مدل مکان‌یابی و اولویت‌بندی نواحی مستعد استقرار سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی (مطالعه موردی: مشهد)

مقاله علمی – پژوهشی

*علی توکلی کاشانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
میرمحمدرضا حسینی قاضی‌ولوئی، دانشجوی کارشناسی ارشد، 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
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Alitavakoli@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۱۳۰-۱۱۹

چکیده

با افزایش تراکم شهری و تشدید چالش‌های ناشی از ترافیک، آلودگی و مصرف انرژی، توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل فعال و سازگار با محیط‌زیست به یکی از ضرورت‌های برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است. در این میان، سامانه‌های دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و امکان پاسخ‌گویی به سفرهای کوتاه درون‌شهری، به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین حمل‌ونقل خرد مورد توجه قرار گرفته‌اند. بااین‌حال، نبود ایستگاه‌های فیزیکی در این سامانه‌ها، چالش مهمی را در زمینه شناسایی نواحی مناسب برای استقرار ناوگان، افزایش کارایی عملکردی و کاهش تعارضات شهری ایجاد می‌کند. هدف پژوهش حاضر، مکان‌یابی و اولویت‌بندی نواحی مستعد برای راه‌اندازی سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه در ۱۷ منطقه شهرداری مشهد است. برای این منظور، از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی استفاده شد. چارچوب ارزیابی پژوهش شامل سه معیار اصلی تقاضای بالقوه، کیفیت زیرساخت و سطح ایمنی عملکردی است که در قالب ۱۳ زیرمعیار عملیاتی سنجیده شدند. وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و بر پایه نظر خبرگان انجام گرفت و امتیاز نهایی هر منطقه از طریق روش ترکیب خطی وزن‌دار محاسبه شد. نتایج نشان داد که در مدل مکان‌یابی پیشنهادی، سطح ایمنی عملکردی با وزن ۰,۴۹۴ مهم‌ترین عامل مؤثر در تعیین نواحی مناسب است و پس از آن، کیفیت زیرساخت با وزن ۰,۳۱۳ و تقاضای بالقوه با وزن ۰,۱۹۲ قرار دارند. بر اساس خروجی مدل تلفیقی، مناطق ۵، ۱۵، ۱۱ و ۱ به‌عنوان مناسب‌ترین و مستعدترین مناطق برای اجرای فاز نخست سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه در شهر مشهد شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل فعال، دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه، مکان‌یابی شهری، تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، تحلیل سلسله‌مراتبی

۱-مقدمه

امروزه سامانه‌های حمل‌ونقل در کلان‌شهرها با چالش‌های فزاینده‌ای مانند ترافیک سنگین، اتلاف زمان سفر، مصرف بی‌رویه سوخت و آلودگی‌های زیست‌محیطی روبه‌رو هستند. برای مواجهه با این چالش‌ها، رویکرد «حمل‌ونقل فعال» و استفاده از شیوه‌های پاک جابه‌جایی، از جمله به‌کارگیری دوچرخه در سفرهای کوتاه و میان‌برد شهری، بیش از پیش مورد توجه برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است. در این میان، سامانه‌های دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه، به‌عنوان نسل

جدیدی از خدمات حمل‌ونقل خرد، تحول قابل توجهی در الگوهای جابه‌جایی شهری ایجاد کرده‌اند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های موقعیت‌یاب و قفل‌های هوشمند، وابستگی به ایستگاه‌های فیزیکی را از میان برداشته و امکان جابه‌جایی درب به‌درب و تکمیل زنجیره سفر، به‌ویژه در مسافت‌های اول و آخر تا ایستگاه‌های مترو و اتوبوس، را با انعطاف‌پذیری بالا فراهم می‌کنند.

بااین‌حال، ویژگی دسترسی آزاد و امکان رهاسازی دوچرخه‌ها در سطح شهر، اگرچه یکی از مزیت‌های رقابتی سامانه‌های بدون ایستگاه به شمار می‌آید، اما در صورت نبود مدیریت مکان‌محور و هوشمند، می‌تواند به یک چالش جدی در بهره‌برداری شهری تبدیل شود. تجربه اجرای این سامانه‌ها نشان داده است که توسعه بدون برنامه آن‌ها ممکن است به پیامدهایی مانند انباشت ناوگان در قطب‌های جذب سفر، ایجاد سد معبر در فضاهای عمومی و افزایش تعارضات ایمنی با عابران پیاده و جریان ترافیک سواره منجر شود. ازاین‌رو، موفقیت این سامانه‌ها در کلان شهری مانند مشهد، مستلزم شناخت دقیق تفاوت‌های محیطی، زیرساختی و رفتاری در مناطق مختلف شهری است؛ زیرا هر محدوده شهری ظرفیت متفاوتی برای پذیرش و بهره‌برداری از این فناوری دارد.

یکی از چالش‌های اصلی در برنامه‌ریزی و مکان‌یابی سامانه‌های دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه آن است که در بسیاری از مطالعات پیشین و رویکردهای سنتی مکان‌یابی، تمرکز اصلی بر شاخص‌های «تقاضا» و «دسترسی» قرار داشته است. در این رویکردها، متغیرهای کلیدی دیگری مانند «ایمنی عملکردی» و «وضعیت زیرساخت‌ها» اغلب به‌عنوان عوامل فرعی در نظر گرفته شده یا به‌طور کامل نادیده گرفته شده‌اند. این مسئله موجب ایجاد شکافی قابل توجه میان چارچوب‌های نظری مکان‌یابی و الزامات عملیاتی اجرای سامانه در محیط واقعی شهر شده است؛ به‌گونه‌ای که حتی مناطقی با تقاضای بالا نیز ممکن است به دلیل ضعف در ایمنی ترافیکی یا کمبود زیرساخت‌های مناسب، برای استقرار ناوگان دوچرخه‌های اشتراکی پرخطر و نامناسب باشند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف رفع این شکاف و ارائه چارچوبی یکپارچه برای تصمیم‌گیری مکانی تدوین شده است. پرسش اصلی پژوهش این است که در سطح ۱۷ منطقه شهرداری کلان شهر مشهد، با در نظر گرفتن هم‌زمان سه بعد اساسی «تقاضای بالقوه»، «کیفیت زیرساخت» و «سطح ایمنی عملکردی»، چگونه می‌توان مناسب‌ترین نواحی را برای استقرار و توسعه سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه مکان‌یابی و اولویت‌بندی کرد. برای پاسخ به این پرسش، در پژوهش حاضر از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی استفاده شده است. همچنین، با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی خبرگانی به شاخص‌ها و روش ترکیب خطی وزن‌دار برای تلفیق لایه‌های مکانی، تلاش شده است نقشه راهی عملیاتی، دقیق و ریسک‌گریز برای اولویت‌بندی اجرایی مناطق مشهد در اختیار مدیریت شهری قرار گیرد.

