۳ و میانگین مقدار هزینه تصادف ۷۸۰۳۵ بدست آمده است.



شکل (۱): خروجی گمز برای مثال عددی

۲-۳ روش محدودیت اِپسیلون

یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چند هدفه، روش محدودیت اِپسیلون است. در این روش با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها به محدودیتها، به حل این نوع مسائل پرداخته می شود. با استفاده از این روش می توان جبهه پارتو را برای مسائل چند هدفه با استفاده از قید ϵ ایجاد کرد [۳۱]. به طور کلی گام های روش محدودیت اِپسیلون به صورت



زیر است:

- (۱) یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.
- (۲) هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله حل شده و مقادیر هر تابع هدف گزارش می‌شود.
- (۳) بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعدادی از قبل مشخص تقسیم بندی می‌شود و در یک جدول مقادیر برای اپسیلون‌ها e_2, \dots, e_m به دست می‌آید.
- (۴) هر بار مسئله با توجه به مقدار تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر e_2, \dots, e_m حل می‌شود.
- (۵) مجموعه ای از جواب‌های پارتو تولید شده مبنای تصمیم‌گیری ا براساس ترجیحات و اولویت‌ها خواهند بود [۳۲].

۳-۳ پیچیدگی مسئله مسیریابی تولید

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه از دسته مسائل Np-hard است [۳۰]. پیچیدگی این مسئله به این دلیل است که شامل فروشنده دوره گرد (TSP) می‌باشد. از آنجا که TSP از نظر پیچیدگی در دسته مسائل Np-hard قرار دارد و مسئله VRP قادر به تبدیل شدن به TSP می‌باشد، مسئله VRP حداقل به سختی TSP می‌باشد و NP-hard است. از آنجاییکه مسئله مسیریابی موجودی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را شامل می‌شود از این رو مسئله مسیریابی موجودی نیز از نظر پیچیدگی NP-hard است. مسئله مسیریابی تولید ترکیبی از دو مسئله مسیریابی وسیله نقلیه و تعیین اندازه انباشته می‌باشد. بنابراین این مسئله نیز در رده NP-hard قرار دارد. مسئله حاضر با افزایش اندازه مسئله و اضافه شدن محدودیت‌ها و متغیرها حجم محاسبات نیز به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. از این رو مسئله مسیریابی تولید با در نظر گرفتن برونسپاری و ریسک تصادف در حمل و نقل نیز از رده مسائل NP-hard است. بنابراین روش‌های دقیق فقط در ابعاد کوچک قادر به حل مسئله بصورت بهینه هستند. به این منظور و برای حل مدل پیشنهادی الگوریتم فراابتکاری الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II) پیشنهاد شده است.

۴- روش حل پیشنهادی

در اینجا از الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب برای حل مساله استفاده شده است.



۴-۱ الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک با رویکرد جمعیت محور، روشی بسیار مناسب برای حل مسائل بهینه سازی می‌باشد. نسخه چندهدفه الگوریتم ژنتیک می‌تواند برای یافتن مجموعه ای از چندین جواب نامغلوب در مسائل چندهدفه، اصلاح گردد. در الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا، عملگر نخبه‌گرایی این فرصت را برای نخبه‌های یک جمعیت فراهم می‌کند که مستقیماً بتوانند به نسل بعدی منتقل شوند. در عملگر نخبه‌گرایی، یک جواب از بین نخواهد رفت مگر اینکه جواب بهتری نسبت به آن پیدا شود. این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری حل مسئله است که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است [۳۳]. روش کار مراحل الگوریتم NSGA-II که یکی از حالت‌های چندهدفه الگوریتم ژنتیک می‌باشد، به شرح ذیل می‌باشد [۳۴].

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه
- ۲- محاسبه معیارهای برازندگی
- ۳- مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن
- ۴- محاسبه فاصله ازدحامی
- ۵- انجام عمل تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید
- ۶- تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت‌های حاصل از تقاطع و جهش
- ۷- جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده
- ۸- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند.

۴-۲ جزییات پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-II

ساختار کلی نمایش یک نقطه برای مسئله بصورت یک کروموزوم $t^*(i+k-l+p+(i*p))$ ژنی می‌باشد. مقدار هر یک از این ژن‌ها برای حل مساله به الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II پیوسته، یک عدد حقیقی است. توجه کنید که در اینجا i تعداد گره‌ها به جز مبدا می‌باشد. k تعداد وسایل



نقلیه و p تعداد کالا و t تعداد دوره می‌باشد. برای راحتی کار و انجام محاسبات $(i+k-$ $(i+p+(i*p))$ ژن اول در سطر اول و به همین ترتیب $(i+k-1+p+(i*p))$ ژن t ام در سطر t ام یک ماترسی قرار می‌گیرند. برای مثال برای یک مساله با ۵ مشتری، ۲ کالا، ۴ وسیله نقلیه و ۳ دوره به صورت شکل (۲) می‌باشد. هر سطر نشان دهنده یک دوره می‌باشد.

