



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / Iranian Remote Sensing & GIS

سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶ / Vol.9, No. 3, Autumn 2017

۱۱۱-۱۲۶

## ارائه مدل مکانی هوشمند به منظور یافتن مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری

علی اکبر متکان<sup>۱</sup>، بابک میرباقری<sup>۲</sup>، محمد تناسان<sup>۳\*</sup>، کمال اکبری<sup>۳</sup>

۱. استاد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. دانشجوی دکتری GIS، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشجوی دکتری GIS، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۲/۱۸



### چکیده

یکی از تحلیل‌های پرکاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) یافتن مسیرهای بهینه بین دو نقطه در شبکه حمل و نقل شهری است. به دلیل تنوع بالای مسیرهای ممکن بین دو نقطه در شبکه حمل و نقل شهری، یافتن مسیرهای بهینه کار پیچیده‌ای است. از سویی، در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی پارامترهای مؤثر در انتخاب مسیر از جمله طول مسیر، ترافیک، سختی عبور از تقاطع‌ها، کیفیت معابر و ...، پیچیدگی فرایند کشف مسیر بهینه را دوچندان می‌کند. همچنین در پاره‌ای از موارد، وجود دو یا چند پارامتر مؤثر ناسازگار، مانند طول مسیر و ترافیک، بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به ویژه الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II، که توانایی در نظر گرفتن هم‌زمان چندین پارامتر ناسازگار در یک مسئله را دارند، می‌توانند GIS را در حل این‌گونه مسائل یاری کنند. هدف از این پژوهش عرضه مدلی بر مبنای الگوریتم NSGA-II در بستر GIS، به منظور کشف مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری است. بدین منظور، الگوریتم NSGA-II به گونه‌ای مدل شد تا ساختار توپولوژیک مسیرهای بهینه (پیوستگی و نبود حلقه در مسیر) حفظ شود؛ بنابراین، هم در تولید مسیرهای اولیه و هم در عملگرهای ژنتیکی مورد استفاده، حفظ ساختار توپولوژیک مسیرهای خروجی مدنظر قرار گرفت. در این راستا به منظور رسیدن به اهداف یادشده، دو عملگر ژنتیکی ابتکاری، متناسب با مسئله بهینه‌سازی مسیر در شبکه حمل و نقل شهری، توسعه داده شد. همچنین با هدف بالابردن کارایی مدل در ارائه مسیرهای بهینه، افزون‌بر در نظر گرفتن طول مسیر، ترافیک و کیفیت مسیر به‌منزله توابع هدف، دشواری عبور از تقاطع‌ها نیز به‌مثابه یکی دیگر از توابع هدف مدل شد. به منظور آزمودن قابلیت‌های مدل، یک شبکه حمل و نقل شهری فرضی با محدودیت‌های لازم طراحی شد و مدل، با بهره‌گیری از آن، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده صحت کارکرد مدل و توانایی بالای آن در یافتن مسیرهای بهینه با چندین هدف متضاد است.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی چندهدفه مسیر، شبکه حمل و نقل شهری، الگوریتم NSGA-II، عملگر ابتکاری، GIS.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، تلفن: ۰۹۱۲۷۲۶۱۵۷۷

## ۱- مقدمه

ترافیک و انتخاب مسیر بهینه همواره یکی از بزرگ‌ترین معضلات و دشواری‌های زندگی در شهرهای بزرگ است و مدیران و برنامه‌ریزان شهری پیوسته در تلاش برای طرح راهکاری نوین برای رفع این مشکل‌اند. استفاده سودمند از تحلیل‌های فضایی برپایه اطلاعات مکانی شبکه حمل و نقل شهری راهکار مناسب و مؤثری جهت مدیریت مسئله مورد نظر محسوب می‌شود. تحلیل شبکه حمل و نقل شهری در GIS نوع خاصی از تحلیل خطی است که روی مجموعه‌ای به هم پیوسته از معابر اجرا می‌شود (Verbyla, 2002). یکی از کاربردهای مهم تحلیل شبکه معابر در GIS کشف مسیرهای بهینه برای رفتن از یک مکان به یک یا چند مکان دیگر است. در بیشتر موارد، آزمودن تمامی مسیرهای موجود در یک شبکه، براساس تمامی پارامترهای مؤثر در انتخاب مسیر بهینه، امکان‌پذیر نیست. در چنین مواردی، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند GIS را در کشف مسیرهای بهینه یاری رساند. با توجه به ماهیت مسئله یافتن مسیر بهینه در شبکه حمل و نقل شهری و دخالت داشتن پارامترهای متنوع و ناسازگاری مانند طول مسیر، کیفیت مسیر، ترافیک و سختی عبور از تقاطع‌ها، استفاده از الگوریتمی که قابلیت در نظر گرفتن هم‌زمان چندین پارامتر ناسازگار را دارا باشد بسیار اهمیت می‌یابد. تا کنون، الگوریتم‌های گوناگونی در زمینه کشف مسیرهای بهینه در این شبکه به کار رفته است که برخی از آن‌ها قابلیت در نظر گرفتن چندین پارامتر متضاد را نیز داشته‌اند (معصومی و همکاران، ۱۳۹۰) ولی الگوریتم تکاملی NSGA-II<sup>۱</sup>، به منزله یکی از انواع الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌یابی (Goldberg, 2007) که از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است و تکنیکی بسیار قدرتمند برای حل مسائل جست‌وجو و بهینه‌یابی دنیای واقعی محسوب می‌شود، کمتر استفاده شده است. قابلیت‌های الگوریتم NSGA-II، مانند داشتن چندین پاسخ بهینه (جبهه پارتو)، نیازنداشتن به وزن‌دهی پارامترها، قابلیت

در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای مؤثر در کشف مسیر بهینه، قابلیت بهینه‌سازی با چندین پارامتر متضاد، داشتن دید کلی در کشف مسیر بهینه (به جای کشف گره به گره مسیر بهینه یا اعمال پیش شرط در انتخاب گره‌های بعدی، مسیرهای تصادفی تولید می‌شوند و با استفاده از عملگرهای ژنتیکی مسیرها به سمت مسیرهای نهایی تکامل می‌یابند)، می‌تواند این الگوریتم را به الگوریتمی کارآ در کشف مسیرهای بهینه تبدیل کند. هدف از این پژوهش بررسی کارآیی این الگوریتم در کشف مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری است.

تا کنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه انتخاب مسیر بهینه در شبکه حمل و نقل شهری صورت گرفته است. از جمله اولین پژوهش‌ها در این زمینه، می‌توان به پژوهش دروשה<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۹۲) اشاره کرد. آنها، به منظور کشف مسیر بهینه در شبکه، از روش قطعی ریاضی استفاده کردند ولی بالابودن زمان صرف شده برای رسیدن به پاسخ در مسائل با حجم بالای داده‌ها باعث ناممکن شدن استفاده از آن می‌شود. حسنی رخ (۱۳۷۹) در پژوهش خود، درون گراف بزرگی با پارامترهای متنوع وابسته به زمان، به مسیریابی بهینه زمانی پرداخت. با توجه به بزرگ بودن دامنه مسئله و پیچیدگی نسبی تابع هزینه و همچنین، برخورد با مقوله پویاشدن پارامتر ترافیک خیابان‌ها، او از ترکیب روش‌های شهودی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیکی برای حل مسئله استفاده کرد. از سویی، نتایج پژوهش آن و راماکریشنا<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) نشان داد که الگوریتم‌های ژنتیکی در کشف مسیرهای بهینه، از نظرگاه همگرایی، بهتر از دیگر الگوریتم‌های مرسوم عمل می‌کنند. همچنین در پژوهش‌های خاکساری و همکاران (۱۳۹۱)، مطیعیان و همکاران (۱۳۹۱) و بائه و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۷)، در کشف مسیر بهینه در شبکه معابر، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. لی و همکارانش<sup>۵</sup> (۲۰۱۱)، به منظور کشف مسیرهای بهینه،

1. non dominated sorting genetic algorithm-II
2. Descrochers
3. Ahn and Ramakrishna
4. Bea et al.
5. Li et l.

