بهینه‌سازی طراحی شبکه و مسیرهای ویژه دوچرخه با هدف کاهش زمان سفر در کلان‌شهرها

مقاله علمی-پژوهشی

محسن مرادی فرد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

* **سعید حسامی (نویسنده مسئول)**، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل ، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول: S.Hesami@nit.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

صفحه ۲۰۰-۱۸۵

چکیده

آلودگی هوا و تراکم ترافیک ناشی از استفاده بی‌رویه از خودروهای شخصی، کلان شهرها را با مخاطرات جدی مواجه ساخته است. توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری و تعیین مسیرهای ویژه دوچرخه یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت تقاضای سفر به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر، پنج مسیر بالقوه در شهر قم بر اساس شش شاخص کلیدی شامل حجم ترافیک ساعتی، شیب طولی، عرض معبر، تعداد تقاطعات، سرعت مجاز و وضعیت پارکینگ حاشیه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.برای وزن‌دهی به شاخص‌ها از آزمون فریدمن بر اساس داده‌های پرسشنامه (۳۸٤ کاربر و ۱۵ متخصص) و برای رتبه‌بندی مسیرها از روش تاپسیس استفاده شده است. همچنین شاخص سازگاری به کمک روش AHP محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مسیر شماره ۳ (خیابان توحید) با شاخص سازگاری (۲,٤ -) و نزدیک‌ترین فاصله به ایده‌آل مثبت در تاپسیس، به عنوان بهترین گزینه از نظر تعادل بین شرایط هندسی و ترافیکی انتخاب شد.در سناریوی کاهش ۳۱ درصدی خودروها (بر اساس تمایل اعلام شده کاربران در پرسشنامه)، زمان سفر ٤۰ درصد کاهش و سرعت جریان ترافیک ۵۷ درصد افزایش یافت. خروجی نهایی پژوهش، یک چارچوب عملیاتی شامل شش گام از انتخاب شاخص تا شبیه‌سازی ترافیک است که قابل تعمیم به سایر شهرهای پرجمعیت نیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: دوچرخه، مدیریت تقاضا، متغیرهای هندسی و ترافیکی، آلودگی هوا

۱-مقدمه

سیستم‌های حمل و نقل شهری در کلانشهرها با چالش‌های اساسی نظیر تراکم ترافیک، آلودگی هوا و مصرف بالای انرژی مواجه هستند. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت (۲۰۲۲)، بیش از ۹۰ درصد جمعیت شهری جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که میزان آلاینده‌های هوا فراتر از حد مجاز است و سهم قابل توجهی از این آلودگی ناشی از خودروهای شخصی می‌باشد.در این میان، حمل‌ونقل با دوچرخه به عنوان راهکاری بدون آلایندگی، کم فضا و ارتقا دهنده سلامت عمومی، به ویژه برای سفرهای کوتاه تا متوسط (زیر ٦ کیلومتر) مورد تأکید قرار گرفته است. تراکم ترافیک و آلودگی هوا از مهم‌ترین چالش‌های حمل‌ونقل شهری در شهرهای بزرگ و متوسط محسوب می‌شوند. افزایش استفاده از خودروهای شخصی، به‌ویژه خودروهای تک‌سرنشین و فرسوده، موجب افزایش مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، کاهش کیفیت هوا و بروز مشکلات بهداشتی شده است. در سال‌های اخیر، تجربه بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته نشان داده است که توسعه توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری می‌تواند با افزایش جذابیت سفرهای غیرموتوری، به کاهش وابستگی به خودروهای

شخصی کمک کند. بااین‌حال، آثار ترافیکی این سیاست به نحوه تخصیص ظرفیت معابر، میزان تغییر شیوه سفر و ساختار شبکه حمل‌ونقل وابسته است؛ بنابراین طراحی مسیرهای دوچرخه باید با ارزیابی هم‌زمان تقاضای دوچرخه‌سواری و عملکرد شبکه خودروها همراه باشد (Liu و همکاران، ۲۰۲۵) .

در مقابل، راهکارهای سنتی نظیر تعریض معابر و توسعه شبکه راه‌ها به دلیل محدودیت فضا و هزینه‌های اجرایی بالا، در بسیاری از شهرها کارایی محدودی دارند. از این رو، توسعه زیرساخت‌های دوچرخه سواری به عنوان یکی از راهبردهای حمل‌ونقل پایدار، مورد توجه برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است. با وجود مزایای دوچرخه‌سواری، کیفیت و ایمنی زیرساخت‌ها از عوامل مهم در توسعه این شیوه حمل‌ونقل به شمار می‌روند. شواهد حاصل از مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مسیرهای دارای جداسازی فیزیکی و طراحی مناسب تقاطع‌ها می‌توانند به بهبود ایمنی دوچرخه‌سواران کمک کنند؛ در مقابل، مسیرهای فاقد حفاظت کافی و نقاط تلاقی جریان‌های ترافیکی از بخش‌های نیازمند توجه در طراحی شبکه هستند (Chen و همکاران، ۲۰۲۶).

پژوهش‌های پیشین به انتخاب مسیر دوچرخه با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند. برای مثال، (چن و وانگ ۲۰۲۲) از تحلیل مکانی مبتنی بر GIS برای شناسایی مسیرها استفاده کردند. (لیو و همکاران ۲۰۲۵) با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، انتخاب مسیر را بر اساس داده‌های تردد پیش‌بینی نمودند. در مطالعات مرتبط با برنامه‌ریزی شبکه دوچرخه، معیارهای هندسی، ایمنی، دسترسی و ویژگی‌های ترافیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. (شیرمحمدی و همکاران، ۱۴۰۲) با استفاده از داده‌های پرسشنامه، روش دیمتل و فرایند تحلیل شبکه‌ای، عوامل مؤثر بر انتخاب مسیر دوچرخه را در منطقه ۱۰ تهران شناسایی و اولویت‌بندی کردند. همچنین (Güldü و همکاران، ۲۰۲۵) با استفاده از یک مدل ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل شبکه، رویکردی برای بهبود برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دوچرخه در شهر سیواس ارائه کردند. این مطالعات ضرورت توجه هم‌زمان به معیارهای متعدد در طراحی شبکه دوچرخه را نشان می‌دهند.شکاف روشنی در ادبیات پژوهشی وجود دارد: هیچ چارچوب یکپارچه‌ای که ترکیبی از (۱) وزن‌دهی مبتنی بر نظر کاربران، (۲) رتبه‌بندی عینی با TOPSIS، (۳) شاخص سازگاری با AHP و (٤) شبیه‌سازی ترافیک سناریوهای کاهش تقاضا باشد، در یک مطالعه موردی مشخص ارائه نشده است.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری، هنوز چارچوبی جامع که به‌صورت هم‌زمان معیارهای هندسی و ترافیکی را در انتخاب مسیرهای دوچرخه لحاظ کرده و اثرات ناشی از تغییر الگوی سفر بر عملکرد شبکه ترافیکی را ارزیابی کند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب بهینه برای انتخاب مسیرهای ویژه دوچرخه در شهر قم و بررسی تأثیر آن بر کاهش زمان سفر انجام شده است. در این راستا، ابتدا اهمیت نسبی شش معیار اصلی شامل حجم ترافیک ساعتی، شیب طولی، عرض معبر، تعداد تقاطعات، سرعت مجاز و وضعیت پارکینگ حاشیه‌ای با استفاده از آزمون فریدمن تعیین شد. سپس پنج مسیر کاندید با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS و AHP ارزیابی و رتبه‌بندی شدند و میزان هم‌خوانی نتایج حاصل با ارزیابی مستقیم کاربران مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، تأثیر انتقال بخشی از سفرهای خودرویی به دوچرخه در سناریوهای مختلف بر شاخص‌هایی نظیر زمان سفر، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AIMSUN تحلیل شد. نوآوری اصلی پژوهش در تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با شبیه‌سازی خرد ترافیک و ارائه یک چارچوب کاربردی برای برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه در شهرهای پرجمعیت نهفته است.

