بهینه‌سازی ایستگاه‌های اتوبوس شهری با الگوریتم ژنتیک و GIS (مطالعه موردی: منطقه ٦ تهران)

نجمه نیسانی سامانی*، استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

نورالدین میثاق، دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

Email: nneysani@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٦/۱۱/۱۲ – پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

چکیده

طراحی ایستگاه‌های اتوبوس یه صورت استاندارد، از جمله موارد مهمی است که باعث پهلوگیری مناسب اتوبوس در ایستگاه‌ها، کاهش زمان پیاده و سوار شدن مسافران و تأثیر منفی کمتر این سیستم بر تردد سایر وسایل نقلیه می‌شود. در این تحقیق، سعی گردید تا مکان‌های مناسب جهت ایجاد ایستگاه‌های کاندید اتوبوس درون شهری در منطقه ٦ تهران با توابع GIS و تصمیم‌گیری تحلیل شبکه ANP، شناسایی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توابع هدف، اقدام به بهینه‌سازی ایستگاه‌های کاندید شد. جهت افزایش دقت تحقیق، منطقه مورد مطالعه به دو پهنه تمرکز قوی و ضعیف از مراکز خدماتی و تجاری تقسیم شد. نتایج نشان داد که با توجه به طول شبکه و استانداردهای فواصل ایستگاه، منطقه ٦ نیاز به ۳۰٦ تا ۲۰۸ ایستگاه دارد که از میان ۲۹۱ ایستگاه کاندید، ۲٤۷ ایستگاه و از ۲۱۲ ایستگاه موجود نیز ۱٤۷ ایستگاه بهینه تعیین شدند که می‌توانند میزان پوشش تقاضای مراکز جمعیتی و مراکز جاذب را حداکثر کنند.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه اتوبوس، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، GIS، منطقه ٦ تهران، ANP

۱. مقدمه

امروزه یکی از مسائل بسیار مهم شهرهای بزرگ، حمل و نقل و ترافیک شهری است. همچنین، کمبود و نارسایی در سیستم حمل و نقل زمینی، به‌خصوص حمل و نقل شهری، به عنوان یکی از موانع رشد و توسعه هر کشوری به شمار می‌رود. یکی از مؤثرترین راه‌حل‌های این مشکل، توسعه و تقویت سیستم‌های حمل و نقل عمومی شهری است. با توجه به مشکلاتی که امروزه در اثر افزایش تعداد

وسایل نقلیه در شهرهای بزرگ و متوسط ایران به وجود آمده است، سیاست تقویت استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی از تدابیر ارزنده به شمار می‌رود. در این راستا، برای بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل عمومی به منظور خدمات رسانی ایمن، مستمر، ارزان، سریع و مطلوب به متقاضیان سفرهای درون شهری باید تلاش گسترده‌ای را آغاز کرد (یزدان پناهی، ۱۳۹۰). از آنجا که عمده‌ترین قسمت سیستم حمل و نقل عمومی در کشورهای در حال توسعه را شبکه اتوبوس‌رانی شهری تشکیل می‌دهد، طراحی بهینه شبکه اتوبوس‌رانی با هدف بهبود وضعیت حمل و نقل عمومی از اهمیت فراوانی برخوردار است و لازم است ایستگاه‌ها در محل‌هایی تعبیه شوند که باعث افزایش این سیستم در مناطق مختلف شهر شوند. در کنار این مسئله، احداث بی‌رویه ایستگاه‌های اتوبوس موجب بالا رفتن تعداد دفعات توقف وسیله و در نتیجه افزایش زمان سفر و کاهش سرعت این سیستم در معابر شهری می‌گردد. لذا، لازم است ایستگاه‌های سیستم اتوبوس‌رانی بر اساس چگونگی توزیع جمعیت و تنوع کاربری‌ها در مناطق مختلف شهری، طوری مکانیابی گردند که علاوه بر افزایش دسترسی کاربران به این سیستم، زمان سفر نیز کاهش پیدا کند (امین ناصری و برادران، ۱۳۸۹). طراحی ایستگاه‌های اتوبوس یه صورت استاندارد، از جمله موارد مهمی هست که باعث پهلوگیری مناسب اتوبوس در ایستگاه‌ها، کاهش زمان پیاده و سوار شدن مسافران و تأثیر منفی کمتر این سیستم بر تردد سایر وسایل نقلیه می‌شود. همچنین، استفاده از تجهیزات مناسب در ایستگاه‌ها به منظور استفاده کاربران باعث افزایش راحتی و در نتیجه افزایش تقاضای استفاده از این سیستم در سفرهای درون شهری می‌گردد. ایستگاه‌ها، اجزای بسیار مهمی در سیستم‌های حمل و نقل همگانی به شمار می‌آیند. امروزه، سیستم حمل و نقل عمومی برای داشتن عملکردی بهتر باید به ارائه خدمات سطح بالا بپردازد و تا جایی که امکان دارد باید در دسترس‌تر باشد و برای تعداد بیشتری خدمات‌رسانی کند. به همین دلیل، اپراتورهای حمل و نقل عمومی همیشه سعی می‌کنند تا جایی که امکان داشته باشد خدمات جذاب و بهتری را ارائه دهند (هال، ۲۰۰۶). فاصله بین ایستگاه‌ها را می‌توان با برقراری تعادل بین کوتاه‌ترین دسترسی (به منظور حداکثر نمودن پوشش سیستم) و بیشترین سرعت عملیاتی (به منظور حداقل نمودن زمان سفر کاربران) به‌دست آورد. هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد امکان دسترسی کاربران به سیستم بیشتر و پوشش سیستم افزایش می‌یابد؛ در مقابل، باعث کاهش سرعت عملیاتی سیستم می‌شود. همچنین، فاصله پیشنهادی برای ایستگاه‌ها با توزیع جمعیت در مناطق مختلف نسبت عکس دارد. هر چقدر جمعیت یک منطقه بیشتر باشد، فاصله ایستگاه‌ها کمتر در نظر گرفته می‌شود .در این راستا، در نظر گرفتن فاصله ایستگاه‌ها بین ۴۰۰ الی ۶۰۰ متر پیشنهاد می‌شود. البته در مکان‌هایی خاص (مانند مناطق تجاری شهرها با جذب سفر بالا) این فاصله می‌تواند کمتر شود. اما حداقل فاصله تعریف شده برای ایستگاه‌ها به ۳۰۰ متر محدود می‌گردد. فاصله کم ایستگاه‌ها و در نتیجه تعداد زیاد آنها در طول مسیر، باعث کاهش تواتر اتوبوس‌ها و راحتی مسافرین خواهد شد. از طرفی، هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد، هزینه‌های سیستم (از لحاظ تجهیزات ایستگاه‌ها) افزایش یافته و سرعت عملیاتی اتوبوس‌ها کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی، پیشنهاد می‌شود در مناطق مسکونی و تجاری با تراکم جمعیت بالا، فاصله ایستگاه‌های سیستم اتوبوسرانی ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر و در مناطق حومه ای با تراکم کمتر و عدم وجود مراکز جذب سفر زیاد، این فاصله ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر لحاظ گردد (شورای عالی هماهنگی ترافیک، ۱۳۸۶). از عوامل مؤثر و مهم در تعیین موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس می‌توان به وضعیت هماهنگی چراغ‌های راهنمایی، دسترسی کاربران سیستم، مسیر خط سیستم اتوبوس‌رانی، شرایط فیزیکی معبر، وضعیت تراکم معابر، محل‌های عبوری عابران پیاده و شرایط هندسی اتوبوس‌ها

به لحاظ گردش و توقف اشاره نمود. دسترسی مسافرین نیز عامل تعیین کننده دیگری در مکان‌یابی ایستگاه‌ها می-باشد و باید به درستی در نظر گرفته شود. محل تجمع مسافرین در ایستگاه باید کاملاً از جریان ترافیک جدا باشد. همچنین، فضای کافی برای تردد و سوار و پیاده شدن کاربران در ایستگاه وجود داشته باشد. به‌طوری که عمل سوار و پیاده شدن مسافران به عنوان سد معبری برای پیاده‌رو محسوب نگردد. شرایط و وضعیت ترافیکی و تراکم معابر نیز به عنوان یکی از مسائلی محسوب می‌شود که در جانمایی ایستگاه‌ها باید در نظر گرفته شود. در این مقوله، می‌توان به عواملی از جمله تأمین حداکثر ایمنی برای عابرین پیاده و اتومبیل‌ها، حداقل نمودن تداخل حرکت سایر وسایل نقلیه با اتوبوس به منظور پهلوگیری و قابلیت دیده شدن آسان ایستگاه توسط مسافرین اشاره نمود (شورای عالی هماهنگی ترافیک، ۱۳۸٦). مطالعات نشان می‌دهند که ٦۰٪ مردم تهران از سیستم حمل و نقل عمومی استفاده می‌کنند، که از این تعداد، ۲۳٪ از اتوبوس برای جابه‌جایی در شهر تهران استفاده می‌کنند (آشتیانی و ایروانی، ۲۰۰۲). مطالعات فراوانی در مباحث مکان‌یابی و بهینه‌سازی تأسیسات و خدمات شهری از جمله ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری با روش‌های گوناگون انجام شده است. ژو و همکاران (۲۰۱۷)، به منظور مکان‌یابی عملی ایستگاه‌های اتوبوس، یک مدل ریاضی بر پایه دیاگرام ورونی جهت حداقل کردن زمان سفر کلی ساکنان پیشنهاد دادند. از آنجا که محاسبه فاصله پیاده‌روی ایستگاه اتوبوس تا موقعیت ساکنان به صورت واقعی قابل محاسبه نیست، از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مختصات کارتزین، فواصل واقعی محاسبه و مدل با توسعه زبان برنامه‌نویسی SQP[1] حل گردید. مدل پیشنهادی در شهر شانگهای چین اجرا شده و نتایج مورد قبولی داشت. هوانگ و لیو (۲۰۱٤)، با هدف بهینه‌سازی توزیع توقف اتوبوس‌ها در شهرهای بزرگ با شبکه حمل و نقل چندوجهی در چین، از یک روش مرتبه‌ای استفاده کردند. انواع توقف اتوبوس به صورت رتبه‌ای شامل ایستگاه‌های اتصالی، کلیدی و معمولی مشخص شدند. ایستگاه‌های اتصالی به صورت دستی جهت ارتباط با سایر شبکه‌های حمل و نقل از قبیل ریلی و BRT ایجاد و ایستگاه‌های کلیدی و معمولی با مدل‌های پوششی از نوع مرکزیت و تقاضای بالقوه بهینه شدند. نتایج نشان داد که ترکیب داده‌های وکتوری و رستری در GIS موجب ارزیابی مؤثر در فرایند تحلیل شده و در مقایسه با موقعیت ایستگاه‌های فعلی، برخی از ایستگاه‌ها، به‌خصوص در مناطق مرکزی، حذف و در مناطق حاشیه‌ای نیز برخی ایستگاه‌ها اضافه شده است. وی (۲۰۱۰)، با هدف کاهش ایستگاه‌های زائد و افزایش کارایی ایستگاه‌های اتوبوس در ووهان چین، از یک پلتفرم مبتنی بر GIS برای رسیدن به یک تعادل در توزیع ایستگاه‌های اتوبوس استفاده کرد. تعداد و موقعیت ایستگاه‌های کاندید، توسط ابزار تحلیل شبکه و پلیگون-های تیسن در ArcGIS مشخص گردیده و ایستگاه‌های کلیدی توسط الگوریتم پیاده‌روی تصادفی و ایستگاه‌های معمولی با به‌کارگیری مدل سرویس مکانی و تقاضای حمل و نقل عمومی در نرم افزار FLOWMAP مشخص شدند. ایبیز و همکاران (۲۰۱۰) نیز با هدف بهینه‌سازی ایستگاه‌های اتوبوس، بر اساس حداقل کردن هزینه نهایی سیستم، با در نظر گرفتن ارزش زمان مسافران خط اتوبوس‌رانی و هزینه‌های متولی اتوبوس‌رانی (شرکت اتوبوس‌رانی) و تبدیل این عوامل به هزینه، رابطه بین فاصله ایستگاه‌های اتوبوس و هزینه کل مسافران و متولی اتوبوس‌رانی را ارائه کردند. سپس، با هدف کمینه کردن هزینه کل، فاصله بین ایستگاه‌ها را به دست آوردند. آقاجان زاده و آقاجان زاده (۱۳۸۸) به یافتن مسیر بهینه حرکت برای اتوبوس‌های درون شهری و بهترین محل برای احداث ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری به وسیله