q11	q21	Y111	Y121	Y211	Y221	Y311	Y321	Y411	Y421	Y511	Y521
q12	q22	Y112	Y122	Y212	Y222	Y312	Y322	Y412	Y422	Y512	Y522
q13	q21	Y113	Y123	Y213	Y223	Y313	Y323	Y413	Y423	Y513	Y523

شکل (۲): کروموزوم مثال ۵ مشتری، ۲ کالا، ۴ وسیله نقلیه و ۳ دوره

در حالت اولیه این مقادارها با تابع توزیع یکنواخت تولید می‌شوند، برای ادامه محاسبات کروموزوم به سه بخش تقسیم می‌شود که در شکل بالا قسمت هایی که به صورت پر رنگ متمایز شده اند، مشخص می‌باشد. در هر سطر $i+k-1$ ژن اول مربوط به مشتری هایی است که در آن دوره توسط وسایل نقلیه بازدید شده‌اند که در ادامه توضیح بیشتری در مورد آن داده خواهد شد. ژن $i+k$ تا ژن $i+k+p$ ، مربوط به مقدار تولید هر یک از کالاها در آن دوره می‌باشد (qpt) . ژن های $i+k+p$ تا آخر نشان دهنده مقدار کالایی است که در آن دوره به هر یک از مشتریان ارسال شده است (Y_{ikpt}) دقت شود در مدل این مقدار کالایی از کالای p ام می‌باشد که توسط وسیله نقلیه به مشتری i در دوره t منتقل می‌گردد. طبق شرایط مساله هر مشتری در هر دوره فقط یک بار بازدید می‌شود، بنابر این اگر با یک وسیله نقلیه مقداری از کالای p به مشتری i در دوره t منتقل شد، خودروهایی دیگر در آن دوره اجازه سرویس دهی به آن مشتری را ندارند و مقدار Y_{ikpt} برای وسایل نقلیه دیگر صفر می‌باشد. بنابر این می‌توان اندیس k را حذف نمود که این کار باعث سادگی در محاسبات و همچنین بالا رفتن سرعت الگوریتم فراابتکاری می‌شود. برای مشخص شدن مسیرها با استفاده از کروموزوم، بخش اول را در نظر بگیرید، سطر اول مربوط به دوره اول، سطر دوم مربوط به دوره دوم و به همین ترتیب سطر آخر مربوط به دوره آخر می‌باشد. فرض کنید در مثال بالا می‌خواهیم مسیرهای طی شده توسط هر یک از وسایل نقلیه در دوره اول را مشخص کنیم، برای این کار $i+k-1$ خانه اول یعنی ۸ خانه اول از سطر اول را در نظر می‌گیریم. فرض کنید مقدار هر یک از این ژن‌ها بصورت زیر باشد.

۱,۵	۴,۳	۲,۲	۳,۵	۲,۴	۲,۷	۱,۷	۱,۸
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



سپس با توجه به مقدار هر ژن یک رتبه به آن اختصاص می‌دهیم. مثلاً کوچکترین عدد رتبه یک، کوچکترین عدد بعدی رتبه دو... بعد با توجه به این کروموزوم، کروموزوم دیگری به همین اندازه تشکیل می‌شود که رتبه‌های متناظر ژن‌های کروموزوم قبلی در آن قرار داده می‌شود. بنابراین کروموزومی که از کروموزوم بالا تشکیل می‌گردد بصورت زیر است.

۱	۴	۸	۷	۵	۶	۲	۳
---	---	---	---	---	---	---	---

سپس اعداد بزرگتر از تعداد مشتریان را در کروموزوم جدید مشخص می‌کنیم.

۱	۸	۴	۷	۵	۶	۲	۳
---	---	---	---	---	---	---	---

کروموزوم بالا بدون در نظر گرفتن خانه‌هایی که پررنگ شده‌اند، به چهار قسمت تقسیم شده که برابر با تعداد وسایل نقلیه می‌باشد. مقادیر هر مشتریانی که هر وسیله نقلیه در دوره مربوطه ملاقات می‌کند را نشان می‌دهد. مسیرها برای چهار وسیله نقلیه برای کروموزوم بالا بصورت زیر می‌باشد. گره ۰ کارخانه را نشان می‌دهد.

