

به کارگیری الگوریتم کلونی مورچه چند معیاره در سیستم‌های

حمل و نقل هوشمند و کاربر مبنا

زهره معصومی*، دانشجوی دکترا، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
ابوالقاسم صادقی نیارکی، استادیار، دانشکده ژئوماتیک، دانشگاه اینها (Inha)، کره جنوبی
محمدسعدی مسگری، استادیار، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

E-mail: zmasoomi@dena.kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳

چکیده

یکی از مسائل مهم در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، مسیریابی کاربر مناسب است. در چنین سیستمی هدف جلب رضایت کاربر از سیستم، جهت برآورده شدن همزمان اهداف وی در مسیرهای ارائه شده توسط الگوریتم مسیریابی است. الگوریتم‌های متداول مسیریابی در سیستم‌های اطلاعات مکانی معمولاً تک‌هدفه بوده و یا به صورت تک‌هدفه حل می‌شوند و جنبه‌های دیگر نیاز کاربران را مدنظر قرار نمی‌دهند. در تحقیق حاضر پس از بررسی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، برای مسیریابی کاربر مبنا از الگوریتم چندهدفه کلونی مورچه که با تغییراتی در ساختار الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه تک‌هدفه به دست آمده استفاده شده است. به این ترتیب که کاربر با توجه به نیازهای خود توابع هدف مورد نظر را تعریف کرده، سپس با استفاده از الگوریتم چندهدفه کلونی مورچه و برنامه طراحی شده، مسیرها رتبه‌بندی و توسط کاربر و اولویت‌های وی انتخاب می‌شوند. از مهم‌ترین نقاط قوت این الگوریتم این است که عامل مورچه با استفاده از یک نوع فرمون، برای انتخاب مسیر در هر تقاطع به صورت کاملاً چندهدفه فکر و عمل می‌کند؛ در نتیجه کاربر می‌تواند به صورت چندهدفه مسیر مورد نظر خود را انتخاب نماید. به علاوه یکی از مهم‌ترین خروجی‌های تحقیق، جبهه جواب‌های مؤثر است که به کاربر اجازه می‌دهد با مشخص کردن اولویت‌های خود، مسیر نهایی را انتخاب کند. نتایج این الگوریتم در شرایط مختلف بررسی و ارزیابی شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی الگوریتم حاکی از تنظیمات مورد قبول در پارامترهای اولیه و تکرارپذیری قابل اطمینان الگوریتم است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، مسیریابی چندهدفه، هوش جمعی، سیستم کاربر- مبنا

۱- مقدمه

قابل قبول‌تر خواهد بود، در حالی که در سیستم‌های کاربر مبنا، نحوه ترکیب داده‌ها، انجام آنالیزها، نمایش نتایج و ... همگی بر مبنای خواسته‌ها و اهداف کاربر قابل تعریف و تغییر هستند. سیستم‌های هدایت ناوگان نیز یکی از رایج‌ترین سیستم‌های حمل و نقل هوشمند است که الگوریتم‌های مسیریابی یکی از بخش‌های ضروری آن است. در جهت رعایت بیشتر خواسته‌های کاربر و کاربر- مبنا بودن سیستم، لازم است که در سیستم‌های

یکی از جنبه‌های سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، کاربر- مبنا بودن آن است، به گونه‌ای که خواسته‌ها و نیازهای کاربر بیشتر مورد توجه قرار گیرند. از این دیدگاه سیستم‌های کاربر- مبنا دقیقاً در نقطه مقابل سیستم‌های داده- مبنا قرار دارند. در سیستم‌های داده- مبنا بیشتر به جمع‌آوری داده‌های مکانی و غیرمکانی پرداخته می‌شود زیرا این اعتقاد وجود داشت که هر چه داده‌های بیشتری در سیستم ذخیره شود، سیستم اطلاعات مکانی

آمد. در تحقیق دیگری Doerner و همکارانش علاوه بر مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی، روشی نیز برای مسیریابی چندمعیاره با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه ارائه کردند [Doerner, Focke and Gutjahr, 2006]. در این تحقیق به هر تابع هدف در لحظه انتخاب نقطه بعدی در گراف، وزنی به صورت تصادفی به یال‌ها داده می‌شود و مورچه با تلفیق این وزن‌ها بهترین راه را انتخاب می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در اینجا از وزن‌دهی به توابع هدف استفاده شده و وزن‌دهی نیز به صورت تصادفی است و این روش تا حدی در تعریف معیار درست برای انتخاب نقطه بعدی ضعف دارد. همچنین در برخی موارد، از این الگوریتم برای حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. به عنوان مثال Chaharsooghi و همکارانش در سال ۲۰۰۸ از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه چندهدفه برای تعیین مکان‌های مناسب جهت استقرار منابع استفاده کرده‌اند. در این پروژه چندهدفه کردن الگوریتم توسط یک سری اطلاعات و روش‌های ابتکاری انجام شده است. به این ترتیب که در تعریف احتمال انتخاب نقاط در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه، توابع هدف نیز آورده شده‌اند. در تحقیق فوق، در میان جواب‌های حاصل از اجرای الگوریتم، هیچ انتخابی صورت نگرفته، بلکه تمامی آنها به صورت یکجا در فضای دو تابع هدف مسئله آورده شده‌اند [Chaharsooghi and Kermani, 2008]. در تحقیق حاضر یک الگوریتم چندهدفه مسیریابی با استفاده از تغییر در ساختار الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه پیشنهاد شده توسط [Dorigo, 1992] طراحی و پیاده‌سازی شده است. در ابتدا، توابع هدف مورد نیاز کاربر و مبدأ و مقصد، انتخاب شده و وارد الگوریتم می‌شوند. سپس برای انتخاب مسیر توسط مورچه، یک رتبه‌موضعی براساس توابع هدف مشخص و تعریف می‌شود، به این صورت که رتبه تمامی یال‌های منتج به نقطه‌ای که قرار است در آن نقطه بعدی تعیین شود مشخص شده و یال با رتبه بالا به عنوان مسیر بعدی انتخاب می‌شود. بنابراین همان‌گونه که ملاحظه می‌شود عامل مورچه در انتخاب مسیر بعدی به صورت کاملاً چندهدفه و نه به صورت تصادفی مثل آنچه در برخی روش‌های به کار برده شده قبلی مانند [Doerner, Focke and Gutjahr, 2006] عمل می‌کند. همچنین در

هدایت ناوگان از الگوریتم‌های مسیریابی استفاده شود که توانایی برآورده کردن چند هدف را به صورت همزمان داشته باشند، زیرا در واقع، در بسیاری از موارد مسیریابی، کاربر به جای یک هدف چندین هدف را دنبال می‌کند که ممکن است برخی از این اهداف با یکدیگر در تناقض باشند. مثال چنین اهداف متناقضی یافتن کوتاهترین مسیر و در عین حال کم ترافیک‌ترین مسیر و یا مسیری با کمترین هزینه و کمترین زمان است. از سوی دیگر بیشتر سیستم‌های امروزی تمرکز بر روی یک هدف دارند که این امر موجب تخریب برخی دیگر از جنبه‌های مسیریابی خواهد شد. به عنوان مثال تنها توجه به کوتاهترین مسیر باعث عدم توجه به ترافیک مسیر خواهد شد و چه بسا کوتاهترین مسیر، مسیر پر ترافیکی باشد. همان‌طور که در مثال‌های فوق مشاهده می‌شود، اغلب کمینه کردن بیش از یک تابع هدف مد نظر است. به عبارت دیگر در اینجا مسایل تصمیم‌گیری چندهدفه مطرح می‌شوند.

یکی از الگوریتم‌هایی که می‌تواند در مسیریابی چندهدفه مورد استفاده قرار گیرد، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۰ توسط M. Dorigo و همکارانش برای حل مشکلات پیچیده بهینه‌سازی پیشنهاد شد [Dorigo, 1992; Dorigo and Gambardella, 1997; Dorigo, Maniezzo and Colorni, 1996]. در این الگوریتم بسیاری از مشکلات موجود در الگوریتم‌های پیشین حل شده است [Dorigo and Stutzle, 2007].