که بخش مهم الگوریتم NSGA-II را نیز همین عملگر تشکیل می‌دهد. جیانگ و همکارانش<sup>۴</sup> (۲۰۱۳)، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به‌همراه مدل عامل مبنای براونی، تلاش کردند مسیر را در شبکه معابر بهینه‌سازی کنند. دو هدف مدنظر آنها شامل کاهش طول مسیر و کاهش تراکم وسایل در مسیر بود. احمد و دب<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) نیز یک مدل چندهدفه بهینه‌سازی مسیر، مبتنی بر الگوریتم NSGA-II، پیشنهاد دادند. آنها در این پژوهش سه پارامتر کاهش طول مسیر، افزایش ایمنی مسیر و افزایش کیفیت آن را در نظر گرفتند. نتایج آنها بیانگر از استحکام و کارایی بالای الگوریتم NSGA-II در حل مسائل برنامه‌ریزی برای مسیرهای پیچیده بود. همچنین، پژوهش آنها انعطاف‌پذیری الگوریتم‌های تکاملی را، در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده با چند هدف، نشان می‌دهد. لی و گوئو<sup>۶</sup> (۲۰۱۶) در پژوهش خود به بهینه‌سازی چندهدفه مسیر در شبکه‌های حمل‌ونقل وابسته به زمان پرداختند. بدین منظور، آنها الگوریتم NSGA-II را به‌کار بردند و پارامترهای آن را با استفاده از روش تاگوچی تعیین کردند و مدل خود را در شبکه‌ای واقعی در پکن اجرا کردند. اهداف مدنظر آنها کاهش هزینه سفر و افزایش قابلیت اطمینان بوده است. زیرو و همکارانش<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) در پژوهش خود به مسیریابی چندهدفه، با هدف حمل‌ونقل مواد خطرناک در شبکه جاده‌ای، پرداختند. اهداف آنها کاهش هزینه سفر و کاهش خطرهای فردی و محیطی بوده است. برای دستیابی به این هدف، از الگوریتم برچسب تنظیم با توابع هزینه فازی استفاده کردند. از مزایای الگوریتم پیشنهادی آنها در نظر گرفتن بده‌بستانی بین حداقل هزینه و حداقل خطر براساس منطق فازی است.

از رویکردی تجربی براساس تجربه رانندگان تاکسی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مسیر بهینه تجربی دارای قابلیت انعطاف‌پذیری بسیاری، در زمان‌های متفاوت و به‌ویژه در زمان‌های اوج ترافیک، است. ون و همکارانش<sup>۱</sup> (۲۰۱۴)، به‌منظور یافتن مسیری با کمترین هزینه بین دو گره (تقاطع) در یک شبکه جاده متغیر با زمان با یک شار ترافیکی، یک روش اکتشافی ابتکاری پیشنهاد دادند. دو‌که و همکارانش<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) از متد بازگشتی دقیقی برپایه شمارش ضمنی، که از محدودیت‌های مسئله مسیریابی بسیار می‌کاهد، استفاده کردند. ژو و همکارانش<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) روش جدیدی به نام مسیر تقریبی جست‌وجو (APS)، برای ارائه کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد، مطرح کردند. میرزایی قمی و همکارانش (۱۳۹۴)، با تلفیق فرایند سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، برای تعیین مسیر بهینه دوچرخه در شبکه معابر شهری مدلی جامع ارائه دادند.

همچنین، از پژوهش‌هایی که به‌صورت چندهدفه به حل مسئله مسیریابی در شبکه حمل‌ونقل پرداختند، می‌توان به پژوهش معصومی و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد. آنها از الگوریتم چندهدفه کلونی مورچه برای مسیریابی کاربرمنا استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها برای انتخاب مسیر توسط مورچه، براساس توابع هدف، رتبه‌ای موضعی مشخص و تعریف شد؛ بدین صورت که رتبه تمامی یال‌های منتج به نقطه‌ای که قرار است نقطه بعدی در آن تعیین شود مشخص و یال با رتبه بالاتر به‌منزله مسیر بعدی انتخاب می‌شود. همچنین، آن‌ها برای مسیریابی چندهدفه از فرومون استفاده کردند تا سرعت تحت تأثیر قرار نگیرد. در پایان، تکنیک مرتب‌سازی غیرقالب برای مرتب‌کردن کل پاسخ‌ها استفاده شد. یکی از مهم‌ترین خروجی‌های این پژوهش جبهه پاسخ‌های مؤثر است که به کاربر امکان می‌دهد، با مشخص کردن اولویت‌های خود، مسیر نهایی را انتخاب کند. یکی از قابلیت‌های پژوهش معصومی و همکارانش استفاده از عملگر مرتب‌سازی غیرقالب است

1. Wen et al.
2. Duque
3. Zhu et al.
4. Jiang et al.
5. Ahmed and Deb
6. Li and Guo
7. Zero et al.

دارای بیشترین کیفیت باشند، دشواری عبور از تقاطع‌ها اندک باشد و مسیرهایی با روان‌ترین ترافیک انتخاب شود. از جمله قیدها و محدودیت‌هایی که در این مدل در نظر گرفته شده عبارت‌اند از توجه به جهت حرکت در خیابان‌های یک‌طرفه، عبور نکردن بیش از یک‌بار از هر معبر، عبور نکردن بیش از یک‌بار از هر تقاطع، دقت داشتن به موانع موجود در مسیر و توجه به گردش ممنوع در تقاطع‌ها. از سویی، برای استفاده از الگوریتم NSGA-II در حل مسئله کشف مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری، با در نظر گرفتن قیدها و محدودیت‌ها، مسیرهای اولیه (جمعیت اولیه) به گونه‌ای ایجاد شد که روابط توپولوژیک (پیوستگی مسیر و نبود حلقه در مسیر) در آنها رعایت شده باشد. همچنین، عملگر ترکیب و جهش در این مسئله به صورت ابتکاری طراحی و استفاده شد. این عملگرها به گونه‌ای طراحی و توسعه داده شده‌اند که روابط توپولوژیک و پیوستگی مسیر را حفظ و از ایجاد حلقه در مسیر جلوگیری می‌کنند. نتایج نهایی مدل به صورت چندین مسیر بهینه، با ارزش کاربردی یکسان، ارائه می‌شود و این مسیرها باید براساس شرایط موجود و نظر کارشناسی انتخاب و اجرا شوند.

#### ۱-۱- بهینه‌یابی چندهدفه<sup>۱</sup>

هنگامی که مسئله بهینه‌یابی شامل بیش از یک تابع هدف است، یافتن یک یا چند پاسخ بهینه را بهینه‌یابی چندهدفه می‌نامند (Dias & Vasconcelos, 2002). در مسئله بهینه‌یابی چندهدفه، پس از شناسایی مسئله، مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم کشف می‌شود و ضمن توجه به محدودیت‌های مسئله، در بهینه‌کردن توابع هدف تلاش می‌شود. از این رو، واژه «بهینه‌یابی» به معنای پیدا کردن مجموعه‌ای از پاسخ‌ها یا پاسخی است که، از لحاظ تمامی مقادیر توابع هدف، قابل قبول باشد (Coello Coello et al., 2007).

از سویی نیز، می‌توان به پژوهش‌های موفقی در زمینه حل مسائل مکان‌محور، با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی، اشاره کرد؛ مانند پژوهش رجیبی و همکاران (۱۳۸۹). آن‌ها، به منظور بهینه‌سازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری، از الگوریتم NSGA-II استفاده کردند. همچنین، راه‌حلی مؤثر برای به کارگیری الگوریتم‌های تکاملی در انواع مسائل مکان‌محور مطرح کردند؛ به گونه‌ای که امکان تحلیل‌های مکانی نیز فراهم باشد. در پژوهشی دیگر، معصومی و همکاران (۱۳۸۹)، به منظور حمایت از تصمیم‌گیری برای یافتن زمین‌های مناسب کاربری‌های صنعتی در محدوده استان زنجان، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده کردند. نتایج کار آنها توانایی بالای الگوریتم ژنتیک چندهدفه در حل مسئله آن‌ها را بیان می‌کند. همچنین، نگارندگان پژوهش حاضر توانایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه را در حل انواع مسائل مکانی در قالب مدل داده‌رستری و برداری را آزمایش و ارزیابی کردند که نتایج تمامی آنها نشان‌دهنده توانایی بالای این الگوریتم در حل مسائل مکان‌محور، با چندین هدف متضاد، در هر دو مدل داده‌رستری و برداری است (تناسان، ۱۳۹۱).