۲-پیشینه تحقیق

گسترش روزافزون شهرنشینی و پیامدهای منفی ناشی از ترافیک وسایل نقلیه موتوری، ضرورت توجه به سامانه‌های حمل‌ونقل پایدار و فعال را بیش از پیش آشکار کرده است. در این میان، تکامل سامانه‌های دوچرخه اشتراکی توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه برنامه‌ریزی شهری و حمل‌ونقل را به خود جلب کرده است. مرور ادبیات موضوع نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در این حوزه را می‌توان از سه منظر اصلی بررسی کرد: نخست، سیر تحول سامانه‌های دوچرخه اشتراکی؛ دوم، معیارهای ارزیابی مکانی برای تعیین ظرفیت پذیرش این سامانه‌ها؛ و سوم، رویکردهای مدل‌سازی و تحلیل مکانی که برای مکان‌یابی و اولویت‌بندی نواحی مناسب به کار گرفته شده‌اند.

در محور نخست، یعنی سیر تحول سامانه‌های دوچرخه اشتراکی، بخش عمده مطالعات اولیه بر سامانه‌های ایستگاه‌محور، به‌عنوان نسل سوم این خدمات، متمرکز بوده است. مطالعات کلاسیک در این دوره نشان دادند که تراکم ایستگاه‌های فیزیکی و فاصله پیاده‌روی کاربران تا آن‌ها، از متغیرهای کلیدی در موفقیت سامانه و میزان جذب کاربر به شمار می‌آیند. بااین‌حال، با ظهور نسل چهارم این خدمات، یعنی سامانه‌های دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه، ماهیت مسئله مکان‌یابی دچار تحول اساسی شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این نسل از سامانه‌ها، با بهره‌گیری از فناوری موقعیت‌یاب جهانی، قفل‌های هوشمند و بستر اینترنت اشیا، توانسته‌اند محدودیت‌های فیزیکی سامانه‌های سنتی را

کاهش دهند و الگوی بهره‌برداری انعطاف‌پذیرتری ایجاد کنند [C. Médard De Chardon.2019]. ژو و همکاران، با تحلیل داده‌های مکانی سامانه‌های بدون ایستگاه، نشان دادند که الگوی تقاضا در این نوع ناوگان با تنوع کاربری اراضی و پیوستگی بافت تجاری ـ مسکونی ارتباط مستقیم دارد [Y. Xu et al.2019]. همچنین گوا و همکاران تأکید کرده‌اند که مجاورت با ایستگاه‌های اصلی حمل‌ونقل عمومی، مانند مترو و بی‌آرتی، یکی از متغیرهای حیاتی در تضمین تقاضای بالقوه برای سفرهای ترکیبی است [Y. Guo.et al.2022].

در همین راستا، منگولد و همکاران بر ضرورت عبور از مدل‌های نقطه‌ای و استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مدیریت ناحیه‌ای و جلوگیری از آشفتگی فضایی ناوگان در سطح شهرها تأکید کرده‌اند [M. Mangold.et al.2022].

از منظر معیارهای ارزیابی مکانی، پژوهشگران به شناسایی و تحلیل عواملی پرداخته‌اند که ظرفیت یک محدوده شهری را برای پذیرش سامانه‌های دوچرخه اشتراکی تعیین می‌کنند. در بعد تقاضای بالقوه، یانگ و همکاران عواملی مانند تراکم جمعیت، تراکم اشتغال و کاربری‌های تجاری را به‌عنوان پیشران‌های اصلی تولید سفر معرفی کرده‌اند [Y. Yang.et al.2019].

همچنین، لیو و میلر با تأکید بر نقش دوچرخه‌های اشتراکی در تکمیل کیلومتر اول و آخر سفر، مجاورت با ایستگاه‌های اتوبوس و مترو را متغیری حیاتی در پوشش سفرهای ترکیبی دانسته‌اند [L. Liu. et al.2022]. در بعد زیرساخت، پژوهش‌های پوچر و همکاران نشان داده‌اند که وجود تقاضا به‌تنهایی برای موفقیت این سامانه‌ها کافی نیست؛ بلکه عواملی مانند شیب ملایم معابر، عرض مناسب مسیرها و پیوستگی شبکه مسیرهای ویژه دوچرخه، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مسیر توسط کاربران و کارایی عملکردی سامانه ایفا می‌کنند [J. Pucher.et al.2010].

در کنار تقاضا و زیرساخت، ایمنی عملکردی یکی از چالش‌برانگیزترین ابعاد در توسعه سامانه‌های مبتنی بر استفاده از دوچرخه در شهرها به شمار می‌آید. رینولدز و همکاران و همچنین تشکه و همکاران، با ارائه شواهد تجربی نشان داده‌اند که ادراک کاربران از خطر، یکی از مهم‌ترین موانع استفاده از مدهای فعال حمل‌ونقل است [C. C. Reynolds.et al.2009, K. Teschke et al.2012]. بر اساس این مطالعات، عواملی مانند تراکم تقاطع‌ها به‌عنوان نقاط پرتعارض، سابقه وقوع تصادفات، حجم ترافیک سنگین و سرعت جریان وسایل نقلیه موتوری، از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی ریسک در مسیرهای ویژه دوچرخه محسوب می‌شوند. نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند موجب کاهش ایمنی کاربران و در نهایت، شکست پروژه‌های توسعه ناوگان دوچرخه اشتراکی شود.