از کاربردهای این الگوریتم می‌توان به حل مسائل بهینه‌سازی [Maniezzo and Colorni, 1999]، مسایل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی^۳ [Dorigo and Stutzle, 2007]، مسئله فروشنده دوره‌گرد و ... اشاره کرد. همچنین از این الگوریتم در حل مسئله چندهدفه مسیریابی نیز استفاده شده است. Chitty و Hernandez (۲۰۰۴) از یک روش ترکیبی برای مسیریابی دوهدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه استفاده کردند. آنها برای دوهدفه کردن مسیریابی از دو نوع فرمون در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه استفاده کردند [Chitty and Hernandez, 2004]. یکی از مواردی که سرعت الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه به آن وابسته است، تعداد فرمون‌هاست [Dorigo and Stutzle, 2007] و در صورتی که تعداد توابع هدف زیاد شوند، اجرای الگوریتم زمان برتر خواهد شد. بنابراین در کاربردهای موبایل، کارایی الگوریتم تا حدی پایین خواهد

جمله در می‌آیند [Coello Coello, Lamount and Veldhuizen, 2007]. در این حالت نیز از آنجایی که وزن‌ها توسط کارشناسان این زمینه تعریف می‌شوند و مسئله بر این اساس حل می‌شود، جواب‌ها کاملاً تحت تأثیر نظر کارشناسان قرار دارند و نظر کاربر تأثیری در حل مسئله ندارد. در واقع توابع هدف مختلف از قبل با استفاده از وزن‌هایی تلفیق شده و در زمان نیاز کاربر، مسئله براساس آن اوزان حل می‌شود. در روش‌های وزن‌دهی بعد از حل ابتدا مجموعه‌ای از جواب‌ها که همه بهینه^۶ هستند به دست می‌آید سپس با توجه به ترجیحات اعلام شده از طرف کاربر جواب نهایی حاصل می‌شود [Zitzler and Thiele, 1998]. به عبارت دیگر یک جواب بهینه وجود ندارد بلکه جواب، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه است و دیگر نقطه نیست، بلکه مجموعه‌ای از نقاط است که می‌تواند یک سطح، منحنی و ... باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این روش هیچ‌گونه وزن اولیه‌ای وارد محاسبات نمی‌شود و پس از مشخص شدن مجموعه جواب بهینه، کاربر با توجه به ترجیحات خود می‌تواند جواب مورد نظر خود را به دست آورد و حالت‌های مختلف جواب را نیز بررسی نماید. در این روش، یک منحنی Trade-off در اختیار کاربر گذاشته می‌شود که تمامی جواب‌های آن بهینه هستند و تصمیم‌گیرنده با توجه به اینکه کدام فاکتور اهمیت بیشتری دارد، جواب را انتخاب می‌کند.

شکل ۱، یک منحنی جواب بهینه را بین دو تابع هدف f_1 و f_2 نشان می‌دهد. در این شکل هر یک از نقاط یک جواب بهینه هستند و کاربر با توجه به ارجحیت‌های هدف خود، انتخاب را انجام می‌دهد.



شکل ۱. منحنی Trade-off میان دو تابع هدف [Deb, 2007]

این روش برای مسیریابی چندهدفه از یک فرمون استفاده می‌شود تا سرعت تحت تأثیر قرار نگیرد. در نهایت پس از انتخاب کل مسیر فرمون کلی بروزرسانی خواهد شد. افزون بر این برای بررسی مسیرهای احتمالی موجود بهتر و نتایج با قابلیت اطمینان بیشتر، از یک روش خاص برای تقاطع دو به دوی مسیرهای بهینه به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه چند معیاره استفاده شده است. در پایان از تکنیک مرتب‌سازی غیر غالب^۷ برای مرتب کردن کل جواب‌های حاصل استفاده شده است. سپس با نمایش جبهه جواب‌های بهینه به کاربر اجازه داده می‌شود تا با توجه به نیازها و اولویت‌های خود مسیری را انتخاب کند. در نهایت جواب مورد درخواست به نمایش گذاشته می‌شود. این الگوریتم همچنین می‌تواند در محیط‌های پویا برای مسیریابی به کار رود، زیرا به پس پردازش نیاز ندارد و زمان اجرای آن برای کاربری موبایل مناسب است.

۲- مواد و روش‌ها

در این قسمت پس از بررسی مفاهیم مربوط به تصمیم‌گیری چندهدفه، به بررسی مفاهیم الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه و نحوه حل مسئله مسیریابی چندهدفه براساس آن پرداخته خواهد شد.

۲-۱- تصمیم‌گیری چندهدفه و مسیریابی چندهدفه

در چند سال گذشته با پیشرفت الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، از آنها در مسیریابی‌های چندهدفه نیز استفاده شده است. الگوریتم‌های چندهدفه در حالت کلی به سه دسته بدون وزن‌دهی، وزن‌دهی قبل از حل و وزن‌دهی بعد از حل که شامل روش‌های بر مبنای جبهه جواب بهینه^۸ هستند، تقسیم‌بندی می‌شوند [Jozefowicz, Semet and Talbi, 2008].

در روش‌های بدون وزن‌دهی، ترجیحی از طرف تصمیم‌گیرنده بین معیارها اعلام نمی‌شود، بلکه یک حالت ایده‌آل تعریف شده و معیار انتخاب گزینه‌ها، نزدیکی به حالت ایده‌آل است. بنابراین جواب‌ها کاملاً وابسته به تعریف حالت ایده‌آل می‌باشند. در روش‌های وزن‌دهی قبل از حل، ترجیحات قبل از حل ارایه شده و اهداف با توجه به وزن آنها با هم تلفیق شده به صورت یک

[Castillo, Trujillo and Melin, 2007]. ناوبری در محیط‌های سیستم‌های فراگستر [Shiraishi (et al.), 2005]، گردشگری [Huang, Yao and Raguraman, 2006] و ناوبری خودروها [Chakraborty, Maeda and Chakraborty, 2005, 2001] [Rahoual, 2001] اشاره کرد. ولی استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه در یافتن مسیر بهینه در محیط‌های متحرک، بیسیم و فراگستر دارای مشکلاتی است که از جمله آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- این الگوریتم‌ها دارای پیچیدگی محاسباتی زیاد مانند $O(MN^2)$, $O(MN^3)$ می‌باشند، در نتیجه سرعت پردازش کمتری دارند [Dorigo and Blumb, 2005].
- فضای کاری الگوریتم ژنتیک فضایی گسسته است و توجهی به پیوسته بودن خطوط^{۱۱} ندارد. در حقیقت ممکن است جواب تولید شده یک مسیر پیوسته را نشان ندهد. در این صورت باید از یک روش ابتکاری^{۱۱} برای حل این مشکل استفاده کرد [Luh and Lin, 2009] و یا این مسئله را به‌صورت پس پردازشی^{۱۲} [Johnson and McGeoch, 2002; Doerner, Focke, and Gutjahr, 2006] حل کرد که در این صورت کارایی روش در حالت دینامیک کم خواهد شد.

در دهه اخیر برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شده‌اند که در آنها مشکلات الگوریتم ژنتیک در مسیریابی وجود ندارد. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه از جمله این الگوریتم‌ها است که در سال ۱۹۹۰ توسط M. Dorigo و همکارانش پیشنهاد شد. در الگوریتم‌های هوش تجمعی^{۱۳} از جمله الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه، مؤلفه‌های اصلی عبارتند از: جمعیت، همکاری، ارتباط، تبادل اطلاعات، جریان اطلاعاتی و خود ترتیبی^{۱۴} که بزرگ‌ترین وجه تمایز این الگوریتم با سایر الگوریتم‌ها است و از این طریق جمعیت اولیه به سمت بهینه‌شدن پیش می‌رود. با استفاده از تبادل اطلاعات اعضای جمعیت اولیه با یکدیگر در ارتباطند و از وضعیت همدیگر در میان جمعیت اولیه مطلع هستند، جریان اطلاعاتی و خود ترتیبی نیز باعث می‌شود جمعیت اولیه به هم نریزد و به سمت بهینه شدن پیش رود. در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه برای بهینه‌سازی چند معیاره در مسیریابی استفاده شده است که در این قسمت مفاهیم آن به تشریح مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

یکی از معمول‌ترین روش‌های بدون وزن دهی برای مسیریابی تک‌هدفه، الگوریتم دایجسترا است [Golden, 1976] که در شبکه راه‌ها [Chan and Zhang, 2001; Fu and Deng, 2004] و محیط‌های دینامیک [Pattanamekar, Park and Rilett, 2003] برای به دست آوردن مسیر بهینه استفاده می‌شود. الگوریتم دایجسترا در رابطه با هر هدف یک راه‌حل جداگانه تولید می‌کند، بنابراین برای تولید جبهه جواب بهینه^{۱۵} و به دست آوردن مسیر بهینه براساس چند هدف، بایستی الگوریتم به دفعات و با استفاده از پارامترهای مختلف اجرا شود [Kano and Kenta, 2008]. از متداول‌ترین روش وزن‌دهی قبل از حل در زمینه مسیریابی چندهدفه نیز می‌توان به ترکیب خطی وزن دار^{۱۶} اشاره کرد [Coello Coello, 2002; Deb, 2007].

در این روش از تبدیل‌های ریاضی جواب‌های بهینه برای مقایسه راه‌حل‌ها و انتخاب جواب‌های بهینه استفاده می‌شود. این روش دارای ضعف‌های مهمی است که از جمله آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد: اولاً در این روش بایستی درصد اهمیت توابع هدف در ابتدا مشخص شود که این مسئله سیستم را از نیازهای واقعی کاربر در مسیریابی موبایل دور می‌کند، ثانیاً تنها جواب‌هایی انتخاب می‌شوند که بر روی جبهه جواب محذب باشند [Jozefowicz, Semet and Talbi, 2008].

برای حل برخی از مشکلات این الگوریتم‌ها، مانند وابسته بودن آنها به شرایط تحذب جواب‌ها و نیز تولید تنها یک جواب در هر بار اجرا، راه‌حل‌ها کم کم به سمت استفاده از الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک سوق داده شدند [Ombuki, Ross, and Hanshar, 2006; Kumar, Arunadevi and Mohan, 2009]. در روش‌هایی که با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی انجام می‌شوند، با بهینه کردن توابع هدف مختلف، جواب‌های متفاوتی در یک بار اجرا برای کاربر تولید می‌شود. در نتیجه کاربر می‌تواند با استفاده از اولویت‌های مورد نظر خود یک جواب انتخاب کند.

