ارزیابی سطح مطلوبیت توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس در محیط GIS (مورد شناسی: شهر مراغه)

حسن محمودزاده * **(دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکدهٔ برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)**

زهرا فرج‌نژاد (کارشناسی ارشد مطالعات شهری و روستایی، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)

مهدی هریسچیان (دانشجوی دکترای جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)

تاریخ دریافت: ۲۳ اسفند ۱۳۹۸
تاریخ پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۹
صفحات: ۱۰۲-۷۳

کلید واژه‌ها:
حمل‌ونقل عمومی، شبکه‌راه‌ها، خطوط اتوبوس‌رانی، ایستگاه‌های اتوبوس، سیستم اطلاعات جغرافیایی، شهر مراغه.

چکیده

امروزه با گسترش شهرها و افزایش جمعیت شهری و به‌تناسب آن افزایش ترافیک معابر، مشکلات متعددی برای مردم در زمینهٔ طول و زمان سفرهای شهری به‌وجود آمده‌است. در این بین ساماندهی مناسب حمل‌ونقل عمومی ازجمله ایستگاه‌های اتوبوس می‌تواند نقش مهمی در کاهش طول و زمان سفرهای شهری ایفا کند. هدف این پژوهش، سنجش سطح مطلوبیت توزیع مکانی فعلی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه و در وهلهٔ بعد، تعیین مناسب‌ترین الگوی مطلوب توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه است که ازحیث هدف، کاربردی- عملی و از حیث ماهیت و روش، توصیفی- تحلیلی است. در این تحقیق، از مدل تاپسیس برای رتبه‌بندی شبکهٔ معابر ازنظر اولویت استقرار ایستگاه‌های اتوبوس و مکان‌های مناسب این ایستگاه‌ها و از مدل تحلیل شبکه نیز در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) درجهت مشخص‌کردن مسیرهای بهینه و محاسبهٔ طول و زمان مسیرها بر روی شبکه استفاده شد. از ده معیارِ فاصله از مراکز مسکونی، تجاری، اداری، آموزشی، فرهنگی، تفریحی و فضای سبز، بهداشتی و درمانی، فاصله از تقاطع، دسترسی و تراکم جمعیت استفاده شد که با روش ANP وزن‌دهی شدند. در این پژوهش، نتایج مدل تاپسیس نشان داد که ایستگاه‌های اتوبوس، شبکهٔ معابر را به‌صورت لازم پوشش نمی‌دهند و فاصلهٔ استاندارد آن‌ها از همدیگر رعایت نشده‌است. همچنین نتایج مدل تحلیل شبکه نیز نشان داد که از ۸ خط اتوبوس مراغه، ۵ خط در مسیرهای رفت و برگشت و ۲ خط در مسیر برگشت، تغییر کردند و مجموع طول مسیرهای خطوط اتوبوس‌رانی پس از اعمال الگوریتم ۵۷۲۴ متر و زمان لازم برای طی مسیرها ۲۰ دقیقه کاهش یافت. نهایتاً نقشهٔ نهایی الگوی مطلوب توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس نشان داد که قسمت‌های کوچکی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و فاز ۲، قسمت‌های زیادی از شهرک سهند و دارایی- طالب‌خان، مکان‌هایی کاملاً مطلوب و قسمت‌های زیادی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و قسمت کوچک‌تری از فاز ۲ در حدمطلوب بوده و بقیهٔ قسمت‌ها نیز به‌ترتیب دارای مطلوبیت متوسط و پایینی درجهت توزیع بهینهٔ مکانی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه هستند.

* نویسنده مسئول: دکتر حسن محمود زاده
پست الکترونیک: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

مقدمه

رشد سریع جمعیت شهری باعث بروز مشکلاتی در کشورهای درحال‌توسعه و توسعه‌یافته شده‌است (حدادی و شیرمحمدی، ۱۳۹۶: ۶۶). این مشکلات به‌صورت پراکندگی جمعیت و شلوغی زیرساخت‌های شهری خود را نشان می‌دهد که باعث ایجاد تراکم سنگین ترافیک وسایل نقلیه، آلاینده‌های زیست‌محیطی، کاهش رشد اقتصادی و کیفیت هوا می‌شوند (Adeleke et al, 2013: 447). در این بین یک شبکهٔ حمل‌ونقل شهری به‌طور مستقیم بر ترافیک معابر، آلودگی منابع طبیعی، زیبایی شهر و... تأثیرگذار است؛ این مورد به‌طور مستقیم زندگی روزمرهٔ هر شهروند را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. این تأثیرگذاری فقط محدود به شهروندانی نیست که از این سیستم برای مسافرت‌های درون‌شهری استفاده می‌کنند؛ بلکه زندگی روزمرهٔ سایر شهروندان را که از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی استفاده نمی‌کنند نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. درنهایت می‌توان گفت، سیستم حمل‌ونقل شهری تعیین‌کنندهٔ کیفیت نهایی زندگی شهری است (ساجدی‌نژاد و حسن نایبی، ۱۳۹۵: ۶۰). همچنین عدم‌ارائهٔ صحیح حمل‌ونقل عمومی می‌تواند فعالیت‌های روزانهٔ کلان‌شهرها را مختل کرده و تأثیرات اقتصادی مخربی بر جای بگذارد. هرچقدر که سیستم حمل‌ونقل شهری ناکارآمدتر باشد، تمایل افراد به استفاده از وسایل نقلیهٔ شخصی افزایش یافته و درنتیجه مدیریت امور شهری دشوارتر و در برخی موارد مختل می‌شود. به‌طور مشخصی ثابت شده‌است که گسترش حمل‌ونقل عمومی و استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقلی کارا و دارای قابلیت اطمینان کافی، موجب کاهش هزینه‌ها، توسعهٔ اقتصادی، افزایش نرخ اشتغال و افزایش کیفیت زندگی شهری خواهد شد (Shi et al, 2016: 515-526). سرویس‌های اتوبوس‌رانی، یکی از انواع حمل‌ونقل عمومی است که در کم‌کردن طول و زمان سفرهای درون‌شهری، حائز اهمیت است و دسترسی سریع و کم‌هزینه به آن‌ها اهمیت زیادی دارد (عمران‌زاده، ۱۳۸۹: ۳۲). ایستگاه‌های اتوبوس‌رانی به‌عنوان یکی از مکان‌های دسترسی مسافران به شبکهٔ حمل‌ونقل و یکی از اجزای مهم حمل‌ونقل شهری، لازم است در محل‌هایی تعبیه شوند که باعث افزایش پوشش این سیستم در مناطق مختلف شهر شوند. ایستگاه‌های حمل‌ونقل شهری (اتوبوس، تاکسی) براساس چگونگی توزیع جمعیت و تنوع کاربری‌ها در مناطق مختلف شهری، باید طوری مکان‌یابی شوند که علاوه‌بر افزایش دسترسی کاربران به این سیستم، زمان سفر را کاهش دهند (وارثی و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۷)؛ ازاین‌رو بهینه‌سازی خطوط اتوبوس‌رانی و تعیین مکان بهینهٔ ایستگاه اتوبوس یک استراتژی مهم است. بهینه‌کردن خطوط اتوبوس‌رانی باعث کاهش تردد در سطح شهر شده و سطح پوشش تقاضا افزایش پیدا خواهد کرد. درحالی‌که مکان‌یابی نامناسب ایستگاه‌های اتوبوس‌رانی باعث افزایش گره‌های ترافیکی و آلودگی‌های هوایی، صوتی و زیست‌محیطی خواهد شد؛ بنابراین با توجه به این امر ضروری است که با استفاده از سیستم‌های کارآمد و تکنولوژی‌های نوین به ارائهٔ این خدمات در سریع‌ترین زمان ممکن اقدام کرد. از فن‌آوری‌های نوینی که امروزه در مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل شهری برای رفع یا به‌حداقل‌رساندن معضلات حمل‌ونقل شهری کاربرد دارد، استفاده از GIS است. ازجمله کاربردهای متنوع GIS می‌توان به مکان‌یابی تأسیسات راه‌ها، مسیریابی بهینه، طراحی مسیر جاده‌ها، تهیهٔ پروفیل طولی جاده‌ها، تعیین میزان خاک‌ریزی و خاک‌برداری در مسیرهای پیشنهادی، مدل‌سازی داده‌های ترافیک، مدیریت بزرگراه‌ها و تحلیل تصادفات جاده‌ای اشاره کرد (رسولی، ۱۳۹۱: ۱۵۴).

شهر مراغه با ۱۷۵۲۵۵ نفر جمعیت که سازمان اتوبوس‌رانی آن در سال ۱۳۷۰ با خرید ۱۵ دستگاه اتوبوس شروع‌به‌کار کرد و درحال‌حاضر اتوبوس‌رانی مراغه شامل ۸ خط فعال شهری با ۷۵ دستگاه اتوبوس است. در شهر مراغه ازجمله خیابان‌هایی که به‌عنوان محورهای ترافیکی شناخته‌می‌شود، خیابان جام‌جم است که علی‌رغم طرح مسیر تردد ناوگان اتوبوس‌های درون‌شهری به‌طرف این خیابان فاقد برخی امکانات شهری نتوانسته است از ترافیک درون‌شهری بکاهد. تردد برخی اتوبوس‌ها در مسیر منتهی از میدان طلوع فجر به خیابان جام‌جم به‌دلیل تک‌بانده‌بودن آن و تردد خودروهای عمومی در کنار اتوبوس‌های درون‌شهری موجب ایجاد ترافیک در این شهر شده‌است. در شهر مراغه اتوبوس‌رانی یکی از مهم‌ترین وسایل حمل‌ونقل عمومی درون‌شهری محسوب می‌شود که به‌دلیل فقدان سیستم‌های پیشرفتهٔ حمل‌ونقل ازقبیل مترو، تراموا، قطار سبک شهری و مانند آن‌ها به‌تنهایی خیل عظیم مسافران درون‌شهری را جابه‌جا می‌کند. با توجه به تقاضای بیش‌ازحد مردم برای استفاده از خدمات اتوبوس‌رانی، سیستم اتوبوس‌رانی شهر مراغه با مشکلات مختلف به‌ویژه در زمینهٔ مکان‌یابی، فواصل، تجهیزات و تأسیسات ایستگاه‌ها مواجه شده‌است و از طرفی سیمای اصلی شبکهٔ شهری مراغه در وضع موجود، بیانگر یک سیستم شطرنجی است. در پهنهٔ مرکزی شهر مراغه با وجود اینکه شبکه‌های اصلی منظم بوده، از ساختار شبکهٔ شطرنجی برخوردار است؛ اما شبکه‌های داخلی بافت، فاقد هرگونه انتظامی بوده و به‌صورت ارگانیک با کوچه‌های طولانی و با پیچ‌وخم زیاد است. این ویژگی عمدتاً در درون حصار تاریخی که شامل بافت قدیمی است، وجود دارد که این مورد به دلیل عدم‌انطباق با نیازهای کنونی شهر مراغه موجب افزایش مشکلات حمل‌ونقلی شده‌است. ازطرف‌دیگر، گستردگی شبکهٔ خیابان‌ها، پراکنش نامناسب کاربری‌ها، ناکارآمدی سیستم تاکسی‌رانی، کرایه‌های بالا و از همه مهم‌تر مکان‌یابی نامناسب ایستگاه های اتوبوس رانی که موجبات ایجاد مشکلات متعدد حمل ونقل ازقبیل گره‌های ترافیکی و مشکلات منبعث از آن شده‌است؛ ازاین‌رو هدف تحقیق پیش‌رو این است که سطح مطلوبیت توزیع مکانی فعلی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه را مشخص کرده و در وهلهٔ بعد مناسب‌ترین الگوی مطلوب توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه را تعیین کند.

پیشینهٔ تحقیق

تحقیقات زیادی در مورد ارزیابی سطح مطلوبیت و کارآیی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در عرصه‌های داخلی و خارجی انجام شده است که در جدول ۱ به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

جدول ۱. پیشینهٔ تحقیق در رابطه با موضوع تحقیق

نویسندگان (سال)	موضوع	نتیجه
عصارزادگان و همکاران (۱۳۹۱)	مکان‌یابی بهینهٔ ایستگاه‌های BRT به کمک نرم‌افزار Arc GIS و تکنیک AHP و TOPSIS	بهینه‌سازی انتخاب ایستگاه‌های BRT، به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل عمومی و افزایش رضایت شهروندان و کاهش استفاده از خودروهای شخصی منجر می‌شود.
قهری و همکاران (۱۳۹۳)	ارزیابی موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسی براساس مدل AHP با استفاده از GIS (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ ۴ شهرداری)	بیشتر ایستگاه‌ها باید در قسمت جنوبی و مرکزی ایجاد شوند. همچنین به‌نظر می‌رسد ایستگاه‌های اتوبوس معابر شهری را به‌صورت لازم پوشش نمی‌دهد.
وارثی و همکاران (۱۳۹۴)	مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس با مدل ANP و منطق فازی در GIS	ایستگاه‌های اتوبوس موجود در مقایسه با فواصل استاندارد ایستگاه‌های پیشنهادی برخی از ایستگاه‌های موجود در شهر از

	(نمونهٔ موردی: شهر خرم‌آباد)	موقعیت مکانی مناسب برخوردار نبوده و نیازمند ساماندهی هستند.
ساجدی‌نژاد و حسن نایبی (۱۳۹۵)	طراحی سامانه‌های عملیاتی در سیستم اتوبوس‌رانی به‌منظور ساماندهی حمل‌ونقل مسافر درون‌شهری	به‌منظور جذب شهروندان به استفاده از این شیوهٔ حمل‌ونقل لازم است که به‌طور همزمان هم ازلحاظ کمّی و هم ازلحاظ کیفی، سامانه‌های اتوبوس‌رانی ارتقاء یابند.
رحیمی و حسینی (۱۳۹۷)	برنامه‌ریزی راهبردی توزیع فضایی ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی	در سفرهای انجام‌شده با اتوبوس، گروه‌های شغلی دانشجو با ۳۲ درصد سهم، خانه‌دار با ۲۳ درصد سهم، دانش‌آموز با ۱۹ درصد سهم، به‌ترتیب بیشترین تعداد مسافران سامانهٔ اتوبوس‌رانی را در میان گروه‌های مختلف شغلی داشته‌اند. راهبرد به‌دست‌آمده از نوع محافظه‌کارانه (حداکثر- حداقل) (WO) بوده و عمدهٔ تأکید اساسی آن بر استفادهٔ بهینه از امکانات موجود حمل‌ونقل عمومی در سطح شهر است.
جی و جائو[1] (۲۰۱۰)	سنجش رضایت مردم از حمل‌ونقل عمومی پکن	تعداد ایستگاه‌های اتوبوس در محدودهٔ ۸۰۰ متری، دسترسی‌پذیری به مکان‌های اصلی شهر با حمل‌ونقل همگانی و ویژگی‌های اجتماعی و اقتصادی، تأثیر مهمی بر رضایت مردم از خدمات حمل‌ونقل همگانی دارند.
ادوبلا و همکاران[2] (۲۰۱۲)	تجزیه‌وتحلیل مکان ایستگاه‌های اتوبوس با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در استان ایبادان در شمال‌غربی نیجریه	توجه کامل به مکان ایستگاه‌های اتوبوس تأثیر زیادی در ارتقاء سیستم حمل‌ونقل عمومی ازطریق افزایش دسترسی، ایمنی و اعتمادپذیری دارد.
یاتسکیو و بادیلویچ[3] (۲۰۱۷)	تجزیه‌وتحلیل جامع حمل‌ونقل عمومی چندمنظورهٔ برنامه‌ریزی‌شده HUB	برنامه‌ریزی حمل‌ونقل چندمنظوره باید با نهادها، شبکه‌ها، ایستگاه‌ها، اطلاعات کاربران و سیستم‌های پرداخت کرایه یکپارچه شده باشند؛ لازم است تمام تأثیرات مهم، ازجمله اثرات بلندمدت، غیرمستقیم و غیرتجاری مانند حقوق صاحبان سهام و تغییرات کاربری زمین مورد توجه قرار گیرد.
تبتی طلاملی و بونی[4] (۲۰۱۸)	حمل‌ونقل عمومی در الجزایر: به سوی رویکرد حکومتی جدید	در ۳۰ سال گذشته، شبکهٔ حمل‌ونقل عمومی در الجزایر با پیاده‌سازی تدریجی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری هدایت‌شده، گسترش یافته‌است. بااین‌حال، این سیستم‌های حمل‌ونقل تنها در صورتی می‌توانند مؤثر باشد که ساختار مدیریتی و فرایندهای حکومتی با نیازهای متغیّر همیشه درحال ظهور شهرهای بزرگ و نیازهای پویای درحال تکامل جمعیتی تقویت شده‌باشد. در حال حاضر، این تقویت به گسترش در فراسوی مرزهای فعلی اداری شهرستان نیاز دارد.
منویل و لوین[5] (۲۰۱۸)	چه چیزی باعث حمایت عموم از حمل‌ونقل عمومی می‌شود؟	دلایل رایج در میان مردم در حمایت از حمل‌ونقل عمومی استدلال‌های مدبّرانهٔ قوی درجهت حمایت از آن نیستند و یک استدلال مدبّرانهٔ قوی درجهت حمایت از آن، علاوه‌بر نادرست‌بودن، می‌تواند تلاش‌های سازمان‌یافته در رابطه با آن را نیز تضعیف کند.