- >۱-----> . مسیر وسیله نقلیه اول در دوره اول
- >۴-----> . مسیر وسیله نقلیه دوم در دوره اول
- >۵-----> . مسیر وسیله نقلیه سوم در دوره اول
- >۳----->۲-----> . مسیر وسیله نقلیه چهارم در دوره اول

۳-۴ شاخص ارزیابی

در این مطالعه برای مقایسه مدل‌های مختلف از شاخص پراکندگی استفاده شده است. این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو در فضای حل و میزان جواب‌های غیر مغلوب یافت شده را نشان می‌دهد نحوه محاسبه این شاخص مطابق رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (24)$$

که در آن d_i و \bar{d} به ترتیب برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتو کناری در فضای حل و میانگین فواصل d_i ها و n تعداد جواب‌های لایه پارتو می‌باشند.

۴-۴ تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II



تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم

مقدار	پارامتر
۱۰۰۰	ماکزیمم تکرار
۵۰	تعداد جمعیت اولیه
۰/۸	نرخ تقاطع
۰/۲	نرخ جهش

۵- بحث و نتایج

در این بخش نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل در ابعاد کوچک و بزرگ گزارش شده است. در این مطالعه مقادیر پارامترهای مدل به شکل تصادفی و بصورت جدول زیر تولید شده‌اند.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به مسائل نمونه

شماره مسئله	بازه تغییرات
تعداد مشتری (I)	[۵۰، ۲۰۰]
تعداد محصول (P)	[۲، ۸]
تعداد دوره (T)	[۲، ۵]
تعداد وسیله نقلیه (K)	[۳، ۱۶]

در مرحله اول، هشت مسئله در ابعاد کوچک تولید شده و نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش محدودیت افسیلون مقایسه شدند. همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود زمان حل مدل NSGA-II نسبت به روش افسیلون محدودیت کمتر است. و با بالاتر رفتن اندازه مسئله زمان حل نیز در مدل افسیلون محدودیت بالاتر می‌رود.

جدول ۴. نتایج محاسباتی برای حل مسائل با ابعاد کوچک

خطای NSGA-II		NSGA-II			روش افسیلون محدودیت			مسئله				ردیف
هدف ۲	هدف ۱	زمان (ثانیه)	هدف ۲	هدف ۱	زمان (ثانیه)	هدف ۲	هدف ۱	K	T	P	I	
٪ ۰/۴۹	٪ ۰/۰۰	۸/۲۹۸۳	۴۶۰۵۳/۶۶۴	۱۳۸۹/۵	۲۹/۹۵۳	۴۵۸۲۹	۱۳۸۹/۵	۲	۲	۳	۳	۱
٪ ۰/۲۲۵	۰/۰۰۹ ٪	۱۷/۶۳۳	۱۲۸۶۴۴/۲۶	۱۶۷۲/۴۵۲	۳۵/۹۰۶	۱۲۸۳۵۵/۳	۱۶۷۲/۳	۲	۲	۳	۴	۲



خطای NSGA-II		NSGA-II			روش اسپیلون محدودیت			مسئله			ردیف	
٪ ۱/۲۵	۱۹/۱۴ ٪	۳۷/۸۵۸	۷۹۰۱۸/۶۸۷	۲۴۸۲/۵۰۵	۴۹/۱۸	۷۸۰۳۵/۷۲	۲۰۸۳/۵۷۱	۲	۲	۳	۵	۳
٪ ۴/۲۳	٪ ۰/۶۸	۴۷/۷۱	۲۴۶۵۳۳/۷۳	۲۳۲۵/۲۴۷	۵۶/۸۹	۲۳۶۵۱۵/۴	۲۳۰۹/۴۲۹	۲	۲	۳	۶	۴
٪ ۰/۷۹	٪ ۰/۴۶	۵۳/۰۹۸	۱۵۲۷۶۰/۴۷	۲۳۵۰/۰۲۱	۶۷/۷۸۱	۱۵۱۵۵۴/۳	۲۳۳۹/۲۳۱	۲	۲	۳	۷	۵
٪ ۳/۹۲	٪ ۱۱/۷	۶۴/۷۴۶	۲۹۰۴۲۹/۷۹	۲۸۳۸/۱۴۴	۱۰۷/۱۱	۲۷۹۴۶۴/۹	۲۵۴۰/۸	۲	۲	۳	۸	۶
٪ ۰/۸۲	۱۱/۰۵ ٪	۷۲/۸۹	۴۸۸۰۵۹/۳	۳۲۴۰/۶۶۴	۱۳۶/۸۷۵	۴۸۴۰۷۲	۲۹۱۸/۱۰۵	۲	۲	۳	۹	۷
٪ ۸/۸۶	۱۹/۹۵ ٪	۸۹/۲۹	۶۱۵۴۴۵/۵۷	۳۶۵۲/۶۱۶	۱۸۶/۸۷۵	۵۶۵۲۵۲	۳۰۴۴/۸۸۹	۲	۲	۳	۱۰	۸

در جدول (۵) نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل نمونه آورده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) پیشنهادی در مقاله [۳۵] استفاده شده است. به این منظور از سه معیار پراکندگی (D)، تعداد جوابهای لایه پارتو و متوسط زمان اجرا بکار رفته‌اند.

