

استخراج و اولویت‌بندی اجرایی شبکه پیوسته ایستگاه‌های فعال دوچرخه اشتراکی با استفاده از الگوریتم درخت پوشای کمینه (مطالعه موردی: کلان‌شهر مشهد)

مقاله علمی - پژوهشی

*علی توکلی کاشانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمدرضا باقری دلوئی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
میرمحمد رضا حسینی قاضی‌ولوئی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Alitavakoli@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۴۰۲-۳۸۹

چکیده

سامانه‌های دوچرخه اشتراکی زمانی می‌توانند نقش مؤثری در جابه‌جایی‌های شهری ایفا کنند که ایستگاه‌ها و مسیرهای دوچرخه در قالب یک شبکه پیوسته به یکدیگر متصل باشند. در شهر مشهد، بخشی از زیرساخت دوچرخه‌سواری به‌صورت پراکنده توسعه یافته و ارتباط کامل آن با ایستگاه‌های فعال سامانه برقرار نیست. این پژوهش با هدف استخراج حداقل شبکه موردنیاز برای اتصال ایستگاه‌های فعال دوچرخه اشتراکی مشهد و اولویت‌بندی مسیرهای آن بر اساس تقاضای سفر انجام شد. روش تحقیق مبتنی بر تحلیل شبکه، داده‌های مکانی و ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت‌شده بود. پس از پالایش شبکه معابر و انطباق ایستگاه‌ها با گره‌های مجاز، شبکه به گراف تبدیل و با استفاده از الگوریتم درخت پوشای کمینه، مسیرهای لازم برای اتصال تمامی ایستگاه‌های فعال با حداقل طول استخراج شد. سپس ماتریس مبدأ-مقصد بر روی شبکه بارگذاری و مسیرها بر اساس میزان پوشش سفرها در سه سطح اولویت دسته‌بندی شدند. نتایج نشان داد طول شبکه پیشنهادی ۱۹۰٫۳ کیلومتر است که به‌ترتیب ۴۸٫۹، ۵۰٫۶ و ۹۰٫۸ کیلومتر آن در اولویت‌های اول تا سوم قرار می‌گیرد. همچنین شاخص بتا از ۰٫۷۰۶ به ۱٫۰۰۰ افزایش یافت و عدد سیکلوماتیک از ۲ به صفر کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده ایجاد شبکه‌ای پیوسته و بدون چرخه مستقل است. نتایج بیانگر آن است که ترکیب الگوریتم درخت پوشای کمینه و ماتریس مبدأ-مقصد می‌تواند روشی کاربردی برای تعیین حداقل شبکه اتصال و شناسایی مسیرهای دارای اولویت اجرایی بالاتر فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: دوچرخه اشتراکی، شبکه اتصال حداقلی، شبکه پیوسته، درخت پوشای کمینه، ماتریس مبدأ-مقصد

۱- مقدمه

ایستگاه‌های مترو، اتوبوس و دیگر خدمات شهری را آسان‌تر کند (Institute for & Development, 2018). راهنماهای جدید طراحی مسیر دوچرخه نیز تأکید می‌کنند که برنامه‌ریزی برای استفاده از دوچرخه نباید به چند مسیر جدا از هم محدود شود؛ بلکه باید بر ایجاد شبکه‌ای ایمن، خوانا،

دوچرخه اشتراکی زمانی می‌تواند در سفرهای شهری نقش حمل‌ونقلی داشته باشد که ایستگاه‌ها، مسیرهای ایمن دوچرخه و مراکز جذب سفر به‌صورت یک شبکه پیوسته عمل کنند. در چنین شرایطی، دوچرخه اشتراکی می‌تواند بخشی از سفرهای کوتاه و میان‌برد را پوشش دهد و دسترسی به

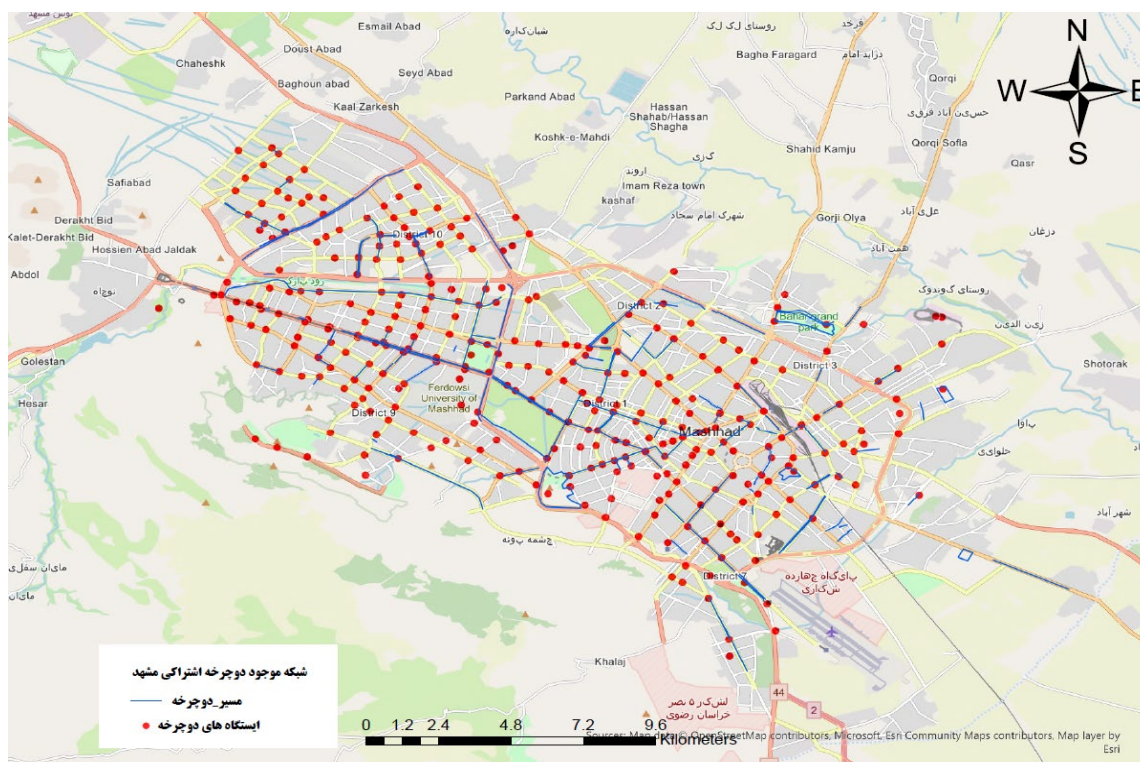
وضع موجود تمرکز دارد. هدف اصلی، استخراج شبکه اتصال حداقلی برای اتصال ایستگاه‌های فعال بایدو با کمترین مجموع طول مسیر و با استفاده از ظرفیت مسیرهای موجود است.

این انتخاب به این دلیل انجام شد که پیش از توسعه سامانه، باید مشخص شود ایستگاه‌های فعال فعلی چگونه می‌توانند از طریق یک شبکه پیوسته به یکدیگر و به مسیرهای موجود متصل شوند. برای پاسخ به این مسئله، شبکه معابر شهر به یک گراف ریاضی تبدیل شد. در این گراف، گرہ‌ها نماینده ایستگاه‌ها و نقاط اتصال شبکه، و یال‌ها نماینده قطعات قابل پیمایش معابر هستند. سپس از الگوریتم درخت پوشای کمینه برای استخراج مجموعه‌ای از مسیرها استفاده شد که همه ایستگاه‌های هدف را با کمترین مجموع طول به هم متصل کند و مسیرهای حلقه‌ای یا موازی غیرضروری تولید نکند (Network, 2026).