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

1- Ji & GAO
2- Adebola et al
3- Yatskiv & Budilovich
4- Tabti-Talamali & Baouni
5- Manville & Levine

بررسی مطالعات صورت‌گرفته در مورد مکان‌یابی بهینهٔ ایستگاه‌های اتوبوس در پژوهش‌های داخلی و خارجی مشخص می‌سازد که مکان‌یابی بهینهٔ این ایستگاه‌ها در افزایش استفاده از حمل‌ونقل عمومی و ارتقای آن، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل عمومی، افزایش رضایت شهروندان و کاهش استفاده از خودروهای شخصی درجهت کاهش معضلات عدیدهٔ حمل‌ونقل شهری نقش ارزنده‌ای ایفا می‌کند. این پژوهش نیز به سنجش سطح مطلوبیت توزیع مکانی فعلی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه و مناسب‌ترین الگوی توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس مراغه می‌پردازد. علی‌رغم شباهتی که این پژوهش با پژوهش‌های دیگر دارد، تفاوت این پژوهش با سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این است که تحقیقات دیگر یا از روش‌های GIS, AHP, ANP, TOPSIS به تنهایی یا توأمان استفاده می‌کردند؛ ولی در اینجا علاوه‌بر استفاده از GIS و TOPSIS از آنالیز شبکه هم در محیط GIS استفاده شده‌است.

مبانی نظری

سامانهٔ حمل‌ونقل عمومی به سامانه‌ای اطلاق می‌شود که برای عموم جامعه، به‌صورت انبوه یا گروهی و حتی انفرادی، از سوی دولت‌های محلی، شرکت‌های خصوصی یا سرمایهٔ فردی، طراحی و به‌کار گرفته می‌شود (موسوی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۶۱). حمل‌ونقل عمومی شهری باعث تحرک مردم در شهرها و در بسیاری موارد در مناطق حومه‌ای نیز می‌شود(Teodorovic & Janic, 2016: 390). حمل‌ونقل عمومی در سال ۲۰۱۵، تعداد ۱۰/۵۹ میلیارد مسافر تفکیک‌شده را در اختیار داشت که تعداد مسافران در سال ۲۰۱۴ که بالغبر ۱۰/۷۵ میلیارد بود، ۱/۴ درصد از میزان اخیر خود بیشتر است. در این بین تعداد مسافران اتوبوس نیز از ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ به میزان ۱/۴ درصد و از سال ۲۰۰۰ به بعد به میزان ۸ درصد کاهش پیدا کرده‌است. بااین‌وجود، از اوایل دههٔ ۱۹۷۰، حمل‌ونقل عمومی نشان‌دهندهٔ رشد طولانی‌مدت در میزان مسافران است که ۴۴ درصد بیشتر از تعداد مسافران در سال ۲۰۱۵ است. روند روبه‌رشد حمل‌ونقل عمومی همچنان بالاتر از رشد جمعیت است (۳۱ درصد در برابر ۲۰ درصد) (Hughes–Cromwick, 2018: 7-10).

حمل‌ونقل ترانزیت شهری نقش مهمی در پایداری اقتصاد، محیط زیست و حتی کل جامعه دارد؛ زیرا به بهبود کارایی راندمان ترافیکی کمک می‌کند و به‌طور مؤثری تضاد بین ترافیک موجود و تقاضای آن را کاهش می‌دهد (Ibarra-Rojas et al, 2015: 38-75; Dou et al, 2014: 420-431). به‌ویژه که ساختارهای مناسب شبکه‌ای در کاهش تراکم‌های جاده‌ای، مشکلات مسافرتی و زیست‌محیطی مرتبط مانند آلودگی هوایی و صوتی نقش دارند (Xu et al, 2016: 1084-1098; Farahani et al, 2013: 281-302). با کاهش تراکم ترافیکی، می‌توان مقدار زیادی انرژی و منابع تجدیدناپذیر را ذخیره کرد و از تصادفات ترافیکی، مرگ‌ومیر و صدمات ناشی از آن، ضایعات مستقیم و غیرمستقیم اقتصادی جلوگیری کرد (Pternea et al, 2015: 276-291; Xiao et al, 2015: 9140-9159). اگرچه سهم حمل‌ونقل ترانزیت شهری در افزایش میزان پایداری قابل‌توجه است؛ اما ساختار جامع سیستم حمل‌ونقل عمومی در بسیاری از شهرها به‌طور جدی دچار عقب‌ماندگی است (Mo et al, 2015: 1782-327; Yu et al, 2015: 310-1785). مخصوصاً، با افزایش تعداد اتومبیل‌های شخصی، نسبت حمل‌ونقل ترانزیتی کاهش یافته‌است و با حالت‌های دیگر با استفاده کمتر از منابع جایگزین شده‌است که منجر به افزایش زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی و پایین‌آمدن سطح خدمات مرتبط با آن شده‌است (Jia et al, 2019: 1).

شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی را در یک تقسیم‌بندی می‌توان به شبکه‌های پیچیده و ساده تقسیم‌بندی کرد. منظور از شبکه‌های ساده، ایجاد یک شبکهٔ ساده با تناوب بالاست. ساختار خطوط شبکه می‌تواند به میزان قابل‌توجهی بر بهره‌وری و جذابیت سیستم حمل‌ونقل عمومی تأثیر بگذارد. برای دستیابی به شبکهٔ ساده اما کارآمد و جذاب باید اصولی مدنظر قرار گیرد: ۱- عملکرد سریع و دقیق با بالاترین سرعت ممکن در خدمات‌دهی یک عامل کلیدی است. ۲- سرعت عملیاتی تعیین‌کنندهٔ بهره‌وری هزینه و جذابیت سیستم حمل‌ونقل عمومی است. ۳- یک سیستم با کیفیت بالا نمی‌تواند در این نوع از خدمات‌دهی توافقات بسیاری ایجاد کند. ۴- وقتی مسیرهای سریع و قابل‌اطمینان در سراسر شهر برقرار شود، شبکه باید با تعداد کم، خطوط مداوم و پرتناوب توسعه یابد. به‌طورکلی، در این گونه موارد خطوط آونگی یا پاندولی باید دارای اولویت باشد. این خطوط فرصت‌های بیشتری در رابطه با سفرهای مستقیم ایجاد می‌کنند و به‌طور معمول نیز از ظرفیت حمل‌ونقل ارائه‌شده بهتر استفاده می‌کنند؛ اما آن‌ها نیاز به سطح بالایی از اولویت‌دهی در مسیر دارند. اصل آونگ نه‌تنها در رابطه با مرکز شهر بلکه در ارتباط با قسمت‌های دیگر داخلی شهر نیز قابل‌اجراست. همچنین باید به‌طور معمول در مراکز حومه و خطوط تغذیه‌کنندهٔ ایستگاه‌های راه‌آهن و سایر تبادلات حمل‌ونقل عمومی در قسمت‌های بیرونی شهر اعمال شود. با استفاده از عملیات قوی و بدون اختلال، همگام‌سازی جدول زمانی خطوط مختلف که در همان مسیر حرکت می‌کنند نیز امکان‌پذیر خواهد بود. این مورد می‌تواند بخشی از شبکه را با خدمات پیشنهادی با تناوب بالا «زمان‌بندی تخصیص‌داده‌شده» بسط دهد (Nielsen et al, 2005: 13). شبکهٔ حمل‌ونقل عمومی شهری را می‌توان به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین سیستم‌های حمل‌ونقل شهری و محیط اجتماعی و اقتصادی مورد بررسی قرار داد (Jia et al, 2019: 2).

شبکه‌های حمل‌ونقل ترانزیتی شهری موجود ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده را ارائه می‌دهند. نظریه شبکهٔ پیچیده، روشی مطلوب برای مطالعهٔ سیستم‌های پیچیده است. این نوع شبکه بر ماهیت توپولوژیکی معماری سیستم تأکید دارد. شبکه‌های پیچیده یک رویکرد نظری برای مطالعهٔ پیچیدگی ارائه می‌دهند (Li & Han, 2017: 910-913; Zhang et al, 2018: 1-36).

نظریهٔ شبکه‌های پیچیده مبتنی‌بر دانش چندرشته‌ای می‌تواند در بررسی‌های مربوط به پیچیدگی شبکه‌های حمل‌ونقل ترانزیتی شهری مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین در آن پیچیدگی فضایی- زمانی و مکانیسم تکاملی شبکه می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. شبکه‌های پیچیده، ویژگی‌های توپولوژیکی ساختار سیستم را برجسته می‌کنند. ازآنجاکه خصوصیات هندسی سیستم‌های پیچیده نقش اصلی در پویایی تحرکات شبکه دارد، حمل‌ونقل عمومی را می‌توان با جریان ترافیک در شبکه‌های پیچیده شامل خطوط اتوبوس و ایستگاه‌های کوتاه توصیف کرد (Wang & Fu, 2017:1-5 ; Carro-Perez & Gonzalez-Hernandez, 2016: 113-117).

سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در حالت کلی به دو بخش ترانزیت و پاراترانزیت تقسیم می‌شوند. سیستم ترانزیت عبارت است از سیستمی که دارای مبدأ و مقصد معیّن است و در زمان معیّن به جابه‌جایی مسافران می‌پردازد. اتوبوس‌های منظم -اتوبوس‌هایی که در طول مسیرهای ثابت براساس جدول زمانی ثابت کار می‌کنند-، اتوبوس‌های سریع‌السیر -اتوبوس‌هایی که در زمرهٔ سیستم حمل‌ونقل نیمه‌سریع قرار دارند-، قطار سبک شهری، تراموا، مونوریل، سیستم‌های عمومی سریع ریلی در این قسمت قرار می‌گیرند و سیستم پاراترانزیت برخلاف سیستم ترانزیت دارای مبدأ و مقصد ثابت و مشخص نیست و همچنین زمان

جابه‌جایی مسافران این سیستم نیز ثابت و ازپیش‌تعیین‌شده نیست. انواع متنوع حمل‌ونقل پاراترانزیت عبارت‌اند از: تاکسی، تاکسی گردشی دربستی، تاکسی تلفنی، تاکسی فرودگاه، تاکسی خطی، تاکسی ساعت اوج، ون، مسافرکش‌ها، اتوبوس‌های اجاره‌ای، خودرو اشتراکی، ون‌های اشتراکی، مینی‌بوس‌ها (خدایی، ۱۳۹۵: ۱۵-۱۶) (شکل ۱).

شکل ۱. ویژگی‌های مکانی و زمانی گزینه‌های حمل‌ونقل شهری

(منبع: Gray & Hoel, 1979)

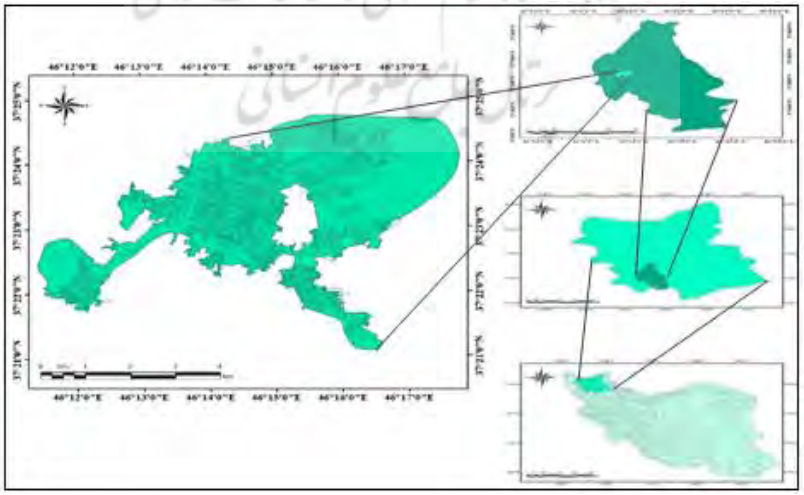
امروزه اتوبوس مهم‌ترین وسیلهٔ حمل‌ونقل عمومی در اکثر شهرهای کشورمان و همچنین بیشتر کشورهای درحال‌توسعه به‌شمار می‌آید و یکی از متداول‌ترین روش‌های حمل‌ونقل عمومی است که از جایگاه ویژه‌ای در میان روش‌های حمل‌ونقل برخوردار است. اتوبوس ازجمله وسائط حمل‌ونقلی است که به‌صورت‌کامل در ترافیک خیابان‌های شهر فعالیت می‌کند. سرویس‌های اتوبوس که در حومهٔ شهرها و شهرهای مرکزی فعالیت می‌کند، به‌طور متوسط ۱۲/۱ مایل در ساعت کار می‌کنند و حالت‌های دیگری که اتوبوس‌ها در آن با سرعت‌های پایین‌تر فعالیت می‌کنند، زمانی است که آن‌ها در مناطق متراکم به‌صورت مکرر توقف می‌کنند. ازآنجاکه مسافران اتوبوس، مسافرت‌های کوتاه‌تر را با آن انجام می‌دهند و اتوبوس‌ها نیز در سرعت‌های پایین‌تر نسبت‌به سایر سرعت‌ها کار می‌کنند، کمتر از دوپنجم تمام مایل‌های مسافران حرکت می‌کنند (Hughes–Cromwick, 2018: 12).