[1]- Sequential Quadratic Programming

الگوریتم ژنتیک تحت همین عنوان پرداخته‌اند. علی عسگری (۱۳۹۰) مدل هزینه معادل پول را برای تمام اجزای سیستم یک خط اتوبوس محاسبه کرده و مجموع آن‌ها را به عنوان هزینه‌های نهایی به حداقل رسانده است. در تحقیق شاهسونی (۱۳۹۱)، مسیرها و ایستگاه‌های مترو در مکان نسبتاً مناسبی مکان‌یابی شده‌اند. به گونه‌ای که دسترسی نسبتاً مناسبی به معابر و شریان‌های اصلی شهر اصفهان داشته‌اند. عصارزادگان و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، وزن شاخص‌های کیفی به دست آمده از نظر کارشناسان حمل و نقل و ترافیک شهری، شاخص‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار ARC GIS با کاربرد تکنیک TOPSIS درانتخاب نقاط پیشنهادی BRT را به کار برده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که بهینه‌سازی انتخاب ایستگاه‌های BRT، به کاهش هزینه‌های حمل و نقل عمومی، افزایش رضایت شهروندان و کاهش استفاده از خودروهای شخصی منجر می‌گردد.

این تحقیق از سه بخش کلی تشکیل شده است.در بخش اول، هدف، شناسایی معیارهای مناسب و در بخش دوم جانمایی ایستگاه‌های کاندید در سیستم اطلاعات جغرافیایی حوزه مورد مطالعه با مد نظر قرار دادن تعدادی از معیارها است. در بخش سوم نیز بهینه‌یابی از میان موقعیت‌های کاندید با حل مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک بیان می‌شود. همچنین، به صورت موردی، روش ارائه شده برای منطقه ٦ تهران پیاده‌سازی شده است.

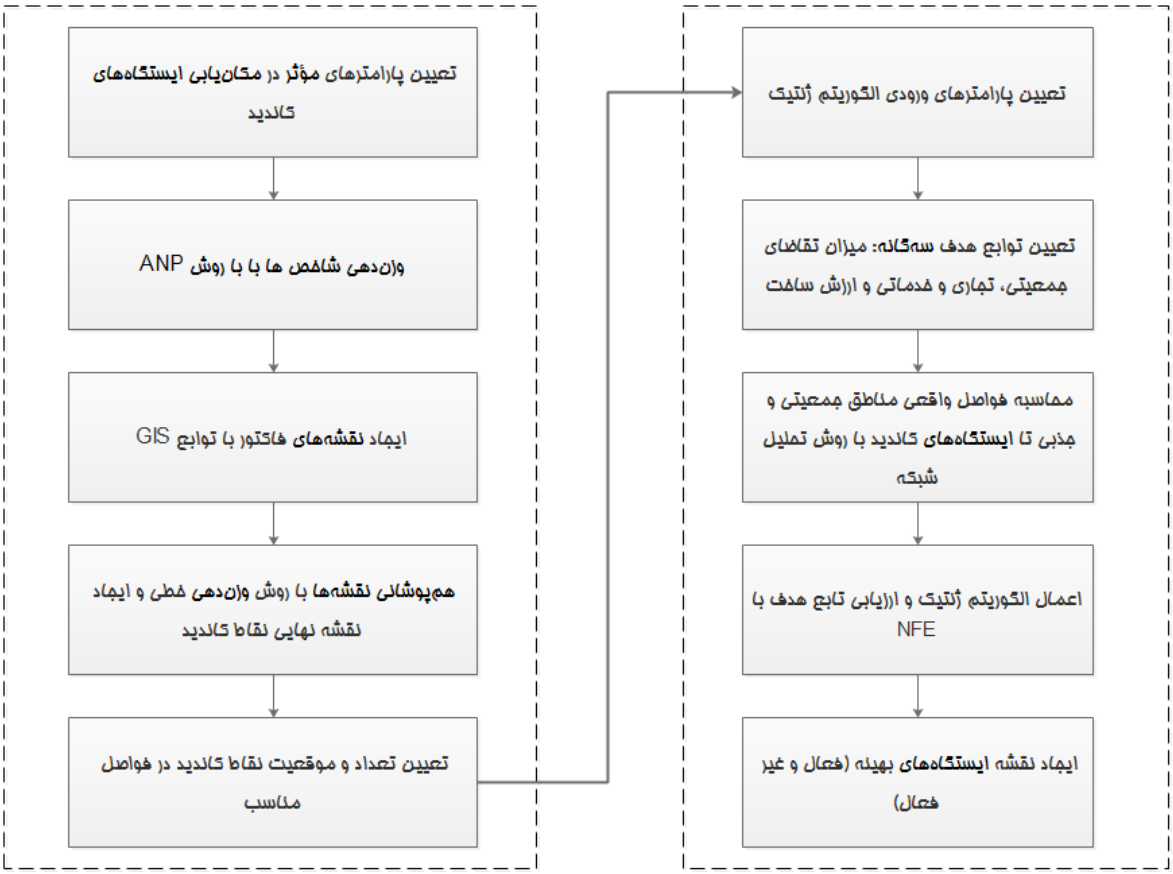
۲. مواد و روش‌های تحقیق

مراحل مکان‌یابی و بهینه‌سازی ایستگاه اتوبوس در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدا، می‌بایست تعدادی نقاط کاندید با پراکنش مناسب در سطح منطقه مورد مطالعه انتخاب گردد. بدین منظور، پارامترهای تأثیرگذار در مکان‌یابی ایستگاه‌های کاندید با مراجعه به نظر کارشناسان و داده‌های موجود شناسایی شده و با استفاده از توابع GIS به نقشه‌های فاکتور تبدیل می‌شوند. به منظور تجمیع نقشه‌های فاکتور از روش وزن‌دهی خطی و جهت تعیین مقدار وزن هر یک از لایه‌های مورد نظر از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP استفاده می‌شود. بعد از شناسایی نقاط کاندید، می‌بایست از میان آنها، نقاط و ایستگاه‌های بهینه که بهترین توزیع را داشته و بیشترین مقدار تابع هدف را برآورده کنند انتخاب گردد. با توجه به غیرخطی و غیرمحدب بودن مسأله بهینه‌سازی ایستگاه‌ها، استفاده از روش‌های ریاضی و تحلیلی نتایج قابل اطمینانی حاصل نمی‌کند و چه بسا حل مسأله با استفاده از روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نباشد (صادقیه، ۱۳۸٤). روش‌های فراابتکاری بر مبنای فرایند سعی و خطا و امتحان کردن جواب‌های مختلف عمل می‌کنند. در این روش‌ها، ابتدا یک جواب اولیه بر مبنای ویژگی‌های مسأله به دست می‌آید و سپس این جواب اصلاح می‌شود. این روش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در هر تکرار به سمت جواب بهینه حرکت کرده و به جواب مطلوب نزدیکتر می‌شوند. تکرار الگوریتم تا رسیدن به تعداد مشخصی از سعی‌ها و یا رسیدن به یک تقریب مناسب از جواب ادامه می‌یابد. از نمونه‌های کاربردی روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک است که در این پژوهش جهت بهینه‌سازی ایستگاه‌های کاندید استفاده شده است.

۲-۱. مکان‌یابی ایستگاه‌های کاندید

مسأله مکان‌یابی تسهیلات، یکی از مهمترین مسائل در تحلیل فضایی داده‌ها می‌باشد که مسأله توازن بین عرضه و تقاضا را با مجموعه‌ای از اهداف و محدودیت‌ها حل می‌کند. هدف از مکان‌یابی و بهینه‌سازی ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری، یافتن مجموعه‌ای از مکان‌هاست که هزینه کل سیستم را حداقل و بیشترین تقاضا را پوشش دهد. تحلیل مکان‌یابی نشان می‌دهد که در چه قسمت-هایی از منطقه مورد مطالعه می‌توان کاربری مورد نظر را

احداث کرد. برای محاسبه میزان مطلوبیت قسمت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه باید لایه‌های اطلاعاتی را با توجه به ارزش‌های محاسبه شده برای هر لایه، با یکدیگر تلفیق نمود.