جدول ۵. نتایج مقایسات الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOGA

MOGA					NSGA-II					مسئله
زمان حل	شاخص پراکندگی (D)	میانگین مقدار تابع هدف دوم	میانگین مقدار تابع هدف اول	تعداد جواب پارتو جبهه	زمان حل	شاخص پراکندگی (D)	میانگین مقدار تابع هدف دوم	میانگین مقدار تابع هدف اول	تعداد جواب پارتو جبهه	
۴۹/۰۹	۰/۷	۸۹۹۵/۸	۲۷۲۹/۰۶	۱۰	۴۶/۷۳	۰/۸۵	۱۹۱۸۳/۸۸	۱۸۹۲/۷۱	۱۰	۱
۴۱/۰۱	۰/۶۱	۱۴۹۳۹/۱۸	۲۴۱۵/۴۸	۱۰	۴۱/۹۷	۰/۹	۱۱۵۴۴/۵۲	۷۹۲۰/۵۳	۱۰	۲
۳۸/۰۷	۰/۸۲	۱۱۰۲۳/۴۶	۲۰۱۷/۵۷	۱۰	۴۰/۵۵	۰/۶	۱۷۳۲۹/۱	۳۸۵۵/۴۴	۱۰	۳
۶۷/۰۲	۰/۸۳	۳۳۹۳۴/۸۶	۳۹۱۵/۷۸	۱۵	۶۴/۴۱	۰/۷	۲۹۴۴۸/۸۵	۳۵۵۸/۳	۱۵	۴
۶۷/۷۹	۰/۸۸	۱۳۹۸۶/۳۷	۴۲۴۵/۱۹	۱۵	۵۵/۶۳	۰/۶۴	۲۲۵۶۳/۹۱	۳۶۷۹/۳	۱۵	۵
۶۴/۸۳	۰/۷۴	۲۳۲۱۵/۷۲	۴۲۸۰/۴۵	۱۵	۵۳/۲۷	۰/۷۵	۳۳۹۳۴/۸۶	۳۹۱۵/۷۸	۱۵	۶
۹۱/۸۵	۰/۹۲	۱۹۰۱۶/۴۸	۱۰۸۱۷/۹۴	۱۴	۸۶/۹۷	۰/۹	۱۹۷۴۰/۲۲	۱۱۱۶۲/۰۷	۷	۷
۸۳/۹	۰/۷۳	۲۱۹۵۳/۲۸	۱۱۸۲۶/۴۸	۱۱	۷۷/۳۷	۱/۴۲	۳۵۲۰/۱/۸	۱۳۲۴۳/۵۶	۱۵	۸