ساماندهی مناسب سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی می‌تواند نقش فزاینده‌ای در جابه‌جایی مسافران ایفا کند و هم می‌تواند نقش مهمی در کاهش ترافیک و کاهش آلودگی هوا در بسیاری از شهرهای جهان داشته باشد (Teodorovic & Janic, 2016: 391)؛ ازاین‌رو در مکان‌یابی و طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی باید طوری عمل کرد که درصد بیشتری از متقاضیان را پوشش داده و همچنین محدودهٔ پوشش اتوبوس‌ها و تعریف برنامه‌های اتوبوس، باید مناطق شهری تحت‌پوشش، منافع مسافران، منافع گردانندگان، تعداد وسایل نقلیهٔ موجود، میزان بار رانندگان و مقررات کاری، بودجه‌های موجود و غیره را درنظر گرفت (Ibid, 2017: 388).

مواد و روش‌ها

محدودهٔ مورد مطالعه

شهر مراغه به وسعت تقریبی ۲۶۴۷ هکتار در امتداد رودخانهٔ صوفی‌چای و در دامنه‌های جنوبی کوه سهند در ۳۷ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و در ۴۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه طول جغرافیایی واقع‌شده‌است. این شهر از شمال به شهرستان تبریز و از جنوب به استان آذربایجان غربی محدود می‌شود. از شرق شهرستان‌های بستان‌آباد، هشترود و چاراویماق و از غرب شهرستان‌های اسکو، عجب‌شیر، بناب و ملکان آن را محدود می‌سازند. اختلاف ارتفاع نسبی حدود ۸۰۰ متر بین پست‌ترین تا بلندترین نقاط در حریم شهر نشان‌دهندهٔ کوهستانی‌بودن منطقه و تأثیرات توپوگرافی بر اوضاع جغرافیایی شهر است (شکل ۲). شهر مراغه براساس اطلاعات سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵ برابربا ۱۷۵۲۵۵ نفر جمعیت داشته‌است. سیمای اصلی شبکهٔ شهری مراغه در وضع موجود بیانگر یک سیستم شطرنجی است. سیستم شطرنجی سیستمی است غیرمرکزی که تعداد زیادی گره یا تقاطع در آن وجود دارد. اکثر نقاط توسط شبکه پوشش داده شده و توسعهٔ شبکه به هر سمت و به‌طور نامحدود به‌صورت نظری امکان‌پذیر است. در مناطق مرکزی یا تجاری مسیرهای فراوانی برای تردد وجود خواهد داشت. در پهنهٔ مرکزی شهر با وجود اینکه شبکه‌های اصلی منظم بوده، از ساختار شبکهٔ شطرنجی برخوردار است؛ اما شبکه‌های داخلی بافت فاقد هر گونه انتظامی بوده و به‌صورت ارگانیک با کوچه‌های طولانی و با پیچ‌وخم زیاد هستند. این ویژگی عمدتاً در درون حصار تاریخی که شامل بافت قدیمی است، وجود دارد. شبکه‌ها در توسعه‌های بعدی و جدید عمدتاً طراحی شده و دارای بافت منظم هستند، بر این اساس مشکلات و تنگناهای ترافیکی نیز در آن‌ها وجود ندارد. اتوبوس‌رانی شهر مراغه در سال ۱۳۷۰ با خرید ۱۵ دستگاه اتوبوس شروع‌به‌کار کرد. درحال‌حاضر اتوبوس رانی مراغه شامل ۸ خط فعال شهری با ۷۵ دستگاه اتوبوس است. دسترسی‌های شهر مراغه به‌ترتیب شامل شریانی درجهٔ یک، شریانی درجهٔ ۲ اصلی و فرعی و دسترسی محلی اصلی و فرعی است.



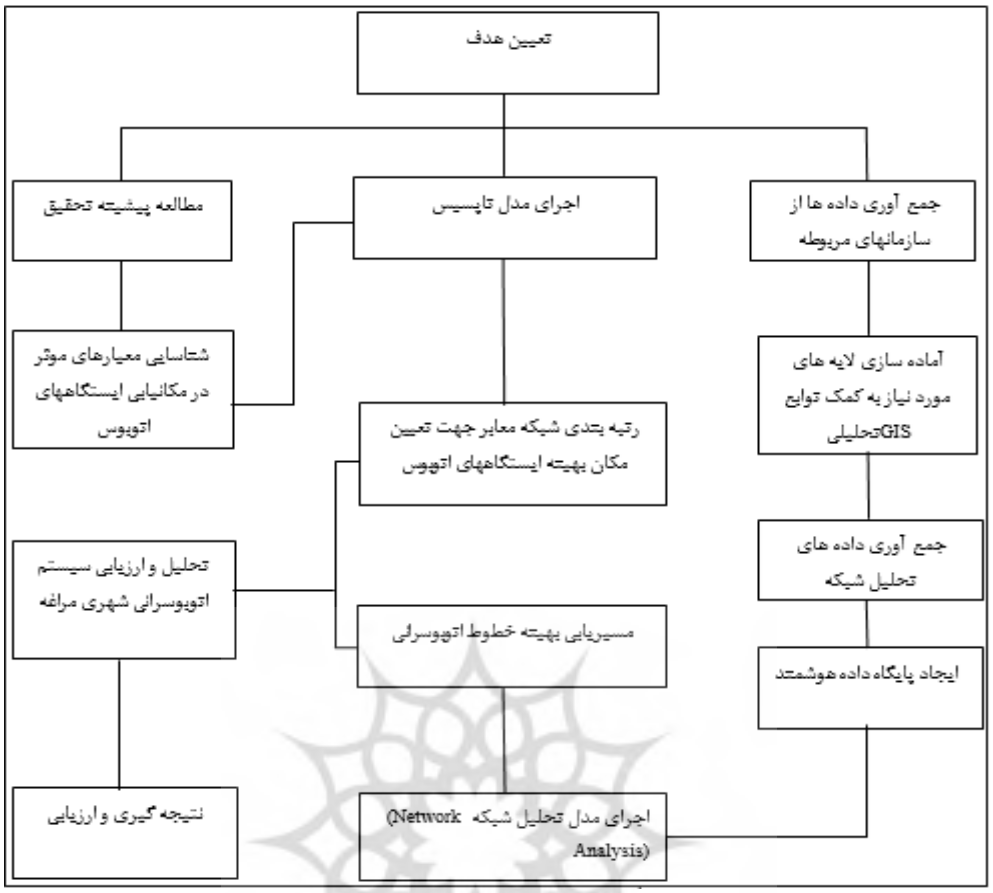
شکل ۲. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

ابزارهای پژوهش و معرفی معیارها

پژوهش حاضر از حیث هدف، کاربردی- عملی و از حیث ماهیت و روش، توصیفی- تحلیلی است. اطلاعات موردنیاز با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، اسنادی، بررسی‌ها و مشاهده‌های میدانی، جمع‌آوری شد. در این پژوهش ابتدا موضوع و مسئلهٔ موردنظر، مورد شناسایی قرار گرفته و ابعاد آن بررسی شد. نخستین گام در این جهت ایجاد یک پایگاه داده برای شبکه‌راه‌ها و سپس رفع خطاهای موجود در داده‌ها است. بدین منظور ابتدا ارزیابی کمّی و کیفی از مسیرهای اتوبوس‌رانی و ایستگاه‌های اتوبوس شهری مراغه انجام شد. در این بخش با استفاده از مطالعات میدانی، پژوهش‌ها و مبانی نظری موجود در رابطه با موضوع تحقیق، مراجعه به سازمان‌های اتوبوس‌رانی و شهرداری و مصاحبه با کارشناسان و متخصصان امر، معیارهای مؤثر در رابطه با موضوع پژوهش (فاصله از مراکز مسکونی، آموزشی، فرهنگی، تجاری، اداری، تفریحی و فضای سبز، مراکز بهداشتی و درمانی، فاصله از تقاطع، دسترسی و تراکم جمعیت) شناسایی شد (جداول ۲ و ۳). سپس پرسشنامه‌ای در این رابطه طراحی شد و در اختیار صاحب‌نظران و کارشناسان امر قرار گرفت.

در ادامه معیارها برحسب میزان اهمیت و ارزشی که برای حمل‌ونقل شهری دارند، توسط مدل ANP وزن‌دهی شد. درنهایت با مشخص‌شدن وزن معیارها با واردکردن فرمول CLi مدل تاپسیس اجرا و رتبه‌بندی خیابان‌های شهری و پهنه‌های مناسب درجهت احداث ایستگاه‌های اتوبوس شناسایی و مشخص شدند. در ادامه برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از مدل تحلیل شبکه در نرم‌افزار GIS استفاده شد. برای اجرای این مدل ابتدا لایه شبکهٔ معابر شهری مراغه و موقعیت ایستگاه‌های مبدأ و مقصد هر خط تهیه شد. بعد از آماده‌سازی و به‌روزرسانی لایهٔ شبکه معابر و رفع خطاهای توپولوژیکی و غیرتوپولوژیکی و اصلاح آن‌ها، پایگاه دادهٔ هوشمند درجهت انجام تحلیل‌های شبکه در محیط GIS ایجاد شد. بعد از ایجاد شبکه و اضافه‌کردن ایستگاه‌های مبدأ و مقصد و درنظرگرفتن رتبه‌بندی شبکهٔ معابر حاصل از مدل تاپسیس و واردکردن بعضی از ایستگاه‌های اتوبوس مراغه در مکان‌هایی با رتبهٔ بالا، مسیرهای اتوبوس شهری با مدل کوتاه‌ترین مسیر مدل‌سازی و مسیرهای بهینه با درنظرگرفتن معیارهای طول و زمان مشخص شد. شکل ۳ فرایند انجام تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل۳. فرایند انجام تحقیق

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

جدول ۲. داده‌های مورداستفاده

ردیف	داده	منبع	کاربرد
۱	شبکهٔ معابر شهر مراغه	شهرداری مراغه و داده‌های OSM[1]	تحلیل شبکه
۲	کاربری اراضی شهر مراغه	شهرداری مراغه	مدل تاپسیس
۳	موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس‌رانی	سازمان اتوبوس‌رانی	مدل تاپسیس
۴	خطوط اتوبوس‌رانی	سازمان اتوبوس‌رانی	تحلیل شبکه
۵	طرح جامع شهر مراغه	شهرداری مراغه	تحلیل شبکه و مدل تاپسیس

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

جدول ۳. معیارهای مورداستفاده در مدل تاپسیس

فاصله از مراکز مسکونی	کد امتیاز حالت کاهشی	فاصله از مراکز آموزشی	کد امتیاز حالت کاهشی
۰ -۳۰۰	۴	۰ -۳۰۰	۴
۳۰۰ -۵۰۰	۳	۳۰۰ -۵۰۰	۳
۵۰۰ -۸۰۰	۲	۵۰۰ -۸۰۰	۲
>۸۰۰	۱	>۸۰۰	۱

1- Open Street Map

فاصله از مراکز فرهنگی	کد امتیاز حالت کاهشی	فاصله از مراکز تجاری	کد امتیاز حالت کاهشی
۰ -۳۰۰	۴	۰ -۳۰۰	۴
۳۰۰ -۵۰۰	۳	۳۰۰ -۵۰۰	۳
۵۰۰ -۸۰۰	۲	۵۰۰ -۸۰۰	۲
>۸۰۰	۱	>۸۰۰	۱
فاصله از مراکز اداری	کد امتیاز حالت کاهشی	فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	کد امتیاز حالت کاهشی
۰ -۳۰۰	۴	۰ -۳۰۰	۴
۳۰۰ -۵۰۰	۳	۳۰۰ -۵۰۰	۳
۵۰۰ -۸۰۰	۲	۵۰۰ -۸۰۰	۲
>۸۰۰	۱	>۸۰۰	۱
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	کد امتیاز حالت کاهشی	فاصله از تقاطع	کد امتیاز حالت کاهشی
۰ -۳۰۰	۴	۰ -۷۰	۴
۳۰۰ -۵۰۰	۳	۷۰ -۲۰۰	۳
۵۰۰ -۸۰۰	۲	۲۰۰ -۳۵۰	۲
>۸۰۰	۱	> ۳۵۰	۱
دسترسی	کد امتیاز حالت کاهشی	تراکم جمعیت	کد امتیاز حالت افزایشی
شریانی درجه ۲ اصلی	۴	کم	۱
شریانی درجه یک	۳	متوسط	۲
شریانی درجه ۲ فرعی	۲	متراکم	۳
محلی اصلی	۱	خیلی‌متراکم	۴