مطالعه و بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته بیانگر ضرورت استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در کشف مسیرهای بهینه است. این مطالعات نشان می‌دهند، در مسئله کشف مسیرهای بهینه بین دو نقطه در شبکه حمل و نقل شهری و جاده‌ها، پارامترها و اهداف گوناگونی دخیل‌اند. گاه این اهداف در تضاد با یکدیگرند که لزوم اعمال هم‌زمان تمامی پارامترها در کشف مسیر بهینه دیده می‌شود. با توجه به شرایط مسئله و همخوانی با قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II، در پژوهش حاضر سعی کرده‌ایم، برای کشف مسیرهای بهینه، مدلی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II در بستر GIS طراحی کنیم. مدل طراحی شده به گونه‌ای تعریف شد تا مسیرهایی را در شبکه حمل و نقل شهری ارائه دهد که در آن‌ها طول مسیر تا حد ممکن کاهش یابد، مسیرهای انتخابی

1. multi-objective optimization

شامل جمعیت نخبه نیز است، انتخاب می‌شود. این روند در نسل‌های بعد نیز به همین صورت تکرار می‌شود تا معیار اختتام ارضا شود (برای نمونه، می‌توان همگراشدن کل جمعیت و یا فاصله ارزیابی (برازندگی) بهترین فرد جمعیت از میانگین ارزیابی‌ها (برازندگی‌ها) را در نظر گرفت) (Deb et al., 2000). شکل ۱ نمایشی از چگونگی عملکرد این الگوریتم را نشان می‌دهد. در این شکل،  $R_t$  جمعیت حاصل از ترکیب جمعیت والدین (P) و فرزندان (Q) نسل  $t$  است. در ابتدا جمعیت  $R_t$  با عملگر مرتب‌سازی نامغلوب، به پنج سطح پارتو (F) تقسیم شده است. چون فقط به تعداد جمعیت اولیه از جمعیت  $R_t$  امکان دارد که به نسل بعد ( $t+1$ ) انتقال یابند؛ جمعیت  $F_2$  و  $F_1$ ، به دلیل داشتن رتبه غالب‌بودن بهتر، می‌توانند مستقیم وارد نسل بعد شوند ولی جمعیت  $F_3$  نمی‌تواند به صورت کامل به نسل بعد انتقال یابد؛ بنابراین، در ابتدا اعضای جمعیت  $F_3$  به روش فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. سپس تعدادی از اعضای این جبهه پارتو، که دارای فاصله ازدحامی بهتری‌اند، به نسل بعد انتقال می‌یابند و باقی‌مانده اعضای این سطح پارتو به همراه اعضای  $F_4$  و  $F_5$  حذف می‌شوند.

#### ۴-۱- نمودار مسیر ارزش

از جمله روش‌های بررسی کیفیت پاسخ مدل‌های بهینه‌سازی، نمودار مسیر ارزش است (Geoffrion et al., 1972). در این نمودار، محور افقی توابع هدف را نشان می‌دهد. میله‌های عمودی نیز برای نمایش هر تابع هدف به کار می‌رود که برد آن کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف برای مجموعه بهینه پارتو را نمایش می‌دهد. هر خط متقاطع که توابع هدف را به هم وصل می‌کند با یک پاسخ از مجموعه نامغلوب متناظر است. همچنین، این خط‌ها ارزش یک جواب را در هر مورد از توابع هدف نشان می‌دهند.

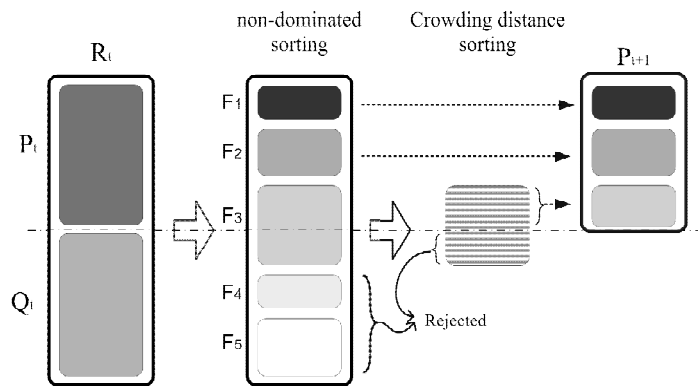
1. Pareto-optimal set
2. Pareto-optimal front (surface)
3. non dominated sorting
4. Pareto front
5. crowding distance

۲-۱- پاسخ‌های بهینه پارتو<sup>۱</sup> و جبهه بهینه پارتو<sup>۲</sup> هنگامی که با مقایسه دو پاسخ، به‌ازای تمامی اهداف، هیچ‌یک بهتر از دیگری نباشد؛ گفته می‌شود که آن دو پاسخ‌های نامغلوب‌اند. اگر اهداف به یک اندازه اهمیت داشته باشند، نمی‌توان گفت کدام‌یک از این دو پاسخ، به‌ازای تمامی اهداف، بهتر از دیگری است. به مجموعه چنین جواب‌هایی پاسخ‌های بهینه پارتو گفته می‌شود (Deb, 2001). مجموعه تمامی جواب‌های بهینه پارتو در مسئله‌ای چندهدفه مجموعه بهینه پارتو و بردارهای هدف متناظر با آن لبه یا جبهه بهینه پارتو نامیده می‌شود (Horn et al., 1999).

#### ۳-۱- الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II را نخستین بار دب و همکارانش (۲۰۰۲) مطرح کردند. این الگوریتم یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است که از نگرش نخبه‌گرایی استفاده می‌کند و می‌تواند در فضایی گسترده از متغیر تصمیم و هدف جست‌وجو کند (Maringanti et al., 2009).

در این الگوریتم، ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس این جمعیت، با توجه به توابع هدف و براساس مفهوم غالب‌بودن، به کمک عملگر مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۳</sup> (Deb et al., 2002) به  $n$  سطح پارتو<sup>۴</sup> (F) تقسیم می‌شود. به هر سطح پارتو، یک رتبه مجزا و به اعضای درون سطح، یک رتبه مساوی براساس مفهوم غالب‌بودن نسبت داده می‌شود. اکنون برای اعضای که در یک سطح پارتو قرار می‌گیرند و دارای یک رتبه‌اند، با توجه به روش فاصله ازدحامی<sup>۵</sup> که بیانگر رتبه فاصله است، یک عدد فاصله نسبت داده می‌شود. در مرحله بعد، به کمک الگوریتم رقابت دودویی، جمعیت والد (P) با توجه به رتبه غالب‌بودن کمتر و رتبه فاصله بیشتر، انتخاب می‌شود. در ادامه، به کمک عملگرهای کلاسیک ژنتیک، جمعیت نتیجه (Q) از روی جمعیت والد ایجاد می‌شود. در نهایت، جمعیت‌های والد و فرزندان با هم ترکیب و جمعیت نسل بعد (R) از کل مجموعه این دو جمعیت، که



شکل ۱. نمایشی از چگونگی عملکرد الگوریتم NSGA-II

منبع: Deb et al., 2002

Minimiz:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^n (L_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا،  $L_i$  طول معبر  $n$ ام در مسیر نهایی و  $n$  تعداد معابر تشکیل دهنده مسیر نهایی است.

## ۲-۱-۲- تراکم ترافیک

مسیر بهینه مسیری است که تراکم ترافیک معابر موجود در آن اندک باشد؛ بنابراین، یکی از توابع هدف مدنظر در این پژوهش کشف مسیرهایی با کمترین تراکم ترافیک ممکن است. به منظور در نظر گرفتن تراکم ترافیک در این پژوهش، از معیار نرخ تراکم ترافیک ( $R_t$ ) استفاده شده است که درصد ترافیکی بودن معابر را نشان می‌دهد. در بهینه‌بودن مسیر نهایی، تأثیر تراکم ترافیک معابر طولانی‌تر بسیار بیشتر از تأثیر تراکم معابر کوتاه‌تر است؛ بنابراین در این تابع هدف، طول معبر ضریبی برای تأثیر تراکم ترافیک آن معبر در نظر گرفته شد و با توجه به اینکه عدد حاصل از جمع این اعداد (حاصل ضرب طول معبر در نرخ تراکم آن معبر) از جنس طول در نرخ تراکم ترافیک است؛ برای به دست آوردن پاسخ نهایی از جنس تراکم ترافیک، عدد حاصل بر مجموع طول مسیر تقسیم می‌شود تا به گونه‌ای نرمال‌سازی صورت گرفته باشد. رابطه (۲) شیوه اجرایی این تابع هدف را نشان می‌دهد.