از آنجا که کوتاه‌ترین اتصال از نظر طول مسیر، الزاماً مهم‌ترین مسیر از نظر استفاده روزانه نیست، در مرحله بعد ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت شده به شبکه افزوده شد تا مسیرها بر اساس حجم تبادل سفر، ارزش‌گذاری و اولویت‌بندی اجرایی شوند (Cascetta, 2009).

پیوسته و قابل استفاده برای گروه‌های مختلف کاربران متمرکز باشد (Federal Highway, 2019; National Association of City Transportation, 2025).

در کلان‌شهر مشهد، مسئله اصلی این پژوهش کمبود مطلق مسیر یا ایستگاه نیست؛ مسئله اصلی، نبود پیوستگی کافی میان مسیرهای موجود و ایستگاه‌های فعال است. هنگامی که مسیرهای دوچرخه به صورت قطعات جدا از هم اجرا شوند، بخشی از شبکه در عمل برای سفرهای روزانه قابل استفاده نخواهد بود. در این وضعیت، حتی اگر تعداد ایستگاه‌ها افزایش یابد، نبود اتصال مناسب میان ایستگاه‌ها و مسیرهای ایمن می‌تواند کارایی سامانه را محدود کند. مطالعات شبکه‌های دوچرخه نیز نشان داده‌اند که پیوستگی و مستقیم‌بودن مسیرها از عوامل مهم در افزایش قابلیت استفاده از زیرساخت دوچرخه هستند (Buehler & Dill, 2016; Schoner & Levinson, 2014). موقعیت مسیرهای ویژه دوچرخه و ایستگاه‌های فعال بایدو در وضع موجود در شکل (۱) نشان داده شده است. بر این اساس، این پژوهش به جای پیشنهاد ایستگاه‌های جدید یا افزایش تعداد دوچرخه‌ها، بر ساماندهی



شکل ۱. مسیرهای ویژه دوچرخه و ایستگاه‌های فعال بایدو در وضع موجود شهر مشهد

پرسش اصلی پژوهش این است: چگونه می‌توان ایستگاه‌های فعال بایده در شهر مشهد را با کمترین مجموع طول مسیر به یک شبکه پیوسته متصل کرد و سپس بخش‌های مختلف این شبکه را بر اساس تقاضای واقعی سفر اولویت‌بندی نمود؟ پاسخ به این پرسش می‌تواند مبنایی روشن برای تصمیم‌گیری اجرایی فراهم کند؛ زیرا ابتدا حداقل اتصال مورد نیاز را مشخص می‌کند و سپس نشان می‌دهد کدام بخش‌ها، بر اساس داده‌های سفر، در اولویت بالاتری برای اجرا قرار می‌گیرند.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات مربوط به شبکه‌های زیرساخت دوچرخه نشان می‌دهد که وجود مسیر دوچرخه به تنهایی برای افزایش استفاده از دوچرخه کافی نیست. آنچه در عمل اهمیت دارد، پیوستگی مسیرها، دسترسی مناسب به ایستگاه‌ها، کیفیت اتصال میان نقاط اصلی سفر و امکان استفاده ایمن از شبکه است. شونر و لوینسون با بررسی شبکه‌های زیرساخت دوچرخه در ۷۴ شهر آمریکا نشان دادند که ساختار شبکه و میزان پیوستگی آن با سطح استفاده از دوچرخه ارتباط دارد (Schoner & Levinson, 2014). بولر و دیل نیز در مرور پژوهش‌های مرتبط با شبکه‌های زیرساخت دوچرخه گزارش کردند که بیشتر مطالعات، میان کیفیت شبکه مسیرهای دوچرخه و میزان استفاده از دوچرخه رابطه مثبت مشاهده کرده‌اند (Buehler & Dill, 2016). این یافته‌ها نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی برای استفاده از دوچرخه باید از اجرای مسیرهای جدا از هم به سمت تحلیل شبکه‌ای حرکت کند.

برای تحلیل شبکه‌ای، لازم است معابر شهری به صورت یک شبکه قابل محاسبه تعریف شوند. در این رویکرد، تقاطع‌ها و ایستگاه‌ها به عنوان گره، و قطعات معبر به عنوان یال در نظر گرفته می‌شوند. چنین مدلی امکان محاسبه شاخص‌های پیوستگی، طول مسیر، تعداد اتصالات و مسیرهای جایگزین را فراهم می‌کند. کوپر و کیارادیا در معرفی ابزار «تحلیل شبکه خیابانی» (اس‌دی‌ان‌ای) نشان داده‌اند که تحلیل شبکه‌ای می‌تواند برای سنجش ساختار فضایی معابر در برنامه‌ریزی شهری و حمل‌ونقل به کار رود (Cooper & Chiaradia, 2020). بر همین مبنا، استفاده از تئوری گراف در برنامه‌ریزی مسیرهای دوچرخه، امکان بررسی شبکه را از سطح مشاهده نقشه به سطح

تحلیل کمی منتقل می‌کند.

بخشی از مطالعات جدید بر رشد مرحله‌ای شبکه‌های دوچرخه تمرکز کرده‌اند. ناترا اورو سکو و همکاران راهبردهای داده‌محور برای گسترش شبکه دوچرخه را بررسی کردند و نشان دادند که افزودن هدفمند پیوندهای جدید می‌تواند پیوستگی شبکه را با مداخله محدود افزایش دهد (Natera Orozco et al., 2020). سل و همکاران نیز با بررسی رشد شبکه‌های دوچرخه در ۶۲ شهر نشان دادند که توسعه قطعه‌ای و بدون توجه به ساختار شبکه، می‌تواند بازدهی سرمایه‌گذاری را کاهش دهد (Szell et al., 2022). این مطالعات برای پژوهش حاضر اهمیت دارند، زیرا نشان می‌دهند که تصمیم‌گیری درباره مسیرهای جدید باید با توجه به ساختار کل شبکه انجام شود، نه فقط بر اساس کوتاه‌ترین اتصال‌های موضعی.

گروه دیگری از پژوهش‌ها، مسئله طراحی شبکه دوچرخه را از دید محدودیت منابع و هزینه اجرا بررسی کرده‌اند. شوی و چان مسئله طراحی شبکه مسیر دوچرخه با گره‌های منتخب را مدل‌سازی کردند و نشان دادند که انتخاب مسیرها باید با توجه به محدودیت بودجه و لزوم اتصال گره‌های هدف انجام شود (Shui & Chan, 2019). در همین راستا، استفاده از الگوریتم‌هایی مانند درخت پوشای کمینه زمانی قابل دفاع است که هدف پژوهش، استخراج یک شبکه اتصال حداقلی میان گره‌های مشخص باشد. این الگوریتم برای انتخاب مجموعه‌ای از یال‌ها به کار می‌رود که همه گره‌های هدف را با کمترین مجموع وزن به هم متصل کند و حلقه اضافی ایجاد نکند (Network, 2026). بنابراین، درخت پوشای کمینه برای استخراج شبکه اتصال حداقلی مناسب است؛ اما به تنهایی برای ارزیابی کیفیت کامل شبکه مسیرهای دوچرخه کافی نیست، زیرا عواملی مانند ایمنی، راحتی، شیب، عرض معبر، تعارض با ترافیک موتوری و دسترسی به حمل‌ونقل عمومی نیز باید در مراحل بعدی بررسی شوند (Federal Highway, 2019; National Association of City Transportation, 2025).

با وجود اهمیت اتصال فیزیکی، طراحی شبکه بدون توجه به تقاضای سفر می‌تواند به اولویت‌بندی نادرست منجر شود. در تحلیل سامانه‌های حمل‌ونقل، ماتریس مبدأ-مقصد یکی از ابزارهای اصلی برای شناخت جهت و حجم جریان سفر است

در این پژوهش، هدف، طراحی شبکه کامل استفاده از دوچرخه در شهر نیست. هدف، استخراج شبکه اتصال حداقلی است که ایستگاه‌های فعال موجود را به هم متصل کند و نشان دهد کدام مسیرها، بر اساس داده‌های سفر، در اولویت اجرایی بالاتری قرار می‌گیرند. به همین دلیل، پیشنهاد ایستگاه‌های جدید و توسعه آتی سامانه در این مقاله بررسی نشده است.