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

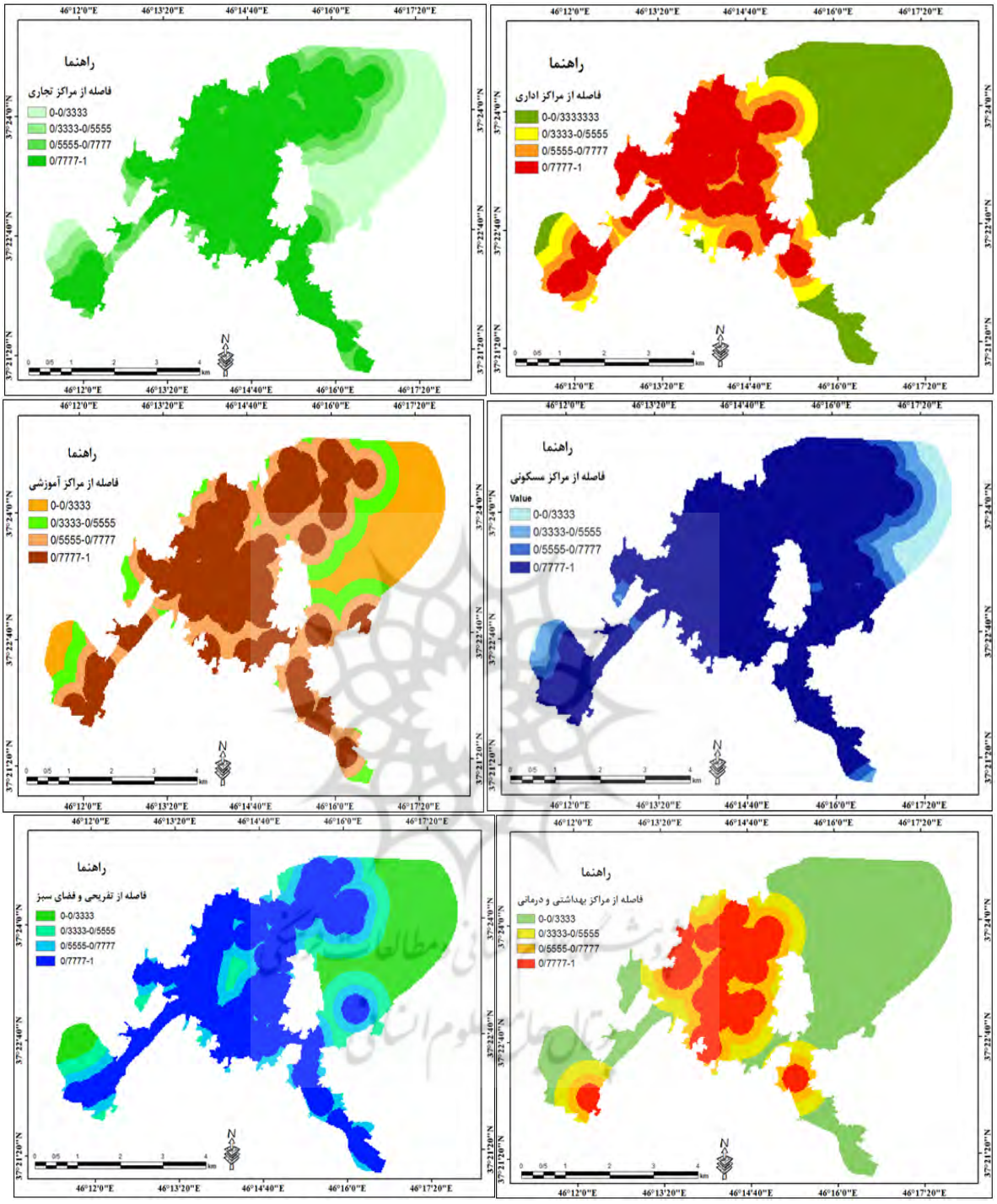
بحث و یافته‌ها

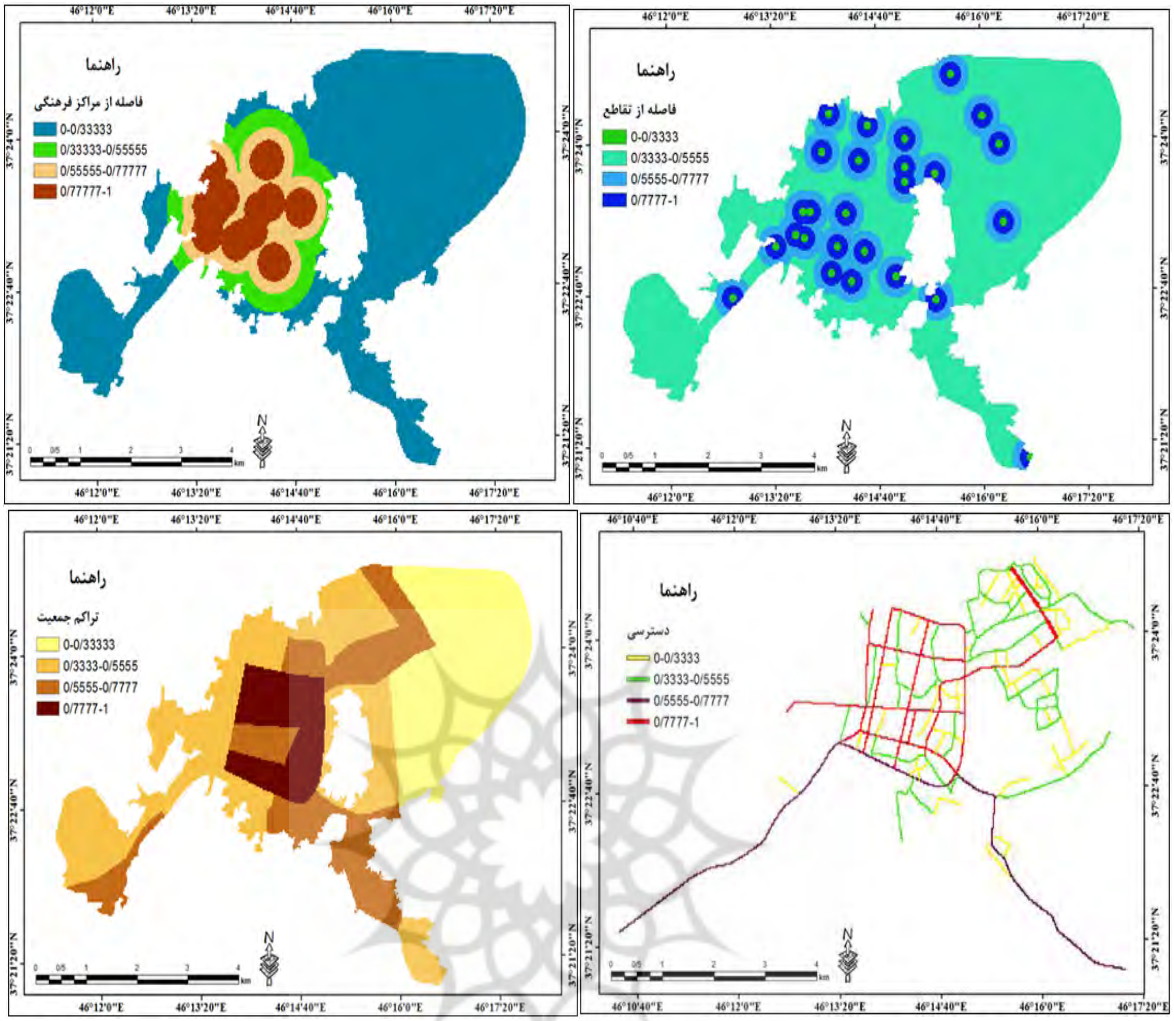
در این پژوهش مراحل زیر طی شد:

تجزیه‌وتحلیل با تاپسیس

استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

برای انجام مدل تاپسیس در ابتدا باید لایه‌ها بی‌مقیاس یا استاندارد شود که در این پژوهش برای بی‌مقیاس‌سازی از روش تبدیل مقیاس خطی استفاده شد. بدین منظور برای استانداردکردن هر یک از لایه‌ها، فرمول‌های مقیاس خطی با توجه به نوع معیار (خوب یا بد) در محیط Raster Calculator نرم‌افزار GIS بر روی هر یک از لایه‌ها اجرا شد (شکل ۴ تا ۱۳).


راهنما
فاصله از مراکز تجاری
0-0/3333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1
راهنما
فاصله از مراکز اداری
0-0/3333333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1
راهنما
فاصله از مراکز آموزشی
0-0/3333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1
راهنما
فاصله از مراکز مسکونی
Value
0-0/3333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1
راهنما
فاصله از تفریحی و فضای سبز
0-0/3333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1
راهنما
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی
0-0/3333
0/3333-0/5555
0/5555-0/7777
0/7777-1



شکل ۴ تا ۱۳. به‌ترتیب نقشهٔ فاصله از مراکز تجاری، فاصله از مراکز اداری، فاصله از مراکز آموزشی، فاصله از مراکز مسکونی، فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز، فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی، فاصله از مراکز فرهنگی، فاصله از تقاطع، تراکم جمعیت و نوع شبکهٔ ارتباطی (دسترسی) (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری و وزن‌دهی

بدین‌منظور عوامل مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس تعیین و نقشه‌های معیار تهیه و آماده‌سازی شد. پس از شناسایی و تعیین معیارها و زیرمعیارها و تهیه نقشه اولیه معیارها و استانداردسازی لایه‌ها، در این مرحله معیارها و زیرمعیارها برحسب میزان اهمیت و ارزشی که برای حمل‌ونقل شهری دارند، ارزشیابی می‌شوند. در ادامه برای وزن‌دهی معیارها، پرسش‌نامه‌هایی طراحی شد و در اختیار صاحب‌نظران قرار گرفت. با توجه به اینکه روش تاپسیس یک ابزار قدرتمند و عملی برای انتخاب و رتبه‌بندی آلترناتیوهای مختلف است، پس از جمع‌آوری نظرات کارشناسان، وزن‌دهی معیارها ازطریق روش تحلیل شبکه (ANP) و نرم‌افزار Export choice انجام گرفت. فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است و در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی طراحی شده و شبکه را جایگزین بر سلسله‌مراتب کرده‌است (Chung et al, 2005: 22; Dyson, 2004: 636). ساعتی برای حل مسائل با

معیارها و آلترناتیوهای وابسته‌به‌هم مدل تحلیل شبکه‌ای را ارائه کرده‌است (Lee & Kim, 2000: 374). رویکرد بازخوردی ANP ساختار شبکه‌ای را با ساختار سلسله‌مراتبی جایگزین کرده‌است و حاکی از آن است که روابط بین سطوح مختلف تصمیم‌گیری را نمی‌توان به‌سادگی بالا-پایین، غالب-مغلوب یا مستقیم-غیرمستقیم تصوّر کرد؛ برای نمونه می توان گفت نه‌تنها اهمیت بین معیارها مشخص‌کنندهٔ اهمیت بین گزینه‌ها در سلسله‌مراتب است، بلکه اهمیت گزینه‌ها نیز ممکن است در اهمیت بین معیارها تأثیرگذار باشد؛ بنابراین ارائهٔ ساختار سلسله‌مراتبی با روابط خطی بالا به پایین نمی‌تواند درمورد سیستم‌های پیچیده مناسب باشد (Lee & Kim, :2000: 374; Momoh, 1998: 819; Saaty, 1980: 45).

به‌طورکلی، مدل ANP از سلسله‌مراتب کنترل، خوشه‌ها، عناصر، روابط متقابل بین خوشه‌ها و عناصر تشکیل می‌شود. فرایند مدل‌سازی شامل مراحل زیر است که در ادامه به آن اشاره می‌شود (Ertay et al, 2006: 247; Sarkis, 2002: 23).

گام اول: پایه‌ریزی مدل و ساختار مسئله

مسئله باید به شکل روشن بیان شود و مانند یک شبکه به یک سیستم عقلایی مجزا شود. این ساختار شبکه‌ای می‌تواند توسط تصمیم‌گیرنده‌ها در جلسات طوفان ذهنی یا به دیگر روش‌ها تعیین شود (نجفی، ۱۳۸۹: ۶۷).

گام دوم: ماتریس مقایسات زوجی و بردارهای تقدم

مشابه با روش AHP زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر کلاستر به‌نسبت اهمیت‌شان درجهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایسه می‌شوند. خود کلاسترها نیز به‌نسبت سهم‌شان در هدف، مقایسات زوجی می‌شوند. از تصمیم‌گیرنده‌ها در مورد یک‌سری از مقایسات زوجی از دو عنصر یا دو کلاستر برحسب توزیع‌هایشان در معیارهای سطح بالایی مختص آن‌ها پاسخ دریافت می‌شود؛ به‌علاوه، وابستگی‌های درونی بین عناصر یک کلاستر نیز باید به‌طور جفتی مورد آزمون قرار گیرند و تأثیر هر عنصر بر روی عنصر دیگر توسط یک بردار ویژه نمایش داده‌شود. مقادیر اهمیتی مرتبط توسط ساعتی در بازهٔ اعداد ۱ تا ۹ بیان شده‌است؛ به‌طوری‌که عدد ۱ مشخص‌کنندهٔ اهمیت مساوی بین دو عنصر و عدد ۹ مشخص‌کنندهٔ اهمیت فوق‌العاده بیشتر یک عنصر (کلاستر سطری ماتریس) در برابر عنصر دیگر (کلاستر ستونی ماتریس) است. مقادیر متقابل نیز در مقایسات معکوس درنظر گرفته می‌شوند؛ همانند روش AHP مقایسات زوجی در ANP نیز توسط یک بستر ماتریسی بیان می‌شوند و یک بردار تقدم محلی می‌تواند به‌عنوان یک تخمین از اهمیت متناسب بین عناصر یا کلاسترها مشتق شود که توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود:

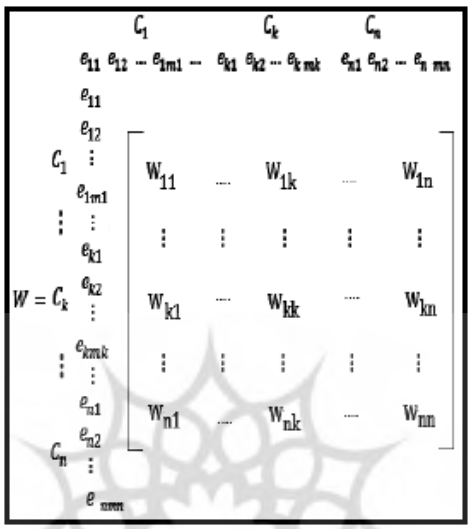
$$A \times w = \lambda_{max} \times w \quad (1)$$

به‌طوری‌که A: ماتریس مقایسات زوجی، W: بردار ویژه و λ_{max}: بزرگ‌ترین مقدار ویژهٔ ماتریس A است. ساعتی روش‌های مختلفی را برای محاسبهٔ W مطرح کرد که در این مقاله از روش Expert Choice برای محاسبهٔ بردار ویژه از ماتریس مقایسات زوجی و نیز محاسبهٔ مقادیر نسبت‌های ناسازگاری استفاده شده‌است (همان، ۱۳۸۹: ۶۷).

گام سوم: تشکیل سوپرماتریس اولیه

عناصر ANP با یکدیگر در تعامل قرار دارند. این عناصر می‌توانند واحد تصمیم‌گیرنده، معیارها، زیرمعیارها، نتایج حاصل، گزینه‌ها و هر چیز دیگری باشند. وزن نسبی هر ماتریس براساس مقایسهٔ زوجی شبیه روش AHP محاسبه می‌شود. وزن‌های حاصل در سوپرماتریس وارد می‌شوند که رابطهٔ متقابل بین عناصر سیستم را نشان می‌دهند. قالب عمومی سوپرماتریس در شکل ۱۴ نشان داده‌شده‌است. در این

تصویر CN نشان‌دهندهٔ خوشهٔ Nام، e_{Nn} عنصر nام در خوشهٔ Nام، Wij ماتریس بلوک شامل وزن‌های نسبی بردارهای W تأثیر عناصر در خوشهٔ iاُم نسبت‌به خوشهٔ jام است. اگر خوشهٔ iاُم هیچ تأثیری بر خوشهٔ iام خودش نداشته باشد (حالت وابستگی داخلی)، Wij صفر می‌شود. سوپر ماتریس به‌دست‌آمده در این مرحله به‌عنوان سوپرماتریس اولیه معرفی می‌شود (وارثی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۳-۶۲). جدول ۴ سوپر ماتریس اولیهٔ پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. فرمت استاندارد یک سوپرماتریس A

(منبع، وارثی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۳).