از منظر رویکردهای مدل‌سازی، تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، به‌عنوان چارچوبی استاندارد و توانمند در مطالعات مکان‌یابی تثبیت شده است. مالچفسکی مبانی نظری این تلفیق را توسعه داده است [J. Malczewski.1999].

در مطالعات کاربردی نیز پژوهشگرانی مانند بهادوری و همکاران نشان داده‌اند که استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای استخراج نظام‌مند ترجیحات و اوزان خبرگانی، در کنار روش ترکیب خطی وزن‌دار برای هم‌پوشانی لایه‌های مکانی، می‌تواند خروجی‌هایی قابل اتکا برای تصمیم‌گیری مدیران شهری فراهم کند [M. S. Bahadori.et al.2022].

جمع‌بندی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که با وجود توسعه مدل‌های مکان‌یابی، بیشتر پژوهش‌های پیشین تمرکز اصلی خود را بر شاخص‌های تقاضا و دسترسی قرار داده‌اند و متغیرهای حیاتی مرتبط با ایمنی ترافیکی را کمتر به‌صورت یکپارچه و هم‌وزن در مدل‌های خود لحاظ کرده‌اند. پژوهش حاضر با هدف رفع این شکاف علمی، چارچوبی جامع ارائه می‌دهد که در آن معیارهای تقاضا، زیرساخت و ایمنی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌شوند تا اولویت‌بندی مناطق هفده‌گانه مشهد با رویکردی چندبعدی و با در نظر گرفتن حداقل تعارضات ترافیکی انجام شود.

۳-روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی ـ تحلیلی است. به‌منظور مکان‌یابی نواحی مستعد برای استقرار سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه، از چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. بر این اساس، فرایند اجرای پژوهش در چهار گام اصلی طراحی و دنبال شده است که در ادامه تشریح می‌شوند.

۳-۱-شناسایی و دسته‌بندی معیارهای ارزیابی

با مرور ادبیات موضوع و اخذ نظر متخصصان، چارچوب ارزیابی پژوهش در قالب سه معیار اصلی و ۱۳ زیرمعیار عملیاتی تدوین شد. همچنین، جهت اثرگذاری هر شاخص بر مطلوبیت مکانی به‌صورت مثبت، یعنی افزاینده مطلوبیت، یا منفی، یعنی کاهنده مطلوبیت، مشخص گردید. معیار نخست، تقاضای بالقوه است که از طریق زیرمعیارهای تراکم جمعیت (+)، تعداد ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی (+)، حجم تبادلی مسافران حمل‌ونقل همگانی (+) و تراکم مراکز جاذب سفر (+) ارزیابی می‌شود. معیار دوم، کیفیت زیرساخت است که شامل شیب و توپوگرافی (−)، پیوستگی شبکه مسیرهای ویژه دوچرخه (+)، چگالی مسیرهای ویژه دوچرخه (+)، چگالی معابر شریانی و اصلی (−) و فضای پارکینگ طبیعی (+) است. معیار سوم نیز سطح ایمنی عملکردی است که با استفاده از زیرمعیارهای نرخ تصادفات کاربران دوچرخه (−)، تراکم نقاط تعارض (−)، سرعت مجاز معابر (−) و مواجهه با ترافیک سنگین (−) سنجیده می‌شود.

۳-۲- وزن‌دهی شاخص‌ها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی

به‌منظور تعیین اهمیت نسبی شاخص‌های استخراج‌شده و دستیابی به مدل تصمیم‌گیری مکانی متناسب با واقعیت‌های ترافیکی و زیرساختی شهر مشهد، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. این روش، به‌عنوان یکی از ابزارهای معتبر تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان تبدیل قضاوت‌های کیفی خبرگان به مقادیر کمی و قابل استفاده در مدل مکانی را فراهم می‌کند. فرایند اجرای این مرحله شامل گام‌های زیر بود:

-تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی: در این مرحله، هدف پژوهش، یعنی مکان‌یابی نواحی مستعد، در بالاترین سطح ساختار قرار گرفت. سپس معیارهای اصلی شامل تقاضای بالقوه، کیفیت زیرساخت و سطح ایمنی عملکردی، و در ادامه زیرمعیارهای سیزده‌گانه در سطوح بعدی طبقه‌بندی شدند.

-تکمیل پرسشنامه و تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی: با بهره‌گیری از نظر ۱۰ نفر از خبرگان حوزه حمل‌ونقل و شهرسازی، ماتریس‌های مقایسه زوجی بر اساس مقیاس نه‌درجه‌ای ساعتی تکمیل شدند. در این ماتریس‌ها، اولویت هر معیار نسبت به معیار دیگر در هر سطح سنجیده شد.

-استخراج اوزان و کنترل نرخ ناسازگاری: پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، وزن نسبی هر معیار و زیرمعیار با استفاده از روش بردار ویژه محاسبه شد. در این مرحله، برای اطمینان از اعتبار قضاوت‌های خبرگان و بررسی میزان سازگاری درونی مقایسه‌ها، نرخ ناسازگاری ماتریس‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. کنترل نرخ ناسازگاری در روش تحلیل سلسله‌مراتبی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نشان می‌دهد که مقایسه‌های زوجی انجام‌شده تا چه اندازه از منطق تصمیم‌گیری منسجم و قابل قبول برخوردار هستند. نرخ ناسازگاری از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

که در آن، CR نرخ ناسازگاری، CI شاخص ناسازگاری و RI شاخص تصادفی است. شاخص ناسازگاری نیز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

در این رابطه، λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی و n تعداد معیارها یا زیرمعیارهای مقایسه‌شده در ماتریس است. بر اساس مبانی نظری روش تحلیل سلسله‌مراتبی، چنانچه مقدار CR کمتر از ۰٫۱ باشد، ماتریس از سازگاری قابل قبول برخوردار است. در پژوهش حاضر، نرخ ناسازگاری تمامی ماتریس‌ها کمتر از این آستانه محاسبه شد؛ بنابراین، قضاوت‌های خبرگان از ثبات منطقی کافی برخوردار بوده و اوزان استخراج‌شده برای استفاده در مدل تلفیقی قابل اتکا هستند.