روش پژوهش در دو مرحله تحلیلی انجام شد. در مرحله نخست، شبکه معابر شهر مشهد پس از پالایش مکانی به گراف ریاضی تبدیل شد.

در این گراف، نقاط اتصال و ایستگاه‌ها به‌عنوان گره و قطعات قابل پیمایش معابر به‌عنوان یال تعریف شدند. سپس با استفاده از الگوریتم درخت پوشای کمینه، مجموعه‌ای از مسیرها استخراج شد که ایستگاه‌های فعال را با کمترین مجموع طول مسیر به هم متصل می‌کند (Network, 2026). در این مرحله، معیار اصلی تصمیم‌گیری، طول مسیر بود و داده‌های تقاضای سفر وارد انتخاب مسیرها نشدند.

در مرحله دوم، ماتریس مبدأ مقصد سفرهای ثبت‌شده به شبکه استخراج‌شده افزوده شد. هدف از این کار، تشخیص ارزش عملکردی بخش‌های مختلف شبکه بود. مسیرهایی که در اتصال زوج ایستگاه‌های دارای تبادل سفر بیشتر نقش داشتند، وزن عملکردی بالاتری دریافت کردند و در اولویت اجرایی بالاتری قرار گرفتند (Cascetta, 2009; Lovelace et al., 2017). بنابراین، خروجی نهایی فقط یک شبکه متصل نیست؛ بلکه شبکه‌ای است که بخش‌های آن بر اساس میزان استفاده ثبت‌شده در سامانه، رتبه‌بندی شده‌اند.

۳-۱- راهبرد کلی مدل‌سازی شبکه پیوسته

راهبرد اصلی پژوهش، جداکردن مسئله «اتصال فیزیکی ایستگاه‌ها» از مسئله «اولویت اجرایی مسیرها» است. این جداسازی لازم است، زیرا کوتاه‌ترین مسیر برای اتصال ایستگاه‌ها الزاماً مسیر دارای بیشترین تقاضای سفر نیست. از سوی دیگر، استفاده مستقیم از ماتریس تقاضا برای طراحی مسیرها می‌تواند بدون توجه به محدودیت طول مسیر و پیوستگی شبکه، به پیشنهاد مسیرهای پراکنده یا پرهزینه منجر شود. بر این اساس، ابتدا ساختار فیزیکی شبکه بر پایه طول مسیر و اتصال ایستگاه‌های فعال استخراج شد. در این مرحله،

(Cascetta, 2009). لاولیس و همکاران در توسعه ابزار «تمایل به استفاده از دوچرخه» نشان دادند که داده‌های مبدأ مقصد می‌تواند برای شناسایی مسیرهای دارای ظرفیت بالاتر برای استفاده از دوچرخه به کار روند (Lovelace et al., 2017). لوکاس و آندراده نیز در مطالعه سامانه دوچرخه اشتراکی لیسبون نشان دادند که پیش‌بینی تقاضای ساعتی میان مبدأ و مقصد، برای مدیریت و برنامه‌ریزی سامانه‌های دوچرخه اشتراکی اهمیت دارد (Lucas & Andrade, 2021). مطالعات جدیدتر مانند پائولسن و ریچ نیز نشان می‌دهند که توسعه شبکه دوچرخه باید علاوه بر هزینه اجرا، اثر مسیرها بر زمان سفر و رفاه کاربران را در نظر بگیرد (Paulsen & Rich, 2023).

جمع‌بندی این پیشینه نشان می‌دهد که دو رویکرد اصلی در مطالعات پیشین وجود دارد. رویکرد نخست بر ساختار شبکه و اتصال میان گره‌ها تمرکز دارد و معمولاً از مفاهیم تئوری گراف و الگوریتم‌های شبکه استفاده می‌کند. رویکرد دوم بر تقاضای سفر، جریان مبدأ مقصد و اثر مسیرها بر استفاده واقعی از شبکه تأکید دارد. پژوهش حاضر این دو رویکرد را در یک چارچوب عملیاتی ترکیب می‌کند: ابتدا شبکه اتصال حداقلی برای اتصال ایستگاه‌های فعال با کمترین مجموع طول مسیر استخراج می‌شود؛ سپس همین شبکه استخراج‌شده با استفاده از ماتریس مبدأ مقصد سفرهای ثبت‌شده ارزش‌گذاری و اولویت‌بندی اجرایی می‌شود. این چارچوب، ادعای طراحی کامل شبکه استفاده از دوچرخه را مطرح نمی‌کند؛ بلکه ابزاری برای ساماندهی وضع موجود و تعیین مسیرهای دارای اولویت بالاتر در شبکه دوچرخه اشتراکی مشهد ارائه می‌دهد.

۳-۲ روش تحقیق

روش این پژوهش برای پاسخ به یک مسئله مشخص طراحی شده است: ایستگاه‌های فعال دوچرخه اشتراکی در شهر مشهد چگونه می‌توانند با کمترین مجموع طول مسیر به یک شبکه پیوسته متصل شوند و سپس بخش‌های مختلف این شبکه بر اساس تقاضای ثبت‌شده سفر اولویت‌بندی شوند؟ برای پاسخ به این پرسش، از ترکیب تحلیل شبکه، سامانه اطلاعات مکانی و الگوریتم درخت پوشای کمینه استفاده شد.

الگوریتم درخت پوشای کمینه برای کاهش مجموع طول مسیرهای لازم و حذف حلقه‌های اضافی به کار رفت. سپس، پس از مشخص شدن شبکه اتصال حداقلی، داده‌های مبدأ-مقصد برای ارزش‌گذاری مسیرها استفاده شد. این ترتیب باعث شد که مدل، ابتدا حداقل اتصال مورد نیاز را مشخص کند و سپس بخش‌های مهم‌تر شبکه را بر اساس سفرهای ثبت شده شناسایی کند. این روش برای شرایطی مناسب است که مدیریت شهری بخواهد پیش از توسعه جدید، وضعیت فعلی سامانه را ساماندهی کند. در چنین شرایطی، مسئله اصلی این نیست که همه معابر شهر وارد شبکه استفاده از دوچرخه شوند؛ بلکه باید مشخص شود کدام مسیرها برای اتصال ایستگاه‌های فعال ضروری‌اند و کدام بخش‌ها بر اساس تقاضای واقعی، زودتر باید اجرا یا تکمیل شوند.

۳-۲- آماده‌سازی داده‌های مکانی و ساخت گراف شبکه

برای اجرای مدل، ابتدا داده‌های مکانی و داده‌های سفر در یک پایگاه داده واحد آماده شد. داده‌های ورودی شامل سه بخش اصلی بود: شبکه معابر شهر مشهد، مسیرهای ویژه دوچرخه موجود، و ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت‌شده در سامانه بایدو. شبکه معابر، بستر اصلی محاسبات را تشکیل داد؛ مسیرهای ویژه دوچرخه موجود به عنوان زیرساخت ساخته شده در مدل لحاظ شد؛ و ماتریس مبدأ-مقصد برای ارزش‌گذاری مسیرها در مرحله بعدی استفاده شد.

در گام بعد، شبکه معابر به گراف ریاضی تبدیل شد. در این گراف، گره‌ها نماینده تقاطع‌ها، ایستگاه‌ها و نقاط اتصال شبکه هستند و یال‌ها قطعات قابل پیمایش معابر را نشان می‌دهند. برای هر یال، طول فیزیکی مسیر به عنوان هزینه پیمایش تعریف شد. این تعریف باعث شد که مدل بتواند اتصال میان ایستگاه‌ها را بر اساس مجموع طول مسیرها محاسبه کند.