دوچرخه وسیله نقلیه ای کم هزینه، مناسب و ارزان است که از آن می توان برای مسیرهای کوتاه و متوسط شهری، خیابان های محلی و تردد در شهرکها استفاده کرد. دوچرخه سواری هم ورزش است که به سلامتی انسان کمک می کند و هم باعث نشاط می شود و از همه مهمتر اینکه هیچگونه آلودگی برای محیط زیست به ویژه در شهرهایی که با خطر آلودگی مواجهند ندارد. ترویج دوچرخه سواری به عنوان گزینه ای برای کاهش استفاده از خودروهای سواری در الگوی مصرف حمل و نقل کشور و مقررات معماری و شهرسازی ایران نیز مورد تأکید قرار گرفته است.در کشور ما به رغم ضرورت کارشناسی و اجتماعی استفاده از دوچرخه در سامانه حمل و نقل شهری، تاکنون اقدام

زیادی در این خصوص صورت نگرفته است. حمل و نقل با دوچرخه نمی تواند جایگزین تمام سفرهای موتوری گردد، لیکن عمدتا در سفرهای کوتاه و متوسط شهری کاربرد آن توصیه می شود و می تواند در این جایگاه به عنوان سریع ترین وسیله نقلیه غیر موتوری نقش مؤثری در کاهش بار ترافیکی ایفا نماید. وجود یک الگوی طراحی مناسب دوچرخه سواری با رعایت تمامی معیارها و پارامترهای مؤثر در آن در جهت کاهش زمان سفر، هزینه سفر و حجم ترافیک می تواند راهگشای مناسبی در کلان شهرها باشد.

۲-پیشینه تحقیق

پژوهش‌های گسترده‌ای پیرامون طراحی مسیرهای دوچرخه و تأثیر آن بر شاخص‌های ترافیکی انجام شده است. تاکاکی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر خط‌کشی رنگی و عرض مسیر دوچرخه بر هوشیاری رانندگان در تقاطعات چراغدار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مسیرهای رنگی نسبت به مسیرهای بدون رنگ، هوشیاری رانندگان را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان شناسایی و اولویت‌بندی مسیرهای مناسب دوچرخه‌سواری را فراهم می‌کند. (صیامی و همکاران، ۱۴۰۲) با ترکیب AHP و GIS به انتخاب مسیر ایمن دوچرخه در شهر مشهد پرداختند. همچنین(Pinto و همکاران، ۲۰۲۶) در یک مرور نظام‌مند، روش‌های اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در شبکه‌های دوچرخه را از رویکردهای مبتنی بر GIS تا الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یادگیری ماشین بررسی کردند. (لیو و همکاران، ۲۰۲۵) با بهره‌گیری از یادگیری ماشین و داده‌های تردد، مدلی برای پیش‌بینی مسیرهای پرتقاضای دوچرخه ارائه دادند.(Schön و همکاران، ۲۰۲۴) در یک مطالعه مروری به بررسی روش‌های سنجش پیوستگی شبکه دوچرخه و ارتباط آن با رفتار سفر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیوستگی شبکه یکی از موضوعات مهم در ارزیابی زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری است، اما شواهد تجربی درباره اندازه اثر آن بر رفتار کاربران همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه انتخاب و اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه‌سواری انجام شده است. (شیرمحمدی و همکاران، ۱۴۰۲) در مطالعه‌ای در منطقه ۱۰ تهران، معیارهای ایمنی، زیست‌محیطی، ترافیکی و انسانی را برای انتخاب مسیرهای دوچرخه بررسی کردند. (صیامی و همکاران ،۱۴۰۲) نیز با استفاده از روش AHP و تحلیل مکانی در محیط GIS، مسیرهای مناسب و ایمن دوچرخه‌سواری را در شهر مشهد شناسایی کردند. نتایج این مطالعات بیانگر اهمیت به‌کارگیری معیارهای کمی و روش‌های چندمعیاره در برنامه‌ریزی زیرساخت‌های دوچرخه است. (دهناد و همکاران، ۱۴۰۳) در پژوهشی درباره انتخاب سامانه دوچرخه اشتراکی در شهر قم، با استفاده از داده‌های پرسشنامه و روش AHP، گزینه‌های مناسب توسعه این سامانه را بررسی کردند. در مطالعه دیگری، همین پژوهشگران عوامل مؤثر بر نگرش و تمایل شهروندان قم به دوچرخه‌سواری را ارزیابی کرده و اهمیت ایمنی مسیرها، نگرش شهروندان و موانع استفاده از دوچرخه را در توسعه سفرهای غیرموتوری مورد تأکید قرار دادند.

(مرادی و رحیمی، ۱۴۰۴) با استفاده از روش تاپسیس فازی، چهار گزینه توسعه مسیر دوچرخه‌سواری را در بافت تاریخی شهر تهران ارزیابی و رتبه‌بندی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های کالبدی، ترافیکی و اجتماعی محدوده مورد مطالعه می‌توانند در اولویت‌بندی مسیرهای پیشنهادی نقش داشته باشند. این مطالعه نمونه‌ای از کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در برنامه‌ریزی زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری در شهرهای ایران است.

در بسیاری از پژوهش‌ها، معیارهای هندسی و ترافیکی به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در حالی که ارزیابی همزمان این دو گروه معیار می‌تواند دیدگاه جامع‌تری برای انتخاب مسیرهای مناسب دوچرخه فراهم کند.مطالعات پژوهش‌ها عمدتاً از یک یا دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده‌اند و بهره‌گیری از یک چارچوب تلفیقی برای وزن‌دهی، رتبه‌بندی و ارزیابی سازگاری مسیرها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه توسعه دوچرخه‌سواری به عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به خودرو مطرح شده است، اما آثار ناشی از تغییر سهم سفر از خودرو به دوچرخه بر شاخص‌های عملکردی شبکه ترافیک، نظیر زمان سفر، مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها، به‌صورت کمی و با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی خرد ترافیک کمتر بررسی شده است. در برخی مطالعات، اطلاعات مکانی و

ویژگی‌های فیزیکی مسیرهای مورد ارزیابی به‌صورت محدود ارائه شده است؛ در نتیجه، امکان مقایسه دقیق نتایج و بهره‌برداری کاربردی از آن‌ها برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری با محدودیت‌هایی همراه است. با وجود انجام مطالعات مختلف در زمینه حمل‌ونقل پایدار و دوچرخه‌سواری شهری، پژوهش‌های مرتبط با شناسایی و اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه در شهر قم همچنان محدود بوده و نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر مبتنی بر داده‌های میدانی است.

پژوهش حاضر با تکیه بر رویکردی یکپارچه در ارزیابی و اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه، از جنبه‌های مختلف دارای ارزش علمی و کاربردی است. ارزش روش‌شناختی در این پژوهش، از ترکیب آزمون فریدمن، روشTOPSIS، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و شبیه‌سازی ترافیکی AIMSUN در قالب یک چارچوب منسجم برای ارزیابی و انتخاب مسیرهای دوچرخه استفاده شده است؛ رویکردی که در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ارزش کاربردی :پژوهش حاضر با تمرکز بر شهر قم و بهره‌گیری از داده‌های میدانی، چارچوبی عملی برای شناسایی و اولویت‌بندی مسیرهای مناسب دوچرخه ارائه می‌کند که می‌تواند در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با توسعه حمل‌ونقل پایدار مورد استفاده نهادهای اجرایی و مدیریت شهری قرار گیرد.