-محاسبه اوزان نهایی زیرمعیارها: در گام پایانی فرایند وزن‌دهی، وزن نهایی هر زیرمعیار از حاصل‌ضرب وزن نسبی آن زیرمعیار در وزن معیار ا صلی مربوط به آن محا سبه شد. به این ترتیب، میزان اثرگذاری هر زیرمعیار در مدل کلی مکان‌یابی مشخص گردید. اوزان نهایی به‌دست‌آمده در مرحله بعد، برای تلفیق لایه‌های مکانی و محاسبه امتیاز نهایی هر یک از مناطق مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-٤- تلفیق نهایی با مدل ترکیب خطی وزن‌دار

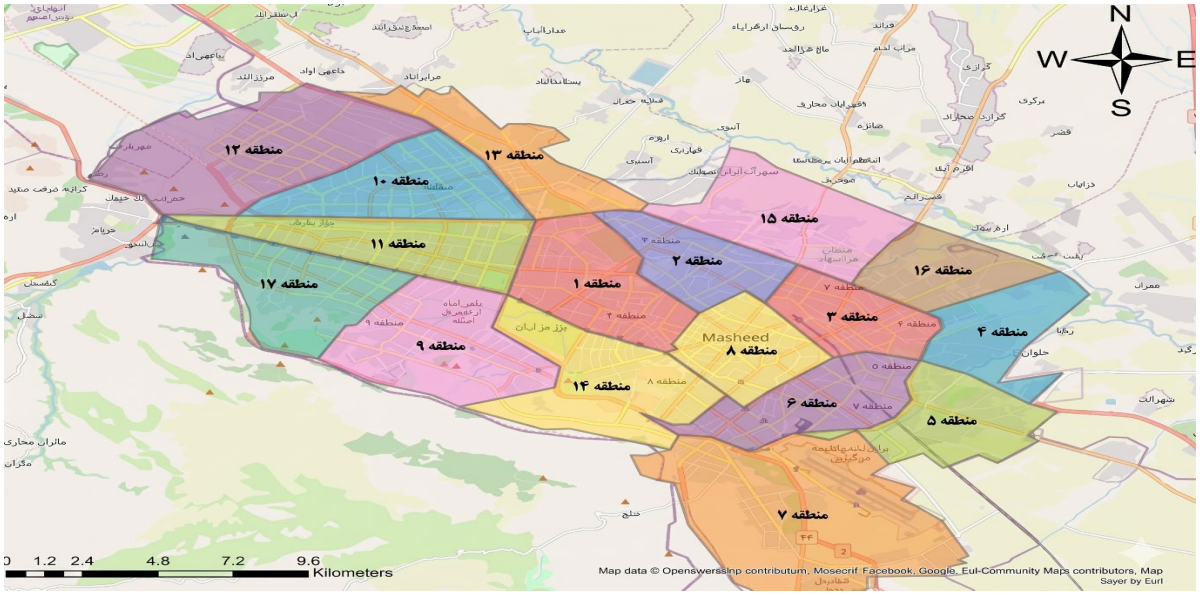
پس از نرمال‌سازی شاخص‌ها و تعیین اوزان خبرگانی، از مدل ترکیب خطی وزن‌دار به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد در مکان‌یابی شهری برای تلفیق لایه‌های مکانی استفاده شد. در این مدل، امتیاز نهایی هر ناحیه از حاصل‌جمع مقادیر نرمال‌شده زیرمعیارها، پس از ضرب در وزن اختصاص‌ی از ضرب در وزن اختصاص‌یافته به هر یک از آن‌ها، محاسبه می‌شود. خروجی این

مرحله، یک امتیاز کمی برای هر ناحیه است که امکان رتبه‌بندی دقیق واحدهای ساختاری شهری را از نظر میزان تناسب برای اجرای فاز نخست سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه فراهم می‌کند.

٤-نتایج

٤-١- معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر مشهد، به‌عنوان دومین کلان‌شهر بزرگ کشور و یکی از مهم‌ترین قطب‌های زیارتی و سیاحتی، روزانه با حجم بالایی از سفرهای درون‌شهری مواجه است. رشد شتابان جمعیت، تمرکز کاربری‌های جاذب سفر در هسته مرکزی شهر و افزایش روزافزون مالکیت وسایل نقلیه شخصی، چالش‌های ترافیکی و زیست‌محیطی متعددی را برای مدیریت شهری مشهد ایجاد کرده است. ساختار تقسیمات شهری مشهد در این پژوهش شامل ۱۷ منطقه شهرداری است که هر یک از نظر تراکم جمعیت، بافت هندسی معابر، توپوگرافی و شیب، و همچنین میزان دسترسی به شبکه حمل‌ونقل همگانی، ویژگی‌هایی متمایز دارند. این تنوع فضایی و ساختاری در سطح مناطق، ضرورت انجام ارزیابی چندمعیاره مکانی را برای تخصیص بهینه و اولویت‌بندی فازهای توسعه سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه دوچندان می‌کند.