مختصات ثبت شده ایستگاه‌های فعال، در بسیاری از موارد دقیقاً روی خط معبر قرار نداشت. برای کاهش این خطا، هر ایستگاه به نزدیک‌ترین گره مجاز در شبکه معابر منطبق شد. این کار با استفاده از روش جست‌وجوی نزدیک‌ترین همسایه در کتابخانه SciPy انجام شد (SciPy, 2026). پس از این مرحله، هر ایستگاه به عنوان یک نقطه قابل استفاده در گراف تعریف شد.

و امکان محاسبه مسیر میان ایستگاه‌ها فراهم گردید. برای جلوگیری از نادیده گرفتن مسیرهای ویژه دوچرخه موجود، این مسیرها به صورت یک لایه جداگانه وارد گراف شدند. سپس هزینه پیمایش روی این مسیرها در مدل کاهش داده شد تا در صورت امکان، مسیرهای ساخته شده در شبکه استخراج شده مورد استفاده قرار گیرند. هدف از این کار، استفاده از سرمایه‌گذاری قبلی مدیریت شهری و پرهیز از پیشنهاد مسیرهای موازی در کنار مسیرهای قابل استفاده موجود بود.

پیش از اجرای الگوریتم، معابر نامناسب از شبکه محاسباتی کنار گذاشته شدند. مسیرهای داخل پارک‌ها، معابر محلی کم‌عرض، مسیرهای با دسترسی محدود و قطعاتی که برای نقش حمل‌ونقلی شبکه استفاده از دوچرخه مناسب نبودند، در محاسبات اصلی استفاده نشدند. این پالایش به این دلیل انجام شد که شبکه اتصال حداقلی باید بر مسیرهایی متکی باشد که قابلیت استفاده روزانه و امکان بررسی اجرایی داشته باشند. انتخاب نهایی مسیر دوچرخه در مرحله اجرا همچنان نیازمند بررسی جزئیاتی مانند عرض معبر، سرعت و حجم ترافیک، ایمنی تقاطع‌ها و تعارض با توقف حاشیه‌ای است.

در این پژوهش، ایستگاه‌هایی که دسترسی عمومی نداشتند یا از نظر کاربری با شبکه عمومی سامانه تفاوت داشتند، از فهرست گره‌های هدف حذف شدند. به طور مشخص، ایستگاه‌های ویژه بانوان در محاسبه شبکه اتصال حداقلی وارد نشدند؛ زیرا هدف مقاله، استخراج شبکه‌ای برای اتصال ایستگاه‌های عمومی و قابل استفاده برای همه کاربران سامانه بود. این حذف به معنای کم‌اهمیت بودن این ایستگاه‌ها نیست؛ بلکه به دلیل تفاوت در دامنه استفاده و منطق دسترسی آن‌ها انجام شد. خروجی این مرحله، یک گراف آماده برای تحلیل شبکه بود. در این گراف، ایستگاه‌های فعال به نقاط معتبر شبکه متصل شده‌اند، مسیرهای موجود دوچرخه در محاسبات لحاظ شده‌اند، و معابر نامناسب از مسیرهای قابل انتخاب حذف شده‌اند. این گراف مبنای اجرای الگوریتم درخت پوشای کمینه در بخش بعدی است.

۳-۳- استخراج شبکه پیوسته با الگوریتم درخت پوشای

کمینه

پس از آماده‌سازی گراف شبکه، مرحله بعد انتخاب مجموعه‌ای

۳-۴- ارزش‌گذاری و اولویت‌بندی اجرایی مسیرها بر

اساس ماتریس مبدأ-مقصد

شبکه اتصال حداقلی که در مرحله قبل استخراج شد، همه ایستگاه‌های فعال را با کمترین مجموع طول مسیر به هم متصل می‌کند. با این حال، همه بخش‌های این شبکه از نظر میزان استفاده یکسان نیستند. ممکن است یک مسیر از نظر طول، بخشی از اتصال حداقلی شبکه باشد، اما حجم سفر کمی از آن عبور کند. در مقابل، بخشی دیگر از شبکه ممکن است میان ایستگاه‌هایی قرار گیرد که تبادل سفر بیشتری دارند. به همین دلیل، پس از استخراج شبکه اتصال حداقلی، ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت شده برای ارزش‌گذاری مسیرها وارد مدل شد.

ماتریس مبدأ-مقصد نشان می‌دهد در بازه زمانی مطالعه، چه تعداد سفر میان هر زوج ایستگاه ثبت شده است. در این پژوهش، هر مقدار غیرصفر در ماتریس به‌عنوان یک تقاضای مشاهده شده میان دو ایستگاه در نظر گرفته شد. سپس مسیر میان همان دو ایستگاه در شبکه استخراج شده شناسایی شد و مقدار تقاضا به همه قطعات واقع در آن مسیر افزوده شد. با تکرار این کار برای همه زوج‌های مبدأ و مقصد، حجم عبوری هر قطعه مسیر محاسبه شد. فرایند محاسبه وزن عملکردی هر قطعه مسیر در رابطه (۲) تعریف شد.

(۲)

$$F_e = \sum_{k=1}^m q_k \delta_{ek}$$

در این رابطه، F_e وزن عملکردی قطعه مسیر e ، تعداد q_k سفرهای ثبت شده برای زوج مبدأ-مقصد k ، و δ_{ek} متغیر صفر و یک است. اگر قطعه مسیر e در مسیر اتصال زوج مبدأ-مقصد k قرار داشته باشد، مقدار δ_{ek} برابر یک است؛ در غیر این صورت، مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، وزن هر قطعه مسیر برابر مجموع سفرهایی است که از آن قطعه عبور می‌کنند. در این رابطه، m تعداد کل زوج‌های مبدأ-مقصد بررسی شده است. از آنجا که خروجی الگوریتم درخت پوشای کمینه ساختاری بدون چرخه دارد، میان هر دو ایستگاه در شبکه مینا یک مسیر مشخص وجود دارد. این ویژگی باعث شد که بارگذاری تقاضا روی شبکه با ابهام کمتری انجام شود؛ زیرا

از مسیرها بود که ایستگاه‌های فعال را به یکدیگر متصل کند. در این پژوهش، این مسئله به صورت یک مسئله در تئوری گراف تعریف شد. گراف آماده شده به صورت $G = (V, E, W)$ در نظر گرفته شد؛ در آن، V مجموعه گره‌ها، E مجموعه یال‌های قابل پیمایش، و W وزن یال‌هاست. وزن هر یال برابر طول فیزیکی همان قطعه از معبر تعریف شد.

هدف این مرحله، کمینه کردن مجموع طول مسیرهای لازم برای اتصال ایستگاه‌های فعال بود. برای این منظور از الگوریتم درخت پوشای کمینه استفاده شد. این الگوریتم، از میان یال‌های موجود در گراف، مجموعه‌ای را انتخاب می‌کند که گره‌های هدف را به هم متصل کند، مجموع وزن یال‌های انتخاب شده را کاهش دهد و چرخه ایجاد نکند. در این پژوهش، گره‌های هدف همان ایستگاه‌های فعال عمومی سامانه بودند.

تابع هدف این مرحله به صورت رابطه (۱) تعریف شد.

(۱)

$$\min Z = \sum_{e \in T} w_e$$

که در آن، T مجموعه یال‌های انتخاب شده در شبکه مینا و w_e طول فیزیکی یال e است. این رابطه نشان می‌دهد که معیار انتخاب مسیر در این مرحله، طول مسیر بوده است. بنابراین، داده‌های تقاضای سفر در انتخاب اولیه مسیرها دخالت داده نشدند.