در الگوریتم ژنتیک مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی در هر بار اجرا می‌توان به چند جواب رسید [Pangiliana and Janssens, 2007]. همچنین محدودیت‌های ناشی از تحذب جواب‌ها وجود ندارد. از جمله کارهای انجام شده با این روش در مسیریابی می‌توان به کاربرد در زمینه ربات‌های متحرک

است که همسایه نقطه i بوده و مورچه k ام آنها را طی نکرده است. Ψ_k نشان‌دهنده نقاطی است که توسط مورچه طی شده است.

۳- تابع کاشف: یک تابع کاشف براساس نوع مسئله و معمولاً به صورت $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ تعریف می‌شود که در آن d_{ij} فاصله میان دو نقطه i, j است.

۴- رفتار فرمون^{۲۱}: یک قانون آماری باید مشخص شود تا مورچه k ام بر پایه احتمال، یک مسیر را براساس فرمون آن مسیر انتخاب کند. این قانون احتمال به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود که نشان‌دهنده احتمال انتخاب شهر j ام برای مورچه k ام در نقطه i ام است.

$$P_{ij}^k = P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{m \in N_i^k} (\tau_{im})^\alpha (\eta_{im})^\beta} & , j \in N_i^k \\ 0 & , j \notin N_i^k \end{cases} \quad (1)$$

که در آن τ_{ij} مقدار فرمونی است که بر روی هر یال ریخته شده و همان مقدار تابع کاشف است و α و β ضرایب ثابتی که تأثیر فرمون را مشخص می‌کنند و N_i^k همسایگان مورچه k ام در نقطه i ام هستند که مورچه آنها را طی نکرده است.

۵- بهنگام‌سازی فرمون: براساس نوع مسئله مورد نظر، الگوریتم‌های متفاوتی برای بهنگام‌سازی فرمون تعریف شده است [Maniezzo and Colomi, 1999; Hromkovic, 2003; Galinier and Hao, 1999]. در این پروژه از روش Ant System استفاده شده است. در این روش مقدار تغییر فرمون از رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q & , l_{ij} \in \Psi^k \\ 0 & , l_{ij} \notin \Psi^k \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، $J(\Psi^k)$ طول کل مسیر طی شده و Q یک ثابت می‌باشد و فرمون نیز به صورت $\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_k \Delta \tau_{ij}^k$ بروزرسانی می‌شود.

۲-۳- به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه

چندمعیاره در مسیریابی کاربر مبنا

در ابتدا لازم به توضیح است که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه در یافتن مسیر بهینه، صورت مسئله‌ای شبیه به

۲-۲- مروری بر مفاهیم الگوریتم بهینه‌سازی

کلونی مورچه^{۱۵}

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری^{۱۶} است [Blum and Roli, 2003; Glover and Kochenberger, 2002; Hoos and Stutzle, 2004] که برای حل مسایل پیچیده در مدت زمان محاسباتی قابل قبول به کار می‌رود. برای دستیابی به مسیر بهینه در گراف‌ها نیز می‌توان از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها بهره گرفت [Merkle and Middendorf, 2002]. این الگوریتم، قابلیت در برگرفتن تمامی پارامترهای مسئله یافتن مسیر بهینه را داراست و نیز سرعت پردازش بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مسیریابی دارد [Dorigo and Stutzle, 2007]. الگوریتم بهینه‌سازی مورچه تداعی کننده رفتار مورچه‌های واقعی است. زیست‌شناسان دریافته‌اند که یک رسانه برای ابلاغ اطلاعات بین تک تک مورچه‌ها وجود دارد که برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مسیر تا منبع غذا به کار می‌رود. این کانال ارتباطی فرمون^{۱۷} یا ماده بوداری است که مورچه در مسیر خود بر روی زمین بر جای می‌گذارد. به این ترتیب مسیر به وسیله بوی این ماده مشخص می‌شود. هنگامی که یک مورچه به طور تصادفی و تنها حرکت می‌کند، احتمال انتخاب مسیری که توسط مورچه یا مورچه‌های قبلی طی شده و دارای فرمون بیشتری است، زیاد است [Dorigo and Stutzle, 2007].

۲-۲-۱- نمایش مسئله^{۱۸}

در بیان ریاضی مسئله موارد زیر باید تعریف شود [Dorigo and Stutzle, 2007]:

۱- تعریف گراف مورد نظر: گراف با نقاط^{۱۹} و یال‌های^{۲۰}

متصل کنندگی آنها تعریف می‌شود. در صورتی که $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ نقاط گراف و یال‌های آن را نشان دهد، $G = (V, L)$ گراف مورد نظر را تعریف می‌کند.

۲- فهرست شهرهای همسایه: برای هر نقطه روی گراف لازم

است فهرست نقاط همسایه تعریف شود که برای هر نقطه مانند i عبارتند از $N_i = \{m | l_{im} \in L\}$. مجموعه دیگری

نیز برای مورچه k ام تعریف می‌شود که عبارت است از $N_i^k = \{m | m \in N_i \wedge m \notin \Psi_k\}$ و نشان‌دهنده نقاطی

که در آن $Rank(arc_j)$ ، رتبه یال i ام از مسیر است. که فاصله ازدحامی، فاکتوری است برای انتخاب بهتر جوابها از نظر پراکنندگی بر روی یک جبهه که به صورت زیر تعریف می شود [Deb (et al.), 2002]:

برای نقاط ابتدا و انتهای یک جبهه مقدار آن بی نهایت فرض می شود.

برای سایر نقاط جبهه، از 2 تا $k-1$

$$I[i]_{dis\ tan\ ce} = I[i]_{dis\ tan\ ce} + (I[i+1]m - I[i-1]m) / (f_m^{max} - f_m^{min}) \quad (4)$$

که در آن k تعداد جوابها بر روی جبهه I ، $I[i]m$ مقدار تابع هدف m ام در k امین فرد در جبهه I است. جوابی بهتر است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد [Gen and Cheng, 2000]

- مرتب سازی: در هر نقطه جمعیت مسیرهای مجاور براساس رتبه مرتب شده و مسیر با بهترین رتبه انتخاب می شود.
- تعریف قانون فرمون ریزی: یکی از نقاط قوت الگوریتم پیشنهادی این است که فرمون ریزی هر مورچه براساس رتبه آن مسیر نسبت به سایر مسیرها در فهرست همسایه ها انجام می پذیرد. هرچه رتبه مسیر با توجه به توابع هدف تعریف شده بالاتر باشد، احتمال انتخاب آن مسیر بیشتر است. با این تعریف در حقیقت تمامی توابع هدف در انتخاب مسیر دخیل هستند.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \frac{Q}{Rank} \quad (5)$$

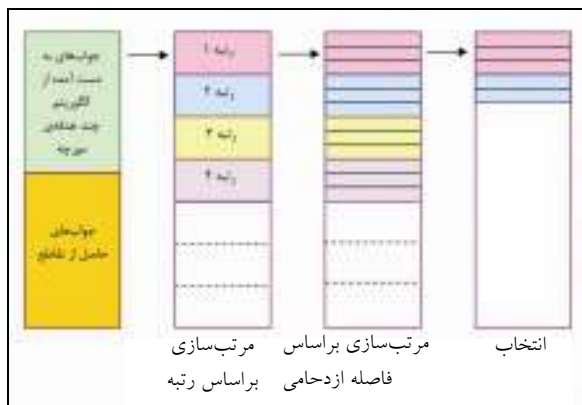
- محاسبه تبخیر فرمون: مقدار تبخیر فرمون در هر مسیر تعریف می شود.
- محاسبه تبخیر فرمون: مقدار تبخیر فرمون در هر مسیر $\tau_{ij} = \tau_{ij}(1 - \rho)$
- محاسبه فاصله ازدحامی: با توجه به روابط آورده شده فاصله ازدحامی برای هر مسیر محاسبه می شود.
- مرتب سازی: مرتب کردن مسیرها براساس شرطهای غلبه کردن.
- انتخاب: به محض اینکه جمعیت اولیه براساس روش مرتب سازی غیر غالب مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان مسیرها آغاز می شود، این انتخاب براساس دو المان صورت می پذیرد:
- رتبه جمعیت: جمعیتها در رتبه های بهتر انتخاب می شوند.

فروشنده دوره گرد^{۲۲} دارد. در مسئله فروشنده دوره گرد، فروشنده سفر خود را از یک شهر آغاز می کند و پس از یک سفر کامل و عبور از تمامی شهرها دوباره به شهر خود باز می گردد^{۲۳}. هدف یافتن بهترین مسیر برای این سفر است. در مسئله یافتن مسیر بهینه بر مبنای یک هدف خاص، باید تغییراتی بر روی مسئله فروشنده دوره گرد اعمال شود، زیرا در مسئله فروشنده دوره گرد مبدأ و مقصد بر هم منطبق است. راه حل پیشنهادی در این تحقیق برای تغییر الگوریتم به این ترتیب است که جستجوی الگوریتم در لیست ممنوعه مورچه ها برای یافتن بهترین مسیر براساس تابع هزینه انجام می گیرد و مسیرهایی که نقاط ابتدا و انتهای مورد نظر برای مسیریابی در آن قرار دارند انتخاب و از نظر تابع هزینه با یکدیگر مقایسه می شوند. مسیری انتخاب می شود که کمترین هزینه را داشته باشد.