شکل ۱. فلوچارت مراحل اجرای پژوهش

برای انجام تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره در مکان‌یابی، هر معیار به یک لایه اطلاعات مکانی تبدیل می‌شود. لایه‌های اطلاعاتی مجموعه‌ای از پیکسل‌ها هستند که هر پیکسل در هر لایه دارای ارزشی است که بیانگر درجه عضویت آن پیکسل به لایه مربوطه است. برای انتخاب پیکسل‌های برتر، باید وضعیت و ارزش پیکسل‌ها در تمام لایه‌ها مورد بررسی قرار گیرد که این بررسی توسط مدل‌های تلفیق لایه‌ها انجام می‌گیرد. مدل‌های تلفیق با استفاده از توابع و عملگردهای مختلف ریاضی و اعمال آنها روی ارزش هر پیکسل در لایه‌های مختلف، این ارزش‌ها را با یکدیگر تلفیق کرده و به این ترتیب ارزش نهایی هر پیکسل با در نظرگرفتن تمام لایه‌های تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در آنالیزهایی مانند مکان‌یابی، ارزش نهایی محاسبه شده هر پیکسل معیار تصمیم‌گیری محسوب می‌شود (گودچایلد، ۱۹۹۶). به منظور به دست آوردن مطلوبیت نهایی هر ناحیه برای ایجاد ایستگاه (S)، از شاخص تجمعی مبتنی بر ترکیب خطی وزن‌دهی شده جهت تلفیق نقشه‌های فاکتور استفاده شد که در آن N تعداد تسهیلات و خدمات انتخاب شده، F_i امتیاز تسهیلات i و W_i وزن تسهیلات i است.

$$S = \sum_{i=1}^{N} F_i W_i \qquad (۱)$$

طبق مطالعات صورت گرفته، به منظور مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس و ویژگی‌های منطقه ٦ تهران، ۹

شاخص تأثیرگذار و قابل سنجش شناسایی گردیدند که این ۹ شاخص در قالب معیار دسترسی (شاخص‌های دسترسی به فضاهای آموزشی و دانشگاهی، مراکز ورزشی، بهداشتی- درمانی، مذهبی، تأسیسات شهری، مراکز تجاری، مراکز اداری و مترو) و معیار اجتماعی (تراکم جمعیتی) دسته‌بندی شدند. مکان‌های جاذب سفر، مکان‌هایی هستند که باعث جذب سفرهای درون شهری می‌شوند، مثلاً بیمارستان‌ها، مدارس، دانشگاه‌ها، اماکن دیدنی و تاریخی و مذهبی، ساختمان‌های مسکونی و تجاری (آپارتمان‌ها)، بازارها و ادارات، جزو مکان‌های جاذب سفراند. نقشه‌های ورودی بیان شده، تأثیرات و وزن‌های متفاوتی در تعیین مکان مناسب احداث ایستگاه اتوبوس دارند. برخی از شاخص‌ها از قبیل عرض معابر و خط‌کشی به دلیل عدم دسترسی به داده حذف شدند. برای تعیین وزن هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی از روش‌های تصمیم‌گیری تحلیل شبکه ANP استفاده گردید. تعداد ۲۰ پرسش‌نامه میان دانشجویان دکتری برنامه‌ریزی شهری و حمل و نقل به منظور مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارها توزیع گردید و در نرم‌افزار Super Decisions توسط مدل ANP وزن‌های مورد نظر به‌دست آمد. فرایند تحلیل شبکه یا ANP یکی دیگر از سری تکنیک‌های تصمیم‌گیری است که شباهت زیادی به روش AHP دارد. هر یک از روش‌ها بر اساس یک سری فرضیات بنا شده است. برای نمونه، اگر معیارها مستقل از هم باشند و مقایسات زوجی امکان‌پذیر باشد، مدل تصمیم‌گیری مناسب، مدل AHP است. ولی اگر معیارها مستقل نباشند، روش ANP بهتر است. از محدودیت‌های جدی AHP این است که وابستگی‌های متقابل بین عناصر تصمیم، یعنی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها را درنظر نمی‌گیرد و ارتباط بین عناصر تصمیم را سلسله مراتبی و یکطرفه فرض می‌کند (لی و کیم، ۲۰۰۰). روش فرایند تحلیل شبکه‌ای، ارتباطات پیچیده بین و میان عناصر تصمیم را از طریق جایگزینی ساختار سلسله مراتبی با ساختار شبکه‌ای درنظر می‌گیرد. برای درک بهتر تکنیک ANP، به تحقیق زبردست (۱۳۸۰) رجوع شود.

۲-۲. بهینه‌یابی موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس

در مکان‌یابی تسهیلات شهری، ازجمله ایستگاه‌ها، هدف، یافتن مکان تعدادی از تسهیلات جدید است به صورتی که فاصله وزن‌دهی شده تمام استفاده‌کنندگان تا نزدیکترین تسهیلات موجود حداقل شود. در این مسئله، فرض می‌شود که تعدادی کاربر یا مسافر درون شهری وجود دارد که نیاز به خدمات دهی از سوی ایستگاه‌های اتوبوس را دارند و تعدادی ایستگاه که سرویس‌دهی به کاربران را بر عهده دارند. یکی از عوامل اصلی در این مسئله، کاربر می‌باشد که هر کاربر سطح تقاضایی دارد. برای مثال، کاربر یا مسافر i ام روزانه یا سالانه (d_i) تقاضای یا سفر درون شهری با اتوبوس دارد. هرچقدر d_i بیشتر باشد، باید وزن یا ارزش بیشتری به آن داد. کاربران به دو دسته میزان تقاضای بلوک‌های جمعیتی و مراکز خدماتی و تجاری عمده (از قبیل پاساژهای شلوغ، بازارها، بیمارستان، دانشگاه و ...) به عنوان مراکز جذب جمعیتی تقسیم‌بندی شدند. مقدار تقاضا در هر بلوک جمعیتی از منطقه، از مجموع جمعیت کل (d_1)، تعداد شاغلان (d_2)، محصلان زن و مرد (d_3) و تعداد افرادی که محل کار یا تحصیل آنها خارج از شهر یا منطقه دیگر می‌باشد (d_4) محاسبه گردید $(d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4)$. همچنین، میزان تقاضا در هر بلوک از مراکز جذب تجاری و ... می‌بایست توسط عملیات میدانی از هر یک از آنها جمع آوری شود. برای مثال، تعداد افرادی که هر روز به بازار یا بیمارستان i جذب می‌شوند به متغیرهای زیادی از قبیل تعداد کارکنان، موقعیت و نقش منطقه ای یا فرا منطقه ای بیمارستان و ... بستگی دارد. به دلیل در دسترس نداشتن داده‌های میدانی مراکز جذب، تعداد طبقات هر بلوک از این مکان‌ها به عنوان میزان تقاضای آنها در نظر گرفته شود. برای مثال، پاساژهای چند طبقه

کالاهای دیجیتالی میزان تقاضای بیشتری خواهند داشت. بنابراین، می‌بایست با در نظر گرفتن تقاضای بلوک‌های جمعیتی و میزان جذب مراکز خدماتی، فاصله‌ها را کمینه کرد و به عبارتی کاربری که تقاضای بیشتری دارد، فاصله آن اهمیت بیشتری دارد. تابع هدف از مجموع سه تابع هدف $(z_1 + z_2 + z_3)$ تشکیل می‌شود که تابع اول، تقاضای بلوک‌های جمعیتی (z_1)، تابع دوم، تقاضای مراکز جذب خدماتی (z_2) و تابع سوم نیز ارزش ساخت ایستگاه (z_3) را در نظر می‌گیرند. میزان ارزش موقعیت هر ایستگاه، c_i می‌باشد که می‌تواند به‌صورت هزینه و یا سود تعریف شود. اگر این تابع به صورت هزینه در نظر گرفته شود به پارامترهایی از قبیل هزینه ساخت، ارزش زمین، توجیه اقتصادی و ... وابسته است و از انتخاب مکان‌های با هزینه زیاد جلوگیری می‌کند. به علت نبود داده‌های مربوط به هزینه هر ایستگاه، میزان ارزش یا DN[1] هر پیکسل که در مرحله ایجاد مناطق مستعد ایستگاه با مدل ANP به‌دست آمد، به عنوان ارزش سود (بر خلاف هزینه) آن ایستگاه در نظر گرفته شد که در این صورت موقعیت‌های با DN بیشتر، شانس انتخاب شدن بیشتری خواهند داشت.

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 \qquad (۲)$$

$$min_i = w_1 \sum_{i}^{n} d_i \, D_i^{min} + w_2 \sum_{i}^{n} t_i \, D_i^{tmin} + w_3 \sum_{i}^{n} f_i c_i \qquad (۳)$$

$$f_j \in \{0, 1\}$$

تابع f_j ایستگاه‌های فعال و غیرفعال را با توجه به تابع هدف مسئله مشخص می‌کند، که در ابتدا به عنوان یک راه‌حل ابتدایی برای ایجاد کروموزوم و جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک از میان تعداد ایستگاه‌های بالقوه (n)، استفاده می‌شود. اگر ایستگاه j انتخاب و آماده سرویس‌دهی باشد فعال $(f_j = 1)$ و اگر $(f_j = 0)$ باشد غیرفعال خواهد بود. در ادامه، نزدیکترین ایستگاه برای هر بلوک یا مراکز جذب تعیین می‌شود. با استفاده از ماتریس فاصله هر بلوک یا مراکز جذب از تمام ایستگاه‌ها که توسط تحلیل شبکه GIS تهیه شد، فاصله هر مکان از نزدیکترین ایستگاه فعال محاسبه و با D_i^{min} نشان داده می‌شود که در آن، i شماره بلوک یا نقطه مورد بررسی، D_{ij} ماتریس فاصله نقطه i از ایستگاه j و D_i^{min} فاصله طولی بلوک iتا نزدیکترین ایستگاه فعال و D_i^{tmin} فاصله طولی مرکز خدماتی و تجاری i تا نزدیکترین ایستگاه فعال می‌باشد. در واقع، فاصله هر نقطه تقاضا از نزدیکترین ایستگاه فعال را پیدا کرده و در میزان تقاضای نقطه مورد نظر ضرب می‌شود که مجموع کل آنها مقدار تابع هدف اول را تشکیل می‌دهد.

$$D_i^{min}, D_i^{tmin} = min\{D_{ij}, f_i = 1\} = min\frac{D_{ij}}{f_i} \qquad (٤)$$

توابع هدفی که اشاره گردید، وزن یا هزینه خاص (w_i) خود را دارند که نسبت به سیاست و سناریوهای مکان‌گزینی ایستگاه‌های اتوبوس تغییر می‌کنند. برای مثال، اگر میزان وزن تابع هدف اول (w_1) یا کاربران بیشتر باشد، تعداد ایستگاه‌های بیشتری به منظور پوشش‌دهی و سرویس‌دهی مراکز جمعیتی انتخاب می‌شوند. همچنین، با افزایش وزن مراکز جذب تجاری، درمانی و ... (w_2)، تعداد ایستگاه‌های بیشتری در مناطق تجاری و درمانی انتخاب می‌شوند و در نهایت اگر وزن تابع هدف سوم (w_3)، مربوط به هزینه ساخت ایستگاه‌ها بیشتر باشد، هزینه اقتصادی ساخت ایستگاه زیاد می‌شود. می‌توان گفت که این تابع با توابع دیگر تضاد دارد. اگر ایستگاه‌های بیشتری انتخاب شود، هزینه اقتصادی کلی نیز بیشتر خواهد بود و بالعکس (گفتنی است که تابع سوم

[1]- Digital Number

در این تحقیق به علت نبود داده‌های مورد نیاز به صورت سود تعریف شده است نه هزینه).