خروجی این مرحله، یک شبکه اتصال حداقلی برای اتصال ایستگاه‌های فعال است. این شبکه همه ایستگاه‌های هدف را در یک ساختار پیوسته قرار می‌دهد و از ایجاد مسیرهای حلقه‌ای در سطح محاسباتی جلوگیری می‌کند. با این حال، این خروجی به معنای تأیید نهایی همه مسیرها برای اجرا نیست. مسیرهای انتخاب شده باید در مرحله بررسی اجرایی از نظر عرض معبر، ایمنی عبور دوچرخه، سرعت و حجم ترافیک، کیفیت تقاطع‌ها، وضعیت توقف حاشیه‌ای و امکان اجرای مسیر ایمن کنترل شوند. به همین دلیل، نقش الگوریتم درخت پوشای کمینه در این پژوهش محدود و مشخص است: این الگوریتم شبکه اتصال حداقلی میان ایستگاه‌های فعال را استخراج می‌کند. سپس در مرحله بعد، همین شبکه استخراج شده با استفاده از ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت شده ارزش‌گذاری می‌شود تا مشخص شود کدام بخش‌ها برای اجرا در اولویت بالاتری قرار دارند.

ثبت شده دارد.

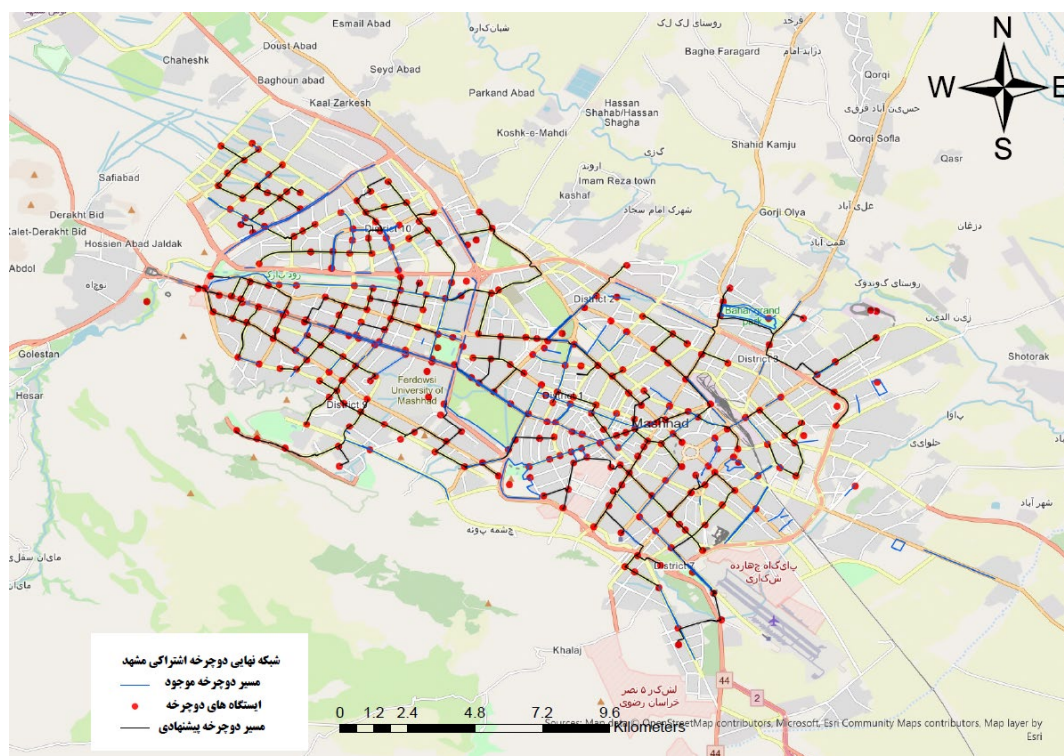
۴- نتایج

۴-۱- استخراج و نمایش شبکه پیوسته

پس از آماده سازی داده های مکانی و ساخت گراف شبکه معابر، الگوریتم درخت پوشای کمینه برای استخراج شبکه اتصال حداقلی اجرا شد. در این مرحله، هدف اصلی، اتصال ایستگاه های فعال دوچرخه اشتراکی با کمترین مجموع طول مسیر بود. وزن هر یال در گراف برابر طول فیزیکی همان قطعه از معبر در نظر گرفته شد. بنابراین، خروجی این مرحله شبکه ای است که ایستگاه های فعال را به یکدیگر متصل می کند و از ایجاد چرخه های اضافی در سطح محاسباتی جلوگیری می کند.

برای هر زوج مبدأ و مقصد، تنها یک مسیر در شبکه مبنا انتخاب می شود. این موضوع محاسبه وزن عبوری هر قطعه مسیر را ساده تر و قابل تکرار می کند.

پس از محاسبه وزن عملکردی قطعات مسیر، مسیرهای شبکه بر اساس مقدار تقاضای عبوری رتبه بندی شدند. قطعاتی که حجم سفر بیشتری عبور می کرد، در اولویت اجرایی بالاتری قرار گرفتند. قطعاتی که نقش کمتری در پوشش سفرهای ثبت شده داشتند، در اولویت های بعدی قرار گرفتند. این اولویت بندی به معنای حذف مسیرهای کم تقاضا نیست؛ بلکه نشان می دهد در صورت محدودیت منابع، کدام بخش ها بر اساس داده های موجود زودتر باید بررسی، طراحی تفصیلی یا اجرا شوند. خروجی این مرحله، شبکه استخراج شده ارزش گذاری شده است. این خروجی نشان می دهد هر بخش از شبکه، علاوه بر نقش اتصالی، چه سهمی در پوشش سفرهای



شکل ۲. خروجی نهایی شبکه مبنا برای مسیرهای دوچرخه سواری اشتراکی شهر مشهد

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، مسیرهای شبکه استخراج‌شده به سه سطح اولویت اجرایی تقسیم شده‌اند. مسیرهای اولویت نخست در بخش‌هایی قرار دارند که سهم بیشتری در اتصال ایستگاه‌های پرتردد دارند. مسیرهای اولویت دوم، نقش تکمیل‌کننده در اتصال بخش‌های دارای تقاضای متوسط را بر عهده دارند. مسیرهای اولویت سوم نیز برای کامل‌شدن شبکه و اتصال ایستگاه‌های باقی‌مانده لازم‌اند، اما بر اساس داده‌های ثبت شده، تقاضای عبوری کمتری نسبت به دو سطح دیگر دارند.

بر اساس جدول (۱)، حدود ۴۸٫۹ کیلومتر از شبکه در اولویت نخست قرار گرفته است. این مقدار نزدیک به یک‌چهارم طول کل شبکه استخراج‌شده است. این بخش‌ها از نظر داده‌های ثبت‌شده، سهم بیشتری در اتصال زوج ایستگاه‌های پرتردد دارند. بنابراین، در صورت محدودیت منابع، بررسی طراحی تفصیلی و امکان اجرای این مسیرها می‌تواند زودتر از سایر بخش‌ها انجام شود.

اولویت دوم با طول ۵۰٫۶ کیلومتر، بخش‌هایی از شبکه را شامل می‌شود که نقش مکمل دارند. این مسیرها به‌تنهایی مهم‌ترین محورهای تبادل سفر نیستند، اما برای پیوستگی شبکه و اتصال ایستگاه‌های دارای تقاضای متوسط به بخش‌های اصلی شبکه لازم‌اند. اجرای این سطح بدون اتصال به مسیرهای اولویت نخست، ممکن است کارایی محدودی داشته باشد.

اولویت سوم با طول ۹۰٫۸ کیلومتر، بیشترین سهم طولی را در شبکه استخراج‌شده دارد. این بخش‌ها برای تکمیل پوشش شبکه و اتصال همه ایستگاه‌های فعال واردشده در مدل لازم‌اند، اما بر اساس داده‌های سفر ثبت‌شده، در اولویت اجرایی پایین‌تری نسبت به دو سطح دیگر قرار می‌گیرند. قرارگیری این مسیرها در اولویت سوم به معنای حذف آن‌ها نیست؛ بلکه نشان می‌دهد نقش آن‌ها در پوشش تقاضای مشاهده‌شده کمتر از مسیرهای اولویت نخست و دوم است.