در مورد این نمودار، ذکر دو نکته ضروری است:  
 ۱. این نمودار ارزیابی‌ای کیفی از پاسخ‌های به دست آمده را، از لحاظ هر تابع هدف، نشان می‌دهد. الگوریتمی که بتواند پاسخ‌های خود را در سراسر طول میله بگستراند، جواب‌های با پراکندگی خوب را پیدا کرده است. ۲. اندازه شیب میان خطوط نشان‌دهنده مبادله میان توابع هدف است. الگوریتمی که تغییرات عمده در شیب خطوط بین دو تابع هدف متوالی (میله‌های عمودی) داشته باشد، مبادله خوبی از پاسخ نامغلوب دارد (Deb, 2001).

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱-۲- تعریف توابع هدف

مدل طراحی شده در این پژوهش، به منظور ارائه مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری، از این چهار تابع بهره می‌برد: هدف طول مسیر، تعداد تقاطع‌ها، تراکم ترافیک و دشواری حرکت در تقاطع‌ها. اهداف در نظر گرفته شده بدین شرح فرموله شد:

### ۲-۱-۱- طول مسیر

از آنجاکه هرچه طول مسیر کوتاه‌تر باشد، مسیر بهینه‌تر است؛ یکی از اهداف در نظر گرفته شده در این پژوهش انتخاب مسیرهایی با کمترین طول ممکن محسوب می‌شود. شیوه بیان ریاضی این تابع هدف در رابطه (۱) نشان داده شده است.

### ۲-۱-۴- سختی حرکت در تقاطع‌ها

از دیگر عوامل مؤثر در بهینه‌بودن هر مسیر به حداقل رساندن سختی عبور از تقاطع‌هاست. این تابع هدف تأثیر گردش در یک تقاطع (گردش به چپ، حرکت مستقیم، گردش به راست و یا دورزدن مسیر) را در نظر می‌گیرد. از سویی، هرچه تعداد تقاطع‌ها کمتر باشد، دشواری کل نیز کمتر خواهد بود. بیان ریاضی تابع این تابع هدف در رابطه زیر نشان داده شده است.

*Minimaiz :*

$$Z_4 = \sum_{i=1}^n Dg_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)،  $Dg_i$  دشواری عبور از تقاطع  $i$ ام است که با توجه به جهت گردش و کیفیت معبر ورودی و خروجی مشخص می‌شود و  $n$  تعداد تقاطع‌هاست. دشواری عبور از هر تقاطع به دو پارامتر درجه معابر ورودی و خروجی و جهت حرکت (شیوه گردش) در تقاطع ربط دارد. جهت حرکت در هر تقاطع تعیین‌کننده تعداد توقف در پشت چراغ راهنمایی است. به‌منظور در نظر گرفتن شیوه گردش در تقاطع‌ها، بدین صورت عمل می‌شود که ابتدا زاویه معابر متصل به تقاطع از معبر ورودی به تقاطع (معبری که در آن قرار داریم) محاسبه می‌شود. سپس، معابر براساس زاویه بین خود و معبر ورودی مرتب می‌شوند. اگر معبر خروجی نخستین معبری باشد که در فهرست مرتب‌شده معابر متصل به تقاطع قرار دارد یا، به‌عبارتی، معبری باشد که کمترین زاویه را با معبر ورودی داراست، در صورت آزادبودن گردش به راست، برای ورود به این معبر تداخلی با دیگر معابر به‌وجود نخواهد آمد؛ بنابراین، برای ورود به این معبر هیچ دشواری‌ای در نظر گرفته نمی‌شود. اگر معبر خروجی معبر دوم به بعد باشد و اگر در فهرست معابر مرتب‌شده بعد از معبر خروجی، در معبری وجود داشته باشد که جهت حرکت در آن به سمت داخل تقاطع باشد و در بین معابر پیش از آن، معبری با جهت حرکت به سمت خارج از تقاطع وجود

*Minimaiz :*

$$Z_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Rt_i \times L_i)}{\sum_{i=1}^n (L_i)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)،  $Rt_i$  نرخ تراکم ترافیک در معبر  $i$ ام،  $L_i$  طول معبر  $i$ ام در مسیر نهایی و  $n$  تعداد معابری است که مسیر نهایی را تشکیل می‌دهند.

### ۲-۱-۳- کیفیت مسیر

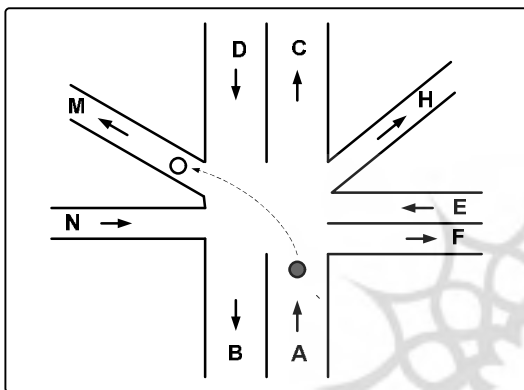
دیگر پارامترهای مؤثر در بهینه‌بودن مسیر کیفیت معابر آن مسیر است. کیفیت مسیر به جنس و درجه مسیر (بزرگراه، خیابان اصلی، خیابان فرعی، کوچه) ارتباط دارد. در این تابع هدف نیز، همانند تابع هدف تراکم ترافیک، در بهینه‌بودن مسیر نهایی، تأثیر کیفیت مسیر طولانی‌تر بیشتر از تأثیر کیفیت مسیر کوتاه‌تر است. بنابراین در این تابع هدف نیز، طول معبر همچون ضریبی برای تأثیر کیفیت مسیر در نظر گرفته شد و به‌منظور نرمال‌سازی، حاصل جمع ضرب طول هر معبر در کیفیت آن معبر بر مجموع طول تمامی معابر هر مسیر تقسیم شد تا عدد به‌دست‌آمده از این تابع هدف از جنس کیفیت مسیر باشد. شیوه بیان ریاضی این تابع هدف در رابطه (۳) نشان داده شده است.

*Maximaiz :*

$$Z_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (Rc_i \times L_i)}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $Rc_i$  ضریبی است متناسب با نوع و کیفیت معبر  $i$ ام،  $L_i$  طول معبر  $i$ ام در مسیر نهایی و  $n$  تعداد معابری که مسیر نهایی را تشکیل می‌دهند. برای به‌دست‌آوردن ضریب  $Rc$ ، می‌توان ابتدا با استفاده از نظر کارشناسی، ماتریس کیفیت معابر را تهیه کرد. سپس، با استفاده از روش AHP، ضریب  $Rc$  را که در واقع وزن معابر با شرایط متفاوت است به‌دست آورد.

است (معابر E و D)؛ بنابراین، به ازای هر معبر با جهت حرکت به سمت داخل، یک دشواری عبور از تقاطع در نظر گرفته می شود. در نتیجه، برای عبور از معبر A به معبر M در تقاطع شکل ۲ با شرایط موجود، سه دشواری عبور وجود خواهد داشت. از سویی، از آنجاکه معبر خروجی (معبر M) درجه ۲ است؛ با دشواری موجود با اعمال ضریبی افزایش می یابد.



شکل ۲. دشواری عبور از تقاطع، از معبر A به معبر M

## ۲-۲- اجرای مدل

به منظور بهره بردن از الگوریتم های ژنتیک چندهدفه، لازم است کروموزوم ها و عملگرهای ژنتیکی (جهش و ترکیب) متناسب با نوع مسئله طراحی و توسعه داده شوند. بدین منظور در این پژوهش، راهکاری جهت ایجاد جمعیت اولیه و نیز، یک عملگر ابتکاری ترکیب و یک عملگر ابتکاری جهش متناسب با مسئله مسیریابی در شبکه، به صورتی که شرایط توپولوژیک مسئله (پیوستگی مسیر و نبود حلقه در مسیر) را بر هم نزند و قیدها و محدودیت های مسئله را رعایت کند، طراحی و توسعه داده شد. در ادامه، شیوه شکل دهی کروموزوم ها و ایجاد جمعیت اولیه و نیز عملگرهای ابتکاری ترکیب و جهش را شرح می دهیم.