جدول ۴. سوپرماتریس غیروزنی

سوپرماتریس غیروزنی	تراکم جمعیت	فاصله از مراکز مسکونی	فاصله از مراکز تجاری	فاصله از مراکز اداری	فاصله از مراکز اموزشی	فاصله از مراکز فرهنگی	فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	فاصل از تقاطع	دسترسی
تراکم جمعیت	۰,۰۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰
فاصله از مراکز مسکونی	۰، ۲۲۵	۰,۰۰۰	۰، ۲۱۳	۰، ۲۲۸	۰، ۲۳۰	۰، ۲۱۰	۰، ۲۲۴	۰، ۲۳۵	۰، ۲۳۲	۰، ۲۲۲
فاصله از مراکز تجاری	۰، ۰۸۵	۰، ۰۹۰	۰,۰۰۰	۰، ۰۷۵	۰، ۰۸۸	۰، ۰۷۴	۰، ۰۸۷	۰، ۰۷۸	۰، ۰۷۹	۰، ۰۸۴
فاصله از مراکز اداری	۰، ۰۷۰	۰، ۰۶۰	۰، ۰۵۳	۰,۰۰۰	۰، ۰۵۵	۰، ۰۵۸	۰، ۰۶۳	۰، ۰۶۹	۰، ۰۷۲	۰، ۰۵۴
فاصله از مراکز آموزشی	۰، ۱۲۵	۰، ۰۱۱۵	۰، ۱۵۰	۰، ۱۳۰	۰,۰۰۰	۰، ۱۱۰	۰، ۱۱۸	۰، ۱۳۵	۰، ۱۲۴	۰، ۱۴۵
فاصله از مراکز فرهنگی	۰، ۰۳۵	۰، ۰۲۵	۰، ۰۱۹	۰، ۰۲۴	۰، ۰۲۸	۰,۰۰۰	۰، ۰۳۱	۰، ۰۳۲	۰، ۰۳۴	۰، ۰۲۲
فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	۰، ۰۴۵	۰، ۰۳۲	۰، ۰۲۵	۰، ۰۲۶	۰، ۰۳۴	۰، ۰۴۲	۰,۰۰۰	۰، ۰۱۴	۰، ۰۲۳	۰، ۰۱۸

فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	۰، ۰۷۵	۰، ۰۴۳	۰، ۰۵۵	۰، ۰۸۰	۰، ۰۷۷	۰، ۰۴۲	۰، ۰۴۱	۰,۰۰۰	۰، ۰۶۳	۰، ۰۸۵
فاصل از تقاطع	۰، ۰۹۵	۰، ۰۸۴	۰، ۰۷۵	۰، ۰۷۰	۰، ۰۶۵	۰، ۰۶۶	۰، ۰۸۸	۰، ۰۷۷	۰,۰۰۰	۰، ۰۷۳
دسترسی	۰، ۱۷۰	۰، ۱۶۵	۰، ۱۵۵	۰، ۱۶۹	۰، ۱۷۸	۰، ۱۷۷	۰، ۱۶۰	۰، ۱۵۸	۰، ۱۵۹	۰,۰۰۰

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

گام چهارم: تشکیل سوپرماتریس وزنی

درواقع ستون‌های سوپرماتریس از چند بردار ویژه تشکیل می‌شود که جمع هر کدام از بردارها برابر با یک است؛ بنابراین این امکان وجود دارد که جمع هر ستون سوپرماتریس اولیه بیش از یک باشد (متناسب با بردار ویژه‌هایی که در هر ستون وجود دارد (برای آنکه از عناصر ستون متناسب با وزن نسبی‌شان فاکتور گرفته شود و جمع ستون برابر با یک شود، هر ستون ماتریس استاندارد می‌شود؛ درنتیجه ماتریس جدیدی به‌دست می‌آید که جمع هر یک از ستون‌های آن برابر با یک خواهد بود. این موضوع شبیه به زنجیرهٔ مارکوف است که جمع احتمالی همهٔ وضعیت‌ها معادل یک است. به ماتریس جدید، ماتریس وزنی گفته‌می‌شود (فرجی سبکبار و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۶۶-۱۴۳) که در این پژوهش سوپرماتریس وزنی مطابق با جدول ۵ به‌دست آمده‌است.

جدول ۵. سوپرماتریس وزنی

سوپرماتریس غیروزنی	تراکم جمعیت	فاصله از مراکز مسکونی	فاصله از مراکز تجاری	فاصله از مراکز اداری	فاصله از مراکز اموزشی	فاصله از مراکز فرهنگی	فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	فاصل از تقاطع	دسترسی
تراکم جمعیت	۰، ۰۰۰	۰، ۲۸۵	۰، ۳۲۰	۰، ۲۸۵	۰، ۲۸۵	۰، ۲۸۵	۰، ۲۸۵	۰، ۲۸۵	۰، ۳۲۰	۰، ۲۸۵
فاصله از مراکز مسکونی	۰، ۱۷۵	۰، ۰۰۰	۰، ۱۸۵	۰، ۱۴۵	۰، ۱۸۰	۰، ۱۵۸	۰، ۱۳۰	۰، ۱۳۵	۰، ۱۹۰	۰، ۱۴۵
فاصله از مراکز تجاری	۰، ۰۴۵	۰، ۰۵۵	۰، ۰۰۰	۰، ۰۴۰	۰، ۰۳۵	۰، ۰۵۴	۰، ۰۳۰	۰، ۰۶۵	۰، ۰۶۰	۳۸ ،۰
فاصله از مراکز اداری	۰، ۰۲۰	۰، ۰۱۵	۰، ۰۱۰	۰، ۰۰۰	۰، ۰۲۵	۰، ۰۴۵	۰، ۰۴۲	۰، ۰۶۳	۰، ۰۴۳	۰، ۰۳۵
فاصله از مراکز آموزشی	۰، ۰۹۵	۰، ۱۰۰	۰، ۰۹۰	۸۵ ،۰	۰، ۰۰۰	۰، ۰۷۳	۰، ۰۷۸	۰، ۰۷۲	۰، ۰۷۰	۰، ۰۶۴
فاصله از مراکز فرهنگی	۰، ۰۱۲	۰، ۰۱۵	۰، ۰۱۸	۰، ۰۲۰	۰، ۰۱۷	۰، ۰۰۰	۰، ۰۱۶	۰، ۰۲۲	۰، ۰۲۴	۰، ۰۱۴
فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	۰، ۰۲۸	۰، ۰۲۳	۰، ۰۲۱	۰، ۰۲۲	۰، ۰۱۴	۰، ۰۲۵	۰، ۰۰۰	۰، ۰۴۲	۰، ۰۱۱	۰، ۰۳۴
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	۰، ۰۴۲	۰، ۰۲۴	۰، ۰۲۸	۰، ۰۲۷	۰، ۰۳۴	۰، ۰۱۵	۰، ۰۴۱	۰، ۰۰۰	۰، ۰۴۲	۰، ۰۲۶
فاصله از تقاطع	۰، ۰۵۴	۰، ۰۴۵	۰، ۰۴۸	۰، ۰۴۶	۰، ۰۳۵	۰، ۰۳۸	۰، ۰۵۸	۰، ۰۴۲	۰، ۰۰۰	۰، ۰۴۳
دسترسی	۰، ۱۱۰	۰، ۰۹۵	۰، ۱۱۵	۰، ۱۱۳	۰، ۱۱۱	۰، ۱۱۲	۰، ۱۱۴	۰، ۰۸۵	۰، ۱۰۱	۰، ۰۰۰

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

گام پنجم: محاسبهٔ بردار وزنی عمومی

در مرحلهٔ بعد، سوپرماتریس وزنی به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. براساس ماتریس به‌دست‌آمده، بردار وزن عمومی مشخص می‌شود. ماتریسی که درنتیجهٔ به‌توان‌رسیدن ماتریس وزنی به‌دست می‌آید، ماتریسی حدی است که مقادیر هر سطر آن با هم برابر است. اگر سوپرماتریس اثر زنجیره‌واری داشته‌باشد، ممکن است دو یا چند سوپرماتریس داشته‌باشیم؛ به‌صورت زیر:

$$\lim_{k\to\infty}\left(\frac{1}{N}\right)\sum w_i^k \qquad \lim_{k\to\infty} W^k \quad (۲)$$

(وارثی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۵). سوپرماتریس حد این تحقیق مطابق‌با جدول ۶ به‌دست آمده‌است.

جدول ۶. سوپرماتریس حد

سوپرماتریس حد	تراکم جمعیت	فاصله از مراکز مسکونی	فاصله از مراکز تجاری	فاصله از مراکز اداری	فاصله از مراکز اموزشی	فاصله از مراکز فرهنگی	فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	فاصل از تقاطع	دسترسی
تراکم جمعیت	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷	۰،۲۸۷
فاصله از مراکز مسکونی	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲	۰،۱۸۲
فاصله از مراکز تجاری	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴	۰،۰۵۴
فاصله از مراکز اداری	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳	۰،۰۳۳
فاصله از مراکز آموزشی	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷	۰،۰۹۷
فاصله از مراکز فرهنگی	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱	۰،۰۲۱
فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷	۰،۰۳۷
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸	۰،۰۴۸
فاصله از تقاطع	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶	۰،۰۵۶
دسترسی	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴	۰،۱۱۴

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

گام ششم: محاسبهٔ وزن نهایی معیارها

در مرحلهٔ آخر، وزن هریک از معیارهای مؤثر به‌دست می‌آید. همان‌طور که جدول ۷ نشان می‌دهد، در میان معیارها، معیار تراکم جمعیت دارای بیشترین ارزش و اهمیت است. در بین معیارهای کاربری نیز کاربری‌های مسکونی دارای بیشترین ارزش بوده و بعد از آن معیار

آموزشی نیز حائز اهمیت است. در بخش دسترسی‌ها، معابر شریانی درجهٔ ۲ از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین کارشناسان، در بُعد جمعیتی، به مناطق پرتراکم و با جمعیت زیاد اهمیت و ارزش بالاتری اختصاص داده‌اند. از منظر حریم کاربری‌ها نیز حریم صفر تا ۳۰۰ متر دارای بیشترین ارزش بودند.

جدول ۷. وزن نهایی شاخص‌های مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس

شاخص	وزن نهایی
تراکم جمعیت	۰،۲۸۸
فاصله از مراکز مسکونی	۰،۱۸۳
فاصله از مراکز تجاری	۰،۰۵۵
فاصله از مراکز اداری	۰،۰۳۴
فاصله از مراکز آموزشی	۰،۰۹۸
فاصله از مراکز فرهنگی	۰،۰۲۲
فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	۰،۰۳۷
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	۰،۰۴۹
فاصله از تقاطع	۰،۰۵۷
دسترسی	۰،۱۱۵

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

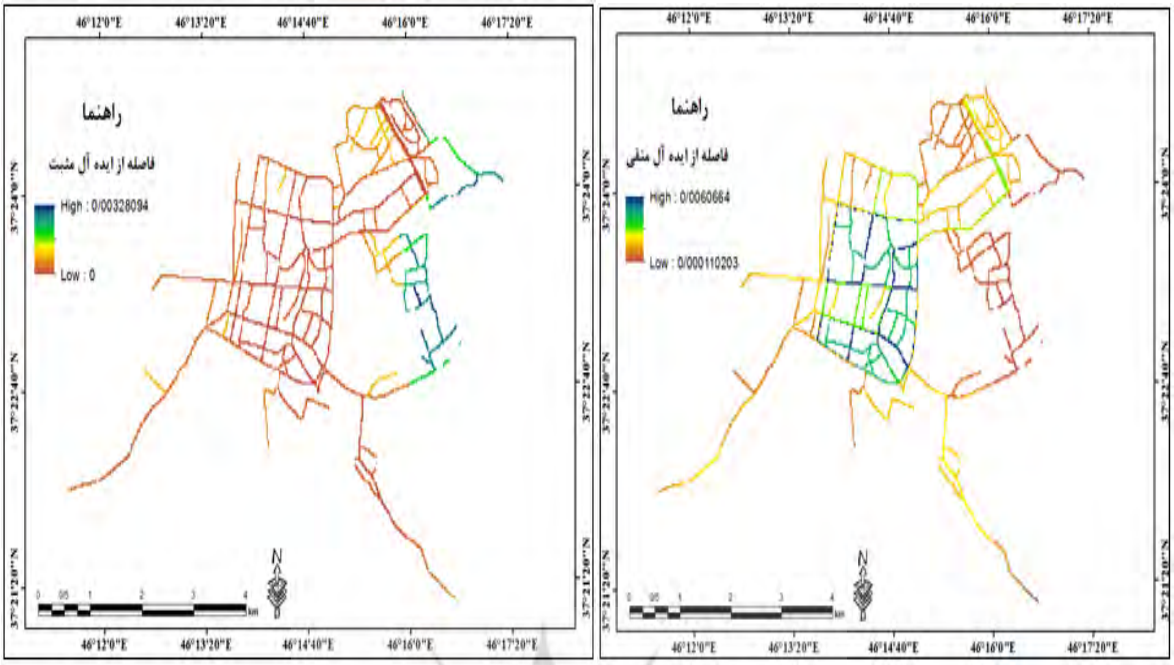
به‌دست‌آوردن ایده‌آل مثبت و منفی (d_j^-) و (d_j^+)

بعد از استانداردسازی لایهٔ معیارها و محاسبهٔ وزن آن‌ها، ماتریس V، از حاصل ضرب لایه‌های استاندارد هر شاخص در اوزان مربوط به خود به‌دست می‌آید (جدول ۸). بعد از این مرحله، راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^*) و ایده‌آل منفی (A^-) را تعریف کرده و براساس آن فاصلهٔ هر گزینه از ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه شد. شکل ۱۵ ایده‌آل مثبت و شکل ۱۶ ایده‌آل منفی را نشان می‌دهد.

جدول ۸. بیشترین و کمترین مقدار هر معیار براساس ماتریس v

معیارها	V^+	V^-
تراکم جمعیت	۰،۲۸۸	۰.۰۹۳۳۳۳
فاصله از مراکز اداری	۰،۱۸۳	۰.۰۱۷۳۳۳
فاصله از مراکز تجاری	۰،۰۵۵	۰.۰۲۴۶۶۷
فاصله از مراکز مسکونی	۰،۰۳۴	۰.۰۷۱۶۶۷
فاصله از مراکز آموزشی	۰،۰۹۸	۰.۰۳۷۳۳۳
فاصله از مراکز فرهنگی	۰،۰۲۲	۰.۰۰۶۳۳۳۳
فاصله از مراکز تفریحی و فضای سبز	۰،۰۳۷	۰.۰۰۵۳۳۳۳
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	۰،۰۴۹	۰.۰۱۳۳۳۳
فاصله از تقاطع	۰،۰۵۷	۰.۰۰۹۳۳۳۳
دسترسی	۰،۱۱۵	۰.۰۵۴۶۶۶۷

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۱۵ و ۱۶. به‌ترتیب نقشهٔ فاصله از ایده‌آل مثبت و نقشهٔ فاصله از ایده‌آل منفی

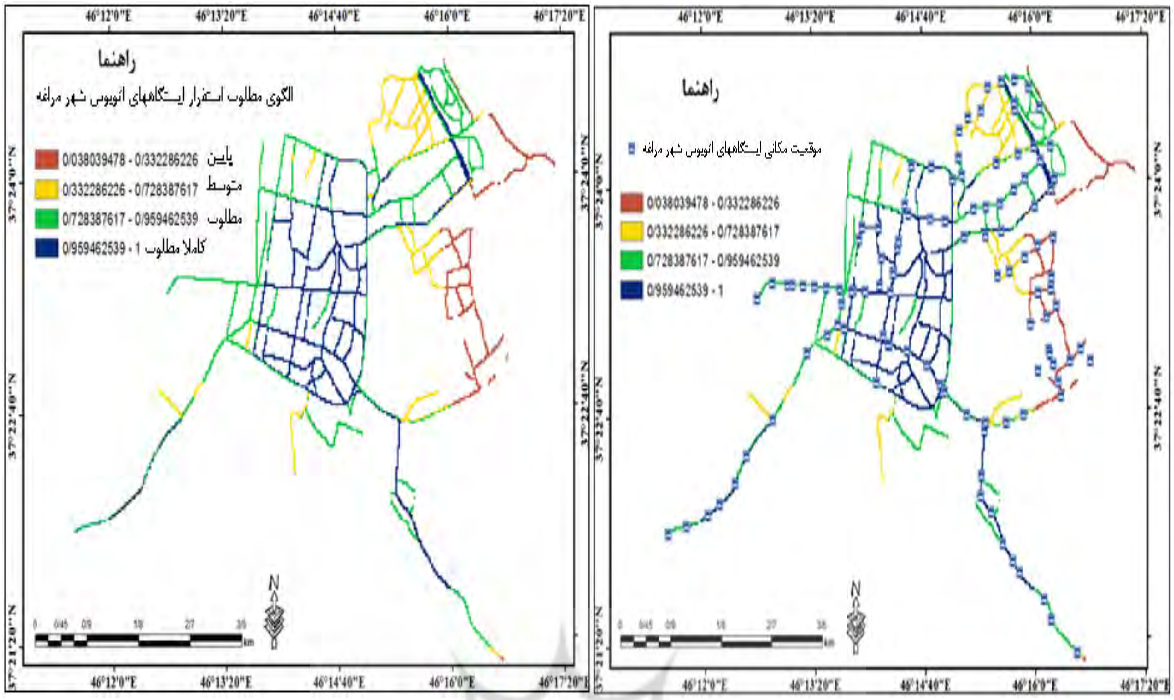
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نقشهٔ نهایی مدل تاپسیس