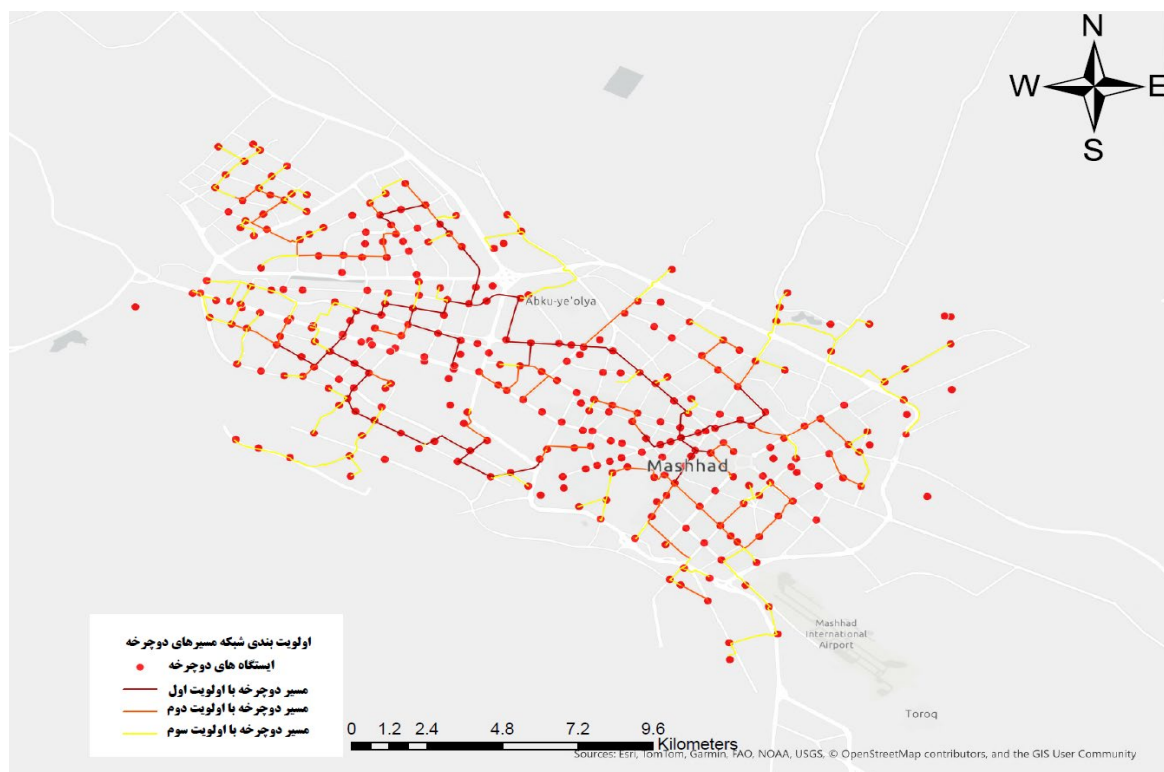
نتیجه این بخش نشان می‌دهد که شبکه استخراج‌شده از نظر طول و نقش اجرایی، ساختاری یکسان ندارد. بخشی از شبکه برای اتصال مسیرهای پرترددتر اهمیت بیشتری دارد و بخش دیگری برای تکمیل پوشش و اتصال همه ایستگاه‌های فعال لازم است. این تفکیک می‌تواند به مدیریت شهری کمک کند که بررسی اجرایی مسیرها را بر اساس شواهد سفر، پیوستگی شبکه و امکان اجرا تنظیم کند.

در این مرحله، داده‌های تقاضای سفر در انتخاب اولیه مسیرها دخالت داده نشدند. دلیل این جدا سازی آن است که ابتدا باید حداقل شبکه لازم برای اتصال ایستگاه‌های فعال مشخص شود. سپس، در مرحله بعد، همین شبکه استخراج‌شده با استفاده از ماتریس مبدأ-مقصد ارزش‌گذاری می‌شود تا بخش‌هایی که نقش بیشتری در پوشش سفرهای ثبت شده دارند، شناسایی شوند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شبکه پیوسته استخراج‌شده از اتصال میان ایستگاه‌های فعال و مسیرهای قابل انتخاب در شبکه معابر به دست آمده است. در این نقشه، نقاط قرمز موقعیت ایستگاه‌های دوجرخه اشتراکی را نشان می‌دهند و خطوط شبکه، مسیرهای استخراج‌شده برای اتصال این ایستگاه‌ها را نمایش می‌دهند. همچنین مسیرهای ویژه دوجرخه موجود در نقشه حفظ شده‌اند تا ارتباط خروجی مدل با زیرساخت ساخته‌شده شهر مشخص باشد.

خروجی شکل (۲) نشان می‌دهد که شبکه استخراج‌شده فقط مجموعه‌ای از مسیرهای پراکنده نیست، بلکه یک ساختار پیوسته برای اتصال ایستگاه‌های فعال ارائه می‌کند. این پیوستگی از نظر محاسباتی نتیجه اجرای الگوریتم درخت پوشای کمینه است. با این حال، هر مسیر باید در مرحله طراحی تفصیلی از نظر ایمنی، عرض معبر، وضعیت تقاطع‌ها، سرعت و حجم ترافیک، توقف‌حاشیه‌ای و امکان اتصال به حمل‌ونقل عمومی بررسی شود. بر اساس خروجی مدل، طول کل شبکه استخراج‌شده برای اتصال ایستگاه‌های فعال برابر با ۱۹۰٫۳ کیلومتر برآورد شد. این مقدار، طول شبکه‌ای را نشان می‌دهد که برای ایجاد اتصال میان ایستگاه‌های وارد شده در مدل لازم است. در بخش بعد، همین شبکه بر اساس ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت‌شده ارزش‌گذاری می‌شود تا مسیرها به سطح‌های اولویت اجرایی تقسیم شوند.

۴-۲- اولویت‌بندی اجرایی مسیرها

پس از استخراج شبکه پیوسته، ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت‌شده بر روی شبکه بارگذاری شد. هدف از این مرحله، تعیین نقش هر بخش از شبکه در پوشش سفرهای مشاهده‌شده بود. در این فرایند، مسیرهایی که در اتصال زوج ایستگاه‌های دارای تبادل سفر بیشتر قرار داشتند، وزن عملکردی بالاتری دریافت کردند. سپس مسیرها بر اساس مقدار این وزن در سه سطح اولویت اجرایی دسته‌بندی شدند.