۳-۲. ساختار کلی یک الگوریتم ژنتیک

ساختار کلی یک الگوریتم ژنتیک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد. ابتدا باید مکانیزمی برای تبدیل هر جواب مسئله به یک کروموزم تعریف کرد. پس از آن، یک مجموعه از کروموزوم‌ها که در حقیقت مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله هستند به عنوان یک جمعیت آغازین تهیه[۱] می‌شود. این مجموعه، که اندازه آن دلخواه است و توسط کاربر تعریف می‌شود، اغلب به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردد. بعد از این مرحله، باید با به‌کارگیری عملیات ژنتیک[۲] اقدام به ایجاد کروموزوم‌های جدید موسوم به فرزند[۳] نمود. این عملیات به دو گونه عمده تقاطعی و جهشی تقسیم‌بندی می‌شود. همچنین، برای گزینش کروموزوم هایی که باید نقش والدین را بازی کنند دو مفهوم نرخ تقاطعی[۴] و نرخ جهشی[۵] کاربرد فراوان دارند که این دو نیز پیش از شروع الگوریتم توسط کاربر تعیین می‌شوند. بعد از تولید یک سری کروموزوم جدید یا اولاد، باید با استفاده از عمل تحول[۶] اقدام به عمل انتخاب[۷] کروموزوم‌ها نمود. فرایند انتخاب مبتنی بر مقدار برازندگی[۸] هر رشته است. در حقیقت فرایند ارزیابی[۹] محوری‌ترین بحث در فرایند انتخاب است. تا بدین مرحله یک تکرار یا یک نسل از الگوریتم طی شده است. الگوریتم بعد از طی چندین نسل به تدریج به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. شرط توقف مسئله نیز طی کردن تعداد معینی تکرار است که پیش از آغاز الگوریتم توسط کاربر تعیین می‌شود. عملگر تقاطع جهت ایجاد نسل جدید با ترکیب ساختار دو کروموزوم انجام می‌شود. ابتدا یک محل به‌صورت تصادفی برای تقاطع والدین مشخص کرده و سپس نیمه اول والد اول و نیمه دوم والد دوم را کنار هم گذاشته تا فرزند اول ایجاد شود. اگر فقط از عملگر تقاطع برای ایجاد فرزند استفاده شود، یک مسأله بالقوه که ممکن است رخ دهد این می‌باشد که اگر همه کروموزم‌ها در جمعیت آغازین در یک موقعیت مکانی خاص دارای مقادیر مشابهی باشند، در نتیجه کلیه فرزندان آینده در آن موقعیت مکانی حاضر مقادیر مشابهی را خواهند داشت. برای رفع این موقعیت نامطلوب، از عملگر جهش استفاده می‌شود. این عملگر، امکان تغییر تصادفی بیت‌ها را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، روی تمام عناصر جمعیت عدد تصادفی ایجاد می‌شود. در صورتی که کمتر از نرخ جهش، مثلاً ۰/۰۱۶ باشد آن عنصر برای جهش انتخاب می‌شود. نرخ‌های جهش ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۰۶ مفید و خارج از آن مفید نمی‌باشند (صادقیه، ۱۳۸٤). در رویه انتخاب، دو کروموزوم والد بر مبنای مقادیر برازندگی آنها (تابع هدف) انتخاب می‌شوند. به طوری که هرچه مقدار برازندگی بیشتر باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم نیز بیشتر خواهد بود (بونهام کارتر، ۱۳۷۹). پس از چند نسل، الگوریتم به سمت بهترین کروموزوم همگرا می‌شود و راه‌حل بهینه یا نزدیک به بهینه را برای مسأله به وجود می‌آورد. ساده‌ترین و مورد استفاده‌ترین روش انتخاب عبارت از انتخاب تناسبی است که به عنوان روش چرخ رولت[۱۰] یا روش نمونه‌گیری تصادفی با جایگزینی معروف است. اگر Z مقدار برازندگی i ام والد باشد، احتمال بقای متناظر با آن کروموزوم به صورت $P_i = Z_i / \sum_i Z_i$ محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب، احتمال انتخاب یک فرد از جمعیت کاملاً تابعی از برازندگی فرد است. با

[1]- Initial operations
[2]- Genetic operations
[3]- Offspring
[4]- Crossover rate
[5]- Mutation rate
[6]- Evolution operation
[7]- Selection
[8]- Fitness value
[9]- Evaluation
[10]- Roulette wheel

منظم کردن کروموزوم‌ها براساس P_i و محاسبه با $q_i = \sum_i p_i$ که در حقیقت همان مقادیر تجمعی هستند می‌توان چرخ رولت را ایجاد کرد. این چرخ را باید به اندازه جمعیت چرخاند تا در هر چرخش یک کروموزوم انتخاب شود. مناسب‌ترین والدین آنهایی نیستند که کمترین هزینه را در پی داشته باشند. به همین دلیل، نوع انتخاب والدین باید به گونه‌ای باشد که مجموعه ایستگاه‌های ضعیف نیز شانس انتخاب شدن داشته باشند. این عامل از قرارگرفتن جواب‌ها در یک نقطه بهینه محلی جلوگیری می‌نماید.

٤-٢. ویژگی‌های منطقه شش تهران

منطقه مورد مطالعه، منطقه ٦ شهر تهران است که هر روز خیل عظیمی از شهروندان تهرانی را از سراسر شهر جهت انجام فعالیت‌های روزانه به سمت خود جذب می‌کند. این منطقه، با مساحتی معادل ٢١/٢ کیلومتر مربع، حدود ٣/٢ درصد از سطح شهر را در بر می‌گیرد که از این نظر در رتبه سیزدهم مناطق شهر تهران قرار دارد. مساحت منطقه به شش ناحیه و ١٨ محله تقسیم شده و بیش از ٪٣٠ ساختمان‌های دولتی و خصوصی تهران را در خود جای داده و به لحاظ موقعیت جغرافیایی در حوزه مرکزی شهر تهران واقع است. بزرگترین محور شمالی- جنوبی تهران (خیابان ولی‌عصر) نیز از این منطقه عبور می‌کند. مهمترین معابر شریانی شهر مانند بزرگراه کردستان، بزرگراه جلال آل احمد، بزرگراه شهید چمران، بزرگراه شهید گمنام، بزرگراه مدرس، بزرگراه حکیم، بزرگراه همت، خیابان انقلاب و خیابان کارگر شمالی نیز در داخل و یا حاشیه این منطقه قرار دارند. حدود ٣٥٪ این منطقه مسکونی، بیش از ٣٠ درصد اداری، تجاری، آموزشی و حدود ٣٠٪ به شبکه‌های حمل و نقل اختصاص دارد. منطقه ٦ به عنوان یکی از پرتراکم‌ترین مناطق شهری تهران، با محدودیت‌های بی‌شماری در زمینه توسعه شهری رو به روست. چرا که با بیش از ٩٨٪ فضای ساخته شده، عملاً جایی برای گسترش ندارد و به همین دلیل توسعه عمودی (ارتفاعی) در آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر، بیشترین تعداد ساختمان ٦ تا ١٠ طبقه در این منطقه قرار دارند. این منطقه، با جمعیت ٢٢٥٢٩٠ نفر، ٢/٨١ درصد جمعیت شهر را در خود جای داده و از این نظر در رتبه نوزدهم قرار دارد. البته در طول روز، رقم جمعیت در این منطقه به یک میلیون نفر هم می‌رسد (پورتال شهرداری منطقه ٦ تهران).