درنهایت با واردکردن فرمول CLi (تعیین نزدیکی نسبی (CL*) یک گزینه به راه‌حل ایده‌آل: تعیین ضریبی که برابر است با فاصلهٔ آلترناتیو حداقل، تقسیم‌بر مجموع فاصلهٔ آلترناتیو حداقل d_i^- و فاصلهٔ آلترناتیو ایده‌آل d_i^+ که آن را با CL_i^* نشان می‌دهند و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \qquad (۳)$$

رتبه‌بندی خیابان‌های شهری و پهنه‌های مناسب درجهت احداث ایستگاه‌های اتوبوس شناسایی و مشخص شدند؛ درنتیجه، شبکهٔ معابر که در لایهٔ رستری ارزشی بین صفر تا یک گرفته‌بود، در چهار کلاس تقسیم‌بندی شد که کلاس آخر بهترین موقعیت استقرار ایستگاه‌های اتوبوس را نشان می‌دهد (اشکال ۱۷ و ۱۸). صرف تکیه‌بر نتایج این نقشه، عملاً نمی‌تواند کارایی لازم را درجهت ارزیابی و تعیین مکان‌های بهینهٔ ایستگاه‌های اتوبوس داشته‌باشد؛ بنابراین در گام نهایی پس از ایجاد شبکهٔ معابر شهری، فاصلهٔ استاندارد ایستگاه‌های موجود به کمک تحلیل شبکه در محیط GIS تعیین شد.



شکل ۱۷ و ۱۸. به‌ترتیب نقشهٔ نهایی مدل تاپسیس الگوی مطلوب و موقعیت فعلی توزیع مکانی ایستگاه‌های اتوبوس شهر مراغه

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نقشهٔ نهایی که با اجرای مدل تاپسیس در محیط GIS به‌دست‌آمد؛ درحقیقت الگوی مطلوب توزیع مکانی استقرار ایستگاه‌های اتوبوس است. با توجه به این نقشه قسمت‌های بیشتری از بخش مرکزی متمایل به شمال غربی شهر مراغه و قسمت‌های کوچکی از جنوب و شمال‌شرقی مراغه (شامل قسمت‌های کوچکی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و فاز ۲، قسمت‌های زیادی از شهرک سهند و دارایی- طالب‌خان) که به‌صورت رنگ آبی در روی نقشه مشخص شده‌اند، مکان‌های کاملاً مطلوبی درجهت استقرار ایستگاه‌های اتوبوس هستند. قسمت‌هایی از شمال‌غربی و شمال‌شرقی مراغه (قسمت‌های زیادی از شهرک ولیعصر فاز ۱ و قسمت کوچکی از فاز ۲) که در روی نقشه به رنگ سبز است نیز ازنظر استقرار ایستگاه‌های اتوبوس در حدمطلوب هستند و بقیهٔ قسمت‌ها نیز که با رنگ زرد (بیشتر قسمت‌های شمال‌شرقی و به میزان کمتری قسمت‌های جنوبی مراغه شامل قسمت‌هایی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و فاز ۲، ۴۸ متری و گلشهر) و رنگ قرمز (قسمت‌های مرکزی متمایل به شرق مراغه شامل قسمت‌های زیادی از ۴۸ متری و قسمت‌های کوچکی از شهرک ولیعصر- فاز ۲) مشخص شده‌اند، به‌ترتیب در حد متوسط بوده و دارای درجه پایینی از مطلوبیت درجهت استقرار ایستگاه‌های اتوبوس هستند. جدول ۵ تعداد ایستگاه‌های موجود در هر کلاس را نشان می‌دهد. از بین ۹۹ ایستگاه موجود در مسیرهای رفت و برگشت، تعداد ۳ ایستگاه در قسمتی از شبکهٔ معابر رتبهٔ یک را داراست.

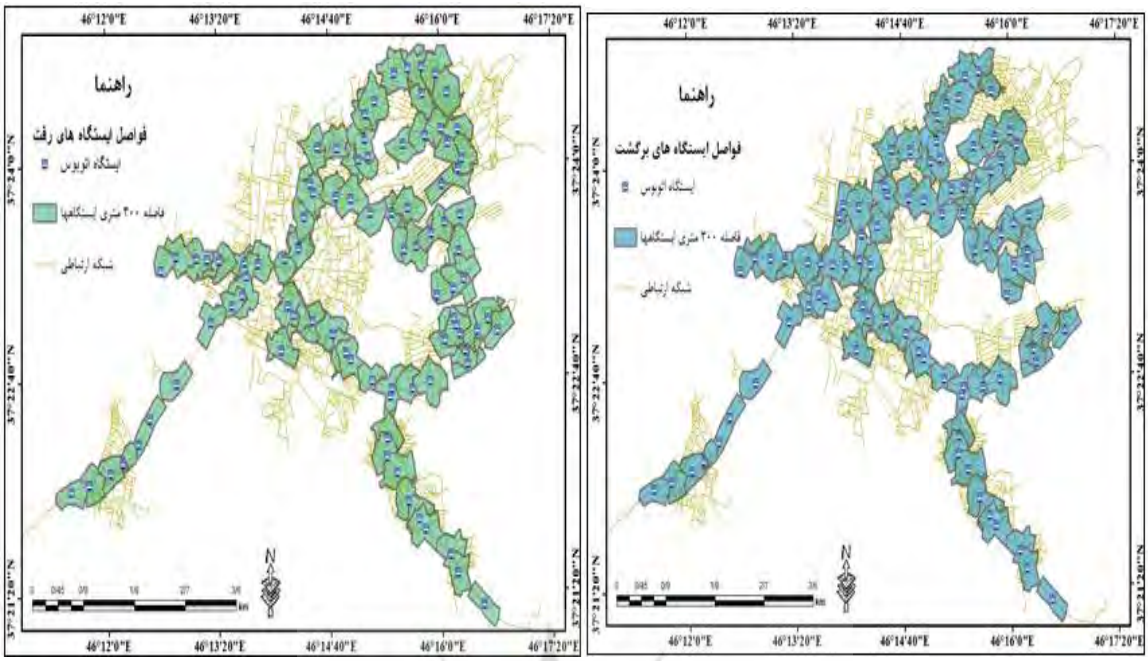
جدول ۹. تعداد ایستگاه‌های موجود در هر کلاس از نقشهٔ نهایی تاپسیس

کلاس	تعداد ایستگاه‌های موجود
۰.۰۳۸۰۳۹۴۷۸ – ۰.۰۳۳۲۲۸۶۲۲۶	۱۷
۰.۰۳۳۲۲۸۶۲۲۶ - ۰.۷۲۸۳۸۷۶۱۷	۱۵
۰.۷۲۸۳۸۷۶۱۷- ۰.۹۵۹۴۶۲۵۳۹	۲۷
۰.۹۵۹۴۶۲۵۳۹ -۱	۴۰

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

همان‌گونه که جدول ۹ و نقشهٔ موقعیت ایستگاه‌ها (شکل ۱۸) نشان می‌دهد، اغلب ایستگاه‌ها در موقعیت مناسب قرار گرفته‌اند؛ اما با توجه به این مهم که این تسهیلات شهری در سطح معابر محدودهٔ مورد مطالعهٔ موجود درحال فعالیت هستند، در این قسمت از تحقیق با همپوشانی این تسهیلات و شبکهٔ معابر، مقاطعی که دارای وزن بالایی بودند و هیچ ایستگاهی در آن واقع نشده‌بود، مشخص شده و مورد بررسی قرار گرفت. این شبکهٔ خروجی به چهار کلاس تقسیم شد که معابر با اولویت بالا در مقاطعی فاقد پوشش ایستگاه است که در بین این مقاطع کمربندی شمالی، خیابان پروین اعتصامی و قسمتی از بلوار شهید کرمی بسیار مهم هستند.

اما نمی‌توان از هم‌پوشانی شبکه و ایستگاه‌ها به‌تنهایی به تحلیل نهایی مؤثری دست‌یافت؛ ازاین‌رو در این تحلیل حریم ایستگاه‌ها به شعاع ۳۰۰ متر نیز به کمک تحلیل شبکه در محیط GIS، مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان فاصلهٔ مناسب ایستگاه‌ها را از هم بررسی کرد. فاصلهٔ بین ایستگاه‌ها را می‌توان با برقراری تعادل بین کوتاه‌ترین دسترسی (به‌منظور حداکثرکردن پوشش سیستم) و بیشترین سرعت عملیاتی (به‌منظور حداقل‌کردن زمان سفر کاربران) به‌دست‌آورد. هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد، امکان دسترسی کاربران به سیستم بیشتر شده و پوشش سیستم افزایش می‌یابد؛ در مقابل باعث کاهش سرعت عملیاتی، راحتی مسافرین و... سیستم می‌شود. از طرفی، هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد، هزینه‌های سیستم (ازلحاظ تجهیزات ایستگاه‌ها) افزایش می‌یابد. فاصلهٔ پیشنهادی برای ایستگاه‌ها با توزیع جمعیت در مناطق مختلف نسبت عکس دارد. هر چقدر جمعیت یک منطقه بیشتر باشد، فاصلهٔ ایستگاه‌ها کمتر درنظر گرفته می‌شود. به‌طورکلی براساس راهنمای ایستگاه‌های سیستم اتوبوس‌رانی وزارت کشور پیشنهاد می‌شود در مناطق مسکونی و تجاری با تراکم جمعیت بالا، فاصلهٔ ایستگاه‌های سیستم اتوبوس‌رانی ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر و در مناطق حومه‌ای با تراکم کمتر و نبود مراکز جذب سفر زیاد، این فاصله ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر لحاظ شود.

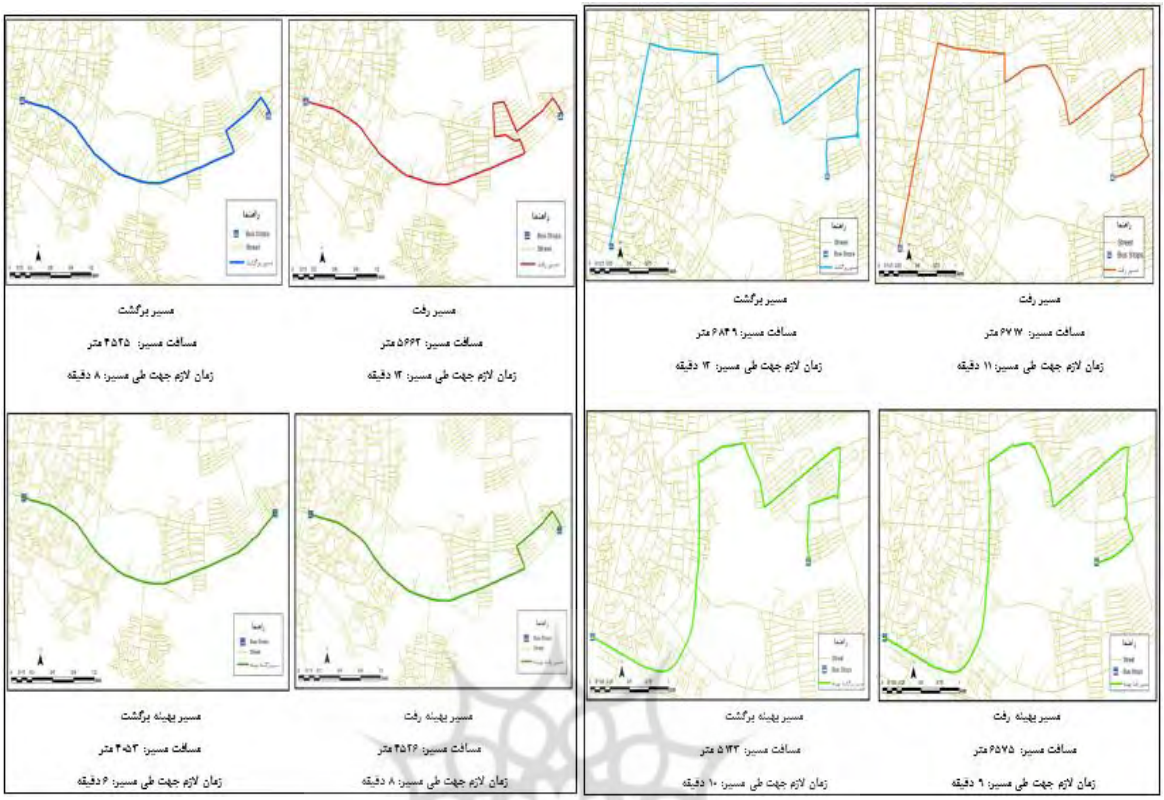


شکل ۱۹ و ۲۰. به‌ترتیب نقشهٔ فاصلهٔ ۳۰۰ متری ایستگاه‌های رفت شهر مراغه و نقشهٔ فاصلهٔ ۳۰۰ متری ایستگاه‌های برگشت شهر مراغه
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