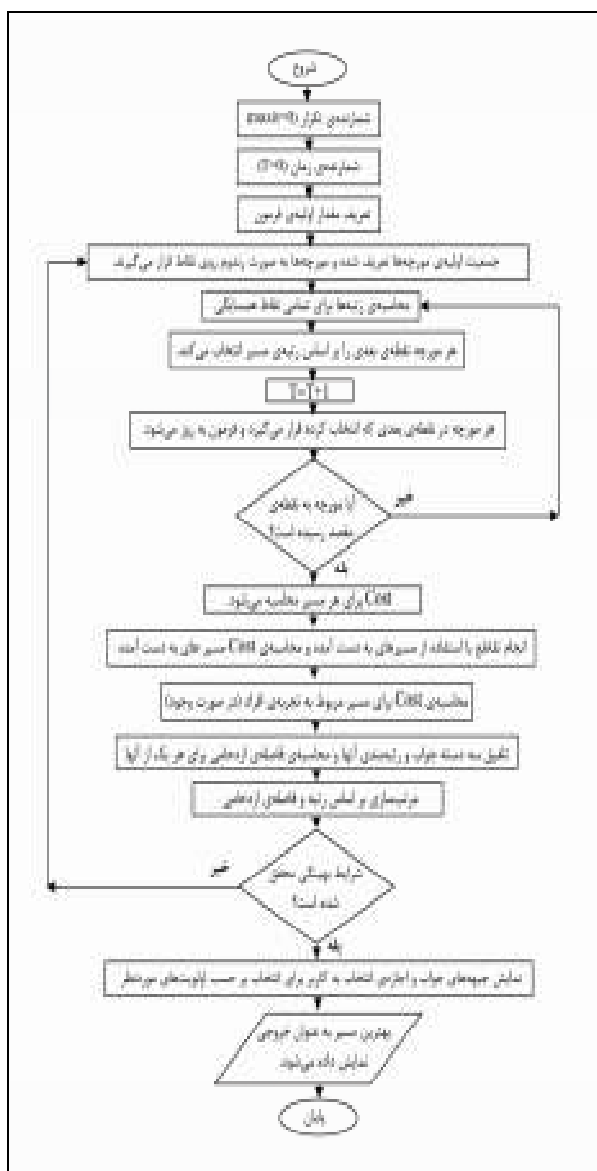
در الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق مراحل کاری به شرح زیر است:

- ایجاد جمعیت اولیه^{۲۴}: تعداد $nAnt$ (مورچه) روی هر نقطه قرار داده می شود.
- محاسبه رتبه برای هر یک از نقاط همسایگی در هر نقطه (رتبه موضعی): در روش پیشنهادی مسیر بهینه در هر نقطه براساس رتبه نقطه بعدی انتخاب می شود. همچنین در صورت قرار گرفتن رتبه دو یا چند یال در رتبه اول، سریعاً فاصله ازدحامی^{۲۵} محاسبه شده و سپس مسیر با فاصله ازدحامی بهتر انتخاب می شود. انتخاب براساس رتبه باعث می شود مورچه ها چند هدفه فکر کنند و الگوریتم کاملاً چند هدفه اجرا شود. به علاوه برای اصلاح سرعت اجرای الگوریتم در هر نقطه ابتدا نقاط همسایگی به دست آمده و رتبه تنها برای این نقاط محاسبه می شود، که این رتبه با رتبه کل مسیر که در نهایت منجر به انتخاب مسیر نهایی بهینه می شود، متفاوت است و یک رتبه موضعی در لحظه انتخاب است. لازم به ذکر است مقدار هزینه برای راه های یک طرفه و یا ورود ممنوع بی نهایت فرض می شود. η_{ij} نیز به عنوان یکی از اطلاعات کاشف مسئله به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\eta_{ij} = 1 / Rank(arc_j) \quad (3)$$



شکل ۲. نحوه تلفیق جمعیت اولیه و انتخاب بهترین جواب‌ها از میان آنها



شکل ۳. فلوجارت کلی الگوریتم پیشنهادی

○ فاصله ازدحامی: با فرض اینکه p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. لازم به ذکر است، اولویت انتخاب ابتدا براساس رتبه و سپس فاصله ازدحامی است. در اینجا برای مشخص کردن مسیر بهینه فقط جبهه اول انتخاب شده است.

● انجام تقاطع برای تولید مسیرهای جدید: طبق اصل بهینگی هر قسمت از یک مسیر بهینه خود یک مسیر بهینه است. بنابراین برای ایجاد مسیرهای جدید در این تحقیق ابتدا نقاط مشترک دو به دو مسیرها به دست می‌آید، سپس یک نقطه به صورت تصادفی از میان آنها انتخاب می‌شود و سپس از نقطه مشترک روی هر دو مسیر بهینه که توسط الگوریتم در مرحله اول به دست آمده است، مسیر شکسته و ادامه آن از مسیر بعدی در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب مسیرهای بهینه دیگری تولید می‌شوند که می‌توان آنها را به عنوان گزینه‌های جدید مورد بررسی قرار داد. در اینجا از تقاطع یک نقطه‌ای میان هر دو مسیر موجود در فهرست مسیرهای بهینه (که در رتبه اول قرار گرفته‌اند)، استفاده شده است.

● تلفیق: تلفیق مسیرهای به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه چند معیاره و تقاطع.

● جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل: در مرحله اول، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والد‌های قبلی می‌شوند و سپس براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. این فرآیند به صورت خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع ابتدا بر حسب رتبه، دسته‌بندی و قسمتی از آنها که دارای رتبه پایین‌تر هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقی‌مانده براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. لازم به ذکر است که در اینجا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌گیرد.

● ترسیم جبهه جواب‌های بهینه: با توجه به ارزش هر یک از مسیرها، جبهه جواب‌های بهینه به دست می‌آید.

● انتخاب نهایی با اولویت‌بندی کاربر: کاربر با توجه به اولویت‌های خود یک جواب را انتخاب و مسیر متناظر را مشاهده می‌کند. شکل ۳ فلوجارت کلی اجرایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت پس از بررسی آماده‌سازی‌های لازم برای اجرای الگوریتم، به جزئیات اجرایی آن پرداخته خواهد شد. در پایان نتایج اولیه حاصل از اجرای الگوریتم آمده است.

۳-۱- آماده‌سازی داده‌ها

با توجه به توضیحات بالا، الگوریتم پیشنهادی در قسمتی از شبکه راه‌های شهر زنجان با وسعت ۵۰ هکتار انجام شده است. برخی از قسمت‌های این منطقه، جزء مناطق پر رفت و آمد است و برخی از شریان‌های اصلی شهر در این قسمت قرار دارند. همچنین تراکم شریان‌ها در قسمت‌های جنوبی منطقه بالاست و این منطقه دارای قوانین ترافیکی متعدد از جمله مسیرهای ورود ممنوع و راه‌های یک طرفه است. این عوامل منجر به انتخاب این منطقه به عنوان منطقه مطالعاتی در این تحقیق بوده است.

در ابتدا داده‌های مربوط به نقشه راه‌های این منطقه تهیه و در گراف مورد نظر، مسیرهای ورود ممنوع، مسیرهای یک طرفه و نحوه اتصالات میان اجزای مسیر مشخص شده است. این کار با استفاده از ایجاد توپولوژی در داده‌ها و در محیط نرم‌افزارهای GIS، صورت گرفته است. همچنین داده‌های ترافیکی مربوط به مسیرها در برخی مسیرهای اصلی از ارگان‌های مرتبط تهیه شده و در سایر موارد که داده‌ای موجود نیست، با توجه به شرایط مسیر شبیه‌سازی شده است. داده‌های مربوط به هزینه حمل و نقل در شبکه نیز با استفاده از اطلاعات واقعی موجود استخراج شده‌اند.

۳-۲- توابع هدف^{۲۶}

در این مسئله، توابع هدف به صورت انتخابی در اختیار کاربر قرار گرفته است. کاربر پس از انتخاب مبدأ و مقصد خود می‌تواند یک یا چند مورد از موارد زیر را به‌عنوان تابع (توابع هدف) انتخاب کند؛

- کمترین فاصله: کمترین فاصله که به‌صورت $f_1(x, y) = \min \sum_{i=1}^j D_{(i,i+1)}$ تعریف می‌شود که در آن i مبدأ، j مقصد و $D_{(i,i+1)}$ فاصله میان هر دو نقطه انتخابی توسط الگوریتم در مسیر است. واحد فاصله، کیلومتر در نظر گرفته شده است.