٤. نتایج تحقیق

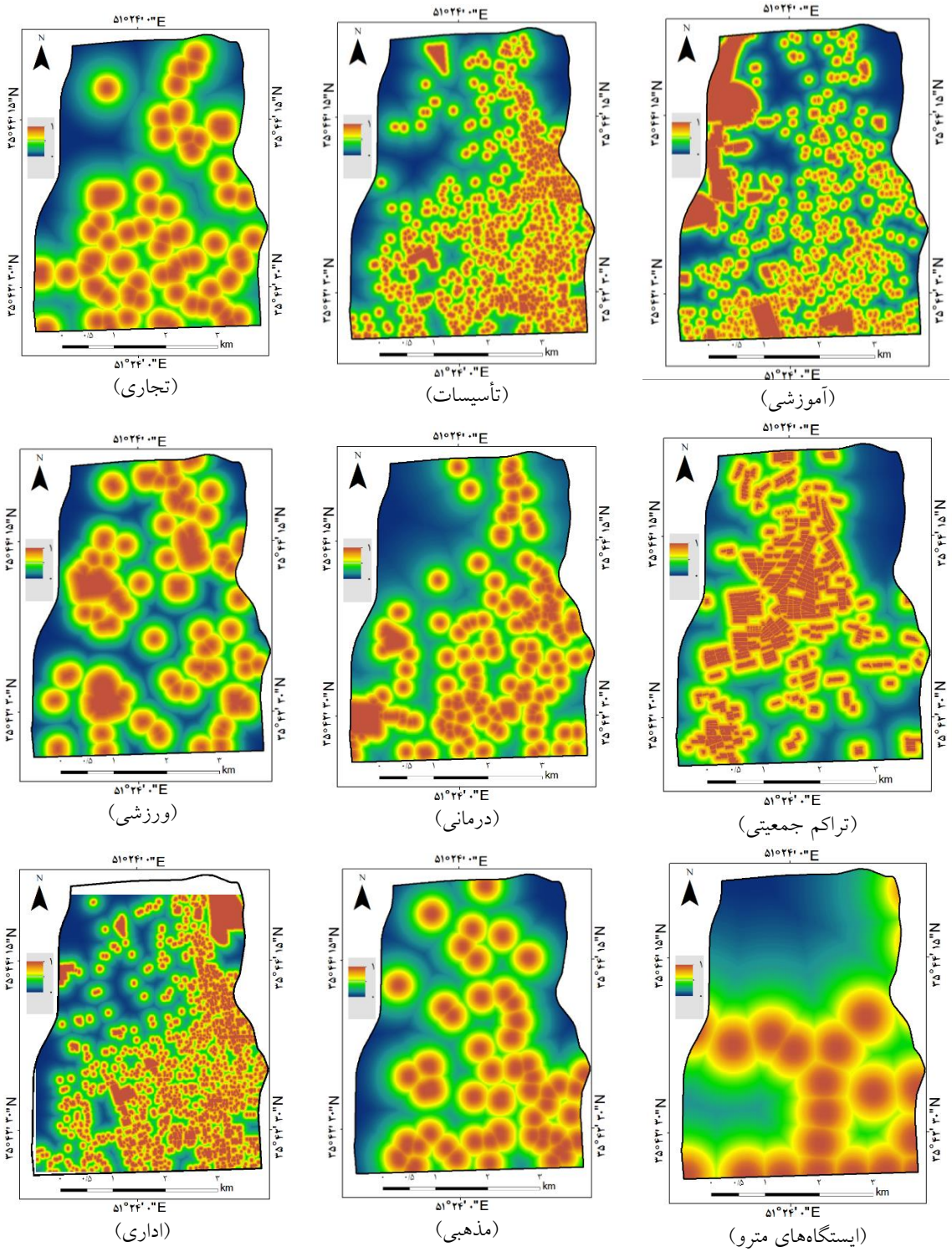
١-٤. ایجاد نقشه‌های فاکتور و محاسبه پارامترهای مورد نیاز

کلیه لایه‌های اطلاعات مورد نظر با فرمت SHP و در ساختار داده‌های برداری و در مقیاس ١:٢٠٠٠ از شهرداری تهران اخذ شد. اما با توجه به خصوصیاتی از ساختار داده‌های رستری مانند ساده بودن و امکان انجام عملیات تلفیقی روی آن به صورت کارا و مؤثر، این ساختار جهت ذخیره‌سازی داده‌های ورودی مدل تلفیقی انتخاب گردید. از تابع فاصله در نرم‌افزار GIS که فواصل را به صورت مساوی در نظر می‌گیرد، کلیه لایه‌های برداری موجود به لایه رستری در ابعاد ١٠ متر مربع تبدیل شدند. با توجه به این که مناطق نزدیک‌تر به مراکز جذب تجاری و درمانی و .. میزان تعلق و ارزش بیشتر و مناطق دورتر میزان تعلق کمتری را در مکان‌یابی ایستگاه‌ها دارند، از توابع فازی خطی مستقیم (F) و رابطه زیر برای محاسبه تعلقات پیکسل‌ها استفاده گردید.

$$F = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (٥)$$

با توجه به مطالب گفته شده، نقشه‌های فاکتور و مؤثر در جانمایی ایستگاه‌های کاندید ایجاد گردید (شکل ٢). تعداد ٩ نقشه فاکتور و تأثیرگذار در تعیین مکان مناسب ایستگاه‌های اتوبوس در منطقه ٦ تهران، توسط تحلیل‌های GIS ایجاد و با روش ترکیب وزنی خطی، نقشه‌ها یا

یگدیگر هم‌پوشانی داده شدند و مکان‌های مناسب با مقادیر صفر تا یک مشخص شدند که مقادیر نزدیک به ۱، به عنوان مناسب‌ترین مکان‌ها محسوب می‌شوند (شکل ۲). در جدول ۱، میزان وزن‌های هر یک از لایه‌های اطلاعاتی به‌دست آمده از مدل ANP نشان داده شده است که تراکم جمعیتی، نزدیکی به مترو و مراکز تجاری و درمانی بیشترین وزن را در مکان‌یابی ایستگاه اتوبوس دارند.



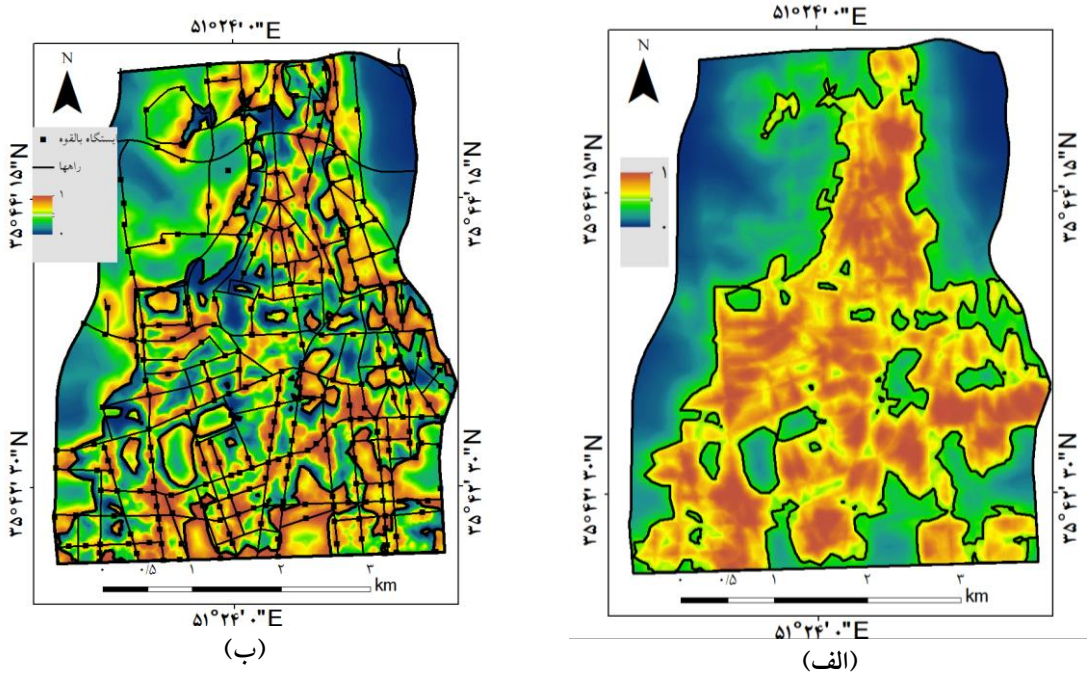
شکل ۲: مقدار فازی و تعلق پارامترهای مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس

جدول ۱. وزن نهایی شاخص‌های مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس

شاخص	وزن نهایی	شاخص	وزن نهایی
تراکم جمعیتی	۰/۱۷	مراکز آموزشی و دانشگاهی	۰/۱۰
مراکز تجاری	۰/۱۵	مراکز ورزشی	۰/۰۸
مراکز اداری	۰/۱۱	تأسیسات شهری	۰/۰۶
مراکز درمانی	۰/۱۰	مترو	۰/۱۵
مراکز مذهبی	۰/۰۶		

با توجه به اینکه توزیع ایستگاه‌ها باید بر طبق شرایط اجتماعی و اقتصادی مناطق صورت گیرد، سعی گردید تا منطقه مورد مطالعه به دو پهنه با شرایط تقریباً یکنواخت اقتصادی و اجتماعی تقسیم گردد. بدین منظور، با استفاده از نقشه‌های فاصله از مراکز تجاری، درمانی، آموزشی و تراکم جمعیت و ...، عملیات هم‌پوشانی وزنی، منطقه به دو پهنه مراکز تمرکز بالا و ضعیف از تجاری و خدماتی تقسیم شد (شکل ۳). یک دلیل مهم برای پهنه‌بندی منطقه این است که به علت تمرکز خدمات شهری در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، نمی‌توان مکان‌های مناسب جهت ایجاد ایستگاه در قسمت‌های دیگر را مشخص کرد و موقعیت ایستگاه‌های مناطق به شدت تحت تأثیر موقعیت ایستگاه‌ها در مناطق تجاری و مرکزی قرار می‌گیرد. همچنین، بعد از تقسیم منطقه به دو پهنه تمرکز بالا و ضعیف، در خود منطقه ضعیف نیز می‌توان مناطق قوی را شناسایی کرد که برای انتخاب ایستگاه‌های کاندید مورد استفاده قرار می‌گیرند. نقشه نهایی مناطق مناسب احداث ایستگاه‌های اتوبوس به همراه موقعیت ایستگاه‌های بالقوه و کاندید در هر دو پهنه ایجاد شده در شکل ٤ نشان داده شده است. در زون دوم (مناطق تجاری)، طول شبکه راه‌ها ۸۵۰۹۷ متر بوده است که با احتساب هر ٤۰۰ تا ٦۰۰ متر ایستگاه در مناطق مرکزی و تجاری شهری (TRB[1]، ۱۹۹٦)، تعداد ایستگاه از ۱٤۱ تا ۲۱۲ عدد می‌باشد. در زون دوم، طول شبکه راه‌ها ٤۷۰٤۷ متر بوده که با احتساب ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر فاصله در مناطق غیر تجاری (TRB، ۱۹۹٦)، تعداد مناسب ایستگاه‌ها ۹٤ تا ٦۷ عدد می‌باشد که در کل منطقه به ۳۰٦ تا ۲۰۸ ایستگاه می‌تواند متغیر در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه ایستگاه‌های موجود در منطقه طبق مطالعات اولیه صورت گرفته است و فرض بر این که ایستگاه‌های موجود نیز می‌تواند به عنوان ایستگاه‌های بالقوه محسوب شود، هر چند که برخی از ایستگاه‌ها در مناطق پیشنهادی قرار نداشتند که علت آن می‌تواند جانمایی نادرست و یا به روز نبودن اطلاعات و نقشه‌های فاکتور مورد استفاده در تحقیق و تأثیر برخی لایه‌های مؤثر از قبیل عرض معابر و جهت‌های خیابان‌ها که در این تحقیق ذکر نشدند برمی‌گردد. تعداد ۷۹ ایستگاه دیگر از مکان‌های پیشنهادی در مراحل قبل به همراه ۲۱۲ ایستگاه موجود انتخاب گردیدند که مجموع ایستگاه‌های بالقوه و کاندید ۲۹۱ عدد تعیین شد.