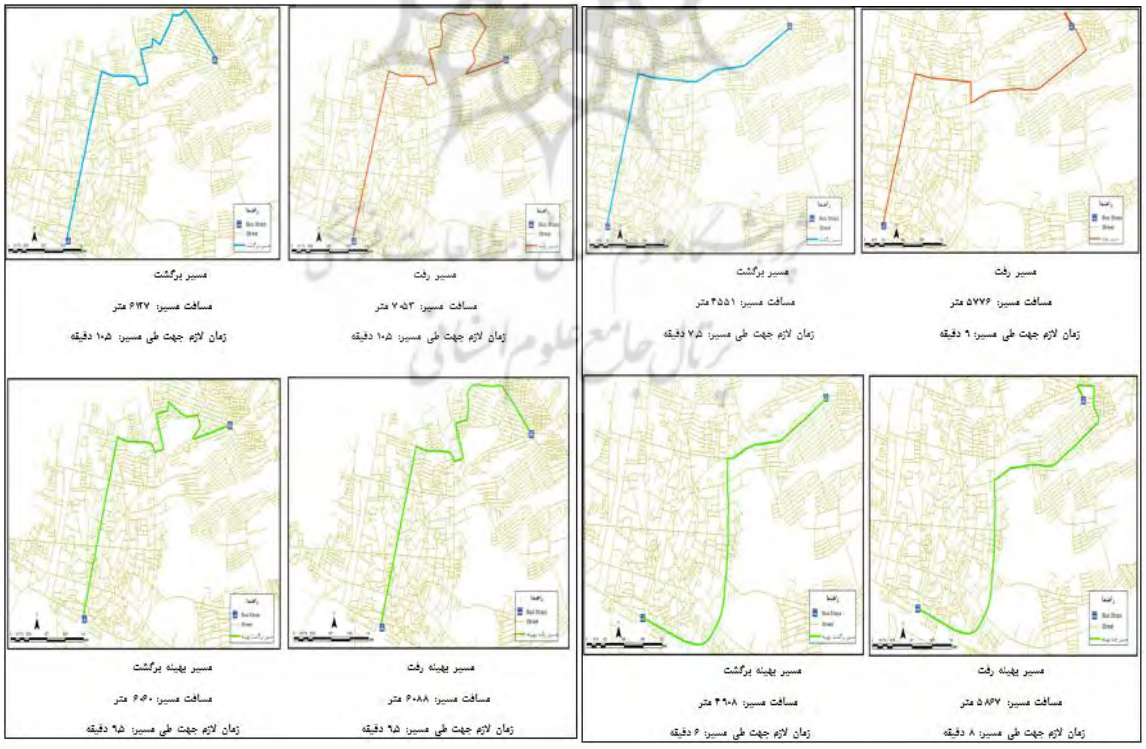
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، فاصلهٔ مناسب ایستگاه‌ها از همدیگر که در این پژوهش با توجه استانداردها و محدودهٔ مورد مطالعه ۳۰۰ متر درنظر گرفته‌شد، در اکثر مناطق شهر مراغه رعایت نشده‌است. فاصلهٔ کم ایستگاه‌ها و درنتیجه تعداد زیاد در طول مسیر نیز باعث کاهش سرعت عملیاتی اتوبوس‌ها شده‌است؛ بنابراین هرچند ایستگاه‌های موجود مراغه با توجه نقشهٔ ارزیابی شبکهٔ معابر تاپسیس اکثراً در موقعیت‌هایی مناسب قرار گرفته‌اند؛ اما فاصلهٔ آن‌ها از یکدیگر مناسب نیست، به‌ویژه در قسمت‌های جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی که تراکم جمعیت و نیز مراکز جذب سفر کم است، این فاصله باید بیش از ۳۰۰ متر درنظر گرفته‌شود که حتی این فاصلهٔ ۳۰۰ متری نیز رعایت نشده‌است (اشکال ۱۹ و ۲۰).

تحلیل شبکه

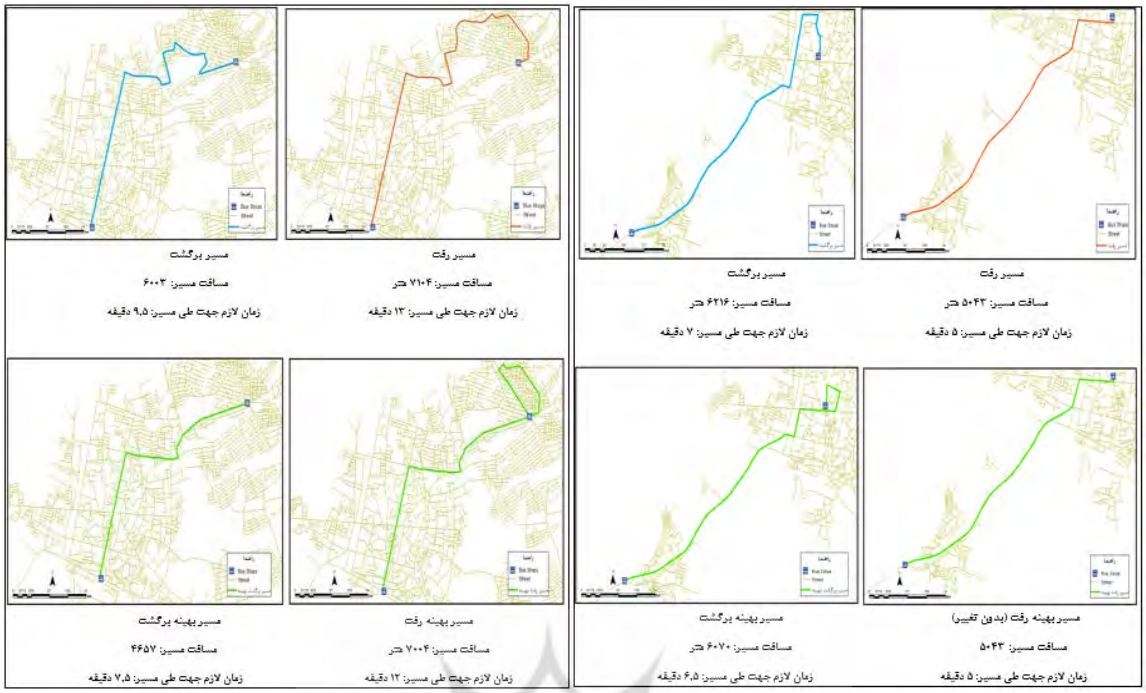
آنالیزهای شبکه در GIS را می‌توان براساس معیارهای گوناگونی انجام داد. از مهم‌ترین و پرکاربردترین این معیارها، زمان، طول، نوع شبکهٔ معابر و... است. محاسبهٔ کوتاه‌ترین مسیر، یکی از مهم‌ترین عملیات در بیشتر تجزیه‌وتحلیل‌های شبکه‌ای است. یافتن کوتاه‌ترین و بهترین مسیرهای اتوبوس‌رانی در محیط GIS در مرحلهٔ اول نیازمند ساخت شبکه و انجام تجزیه‌وتحلیل‌های شبکه‌ای است. به این منظور با استفاده از لایه‌های موجود به‌خصوص لایهٔ معابر، اقدام به ساخت شبکهٔ هوشمند شده‌است. بعد از ساخت شبکه در محیط GIS اقدام‌به مدل‌سازی مسیرهای بهینهٔ اتوبوس با فرض ثابت‌بودن مبدأ و مقصد و با درنظرگرفتن معیارهای طول، زمان، نوع معابر و یک‌طرفه یا دوطرفه‌بودن معابر شد که در ادامه، مسیرهای بهینهٔ دسترسی همراه با مسافت و زمان لازم در اشکال ۲۱ تا ۲۸ نشان داده‌شده‌است.



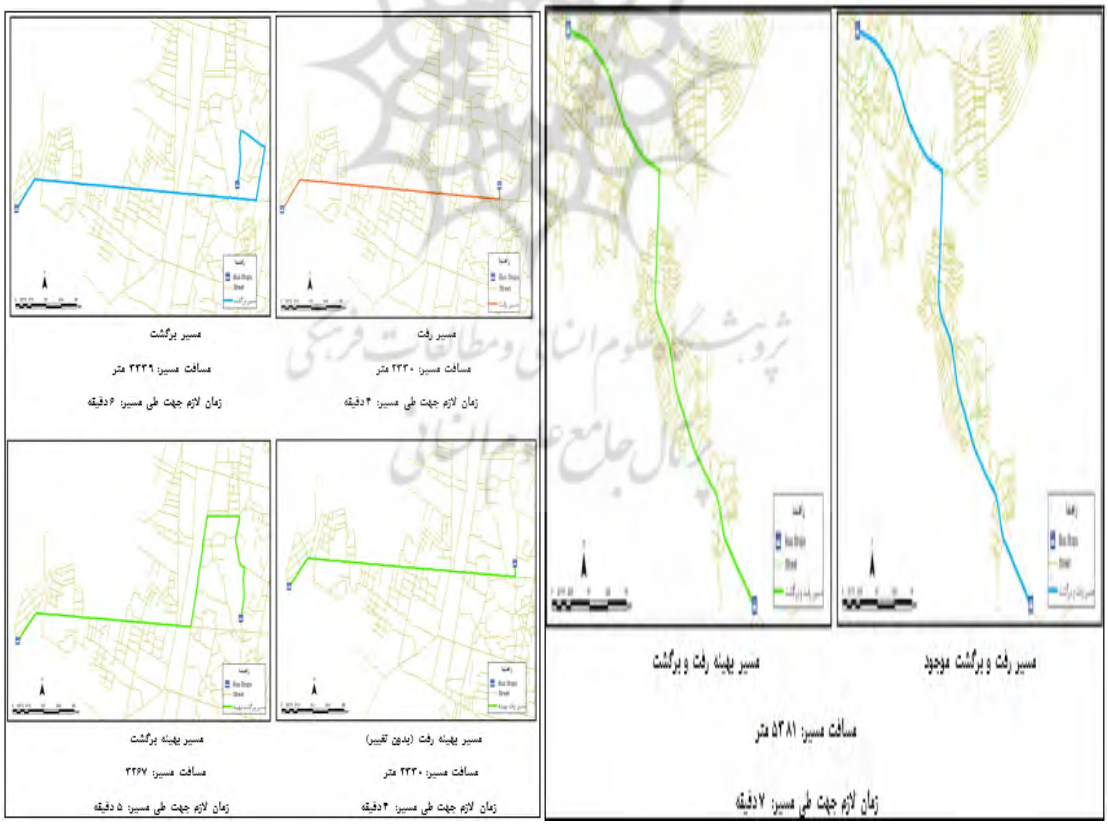
شکل ۲۱ و ۲۲. به‌ترتیب مسیر تغییریافتهٔ خط شهرک گلشهر، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر و مسیر تغییریافتهٔ خط شهرک سهند، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۲۳ و ۲۴. به‌ترتیب مسیر تغییریافتهٔ خط فاز یک، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر و مسیر تغییریافتهٔ خط آزادگان، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۲۵ و ۲۶. به‌ترتیب مسیر تغییریافتهٔ خط فاز دو، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر و مسیر تغییریافتهٔ خط پهرآباد، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۲۷ و ۲۸. به‌ترتیب مسیر تغییریافتهٔ خط دارایی، نقشهٔ بالا قبل از تغییر و پایین بعد از تغییر و مسیر تغییریافتهٔ خط شهرک امیرکبیر، نقشهٔ سمت راست قبل از تغییر و سمت چپ بعد از تغییر (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نتایج اجرای الگوریتم نزدیک‌ترین مسیر بر روی شبکهٔ معابر شهر مراغه نمایانگر این است که خطوط اتوبوس‌رانی در بعضی از مناطق تغییر پیدا کرده‌است؛ بدین شرح که از ۸ خط اتوبوس‌رانی فعال در شهر مراغه، ۵ خط در مسیرهای رفت و برگشت تغییر کرده و در دو خط دارایی و پهرآباد مسیر رفت بدون تغییر مانده، اما مسیرهای برگشت این دو خط تغییر یافته‌است. هم‌چنین خط شهرک امیرکبیر در مسیرهای رفت و برگشت هیچ تغییری پیدا نکرده‌است. لازم به ذکر است که در خط آزادگان و شهرک سهند هرچند طول مسیرهای بهینهٔ رفت و برگشت نسبت‌به مسیرهای موجود افزایش یافته، اما به‌دلیل اینکه مسیریابی براساس عامل زمان و طول انجام گرفته و مسیرهای پیشنهادی الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر، زمان کمتری را به خود اختصاص داده و بهینه‌تر از مسیرهای اولیه است.

با مقایسهٔ دو فاکتور اصلی طول مسیر و زمان می‌توان کارآمدی این روش را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی خطوط اتوبوس‌رانی شهر مراغه بیانگر این است که مجموع طول مسیرهای خطوط اتوبوس‌رانی پس از اعمال الگوریتم ۵۷۲۴ متر و زمان لازم برای طی مسیرها ۲۰ دقیقه کاهش یافته‌است. با توجه به اینکه در این مسیریابی از داده‌های ترافیک استفاده نشده و زمان به‌دست‌آمده در این روش براساس طول و سرعت مسیرها است، زمان لازم برای طی مسیر در هر یک از مسیرها با درنظرگرفتن داده‌های ترافیک بیشتر از این زمان خواهد بود.

نتیجه‌گیری

امروزه در شهرها، حمل‌ونقل عمومی و در این میان سامانهٔ اتوبوس‌رانی شهری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. بحث سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی در شهرها مدت‌هاست که از حدود فنی و مهندسی فراتر رفته و به یک بحث اجتماعی، بهداشتی و اقتصادی تبدیل شده‌است؛ از سوی دیگر کاربری حمل‌ونقل یا کاربری ارتباطی اولین کاربری در یک سکونتگاه اعم‌از شهر یا روستاست. سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی به‌عنوان استراتژی اصلی در کاهش استفاده از اتومبیل‌های شخصی مطرح بوده و به‌عنوان یک سرویس عمومی که جابه‌جایی همهٔ شهروندان را تضمین می‌کند، مطرح هستند. در همین ارتباط و در راستای هدف اصلی پژوهش، وضعیت سیستم اتوبوس‌رانی شهر مراغه مورد سنجش قرار گرفت. نتایج مدل تاپسیس نشان داد که فاصله مناسب ایستگاه‌ها از یکدیگر که در این پژوهش با توجه به استانداردها و محدودهٔ مورد مطالعه ۳۰۰ متر درنظر گرفته‌شد، در اکثر مناطق شهر مراغه رعایت نشده‌است. فاصلهٔ کم ایستگاه‌ها از یکدیگر و درنتیجه تعداد زیاد ایستگاه‌ها در طول مسیر نیز باعث کاهش سرعت عملیاتی اتوبوس‌ها شده‌است؛ بنابراین با توجه نقشهٔ ارزیابی شبکهٔ معابر تاپسیس هر چند ایستگاه‌های موجود اتوبوس مراغه اکثراً در موقعیت‌هایی مناسب قرار گرفته‌اند، اما فاصلهٔ آن‌ها از یکدیگر مناسب نیست، به‌ویژه در قسمت‌های جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی که تراکم جمعیت زیاد بوده و نیز در مراکز جذب سفر فاصلهٔ ایستگاه‌ها از یکدیگر کم است که این فاصله باید بیش از ۳۰۰ متر درنظر گرفته‌می‌شد، ولی این فاصله ۳۰۰ متری نیز رعایت نشده‌است. نقشهٔ نهایی الگوی مطلوب توزیع مکانی استقرار ایستگاه‌های اتوبوس نشان داد که قسمت‌های کوچکی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و فاز ۲، قسمت‌های زیادی از شهرک سهند و دارایی- طالب‌خان مکان‌هایی کاملاً مطلوب، قسمت‌های زیادی از شهرک ولیعصر فاز ۱ و قسمت کوچکی از فاز ۲ در حدمطلوب و قسمت‌هایی از شهرک ولیعصر- فاز ۱ و فاز ۲، ۴۸ متری و گلشهر و قسمت‌های زیادی از ۴۸ متری و قسمت‌های کمی از شهرک ولیعصر- فاز ۲ به‌ترتیب

متوسط و دارای درجه پایینی از مطلوبیت درجهت استقرار ایستگاه‌های اتوبوس هستند. نتایج اجرای الگوریتم نزدیک‌ترین مسیر بر روی شبکهٔ معابر هوشمند شهر مراغه نیز نمایانگر این است که خطوط اتوبوس‌رانی در بعضی از مناطق تغییر پیدا کرده‌است. بدین شرح که از ۸ خط اتوبوس‌رانی فعال در شهر مراغه، ۵ خط در مسیرهای رفت و برگشت دچار تغییر شده و در دو خط دارایی و پهرآباد مسیر رفت بدون تغییر مانده، اما مسیرهای برگشت این دو خط تغییر یافته‌است. هم‌چنین خط شهرک امیرکبیر در مسیرهای رفت و برگشت هیچ تغییری پیدا نکرده‌است.