- کمترین ترافیک: کمترین ترافیک که به صورت $f_2(x, y) = \min \sum_{i=1}^j Traffic_{(i,i+1)}$ تعریف می‌شود که در آن i مبدأ، j مقصد و $Traffic_{(i,i+1)}$ ترافیک میان هر دو نقطه انتخابی توسط کاربر در مسیر است. واحد ترافیک در اینجا جریان ترافیک^{۲۷} در نظر گرفته شده است. این مقدار یک نسبت است که تعداد وسایل نقلیه‌ای که از یک نقطه مشخص در یک واحد زمانی مشخص عبور می‌کند را نشان می‌دهد [Bellomo, [Coscia, and Delitala, 2002; Kerner, 2004].

- کمترین زمان: کمترین زمان^{۲۸} که به صورت $f_3(x, y) = \min \sum_{i=1}^j T_{(i,i+1)}$ تعریف می‌شود. که در آن i مبدأ، j مقصد و $T_{(i,i+1)}$ زمان لازم طی کردن میان هر دو نقطه انتخابی توسط کاربر در حالت عادی در مسیر است و واحد آن دقیقه در نظر گرفته شده است.

- کمترین هزینه: کمترین هزینه که به صورت $f_4(x, y) = \min \sum_{i=1}^j Cost_{(i,i+1)}$ تعریف می‌شود که در آن i مبدأ، j مقصد و $Cost_{(i,i+1)}$ هزینه ریالی لازم برای طی کردن میان هر دو نقطه انتخابی توسط کاربر در مسیر است که در اینجا برای هر مسیر مقادیر واقعی آن استخراج شده‌اند. بسته به اینکه کاربر کدام تابع هدف را مد نظر داشته باشد، مسئله برایش حل خواهد شد. در صورتی که تنها یک تابع هدف انتخاب شود، مسئله به صورت یک هدف و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه ساده حل خواهد شد، در غیر این صورت الگوریتم چند معیاره مورچه به‌کار خواهد رفت.

۳-۳- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم

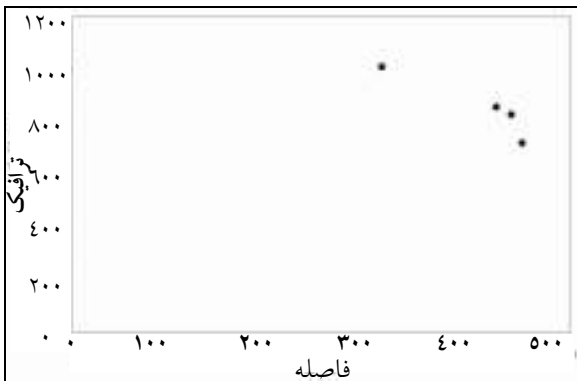
این الگوریتم برای منطقه مطالعاتی با ۲۵ مورچه و تعداد تکرار^{۲۹} ۲۵ بار و با دو تابع هدف فاصله و ترافیک اجرا شد و مسیرهای بهینه حاصل از آن به دست آمد. با این شرایط اجرا، الگوریتم چهار مسیر بهینه را پیشنهاد داده است که بر یکدیگر غلبه نمی‌کنند. از این چهار مسیر یک مسیر، مسیر حاصل از تقاطع مسیرهای بهینه به دست آمده است. شکل ۴، سه مسیر عادی از مسیرهای پیشنهادی الگوریتم را نشان می‌دهد (نقاط ابتدا و انتهای مسیر در شکل مشخص است). همچنین شکل ۵، نتایج حاصل از انجام تقاطع در الگوریتم را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، پس از انجام تقاطع روی سه جواب به دست آمده در مرحله قبل،

جدول ۱ مشخصات مسیرهای به دست آمده در جبهه جواب اول که در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شد را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ جبهه جواب به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

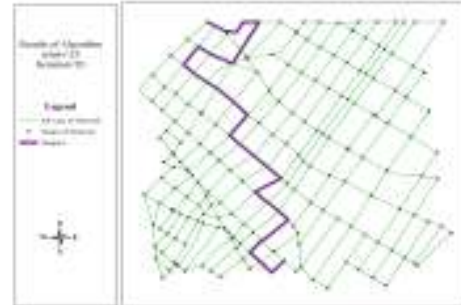
سه مسیر دیگر تولید شد که دو جواب در جبهه جواب بهینه رتبه دو قرار گرفتند. از آنجا که هدف، نمایش بهترین مسیرهاست، تنها مسیر قرار گرفته در رتبه یک و جبهه جواب اول انتخاب شده است.

جدول ۱. مشخصات مسیرهای به دست آمده در جبهه جواب اول با ۲۵ تکرار و ۲۵ مورچه

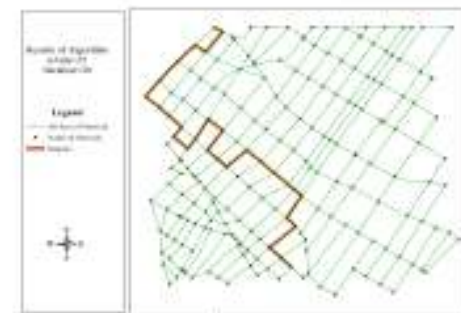
نام مسیر	فاصله	ترافیک	تعداد گره
مسیر اول	۴۵۲	۷۲۰	۳۰
مسیر دوم	۴۴۱	۸۲۸	۳۱
مسیر سوم	۴۲۶	۸۵۷	۳۱
مسیر حاصل از تقاطع	۳۱۱	۱۰۱۰	۲۲



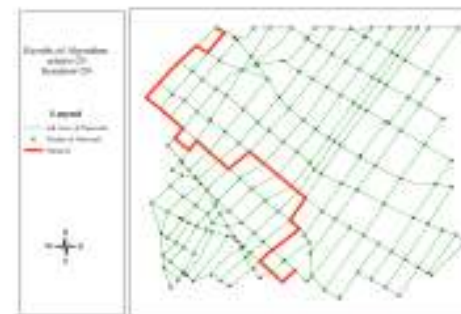
شکل ۶. جبهه جواب دو بعدی به دست آمده از اجرای الگوریتم با تعداد مورچه ۲۵ و تعداد تکرار ۲۵ و توابع هدف فاصله و ترافیک



نتیجه ۱

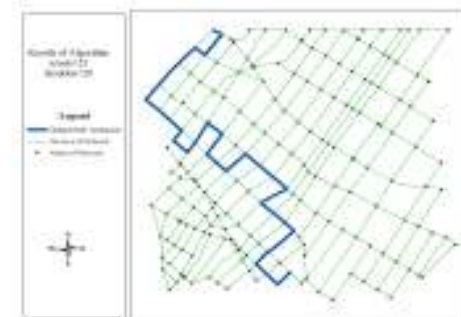


نتیجه ۲



نتیجه ۳

شکل ۴. سه نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم بدون تقاطع



شکل ۵. نتیجه حاصل از تقاطع

۴- بحث و بررسی

در این قسمت به انجام برخی آزمون‌ها به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و نتایج حاصل از آن پرداخته خواهد شد.

۴-۱- آزمون تکرارپذیری الگوریتم

در الگوریتم‌هایی که جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، نتایج کار با اجراهای مختلف، متفاوت خواهد بود. بنابراین لازم است الگوریتم به دفعات مختلف با پارامترهای

اجرای الگوریتم با پارامترهای متفاوت آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش جمعیت اولیه مورچه‌ها در الگوریتم جواب‌های موجود در جبهه اول تغییر چندانی نمی‌کند، تنها تعداد جواب بیشتر در تعداد تکرارهای بالا و در تعداد مورچه‌های بالا به دست می‌آید، ولی همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این حالت نیز زمان اجرای الگوریتم افزایش می‌یابد. بنابراین با صرف زمان بیشتر می‌توان به تعداد جواب بیشتر رسید، ولی از آنجایی که در کاربردهای سیستم‌های موبایل و حمل و نقل هوشمند، زمان، عامل مهمی برای کاربر محسوب می‌شود، بهتر است کمترین زمان که نتایج خوبی نیز در بر دارد در نظر گرفته شود.

افزون بر این، برای حفظ جواب‌های الگوریتم در تکرارهای بالا می‌توان زمان را نیز به عنوان ورودی برای تشخیص نیاز کاربر در سیستم آورد و در صورت قبول کاربر برای صرف زمان بیشتر، تعداد تکرار بیشتر و تعداد مورچه‌های بیشتر در نظر گرفته شود. به هر حال الگوریتم پیشنهادی با شرایط ذکر شده برای دو مسیر دیگر نیز مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن مانند مثال‌های فوق برای پارامترهای اولیه قابل قبول بودند. بنابراین پارامترهای ذکر شده، به عنوان پارامترهای اولیه قابل قبول در الگوریتم قرار داده شد. همچنین الگوریتم در زمینه پارامترهای اولیه در تکرارهای بین ۰ تا ۱۰۰، ۸۴ درصد ثبات دارد.