[1]- Transportation Research Board

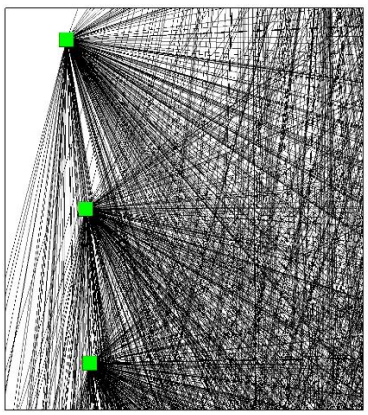


شکل ۳. الف) پهنه‌بندی منطقه به مراکز قوی و ضعیف تمرکز خدماتی و تجاری، ب) مناطق مناسب بالقوه جهت ایجاد ایستگاه (رنگ قرمز) در دو پهنه ۱ و ۲ به همراه موقعیت ایستگاه‌های بالقوه (۲۹۱ ایستگاه)

یکی از اطلاعات مهم مکان‌یابی ایستگاه‌ها، که از ورودی‌های مورد نیاز الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد، اطلاعات زمان دسترسی بین نقاط شبکه می‌باشد. زمان دسترسی یا مسافت طی شده از یک نقطه تا ایستگاه اتوبوس می‌باشد. در واقع مسافت طی شده، مبین میزان هزینه‌ای است که اشخاص واقع در هر منطقه، برای دسترسی به نقطه مورد نظر می‌پردازند. می‌بایست نقاطی که انتخاب آنها باعث حداقل نمودن زمان دسترسی کل متقاضیان به ایستگاه‌های اتوبوس می‌شوند، انتخاب گردند. روش‌های مختلفی جهت محاسبه فاصله یا مسافت طی شده از قبیل مسافت اقلیدسی، بلوک‌های شهری و ماتریس فاصله OD تحلیل شبکه GIS وجود دارد. در این تحقیق، با توجه به اینکه هر متقاضی برای استفاده از ایستگاه باید از کوچه‌ها و مسیرها رفت و آمد کند، بنابراین از ماتریس فاصله OD تحلیل شبکه GIS برای محاسبه فواصل مکان‌های مختلف تا ایستگاه‌های منطقه استفاده گردید که فواصل بین آنها را به صورت مجموع طول راه‌ها، میان نقطه i تا همه ایستگاه‌های موجود را محاسبه می‌کند (شکل ۵).

nes

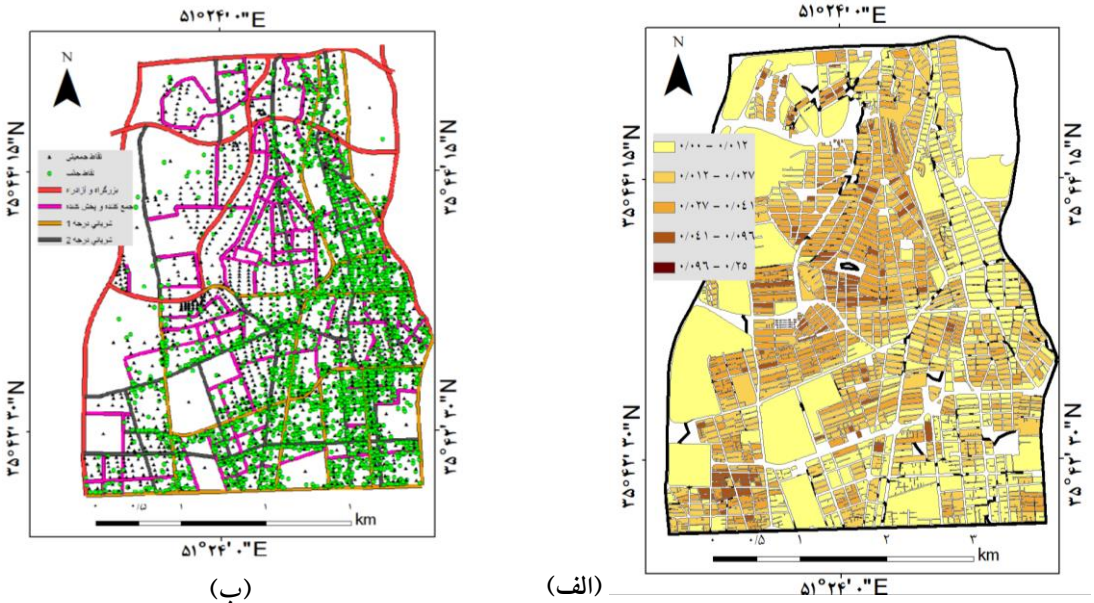
ObjectID	Shape	Name	OriginID	DestinationID	DestinationRan	Total_Length
1	Polyline	Location 1 - Location 1	1567	1567	1	0
2	Polyline	Location 1 - Location 162	1567	1728	2	149.908418
3	Polyline	Location 1 - Location 191	1567	1757	3	230.293566
4	Polyline	Location 1 - Location 7	1567	1573	4	264.748321
5	Polyline	Location 1 - Location 190	1567	1756	5	271.077418
6	Polyline	Location 1 - Location 8	1567	1574	6	298.660323
7	Polyline	Location 1 - Location 4	1567	1570	7	301.849325
8	Polyline	Location 1 - Location 28	1567	1594	8	389.598593
9	Polyline	Location 1 - Location 194	1567	1760	9	390.983406
10	Polyline	Location 1 - Location 118	1567	1684	10	498.223442
11	Polyline	Location 1 - Location 192	1567	1758	11	536.36072
12	Polyline	Location 1 - Location 2	1567	1568	12	563.650462
13	Polyline	Location 1 - Location 25	1567	1591	13	605.970255
14	Polyline	Location 1 - Location 155	1567	1721	14	630.11792
15	Polyline	Location 1 - Location 157	1567	1723	15	645.123911
16	Polyline	Location 1 - Location 116	1567	1682	16	720.38887
17	Polyline	Location 1 - Location 117	1567	1683	17	722.352776
18	Polyline	Location 1 - Location 198	1567	1764	18	742.51899
19	Polyline	Location 1 - Location 12	1567	1578	19	803.100714
20	Polyline	Location 1 - Location 5	1567	1571	20	818.989189
21	Polyline	Location 1 - Location 159	1567	1725	21	822.508159
22	Polyline	Location 1 - Location 158	1567	1724	22	871.094253



شکل ۵. قسمتی از آنالیز تحلیل شبکه (ماتریس OD) جهت ایجاد فاصله شبکه‌ای نقاط از ایستگاه‌ها

۲-٤. بهینه‌سازی ایستگاه‌های کاندید با الگوریتم ژنتیک

همان طور که بیان شد، تعداد ۲۹۱ ایستگاه اتوبوس درون شهری در منطقه ٦ تهران با استفاده از نقشه‌های فاکتور ایجاد شده از توابع GIS و هم‌پوشانی آنها با روش ترکیب خطی وزنی، شناسایی گردید. همچنین، داده‌های نقاط جمعیتی (شکل ٦) به همراه نقاط مراکز جذب تجاری و ... در نرم‌افزار اکسل مرتب گردید (جدول ۲). خصوصیات جمعیت کل، افراد شاغل، محصلان زن و مرد، تعداد افرادی که محل کار و یا تحصیل آنها خارج از منطقه ٦ می‌باشد با تعداد طبقات مراکز جذب و ارزش DN به‌دست آمده از فرایند ANP برای هر ایستگاه به همراه ماتریس فواصل نقاط مورد نظر از کل ایستگاه‌ها در بهینه‌سازی ایستگاه‌های اتوبوس مورد استفاده قرار گرفت.



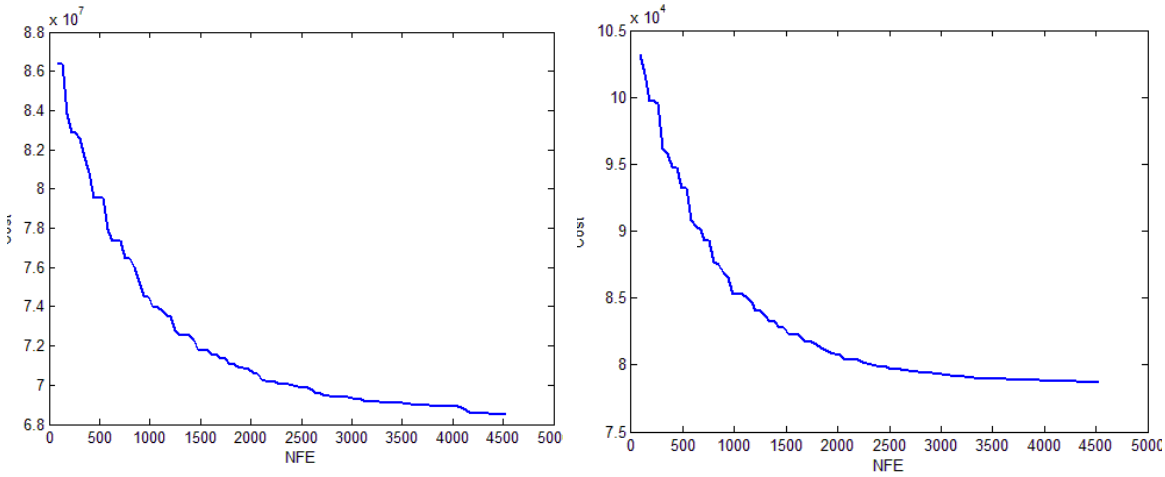
شکل ٦. الف) توزیع تراکم جمعیتی، ب) مناطق جذب (رنگ سبز) و مراکز بلوک جمعیتی (رنگ تیره) با شبکه راه‌های منطقه