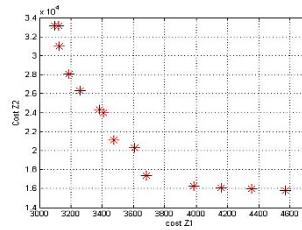


MOGA					NSGA-II					مسئله
زمان حل	شاخص پراکندگی (D)	میانگین مقدار تابع هدف دوم	میانگین مقدار تابع هدف اول	تعداد جواب پارتو جبهه	زمان حل	شاخص پراکندگی (D)	میانگین مقدار تابع هدف دوم	میانگین مقدار تابع هدف اول	تعداد جواب پارتو جبهه	
۷۲/۸۴	۰/۵۲	۲۴۰۹۶/۷۹	۹۱۲۹/۵	۱۸	۶۸/۹۶	۱/۰۳	۴۵۱۷۱/۰۸	۱۶۲۴۷/۴۱	۱۹	۹
۱۴۳/۰۵	۰/۹	۴۵۸۹۲/۲۲	۲۸۳۷۷/۸۸	۲۵	۱۳۶/۲۷	۰/۸۶	۱۰۰۶۸۶/۶	۲۴۵۱۱/۹۲	۱۳	۱۰
۱۲۶/۵۶	۰/۹۴	۵۰۹۳۱/۷۱	۲۵۳۲۱/۰۱	۲۰	۱۱۴/۶۲	۰/۸۸	۵۹۳۶۶/۲۳	۲۳۳۶۱/۹	۲۴	۱۱
۱۰۸/۷۰	۰/۹	۶۳۵۸۴/۶۳	۲۵۶۴۲/۲۸	۱۸	۱۰۵/۷۹	۱/۰۴	۱۲۵۳۵۳/۵	۳۱۷۲۵/۹۱	۱۸	۱۲
۱۸۷/۵۵	۰/۶۵	۲۳۳۴۲۵/۶	۶۴۱۵۳/۵۸	۲۴	۱۷۶/۱۳	۰/۷۱	۲۶۵۹۰/۸/۸	۶۳۷۵۸/۴۷	۱۵	۱۳
۱۶۴/۷۲	۰/۶۸	۲۷۰۶۱۸/۳	۵۷۳۵۱/۷۳	۲۲	۱۵۵/۲۸	۰/۸۶	۴۱۶۶۳۸	۸۱۴۵۹/۴۳	۱۷	۱۴
۱۴۰/۳۴	۰/۷۴	۲۰۹۱۱۷/۲	۶۰۷۰۶/۵	۱۶	۱۳۱/۳۳	۰/۷۸	۴۴۸۶۴۳/۹	۷۵۷۵۱/۷۴	۲۲	۱۵
۲۶۳/۱۱	۰/۶۳	۳۵۶۴۷۹/۵	۱۱۲۲۱۴/۹	۲۱	۲۵۴/۸۴	۱/۱۱	۳۹۹۱۵۹/۸	۱۳۳۵۵۷/۲	۳۵	۱۶
۲۲۷/۰۷	۰/۹۸	۴۲۷۵۲۳/۵	۹۸۸۴۳/۱۷	۳۲	۳۲۱/۸۴	۰/۸۴	۴۶۳۷۵۱/۱	۱۱۶۸۴۷/۲	۲۴	۱۷
۱۹۶/۱	۰/۸۶	۵۰۹۶۶۱/۲	۱۰۷۳۹۸	۱۹	۱۸۳/۷۷	۰/۷	۴۷۰۵۲۳/۵	۱۱۵۸۴۰/۵	۲۸	۱۸
۴۱۷/۲۲	۰/۷۶	۱۱۴۷۷۱۶	۲۱۱۷۰۴/۹	۳۸	۳۹۷/۸۴	۰/۶۶	۹۸۳۲۹۳/۷	۲۲۰۹۷۹/۴	۳۵	۱۹
۳۶۶/۸۱	۰/۶۸	۱۴۰۸۸۰	۱۹۴۴۵۸/۹	۳۹	۳۴۵	۰/۶۳	۱۱۸۳۵۰۱	۲۲۱۶۰/۱/۳	۳۲	۲۰
۳۱۰/۹۰	۰/۷	۱۱۶۸۲۱۵	۲۱۷۶۰۴/۱	۴۰	۲۹۱/۷۴	۰/۵۸	۱۴۶۹۸۴۲	۲۲۰۳۶۵/۳	۳۹	۲۱
۶۲۰/۳۷	۰/۸۷	۲۰۲۴۷۰۲۲	۳۱۶۰۸۰۹	۳۶	۵۴۶/۸۱	۰/۸۷	۱۶۵۸۹۸۴۹	۳۳۳۳۵۵۱	۳۵	۲۲
۵۰۱/۰۴	۰/۷۱	۱۷۲۴۲۱۷۸	۳۲۵۹۵۸۶	۴۵	۴۶۴/۲۹	۰/۷۱	۱۸۳۵۲۶۵۶	۳۴۲۰۹۹۹	۴۱	۲۳
۴۳۲/۱۱	۰/۸۲	۱۸۷۶۵۹۸۴	۳۱۳۰۷۵۴	۴۳	۳۹۶/۸۱	۰/۸۶	۱۵۵۱۲۷۹۰	۲۵۱۶۶۲۳	۳۴	۲۴
۹۵۹/۹۷	۰/۷۳	۴۱۸۸۲۹۶۹	۳۸۱۲۸۱۴	۳۳	۸۹۹/۴۲	۰/۷۳	۳۷۶۲۸۴۱۰	۳۹۸۱۷۹۷۶	۵۰	۲۵
۸۲۷/۷۷	۰/۸۵	۳۱۷۸۶۱۹۹	۳۷۴۵۹۲۶	۳۶	۷۵۵/۲۳	۰/۶۸	۳۵۴۴۱۰۸۰	۳۹۹۰۸۹۸	۴۴	۲۶
۶۹۷/۹۳	۰/۷	۳۸۳۰۵۲۷۷	۳۶۶۶۲۵۱	۴۶	۶۲۹/۴۷	۰/۸۷	۳۵۰۴۳۸۵۹	۴۰۲۳۱۱۳	۲۷	۲۷
۲۰۹۱/۸۸	۰/۷۸	۱۰۲۵۷۹۵۴۴	۷۸۹۱۲۰۴/۰۱	۴۲	۱۹۴۹/۹۴	۰/۶۳	۱۳۱۴۱۵۹۷۳	۷۹۶۵۵۷۰/۱	۴۸	۲۸
۱۸۴۲/۲۸	۰/۷۳	۱۰۵۳۵۶۹۰۱	۸۰۱۴۲۰۹/۴	۵۰	۱۷۲۱/۸۱	۰/۷۶	۱۰۸۶۳۳۱۷۹	۸۰۱۱۹۷۵/۸	۴۵	۲۹
۱۴۹۹/۰۷	۰/۷۸	۱۱۲۸۳۳۱۰۵	۷۹۴۶۳۳۶/۸	۴۷	۱۴۱۴/۴۲	۰/۷۵	۱۱۶۶۸۲۲۹۹/۲	۸۰۳۸۹۰۰	۳۵	۳۰

جبهه پارتو الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOGA جهت نمونه برای شش مثال به عنوان نمونه ترسیم شده است.



الگویتم NSGA II

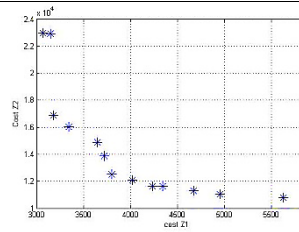


(مثال ۴)

(مثال ۵)

(مثال ۶)

الگویتم MOGA

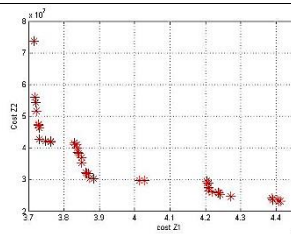


(مثال ۴)

(مثال ۵)

(مثال ۶)

الگویتم NSGA II



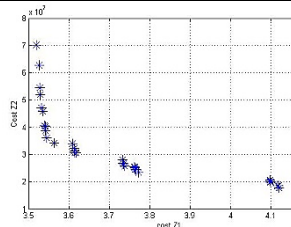
(مثال ۲۵)

(مثال ۲۶)

(مثال ۲۷)



الگوریتم MOGA



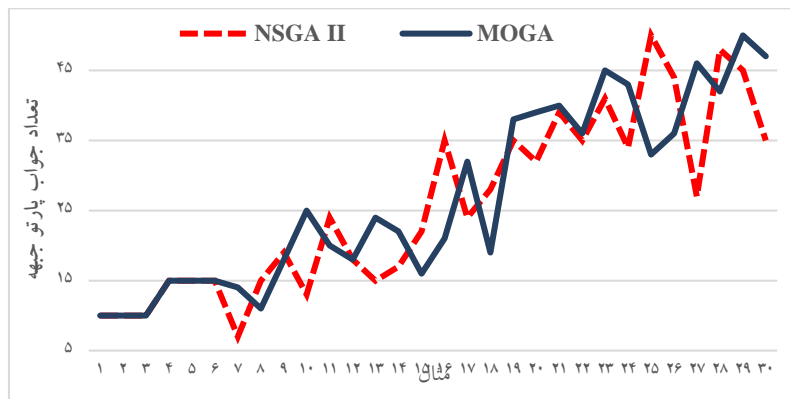
(مثال ۲۵)

(مثال ۲۶)

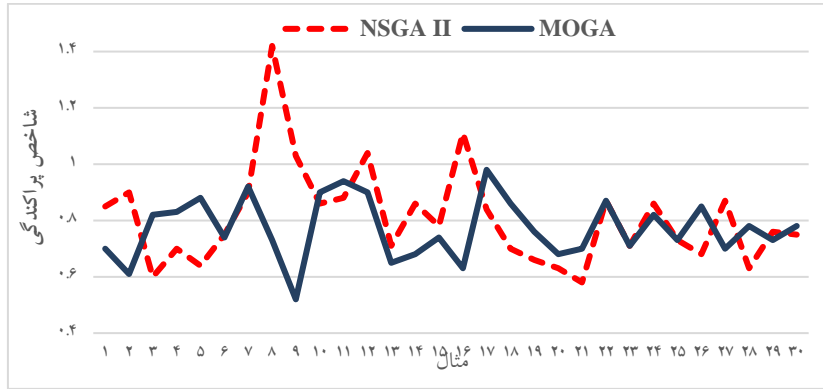
(مثال ۲۷)

شکل (۳): جبهه پارتو الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOGA

نمودارهای مقایسه‌ای با توجه به شاخص‌های معرفی شده و نتایج گزارش شده در جدول (۵) در شکل‌های (۴) و (۵) گزارش شده است.



شکل (۴): نمودار تعداد جواب پارتو جبهه الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOGA



شکل (۵): نمودار شاخص پراکندگی الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOGA

نتایج حاکی از آن است که با وجود زمان اجرای کمتر در الگوریتم پیشنهادی، در شاخص پراکندگی الگوریتم NSGA II و در شاخص تعداد جواب‌های لایه پارتو کارایی دو الگوریتم تقریباً همسان است. لازم به ذکر است که با توجه به ویژگی این دو شاخص، الگوریتمی بهتر است که مقدار شاخصه بزرگتری داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات مطالعات آتی

حمل و نقل در مسئله مسیریابی تولید نقش بسیار مهمی در لجستیک و توزیع کالا دارد و همواره در تحقیقات سعی شده است که مدل‌های کلاسیک را به مسائل دنیای واقعی نزدیکتر کرده تا نیازهای حوزه لجستیک پوشش داده شوند یکی از این موارد وقوع تصادف و ریسک‌های ناشی از آن می‌باشد. در این مطالعه، یک مدل مسیریابی تولید با دو هدف تمرکز بر کاهش هزینه‌ها و کمینه کردن ریسک تصادف در حمل و نقل با در نظر گرفتن برونسپاری، چند محصولی و چند دوره‌ای پیشنهاد شده است. در این مطالعه برای بررسی کارایی مدل NSGA-II با روش محدودیت افسیلون با ارائه هشت مسئله مقایسه شده‌اند. از آنجاییکه این مسئله NP-hard می‌باشد، به منظور حل مدل ارائه شده چند هدفه از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی در اینجا ۳۰ مسئله با ابعاد گوناگون تولید شده و با



توجه به سه شاخص ارزیابی نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) پیشنهادی مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که با وجود زمان اجرای کمتر در الگوریتم پیشنهادی، در شاخص پراکندگی الگوریتم NSGA II دارای کارایی مناسب‌تری است در حالیکه در شاخص تعداد جوابهای لایه پارتو دو الگوریتم دارای کارایی تقریباً برابری هستند. به عنوان پیشنهاد آتی می‌توان حالت تک کارخانه‌ای بررسی شده در این تحقیق را به حالت چند کارخانه‌ای تعمیم داد و همچنین می‌توان تصمیم‌گیری در رابطه با توالی تولید محصولات را نیز در نظر گرفت. همچنین در نظر عدم قطعیت در زمان سفرها و یا تعداد مشتریان و یا حل مسئله در شرایط زمان واقعی می‌تواند منجر به انجام تحقیقات ارزشمندتری در این زمینه گردد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Inventory Routing Problem (IRP)
2. Production Routing Problem (PRP)
3. Greedy Randomized Adaptive Search (GRASP)
4. Mixed-Integer Programming (MIP)

۸- مراجع

- [1] Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. & Jans, R. (2012) "Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem", *Transportation science*, Vol. 48(1), pp. 20-45.
- [2] Chandra, P. (1993) "A dynamic distribution model with warehouse and customer replenishment requirements", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44(7), pp. 681-692.
- [3] Chandra, P. & Fisher, M. L. (1994) "Coordination of production and distribution planning", *European Journal of Operational Research*, Vol. 72(3), pp. 503-517.
- [4] Fumero, F. & Vercellis, C. (1999) "Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules", *Transportation science*, Vol. 33(3), pp. 330-340.
- [5] Boudia, M., Louly, M. A. O. & Prins, C. (2008) "Fast heuristics for a combined



- production planning and vehicle routing problem“, *Production Planning and Control*, Vol. 19(2), pp. 85-96.
- [6] Ruokokoski, M., Solyali, O., Cordeau, J.-F., Jans, R. & Süral, H. (2010) “Efficient formulations and a branch-and-cut algorithm for a production-routing problem“, *GERAD Technical Report G-2010-66*, Vol., pp.
- [7] Archetti, C., Bertazzi, L., Paletta, G. & Speranza, M. G. (2011) “Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system“, *Computers & Operations Research*, Vol. 38(12), pp. 1731-1746.
- [8] Absi, N., Archetti, C., Dautère-Pérés, S. & Feillet, D. (2014) “A two-phase iterative heuristic approach for the production routing problem“, *Transportation science*, Vol. 49(4), pp. 784-795.
- [9] Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. & Jans, R. (2015b) “The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms“, *Computers & Operations Research*, Vol. 55, pp. 141-152.
- [10] Díaz-Madroñero, M., Peidro, D. & Mula, J. (2015a). Integrated production and routing planning decisions under uncertainty: a case study. Paper presented at the 2015 Conference of the International Fuzzy Systems Association and the European Society for Fuzzy Logic and Technology (IFSA-EUSFLAT-15).
- [11] Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. & Jans, R. (2015a) “Benders decomposition for production routing under demand uncertainty“, *Operations Research*, Vol. 63(4), pp. 851-867.
- [12] Díaz-Madroñero, M., Peidro, D. & Mula, J. (2015b) “A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions“, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 88, pp. 518-535.
- [13] Kumar, R. S., Kondapaneni, K., Dixit, V., Goswami, A., Thakur, L. S. & Tiwari, M. (2016) “Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization



- approach“, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 99, pp. 29-40.
- [14] Belo-Filho, M., Amorim, P. & Almada-Lobo, B. (2015) “An adaptive large neighbourhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products“, *International Journal of Production Research*, Vol. 53(20), pp. 6040-6058.
- [15] Hein, F. & Almeder, C. (2016) “Quantitative insights into the integrated supply vehicle routing and production planning problem“, *International Journal of Production Economics*, Vol. 177, pp. 66-76.
- [16] Brahimi, N. & Aouam, T. (2016) “Multi-item production routing problem with backordering: a MILP approach“, *International Journal of Production Research*, Vol. 54(4), pp. 1076-1093.
- [17] Rahimi, M., Baboli, A. & Rekik, Y. (2017). Inventory routing problem for perishable products by considering customer satisfaction and green criteria. In *Dynamics in Logistics* (pp. 445-455): Springer.
- [18] Solyali, O. & Süral, H. (2017) “A multi-phase heuristic for the production routing problem“, *Computers & Operations Research*, Vol. 87, pp. 114-124.
- [19] Qiu, Y., Ni, M., Wang, L., Li, Q., Fang, X. & Pardalos, P. M. (2018) “Production routing problems with reverse logistics and remanufacturing“, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 111, pp. 87-100.
- [20] Qiu, Y., Wang, L., Xu, X., Fang, X. & Pardalos, P. M. (2018a) “Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-product multi-vehicle production routing problems with startup cost“, *Expert Systems with Applications*, Vol. 98, pp. 1-10.
- [21] Qiu, Y., Wang, L., Xu, X., Fang, X. & Pardalos, P. M. (2018b) “A variable neighborhood search heuristic algorithm for production routing problems“, *Applied Soft Computing*, Vol. 66, pp. 311-318.
- [22] Neves-Moreira, F., Almada-Lobo, B., Cordeau, J.-F., Guimarães, L. & Jans, R. (2019) “Solving a large multi-product production-routing problem with delivery time windows“, *Omega*, Vol. 86, pp. 154-172.



- [23] Avci, M. & Yildiz, S. T. (2019) "A matheuristic solution approach for the production routing problem with visit spacing policy", *European Journal of Operational Research*, Vol., pp.
- [24] Shuang, Y., Diabat, A. & Liao, Y. (2019) "A stochastic reverse logistics production routing model with emissions control policy selection", *International Journal of Production Economics*, Vol. 213, pp. 201-216.
- [25] Li, Y., Chu, F., Chu, C. & Zhu, Z. (2019) "An efficient three-level heuristic for the large-scaled multi-product production routing problem with outsourcing", *European Journal of Operational Research*, Vol. 272(3), pp. 914-927.
- [26] Bula, G. A. Prodhon, C. Gonzalez, F. A. Afsar, H. M. & Velasco, N. (2017) "Variable neighborhood search to solve the vehicle routing problem for hazardous materials transportation", *Journal of hazardous materials*, vol. 324, pp. 472-480.
- [27] Bula, G. A. Afsar, H. M. González, F. A. Prodhon, C. & Velasco, N. (2019) "Bi-objective vehicle routing problem for hazardous materials transportation", *Journal of cleaner production*, vol. 206, pp. 976-986, 2019.
- [28] Behnamian, J & Adabi, F. (2018) "Competitive Production Routing Problem: Modeling, Solving and Valid Inequalities". *Modern Research in Decision Making*, 3(2), 55-79.
- [29] Timajchi, A. Al-e-Hashem, S. M. M. & Rekik, Y. (2019) "Inventory routing problem for hazardous and deteriorating items in the presence of accident risk with transshipment option", *International Journal of Production Economics*, 209, 302-315.
- [30] Bodin, L. and Golden, B. (1981) "Classification in vehicle routing and scheduling", *Networks*, Vol. 11(2), pp. 97-108.
- [31] Bérubé, J. F., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2009) "An exact ϵ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the



- Traveling Salesman Problem with Profits", European journal of operational research, 194(1), 39-50.
- [32] Sabouhi, F., Bozorgi-Amiri, A. (2019). A bi-objective mathematical model for emergency evacuation considering heterogeneous fleet of vehicles. *Modern Research in Decision Making*, 4(1), 119-137.
- [33] Taghavifard, S. M. T. Dehghani, M. H. & Aghaei, M. (2015) "The Model for Lot Sizing Problem with Supplier Selection and Solving by NSGA-II (Case Study: Morvarid Panberiz Company)", *Management Research in Iran*, 19(2): 65-89.
- [34] Maghsoud, A. Mahdi, A. & Nezhadi Mostafa, H. (2014) "Application of multi-level, multi-objective mathematical model to determine the optimal level of effective quality factors in plastic injection quality and using fuzzy dual response surface methodology (Case Study: Movable arm rest Teflon Bush for bus seat)", *Management Research in Iran*, 18 (2); 1 -23.
- [35] Moura A. (2008) A Multi-Objective Genetic Algorithm for the Vehicle Routing with Time Windows and Loading Problem. In: Bortfeldt A., Homberger J., Kopfer H., Pankratz G., Strangmeier R. (eds) *Intelligent Decision Support*. Gabler