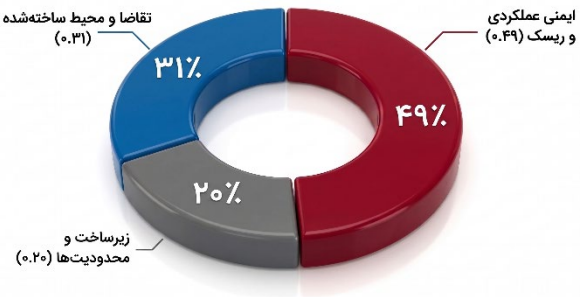
شکل ۱. مناطق ۱۷گانه شهرداری مشهد

٤-٢- نتایج تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها

در این مرحله از پژوهش، به‌منظور تعیین درجه اهمیت و ضریب اثرگذاری هر یک از معیارهای اصلی و زیرمعیارهای سیزده‌گانه در مدل نهایی مکان‌یابی سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی اجرا شد. مبنای این روش، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی بر اساس طیف ۹ درجه‌ای ساعتی و استخراج ترجیحات حاصل از نظر پنل خبرگان و متخصصان حوزه مهندسی ترافیک و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری است. پس از گردآوری قضاوت‌های کارشناسی، محاسبات مربوط به استخراج بردارهای ویژه نرمال‌سازی‌شده انجام شد تا سهم هر متغیر در اوزان نسبی و نهایی مدل مشخص شود. یکی از مراحل کلیدی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، ارزیابی سازگاری درونی قضاوت‌های خبرگان از طریق محاسبه نرخ ناسازگاری است. بر اساس اصول نظری این روش، در صورتی که نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی کمتر از آستانه ۰,۱ باشد، قضاوت‌های ثبت‌شده از سازگاری منطقی برخوردار بوده و نتایج حاصل از بردار ویژه قابل اتکا خواهند بود. در پژوهش حاضر، نرخ ناسازگاری برای ماتریس معیارهای اصلی و تمامی ماتریس‌های مربوط به زیرمعیارها کمتر از ۰,۱ و در بازه ۰,۰۲ تا ۰,۰٦ محاسبه شد. این نتیجه نشان می‌دهد که قضاوت‌های خبرگان از ثبات کافی برخوردار بوده و

خروجی‌های حاصل از فرایند وزن‌دهی، اعتبار لازم برای استفاده در مدل نهایی مکان‌یابی را دارند.

تحلیل اوزان معیارهای اصلی نشان‌دهنده تفاوت معنادار رویکرد این پژوهش با مطالعات سنتی مکان‌یابی است. در حالی که در سامانه‌های ایستگاه‌محور قدیمی، تمرکز اصلی اغلب بر قطب‌های جذب تقاضا قرار داشت، در مدل تلفیقی حاضر برای سامانه‌های بدون ایستگاه، معیار «سطح ایمنی عملکردی» با وزن ۰,۴۹۴ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده است. این وزن بالا نشان می‌دهد که ایمنی ترافیکی، به‌ویژه برای کاربران آسیب‌پذیر، شرط اساسی موفقیت این سامانه‌هاست؛ زیرا در صورت نبود ایمنی حرکتی و افزایش ریسک تصادفات در شبکه معابر، تمایل کاربران به استفاده از سامانه کاهش یافته و احتمال ناکامی طرح افزایش می‌یابد. پس از آن، معیار «کیفیت زیرساخت» با وزن ۰,۳۱۳ در رتبه دوم قرار گرفته است که بیانگر نقش بسترهای کالبدی مناسب و پیوسته به‌عنوان مکمل اصلی ایمنی و پیش‌نیاز فنی حرکت دوچرخه‌هاست. در نهایت، معیار «تقاضای بالقوه» با وجود اهمیت آن در توجیه اقتصادی و عملکردی سامانه، با وزن ۰,۱۹۲ در رتبه سوم قرار دارد؛ زیرا وجود تقاضا، بدون فراهم بودن شرایط زیرساختی و ایمنی، به‌تنهایی نمی‌تواند موفقیت سامانه را تضمین کند.



شکل ۲. سهم وزنی معیارهای اصلی در مدل مکان‌یابی

در سطح زیرمعیارهای سیزده‌گانه نیز مقایسات زوجی درون‌گروهی انجام شد تا وزن نسبی هر زیرمعیار نسبت به معیار اصلی مربوط به خود و سپس وزن نهایی آن در مدل مکانی تعیین شود. در گروه معیار «سطح ایمنی عملکردی»، چهار زیرمعیار مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این میان، زیرمعیارهای نرخ تصادفات کاربران دوچرخه و تراکم نقاط تعارض در تقاطع‌ها، بالاترین وزن‌های نسبی را به خود اختصاص دادند. این نتیجه نشان می‌دهد که کنترل سوابق حادثه‌خیزی مناطق و کاهش تلاقی جریان حرکت دوچرخه با ترافیک سواره، از اصلی‌ترین ملاحظات ایمنی در مکان‌یابی سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه هستند. زیرمعیارهای سرعت مجاز معابر و مواجهه با ترافیک سنگین وسایل نقلیه موتوری نیز به‌عنوان عوامل محیطی تشدیدکننده ریسک، در رتبه‌های بعدی این گروه قرار گرفتند. تمامی این زیرمعیارها در مدل دارای جهت اثر منفی هستند؛ به این معنا که افزایش مقدار آن‌ها موجب کاهش مطلوبیت مکانی برای استقرار سامانه می‌شود.

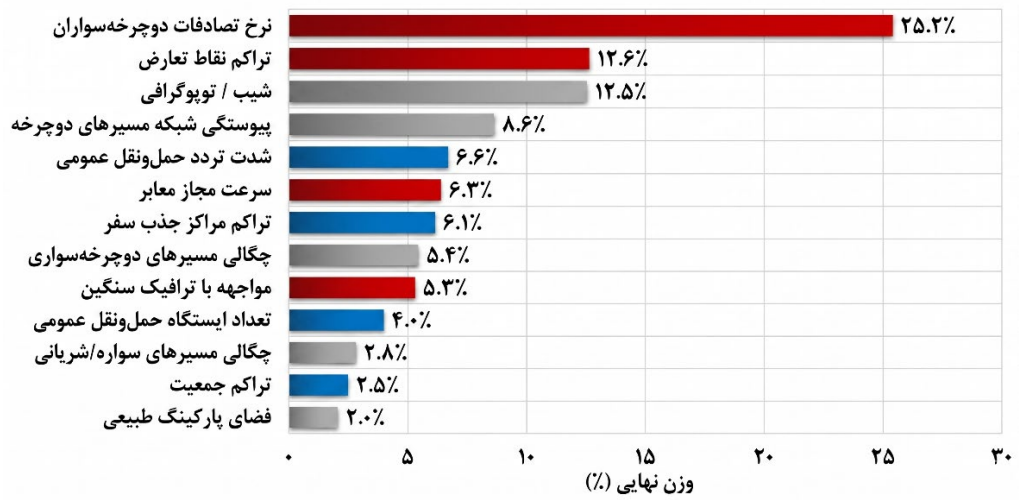
در گروه معیار «کیفیت زیرساخت»، پنج زیرمعیار عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این گروه، زیرمعیارهای پیوستگی شبکه مسیرهای ویژه دوچرخه و چگالی این مسیرها، بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند؛ زیرا گسستگی در شبکه مسیرهای قابل استفاده برای دوچرخه، کارایی سامانه بدون ایستگاه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در مقابل، زیرمعیار شیب و توپوگرافی به‌عنوان یک عامل طبیعی بازدارنده، و چگالی معابر شریانی و اصلی به‌عنوان عاملی ساختاری و محدودکننده، با جهت اثر منفی در مدل لحاظ شدند. همچنین، زیرمعیار فضای پارکینگ طبیعی، که بیانگر محدوده‌های مستعد برای رهاسازی ایمن دوچرخه‌ها بدون ایجاد سد معبر است، در سازمان‌دهی فضایی ناوگان نقش مکمل و قابل توجهی دارد.