شکل ۲. نقشه شبکه مبنا و سطح های اولویت اجرایی مسیرهای دوچرخه سواری اشتراکی شهر مشهد

جدول ۲. برآورد طول مسیرهای شبکه استخراج شده بر اساس سطح اولویت اجرایی

سطح اولویت اجرایی	مبنای ارزش گذاری	نقش در شبکه استخراج شده	طول مسیر
اولویت اول	عبور از مسیرهای مرتبط با ایستگاه های دارای تبادل سفر بیشتر	اتصال مسیرهای اصلی سفرهای ثبت شده	۴۸٫۹ کیلومتر
اولویت دوم	عبور از مسیرهای مرتبط با ایستگاه های دارای تقاضای متوسط	تکمیل اتصال میان بخش های پرتردد و سایر ایستگاه های فعال	۵۰٫۶ کیلومتر
اولویت سوم	عبور از مسیرهای مرتبط با ایستگاه های دارای تبادل سفر کمتر	افزایش پوشش شبکه و اتصال بخش های باقی مانده	۹۰٫۸ کیلومتر
مجموع شبکه استخراج شده	اتصال همه ایستگاه های فعال وارد شده در مدل	شبکه اتصال حداقلی برای سامانه بایدو	۱۹۰٫۳ کیلومتر

۴-۳- ارزیابی ساختاری شبکه با شاخص های گراف

و شکل کلی شبکه به کار می روند و امکان مقایسه وضعیت موجود با شبکه پیوسته استخراج شده را فراهم می کنند (Kansky, 1963). در این بخش، هدف ارزیابی کیفیت

برای بررسی تغییر ساختار شبکه پس از اجرای مدل، سه شاخص گراف شامل شاخص بتا، شاخص گاما و عدد سیکلوماتیک محاسبه شد. این شاخص ها برای سنجش همبندی

بر اساس جدول (۲)، شاخص بتا در وضعیت موجود برابر ۰,۷۰۶ بوده است. این مقدار نشان می‌دهد شبکه مسیرهای موجود، از نظر نسبت یال به گره، اتصال محدودی داشته و به صورت یک شبکه پیوسته برای اتصال همه ایستگاه‌های هدف عمل نمی‌کرده است. پس از اجرای مدل، مقدار این شاخص به ۱,۰۰۰ رسید. این تغییر نشان می‌دهد شبکه پیوسته استخراج شده به ساختاری نزدیک به اتصال حداقلی میان گره‌های هدف رسیده است.

شاخص گاما نیز از ۰,۲۳۶، در وضعیت موجود به ۰,۳۳۳ در شبکه پیوسته استخراج شده افزایش یافته است. این افزایش نشان می‌دهد تعداد اتصالات شبکه نسبت به ظرفیت نظری یک گراف مسطح بیشتر شده است. با این حال، مقدار ۰,۳۳۳ همچنان نشان‌دهنده شبکه‌ای با اتصال کنترل شده است، نه شبکه‌ای با مسیرهای متعدد و جایگزین‌های فراوان. این نتیجه با هدف پژوهش سازگار است؛ زیرا هدف، استخراج شبکه اتصال حداقلی بود.

عدد سیکلوماتیک در وضعیت موجود برابر ۲ و در شبکه پیوسته استخراج شده برابر صفر محاسبه شد. مقدار صفر نشان می‌دهد شبکه استخراج شده چرخه مستقل ندارد. این نتیجه از نظر محاسباتی با خروجی الگوریتم درخت پوشای کمینه همخوان است. نبود چرخه به کاهش مسیرهای تکراری در شبکه محاسباتی کمک می‌کند، اما هم‌زمان به این معناست که شبکه مسیر جایگزین محدودی دارد. بنابراین، این ویژگی برای استخراج شبکه اتصال حداقلی قابل قبول است، اما برای طراحی نهایی مسیرهای دوطرفه باید همراه با بررسی ایمنی، دسترسی، کیفیت تقاطع‌ها و امکان ایجاد مسیرهای جایگزین در بخش‌های پرتردد ارزیابی شود.

نتیجه این بخش نشان می‌دهد که مدل، وضعیت موجود را از مجموعه‌ای با اتصال محدود به شبکه‌ای پیوسته و بدون چرخه مستقل تبدیل کرده است. این نتیجه فقط در سطح ساختار گراف قابل تفسیر است. برای تصمیم‌گیری اجرایی، این شاخص‌ها باید در کنار طول مسیر، حجم تقاضای عبوری، شرایط معبر و امکان اجرای ایمن مسیر دوطرفه بررسی شوند.

طراحی اجرایی مسیرها نیست؛ بلکه فقط وضعیت اتصال و ساختار ریاضی شبکه بررسی می‌شود.

شاخص بتا از نسبت تعداد یال‌ها به تعداد گره‌ها و بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

(۳)

$$\beta = \frac{e}{v}$$

در این رابطه، e تعداد یال‌ها و v تعداد گره‌های شبکه است. مقدار کمتر از یک معمولاً نشان‌دهنده شبکه‌ای با اتصال محدود یا وجود بخش‌های جدا از هم در شبکه است. مقدار نزدیک به یک، در شبکه‌ای که با هدف اتصال حداقلی گره‌ها طراحی شده، نشان می‌دهد تعداد یال‌ها تقریباً در حد لازم برای برقراری اتصال میان گره‌ها قرار گرفته است.

شاخص گاما نسبت تعداد یال‌های موجود به بیشینه تعداد یال‌های ممکن در یک گراف مسطح را بر اساس رابطه مقابل نشان می‌دهد.

(۴)

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}$$

در این رابطه، e تعداد یال‌های موجود و v تعداد گره‌های شبکه است. مقدار این شاخص بین صفر و یک قرار می‌گیرد. مقدار بالاتر شاخص گاما نشان‌دهنده وجود پیوندهای بیشتر نسبت به ظرفیت نظری شبکه مسطح است. در این پژوهش، افزایش مقدار شاخص گاما به معنای افزایش میزان هم‌بندی شبکه نسبت به وضعیت موجود تفسیر می‌شود؛ با این حال، این افزایش الزاماً به معنای کامل بودن شبکه یا کفایت اجرایی همه مسیرها نیست. عدد سیکلوماتیک تعداد چرخه‌های مستقل شبکه را نشان می‌دهد و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

(۵)

$$\mu = e - v + c$$

در این رابطه، μ عدد سیکلوماتیک، e تعداد یال‌ها، v تعداد گره‌ها و c تعداد مؤلفه‌های متصل شبکه است. اگر مقدار این شاخص صفر باشد، شبکه فاقد چرخه مستقل است. این ویژگی با ماهیت الگوریتم درخت پوشای کمینه سازگار است؛ زیرا این الگوریتم برای اتصال گره‌ها با کمترین طول ممکن و بدون ایجاد چرخه اضافی طراحی شده است.

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های ساختاری وضعیت موجود و شبکه مینا

وضعیت شبکه	شاخص بتا	شاخص گاما	عدد سیکلوماتیک
وضعیت موجود مسیرهای ویژه دوچرخه	۰,۷۰۶	۰,۲۳۶	۲
شبکه استخراج شده	۱,۰۰۰	۰,۳۳۳	۰

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ساماندهی و وضع موجود شبکه دوچرخه اشتراکی در کلان شهر مشهد انجام شد. مسئله اصلی پژوهش، افزایش تعداد ایستگاه یا پیشنهاد مسیرهای جدید نبود؛ بلکه تمرکز بر این بود که ایستگاه‌های فعال سامانه چگونه می‌توانند از طریق یک شبکه پیوسته به یکدیگر متصل شوند و سپس مسیرهای این شبکه بر اساس داده‌های سفر، اولویت اجرایی پیدا کنند. برای پاسخ به این مسئله، ابتدا شبکه معابر و مسیرهای موجود دوچرخه به گراف ریاضی تبدیل شد. سپس با استفاده از الگوریتم درخت پوشای کمینه، شبکه اتصال حداقلی استخراج شد که ایستگاه‌های فعال را با کمترین مجموع طول مسیر به هم متصل می‌کند. در ادامه، ماتریس مبدأ-مقصد سفرهای ثبت شده بر روی این شبکه بارگذاری شد تا مشخص شود هر بخش از شبکه چه نقشی در پوشش سفرهای مشاهده شده دارد.

نتایج نشان داد که طول کل شبکه استخراج شده برای اتصال ایستگاه‌های فعال برابر با ۱۹۰,۳ کیلومتر است. از این مقدار، ۴۸,۹ کیلومتر در اولویت نخست، ۵۰,۶ کیلومتر در اولویت دوم و ۹۰,۸ کیلومتر در اولویت سوم قرار گرفت. قرارگیری ۴۸,۹ کیلومتر از مسیرها در اولویت نخست به این معناست که این بخش‌ها، بر اساس داده‌های ثبت شده، سهم بیشتری در اتصال زوج ایستگاه‌های پرتردد دارند. بنابراین، در صورت محدودیت منابع، این بخش‌ها می‌توانند زودتر وارد بررسی اجرایی، طراحی تفصیلی و کنترل میدانی شوند.