داشته باشد، در صورت نبود محدودیت در گردش در تقاطع، به ازای هر معبر با جهت حرکت به سمت داخل تقاطع پس از معبر خروجی، دشواری عبور در نظر گرفته می شود. در مواردی که فقط معبر با جهت حرکت به سمت خارج از تقاطع خود معبر خروجی باشد، برای اولین معبر با جهت حرکت به سمت داخل تقاطع، پس از معبر خروجی، هیچ دشواری عبوری در نظر گرفته نمی شود.

از سویی، اگر در معابر قبل از معبر خروجی معبری وجود داشت که جهت حرکت در آن به سمت داخل معبر باشد و در معابر پس از معبر خروجی معبری وجود داشت که جهت حرکت در آن به سمت خارج از معبر باشد، به ازای هر معبر با جهت حرکت به سمت داخل، از معابر پیش از معبر خروجی، یک دشواری عبور در نظر گرفته می شود. اگر در فهرست معابر بعد از معبر خروجی، تنها معبر با جهت حرکت به سمت خارج از تقاطع فقط خود معبر خروجی باشد و اگر معبری با جهت حرکت به داخل دقیقاً اولین معبر پیش از معبر خروجی باشد، دشواری عبور از تقاطع در نظر گرفته نمی شود.

برای نمونه، در شکل ۲، معبر ورودی A و معبر خروجی M در نظر گرفته شده است. اگر معابر متصل به تقاطع براساس زاویه بین آنها و معبر ورودی A مرتب شوند، معبر خروجی M ششمین معبر می شود. از آنجاکه بین معبر ورودی و خروجی دو معبر وجود دارد که جهت حرکت آنها به سمت خارج از تقاطع است (معابر F و H) و از سویی، در بین معابر پس از معبر خروجی، یک معبر وجود دارد که جهت حرکت آن به سمت داخل تقاطع است (معبر N)؛ یک دشواری برای عبور از تقاطع، از سوی وسایل نقلیه ای که از معبر N وارد تقاطع می شوند وجود خواهد داشت. همچنین، در معابر پس از معبر خروجی، یک معبر وجود دارد که جهت حرکت آن به سمت خارج از تقاطع است (معبر B) و از سویی، در معابر پیش از معبر خروجی، دو معبر وجود دارد که جهت حرکت آن به سمت داخل تقاطع



## ۲-۲-۱- شیوه شکل دهی کروموزومها

مجموعه‌ای از کروموزومها به شکل جمعیتی برای الگوریتم ژنتیک محسوب می‌شوند (Goldberg, 1989) که این جمعیت را عملگرهای الگوریتم ژنتیک تکامل می‌بخشند. در این پژوهش، یک کروموزوم رشته‌ای از ژن‌ها و هر ژن نیز نشان‌دهنده یک معبر از مسیر نهایی است که ارزش آن شناسه آن معبر را بیان می‌کند. از آنجاکه ممکن است تعداد معابر مسیر نهایی در حالت‌های گوناگون متفاوت باشد، به منظور برآوردن نیاز فضایی مسئله، کروموزومها به گونه‌ای طراحی شدند که طول آنها و یا به عبارتی، تعداد ژن‌ها قابل تغییر باشد و انعطاف‌پذیری بالایی داشته باشند.

در این پژوهش، کروموزوم‌های اولیه (جمعیت اولیه) و یا به عبارتی، مسیرهای اولیه با توجه به روابط توپولوژیک شبکه معابر (حفظ پیوستگی و نبود حلقه در مسیر) و قیدها و محدودیت‌ها (توجه به یک‌طرفه یا دوطرفه بودن مسیر و وجود یا نبود مانع در مسیر)، به صورت تصادفی ایجاد شد. به منظور تولید مسیر تصادفی در این پژوهش، ابتدا نقطه شروع و پایان (گره ابتدایی و انتهایی) مشخص می‌شود. سپس برای گره شروع، فهرستی از معابر تهیه می‌شود که با توجه به قیدها و محدودیت‌های موجود، این گره را به گره‌های بعدی اتصال می‌دهند. همچنین، به منظور جلوگیری از ایجاد حلقه در مسیر، معبری که منتهی به گره‌ای باشد که قبلاً مسیر از آن گره عبور کرده باشد یا معبری که منتهی به مانعی باشد، از فهرست معابر مجاز برای آن گره حذف می‌شود. سپس، از بین معابر مجاز، یک معبر به تصادف انتخاب می‌شود. در ادامه، برای این گره نیز همانند گره قبل عمل می‌شود و این روند برای گره‌های بعدی، تا جایی که نقطه یا گره پایانی در فهرست مجاز گره قرار بگیرد، ادامه می‌یابد.

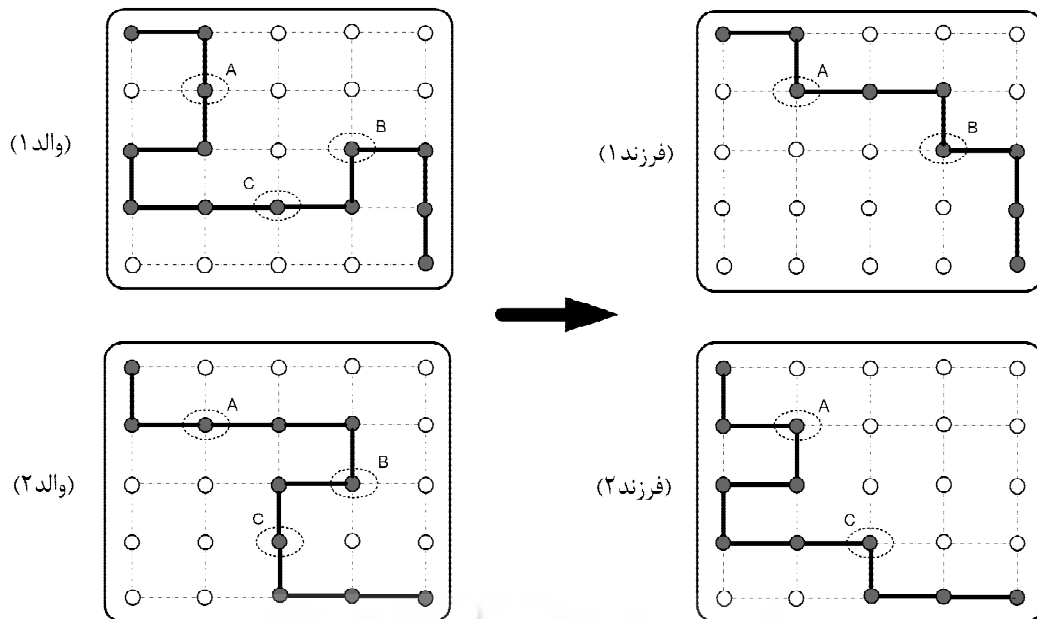
## ۲-۲-۲- عملگر ترکیب ابتکاری

یکی از عملگرهای مهم در الگوریتم NSGA-II عملگر ترکیب است. هدف از عملگر ترکیب کاوش در

قسمت‌های جدید و به‌ویژه سودمند فضای جست‌وجو از طریق تعویض مجموعه‌ای از ژن‌ها بین دو کروموزوم است. در این پژوهش، یک نوع عملگر ترکیب ابتکاری متناسب با حل مسائل بهینه‌سازی مسیر در شبکه معابر طراحی و توسعه داده شد. از جمله ویژگی‌های مهم این عملکرد قابلیت ترکیب کروموزوم‌هایی با طول متفاوت است و نتایج خروجی نیز ممکن است کروموزوم‌هایی با طولی متفاوت از کروموزوم‌های ورودی به این عملگر باشد. از سویی، عمل ترکیب به‌صورتی است که روابط توپولوژیک (یکپارچگی مسیر و نبود حلقه) در مسیر خروجی از بین نرود. شکل ۳ شیوه عملکرد این عملگر ابتکاری را نشان می‌دهد.

این عملگر ترکیب نیز، همانند دیگر عملگرهای ترکیب مرسوم، از دو نقطه قطع بهره می‌برد؛ با این تفاوت که نقطه قطع دوم در دو والد یکسان نیست. بدین‌منظور، دست‌کم سه گره مشترک در طول مسیر لازم است. شیوه عملکرد این عملگر بدین‌صورت است که، در ابتدا، گره‌های مشترک بین دو مسیر والد شناسایی و براساس شیوه قرارگرفتن آنها در طول مسیر هر والد، مرتب می‌شوند (شایان ذکر است که با وجود مشترک بودن گره‌ها در دو والد، ترتیب قرارگیری آنها در طول مسیر هر والد متفاوت است. برای نمونه در شکل ۳، فهرست مرتب‌شده گره‌های مشترک برای والد اول به‌صورت [A, C, B] و برای والد دوم به‌صورت [A, B, C] است).