در گروه معیار «تقاضای بالقوه»، چهار زیرمعیار مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این گروه، زیرمعیارهای تعداد ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی و حجم تبادلی مسافران حمل‌ونقل همگانی، شامل مترو و اتوبوس، بیشترین وزن نسبی را به خود اختصاص دادند.

این نتیجه نشان‌دهنده نقش سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه در تکمیل مایل اول و مایل آخر سفرهای درون‌شهری و ایجاد پیوند عملکردی با شبکه حمل‌ونقل انبوه است. همچنین، زیرمعیارهای تراکم مراکز جاذب سفر، شامل کاربری‌های تجاری، اداری و آموزشی، و تراکم جمعیت ساکن نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در تولید و جذب سفرهای درون‌منطقه‌ای، وزن‌های تکمیلی این بخش را به خود اختصاص دادند.

جدول ۱. اوزان نسبی و نهایی معیارها و زیرمعیارهای مکان‌یابی بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی

دسته‌بندی	زیرمعیار	وزن نسبی	وزن نهایی
سطح ایمنی عملکردی	نرخ تصادفات دوچرخه‌سواران	۰,۵۱	۰,۲۵۲
	تراکم نقاط تعارض	۰,۲۵۵	۰,۱۲۶
	سرعت مجاز معابر	۰,۱۲۸	۰,۰۶۳
	مواجهه با ترافیک سنگین	۰,۱۰۷	۰,۰۵۳
کیفیت زیرساخت	شیب / توپوگرافی	۰,۳۹۸	۰,۱۲۵
	پیوستگی شبکه مسیرهای دوچرخه	۰,۲۷۵	۰,۰۸۶
	چگالی مسیرهای دوچرخه سواری	۰,۱۷۲	۰,۰۵۴
	چگالی مسیرهای سواره/شریانی	۰,۰۸۸	۰,۰۲۸
	فضای پارکینگ طبیعی	۰,۰۶۷	۰,۰۲
تقاضای بالقوه	حجم تبادلی مسافران حمل‌ونقل همگانی	۰,۳۴۵	۰,۰۶۶
	تراکم مراکز جذب سفر	۰,۳۱۵	۰,۰۶۱
	تعداد ایستگاه حمل‌ونقل عمومی	۰,۲۱	۰,۰۴
	تراکم جمعیت	۰,۱۳	۰,۰۲۵



شکل ۳. رتبه‌بندی زیرمعیارهای ارزیابی مکانی بر اساس وزن نهایی درصدی حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی

٤-۳- تلفیق لایه‌های مکانی و اولویت‌بندی مناطق هفده‌گانه

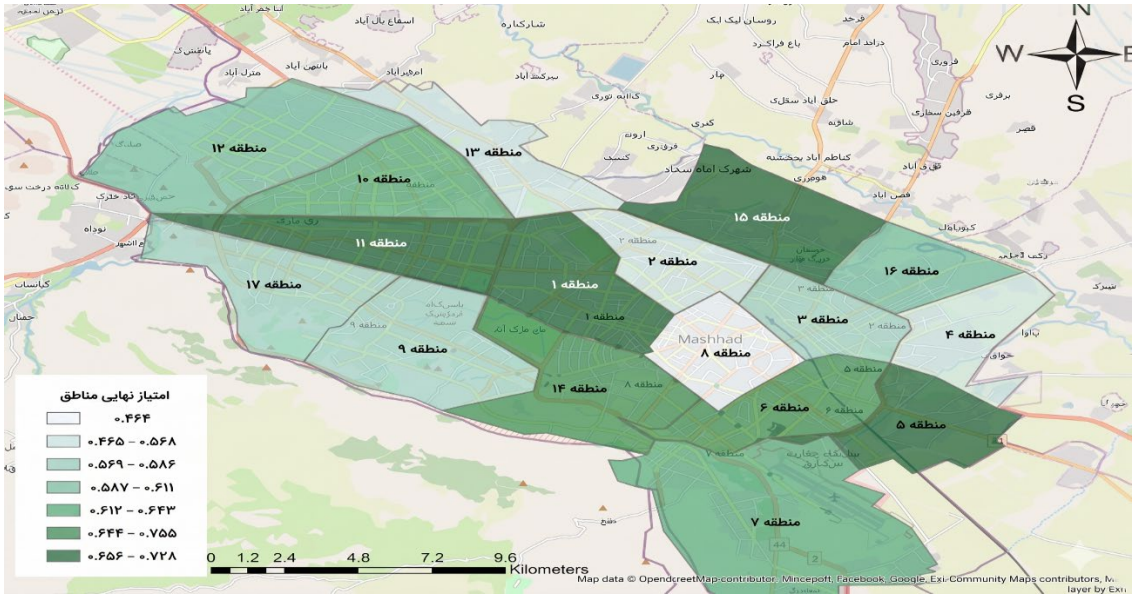
پس از تعیین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، مرحله بعد به تلفیق لایه‌های مکانی و استخراج نقشه نهایی اولویت‌بندی مناطق اختصاص یافت. برای این منظور، از مدل ترکیب خطی وزن‌دار در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. این مدل، به دلیل ماهیت جبران‌پذیر خود، این امکان را فراهم می‌کند که ضعف یک معیار در یک منطقه، تا حدی با قوت معیارهای دیگر جبران شود؛ ویژگی‌ای که با ماهیت پیچیده تصمیم‌گیری‌های شهری سازگاری دارد. در این

فرایند، ابتدا مقدار نرمال‌شده هر یک از زیرمعیارها در وزن نهایی استخراج‌شده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی ضرب شد. سپس، حاصل‌جمع مقادیر وزن‌دارشده برای هر یک از مناطق هفده‌گانه شهرداری مشهد محاسبه گردید تا امتیاز نهایی مطلوبیت فضایی هر منطقه به دست آید.

خروجی کمی حاصل از اجرای مدل ترکیب خطی وزن‌دار، طیفی از امتیازات را در میان مناطق مختلف نشان داد که بیانگر تفاوت‌های ساختاری، کالبدی و ترافیکی در سطح کلان‌شهر مشهد است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر و کاربردی‌تر نتایج، مناطق هفده‌گانه بر اساس امتیازات به‌دست‌آمده و با استفاده از روش‌های آماری استاندارد، در سه سطح «مناطق کاملاً مستعد»، «مناطق با پتانسیل متوسط» و «مناطق نامناسب» طبقه‌بندی شدند. جزئیات رتبه‌بندی عددی و امتیاز نهایی هر منطقه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، نقشه نهایی پهنه‌بندی فضایی مناطق مستعد برای استقرار سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه در شکل ٤ نشان داده شده است.

جدول ۲. امتیاز نهایی و اولویت‌بندی مناطق هفده‌گانه شهرداری مشهد برای استقرار سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه

کد منطقه	امتیاز نهایی	اولویت
۵	۰,٦٧٧	۱
۱۱	۰,٦٦٤	۲
۱۵	۰,٦٦٣	۳
۱	۰,٦٦١	٤
۱٤	۰,٦٥٥	۵
٦	۰,٦٤٩	٦
۱۰	۰,٦٤٢	۷
۷	۰,٦٣٤	۸
۱٦	۰,٦۱۱	۹
۱۲	۰,٦۰۳	۱۰
۹	۰,۵۸۵	۱۱
۱۷	۰,۵۸٤	۱۲
۳	۰,۵۸٤	۱۳
٤	۰,۵٦۷	۱٤
۱۳	۰,۵٦٦	۱۵
۲	۰,۵٦۰	۱٦
۸	۰,٤٦٤	۱۷



شکل ٤. نقشه نهایی اولویت‌بندی مناطق مستعد برای استقرار سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه

بررسی خروجی‌های مدل تلفیقی نشان می‌دهد که مناطق ۵، ۱۵، ۱۱ و ۱ بالاترین امتیازات مطلوبیت فضایی را به دست آورده‌اند و در نتیجه، به‌عنوان مناطق کاملاً مستعد در اولویت نخست اجرای فاز عملیاتی سامانه دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه قرار می‌گیرند. علت این برتری را می‌توان در هم‌پوشانی مناسب میان سه بعد اصلی پژوهش، یعنی ایمنی عملکردی، کیفیت زیرساخت و تقاضای بالقوه، جست‌وجو کرد. از یک سو، این مناطق از سطح بالاتری از ایمنی عملکردی برخوردارند؛ به این معنا که نرخ تصادفات کاربران دوچرخه در آن‌ها کنترل‌شده‌تر است، سرعت جریان وسایل نقلیه موتوری در معابر داخلی پایین‌تر بوده و تراکم نقاط تعارض حاد ترافیکی در تقاطع‌های آن‌ها کمتر گزارش شده است. از سوی دیگر، وجود بسترهای زیرساختی مناسب، مانند پیوستگی نسبی مسیرهای ویژه دوچرخه، شیب توپوگرافی ملایم و فضاهای پارکینگ طبیعی برای رهاسازی ایمن ناوگان، در کنار تقاضای بالقوه بالا ناشی از تراکم جمعیت و مجاورت با ایستگاه‌های اصلی حمل‌ونقل عمومی، موجب افزایش امتیاز نهایی این مناطق شده است.

در مقابل، مناطقی که در رتبه‌های پایین‌تر جدول قرار گرفته و در پهنه نامناسب طبقه‌بندی شده‌اند، عموماً با چالش‌های ساختاری جدی مواجه هستند. این مناطق به دلیل ویژگی‌های بزرگراهی، سرعت بالای جریان ترافیک سواره، تراکم بالای معابر شریانی درجه یک و در نتیجه، آمار بالاتر تصادفات و ریسک بیشتر برای حرکت مدهای فعال، امتیاز پایینی در معیار ایمنی عملکردی کسب کرده‌اند. افزون بر این، گسستگی شدید در شبکه مسیرهای ویژه دوچرخه و وجود شیب‌های نامناسب در برخی مقاطع، مانع شکل‌گیری جریان حرکتی روان برای کاربران دوچرخه می‌شود. بنابراین، بر اساس خروجی مدل یکپارچه، استقرار ناوگان دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه در این مناطق در فازهای اولیه توصیه نمی‌شود و هرگونه توسعه در این محدوده‌ها باید به اجرای اصلاحات زیرساختی و ارتقای شاخص‌های ایمنی عملکردی در آینده مشروط شود.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که موفقیت و پایداری سامانه‌های دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه در کلان‌شهرها، مستلزم تغییر رویکرد برنامه‌ریزی از مدل‌های صرفاً تقاضامحور به مدل‌های یکپارچه با محوریت ایمنی ترافیکی است. نتایج حاصل از ارزیابی خبرگانی نشان داد که معیار «سطح ایمنی عملکردی» با وزن ۰,۴۹۴، مهم‌ترین پیش‌شرط برای توسعه این مد حمل‌ونقل فعال محسوب می‌شود. این یافته تأکید می‌کند که بدون اقداماتی مانند کاهش تراکم نقاط تعارض در تقاطع‌ها و کنترل سرعت وسایل نقلیه موتوری، حتی مناطقی که از تقاضای بالقوه بالایی برخوردارند نیز نمی‌توانند بستر مناسبی برای پذیرش این سامانه باشند؛ زیرا در چنین شرایطی، ریسک آسیب به کاربران افزایش می‌یابد. در رتبه‌های بعدی، معیار «کیفیت زیرساخت» با وزن ۰,۳۱۳ به‌عنوان بستر کالبدی حرکت و معیار «تقاضای بالقوه» با وزن ۰,۱۹۲ به‌عنوان عامل پشتیبان عملکرد سامانه قرار گرفتند. همچنین، اجرای مدل تلفیقی و ارزیابی فضایی مناطق هفده‌گانه کلان شهر مشهد در سه سطح «کاملاً مستعد»، «دارای پتانسیل متوسط» و «نامناسب» نشان داد که ظرفیت پذیرش سامانه دوچرخه اشتراکی بدون ایستگاه در سطح شهر به صورت یکنواخت توزیع نشده است. بر اساس خروجی مدل، مناطق ۵، ۱۵، ۱۱ و ۱ به دلیل برخورداری از هم‌پوشانی مناسب میان ایمنی ترافیکی، پیوستگی شبکه معابر قابل استفاده برای دوچرخه، شیب ملایم و مجاورت با ایستگاه‌های اصلی حمل‌ونقل همگانی، بالاترین میزان مطلوبیت فضایی را به خود اختصاص دادند. ازاین‌رو، این مناطق به‌عنوان اولویت‌های اجرایی و کم‌ریسک برای آغاز فاز نخست استقرار ناوگان دوچرخه‌های اشتراکی بدون ایستگاه پیشنهاد می‌شوند. در مقابل، توسعه سامانه در سایر نواحی شهری، به‌ویژه مناطقی که در سطح نامناسب ارزیابی شده‌اند، به دلیل ضعف زیرساختی و ریسک بالاتر تصادفات، تا پیش از اجرای اصلاحات کالبدی و ارتقای شاخص‌های ایمنی عملکردی، توجیه‌پذیر نخواهد بود.

٦-مراجع

-C. C. Reynolds, M. A. Harris, K. Teschke, P. A. Cripton, and M. Winters (2009). The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature. *Environ Health,* Vol. 8, No. 1, 47, Dec. **doi: 10.1186/1476-069X-8-47**

-M. Mangold, P. Zhao, H. Haitao, and A. Mansourian (2022). Geo-fence planning for dockless bike-sharing systems: a GIS-based multi-criteria decision analysis framework. *Urban Informatics,* Vol. 1.
doi: 10.1007/s44212-022-00013-1

-M. S. Bahadori, A. B. Gonçalves, and F. Moura (2022). A GIS-MCDM Method for Ranking Potential Station Locations in the Expansion of Bike-Sharing Systems. *Axioms,* Vol. 11, No. 6, 263-264.
doi: 10.3390/axioms11060263

-Y. Guo, L. Yang, and Y. Chen (2022). Bike Share Usage and the Built Environment: A Review. *Frontiers in Public Health,* vol. 10-2022.
doi: 10.3389/fpubh.2022.848169

-Y. Xu et al., (2019). Unravel the landscape and pulses of cycling activities from a dockless bike-sharing system," Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 75, 184–203.
doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.002

-Y. Yang, X. Wu, P. Zhou, Z. Gou, and Y. Lu, (2019). Towards a cycling-friendly city: An updated review of the associations between built environment and cycling behaviors (2007–2017). *Journal of Transport & Health,* Vol. 14, 100613-100614.
doi: 10.1016/j.jth.2019.100613

-C. Médard De Chardon (2019). The contradictions of bike-share benefits, purposes and outcomes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* Vol. 121, 401–419.
doi: 10.1016/j.tra.2019.01.031

-J. Malczewski, (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. *Wiley.*

-J. Pucher, J. Dill, and S. Handy (2010). Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: An international review. *Preventive Medicine,* Vol. 50, S106–S125.
doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.028

-K. Teschke et al., (2012). Route Infrastructure and the Risk of Injuries to Bicyclists: A Case-Crossover Study. *Am J Public Health,* Vol. 102, No. 12, 2336–2343.
doi: 10.2105/AJPH.2012.300762

-L. Liu and H. J. Miller (2022). Measuring the impacts of dockless micro-mobility services on public transit accessibility. *Computers, Environment and Urban Systems,* Vol. 98, 101885.
doi:org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101885

A Spatial Multi-Criteria Decision-Making Model for Site Selection and Prioritization of Suitable Areas for Dockless Bike-Sharing System Deployment (Case Study: Mashhad)

Ali Tavakoli Kashani, *Associate Professor, 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.
Mohammadreza Bagheri Delouee, Ph.D., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: alitavakoli@iust.ac.ir

Received: July 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
With increasing urban density and the intensification of challenges related to traffic congestion, pollution, and energy consumption, the development of active and environmentally friendly transportation systems has become one of the necessities of urban planning. In this regard, dockless bike-sharing systems, due to their high flexibility and ability to serve short intra-urban trips, have received attention as one of the innovative solutions in micromobility. However, the absence of physical docking stations in these systems creates an important challenge in identifying suitable areas for fleet deployment, improving operational efficiency, and reducing urban conflicts. The aim of this study is to locate and prioritize suitable areas for launching a dockless bike-sharing system across the 17 municipal districts of Mashhad. For this purpose, Geographic Information Systems and spatial multi-criteria decision-making methods were integrated. The evaluation framework of the study includes three main criteria: potential demand, infrastructure quality, and functional safety level, which were assessed through 13 operational sub-criteria. The criteria were weighted using the Analytic Hierarchy Process based on expert judgments, and the final score of each district was calculated through the Weighted Linear Combination method. The results showed that, in the proposed site-selection model, functional safety level, with a weight of 0.494, is the most important factor affecting the identification of suitable areas. It is followed by infrastructure quality, with a weight of 0.313, and potential demand, with a weight of 0.192. Based on the output of the integrated model, Districts 5, 15, 11, and 1 were identified as the most suitable and promising areas for implementing the first phase of the dockless bike-sharing system in Mashhad.

Keywords: Active Mobility, Dockless Bike-Sharing, Urban Site Selection, Spatial Multi-Criteria Decision-Making, Analytic Hierarchy Process