ارزیابی ساختاری شبکه نیز نشان داد که شاخص بتا از ۰,۷۰۶ در وضعیت موجود به ۱,۰۰۰ در شبکه پیوسته استخراج شده افزایش یافته و عدد سیکلوماتیک از ۲ به صفر رسیده است. این نتیجه نشان می‌دهد که خروجی مدل از نظر محاسباتی، یک شبکه پیوسته و بدون چرخه مستقل است. این ویژگی با منطق الگوریتم درخت پوشای کمینه همخوان است. با این حال، این شاخص‌ها فقط وضعیت ساختاری شبکه را نشان می‌دهند و

برای تأیید اجرایی مسیرها کافی نیستند. اجرای هر مسیر باید از نظر عرض معبر، ایمنی حرکت با دوچرخه، سرعت و حجم ترافیک، وضعیت تقاطع‌ها، توقف حاشیه‌ای و امکان اتصال به حمل‌ونقل عمومی بررسی شود. یافته اصلی پژوهش این است که ترکیب درخت پوشای کمینه و ماتریس مبدأ-مقصد می‌تواند روشی روشن برای تفکیک دو تصمیم متفاوت فراهم کند: نخست، تشخیص حداقل شبکه لازم برای اتصال ایستگاه‌های فعال؛ دوم، تعیین بخش‌هایی از شبکه که بر اساس تقاضای ثبت شده در اولویت اجرایی بالاتری قرار دارند. این تفکیک باعث می‌شود تصمیم‌گیری درباره شبکه دوچرخه اشتراکی فقط بر پایه فاصله هندسی یا فقط بر پایه حجم سفر انجام نشود.

نتایج این پژوهش برای مدیریت شهری مشهد می‌تواند در سه سطح کاربرد داشته باشد. نخست، مسیرهای اولویت نخست می‌توانند به عنوان گزینه‌های زودتر برای بررسی اجرایی و طراحی تفصیلی انتخاب شوند. دوم، مسیرهای اولویت دوم می‌توانند برای تکمیل اتصال میان بخش‌های پرتردد و سایر ایستگاه‌های فعال بررسی شوند. سوم، مسیرهای اولویت سوم باید به عنوان بخش‌های تکمیل کننده شبکه حفظ شوند، اما زمان و شیوه اجرای آن‌ها باید با توجه به منابع، ایمنی، شرایط معبر و تغییرات تقاضا تعیین شود.

محدودیت اصلی پژوهش این است که مدل بر داده‌های سفر ثبت شده در سامانه و ساختار شبکه معابر متکی است. بنابراین، نتایج آن باید با برداشت میدانی، ارزیابی ایمنی، بررسی کیفیت سطح مسیر، تحلیل تقاطع‌ها و داده‌های به روز شده سفر تکمیل شود. همچنین، این پژوهش رفتار کاربران بالقوه، کیفیت تجربه سفر، شیب مسیرها و محدودیت‌های دقیق اجرایی هر معبر را به صورت مستقل مدل نکرده است. در پژوهش‌های بعدی می‌توان این عوامل را به مدل افزود و شبکه استخراج شده را با سناریوهای اجرایی و هزینه‌های واقعی ساخت مقایسه کرد.

۶- مراجع

- Natera Orozco, L. G., Battiston, F., Iñiguez, G., & Szell, M. (2020). Data-driven strategies for optimal bicycle network growth. *Royal Society Open Science*, 7(12), 201130.
doi.org/10.1098/rsos.201130
- National Association of City Transportation, O. (2025). *Urban Bikeway Design Guide* (3rd ed.). Island Press.
- Network, X. D. (2026). minimum-spanning_tree - NetworkX documentation.
- Paulsen, M., & Rich, J. (2023). Societally optimal expansion of bicycle networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 174, 102778.
doi.org/10.1016/j.trb.2023.06.002
- Schoner, J. E., & Levinson, D. M. (2014). The missing link: Bicycle infrastructure networks and ridership in 74 US cities. *Transportation*, 41(6), 1187-1204.
doi.org/10.1007/s11116-014-9538-1
- SciPy, D. (2026). scipy.spatial.cKDTree - SciPy documentation.
- Shui, C. S., & Chan, W. L. (2019). Optimization of a Bikeway Network with Selective Nodes. *Sustainability*, 11(23), 6531.
doi.org/10.3390/su11236531
- Szell, M., Mimar, S., Perlman, T., Ghoshal, G., & Sinatra, R. (2022). Growing urban bicycle networks. *Scientific Reports*, 12, 6765.
doi.org/10.1038/s41598-022-10783-y
- Buehler, R., & Dill, J. (2016). Bikeway networks: A review of effects on cycling. *Transport Reviews*, 36(1), 9-27.
- Cascetta, E. (2009). *Transportation Systems Analysis: Models and Applications* (2nd ed.). Springer.
- Cooper, C. H. V., & Chiaradia, A. J. F. (2020). sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line & Python. *SoftwareX*, 12, 100525.
doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525
- Federal Highway, A. (2019). *Bikeway Selection Guide*.
- Institute for, T., & Development, P. (2018). *The Bikeshare Planning Guide*.
- Kansky, K. J. (1963). *Structure of Transportation Networks: Relationships between Network Geometry and Regional Characteristics*. University of Chicago, Department of Geography.
- Lovelace, R., Goodman, A., Aldred, R., Berkoff, N., Abbas, A., & Woodcock, J. (2017). The Propensity to Cycle Tool: An open source online system for sustainable transport planning. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 505-528.
doi.org/10.5198/jtlu.2016.862
- Lucas, V., & Andrade, A. R. (2021). Predicting hourly origin-destination demand in Bike Sharing Systems using hurdle models: Lisbon case study. *Case Studies on Transport Policy*, 9(4), 1836-1848.
doi.org/10.1016/j.cstp.2021.10.003

Extraction and Implementation Prioritization of a Connected Network for Active Bike-Sharing Stations Using the Minimum Spanning Tree Algorithm (A Case Study of Mashhad Metropolis)

Ali Tavakoli Kashani, Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran and Road Safety Research Center,

Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mohammadreza Bagheri Delouee, Ph.D., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mir Mohammadreza Hosseini Ghazivaloei, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: alitavakoli@iust.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Bike-sharing systems can effectively support urban mobility when stations and bicycle routes are connected through a continuous network. In Mashhad, however, parts of the cycling infrastructure have been developed in a fragmented manner, resulting in incomplete connectivity between active bike-sharing stations and existing bicycle routes. This study aimed to identify the minimum network required to connect active bike-sharing stations in Mashhad and to prioritize its routes based on travel demand. The methodology was based on network analysis, spatial data, and an origin–destination (OD) matrix derived from recorded trips. After refining the street network and matching active stations to valid network nodes, the network was converted into a graph. A Minimum Spanning Tree (MST) algorithm was then applied to identify the routes required to connect all active stations with the minimum total length. The OD matrix was subsequently assigned to the extracted network, and routes were classified into three implementation-priority levels according to the volume of trips they served. The results showed that the proposed network has a total length of 190.3 km, of which 48.9 km, 50.6 km, and 90.8 km fall into the first, second, and third priority levels, respectively. In addition, the beta index increased from 0.706 to 1.000, while the cyclomatic number decreased from 2 to 0, indicating the creation of a continuous network without independent cycles. The findings suggest that integrating the MST algorithm with an OD matrix provides a practical approach for identifying a minimum station-connection network and prioritizing routes for implementation.

Keywords: Bike-Sharing, Minimum-Length Connecting Network, Connected Network, Minimum Spanning Tree, Origin–Destination Matrix