جدول ۲. مشخصات تعدادی از داده‌های اعمال شده در بهینه‌سازی

جمعیت	طبقات تجاری	محصل	شاغل	محل کار	ارزش DN	انتخاب ایستگاه
۱٤۷	۸	۳۷	۳۳	۵	۰/۹٤٦	۱
۱۸	٤	۷	۲	۰	۰/۹۰۹	۱
۱۳	٤	۸	۱	۰	۰/۹۵٤	۱
۰	٤	۰	۰	۰	۰/۹٤٦	۱
٤٤	٤	۱۵	۷	۳	۰/۹۲۳	۱
۷٤	۵	۲۸	۱۱	۰	۰/۹۷۱	۰
۰	۹	۰	۰	۰	۰/۹۹۵	۰
٦٦	٦	۲٤	۱۲	۰	۰/۹۷۱	۰
۲۲	٤	۱۱	۲	۰	۱/۰۰۳	۰

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تعداد متغیرهای تصمیم (تعداد ایستگاه‌های بالقوه)	۲۹۱	نرخ تقاطع	۰/۸
بیشترین میزان تکرار	۵۰۰	نرخ جهش	۰/۰۳
اندازه جمعیت اولیه	۸۰	شرط توقف	عدم بهبود تا ۲۰۰ تکرار

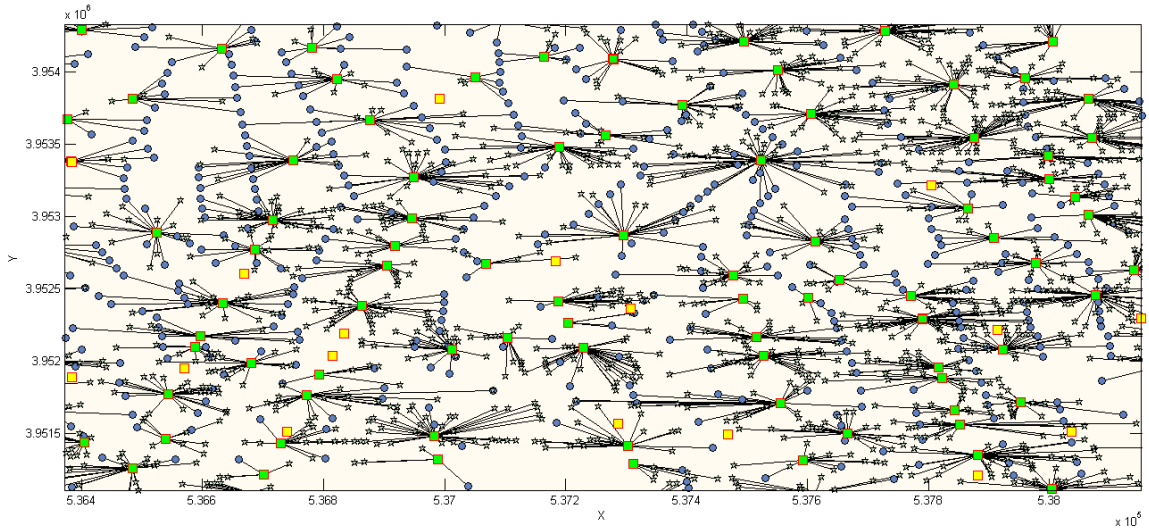


(الف) (ب)

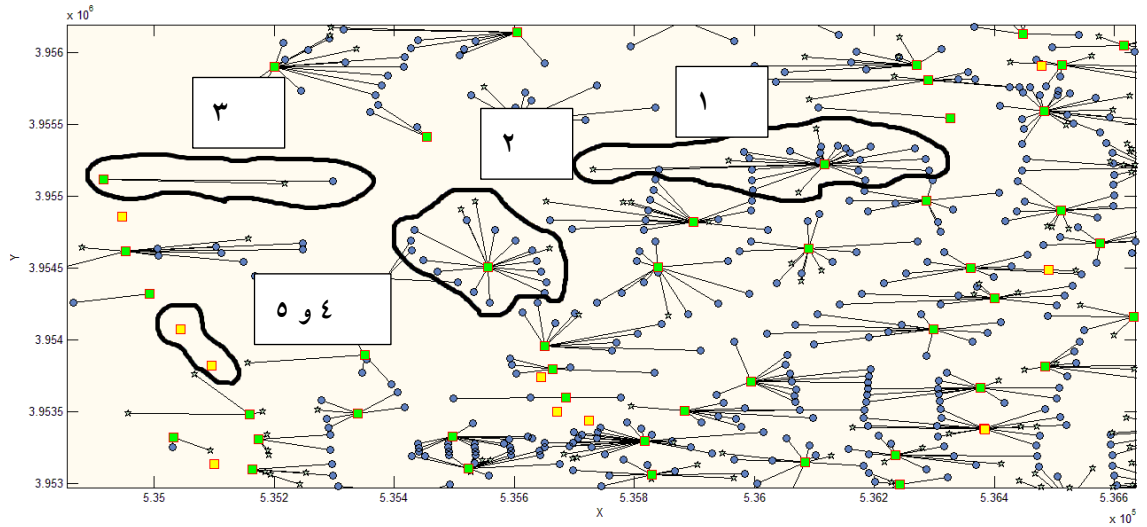
شکل ۷. نحوه کاهش میزان هزینه: الف) تعداد ۲۹۱ ایستگاه کاندید و ب) تعداد ۲۱۲ ایستگاه موجود (ماخذ: نتایج پژوهش)

الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی به نوعی طراحی شده است که تعداد ایستگاه‌های بالقوه را گرفته و تعدادی را به عنوان نقاط بهینه، با توجه به میزان تابع هدف و هزینه، انتخاب می‌کند. برای مثال، نتایج بهینه‌سازی، ۲۹۱ ایستگاه کاندید و ۲۱۲ ایستگاه موجود در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است که تعداد ۲۴۷ ایستگاه از ۲۹۱ ایستگاه کاندید به عنوان ایستگاه‌های منتخب تعیین شده‌اند که با رنگ سبز نشان داده شده‌اند و ٤٤ ایستگاه (رنگ زرد) حذف شدند. همچنین، میزان پوشش تقاضای هر ایستگاه با اختصاص نقاط جمعیتی (دایره آبی) و مراکز جذب (علامت ستاره) که با خطی به هر ایستگاه متصل شده‌اند، را نشان می‌دهد. همچنین، میزان پوشش و خدمات‌رسانی چند ایستگاه توسط دایره‌هایی در شکل ۹ مشخص شده است. برای مثال، ایستگاه شماره ۱ با تعداد ۱۵ بلوک جمعیتی و ۳ مرکز تجاری و ایستگاه ۲ تعداد ۱۳ بلوک جمعیتی و ۳ مرکز تجاری را خدمات‌رسانی می‌کنند. اما ایستگاه‌های شماره ٤ و ۵، هیچ تقاضایی اختصاص پیدا نکرده است و می‌توان آنها را از ایستگاه‌های کاندید حذف کرد تا بازده خدمات‌رسانی کل ایستگاه‌ها افزایش پیدا کند. همچنین، ایستگاه‌هایی از قبیل شماره ۳ (با دو بلوک جمعیتی) که میزان پوشش بسیار کمتری دارند را نیز در صورت صلاحدید می‌توان حذف نمود. شکل ۱۰- الف، موقعیت ایستگاه‌های فعال و غیرفعال بهینه‌سازی شده در ایستگاه‌های بالقوه و ایستگاه‌های موجود را در موقعیت واقعی آنها به همراه شبکه راه‌ها و زون‌های اول و دوم نشان می‌دهد. می‌توان گفت که در مناطق مرکزی و جنوبی شهری که مراکز جذب تجاری و درمانی و ... زیاد است، تعداد ایستگاه‌های بیشتر و با فواصل کمتر انتخاب شده‌اند. اما در مناطق شمال غربی که تمرکز خدمات و مراکز تجاری نسبت به سایر مناطق کمتر است، ایستگاه‌ها

کمتر و با فواصل بیشتر می‌باشند. مدل استفاده شده در این تحقیق توانسته است با تخصیص بلوک‌های جمعیتی و مراکز جذب تجاری و خدماتی به هر ایستگاه، از ایجاد ایستگاه‌هایی با کمترین پوشش خدمات‌رسانی جلوگیری کند. برای مثال، در شکل ۱۰- ب، ایستگاه‌های موجود در منطقه (۲۱۲ ایستگاه) به مدل ارائه شده است که از میان آنها، تعداد ۱۸۷ ایستگاه توسط الگوریتم ژنتیک به عنوان ایستگاه بهینه انتخاب شده‌اند.

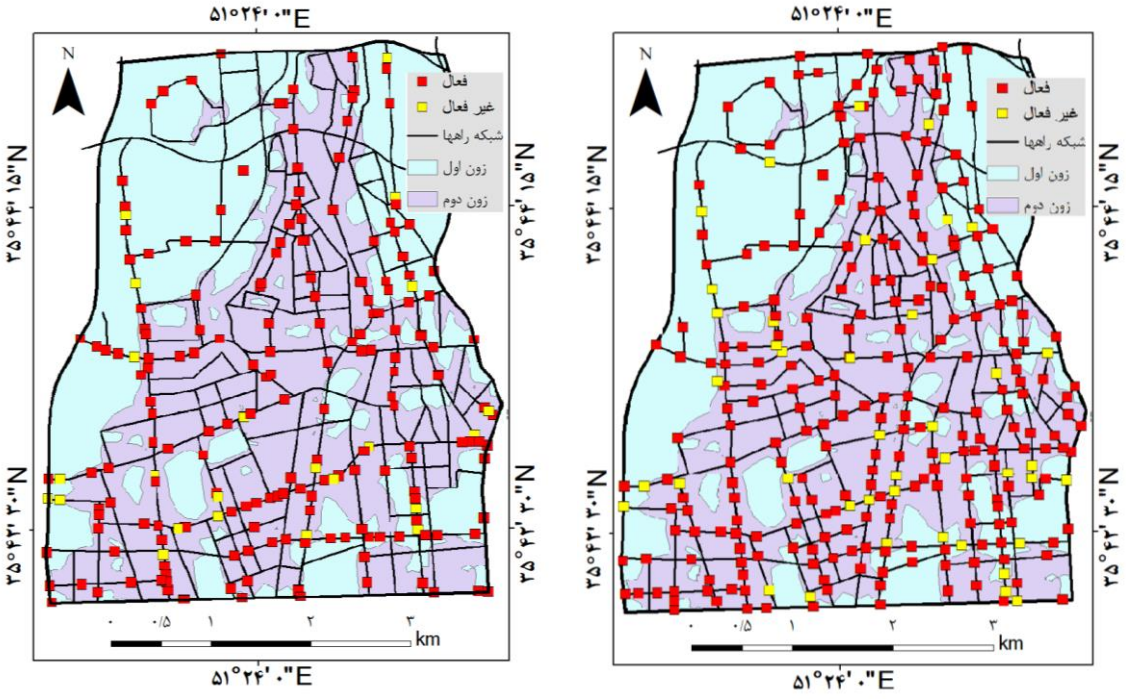


شکل ۸. بهینه‌سازی ایستگاه‌های بالقوه در قسمتی از زون دوم (فواصل کمتر ایستگاه‌ها)