۴-۳- حمایت از تصمیم‌گیری در مسیریابی

در مرحله نهایی پس از اجرای الگوریتم، جواب‌ها در اختیار کاربر گذاشته می‌شود تا با توجه به نیازهای خود، مسیر مورد نظر را انتخاب کند. در حقیقت در این قسمت کاربر با توجه به اولویت نهایی خود که بر روی واسط کاربر مشخص می‌سازد، می‌تواند مسیر مورد نظر خود را ملاحظه کند. برای روشن‌تر شدن مطلب در شکل ۸، جبهه جواب بهینه برای دو تابع هدف فاصله و ترافیک و ۵ جواب به‌دست آمده از آن، آورده شده است. تصمیم‌گیرنده می‌تواند با انتخاب یک نقطه، مسیر متناظر آن را ببیند. در شکل ۸، سه نقطه روی جبهه جواب مشخص شده و مسیرهای متناظر آنها آمده است. این نتایج مربوط به تعداد تکرار ۱۰۰ و تعداد مورچه ۱۰۰ است. در این شکل نقطه A، مسیر با کمترین فاصله، نقطه B مسیر با کمترین ترافیک و نقطه C مسیر با ترافیک و فاصله متوسط، را نشان می‌دهد.

یکسان اجرا شود تا تغییرات در نتایج ملاحظه شود و پارامترهای مناسب انتخاب شوند [Saadatseresht, Mansourian & Taleai, 2009]. در این تحقیق، الگوریتم ۱۰ بار^{۳۰} و با ۲۵ مورچه و تعداد تکرار ۲۵ بار و با دو تابع هدف فاصله و ترافیک اجرا شد و مسیرهای بهینه حاصل از آن به‌دست آمد. جدول ۲ تعداد جواب‌ها را در کل جبهه‌ها و مسیرهای انتخاب شده توسط الگوریتم در هر کدام از اجراها نشان می‌دهد.

جدول ۲. تعداد جواب‌ها در کل جبهه‌ها و تعداد مسیرهای موجود در جبهه اول به منظور آزمون تکرارپذیری الگوریتم

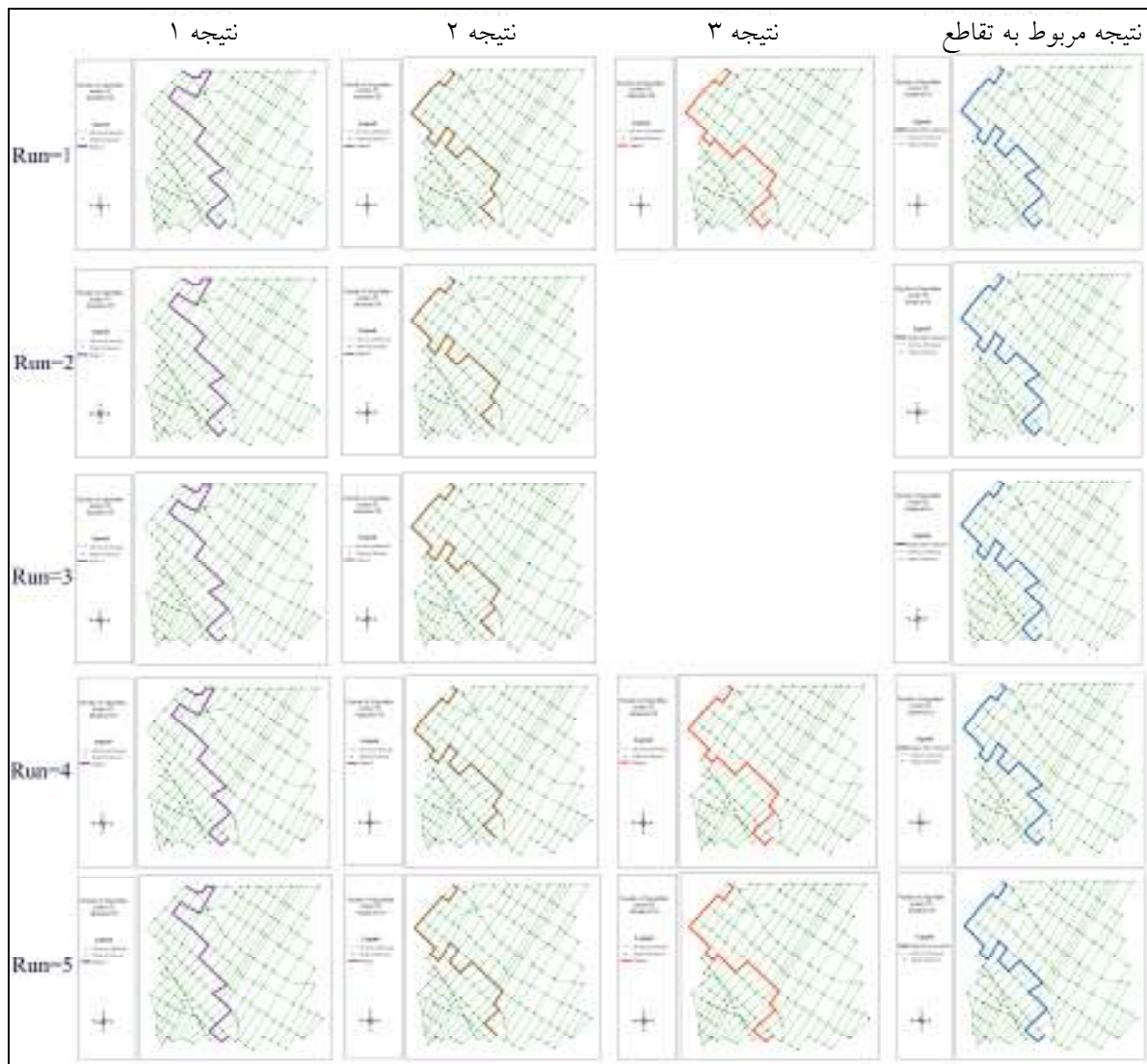
شماره ردیف	تعداد تکرار	تعداد مورچه	تعداد کل مسیرهای به‌دست آمده	تعداد جواب‌ها در جبهه اول
۱	۲۵	۲۵	۲۷	۴
۲	۲۵	۲۵	۲۶	۴
۳	۲۵	۲۵	۲۷	۳
۴	۲۵	۲۵	۲۶	۳
۵	۲۵	۲۵	۲۷	۴

لازم به ذکر است در تمامی جواب‌های به‌دست آمده در جبهه اول در این آزمون، یک جواب مربوط به تقاطع می‌باشد که در تمامی اجراها یکسان به‌دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، جواب‌ها با یکدیگر پوشش دارند و مسیرهای انتخاب شده یکسان هستند. تنها تفاوت در تعداد جواب‌هاست که در برخی موارد یک مسیر در جواب‌ها وجود ندارد، ولی سایر مسیرها کاملاً بر هم تطابق دارند. همچنین در تمامی اجراها نتیجه حاصل از تقاطع جواب‌های ۱ و ۲ در جبهه اول قرار دارد. بنابراین الگوریتم از نظر تکرارپذیری ثبات دارد و ثبات‌پذیری آن در جواب‌های جبهه اول، ۷۰ درصد است.

۴-۲- آزمون پارامترهای اولیه

از آنجایی که پارامترهایی همچون تعداد تکرار و تعداد جمعیت اولیه نقشی اساسی در خروجی الگوریتم دارند، لازم است با تغییر این المان‌ها تغییر جواب نهایی بررسی شود. حاصل ضرب این دو المان، تابع ارزیابی^{۳۱} نام دارند. در جدول ۳، نتایج حاصل از

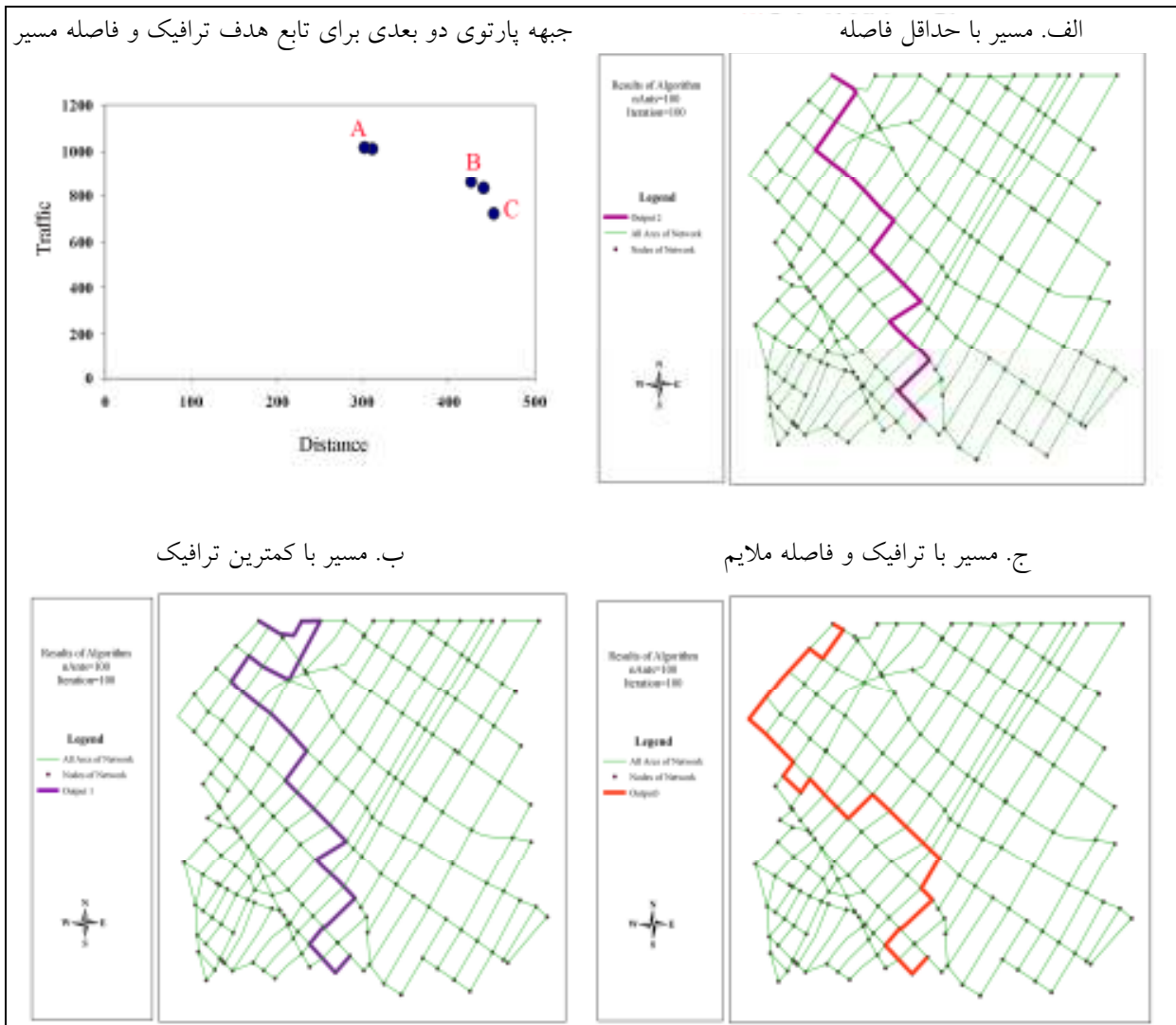
به کارگیری الگوریتم کلونی مورچه چندمعیاره در سیستم‌های حمل و نقل ...