برای عملگر تقاطع، لازم است دو نقطه قطع صحیح انتخاب شود (نقطه قطعی که موجب به‌هم‌خوردن پیوستگی مسیر، ایجاد حلقه در مسیر و نیز شروط مسئله نشود) و معابر بین این دو نقطه قطع با معابر والد دیگر جابه‌جا شود. انتخاب دو نقطه قطع در الگوریتم ترکیب ابتکاری در این پژوهش، کمی متفاوت‌تر از دیگر عملگرهای ترکیب صورت می‌پذیرد زیرا لازم است پیوستگی مسیرهای خروجی این عملگر حفظ شود و از ایجاد حلقه در مسیرها جلوگیری شود. نقطه قطع اول در دو والد یکسان است و به تصادف، یک گره از بین فهرست گره‌های مشترک بین دو والد



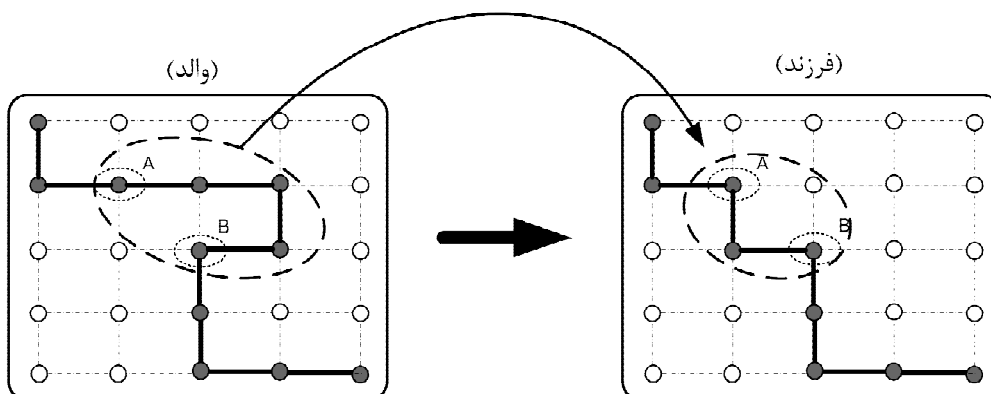
شکل ۳. عملگر ترکیب ابتکاری طراحی شده (نقاط قطع برای والد اول A و B و برای والد دوم A و C است)

عملگر مسیرهایی خواهند بود که شرایط توپولوژیک و نیز، قیدها و محدودیت‌های مسئله در آنها رعایت شده است.

### ۲-۲-۳- عملگر جهش ابتکاری

عملگر جهش باعث ورود اطلاعات جدید به جمعیت و نیز جست‌وجو در فضاهای دست‌نخورده مسئله می‌شود. در این پژوهش، یک عملگر جهش ابتکاری متناسب با حل مسائل بهینه‌سازی مسیر در شبکه معابر طراحی و توسعه داده شد. شیوه عملکرد این عملگر در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این عملگر، ابتدا دو گره به تصادف در طول یک مسیر انتخاب می‌شوند (گره‌های A و B در شکل ۴). سپس معابر بین این دو گره حذف و مسیر تصادفی جدید بین این دو گره پیشنهاد داده می‌شود. از جمله پیش‌شرط‌های این عملگر، به منظور حفظ روابط توپولوژیک (حفظ پیوستگی و نبود حلقه در مسیر)، عبور نکردن بیش از یک‌بار مسیر نهایی از یک گره و یک معبر است. بدین منظور، معابر و گره‌های قسمت‌های حفظ‌شده مسیر والد، به منزله محدودیت در ارائه مسیر پیشنهادی جدید، وارد عملگر جهش ابتکار می‌شود.

انتخاب می‌شود (در شکل ۳، گره A به منزله نقطه قطع اول در نظر گرفته شد). تفاوت این عملگر با دیگر عملگرهای مرسوم در انتخاب نقطه قطع دوم است. برای اعمال شروط مدنظر، نقطه قطع دوم، برای والد اول، نخستین گره مشترک پس از نقطه قطع اول در فهرست گره‌های مشترک والد دوم (گره B) در نظر گرفته شد و نقطه قطع دوم برای والد دوم نیز اولین گره مشترک پس از نقطه قطع اول در فهرست گره‌های مشترک والد اول (گره C) است (باید بیان کنیم نقطه قطع دوم در دو والد از لحاظ مختصات جغرافیایی یکسان نیستند). بعد از مشخص شدن نقطه قطع اول و دوم برای هر والد، معابر بین این دو نقطه قطع در هر یک از والدها حذف می‌شود و مسیر بین این دو نقطه قطع از والد دیگر (برای والد اول، مسیر بین نقطه قطع اول و دوم والد اول در والد دوم؛ و برای والد دوم، مسیر بین نقطه قطع اول و دوم والد دوم در والد اول) جایگزین آن می‌شود. شایان توجه است که هر چند امکان دارد طول رشته ژنی در این عملگر تغییر کند، روابط توپولوژیک (پیوستگی مسیر و نبود حلقه در مسیر) دچار مشکل نمی‌شود و مسیرهای خروجی این



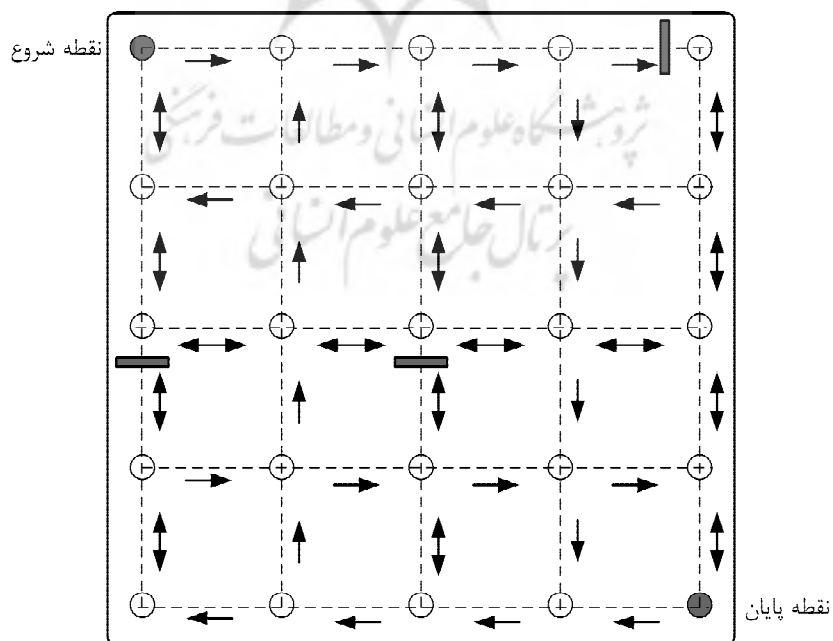
شکل ۴. عملگر جهش ابتکاری طراحی شده (حذف مسیر بین دو گره A و B و ارائه مسیر تصادفی جایگزین)

### ۳- نتیجه گیری و بحث

#### ۳-۱- نتایج مدل

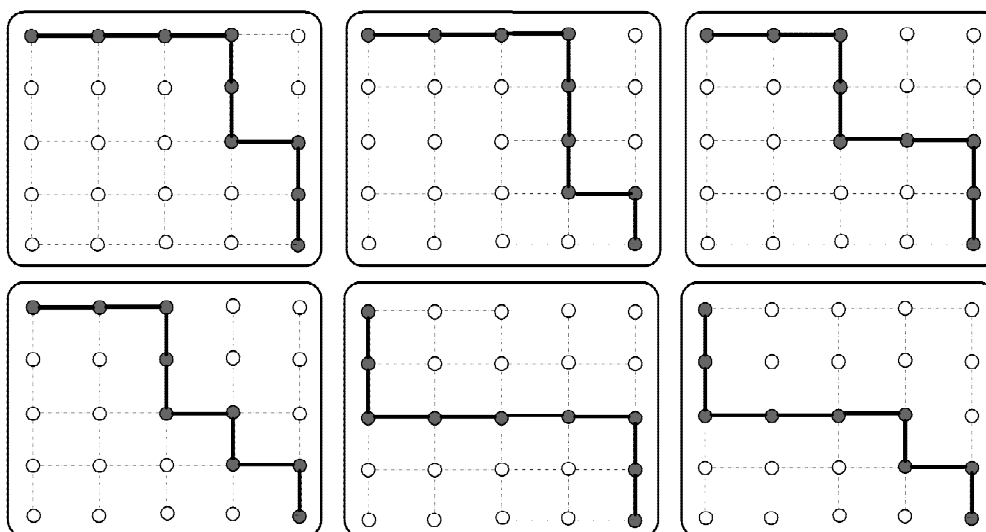
در ابتدا، مدل یک بار فقط با هدف یافتن کوتاه ترین مسیر با در نظر گرفتن محدودیت ها، توجه به جهت حرکت در معابر، عبور نکردن بیش از یک بار از یک معبر، عبور نکردن بیش از یک بار از یک گره و توجه به موانع موجود اجرا شد. نتایج خروجی مدل چندین مسیر با تعداد هشت معبر است. شکل ۶ مسیرهای خروجی تولید شده مدل با شرایط در نظر گرفته شده را نشان می دهد.

برای بررسی کارایی مدل در این پژوهش، یک داده فرضی به صورتی طراحی شد که قیدها و محدودیت های یک شبکه حمل و نقل شهری در آن دیده شود. مسیر فرضی طراحی شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این شبکه فرضی، طول تمامی معابر یکسان است.



شکل ۵. داده فرضی همراه با جهت حرکت مجاز در معابر و موانع (مستطیل مشکی)

ارائه مدل مکانی هوشمند به منظور یافتن مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری



شکل ۶. خروجی مدل با قیدها و محدودیت‌های مفروض با هدف کشف کوتاه‌ترین مسیرها

مسیرهای بهینه آمده ولی این دو مسیر، از لحاظ شرایط کیفیت مسیر و نیز ترافیک، شرایط بهتری دارند.

جدول ۱. مسیرهای خروجی مدل

ردیف	طول مسیر	ترافیک	کیفیت مسیر	دشواری عبور از تقاطع
۱	۱۰	۱۰	۹	۵
۲	۸	۱۲	۶	۳
۳	۱۰	۱۳	۷	۵
۴	۸	۱۴	۷	۴

بنابراین، این مدل به کاربر امکان می‌دهد، در صورت نیاز، مسیری را انتخاب کند که ترافیک روان‌تر یا کیفیت بهتری دارد و یا دشواری عبور از تقاطع‌ها در آن کمتر است. از سویی، فقط یک مسیر از شش مسیری که، در ابتدای کار، فقط با هدف کاهش طول مسیر ارائه شد در بین پاسخ‌های نهایی وجود دارد. از آنجاکه به موانع موجود در مسئله در اجرای دوم، با در نظر گرفتن تمامی اهداف، توجه نشد؛ مسیری جدید در بین مجموعه پاسخ نهایی دیده می‌شود که از لحاظ طول بهینه است و در پاسخ‌های اجرای اول نبود.

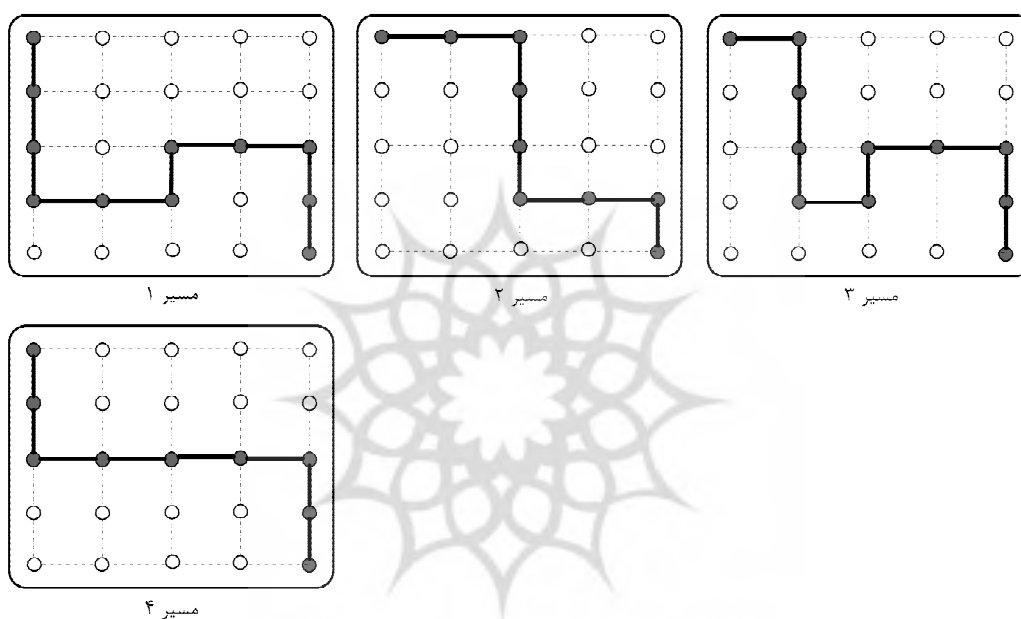
نتایج این بخش از اجرای مدل نشان می‌داد مدل قابلیت ارائه مسیرهایی با توجه به محدودیت‌های موجود را دارد و از سویی، از آنجاکه فقط به طول مسیر نهایی توجه شده بود، مدل قابلیت بهینه کردن مسیرها را با یک تابع هدف دارد. همچنین، به این علت که خروجی مدل چند مسیر بهینه بود، این نکته نشان داد که اگر چندین پاسخ بهینه برای مسئله وجود داشته باشد، مدل توانایی کشف تمامی آنها را داراست.

به منظور آزمودن قابلیت‌های مدل برای در نظر گرفتن چندین هدف در ارائه مسیر و نیز توانایی در نظر گرفتن دشواری حرکت در تقاطع‌ها، به صورت پیش فرض، مجموعه‌ای پارامتر مانند نوع مسیر، کیفیت مسیر و ترافیک به شبکه حمل و نقل شهری فرضی افزوده شد و از سویی، از آنجاکه توانایی مدل برای در نظر گرفتن موانع سنجیده شد، در این بخش، موانع مدنظر از شبکه حذف شد. نتایج خروجی مدل، طبق شرایط تعیین شده، در جدول ۱ آمده است و شکل ۷ مسیرها را در فضای شبکه حمل و نقل شهری نشان می‌دهد.

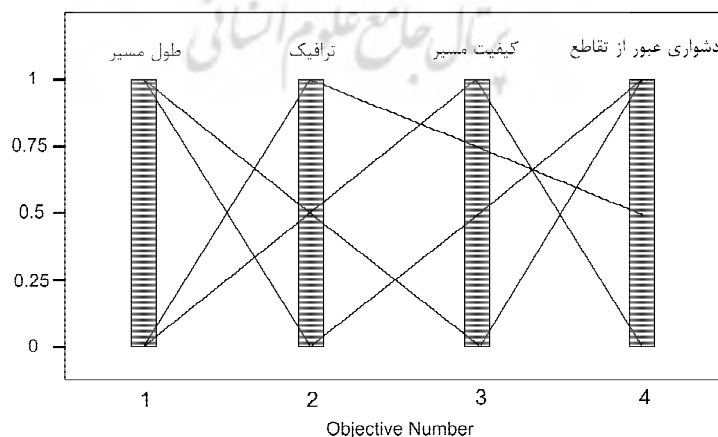
همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۷ مشخص است، دو مسیر با طول نامطلوب‌تر در مجموعه

خوب نتایج و هم تغییرات عمده‌ای است که در شیبه خطوط بین هر دو تابع هدف متوالی دیده می‌شود و نشان از مبادله مطلوب بین پاسخ‌های نامغلوب است. البته باید توجه داشت چون در این پژوهش از یک داده فرضی با فضای محدود استفاده شد، نمودار مسیر ارزش از تعداد محدودی خط (به تعداد پاسخ نهایی) تشکیل شده است.