شکل ۹. بهینه‌سازی ایستگاه‌های بالقوه در قسمتی از زون اول (فواصل بیشتر ایستگاه‌ها)

(نقاط سبز: ایستگاه‌های فعال، نقاط زرد: ایستگاه‌های غیرفعال، علامت ستاره: مناطق جذب تجاری، نقاط آبی: مناطق تقاضای جمعیتی)



(ب) (الف)

شکل ۱۰. موقعیت ایستگاه‌های فعال و غیرفعال بهینه‌سازی شده: الف) ایستگاه‌های بالقوه و ب) ایستگاه‌های موجود

۵. نتیجه‌گیری

از آنجا که عمده‌ترین قسمت سیستم حمل و نقل عمومی در کشورهای در حال توسعه را شبکه اتوبوس‌رانی شهری تشکیل می‌دهد، طراحی بهینه شبکه اتوبوس‌رانی با هدف بهبود وضعیت حمل و نقل عمومی از اهمیت فراوانی برخوردار است. لازم است ایستگاه‌ها در محل‌هایی تعبیه شوند که باعث افزایش این سیستم در مناطق مختلف شهر شود. در کنار این مسأله، احداث بی-رویه ایستگاه‌های اتوبوس موجب بالا رفتن تعداد دفعات توقف وسیله و در نتیجه باعث افزایش زمان سفر و کاهش سرعت این سیستم در معابر شهری می‌گردد. لذا، لازم است ایستگاه‌های سیستم اتوبوس‌رانی بر اساس چگونگی توزیع جمعیت و تنوع کاربری‌ها در مناطق مختلف شهری، طوری مکان‌یابی گردند که علاوه بر افزایش دسترسی کاربران به این سیستم، زمان سفر را نیز کاهش دهند. فاصله کم ایستگاه‌ها و در نتیجه تعداد زیاد آنها در طول مسیر، باعث کاهش تواتر اتوبوس‌ها و راحتی مسافرین خواهد شد. از طرفی، هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد، هزینه‌های سیستم (از لحاظ تجهیزات ایستگاه‌ها) افزایش یافته و سرعت عملیاتی اتوبوس‌ها کاهش پیدا می‌کند. در این تحقیق، سعی گردید تا مکان‌های مناسب جهت ایجاد ایستگاه‌های کاندید اتوبوس درون شهری در منطقه ٦ تهران با توابع GIS و تصمیم‌گیری تحلیل شبکه ANP، شناسایی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توابع هدف، اقدام به بهینه‌سازی ایستگاه‌های کاندید شد. نتایج نشان داد که با توجه به طول شبکه و استانداردهای فواصل ایستگاه‌ها، منطقه ٦ نیاز به ۳۰٦ تا ۲۰۸ ایستگاه دارد که از میان ۲۹۱ ایستگاه کاندید، ۲٤۷ ایستگاه و از ۲۱۲ ایستگاه موجود نیز ۱٤۷ ایستگاه بهینه تعیین شدند که می‌توانند میزان پوشش تقاضای مراکز جمعیتی و مراکز جاذب را به حداکثر برسانند. همچنین، مشخص گردید که الگوریتم ژنتیک می‌تواند قسمت بسیار کوچکی از فضای جستجو

یا جواب‌های ممکن را جستجو کند و به پاسخ برسد که با شاخص NFE این قضیه به اثبات رسید. در بهینه‌سازی، از میزان هزینه یا مجموع سه تابع هدف استفاده گردید، که بر طبق وزن هر کدام از این توابع، میزان هزینه کلی نیز متغیر خواهد بود. بنابراین، با توجه به هدف و سیاست کلی از تعیین ایستگاه‌های اتوبوس، می‌توان وزن هر تابع را تغییر داد. همچنین، پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک از قبیل تعداد جمعیت، نرخ تقاطع و جهش نیز می‌توانند متغیر باشند تا در نهایت به پاسخ مناسب دست یافت. نقطه قوت این نوع بهینه‌سازی در این است که مکان و موقعیت واقعی بلوک‌های جمعیتی و مراکز تجاری و خدماتی تحت پوشش ایستگاه‌های منتخب نیز قابل شناسایی هستند. برای مثال، برخی از ایستگاه‌ها تعداد زیاد و برخی نیز تعداد بسیار اندکی (یک بلوک) را می‌توانند تحت پوشش قرار دهند. بنابراین، در برخی از موارد می‌توان از ایستگاه‌هایی که کمترین پوشش خدماتی را دارند نیز صرف‌نظر کرد. البته، در این حالت نیز هرچند که موجب کاهش تعداد ایستگاه و سرعت خدمات‌رسانی می‌شود، اما برخی از بلوک‌های جمعیتی و تجاری به نحو مطلوب خدماتی‌رسانی را دریافت نخواهند کرد.

پیشنهاد می‌گردد علاوه بر الگوریتم ژنتیک، GIS و معیارهای کیفی موجود در تعیین سطح سرویس ایستگاه‌های اتوبوس، معیارهایی نظیر نزدیکی به تقاطع، عرض و تعداد خط‌های هر معبر، کاربری بدنه معبر در همسایگی ایستگاه اتوبوس و تراکم جمعیت در هر ناحیه (با وسعت کیلومتر مربع) نیز بررسی گردد که برای استفاده از این استانداردها می‌توان به آیین‌نامه TCRP Report 19 یا Transit Cooperative Research Program (TCRP) Report مراجعه و معیارهای موجود در آنها را نیز مد نظر قرار داد.

٦. مراجع

آقاجان زاده ح. و آقاجان زاده ن. ۱۳۸۸. "یافتن مسیر بهینه حرکت برای اتوبوس‌های درون شهری و بهترین محل برای احداث ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری به‌وسیله الگوریتم ژنتیک، دومین کنفرانس بین المللی شهر الکترونیک، پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات جهاد دانشگاهی، تهران.

امین ناصری، م. ر. و برادران، و. ۱۳۸۹. "بررسی عوامل مؤثر بر زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها و پیش بینی آن در سیستم حمل و نقل اتوبوسرانی شهر تهران". پژوهشنامه حمل و نقل، ۷(۱).

بونهام کارتر، گ. اف. ۱۳۷۹. "سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای دانش‌پژوهان علوم زمین (مدل‌سازی به کمک GIS)". گروه اطلاعات زمین‌مرجع، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

پورتال شهرداری منطقه شش تهران، http://region6.tehran.ir

زبردست، ا. ۱۳۸۰. "کاربرد فرایند تحلیل سلسله مراتبی در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای". هنرهای زیبا، ۱۰: ۱۳-۲۱.

شاهسونی، ج. ۱۳۹۱. "تحلیل مسیریابی و مکان‌یابی ایستگاه‌های متروهای شهری با استفاده از GIS، نمونه موردی: شهر اصفهان". دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی شهری.

صادقیه، ا. ۱۳۸٤. "تصمیم‌گیری بر اساس الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی". چاپ اول، مؤسسه نوین یزد.

عصارزادگان ح.، نادعلی، ا. ح.، عطایی، م. ص. و پورمیری، ر. ۱۳۹۱. "مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های BRT به کمک نرم‌افزار Arc GIS و تکنیک AHP و TOSIS. یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران.

علی عسگری، و. ۱۳۹۰. "مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های اتوبوس درون شهری". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

معاونت عمرانی دفتر حمل ونقل و دبیرخانه شورای عالی هماهنگی ترافیک شهرهای کشور. ۱۳۸٦. "راهنمای ایستگاه‌های سیستم اتوبوس‌رانی".

یزدان پناهی م. و ملکی، ک. ۱۳۹۰. "بررسی جایگاه حمل و نقل در توسعه اقتصادی پایدار شهری". اولین کنفرانس اقتصاد شهری ایران.

Ashtiani, H. Z. and Iravani, H. 2002. "Application of dwell time functions in transit assignment model". Transportation Research Record, J. Transport. Res. Board, 1817: 88-92.

Baaj, M. H. and Mahmassani, H. S. 1991. "An AI based approach for transit route system planning and design". J. Adv. Transport., 25(2): 187-210.

Fitzpatrick, K., Hall, K., Perkinson, D., Nowlin, L. and Koppa, R. 1996. "TCRP report 19: Guidelines for the location and design of bus stops". Transport. Res. Board of the Nat. Acad., Washington, DC.

Goodchild, M. F., Steyaert, L. T. and Parks, B. O. 1996. "GIS and environmental modeling: Progress and research issues". John Wiley and Sons.

Hall, C. H. 2006. "A framework for evaluation and design of an integrated public transportion". Institute of Technology, Linkopings University, Norrkping, Sweden.

Huang, Z. and Liu, X. 2014. "A hierarchical approach to optimizing bus stop distribution in large and fast developing cities". ISPRS Int. J. Geo-Inform., 3(2): 554-564.

Ibeas, Á., dell'Olio, L., Alonso, B., & Sainz, O. (2010). Optimizing bus stop spacing in urban areas. Transportation research part E: logistics and transportation review, 46(3), 446-458.

Lee, L. W. and Kim, S. H. 2000. "Using analytic network process and goal programming for interdependent information system project selection". Comp. Oper. Res, 27; 367-382.

Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation". McGraw-Hill, New York, 287 p.

Wei, X. 2010. "Optimizing bus stop locations in Wuhan, China". MSc. Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.

Zhu, Z., Guo, X., Chen, H., Zeng, J. and Wu, J. 2017. "Optimization of urban mini-bus stop spacing: A case study of Shanghai (China)". Tech. Gaz., 24(3): 949-955.