همسو با نتایج این پژوهش، پژوهش‌های دیگری نیز به سنجش وضعیت سیستم حمل‌ونقل عمومی با مطالعهٔ موردی ایستگاه‌های اتوبوس با استفاده از GIS, AHP, ANP و روش‌های دیگر پرداخته‌اند که نتایج این پژوهش‌ها نیز همانند این پژوهش حکایت از مکان‌یابی نامناسب ایستگاه‌های اتوبوس دارد؛ به‌عنوان‌نمونه، وارثی و همکاران (۱۳۹۴) بیان کرده‌اند که برخی از ایستگاه‌های موجود در شهر، در مقایسه با فواصل استاندارد ایستگاه‌های پیشنهادی، از موقعیت مکانی مناسب برخوردار نبوده و نیازمند ساماندهی هستند یا قهری و همکاران (۱۳۹۳) اذعان کرده‌اند که بیشتر ایستگاه‌ها باید در قسمت جنوبی و مرکزی ایجاد شوند و همچنین به‌نظر می‌رسد ایستگاه‌های اتوبوس معابر شهری را به‌صورت لازم پوشش نمی‌دهند. در عرصهٔ خارجی نیز ادوبلا و همکاران (۲۰۱۲) بدین نتیجه دست یافتند که توجه کامل به مکان ایستگاه‌های اتوبوس تأثیر زیادی در ارتقای سیستم حمل‌ونقل عمومی ازطریق افزایش دسترسی، ایمنی و اعتمادپذیری دارد. علی‌رغم شباهتی که این پژوهش با پژوهش‌های دیگر دارد، تفاوت این پژوهش با سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این است که تحقیقات دیگر یا از روش‌های GIS, AHP, ANP, TOPSIS به‌تنهایی یا توأمان استفاده می‌کردند، ولی در اینجا علاوه‌بر استفاده از GIS و TOPSIS از آنالیز شبکه نیز در محیط GIS استفاده شده‌است تا نتایج تحقیق از دقت بیشتری برخوردار شود.

پیشنهادها

- ایجاد ایستگاه‌های جدید اتوبوس در قسمت جنوبی شهر مراغه در مسیر بلوار شهید مقدم و خیابان صنعت.
- لزوم استفاده از معیارهای بیشتر علاوه‌بر معیارهای استفاده‌شده در تحقیق فعلی در تحقیقات آتی.
- استفاده از داده‌های ترافیک به‌صورت زمانی درجهت زمانمندکردن پایگاه دادهٔ هوشمند.
- بهره‌گیری از سامانه‌های نوین اطلاعاتی و مدیریتی در مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس.
- بروزرسانی آمارها و اطلاعات موجود در ارتباط با کاربری‌های شهر مراغه.
- اهمیت‌دادن به توزیع ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی در سطح شهر مراغه به‌گونه‌ای‌که همهٔ شهروندان بتوانند با حداقل پیاده‌روی، به ایستگاه‌های اتوبوس دسترسی پیدا کنند.
- توجه به نقش کارشناسان خبره در بهینه‌سازی ایستگاه‌های اتوبوس.

منابع

حدادی، فرهاد؛ شیرمحمدی، حمید. (۱۳۹۶). ارزیابی و اولویت‌بندی تصمیم‌گیران شهری در یکپارچه‌سازی سیستم حمل‌ونقل عمومی با استفاده از روش کوپراس (مطالعهٔ موردی: شهر ارومیه)، نشریهٔ پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، دورهٔ ۸، شمارهٔ ۳۰، صص ۸۲-۶۵.
http://jupm.miau.ac.ir/article_2499.html

خدایی، علی. (۱۳۹۵). مهندسی و برنامه‌ریزی ترابری. چاپ اول. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

رحیمی، محمد؛ حسینی، سیده شهلا. (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی راهبردی توزیع فضایی ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، فصلنامهٔ علمی‌ترویجی مطالعات مدیریت ترافیک، دانشگاه علوم انتظامی امین، شمارهٔ ۴۸، صص ۲۶- ۱.
http://tms.jrl.police.ir/article_19067.html

رسولی، علی‌اکبر. (۱۳۹۱). کاربرد GIS در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای. چاپ اول. تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز، وزارت کشور و مرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهری.

ساجدی‌نژاد، آرمان؛ حسن نایبی، عرفان. (۱۳۹۵). طراحی سامانه‌های عملیاتی در سیستم اتوبوس‌رانی به‌منظور ساماندهی حمل‌ونقل مسافر درون‌شهری. فصلنامهٔ تحقیقات جغرافیایی، پروفسور محمدحسین پاپلی یزدی، دورهٔ ۳۱، شمارهٔ ۴، صص ۷۳-۶۰.
http://georesearch.ir/article-1-26-fa.html

عمران‌زاده، بهزاد؛ قرخلو، مهدی؛ پوراحمد، احمد. (۱۳۸۹). ارزیابی و تحلیل کارایی سامانهٔ حمل‌ونقل BRT و رضایت عمومی از آن در کلان‌شهر تهران، پژوهش‌های جغرافیای انسانی، دانشگاه تهران، دورهٔ ۴۲، شمارهٔ ۷۳، صص ۳۸-۱۹.
https://jhgr.ut.ac.ir/article_24468.html

عصارزادگان، حمید؛ نادعلی، امیرحسین؛ عطایی، محمدصادق؛ پورمیری، رضا. (۱۳۹۱). مکان‌یابی بهینهٔ ایستگاه‌های BRT به کمک نرم‌افزار GIS ARC و تکنیک AHP و TOPSIS، یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک ایران، تهران.
https://civilica.com/doc/155080/

فرجی‌سبکبار، حسنعلی؛ نصیری، حسین؛ حمزه، محمد؛ طالبی، سمیه؛ رفیعی، یوسف. (۱۳۹۰). تعیین عرصه‌های مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی بر پایهٔ تلفیق روش‌های ANP و مقایسهٔ زوجی در محیط GIS (مطالعهٔ موردی: دشت گربایگان فسا)، مجلهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، دورهٔ ۲۲، شمارهٔ ۴، صص ۱۶۶-۱۴۳.
http://gep.ui.ac.ir/article_18523.html

قهری، مهنوش؛ لحمیان، رضا؛ آزاده‌دل، یعقوب. (۱۳۹۳). ارزیابی موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسی براساس مدل AHP با استفاده از GIS (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ ۴ شهرداری تهران)، فصلنامهٔ مطالعات ساختار و کارکرد شهری، دانشگاه مازندران، دورهٔ ۲، شمارهٔ ۷، صص ۱۴۶-۱۲۷.
http://shahr.journals.umz.ac.ir/article_1011.html

موسوی، سیدرسول؛ باباصفری، عبدالمجید؛ گلستان‌نژاد، ابوالقاسم؛ نصری، اعظم؛ خلیلیان، مائده؛ ارشدی‌پور، اعظم. (۱۳۹۴). اطلس کلان‌شهر اصفهان، چاپ اول، تهران: انتشارات هم‌صدا.

نجفی، اسدالله. (۱۳۸۹). به‌کارگیری فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در تحلیل چالش‌های ساختاری و محیط اجرایی سازمان در مدیریت پروژه‌ها، نشریهٔ بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، معاون پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، دورهٔ ۲۱، شمارهٔ ۱، صص ۷۶-۶۳.
http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-244-fa.html

وارثی، حمیدرضا؛ شیران، غلامرضا؛ عزیزی حسنوند، حدیث. (۱۳۹۴). مکان‌یابی ایستگاه‌های اتوبوس با مدل ANP و منطق فازی در GIS (نمونهٔ موردی: شهر خرم‌آباد)، نشریهٔ پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، دورهٔ ۶، شمارهٔ ۲۳، صص ۷۶-۵۵.
http://jupm.miau.ac.ir/article_1763.html

Adeleke, O. O., Jimoh, Y. A., Akinpelu, M. A. (2013). Development of an Advanced Public Transportation System for captive commuters on urban arterials in Ilorin, Nigeria, Alexandria Engineering Journal, 52 (3): 447-454.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016813000355

Adebola, O., Enosko, O. (2012). Analysis of Bus-stops locations using Geographic Information System in Ibadan North LGA Nigeria, Industrial Engineering Letters, ISSN, 2224-6096, 2 (3): 20-38.
https://core.ac.uk/download/pdf/234685007.pdf

Carro-Perez, I., Gonzalez-Hernandez, H.G. (2016). Topological Characterization of the Public Transportation Complex Network in Puebla City, Mexico. In Proceedings of the 2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers, Cholula, Mexico, 24–26 February 113–117.
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7438561

Chung, S.H., Lee, A.H. L., Pearn, W. L. (2005). Analytic Network Process (ANP) Approach for Product Mix Planning in Semiconductor

Interdependent Information System Project Selection, Computers and Operations Research, 27 (4):367-382.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030505489900057X

Li, M., Han, J. (2017). Complex Network Theory in Urban Traffic Network. In Advances in Engineering Research, Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering, 13–14 May 2017; Zhou, J., Zhu, P., Eds.; Atlantis Press: Paris, France, 123: 910–913.
https://www.atlantis-press.com/proceedings/msmee-17/25877804

Manville, M., Levine, A. S. (2018). What motivates public support for public transit?. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 118:567-580.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856418302866

Momoh, J. A., Zhu, J. Z. (1998). Application of AHP/ANP to Unit Commitment in the Deregulated Power Industry, In: 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1 San Diego, 817- 822.
https://ieeexplore.ieee.org/document/725515

Nielsen, G., Nelson, G. D., Mulley. G., Tegner. G., Lind, G., Lange, T. (2005). Public transport - planning the networks: HiTrans Best practice guide 2, Civitas, Development of principles and strategies for introducing High Quality Pubilic Transport in medium sized cities and regions.
http://www.civitas.no/assets/hitrans2publictransportplanningthe-networks.pdf

Pternea, M., Kepaptsoglou, K., Karlaftis, M.G. (2015). Sustainable urban transit network design. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 77: 276–291.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096585641500110X

Saaty, T. L. (1980).The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York.

Sarkis, J. (2002). A Model for Strategic Supplier Selection, Journal of Supply Chain Management, 38 (1): 18 - 28.
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00117.x

Fabricator, International Journal of Production Economics, 96 (1): 15 - 36.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527304000453

Dyson, R. G. (2004). Strategic Development and SWOT Analysis at the University of Warwick, European Journal of Operational Research, 152 (3): 631- 640.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221703000626

Dou, Y., Zhu, Q., Sarkis, J. (2014). Evaluating green supplier development programs with a grey-analytical network process-based methodology. European Journal of Operational Research, 233: 420–431.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221713002129

Ertay, T., Ruan, D., Tuzkaya, U. R. (2006). Integrating Data Envelopment Analysis and Analytic Hierarchy for the Facility Design in Manufacturing Systems, Information Sciences, 176 (3): 237- 262.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025504003391

Farahani, R.Z., Miandoabchi, E., Szeto,W.Y., Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. European Journal of Operational Research, 229: 281–302.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221713000106

Gray, G. E., Hoel, L. A. (1979). Public transportation: planning, operations, and management, Prentice – hall.
https://books.google.com/books/about/Public_Transportation.html?id=uo4iAQAAMAAJ

Hughes-Cromwick, M. P. (2018). 2017 Public Transportation Factbook. American Public Transportation Association, American Public Transportation Association, Washington, DC.

Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., Muñoz, J.C. (2015). Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. Transportation Research Part B: Methodological, 77: 38–75.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261515000454

Lee, J. W., Kim, S. H. (2000). Using Analytic Network Process and Goal Programming for

carbon emission of regional logistics. Sustainability (Switzerland), 7: 9140–9159.
https://www.researchgate.net/publication/281889079_Spatial_Distribution_of_Energy_Consumption_and_Carbon_Emission_of_Regional_Logistics

Xu, X., Chen, A., Yang, C. (2016). A review of sustainable network design for road networks, KSCE Journal of Civil Engineering, 20 (3): 1084–1098.
https://www.researchgate.net/publication/297741217_A_review_of_sustainable_network_design_for_road_networks

Yu, B., Kong, L., Sun, Y., Yao, B., Gao, Z. (2015). A bi-level programming for bus lane network design. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55: 310–327.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X15000698

Mo, Y. K., Wang, K., Lv, S. (2015). Bus priority network design based on bi-level programming. Applied Mechanics and Materials, 744–746: 1782–1785.
https://www.researchgate.net/publication/277579083_Bus_Priority_Network_Design_Based_on_Bi-Level_Programming

Yatskiv, I., Budilovich, E. (2017). A comprehensive analysis of the planned multimodal public transportation HUB, Transportation research procedia, 24: 50-57.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517303484

Zhang, L., Lu, J., Fu, B.-B., Li, S.-B. (2018). A Review and Prospect for the Complexity and Resilience of Urban Public Transit Network Based on Complex Network Theory. Complexity 2018, 1–36.
https://www.researchgate.net/publication/329421592_A_Review_and_Prospect_for_the_Complexity_and_Resilience_of_Urban_Public_Transit_Network_Based_on_Complex_Network_Theory

Shi, A., Haiqiang, Y., Jian, W., Na, C., Jianxun, C. (2016). Mining urban recurrent congestion evolution patterns from GPS-equipped vehicle mobility data, Information Sciences, 373: 515-526.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025516304546

Teodorovic, D., Janic, M., (2016). Transportation Engineering Theory, Practice and Modeling. Butterworth-Heinemann.
https://www.researchgate.net/publication/317973766_Transportation_engineering_Theory_practice_and_modeling

Tabti-Talamali, A., Baouni, T. (2018). Public transportation in Algiers: Towards a new governance approach, Case Studies on Transport Policy,6 (4):706-715.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213624X17300044

Ji, J., Gao, X. (2010). Analysis of people's satisfaction with public transportation in Beijing, Habitat International, 34 (4): 464-470.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0197397509001167

Jia, C. L., Ma, R. C., Ha, Z. H. (2019). Urban Transit Network Properties Evaluation and Optimization Based on Complex Network Theory, Journal of sustainability, 11 (7): 1-16.
https://www.researchgate.net/publication/332216911_Urban_Transit_Network_Properties_Evaluation_and_Optimization_Based_on_Complex_Network_Theory

Wang, K., Fu, X. (2017). Research on Centrality of Urban Transport Network Nodes. In Materials Science, Energy Technology, and Power Engineering I; You, Z., Xiao, J., Tan, Z., Eds.; AIP Publishing: Melville, NY, USA, 1839 (1):1-5.
https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4982546

Xiao, F., Hu, Z.H., Wang, K.X., Fu, P.H. (2015). Spatial distribution of energy consumption and

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی