

به کارگیری الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه برای مسیریابی خودروهای امدادی با در نظر گرفتن خرابی مسیر و خرابی خودروها

خداکرم سلیمی فرد^۱، محمدحسین کبگانی^{۲*}

۱- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۲- دانشجوی دوره دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

رسید مقاله: ۲۱ شهریور ۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۵ مهر ۱۳۹۹

چکیده

توسعه شتابان شهرها و ازدیاد روز افزون جمعیت شهری در دهه‌های اخیر، برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل شهرها را بیش از پیش با مشکل مواجه کرده است. این مشکل در زمان وقوع بحران‌های طبیعی و به ویژه زمانی که با ناهنجاری‌های اجتماعی همراه می‌شوند، بسیار پیچیده‌تر می‌گردد. از این رو مسیریابی خودروهای امدادی در شرایط بحران از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، مساله مسیریابی خودروهای امدادی با در نظر گرفتن خرابی مسیر و خرابی خودروهای امدادی همراه با یک‌سری محدودیت‌های عملیاتی بررسی می‌شود. در این پژوهش یک مدل ریاضی دو هدفه برای خرابی مسیر و خرابی خودرو در نظر گرفته شده است. در تابع هدف اول، مجموع نرخ مشتریان از دست رفته ناشی از ازدحام در تسهیلات و انسداد مسیرهای ارتباطی کمینه می‌گردد. همچنین تابع هدف دوم، میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان را کمینه می‌سازد. همچنین این رابطه میزان کارایی (احتمال خرابی) خودرو مورد استفاده را نیز نشان می‌دهد. در ادامه، مدل پیشنهادی پژوهش را در ابعاد مختلف با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه و الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه با نرم‌افزار MATLAB حل نموده و کارایی آن را با شاخص‌های شش‌گانه مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

کلمات کلیدی: مدیریت بحران، مسیریابی، خودروهای امداد، الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه، الگوریتم ژنتیک دو هدفه

۱ مقدمه

مدیریت بحران یکی از موضوعاتی است که در عصر حاضر به صورت حرفه‌ای به عنوان یک شاخه اصلی در مدیریت محسوب می‌گردد. اهمیت این موضوع از آنجا ناشی می‌گردد که امروزه مدیریت بحران یکی از اجزای بسیار مهم در برنامه‌ریزی استراتژیک سازمان به شمار می‌آید. با توجه به افزایش حوادث غیرمترقبه، هر ساله

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: mohammadhossein.kabgani@gmail.com

میلیون ها نفر از مردم تحت تأثیر سوانح و بحران های طبیعی و یا غیر طبیعی قرار می گیرند و در دهه های اخیر تعداد افرادی که قربانی شده اند به صورت چشم گیری افزایش یافته است و ماهیت بحران ها به گونه ای است که پاسخگویی به آنها باید در زمان اندک صورت پذیرد [۱].

لذا باید توجه کرد که مدیریت بحران را نباید فقط واکنش تاکتیکی در هنگام رخداد یک بحران در نظر گرفت، بلکه می توان به عنوان فعالیت های پیشگیرانه و آمادگی در برابر بحران و بهبود وضعیت بحران در نظر گرفت. از این رو مکانیابی بهینه تسهیلات، نمونه ای از سیاست گذاری دولت ها با درک منافع ناشی از صرفه جویی در استفاده از منابع، افزایش کارایی به ویژه در هنگام وقوع بحران بسیار حیاتی می باشد [۲]. به عبارت دیگر انتخاب مکان مناسب برای استقرار تسهیلات امدادی یا اضطرار (اورژانسی) مانند ایستگاه های آمبولانس و آتش نشانی از جمله تصمیم گیری های مهم در مدیریت آثار مخرب ناشی از وقوع بحران است.

در زمان وقوع حوادث، یکی از نیازهای اساسی در یک عملیات امدادرسانی در سطح وسیع، بهره وری کامل و بیشینه از تمامی پتانسیل ها و امکانات موجود است. از سوی دیگر انتخاب مسیر مناسب برای رسیدن تسهیلات امدادی (اورژانسی) مانند خودروهای آتش نشانی و آمبولانس از محل استقرار برای خدمات رسانی به آسیب دیدگان از جمله تصمیم گیری های مهم در مدیریت آثار مخرب ناشی از وقوع بحران است. علاوه بر موارد ذکر شده، در زمان وقوع بحران و ضرورت استفاده از خودروهای امدادی، ممکن است به دلایل مختلفی همچون انجام نشدن دوره های نگهداری و تعمیرات خودروها، نبود قطعات فنی مورد نیاز این خودروها و یا حتی آسیب دیدن این خودروها در حین انجام خدمت به حادثه دیدگان به علت خرابی مسیر و دیگر حوادث، قابل استفاده نباشد و باعث ایجاد محدودیت در امر خدمت رسانی گردد.

از این رو با توجه به موارد بیان شده می توان اهمیت انجام این پژوهش را بیشتر درک نمود. در این پژوهش از الگوریتم رقابتی استعماری دو هدفه (MOICA) که یک الگوریتم تکاملی با الهام از زندگی اجتماعی انسان ها می باشد، استفاده شده است. این الگوریتم با مدلسازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی-سیاسی برای حل مسایل ریاضی بهینه سازی ارایه می دهد [۳]. در گام بعد برای اعتبارسنجی جواب های به دست آمده از روش رقابت استعماری دو هدفه، مدل پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAII) که یکی از روش های مرسوم برای حل مسایل مدیریت بحران می باشد مورد حل قرار گرفت و کیفیت جواب های هر دو الگوریتم با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به طور کلی این پژوهش بر اساس هدفی که دنبال می کند به چند بخش تقسیم می گردد: در بخش اول بعد بازخوانی ادبیات نظری پژوهش، تعریف مساله ارایه می شود. در بخش دوم بر اساس مفروضات در نظر گرفته شده، یک مدل ریاضی ارایه می گردد. در بخش سوم، از آنجا که مساله مورد بررسی از جمله مسایل NP-Hard محسوب می گردد، یک الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه برای حل مساله در ابعاد بزرگ، ارایه می گردد. در بخش چهارم، اعتبارسنجی مدل ریاضی و کارایی الگوریتم های حل ارایه شده از طریق مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAII)، مورد ارزیابی قرار می گیرد. بخش انتهایی پژوهش به جمع بندی، نتیجه گیری و ارایه پیشنهادها برای مطالعات آتی می پردازد.

۲ پیشینه تحقیق

مساله مسیریابی وسیله نقلیه توسعه یافته مساله TSP است که در آن وسیله (وسایل) نقلیه با ظرفیت Q از انبار (انبارها) شروع به حرکت کرده و مجموعه‌ای از n مشتری را با تقاضای Q_i ملاقات می‌کند و در پایان به انبار باز می‌گردد. اگر چندین وسیله نقلیه وجود داشته باشد، مساله مسیریابی وسایل نقلیه مطرح می‌شود. این مساله در پی یافتن حداقل مسافت برای یک وسیله نقلیه یا حداقل مسافت ترکیبی از مسیرها، برای تعدادی از وسایل نقلیه (m) است که باید به تعدادی مشتری (n) خدمت‌رسانی کنند. در این مساله، مینیم کردن مسافت سفر، زمان سفر و تعداد وسیله نقلیه می‌تواند از اهداف مساله باشد [۴]. هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه و فقط یک بار ویزیت می‌شود. هر وسیله نقلیه سفرش را از ایستگاه مرکزی شروع و به همان ایستگاه ختم می‌کند. مجموع تقاضای مشتریانی که توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌رسانی می‌شوند، نباید بیش از ظرفیت آن وسیله نقلیه باشد.

یکی از عناصر مهم در حمل و نقل، ترافیک می‌باشد. ازدحام و ترافیک یک پدیده معمول در بیشتر مناطق، به خصوص در مناطق شهری می‌باشد [۵]. ترافیک یکی از بخش‌های جدایی‌ناپذیر زندگی مدرن امروزی می‌باشد [۶]. در حال حاضر در اکثر شهرهای بزرگ ظرفیت جاده‌ها جواب‌گوی تعداد خودروها نیست و این عامل باعث تاخیر در حمل و نقل می‌گردد [۷]. مساله مسیریابی وسایل نقلیه قلب سازماندهی توزیع است. هزاران شرکت که در امور تحویل، جمع‌آوری و حمل و نقل اشیاء و انسان‌ها فعالیت دارند، هر روزه با این مساله روبه‌رو می‌شوند. از آنجا که سازمان‌ها دارای شرایط متفاوتی هستند، اهداف و قیود این مساله بسیار متنوع است [۸].

بلاای طبیعی همچون زلزله، سیل، طوفان و غیره تلفات مالی و انسانی زیادی را همه ساله به دولت‌ها و جوامع مختلف وارد می‌کنند. یکی از مسایل مهمی که در سال‌های اخیر در تمامی کشورها و از جمله ایران به آن پرداخته شده است، مساله مدیریت بحران است [۹]. مدیریت بحران را می‌توان قانون و قاعده‌ای برای جلوگیری کردن و یا مواجه شدن با ریسک‌های احتمالی وقوع هر بحران طبیعی و غیرطبیعی تعریف کرد. در واقع مدیریت بحران مجموعه‌ای از فرایندها را قبل، حین و پس از وقوع هر بحران پیش‌بینی و برنامه‌ریزی می‌کند تا بتواند تا حد ممکن از تلفات مالی و انسانی هر بحران جلوگیری کند و یا آنها را کاهش دهد [۱۰].

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه لجستیک امدادرسانی صورت پذیرفته است. بسیاری از پژوهشگران به طور خاص بر برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تمرکز کرده‌اند [۱۱]. الگوریتم دیکسترا مشهورترین الگوریتم برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از یک مبدأ روی گراف وزن دار می‌باشد. از این‌رو برخی از پژوهشگران در پژوهش‌های خود بر روی انتخاب اماکن امدادرسانی تمرکز کرده‌اند. لاکومه^۱ و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای امدادرسانی در شرایط بحران با استفاده از ماشین‌های آتش‌نشانی ارایه نمودند. در این مدل، تابع هدف به صورت حداقل کردن حداکثر بوده و به دنبال حداقل کردن بیشترین هزینه ایجاد شده توسط هر ماشین و به دنبال آن، حداقل کردن زمان امدادرسانی می‌باشد [۱۲].

¹ - Lacomme

به طور کلی لجستیک امداد رسانی عبارت است از فرایند برنامه ریزی، پیاده سازی و پایش جریان و ذخیره مؤثر و با هزینه مناسب کالا و مواد و همچنین اطلاعات مرتبط، از نقطه ارسال تا لحظه رسیدن آنها به دست مصرف کنندگان برای کاهش و التیام درد افراد حادثه دیده. این عملیات دامنه ای از فعالیت ها همچون آمادگی، برنامه ریزی، تدارکات، حمل و نقل، انبارداری، رهگیری، ردیابی و ترخیص گمرکی را شامل می شود [۱۳]. در واقع فعالیت های شمرده شده در تعریف بالا، همگی جزو فعالیت های اصلی در دو فاز آمادگی و پاسخ از چرخه مدیریت بحران هستند. میزان و حجم فعالیت های لجستیکی در این دو فاز به حدی است که تقریباً ۸۰ درصد از فعالیت های امداد رسانی را شامل می شود [۱۴].

مساله مسیریابی وسایل نقلیه که یک مساله بهینه سازی ترکیبی است، ابتدا در مقاله های دنتزیگ و رامسر^۱ معرفی شد که تاکنون به صورت وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در سال های اخیر توجه به مساله مسیریابی چند هدفه افزایش یافته است. از جمله اهدافی که در این پژوهش ها مورد توجه بوده است، می توان به موارد میزان کالای جابه جا شده در هر مسیر، تعداد مشتریان موجود در هر مسیر، طول مسیرها و یا زمان عبور از مسیرها اشاره کرد [۱۶].

در پژوهشی که توسط ارکات و همکاران انجام گردید، آنها مساله مسیریابی تسهیلات اضطراری را با در نظر گرفتن احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی و ازدحام تسهیلات اورژانسی در زمان وقوع بحران و با استفاده از یک مدل ریاضی دو هدفه فقط به صورت یک مدل ریاضی ارایه کردند. در این پژوهش از الگوریتم های مسیریابی تحلیل به منظور شبیه سازی مسیرهای بهینه برای خودروهای امدادی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی به وسیله ریزش پل های (غیرهمسطح)، تخریب و غیره استفاده شد. انتخاب مسیر مناسب برای رسیدن تسهیلات امدادی (اورژانسی) مانند خودروهای آمبولانس و آتش نشانی و غیره از محل استقرار برای خدمات رسانی به آسیب دیدگان از جمله تصمیم گیری های مهم، در مدیریت آثار مخرب ناشی از وقوع بحران است [۱۷].

همچنین وجود شبکه گسترده ای از تأسیسات و شریان های شهری نظیر جاده ها و خیابان ها، خطوط راه آهن و مترو، پل ها و تونل ها، خطوط و تأسیسات آب، گاز، برق، نفت و بنزین و مخابرات در شهر وجود دارند که صدمات ناشی از بحران های طبیعی از قبیل سیل، زلزله و طوفان بر آنها علاوه بر ایجاد خسارات جانی و مالی، بازگشت شهر به وضعیت عادی را بسیار طولانی می سازد [۱۸]. از این رو رسیدن خودروهای امدادی به محل وقوع حادثه در شرایط بحران موجب کاهش مرگ و میر می شود [۱۹].

ازدمار^۲ و همکاران یک مدل مسیریابی وسایل حمل و نقل در مواقع بحران ارایه کرده اند. برای حل این مدل از یک روش ابتکاری استفاده شده است و کارایی مدل با داده های به دست آمده از زلزله سال ۱۹۹۰ ایزمیت ترکیه اثبات شده است [۲۰]. دلاتور^۳ و همکاران در پژوهش های مروری، به بررسی انواع مدل های مسیریابی مرتبط با عملیات امداد رسانی پرداخته اند. اصلی ترین بخش یک عملیات لجستیک امداد رسانی، توزیع

^۱ - Dantzig & Ramser

^۲ - Zdamar

^۳ - De la Torre

کالاهای امدادی برای نجات جان انسانهاست. از طریق مصاحبه با سازمان‌های درگیر در امدادرسانی، مرور انتشارات آنها و مرور پیشینه مدل‌های پژوهش در عملیات رایج در حمل و نقل کالاهای امدادی، این مقاله تحلیل استفاده از چنین مدل‌هایی را از دید دانشگاهیان و متخصصان شاغل در این حوزه فراهم می‌کند [۲۱].

کچپل و همکاران، از یک روش الگوریتم بهبودیافته مورچگان برای حل مساله مسیریابی وسیله نقلیه دریافت و تحویل همزمان کالا استفاده کردند. در روش آنها از یک ساختار مناسب برای افزایش کیفیت جواب‌ها و همچنین از دو جستجوی محلی چندگانه استفاده شده و مزیت این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های دیگر، توانایی حل نسخه‌های دیگر از مساله مسیریابی است [۲۲]. اتکینسون^۱ و همکاران در پژوهش خود از الگوریتم کلونی مورچگان بهره گرفتند. این الگوریتم دارای یک تابع هدف است که در برگیرنده متغیرهایی در جهت صرفه‌جویی و روش به‌روزرسانی فرومون تولیدشده توسط مورچگان می‌باشد. نتایج ارایه شده نشان از قابلیت الگوریتم پیشنهادی در یافتن کوتاه‌ترین فاصله دارد [۲۳].

ی^۲ و همکاران یک مدل یکپارچه مکان‌یابی توزیع برای یکپارچه کردن حمایت‌های لجستیکی و عملیات تخلیه در مرحله پاسخ به بحران ارایه کرده‌اند. مدل جریان شبکه چند کالایی عدد صحیح مختلط آنها، وسایل نقلیه را کالاهایی با مقدار عدد صحیح در نظر می‌گیرد تا همانند متغیرهای صفر و یک با آنها برخورد کند. مدلسازی ارایه شده دارای دو مرحله است: در مرحله اول رابطه‌بندی یک مساله با موارد پیش گفته شکل می‌گیرد. در مرحله بعد یک الگوریتم برای تولید مسیرهای حمل و نقل و دستورالعمل بارگیری و تخلیه تولید می‌شود [۲۴]. ازدمار و دمیر یک روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و مسیریابی برای یکپارچه کردن مسیریابی وسایل حمل و نقل برای فعالیت‌های بعد از بحران و در مقیاس واقعی و بزرگ ارایه کرده‌اند. این روش یک الگوریتم خوشه‌بندی چند سطحی است که گره‌های تقاضا را در هر سطح برنامه‌ریزی به گروه‌های کوچک‌تری خوشه‌بندی می‌کند. در واقع مدل ارایه شده با استفاده از یک مدل جریان شبکه به صورت سلسله‌مراتبی، ابتدا خوشه‌بندی نقاط تقاضا را انجام می‌دهد و سپس مسیریابی می‌کند [۲۵].

۳ بیان مساله و ارایه مدل ریاضی

مساله این پژوهش مسیریابی تمامی خودروهای امدادی با رویکرد خرابی مسیر و همچنین خرابی خودرو امدادی می‌باشد. همان‌گونه که از نام مساله مسیردهی خودرو و هدف این پژوهش می‌توان استنباط نمود، این مساله به تعیین مسیر کارا با توجه به هدف مساله می‌پردازد. در واقع، بهبود بخش حمل و نقل و سرعت بخشی به کمک‌رسانی به مصدومان در زمان وقوع یک حادثه طبیعی و به‌طور کلی زمان‌های بحرانی (از قبیل سیل، زلزله، طوفان و غیره) از نظر این مساله، از طریق تعیین مسیر درست انجام می‌پذیرد. باید پذیرفت که بهبود تنها به مسیر درست وابسته نمی‌باشد و مسیر مناسب فقط یکی از گزینه‌ها برای بهبود می‌باشد. زمان آن فرا رسیده است تا مدل‌های مسیردهی خودرو، به سمت تعیین گزینه‌های دیگری افزون بر تعیین مسیر درست برای بهبود حرکت نمایند.

¹ - Atkinson

² - Yi

به همین دلیل مساله نخست این پژوهش شناسایی راهکارهای دیگر (افزون بر مسیر درست) با توجه به شرایط ترافیکی است تا به بهبود خدمت رسانی به مصدومان کمک نماید. همچنین، مساله دوم این پژوهش، چگونگی قرار دادن این راهکارها در قالب یک مدل بهینه سازی ریاضی می باشد. مساله سوم این پژوهش نیز ارایه یک مساله جدید مسيردهی خودرو با در نظر گرفتن خرابی مسیر و خرابی خودرو امداد رسان و مدل سازی آن می باشد.

به طور کلی در این پژوهش شبکه ای از گره ها و کمان ها از قبل مشخص است و طول کوتاه ترین مسیر ارتباطی بین هر جفت گره طول مسافت بین آنها تلقی می شود. مشتریان (مصدومان) در برخی از نقاط شبکه مستقرند و فاصله زمانی بین تقاضاهای متوالی برای هر مشتری یک متغیر تصادفی است. تعدادی از گره های شبکه به منزله سایت های کانیدیدا برای استقرار تسهیلات اورژانسی در نظر گرفته می شوند. در هر تسهیل، تعدادی خدمت دهنده (وسیله نقلیه اورژانسی) مستقر می گردد و زمان های خدمت دهی توسط هر یک از آنها از توزیع آماری مشخصی پیروی می کند. در هنگام وقوع بحران، خدمت دهندگان مستقر در تسهیلات برای خدمت رسانی به آسیب دیدگان به محل آنها اعزام می شوند. از سوی دیگر در هر تسهیل، احتمال مشخصی را می توان برای بلوکه شدن (حضور نداشتن خدمت دهنده در تسهیل) محاسبه کرد. علاوه بر این، هر یک از کمان های شبکه با احتمال مشخصی در زمان وقوع بحران مسدود یا خراب می شوند. این احتمال را می توان با توجه به عواملی همچون نوع مصالح و زیرسازی ها، وجود تونل ها و پل ها در کمان، گذر از مسیر گسل ها و جریان های سیلابی و یا نزدیکی به پرتگاه ها و مسیرهای کوهستانی برآورد و مشخص کرد. از سوی دیگر علاوه بر وجود احتمال خرابی مسیر برای حرکت خودرو امدادی، ممکن است خودرو امدادی مستقر در هر یک از سایت ها نیز، قبل از شروع خدمت رسانی دچار خرابی کلی (غیر قابل تعمیر) و یا خرابی جزئی (قابل تعمیر در زمان کوتاه) باشد. همچنین ممکن است این خودرو در حین انجام خدمت رسانی به حادثه دیدگان، بر اثر خرابی مسیر، دچار آسیب گردد و از فرایند امداد رسانی خارج گردد. مفروضات زیر در مدل سازی مساله این پژوهش مدنظر قرار گرفته است:

- مختصات گره های شبکه و، در نتیجه، طول کوتاه ترین مسیر بین هر جفت گره از قبل مشخص است.
- مشتریان در گره هایی از شبکه مستقرند و فواصل زمانی بین تقاضاهای متوالی هر مشتری از یک توزیع نمایی با نرخ مشخص پیروی می کند.
- احتمال خرابی خودروهای هر تسهیل یکسان در نظر گرفته شده است.
- هر تسهیل خودروهای امدادی متفاوتی می تواند داشته باشد. برای مثال در یک تسهیل ممکن است تنها خودرو امدادی، خودرو آتش نشانی باشد، و در تسهیل دیگر تنها خودرو امدادی، آمبولانس و غیره باشد. از این رو کارایی هر تسهیل می تواند متفاوت باشد.
- تعدادی سایت کانیدیدا برای استقرار تعداد مشخصی تسهیل در نظر گرفته شده اند.
- تعداد خدمت دهندگان در هر یک از تسهیلات از قبل مشخص و یکسان است.

• میزان کارایی خودروهای امدادی موجود در تسهیل بر روی نرخ خدمت‌دهی آن تسهیل اثر مستقیم دارد.

• در زمان وقوع بحران، هر یک از کمان‌های شبکه با احتمال مشخصی مسدود می‌گردند.

• نظام خدمت‌دهی در هر تسهیل از نوع نوبتی است و صف‌ها در حالت پایدار بررسی می‌شوند. نمادگذاری به کاررفته در مدل ریاضی به شرح زیر است:

• اندیس‌ها

V مجموعه نقاط شبکه (m و n اندیس نقاط شبکه)

A مجموعه کمان‌های شبکه ((n, m) کمان واصل میان جفت گره n و m)

$I \subset V$ مجموعه مشتریان (i اندیس مشتریان)

$J \subset V$ مجموعه سایت‌های کاندید (j اندیس سایت)

• پارامترها

d_i نرخ تقاضا (تعداد تقاضا در واحد زمان) برای مشتری i

μ نرخ خدمت‌دهی برای هر خدمت‌دهنده

C تعداد خدمت‌دهندگان مستقر در هریک از تسهیلات

t_{nm} زمان طی کردن کمان (n, m)

f_{nm} احتمال خرابی کمان (n, m)

E_j میزان کارایی خودرو امدادی

• متغیرها

x_{ij} اگر مشتری i به تسهیل مستقر در سایت j تخصیص یابد، برابر با ۱ در غیر این صورت ۰ است

y_j اگر تسهیلی در سایت j مستقر یابد، برابر با ۱ در غیر این صورت ۰ است

Z_{nm}^{ij} اگر کمان (n, m) در مسیر انتقال تقاضای مشتری i به تسهیل مستقر در سایت j قرار داشته باشد، برابر با ۱ در غیر این صورت ۰ است

q_{ij} احتمال سالم بودن مسیر تسهیل مستقر در سایت j تا مشتری i

P_j احتمال حدی حضور نداشتن خدمت‌دهنده در تسهیل مستقر در سایت j

λ_j مجموع نرخ تقاضا برای دریافت خدمت از تسهیل مستقر در سایت j

ρ_j نسبت نرخ تقاضا به نرخ خدمت‌دهی در تسهیل مستقر در سایت j

از این‌رو می‌توان مدل ریاضی مساله را در قالب یک مدل دوهدفه به صورت زیر نشان داد:

(۱)

$$\text{Min } W_1 = \sum_{i \in I} (d_i - \sum_{j \in J} d_i x_{ij} q_{ij} (1 - p_j))$$

$$\text{Min } W_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{(n, m) \in A} (\tau - E_j) t_{nm} Z_{nm}^{ij} \quad (2)$$

s.t.

$$P_j = \frac{\rho_j^C}{C! \sum_{r=0}^C \frac{\rho_j^r}{r!}} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\lambda_j = \sum_{i \in I} d_i x_{ij} \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$q_{ij} = \prod_{(n,m) \in A} (1 - z_{nm}^{ij} f_{nm}) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{n(i,n) \in A} z_{in}^{ij} = x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{m(m,j) \in A} z_{mj}^{ij} = x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_n z_{nm}^{ij} - \sum_{n \neq i} z_{mn}^{ij} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, m \in V, i \neq j, m \neq i, j \quad (10)$$

$$z_{nm}^{ij} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, (n,m) \in A \quad (11)$$

$$x_{ij} \leq y \quad \forall i \in I, j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = S \quad (13)$$

$$x_{ij}, y_j, z_{nm}^{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, (n,m) \in A \quad (14)$$

$$\rho_j, P_j, \lambda_j, q_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (15)$$

• تشریح توابع هدف و محدودیت‌ها

رابطه (۱)، به عنوان تابع هدف نخست، مجموع نرخ مشتریان ازدست رفته ناشی از ازدحام در تسهیلات و انسداد مسیرهای ارتباطی را کمینه می‌نماید که این مقدار از کم کردن نرخ تقاضای پوشش‌یافته از کل نرخ تقاضا به دست می‌آید. رابطه (۲)، به عنوان تابع هدف دوم، میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان را کمینه می‌سازد. همچنین این رابطه نشان‌دهنده میزان کارایی (احتمال خرابی) خودرو مورد استفاده را نیز نشان می‌دهد. رابطه (۳)، که در واقع رابطه ارلنگ C برای سیستم صف است، احتمال حدی بلوکه شدن (مشغول بودن تمامی خدمت‌دهندگان) را برای هر یک از تسهیلات محاسبه می‌کند. این احتمال برابر با درصد زمان‌هایی است که مشتریان با تسهیل خالی مواجه می‌شوند و قادر به دریافت خدمت نیستند. رابطه (۴) ضریب بهره‌وری (نسبت نرخ مراجعه مشتریان به نرخ خدمت‌دهی) برای هر تسهیل را محاسبه می‌کند. رابطه (۵)، مجموع نرخ مراجعه مشتریان

به هر تسهیل را محاسبه می‌کند. احتمال سالم بودن هر یک از مسیرهای ارتباطی بین تسهیلات و مشتریان با رابطه (۶) محاسبه می‌شود. هر مسیر ارتباطی فقط زمانی سالم و قابل تردد است که تمامی کمان‌های موجود در آن مسیر سالم باشند. بنابراین، احتمال سالم بودن هر مسیر با توجه به احتمال خرابی در هر یک از کمان‌های موجود در امتداد آن مسیر محاسبه می‌شود. رابطه (۷) تضمین می‌کند که هر مشتری به یکی از تسهیلات تخصیص یابد. روابط (۸) تا (۱۰) پیوستگی جریان در کمان‌های شبکه را تضمین می‌نمایند. رابطه (۱۱) تضمین می‌کند که متغیرهای تعیین مسیر صرفاً برای سایت‌هایی که در آنها تسهیل مستقر گردیده است، فعال گردند. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که مشتریان فقط از سایت‌های فعال‌شده خدمت دریافت کنند. محدودیت (۱۳) تعداد کل تسهیلات احداث شده را محدود می‌نماید. روابط (۱۴) و (۱۵) دامنه متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

۴ روش‌شناسی پژوهش

از جمله ویژگی‌های مطالعه علمی که هدفش حقیقت‌یابی است، استفاده از یک روش تحقیق مناسب می‌باشد و انتخاب روش تحقیق مناسب به هدف‌ها، ماهیت و موضوع مورد تحقیق و امکانات اجرایی بستگی دارد و هدف از تحقیق دسترسی دقیق و آسان به پاسخ پرسش‌های تحقیق است. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش جمع‌آوری داده‌ها، از نوع توصیفی-تحلیلی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مطالعه کتابخانه‌ای، ادبیات مربوط به مسایل مسیریابی خودروها، پیشینه تحقیق و نظریاتی که راجع به موضوع وجود دارد، جمع‌آوری گردید. پس از آن با مدلسازی مساله مسیریابی خودروهای امدادی با دو پیش فرض اساسی خرابی مسیرهای تردد و همچنین با در نظر گرفتن خرابی خودرو، در قالب روش‌های فرا ابتکاری و با بهره‌گیری از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه، خروجی‌های مدل با استفاده از داده‌های استاندارد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین برای مدلسازی و حل مساله مسیریابی خودروهای امدادی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه از نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

۵ الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری، یک الگوریتم الهام گرفته از تکامل اجتماعی انسان است که برای بهینه‌سازی توسعه داده شده است. این الگوریتم با الهام‌گیری از یک فرایند اجتماعی سیاسی دارای توانایی بالایی بوده و تا حد بسیار زیادی نیز سریع می‌باشد. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک "کشور" نامیده می‌شوند؛ شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست یا استعمارگر^۱ انتخاب می‌شوند. باقی‌مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره^۲، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند.

^۱ -Imperialist

^۲ -Colony

قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با شکل گیری امپراطوری های اولیه، رقابت استعماری میان آنها شروع می شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری های رقیب، و به سيطرة در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری های بزرگ افزوده شده و امپراطوری های ضعیف تر، حذف خواهند شد. امپراطوری ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری ها نزدیک تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشد، با مستعمراتی که از لحاظ موقعیت به خود کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند [۲۶].

۵-۱ شکل دهی امپراطوری های اولیه

در بهینه سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مساله است. لذا یک آرایه از متغیرهای مساله که باید بهینه شوند، ایجاد می شود. در الگوریتم ژنتیک این آرایه، کروموزوم^۱ نامیده می شود. در الگوریتم رقابت استعماری این آرایه را یک "کشور" می نامیم. در یک مساله بهینه سازی N_{var} بعدی، یک کشور، یک آرایه $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می شود.

$$Country = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}] \quad (16)$$

مقادیر متغیرها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می شوند. از دیدگاه تاریخی - فرهنگی، اجزای تشکیل دهنده یک کشور را می توان ویژگی های اجتماعی - سیاسی آن کشور همچون فرهنگ، زبان، ساختار اقتصادی و سایر ویژگی ها در نظر گرفت. به عبارت دیگر در حل یک مساله بهینه سازی توسط الگوریتم معرفی شده؛ به دنبال بهترین کشور (کشوری با بهترین ویژگی های اجتماعی - سیاسی) می باشیم. یافتن این کشور در حقیقت معادل یافتن بهترین پارامترهای مساله است که کم ترین مقدار تابع هزینه را تولید می کند.

هزینه یک کشور با ارزیابی تابع هدف f در متغیرهای $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}})$ یافته می شود؛ بنابراین:

$$Cost_i = f(Country_i) = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}) \quad (17)$$

¹ - Chromosome

برای شروع الگوریتم، تعداد $N_{Country}$ کشور اولیه ایجاد می‌شود. N_i تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست یا استعمارگر انتخاب می‌شود. باقیمانده N_{Col} تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند. در پایان این گام، کشورهای امپریالیست و مستعمره‌ای هر یک مشخص شده و هزینه‌ی مربوط به هر یک نیز با توجه به تابع هدف مساله مشخص می‌شود [۲۶].

$$C_n = \max\{C_i\} - c_n \quad (18)$$

که در آن C_n ، هزینه امپریالیست n ام، $\max\{C_i\}$ بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها و c_n هزینه نرمالایز شده این امپریالیست، می‌باشد. هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف‌تری باشد)، دارای هزینه نرمالایزه کم‌تری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالایزه، قدرت نسبی نرمالایزه هر امپریالیست به صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره، بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند.

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \quad (19)$$

از طرف دیگر، قدرت نرمالایزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N.C_n = \text{round}\{P_n.(N_{col})\} \quad (20)$$

که در آن $N.C_n$ ، تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری و N_{col} نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. round نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن $N.C_n$ برای هر امپراطوری، تعدادی از کشورهای مستعمره اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و به امپریالیست n ام داده می‌شود. با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود [۲۶].

۵-۲ مدل‌سازی سیاست جذب (حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست‌ها)

سیاست همگون‌سازی (جذب)^۱ با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گیرد. کشورهای استعمارگر برای افزایش نفوذ خود، شروع به ایجاد عمران (ایجاد زیر ساخت‌های حمل و نقل، تأسیس دانشگاه و ...) می‌کنند [۲۶].

۵-۳ انقلاب (تغییر ناگهانی در موقعیت یک کشور)

بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه‌جایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود.

¹ -Assimilation

انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در جواب های بهینه محلی نجات یابد، که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می برد [۲۶].

۵-۴ جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

پس از اعمال سیاست جذب و انقلاب ممکن است به دلیل جابه جایی های صورت گرفته وضعیت یک مستعمره در یک امپراتوری بهتر از خود امپریالیست شود. در این حالت جای مستعمره با امپریالیست عوض می شود. بنابراین در الگوریتم رقابت استعماری در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمار، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست تولید می کنند). در این حالت کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون سازی بر مستعمرات خود می کند [۲۶].

۵-۵ قدرت کل یک امپراطوری (محاسبه هزینه کل هر امپراطوری)

قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراطوری برابر است با:

$$T.C_n = Cost(imperialist_n) + \xi \text{mean}\{Cost(colonies of empire_n)\} \quad (21)$$

که در آن $T.C_n$ هزینه کل امپراطوری n ام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می شود. کوچک در نظر گرفتن ξ ، موجب می شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست) شود و افزایش ξ نیز باعث افزایش تأثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می شود. در حالت نوعی $\xi = 0.5$ در اکثر پیاده سازی به جواب های مطلوبی منجر شده است [۲۷].

۵-۶ رقابت استعماری

هر امپراتوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید، در جریان رقابت های امپریالیستی، به تدریج حذف می شود و به مرور زمان، امپراتوری های ضعیف، مستعمرات خود را از دست می دهند و امپراتوری های قوی تر، این مستعمرات را تصاحب می کنند و بر قدرت خویش می افزایند. برای مدلسازی رقابت میان امپراطوری ها برای تصاحب مستعمرات، ابتدا احتمال تصاحب هر امپراطوری (که متناسب با قدرت آن امپراطوری است)، با در نظر گرفتن هزینه کل امپراطوری محاسبه می شود. بدین منظور ابتدا از روی هزینه کل امپراطوری، هزینه کل نرمالیزه شدهی آن تعیین می شود.

$$N.T.C_n = m_i \text{ax}\{T.C_i\} - T.C_n \quad (22)$$

در این رابطه $T.C._n$ هزینه کل امپراطوری n ام و $N.T.C._n$ هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراطوری می باشد. هر امپراطوری که $T.C._n$ کمتری داشته باشد، $N.T.C._n$ بیشتری خواهد داشت. در حقیقت $T.C._n$ معادل هزینه کل یک امپراطوری و $N.T.C._n$ معادل قدرت کل آن می باشد. امپراطوری با کمترین هزینه، دارای بیشترین قدرت است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره مورد رقابت، توسط هر امپراطوری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_{pn} = \left| \frac{N.T.C._n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C._i} \right| \quad (23)$$

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای این که مستعمرات مذکور به صورت تصادفی، از P ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراطوری، بین امپراطوری ها تقسیم شود، بردار روی مقادیر احتمال یادشده، به صورت زیر تشکیل می شود.

$$P = [P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, \dots, P_{pN_{imp}}] \quad (24)$$

بردار P دارای سائز $N_{imp} * 1$ است و از مقادیر احتمال تصاحب امپراطوری ها تشکیل شده است. سپس بردار تصادفی R ، هم اندازه با بردار P تشکیل می شود. آرایه های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ هستند.

$$R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}} \in U(0, 1) \quad (25)$$

سپس بردار D به صورت زیر تشکیل می شود.

$$D = P - R = [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] = [P_{p1} - r_1, P_{p2} - r_2, \dots, P_{pN_{imp}} - r_{N_{imp}}] \quad (26)$$

با داشتن بردار D ، مستعمرات مذکور به امپراطوری داده می شود که اندیس مربوط به آن در بردار D بزرگتر از بقیه باشد [۲۷].

۵-۷ سقوط امپراطوری های ضعیف

در جریان رقابت های امپریالیستی، امپراطوری های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراطوری های قوی می افتد. شروط متفاوتی را می توان برای سقوط یک امپراطوری در نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد [۲۷].

۵-۸ همگرایی

الگوریتم مورد نظر تا برآورده شدن یک شرط همگرایی، و یا اتمام تعداد کل تکرارها ادامه می یابد. پس از مدتی همه امپراطوری ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری خواهیم داشت و بقیه کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد قرار می گیرند. در الگوریتم رقابت استعماری در حالت پایه شرط توقف الگوریتم، حذف همه ی امپریالیست ها و باقی ماندن تنها یک امپریالیست است [۲۷].

۶ نمایش راه حل

یکی از مهم ترین بخش های طراحی هر الگوریتم فراابتکاری تعیین شیوه نمایش راه حل است. این نحوه نمایش با تصویر کردن خصوصیات راه حل در رشته ای از نمادها ارتباطی منطقی بین فضای اصلی مساله و فضای جست و جو با الگوریتم حل برقرار می کند. نحوه نمایش باید چنان باشد که بتواند تمامی راه حل های ممکن را نمایش دهد و از سوی دیگر با تغییر مقادیر مربوط به یک راه حل بتوان راه حل های دیگر مساله را تولید کرد. در مساله مورد بررسی، هر راه حل به کمک یک آرایه با $n+1$ (n تعداد مشتریان) سطر نمایش داده می شود. سطر نخست هر راه حل شماره سایت هایی را نشان می دهد که تسهیلات در آنها مستقر می گردند. بنابراین، این سطر به صورت رشته ای به طول m (تعداد تسهیلات) در نظر گرفته می شود که در هر آرایه ی آن، شماره یکی از سایت های منتخب ذکر می گردد.

هریک از n سطر بعدی، مسیرهای انتقال تقاضا میان مشتریان و هر یک از تسهیلات را مشخص می نماید؛ بنابراین، هر یک از سطرها دوم تا $n+1$ به ترتیب مسیرهای انتقال تقاضای مشتریان اول تا n ام را تعیین می کنند. مسیر انتقال تقاضا از هر مشتری تا تسهیل متناظر به کمک شماره گره هایی که در آن مسیر قرار دارند، مشخص می شود. بنابراین، اولین عنصر هر سطر شماره مشتری و آخرین عنصر شماره تسهیلی را که مشتری به آن تخصیص یافته است، مشخص می سازد. شکل ۱ راه حل اولیه استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تعداد گره ها (مشتریان) ۷ و تعداد ۲ تسهیل داریم. سطر اول نشان دهنده این موضوع است که از بین گره های (مشتریان) شماره ۱ تا ۷، دو سایت (تسهیل) شماره ۳ و ۵ انتخاب شده اند. همچنین سطر دوم نشان دهنده این است که مشتریان واقع در گره شماره ۱ برای دریافت خدمت بایستی به سایت شماره ۳ تخصیص داده شود. دیگر سطرها نیز به ترتیب مسیر انتقال تقاضای مشتریان ۲ تا ۷ را نشان می دهند.

۳			
۱	۲	۳	
۲	۳		
۳			
۴	۵		
۵			
۶	۴	۵	
۷	۶	۴	۵

شکل ۱. نحوه نمایش راه حل اولیه

۷ اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و یافته های پژوهش

برای بررسی روایی مدل دو راه وجود دارد. ۱- بهره مندی از نظر خبرگان و کارشناسان و ۲- مقایسه ی نتایج به دست آمده با نتایج واقعی و بررسی واقعی بودن نتایج و برآورده شدن محدودیت ها. در پژوهش حاضر از هر دو

روش برای بررسی روایی و اعتبار مدل استفاده شده است. در این پژوهش از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه برای بهینه‌سازی انتخاب شد، به این دلیل که اولاً مساله‌ی پژوهش از نوع *NP-Hard* است و روش‌های دقیق برای این گونه مسایل کارایی ندارند. دوم این که مساله پژوهش از نوع مسایل گسسته‌ی ترکیبی است. به منظور بررسی همگرایی الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری دو هدفه، به جواب بهینه‌ی سراسری، ابتدا کد مربوط به الگوریتم و مدل مساله به کمک نرم افزار متلب کدنویسی و شبیه‌سازی شد. همچنین عملیات پردازش بر روی رایانه‌ای با مشخصات Intel-corei5 2.67Ghz و RAM 4GB انجام شده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه (NSGAI) و رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) برای این مساله در جدول ۱ نشان داده است.

جدول ۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه (NSGAI) و رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) برای مساله پژوهش

الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA)		الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه (NSGAI)	
تعداد تکرار	MaxIt=200	تعداد تکرار	MaxIt=200
اندازه جمعیت	nPop=50	اندازه جمعیت	nPop=50
تعداد امپریالست‌ها	nEmp=6	درصد ایجاد تقاطع (ترکیب مجدد)	pCrossover=0.7
ضریب جذب	beta=1.5	میزان زاد ولد	nCrossover=2*round(pCrossover*nPop/2)
میزان احتمال انقلاب	pRevolution=0.1	درصد میزان جهش	pMutation=0.4
نرخ رخ دادن انقلاب	mu=0.1	نرخ جهش	mu=0.02
ضریب هزینه مستعمره‌ها	zeta=0.1	اندازه مرحله جهش	sigma=0.۱*(VarMax-VarMin)
سیاست انتخاب	alpha=1		

با توجه به این که روش‌های فراابتکاری، الگوریتم‌های تخمینی برای حل مسایل بهینه‌سازی محسوب شده و ماهیتی تصادفی دارند؛ حل یک مساله از طریق روش‌های مختلف ممکن است به پاسخ‌های مختلف منجر شود، لذا ارزیابی الگوریتم‌ها و انتخاب الگوریتم مناسب با کمک شاخص‌های متنوع مورد توجه محققان علوم مختلف قرار گرفته است. اما همگرایی در پاسخ‌های پارتو و فراهم نمودن چگالی و تنوع در میان مجموعه پاسخ‌ها، دو هدف مجزا و تا حدودی متضاد در الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه محسوب می‌شوند، لذا معیار مطلقی که بتواند در مورد عملکرد الگوریتم‌ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد. در نهایت پس از بررسی ادبیات موضوع، شش شاخص زیر به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در این پژوهش شناسایی و معرفی شده‌اند.

- شاخص تعداد جواب‌های پارتو^۱ (NPS)
این شاخص نشانگر تعداد پاسخ‌های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم می‌باشد و هر چه این تعداد بیشتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم مورد نظر است [۲۸].
- شاخص کیفیت^۲ (QM)
این شاخص نشان‌دهنده سهم الگوریتم در مجموعه پاسخ‌های پارتو حاصل از ترکیب پاسخ‌های پارتو ارایه شده از طریق کلیه الگوریتم‌های مورد مقایسه است. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشانه کارایی بهتر الگوریتم است [۲۸].
- شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل^۳ (MID)
این شاخص نشان‌دهنده میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده‌آل است. مقدار ایده‌آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف در تمامی الگوریتم‌های به کار رفته است. کمتر بودن مقدار این شاخص به معنای بهتر بودن کارایی الگوریتم می‌باشد [۲۸].
- شاخص فاصله^۴ (SM)
این شاخص نشان‌دهنده انحراف معیار فاصله پاسخ‌های نامغلوب می‌باشد. به عبارت دیگر میزان فاصله نسبی پاسخ‌های متوالی پارتو را محاسبه می‌نماید. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان کارایی بهتر الگوریتم است [۲۸].
- شاخص گوناگونی^۵ (DM)
این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهای مجموعه پاسخ پارتو را نشان می‌دهد. این شاخص طول قطر مکعب فضایی را که به وسیله‌ی مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه پاسخ‌های نامغلوب به کار می‌رود، اندازه می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص مقادیر بزرگ‌تری اختیار کند، الگوریتم مربوطه کارایی بالاتری خواهد داشت [۲۸].
- شاخص زمان اجرای الگوریتم (Time)
این شاخص بر زمان اجرای الگوریتم تأکید کرده و از مهم‌ترین شاخص‌ها در مقایسه الگوریتم‌های مختلف است و هر چه میزان آن کمتر باشد (در صورت برابر بودن سایر شاخص‌ها)، الگوریتم مورد نظر کارا تر خواهد بود. پس از شناسایی شاخص‌ها، در ادامه می‌بایست مقادیر هر شاخص در الگوریتم‌ها محاسبه و ارایه گردد. برای اطمینان از جواب‌های الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی پس از حل یک مساله در ابعاد کوچک‌تر، نتایج آن با الگوریتم فراابتکاری ژنتیک دوهدفه (NSGAII) مقایسه شد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

¹ -Number of Pareto Solution

² -Quality Metric

³ -Mean Ideal Distance

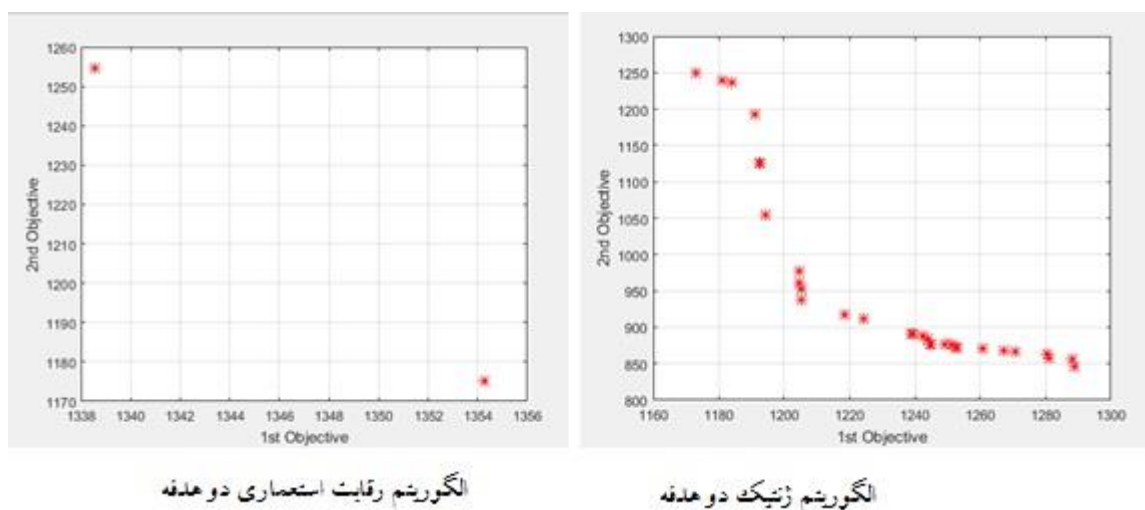
⁴ -Spacing Metric

⁵ -Diversification Metric

جدول ۲. مقایسه نتایج اجرای الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (ICAI) و الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)

الگوریتم نام	تعداد گره	تعداد سایت	تعداد فراخوانی تابع هدف	نام شاخص					
				NPS	QM	MID	SM	DM	TIME (sec)
الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)	۱۰۰	۲۰	۱۱۲۵۱	۲۳	۰/۷	۰/۷۶۹	۰/۳۶۱۴	۶/۳۶	۵۲۲
	۵۰	۱۰	۱۱۲۵۱						۲۴۲
	۲۰	۵	۱۱۲۵۱						۱۴۷
الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA)	۱۰۰	۲۰	۱۰۹۵۵	۲	۰/۷	۰/۶۸۸	۰/۵۹۶۱	۶/۳۶	۴۸۶
	۵۰	۱۰	۱۱۰۲۴						۱۸۲
	۲۰	۵	۱۱۰۳۸						۷۸

شکل ۲ مقادیر توابع هدف در الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک را با تعداد ۵۰ سایت و ۱۰ گره نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقادیر توابع هدف در الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک

با اجرای الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری دو هدفه و الگوریتم ژنتیک دو هدفه و به کمک داده‌های مورد نیاز، مدل ریاضی پژوهش در ابعاد کوچک‌تری (تعداد ۵ سایت و ۲۰ گره) مورد حل قرار گرفته است. در جدول ۳ سایت‌های انتخابی و نحوه تخصیص مشتریان موجود در هر گره به سایت پیشنهادی نشان داده شده است.

جدول ۳. سایت‌های تعیین شده و نحوه تخصیص مشتریان موجود در هر گره به سایت‌های پیشنهادی

الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA)		الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)	
شماره سایت‌های تعیین شده	۶-۹-۱۱-۱۷-۲۰	شماره سایت‌های تعیین شده	۳-۴-۱۷-۱۹-۲۰
شماره مشتری (شماره گره)	تخصیص و مسیر حرکت مشتریان به سایت‌ها	شماره مشتری (شماره گره)	تخصیص و مسیر حرکت مشتریان به سایت‌ها
۱	۱-۶	۱	۱-۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰
۲	۲-۵-۱۱	۲	۲-۵-۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۳	۳-۷-۱۰-۱۸-۲۰	۳	سایت
۴	۴-۵-۱۱	۴	سایت
۵	۵-۱۱	۵	۵-۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۶	سایت	۶	۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰
۷	۷-۱۰-۱۸-۲۰	۷	۷-۱۰-۱۸-۲۰
۸	۸-۱۲-۱۸-۲۰	۸	۸-۱۲-۱۸-۲۰
۹	سایت	۹	۹-۱۶-۱۷
۱۰	۱۰-۱۱-۲۰	۱۰	۱۰-۱۸-۲۰
۱۱	سایت	۱۱	۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۱۲	۱۲-۱۸-۲۰	۱۲	۱۲-۱۸-۲۰
۱۳	۱۳-۱۴-۱۷	۱۳	۱۳-۱۴-۱۷
۱۴	۱۴-۱۷	۱۴	۱۴-۱۷
۱۵	۱۵-۲۰	۱۵	۱۵-۲۰
۱۶	۱۶-۱۷	۱۶	۱۶-۱۷
۱۷	سایت	۱۷	سایت
۱۸	۱۸-۲۰	۱۸	۱۸-۲۰
۱۹	۱۹-۲۰	۱۹	سایت
۲۰	سایت	۲۰	سایت

همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است مساله پژوهش در ابعاد کوچک (تعداد ۲۰ گره و ۵ سایت) با هر دو الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک دو هدفه حل شده است. با توجه به خروجی حل هر دو الگوریتم می‌توان بیان نمود که برای امداد رسانی به مشتریان واقع در هر گره در روش رقابت استعماری مسیر کوتاه‌تری طی می‌شود که این نشان‌دهنده کارایی بالاتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک (NSGAI) است. برای مثال در روش حل الگوریتم رقابت استعماری، برای خدمت‌رسانی به مشتریان (حادثه دیدگان) واقع در گره ۱ تنها فاصله سایت ۶ تا گره ۱ طی می‌شود. به عبارت دیگر مشتریان واقع در گره ۱ به سایت ۶ تخصیص داده می‌شود. در عین حال این موضوع را می‌توان در روش الگوریتم ژنتیک (NSGAI) نیز دنبال نمود. همان‌گونه که در جدول فوق نشان داده شده است برای خدمت‌رسانی به مشتریان (حادثه دیدگان) واقع در گره ۱ بایستی فاصله گره‌های ۱-۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰ طی گردد.

جدول ۴: تبیین ابعاد پژوهش حاضر با برخی

منابع	نوع مساله				حوزه		نوع تابع هدف	تکنیک حل
	مکانیابی	تخصیص	مسیریابی	خرابی خودرو	سایر	سایر	حداکثرسازی حداقل سازی	
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAII) استعماری دو هدفه (ICAI)
ارکات و همکاران [17]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAII)
بازرگان و همکاران [30]			✓		✓	✓	✓	استفاده از نرم افزار GIS
هادی نژاد و همکاران [28]				✓	✓	✓	✓	چهار الگوریتم NSGAII و MOPSO و PESA-II و MALO
بابایی و همکاران [31]	✓				✓	✓	✓	الگوریتم رقابت استعماری

۸ نتیجه گیری

در این پژوهش برای حل مساله مسیریابی خودروهای امدادی با در نظر گرفتن خرابی مسیر و خرابی خودرو، مدلی جدید در چهار مرحله ارایه گردید. در مرحله اول بعد از بازخوانی ادبیات نظری پژوهش، تعریف مساله ارایه می شود. در بخش دوم بر اساس مفروضات در نظر گرفته شده، یک مدل ریاضی دو هدفه ارایه گردید. در بخش سوم، از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه برای حل مساله در ابعاد بزرگ، استفاده گردید. در مدل ریاضی ارایه شده، فرض می گردد که در هر سایت با توجه به نوع کاربری خود، خودروهای امدادی یکسانی قرار می گیرد. از این رو می توان مدل ریاضی را به گونه ای فرموله نمود که در هر سایت تمام خودروهای مورد نیاز در شرایط بحران اعم از ماشین های آتش نشانی، آمبولانس و غیره وجود داشته باشد. در نظر گرفتن وجود تمام خودروهای امدادی مورد نیاز در هر سایت، مفروضات مساله را به وضعیت دنیای واقعی نزدیک می کند، اما از سویی پیچیدگی مدل ریاضی را نیز به شدت افزایش می دهد. توسعه مدل ارایه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن وجود تمام خودروهای امدادی مورد نیاز برای هر سایت زمینه مناسبی برای ادامه مطالعات در این حوزه فراهم می کند. همچنین جدول ۴ کلیت پژوهش حاضر با برخی از پژوهش هایی که در حوزه مسیریابی خودروهای امدادی انجام شده است را نشان می دهد.

در بخش چهارم، اعتبارسنجی مدل ریاضی و کارایی الگوریتم های حل ارایه شده از طریق مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می دهد که هر کدام از الگوریتم های پیشنهادی می تواند در برخی از شاخص ها از کارایی بالاتری نسبت به دیگری برخوردار باشد. از این رو از شش شاخص جهت ارزیابی کارایی این دو الگوریتم استفاده گردید. شاخص تعداد جواب های پارتو (NPS) نشان می دهد که باتوجه به ابعاد مسایل حل شده در این پژوهش تعداد پاسخ های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI) بیشتر از تعداد پاسخ های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) می باشد که نشان دهنده کارایی بهتر الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI) است.

یکی دیگر از شاخص های مورد نظر برای سنجش میزان کارایی الگوریتم های چندهدفه استفاده از میزان شاخص کیفیت (QM) هریک از الگوریتم های مورد استفاده می باشد. این شاخص نشان می دهد که در ابعاد های مسایل حل شده مقدار این شاخص برای هر دو الگوریتم یکسان می باشد. بنابراین می توان بیان داشت که الگوریتم های پیشنهادی پژوهش دارای کارایی برابری در این شاخص می باشد. همچنین سومین شاخص ارزیابی الگوریتم های چندهدفه شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده آل (MID) است. این شاخص نشان دهنده میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده آل است که هر چه مقدار آن کمتر باشد الگوریتم مورد استفاده از کارایی بالاتری برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که کارایی الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) بالاتر از الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI) است.

شاخص فاصله (SM) یکی دیگر از شاخص های ارزیابی بین الگوریتم های چندهدفه می باشد. این شاخص نشان دهنده انحراف معیار فاصله پاسخ های نامغلوب می باشد و هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان کارایی

بهرتر الگوریتم است. بر اساس این شاخص می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI) دارد. نتیجه شاخص گوناگونی (DM) بیان می‌کند میزان فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهایی مجموعه پاسخ پارتو در الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش کارایی یکسان این دو الگوریتم را نشان می‌دهد. همچنین شاخص زمانی الگوریتم‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری دوهدفه (MOICA) با حذف جواب‌های غیرموجه موجب افزایش سرعت رسیدن به جواب بهینه در زمان کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI) می‌شود. همچنین همان‌گونه که پیش‌تر نشان داده شد، الگوریتم رقابت استعماری دوهدفه (MOICA) با تکرارهای کمتر به جواب بهینه می‌رسد، که این خود نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم رقابت استعماری می‌باشد.

منابع

- [1] Barzinpour, Farnaz (2014). Location-Multi-Objective Routing Model in Relief Chain Management with a Periodic Approach. Publication: Journal of Operations Research in its Applications, 3 (Series 42).
- [2] Mohammadi, Ahmad, Yaghoubi, Saeed and Nehafti Kohneh, Jamal. (2014). Presentation of a two-objective mathematical model of relief logistics with transmission points and support facilities (Case study: Earthquake crisis in region one of Tehran). Publication: Journal of Operations Research in its Applications, 4 (43).
- [3] Jafari Keliji, Manouchehr, Sadeghpour Haji, Mahboubeh and Haji Aghaei Keshtoli, Mostafa (2017). Timing the truck in the dock to reduce delays using the meta-heuristic algorithm of colonial competition. Publication: Journal of Operations Research in its Applications, 1398, 1 (60).
- [4] Teimoury, Ebrahim (2013). Two-Facility Location Problem with Infinite Retrial Queue. s.l. : IGI Global.
- [5] Figliozzi, Miguel Andres (2012). The Time Dependent Vehicle Routing Problem With Time Windows: Benchmark Problems, An Efficient Solution Algorithm, And Solution Characteristics. Transportation Research Part E, 48, 616-636.
- [6] Lindsey, Robin and Verhoef, Erik. (2010). CONGESTION MODELLING. Transportation science, 21, 135-143.
- [7] Tatomir, Bogdan, Rothkrantz, Leon and Suson, Adriana (2009). Travel Time Prediction For Dynamic Routing Using Ant Based Control. Proceedings of the Winter Simulation Conference. 10.
- [8] Zhang, B ,Li, H ,Li, S & ,Peng, J (2018). Sustainable multi-depot emergency facilities location-routing problem with uncertain information. . Applied Mathematics and Computation, 333, 506-520.
- [9] Katz, N ,Leonard, L ,Wiesenfeld, L ,J. Perry, J & Calder, L (2017). Support of supervised injection facilities by emergency physicians in Canada. International Journal of Drug Policy, 49, 26-31.
- [10] Ahmadi, Morteza, Seifi, Abbas and Gharahi, Alireza (2012). A humanitarian logistics model to minimize losses aftermath of an earthquake in large-scale and actual size. Journal of Emergency Management.
- [11] Zhang, Bo , Peng, Jin and Li, Shengguo (2017). Covering location problem of emergency service facilities in an uncertain environment. Applied Mathematical Modelling, 51, 429-447.
- [12] Lacomme, C Prins and Ramdan, Cherif (2013). Annals of Operations Research Competitive memetic algorithms for arc routing problems, 131, 159-185..
- [13] Yin, Ping and Mu, Lan (2012). Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. Applied Geography 34 247e254.
- [14] Overstreet, R.E(2012). Research in humanitarian logistics. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management 1(2), 114-131.
- [15] Khayal, D, Pradhananga, R, Pokharel, & Mutlu, F (2015). A model for planning locations of temporary distribution facilities for emergency response. Socio-Economic Planning Sciences, 52, 22-30.

- [16] N. Berger, A. K. Black, L. H. S. Bouwman, C & Dlugosz, J (2017). Bank loan supply responses to Federal Reserve emergency liquidity facilities. *Journal of Financial Intermediation*, 32, 1-15.
- [17] Arkat, Jamal, Zamani, Shokoufeh and Qods, Parak (2014). Location-routing for emergency facilities considering destruction probabilities for communication paths in crises. *Journal of Emergency Management*.
- [18] Zachariadis, E. E. and Kiranoudis, C. T (2011). A Local Search Meta-heuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries. *Expert Systems with Applications*, 38 (3), 2717-2726.
- [19] Lee, C., Huang, C., Hsiao, T & Wu, C (2014). Impact of Vehicular Networks on Emergency Medical Services in Urban Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 11348-11370.
- [20] Zdamar, L, Ekinci, E. and Kkyazici, B (2004). Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research*, 129(1), 217-245.
- [21] de la Torre, L, Dolinskaya, I.S. and Smilowitz, K.R (2012) Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 88-97.
- [22] Contreras, Ivan, Ferná'ndez, Elena, Reinelt, Gerhard (2012). Minimizing the maximum travel time in a combined model of facility location and network design. *Omega*, 847-860.
- [23] Atkinson, J, Kovalenko, I, Kuznetsov, N & Mykhalevych, K (2008). A hypercube queueing loss model with customer-dependent service rates. *European Journal of Operational Research* 191 (2008) 223-239.
- [24] Yi, W and Zdamar, L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177-1193.
- [25] Zdamar, L and Demir, O (2012). A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48(3), 591-602.
- [26] Enayatifar, Rasul (2013). MOICA: A novel multi-objective approach based on imperialist competitive algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 8829-8841.
- [27] Safari, Hossein and Faghieh, Alireza (2014). Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Using Developed Imperialistic Competition Algorithm (DICA). *Industrial Management Journal*.
- [28] Hadi nezahd, Farhad, Ramzi, Ali و Khaje, Mostafa (2018). Evaluation and comparison of multi-objective meta-heuristic algorithms to solve the optimization problem. *Military Management Quarterly*, No. 8.
- [29] Sorensen, Paul & Church, Richard (2010). Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems. *Socio-Economic Planning Sciences*, 44, 8-18.
- [30] Bazargan, Mehdi & Bize, Ali Akbar (2017). Implementing network analysis routing algorithms in crisis management in order to route relief facilities assuming the possibility of failure of communication routes in times of crisis using GIS. *International Conference on Urban Planning and Management*.
- [31] Shariat Mahimani, Afshin, Maadi, Saeid & Babaei, Mohsen (2012). Applying the colonial competition algorithm in locating emergency medical centers. *Sixth National Congress of Civil Engineering*.