شکل ۷. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با پارامترهای یکسان در ۵ اجرای مختلف

جدول ۳. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با پارامترهای متفاوت

ردیف	تعداد مورچه	تعداد تکرار	زمان جواب‌دهی	تعداد کل جواب‌ها	تعداد جواب‌ها در جبهه اول
۱	۲۵	۲۵	10"	۲۷	۴
۲		۵۰	1'	۲۹	۴
۳		۱۰۰	3'	۳۰	۴
۴	۵۰	۲۵	20"	۵۳	۴
۵		۵۰	1',40"	۵۴	۵
۶		۱۰۰	5'	۵۷	۵
۷	۱۰۰	۲۵	40"	۷۵	۵
۸		۵۰	4'	۷۹	۵
۹		۱۰۰	8'	۸۱	۵



شکل ۸. جبهه جواب دو تابع هدف فاصله و ترافیک و (A) مسیر با کمترین فاصله، (B) مسیر با کمترین ترافیک و (C) مسیر با مقدار متوسط فاصله و زمان

برای مقایسه نتایج در ابتدا به تابع هدف فاصله وزن ۷۰ درصد و به هر یک از توابع دیگر، وزن ۱۰ درصد داده شده است. نتایج، نشان‌دهنده افزایش سرعت الگوریتم است، زیرا در این حالت نیاز به تعریف رتبه موضعی نیست و الگوریتم، مسئله را به صورت تک‌هدفه حل می‌کند.

همچنین مسیر به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه ساده با اهداف تلفیقی تفاوت اندکی با مسیر پیشنهاد شده در الگوریتم پیشنهادی این تحقیق در حالتی که یکی از اهداف کمینه کردن تابع هدف فاصله است، دارد. به عبارت دیگر، در حالتی که الگوریتم پیشنهاد شده توسط تحقیق به صورت چندهدفه حل شود و جواب مربوط به کمترین فاصله انتخاب

۴-۴- ارزیابی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم

به منظور اعتبارسنجی الگوریتم، نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی تحقیق با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه تک‌هدفه ساده که در آن به هر یک از توابع هدف، وزنی داده شده و در نهایت با عملگر جمع با هم تلفیق شده‌اند، مقایسه شده است. در حقیقت در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه تک‌هدفه، تابع هدف طبق رابطه ۷ با تلفیق شده‌اند.

$$Cost_Function = \sum_{i=1}^4 \lambda_i f_i \quad (7)$$

که در آن f_i مقادیر توابع هدف و λ_i وزن‌های از پیش تعیین شده برای اجرای الگوریتم هستند.

بهبودسازی کلونی مورچه با اهداف تلفیقی، نتایج کاملاً وابسته به وزندهی قبل از حل الگوریتم است، ولی همان‌طور که قبلاً به صورت تفصیلی بحث شد در روش پیشنهادی ابتدا تمامی جواب‌های بهینه بدون وزندهی به دست می‌آیند و سپس با توجه به نظر کاربر مسیر مورد نظر به دست می‌آید.

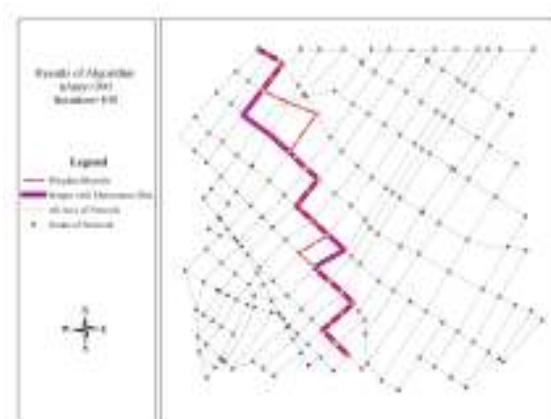
۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق تلاش شد تا یکی از خصوصیات سیستم‌های حمل و نقل هوشمند که تمرکز بر خواسته‌ها و علایق کاربر است، پیاده‌سازی شود. به عبارت دیگر در این تحقیق به یکی از پرکاربردترین بخش‌های سیستم اطلاعات کاربر- مینا که سیستم‌های مسیریابی است توجه شد و یک سیستم کاربر- مینا برای مسیریابی چند هدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچه طراحی شد. در این سیستم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی که براساس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه کار می‌کند، مسیریابی با توجه به نیازهای کاربر و توابع هدف تعریف شده از طرف وی، انجام شده است. برای انجام این کار در ابتدا با توجه به نظر کارشناسان و نیازهای متداول کاربران المان‌های تأثیرگذار بر مسیریابی‌های چندهدفه استخراج شده است. سپس با برنامه‌ای که به این منظور توسعه داده شده توابع هدف مورد نظر توسط کاربر انتخاب و الگوریتم روی آنها اجرا شده است. نتایج، شامل مسیر بهینه با توجه به توابع هدف تعریفی و جبهه جواب‌های بهینه تولید شده است. در پایان با استفاده از برنامه توسعه داده شده با انتخاب یک نقطه روی منحنی جواب‌های بهینه با شرایط مورد نظر کاربر، مسیر متناظر روی نقشه مشخص می‌شود. در حقیقت، این سیستم یک ابزار تصمیم‌گیری است که به کاربر کمک می‌کند تا با مشخص کردن اولویت خود تغییر نتایج را ملاحظه کند. همچنین در این تحقیق آزمون‌های گوناگونی روی نتایج حاصل از الگوریتم انجام شده است. آزمون تکرارپذیری الگوریتم نشان داد که الگوریتم دارای تکرارپذیری قابل قبولی است. آزمون پارامترهای اولیه نیز نشان داد با صرف زمان بیشتر (با تعداد مورچه بیشتر) می‌توان به جواب‌های بیشتری رسید، ولی در صورتی که در تصمیم‌گیری، زمان محدود باشد، تعداد کم مورچه نیز جواب قابل قبولی خواهد داد.

شود، نتایج از نظر فاصله، تقریباً منطبق بر حالتی است که مسئله به صورت تک‌هدفه حل شود و وزن تابع هدف فاصله زیاد باشد. تفاوت دو الگوریتم ۵ یال از کل مسیر است. جدول ۴ مقایسه دو مسیر را به صورت خلاصه در مورد دو تابع هدف فاصله و ترافیک نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با حالت تک‌هدفه با اهداف تلفیقی و چندهدفه

مشخصات مسیر	طول مسیر	تعداد گره‌ها	ترافیک
مسیر حاصل از اجرای الگوریتم با حالت چندهدفه	۳۰۲	۲۳	۱۰۱۵
مسیر حاصل از اجرای الگوریتم با حالت تک‌هدفه با اهداف تلفیقی	۲۸۵	۲۰	۱۰۶۸



شکل ۹. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم در دو حالت تک‌هدفه با اهداف تلفیقی و چندهدفه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه با اهداف تلفیقی با اینکه طول مسیر کوتاهتر است، ولی ترافیک مسیر بالاتر است. دلیل این مسئله دادن وزن زیاد به فاصله و وزن پایین به ترافیک است، در حالی که در مسیر حاصل از اجرای الگوریتم با حالت چندهدفه، ترافیک پایین‌تر است، زیرا الگوریتم طوری عمل می‌کند که تمامی توابع هدف به صورت همزمان بهینه می‌شوند. شکل ۹ دو مسیر فوق را نشان می‌دهد. بنابراین در الگوریتم