نمودار مسیر ارزش برای پاسخ‌های نسل ۲۰۰م حاصل از مدل در شکل ۸ نمایش داده شده است. این شکل برای توابع هدف نرمال شده رسم شده است. با توجه به نکات مرتبط با نمودار مسیر ارزش (ارائه شده در بخش ۱-۴) و شکل ۸، پاسخ‌های حاصل از مدل در هر یک از توابع هدف در سراسر طول میله آن تابع هدف گسترده شده که این نکته بیانگر پراکندگی



شکل ۷. خروجی مدل با قیدها و محدودیت‌های مفروض با در نظر گرفتن چندین هدف



شکل ۸. نمودار مسیر ارزش برای چهار تابع هدف در نسل ۲۰۰

### ۳-۲- نتیجه گیری

در این پژوهش، برای عرضه مسیرهای بهینه در شبکه حمل و نقل شهری، مدلی مطرح شد. با توجه به مطالعات صورت گرفته و شرایط مسئله، به منظور بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II انتخاب و اعمال شد ولی برای به کار بردن این الگوریتم در حل مسئله مورد نظر، لازم است عملگرهای مناسب توسعه یابند. بنابراین در این پژوهش، دو عملگر ترکیب ابتکاری و جهش ابتکاری توسعه داده شد. از جمله ویژگی های این عملگرها حفظ شرایط توپولوژیک مسیرهای مطرح شده در کنار تغییرپذیری شدید طول کروموزومها (تعداد معابر یک مسیر) است. نتایج نهایی اعمال این مدل در کشف مسیرهای بهینه، در شبکه حمل و نقل شهری فرضی، نشان از عملکرد صحیح مدل و قابلیت بالای آن در کشف مسیرهای بهینه با در نظر گرفتن اهداف متفاوت است. از جمله ویژگی های این مدل قابلیت در نظر گرفتن پارامترها و اهداف دیگر بدون نیاز به تغییر مدل و نیز قابلیت اجرا در هر شبکه حمل و نقل شهری با شرایط متفاوت است. برای بررسی کارایی و قابلیت های مدل هایی از این دست، پیشنهاد می شود دیگر الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه نیز روی مسئله کشف مسیرهای بهینه در شبکه اجرا شود تا قابلیت این گونه الگوریتم ها بهتر مشخص شود. در این پژوهش، با توجه به محدودیت زمانی، این مورد در نظر گرفته نشد.

### ۴- منابع

تناسان، م.، ۱۳۹۱، طراحی مدل بهینه سازی کاربری اراضی، مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین (حوزه مورد مطالعه: رودبار جنوب - استان کرمان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، گروه سنجش از دور و GIS.  
حسنی رخ، س.، ۱۳۷۹، یافتن محل استقرار و

### مسیریابی پویا با استفاده از تکنیک های

ژنتیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

خاکساری، ع.، نیازخانی، س.، قربانپور، ز.، ۱۳۹۱، بهینه یابی مسیر حمل و نقل کالا بین مراکز استان ایران، با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)، مهندسی حمل و نقل، سال سوم، شماره ۳، صص. ۲۹۲-۲۸۱.

خشایی پور، م.، نقدی زاده، م.، پارسا فرد، م.، ۱۳۹۱، مسیریابی خودروهای حامل مواد خطرناک در شبکه معابر شهری (مطالعه موردی: شهر تهران)، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

رجبی، م.، منصوریان، ع.، علیمحمدی، ع.، طالعی، م.، ۱۳۸۹، بهینه سازی مکانی فرایند طراحی و برنامه ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شماره ۳، صص. ۴۲-۲۱.

مطیعیان، ح.، مسگری، م. س.، نعیمی، ا.، ۱۳۹۱، بهینه سازی مسیر تردد سرویس های حمل و نقل یک شرکت، با استفاده از خوشه بندی و الگوریتم ژنتیک، مهندسی حمل و نقل، سال سوم، شماره ۴، صص. ۳۶۵-۳۷۸.

معصومی، ز.، صادقی نیارکی، ا.، مسگری، م. س.، ۱۳۹۰، به کارگیری الگوریتم کلونی مورچه چندمعیاره در سیستم های حمل و نقل هوشمند و کاربر مبنا، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هشتم، شماره اول، صص. ۶۲-۴۷.

معصومی، ز.، منصوریان، ع.، مسگری، م. س.، ۱۳۸۹، کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات

- Dias, A.H.F. & Vasconcelos, J.A., 2002, **Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems**, IEEE, Transactions on Magnetics.
- Duque, D., Lozano, L., Medaglia, A.L., 2015, **An Exact Method for the Objective Shortest Path Problem for Large-Scale Road Networks**, European Journal of Operational Research, 243(3), PP. 788–797.
- Descrochers, M., Desrosiers, J. & Solomon, M., 1992, **A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows**, Operations Research, PP. 342–352.
- Geoffrion, A.M., Dyer, J.S. & Feinberg, A., 1972, **An Interactive Approach for Multicriterion Optimization with an Application to the Operation of an Academic Department**, Management Science, 19(4), PP. 335–368.
- Goldberg, D.E., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC, P. 810.
- Horn, J., Nafpliotis, N. & Goldberg, D.E., 1999, **A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization**, In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Computation, 1, PP. 82–87.
- Jiang, B., Xu, X., Yang, C., Li, R. & Terano, T., 2013, **Solving Road-Network Congestion Problems by a Multi-objective Optimization Algorithm with Brownian Agent Model**, Springer V(365), Computer and Information Science, PP. 36–48.
- Li, Y. & Guo, L., 2016, **Multi-Objective Optimal Path Finding in Stochastic Time-Dependent Transportation Networks Considering Timeliness Reliability and Travel Expense**, In Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), PP. 1–6.
- Li, Q., Zeng, Z., Zhanga, T., Li, J. & Zhongheng, Wu., 2011, **Path-Finding through Flexible Hierarchical Road Networks: An Experiential Approach Using Taxi Trajectory Data**, ELSEVIER, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1), PP. 110–119.
- مکان یابی کاربری های صنعتی، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شماره ۴، صص. ۱–۲۲.
- میرزایی قمی، م.م.، آزاده دل، ی.، بهادر، م.، ۱۳۹۴، ارائه مدل جامع جهت تعیین مسیر بهینه دوچرخه در شبکه معابر شهری با تلفیق فرایند سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS (محدوده مورد مطالعه: منطقه چهار شهر تهران)، چهاردهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران، معاونت و سازمان حمل و نقل ترافیک.
- Ahmed, F. & Deb, K., 2013, **Multi-Objective Optimal Path Planning Using Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms**, Soft Computing, Vol. 17, No. 7, PP. 1283–1299.
- Ahn, C.W. & Ramakrishna, R.S., 2002, **A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations**, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 6, PP. 566–579.
- Bae, S.T., Hwang, H., Cho, G.S. & Goan, M.-J., 2007, **Integrated GA-VRP Solver for Multi-Depot SYSTEM**, Computers and Industrial Engineering, 53, PP. 233–240.
- Coello Coello, C.A., Lamont, G.B & Van Veldhuizen, D.A., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Springer Science+Business Media, LLC.
- Datta, D., Deb, K. & Fonseca, C.M., 2007, **Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Land-Use Management Problem**, International Journal of Computational Intelligence Research, 3(4), PP. 371–384.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 6(2), PP. 182–197.
- Deb, K., 2001, **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, LTD.
- Descrochers, M., Desrosiers, J. & Solomon, M., 1992, **A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows**, Operations Research, PP. 342–352.

- Wen, L., Çatay, B. & Eglese, R., 2014, **Finding a Minimum Cost Path between a Pair of Nodes in a Time-Varying Road Network with a Congestion Charge**, European Journal of Operational Research, 236(3), PP. 915–923.
- Maringanti, C., Chaubey, I. & Popp, J., 2009, **Development of a Multiobjective Optimization Tool for the Selection and Placement of Best Management Practices for Nonpoint Source Pollution Control**, Water Resources Reserch, 45(6), PP. 15.
- Verbyla, D.L., 2002, **Paractical GIS Analysis**, Taylor and Francis.
- Zero, L., Bersani, C., Paolucci, M. & Sacile, R., 2017, **Multi-Objective Shortest Path Problem with Deterministic and Fuzzy Cost Functions Applied to Hazmat Transportation on a Road Network**, In Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2017 5th IEEE International Conference on (PP. 238–243), IEEE.
- Zhao Tiana, Z., Jiaa, L., Donga, H., Sua, F. & Zhangc, Z., 2015, **Analysis of Urban Road Traffic Network Based on Complex Network**, Procedia Engineering, 137, PP. 537–546.
- Zhu, C.J., Lam, K.Y. & Hanb, S., 2015, **Approximate Path Searching for Supporting Shortest Path Queries on Road Networks**, Elsevier, Information Sciences, 325, PP. 409–428.