۷- مراجع

- Bellomo, N., Coscia, V. and Delitala, M. (2002) "On the mathematical theory of vehicular traffic flow I. Fluid dynamic and kinetic modeling". Allied Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. Vol. 12, No. 12, pp. 1801-1843.
- Blum, C. and Roli, A. (2003) "Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison", Comput. Surveys, Vol. 35, No. 3, pp. 268-308.
- Castillo, O., Trujillo, L. and Melin, P. (2007) "Multiple objective genetic algorithms for path-planning optimization in autonomous mobile robots", Soft Computing – A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, Vol. 11, No. 3, pp. 269-279.
- Chaharsooghi, S.K. and Meimand Kermani, A. H. (2008) "An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP)". Applied Mathematics and Computation, No. 200, pp. 167-177.
- Chan, E. P. F. and Zhang, N. (2001) "Finding shortest paths in large network systems", Proceedings from ACM: The 9th. ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, November 09-10, Atlanta, 2001, Georgia, USA, pp. 160-166.
- Chakraborty, B., Maeda, T. and Chakraborty, G. (2005) "Multi objective route selection for car navigation system using genetic algorithm", IEEE Mid-Summer Workshop on Soft Computing in Industrial Application (SMXia/05), pp.190-195.
- Coello Coello, C. A., Lamount, G.B. and Veldhuizen, D. A. (2007) "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems". 2nd. ed. Springer, New York.
- Coello Coello, C. A. (2002) "Introduction to evolutionary multi-objective optimization". Lecture Notes, Depto. De Ingenier'ia El'ectrica, Secci'on de Computaci'on, Instituto Polit'ecnico Nacional, MEXICO.
- Chitty, D. M. and Hernandez, M. L. (2004) "A hybrid ant colony optimization technique for dynamic vehicle routing", In Deb, K. [et al.]

به‌عنوان کارهای آینده نیز در این تحقیق می‌توان از محاسبات فازی در ترجمه نیازهای کاربر استفاده کرد و آنان را با دقت بیشتری در اختیار الگوریتم قرار داد. به‌عنوان مثال اگر هدف شخص رسیدن به کمترین فاصله است، می‌توان کمترین فاصله را با پارامترهای زبانی فازی مدل کرده و وارد سیستم نمود و به این ترتیب می‌توان به سیستم کاربرپسندتری دست یافت. همچنین در این تحقیق تأکید بیشتر روی الگوریتم پیشنهادی و روش انجام کار بوده است تا راحتی کاربرد. بنابراین یکی از اهداف مؤلفان مقاله طراحی یک سیستم کاربرپسندتر و دارای واسط کاربر قوی‌تر است.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. User-Centric
 2. Data-Centric
 3. Scheduling problem
 4. Rank
 5. Non-Dominated Sorting
 6. Pareto-Base
 7. Pareto - Optimal Solution
 8. Pareto Optimum Front
 9. Weighted Linear Aggregation
 10. Segment
 11. Heuristic
 12. Post Processing
 13. Swarm Intelligent
 14. Self Organization
 15. Ant Colony Algorithm
 16. Meta-Heuristic
 17. Pheromone
 18. Problem Representation
 19. Node
 20. Arc
 21. Pheromone Trails
 22. Traveling Salesman Problem (TSP)
۲۳. فروشنده باید از هر شهر فقط یکبار عبور کند.
24. Population Initialization
 25. Crowding Distance
 26. Objective Functions
 27. Traffic Flow
 28. Transition Time
 29. Iteration
 30. Run
 31. Evaluation Function

- Congress on Intelligent Control and Automation, No. 6, pp. 5326-5329.
- Galinier, P. and Hao, J. K. (1999) "Hybrid evolutionary algorithms for graph coloring", *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 3, No. 4, pp. 379–397.
 - Gen, M. and Cheng, R. (2000) "Genetic algorithms and engineering optimization", Canada: John Wiley & Sons.
 - Glover, F. and Kochenberger, G. (2002) "Handbook of metaheuristics", Norwell: Kluwer Academic Publishers.
 - Golden, B. (1976) "Shortest-path algorithms - a comparison –". *Operations Research*, Vol. 24, No. 9, pp. 1164-1168.
 - Hoos, H. H. and Stutzle, T. (2004) "Stochastic local search: Foundations and applications", Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
 - Hromkovic, J. (2003) "Algorithmics for hard problems", 4th. Edition, Berlin: Springer-Verlag.
 - Huang, B., Yao, L. and Raguraman, K. (2006) "Bi-level GA and GIS for multi-objective TSP route planning". *Transportation Planning and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 105-124.
 - Johnson, D. S. and McGeoch, J. A. (2002) "The traveling salesman problem and its variations chapter experimental analysis of heuristics for the TSP", In: Gutin, G., Punnen, A.P., (Eds.) *The traveling salesman problem and its variations* (369–443). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
 - Jozefowicz, N., Semet, F. and Talbi, E. (2008) "Multi-objective vehicle routing problems". *European Journal of Operational Research*, No. 189, pp. 293–309.
 - Kanoh, H. and Kenta, H. (2008) "Hybrid genetic algorithm for dynamic multi-objective route planning with predicted traffic in a real-world road network", *Proceedings: The 10th. Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, Atlanta: USA, pp. 657-664.
 - Kerner, S. B. (2004) "The physics of traffic: Empirical freeway pattern features, engineering applications and theory (Understanding complex systems)", Germany: Springer - Verlag.
 - (Eds.), *Genetic and Evolutionary Computation 1: Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Berlin, Springer - Verlag, pp. 48–59.
 - Deb, K. (2007) "Multi-objective optimization using evolutionary algorithms", 2nd Edition, New York: John Wiley and Sons.
 - Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyerivan, T. (2002) "A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA – II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.6, No.2, 181-197.
 - Doerner, K., Focke, A. and Gutjahr, W.J. (2006) "Multi criteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country". *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 3, pp. 1078-1096.
 - Dorigo, M. (1992) "Optimization, learning and natural algorithms (in Italian)", Ph.D. Dissertation, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy.
 - Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colorni, A. (1996) "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems*", *Man and Cybernetics—Part B*, Vol. 26, No. 1, pp. 29–41.
 - Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997) "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem", *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol.1, No. 1, pp. 53–66.
 - Dorigo, M. and Stutzle, T. (2002) "The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications and advances". In F. Glover, G. Kochenberger (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, International Series in Operations Research and Management Science (251–285). Norwell: Kluwer Academic Publishers.
 - Dorigo, M. and Blumb, C. (2005) "Ant colony optimization theory: A survey", *Theoretical Computer Science*. No. 344, pp. 243 – 278.
 - Dorigo, M. and Stutzle, T. (2007) "Ant colony optimization", 2nd ed., USA: Massachusetts Institute of Technology.
 - Fu, M., Li, J. and Deng, Z. (2004) "A practical route planning algorithm for vehicle navigation system", *Proceedings from WCICA: Fifth World*

- Pattanamekar, P., Park, D. and Rilett, L.R. (2003) "Dynamic and stochastic shortest path in transportation networks with two components of travel time uncertainty", *Transportation Research Part C*, No. 11, pp. 331-354.
- Rahoual, M., Kitoun, B., Mabed, M., Bachelet, V. and Benameur, F. (Eds.). (2001) "Multi-criteria genetic algorithms for the vehicle routing problem with time windows", *Proceedings from: Metaheuristic International Conference*. Portugal, pp. 527-532.
- Shiraishi, T., Nagata, M., Shibata, N., Murata, Y., Yasumoto, K. and Ito, M. (2005) "A personal navigation system with functions to compose tour schedules based on multiple conflicting criteria", *IPSJ Digital Courier*, No. 1, pp. 528-536.
- Saadatseresht, M., Mansourian, A. and Taleai, M. (2009) "Evacuation planning using multi objective evolutionary optimization approach", *European Journal of Operational Researches*, No. 198, pp. 305-314.
- Zitzler, E. and Thiele, L. (1998) "Multi objective optimization using evolutionary algorithms- A comparative case study", In Eiben, A.E., Bäck, T., Schoenauer, M., Schwefel, H.-P. (Eds.), *Parallel Problem Solving From Nature*, Berlin: Springer-Verlag.
- Kumar, A. S., Arunadevi, J. and Mohan, V. (2009) "Intelligent transport route planning using genetic algorithms in path computation algorithms". *European Journal of Scientific Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 463-468.
- Luh, G. C. and Lin, C. Y. (2009) "Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm", *Applied Soft Computing*, No. 9, pp. 1343-1353.
- Maniezzo, V. and Colorni, A. (1999) "The ant system applied to the quadratic assignment problem", *IEEE Transactions on Data and Knowledge Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 769-778.
- Maria, J., Pangiliana, A., and Janssens, G. K. (2007) "Evolutionary algorithms for the multi objective shortest path planning problem", *International Journal of Computer and Information Science and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 54- 59.
- Merkle, D. and Middendorf, M. (2002) "Modeling the dynamics of ant colony optimization algorithms". *Evolution and Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 235-262.
- Ombuki, B., Ross, B.J. and Hanshar, F. (2006) "Multi-objective genetic algorithm for vehicle routing problem with time windows", *Applied Intelligence*, No. 24, pp. 17-30.