ارزش سیاست‌گذاری :در این مطالعه، سناریوهای مختلف تغییر سهم سفر از خودرو به دوچرخه (۱۴، ۱۷ و ۳۱ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفته و آثار آن‌ها بر شاخص‌هایی نظیر زمان سفر، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها به‌صورت کمی بررسی شده است؛ موضوعی که می‌تواند مبنایی برای تدوین سیاست‌های حمل‌ونقل شهری باشد.

ارزش تعمیم‌پذیری :چارچوب پیشنهادی این پژوهش، به دلیل اتکا به معیارهای متداول هندسی و ترافیکی و بهره‌گیری از روش‌های شناخته‌شده تصمیم‌گیری، قابلیت استفاده و انطباق با شرایط سایر شهرهای کشور را نیز دارا است.

۳-معرفی محدوده مورد مطالعه

استان قم به عنوان شهر مورد مطالعه برای این تحقیق انتخاب شده است.یکی از عوامل مؤثر در استقبال از دوچرخه، سن افراد است. از جمعیت استان٤٠,٤ درصد در گروه سنی کمتر از ۱۵ ساله، ٥٥,٥٦درصد در گروه سنی ۱۵– ٦٤ ساله و ۳,۹۲ درصد در گروه سنی ٦٥ ساله و بیشتر قرار داشته‌اند. براساس تجربیات سایر کشورها عمده سفرهای انجام گرفته با شیوه دوچرخه رانی، توسط افراد در گروه سنی ۱۵ تا ۵۰ سال انجام می‌گیرد. سفرهای افراد زیر ۱۵ سال غالبا با هدف تفریحی انجام می‌گیرد. در شهرهایی که علاوه بر دوچرخه معمولی استفاده از دوچرخه برقی نیز رایج بوده، برای افراد بالای ۵۰ سال معمولا استفاده از دوچرخه برقی مطلوب تر است. بالغ بر ۵۰ درصد از جمعیت شهر قم در سنین مناسب دوچرخه سواری ۱۵ تا ۵۰ قرار دارند. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر سیستم دوچرخه سواری شرایط جوی و ویژگیهای اقلیمی ناحیه است. جریانات مرطوب و باران زا در این شهر در حد مطلوب برای دوچرخه سواری است. در شهر قم در اکثر ماههای سال دما برای دوچرخه سواری مناسب است. در فصل تابستان به دلیل گرمای هوا و همچنین اوایل زمستان به دلیل وجود باد و سرما احتمال می‌رود از مسافران بالقوه شیوه حمل و نقل دوچرخه کاسته شود. در این موارد استفاده از تسهیلات مناسب نظیر سایه بان و تدارک مسیرهای مسقف جهت جلوگیری از تابش مستقیم آفتاب می‌تواند بر افزایش مطلوبیت این شیوه مؤثر واقع شود.

۳-۱- انتخاب مسیر مورد مطالعه

مسیرهایی که در مطالعه حاضر انتخاب شده ۵ مورد هستند که همه آن‌ها حداکثر ۷۰۰ متر از هم فاصله دارند اما مبدا همه آن‌ها در یک محدوده با شعاع حدود ۲ کیلومتر و مقصد آن‌ها در ناحیه مرکزی شهر و در یک محدوده با شعاع ۳۵۰ متر می‌باشد.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

جدول۱. معرفی مسیرهای مورد مطالعه

مسیر	نام مسیر	طول مسیر
مسیر۱	خیابان انقلاب	٤,٧
مسیر۲	آیت اله کاشانی	٥
مسیر۳	خیابان توحید	٣,٩
مسیر٤	خیابان امام خمینی	٦
مسیر٥	خیابان شهید صدوقی	٤,٢

مسیرهای انتخابی مورد مطالعه هر کدام دارای ویژگی‌های خاصی هستند. این ویژگی‌ها به گروه های هندسی، ترافیکی و ... تقسیم شده‌اند. اطلاعاتی که در مورد حداقل‌ها و یا حداکثرهای مقادیر این پارامترها ارایه شده است با توجه به مطالعات و آیین نامه‌های موجود می‌باشد.

داده‌های حجم ترافیک مورد استفاده در این پژوهش، حجم ترافیک ساعتی در ساعات اوج هستند، نه میانگین روزانه دلیل انتخاب حجم ساعتی به جای روزانه، تأکید پژوهش بر زمان سفر در شرایط اوج ترافیک است؛ زیرا در این ساعات، بالاترین میزان تقاضا و بیشترین تأخیرها رخ می‌دهد و تصمیم‌گیری برای احداث مسیر دوچرخه در این شرایط بیشترین اثر را بر کاهش زمان سفر خواهد داشت.

۳-۲-روش جمع آوری و تحلیل داده‌ها

شمارش ترافیک در سه روز کاری متوالی (شنبه، دوشنبه، چهارشنبه) در هفته دوم دی ماه ۱٤۰۳ انجام شد. روزهای تعطیل و روزهای با شرایط جوی غیرعادی (بارندگی، برف، مه غلیظ) از نمونه‌گیری حذف شدند.

ساعات شمارش

ساعات اوج صبح :۷:۳۰ تا ۸:۳۰

ساعات اوج عصر :۱۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰

در هر مسیر، در هر دو جهت (رفت و برگشت) شمارش انجام شد و میانگین دو ساعت اوج محاسبه گردید.

فرمول محاسبه

$$V_{peak} = \frac{V_{morning} + V_{evening}}{2} \qquad (۱)$$

که در آن

V_{peak}= حجم ترافیک ساعتی در ساعات اوج (وسیله در ساعت)

$V_{morning}$ = حجم ترافیک در ساعت اوج صبح

$V_{evening}$ = حجم ترافیک در ساعت اوج عصر

مثال برای مسیر ۱ (خیابان انقلاب)

جدول ۲. داده‌های ترافیکی خیابان انقلاب

جهت	ساعت اوج صبح	ساعت اوج عصر	میانگین
رفت	٤۳۰ وسیله/ساعت	٤۷۰ وسیله/ساعت	**٤٥۰**
برگشت	۱۳۰ وسیله/ساعت	۱٥۰ وسیله/ساعت	**۱٤۰**
میانگین کل	-	-	**۲۹٥**

در جدول ۳ مقدار ٤٥۰ برای مسیر ۱ درج شده که مربوط به سمت رفت (جهت پرترافیک) است، زیرا در مدلسازی TOPSIS، بدترین حالت (بیشترین حجم ترافیک) به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شده است.

بر اساس مرور ادبیات و نظرات متخصصان، شش متغیرگفته شده در ادامه به عنوان معیارهای اصلی انتخاب مسیر دوچرخه در این پژوهش انتخاب شدند.

حجم ترافیک ساعتی (وسیله/ساعت) –معیار منفی (هرچه کمتر، بهتر)

شیب طولی (درجه) – معیار منفی (هرچه کمتر، بهتر)

عرض معبر (متر) – معیار مثبت (هرچه بیشتر، بهتر)

تعداد تقاطعات، ورودی و خروجی‌ها (تعداد در طول مسیر) – معیار منفی

سرعت مجاز (کیلومتر/ساعت) – معیار منفی (سرعت بالاتر، خطر بیشتر برای دوچرخه)

وضعیت پارکینگ حاشیه‌ای –معیار منفی (مجاز = بد، غیرمجاز = خوب)

در این پژوهش برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی مسیرهای دوچرخه از سه نرم‌افزار تخصصی استفاده شد. نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ برای تحلیل آماری داده‌های پرسشنامه و اجرای آزمون فریدمن به منظور تعیین وزن نسبی شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار Expert Choice نسخه ۱۱ برای انجام مقایسات زوجی و محاسبه شاخص سازگاری بر پایه فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به کار گرفته شد. همچنین نرم‌افزار AIMSUN Next نسخه ۲۲ به منظور شبیه‌سازی جریان ترافیک و ارزیابی اثر سناریوهای مختلف کاهش سفرهای خودرویی بر شاخص‌هایی نظیر زمان سفر، سرعت متوسط، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها استفاده گردید. استفاده همزمان از این نرم‌افزارها امکان ارزیابی جامع معیارهای تصمیم‌گیری و تحلیل پیامدهای اجرایی توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری را فراهم نمود.

پرسشنامه تحقیق

پرسشنامه این پژوهش در دو بخش طراحی شده است.

بخش اول – اطلاعات عمومی: شامل سن، جنسیت، میزان استفاده روزانه از خودرو شخصی، و تجربه قبلی دوچرخه‌سواری.

بخش دوم – ارزیابی شاخص‌ها: کاربران شش شاخص (حجم ترافیک، شیب، عرض معبر، تعداد تقاطعات، سرعت مجاز، پارکینگ حاشیه‌ای) و همچنین کیفیت کلی هر یک از پنج مسیر را در مقیاس پنج‌گزینه‌ای لیکرت (خیلی مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب، خیلی نامناسب) ارزیابی کردند.

جدول ۳. داده‌های پنج مسیر مورد مطالعه با واحدهای صحیح

مسیر	حجم ترافیک ساعتی* (وسیله/ساعت)	شیب (درجه)	عرض معبر (متر)	تعداد تقاطعات	سرعت مجاز (کیلومتر/ساعت)	پارکینگ حاشیه‌ای
مسیر ۱ (انقلاب)	٤٥٠	٥	۱۰٫۳	١٤	٥٠	**ممنوع**
مسیر ۲ (کاشانی)	۳۷۰	٥	۱۲٫۸	۲۰	٥٠	**مجاز**
مسیر ۳ (توحید)	۳۱۰	٤	۱۰٫٤	١٦	٥٠	**ممنوع**
مسیر ٤ (امام خمینی)	۳٥٠	٦	۱۲٫۹	٢٤	٥٠	**مجاز**
مسیر ٥ (صدوقی)	٢٦٠	۷	۱۲٫۹	۱۹	٥٠	**مجاز**

***حجم ترافیک ساعتی گزارش شده در این جدول مربوط به سمت رفت (جهت پرترافیک) هر مسیر در ساعات اوج است.**

علاوه بر این، یک سؤال کلیدی در پرسشنامه گنجانده شد: در صورت وجود مسیر دوچرخه ایمن و مجزا، ایستگاه‌های اجاره دوچرخه در سطح شهر، و در صورت تأمین دوچرخه رایگان از سوی دولت، تا چه میزان از سفرهای خودرویی خود کاسته و به دوچرخه روی می‌آورید؟

پاسخ به این سؤال در سه سطح ارائه شد:

سطح ۱: شرایط موجود (زیرساخت فعلی)

سطح ۲: بهبود زیرساخت (مسیر ایمن + ایستگاه اجاره)

سطح ۳: زیرساخت کامل + دوچرخه رایگان دولتی

جامعه آماری و حجم نمونه

جامعه آماری این پژوهش شامل تمامی ساکنان شهر قم در گروه سنی ۱۵ تا ٦٤ سال (حدود ٦٦٠،٠٠٠ نفر بر اساس آمار سال ۱٤۰۰) می‌باشد. حجم نمونه با استفاده از فرمول کوکران برای جامعه نامحدود با سطح اطمینان ٪۹۵ و خطای ٪۵ محاسبه گردید. بدین ترتیب، ۳۸٤ پرسشنامه به صورت تصادفی ساده در نقاط مختلف شهر قم (مراکز خرید، ایستگاه‌های اتوبوس، پارک‌ها و ادارات) توزیع و جمع‌آوری شد. همچنین ۱۵ پرسشنامه تخصصی توسط اساتید حمل‌ونقل، کارشناسان شهرداری و متخصصان ترافیک تکمیل گردید.

پایایی و روایی پرسشنامه

برای سنجش پایایی (قابلیت اعتماد) پرسشنامه، از ضریب آلفای کرونباخ در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. مقدار آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه ۰٫۸۷ محاسبه گردید که نشان‌دهنده پایایی بسیار خوب (بالاتر از ۰٫۷) است.

برای تأیید روایی (اعتبار) محتوایی، پرسشنامه در اختیار ۳ نفر از اساتید رشته حمل‌ونقل قرار گرفت و پس از اعمال اصلاحات، روایی تأیید شد.

خروجی نرم‌افزار SPSS آزمون فریدمن

داده‌های حاصل از پرسشنامه وارد نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ شد و برای تعیین وزن هر یک از شش شاخص، از آزمون ناپارامتریک فریدمن استفاده گردید. جدول ۲ خروجی این آزمون را نشان می‌دهد.

جدول ٤. نتایج آزمون فریدمن خروجیSPSS

شاخص	میانگین رتبه	سطح معناداری(.Sig)
تقاطعات و گره‌ها	۱۱٫۵۸	۰٫۰۰۰
ترافیک	۱۰٫۰۳	۰٫۰۰۰
عرض و تعداد خطوط	۹٫۹۵	۰٫۰۰۰
شیب	۹٫٤۰	۰٫۰۰۰
سرعت	۷٫۷۹	۰٫۰۰۰
پارک حاشیه‌ای	۵٫۳۸	۰٫۰۰۰

مقدار معناداری کمتر از ۰٫۰۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاوت بین رتبه شاخص‌ها است.همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، «تقاطعات و گره‌ها» با میانگین رتبه ۱۱٫۵۸ بیشترین اهمیت و «پارک حاشیه‌ای» با میانگین رتبه ۵٫۳۸ کمترین اهمیت را از دید کاربران داشته‌اند.

استخراج درصدهای تغییر سفر

پاسخ به سؤال کلیدی پرسشنامه (کاهش سفر خودرویی به نفع دوچرخه) در سه سطح به صورت زیر خلاصه شد.

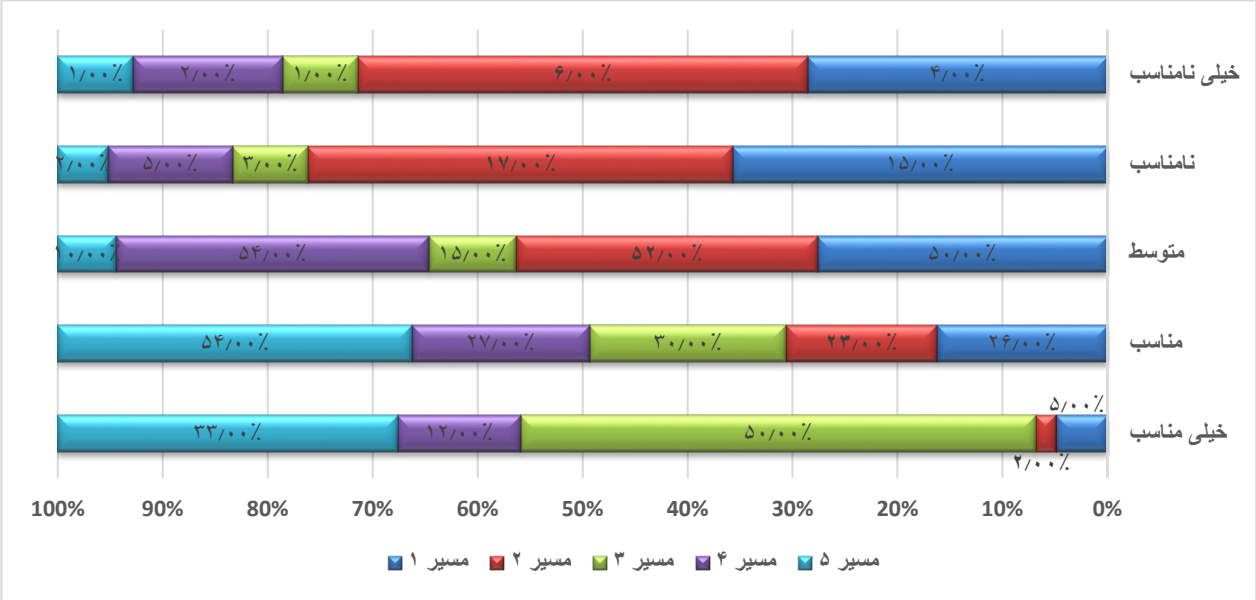
جدول۵. بررسی سوال کلیدی پرسشنامه

سطح	شرایط	میانگین درصد تمایل به کاهش سفر خودرویی
سطح ۱	شرایط موجود (زیرساخت فعلی)	۱٤٪
سطح ۲	وجود مسیر ایمن + ایستگاه اجاره دوچرخه	۱۷٪
سطح ۳	مسیر ایمن + ایستگاه اجاره + دوچرخه رایگان دولتی	۳۱٪

پاسخ ۳۸٤ کاربر در هر سطح میانگین گرفته شد. به عنوان مثال، در سطح ۳، کاربران به طور میانگین اعلام کردند که «۳۱ درصد از سفرهای خودرویی خود را با دوچرخه جایگزین خواهند کرد». این درصدها به عنوان ورودی سناریوهای شبیه‌سازی در نرم‌افزار AIMSUN استفاده شده‌اند.

جمع‌بندی نتایج حاصل از بررسی مسیرهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی کیفیت این مسیرها از دو دیدگاه «محقق» و «کاربران» تا حدی همسو اما با تفاوت‌هایی در شدت قضاوت‌ها همراه است. بر اساس دیدگاه محقق، مسیر ۱ و ٤ در سطح متوسط ارزیابی شده‌اند، مسیر ۲ نامناسب، مسیر ۳ بسیار مطلوب (خیلی مناسب) و مسیر ۵ در سطح مناسب قرار گرفته است. در مقابل، دیدگاه کاربران نشان می‌دهد که مسیر ۱ عمدتا نامناسب (حدود ۵۰ درصد)، مسیر ۲ متوسط (حدود ۵۲ درصد)، مسیر ۳ خیلی مناسب (حدود ٦۳ درصد)، مسیر ٤ متوسط (حدود ۵٤ درصد) و مسیر ۵ مناسب (حدود ۵٤ درصد) ارزیابی شده‌اند. در مجموع، مسیر ۳ بهترین عملکرد را در هر دو دیدگاه

داشته و مسیر ۲ ضعیف‌ترین وضعیت را نشان می‌دهد، در حالی‌که مسیرهای ۱، ٤ و ٥ در سطح میانی تا نسبتاً مطلوب قرار دارند و اختلاف دیدگاه محقق و کاربران در برخی موارد قابل مشاهده است.



شکل ۱. توزیع پاسخ‌های کاربران به کیفیت هر مسیر (در پنج سطر)

٤-مدلسازی تحقیق

در این پژوهش هر یک از روش‌های مورد استفاده نقش متفاوتی در فرآیند تصمیم‌گیری ایفا می‌کنند. آزمون فریدمن برای استخراج وزن نسبی معیارها بر اساس نظرات کاربران و متخصصان استفاده شد. سپس روش TOPSIS با بهره‌گیری از این وزن‌ها، مسیرهای مورد مطالعه را بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل رتبه‌بندی نمود. در ادامه، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای بررسی سازگاری و صحت نتایج حاصل از رتبه‌بندی و تعیین شاخص سازگاری مسیرها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، نرم‌افزار ایمسان امکان ارزیابی پیامدهای عملی انتخاب مسیر بر عملکرد شبکه ترافیکی را فراهم نمود. بدین ترتیب، ترکیب این روش‌ها موجب شد علاوه بر انتخاب بهترین مسیر دوچرخه، آثار اجرایی آن بر کاهش زمان سفر و بهبود عملکرد شبکه نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

تمامی متغیرها و پارامترهایی که در قسمت های قبل ارایه شده است برای انتخاب و ارزیابی یک مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. هریکی از این متغیرها و پارامترها دارای اهمیت‌های جداگانه ای هستند.به طوری که تاثیر هر کدام از این پارامترها برای انتخاب و ارزیابی یک مسیر متفاوت هستند. به عنوان مثال شیب خط و تعداد تقاطعات موجود در مسیر برای انتخاب ان مسیر تاثیر بسزایی دارند. برای این کار از روش TOPSIS استفاده شده است که به شیوه مراحل زیر انجام می‌شود.

مرحله اول: انتخاب متغیرهای موثر

از بین داده‌های جمع آوری شده ۵ داده که دارای اطلاعات بهتر و مرتبط با موضوع است و همچنین برخی از آن‌ها در انواع مطالعات مسیرهای دوچرخه استفاده شده به عنوان داده‌های موثر تحقیق انتخاب شده است.

این داده‌ها عبارتند از: حجم ترافیک، تعداد تقاطعات، ورودی و خروجی‌های موجود، شیب طولی مسیر، عرض مسیر، وجود پارکینگ حاشیه‌ای، سرعت مجاز مسیر

مرحله دوم: تشکیل جدول داده

جدول ٦. داده‌های تحقیق

مسیر	ADT	Pm	N	W	S	M
1	450	ممنوع	19	10.3	50	5
2	370	مجاز	20	12.8	50	6
3	310	ممنوع	16	10.4	50	6
4	350	مجاز	24	12.3	60	5
5	260	مجاز	19	12.9	50	7

مرحله سوم: کمی سازی داده‌ها

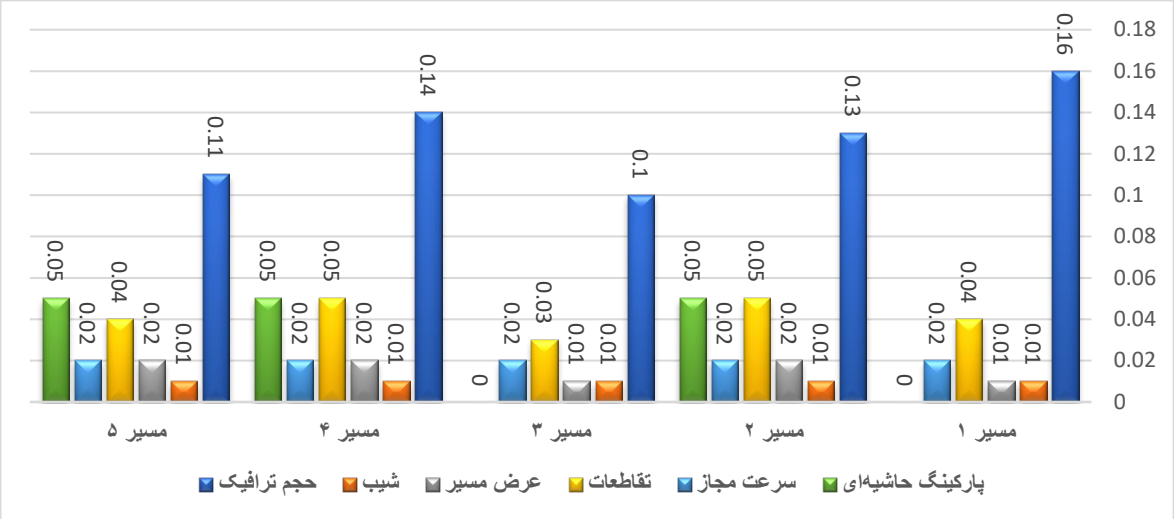
با توجه به این که داده‌های موجود همه باید به صورت کمی باشند،اما پارکینگ حاشیه‌ای دارای داده‌های کیفی است به همین دلیل این داده‌ها باید کمی‌سازی شوند. بدین جهت برای مسیرهای مجاز به پارکینگ حاشیه‌ای عدد۱ و مسیرهای غیر مجاز عدد صفر لحاظ شده است.

جدول ۷. کمی سازی داده‌ها

مسیر	ADT	Pm	N	W	S	M
1	450	۰	19	10.3	50	5
2	370	۱	20	12.8	50	6
3	310	۰	16	10.4	50	6
4	350	۱	24	12.3	60	5
5	260	۱	19	12.9	50	7

مرحله چهارم: بی‌مقیاس سازی داده‌ها

این فرآیند سعی می‌کند مقیاس‌های موجود در ماتریس تصمیم را بدون مقیاس نماید. به این ترتیب که هر کدام از مقادیر بر اندازه بردار مربوط به همان شاخص تقسیم می‌شود. پس ابتدا مجذور هر یک از درایه‌ها را بدست می‌آوریم و سپس جذر مجموع مجذورات هر یک از شاخص‌ها را بدست می‌آوریم. حال هر یک از درایه‌ها را بر جذر مجموع مجذورات شاخص مربوطه تقسیم می‌کنیم. حاصل مطابق جدول زیر خواهد بود.



شکل۲. مقایسه پنج مسیر از نظر شش شاخص ارزیابی پس از بی‌مقیاس‌سازی

برای وزن دهی ماتریس‌ها از نتایج آزمون فریدمن استفاده می‌شود. در آزمون فریدمن بر اساس نتایج پرسشنامه میانگین رتبه هر گزینه مشخص شده است که بر این اساس این داده‌ها به وزن درصدی تقسیم می شود و در ادامه از آن استفاده می‌شود.

نتایج وزن‌دهی بر اساس آزمون فریدمن نشان می‌دهد که «تقاطع‌ها و گره‌ها» بیشترین وزن را در میان متغیرها به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن «ترافیک» و «عرض و تعداد خطوط» در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مقابل، «پارک حاشیه‌ای» کمترین اهمیت نسبی را نشان می‌دهد.

در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که عوامل مرتبط با ساختار شبکه معابر و جریان ترافیک، بیشترین تأثیر را در ارزیابی نهایی مسیرها داشته‌اند.

تعیین راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی

در این قسمت بسته به نوع شاخص و اثر گذاری آن روی هدف تصمیم گیری، ایده آل مثبت و ایده آل منفی تعیین می‌شود. برای شاخص‌هایی که دارای تأثیر گذاری مثبت بر روی هدف مسئله می‌باشند، ایده آل مثبت، بیشترین مقدار آن شاخص خواهد بود. به طور مثال هر چه امتیاز عرض مسیر بالاتر باشد برای ما مطلوب‌تر است. به همین منوال برای شاخص‌هایی که دارای تأثیر گذاری منفی بر روی هدف مسئله می‌باشند، ایده‌آل مثبت، کمترین مقدار آن شاخص خواهد بود. به طور مثال هر چه حجم تردد پایین‌تر باشد برای ما مطلوب‌تر است. جدول زیر مقادیر حداکثر و حداقل هر یک از شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول۸. تست فریدمن

متغیر	وزن
شیب	۰,۱۶
ترافیک	۰,۱۹
پارک حاشیه‌ای	۰,۱۱
تقاطعات و گره‌ها	۰,۲۱
عرض و تعداد خطوط	۰,۱۷
سرعت	۰,۱۴

جدول۹. حداکثر و حداقل شاخص‌ها

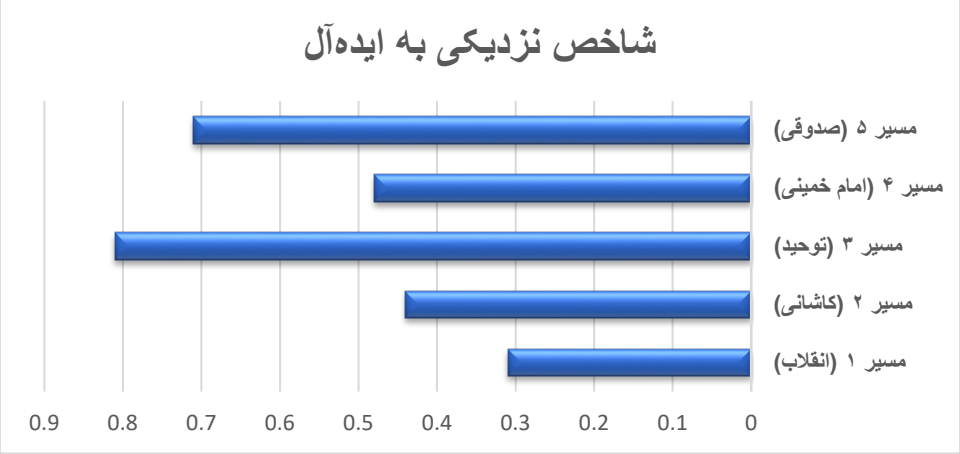
گزینه‌ها	max	min
حجم ترافیک	۰,۱۶۲۲	۰,۰۵۴۱
وجود پارکینگ حاشیه‌ای	۰,۰۴۶۶	۰,۰۰۰۰
تعداد تقاطعات، ورودی و خروجی‌های موجود	۰,۰۵۳۷	۰,۰۲۳۹
عرض مسیر	۰,۰۱۵۶	۰,۰۰۹۹
سرعت مجاز مسیر	۰,۰۱۹۶	۰,۰۱۳۶
شیب طولی مسیر	۰,۰۱۲۶	۰,۰۰۶۴

به دست آوردن میزان فاصله هر گزینه تا ایده آل‌های مثبت و منفی ایده آل مثبت برای معیار حجم ترافیک مقدار حداقل و برای مابقی معیارها مقدار حداکثر است و ایده آل منفی برای حجم ترافیک مقدار حداکثر و برای مابقی معیارها مقدار حداقل است. برای هر یک از خیابان ها فاصله مقدار ذکر شده برای هر معیار را با ایده آل مثبت آن معیار بدست آمده و سپس به توان ۲ می‌رسد. مجموع این مقادیر را محاسبه کرده و سپس جذر آن محاسبه می‌شود. به همین منوال برای فاصله تا ایده آل منفی عمل باید کرد و مقادیر را برای هر یک از خیابان ها محاسبه کرد. در انتهای این مرحله برای هر یک از خیابان ها دو مقدار (فاصله از ایده آل مثبت و فاصله از ایده آل منفی) خواهیم داشت.

جدول۱۰. فاصله از ایده آل برای گزینه‌ها

گزینه‌ها	plus	minus
مسیر۱	0.109	0.050
مسیر۲	0.072	0.056
مسیر۳	0.024	0.101
مسیر٤	0.070	0.065
مسیر٥	0.046	0.110

رتبه بندی راه‌ها به ترتیب و وزن‌های زیر خواهد بود.



شکل ۳. مقادیر شاخص نزدیکی به ایده‌آل

شاخص سازگاری

شاخص سازگازی شاخصی است که نشان دهنده وضعیت یک مسیر برای احداث مسیر ویژه دوچرخه و مقایسه مسیرهای مختلف برای انتخاب مسیر بهتر می‌باشد. هرچه ای شاخص عدد بزرگتری به ماد بدهد یعنی آن مسیر بهینه‌تر است. شاخص سازگاری برای همه مسیرها محاسبه می‌شود و سپس مسیری بهترین است که بتواند بیشترین عدد را کسب کند که به روش‌هایی که در ادامه گفته شده است محاسبه می‌شود.

مقایسات زوجی با استفاده از روش AHP

در این مرحله متغیرهای تحقیق نسبت به هم بر اساس تاثیر آن ها بر زمان سفر مقایسه می‌شوند و با استفاده از روش AHP وتحلیل با استفاده از نرم افزار EXPORT CHOICE نتایج آن‌ها ارایه می‌گردد.

رابطه شاخص سازگاری بر اساس رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$V = \pm 0.09M + 0.084W + 0.073W_b + 0.08W_{bp} \pm 0.085L - 0.082S + 0.152V_d - 0.06N - 0.012H - 0.071P_m - 0.211N_s \quad (۲)$$

ضریب‌های موجود در معادله بالا مربوط به وزن متغیرها با استفاده از روش AHP می‌باشد. همچنین علامت هریک از پارامترها بر اساس تاثیر هر متغیر بر ایمنی و همچنین توجیه برای ایجاد مسیر دوچرخه با بررسی کارشناسان حمل و نقل، اساتید

رشته های مرتبط و متخصصین شهرداری ارایه شده است. نکته مهم برای متغیر شیب مسیر این است که بر اساس آیین نامه اگر شیب مسیر در بیشتر از ۹ درجه باشد به عنوان پارامتر منفی در نظر گرفته می‌شود و در غیر اینصورت مثبت می‌باشد. همچنین دوچرخه سواری برای طول مسیر های ٦ کیلومتر و کمتر به عنوان پارامتر مثبت و برای بیشتر از ان منفی می‌باشد.

عوامل ارایه شده باعث می‌شود یک مسیر دوچرخه دارای شرایطی باشد که مورد استقبال دوچرخه سواران گردد. زمان سفر یکی از مولفه های مهم در انتخاب مسیر و شیوه سفر است.

پس می‌توان با رعایت موارد گفته شده یک مسیر با سرعتی که مورد رضایت همه هست انتخاب شود. بر اساس موارد ارایه شده مسیرها با هم مقایسه شده‌اند. ابتدا عوامل با هم وزن دهی شده و سپس برای همه مسیرها ارایه شده است و در ادامه مسیری که دارای شرایطی برای سرعت مناسب و زمان سفر معقول هست اتخاب شده است. مسیرهای مورد مطالعه با در نظر گرفتن شرایط رضایتمندانه و دارای زمان سفر بهتر نسبت به بقیه به شکل زیر رتبه بندی شده است.

جدول۱۱. شاخص سازگاری برای هر مسیر

مسیرها	V	رتبه
مسیر شماره۱	-۲۷,۱٦	٤
مسیر شماره۲	-۳۲,۱۹	٥
مسیر شماره۳	-۲,٤	۱
مسیر شماره٤	-۱۱,۸٤	۳
مسیر شماره٥	-٥,۹٥	۲

جدول۱۲. رتبه بندی مسیرهای مورد مطالعه

(رتبه)	گزینه ها
٥	مسیر۱
٤	مسیر۲
۱	مسیر۳
۳	مسیر٤
۲	مسیر٥

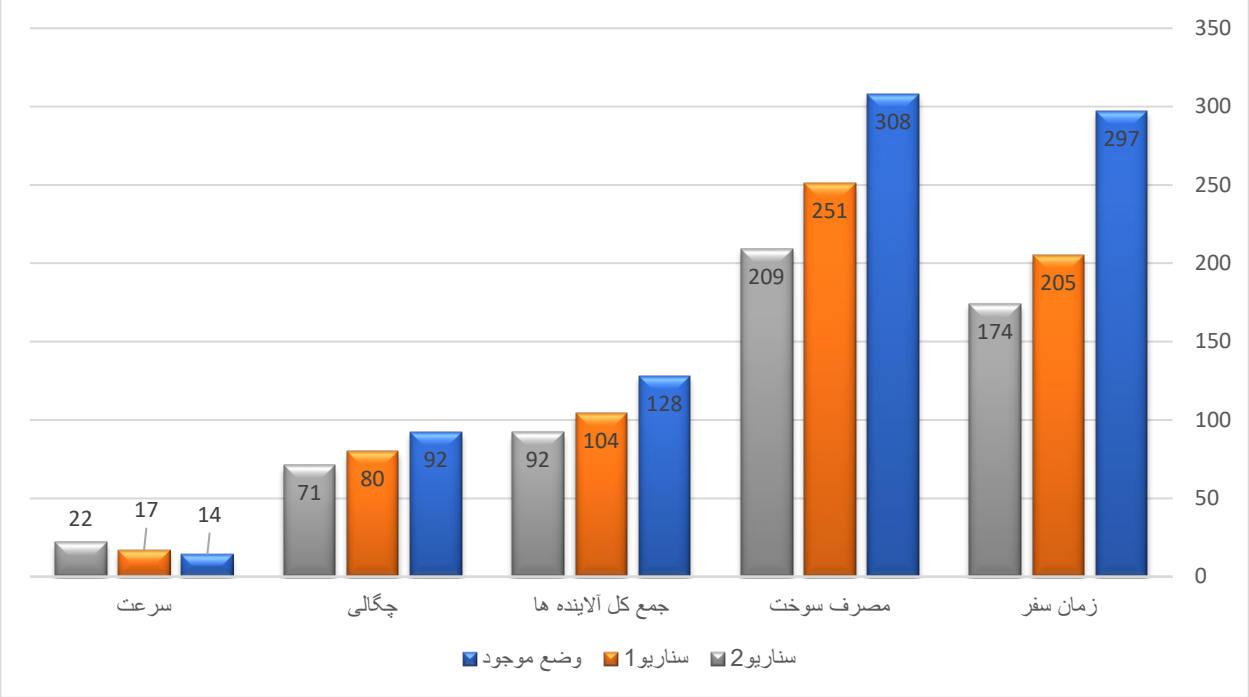
تاثیر وجود مسیر دوچرخه بر زمان سفر خودروها

وجود مسیر دوچرخه و ارایه امکانات باعث می‌شود که افراد به استفاده از دوچرخه روی آورند البته به شرطی که بتواند زیر ساخت‌های آن فراهم گردد.طبق بررسی‌های انجام شده و پرسشنامه ارایه شده مشخص شد که افراد در مسیرهای درون شهری در صورت وجود مسیرهای دوچرخه با زیرساخت‌های مناسب و وصل شدن مسیر به نقاط مهم شهر و محدوده‌های مسکونی، ١٤ درصد از افراد به استفاده از دوچرخه روی می‌آورند. البته تقاضا بیشتر است اما به دلیل هزینه خرید دوچرخه این درصد اعلام شده است. اما ۱۷ درصد دیگر اعلام داشتند که اگر از طریق دولت دوچرخه در اختیار کاربران قرار گیرد و ایستگاهای اجاره دوچرخه در شهر وجود داشته باشد، از آن استفاده خواهند کرد. با استفاده از نرم افزار ایمسان برای مسیر شماره ۳ این درصدها در نظر گرفته شده و نتایج آن در جدول زیر ارایه شده است: برای این کار ۳ سناریو در نظر گرفته شده است.

سناریوی ۱) سناریوی وضع موجود: این سناریو شرایط موجود و وضع فعلی خیابان را تحلیل می‌کند.

سناریوی ۲) کاهش ١٤ درصدی کاربران خودرو

سناریوی ۳) کاهش ۳۱ درصدی کاربران خودرو



شکل ٤. مقایسه سناریوهای نتایج نرم افزار ایمسان

نتایج تحلیل نشان می دهد که اگر تعداد خودروها به دلیل استفاده از دوچرخه کاهش یابد یا ترافیک خودروها کم شود، به ازای کاهش ۳۱ درصدی استفاده از خودروها، زمان سفر حدود ٤۰ درصد کم تر شده و سرعت حرکت به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۵-نتیجه گیری

در این پژوهش، یک چارچوب ترکیبی شامل روش‌های AHP ،TOPSIS، آزمون فریدمن و شبیه‌سازی AIMSUN برای اولویت‌بندی پنج مسیر کاندید دوچرخه در شهر قم ارائه شد. نتایج نشان داد:

از دیدگاه ۳۸٤ کاربر، تقاطعات و گره‌ها (میانگین رتبه ۱۱,۵۸) و حجم ترافیک (میانگین رتبه ۱۰,۰۳) بیشترین اهمیت را در انتخاب مسیر دوچرخه دارند، در حالی که پارکینگ حاشیه‌ای (میانگین رتبه ۵,۳۸) کمترین تأثیر را دارد.

رتبه‌بندی نهایی با روش TOPSIS نشان داد مسیر شماره ۳ (خیابان توحید) با شاخص نزدیکی به ایده‌آل ۰,۸۱ بهترین گزینه و مسیر شماره ۱ (خیابان انقلاب) با مقدار ۰,۳۱ ضعیف‌ترین گزینه است.

شاخص سازگاری محاسبه شده با روش AHP نیز تأیید کرد که مسیر ۳ (امتیاز منفی ۲,٤ در مقابل مسیر ۱ با امتیاز منفی ۲۷,۱٦) بهترین وضعیت را از نظر تعادل بین معیارهای هندسی و ترافیکی دارد.

شبیه‌سازی سناریوی کاهش ۳۱ درصدی خودروها (بر اساس تمایل اعلام‌شده کاربران) نشان داد که زمان سفر ٤۰ درصد کاهش، سرعت جریان ترافیک ۵۷ درصد افزایش، مصرف سوخت ۳۲ درصد کاهش و آلاینده‌های خروجی ۲۸ درصد کاهش می‌یابد.

یافته‌های پژوهش حاضر درباره اهمیت ساختار شبکه و ویژگی‌های مسیرها با مباحث مطرح‌شده توسط Schön و همکاران، (۲۰۲٤) در زمینه پیوستگی شبکه دوچرخه و با نتایج مرور نظام‌مند Chen و همکاران، (۲۰۲٦) درباره نقش طراحی ایمن تقاطع‌ها همسو است. از سوی دیگر، Liu و همکاران، (۲۰۲۵) نشان داده‌اند که ارزیابی توسعه شبکه دوچرخه باید

پیامدهای آن بر تقاضای سفر و عملکرد ترافیکی خودروها را نیز در نظر بگیرد. بر این اساس، پژوهش حاضر تلاش می‌کند ارزیابی چندمعیاره مسیرهای منتخب را با شبیه‌سازی سناریوهای تغییر تقاضای سفر در شهر قم مرتبط سازد.با این حال، نوآوری پژوهش حاضر در تلفیق چهار روش تحلیلی در یک چارچوب یکپارچه و شبیه‌سازی سناریوهای کاهش خودرو است که در مطالعات پیشین دیده نمی‌شود.

شبیه‌سازی انجام شده در محیط ایمسان نشان داد که انتخاب مسیر مناسب دوچرخه به تنهایی کافی نیست و اثربخشی واقعی آن زمانی مشخص می‌شود که تأثیر آن بر عملکرد شبکه ترافیکی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که انتقال بخشی از سفرهای خودرویی به دوچرخه می‌تواند علاوه بر کاهش زمان سفر، موجب افزایش سرعت متوسط جریان ترافیک، کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها شود. بنابراین ایمسان نقش مهمی در تبدیل نتایج حاصل از تصمیم‌گیری نظری به پیامدهای عملی و قابل اندازه‌گیری ایفا نموده است.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق سه رویکرد مکمل شامل آزمون فریدمن، TOPSIS و AHP همراه با شبیه‌سازی ترافیکی AIMSUN است. در صورت استفاده از هر یک از این روش‌ها به صورت مستقل، امکان ارزیابی جامع مسیرها فراهم نمی‌شد. آزمون فریدمن اهمیت معیارها را از دید کاربران مشخص نمود، TOPSISرتبه‌بندی کمی مسیرها را انجام داد، AHPسازگاری نتایج را کنترل کرد و AIMSUN پیامدهای اجرایی انتخاب مسیر را بر عملکرد شبکه ترافیکی نشان داد. این رویکرد ترکیبی موجب افزایش قابلیت اطمینان نتایج و کاهش عدم قطعیت در انتخاب مسیر بهینه گردید.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در توسعه مسیرهای ایمن دوچرخه، ایجاد ایستگاه‌های اجاره دوچرخه و حمایت‌های دولتی برای تأمین دوچرخه می‌تواند بخشی از سفرهای کوتاه درون‌شهری را از خودرو به دوچرخه منتقل کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تحقق این سیاست‌ها در شهر قم قادر است تا حدود ۳۱ درصد از سفرهای خودرویی کوتاه‌مدت را کاهش داده و به دنبال آن زمان سفر، مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده‌ها را به طور محسوسی کاهش دهد. بنابراین چارچوب پیشنهادی پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل پایدار و مدیریت تقاضای سفر در شهرهای پرجمعیت مورد استفاده قرار گیرد.

محدودیت‌های پژوهش

داده‌های ترافیکی تنها در سه روز کاری جمع‌آوری شده و فصول مختلف سال پوشش داده نشده است. همچنین درصدهای تمایل به تغییر سفر بر اساس اعلام کاربران است و ممکن است در عمل با رفتار واقعی متفاوت باشد.

پیشنهاد به سیاست‌گذاران :احداث مسیر دوچرخه ابتدا در خیابان توحید (مسیر ۳) و سپس در خیابان شهید صدوقی (مسیر ۵) انجام شود. ایمن‌سازی تقاطعات، ایجاد ایستگاه‌های اجاره دوچرخه و اجرای برنامه‌های تشویقی مانند تأمین دوچرخه یارانه‌ای برای گروه‌های هدف توصیه می‌گردد.

پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

تحلیل تأثیر فصلی بودن بر تقاضای دوچرخه‌سواری، مدلسازی یکپارچه شبکه دوچرخه با روش‌های یادگیری ماشین، و ارزیابی اقتصادی-اجتماعی احداث مسیرهای دوچرخه پیشنهاد می‌شود.

٦-مراجع

-اسدالهی، رضا، صفارزاده، محمود، و ممدوحی، امیررضا. (۱۳۹۰). ارایه الگویی برای طراحی شبکه مسیرهای دوچرخه‌سواری: مطالعه موردی شهر قم. *پژوهشنامه حمل‌ونقل*، ۸(۲)، ۱۰۱–۱۱٤.

-دهناد، سید محمدحسین، عبدی شیجانی، سجاد، و ریاضی، علی. (۱٤۰۳الف). افزایش سهم استفاده از دوچرخه در سفرهای روزانه شهری با انتخاب سامانه دوچرخه اشتراکی مناسب (مطالعه موردی: شهر قم). *جاده*، ۳۲(۱۲۰)، ۱۲۱–۱۳۰.

-دهناد، سید محمدحسین، عبدی شیجانی، سجاد، و ریاضی، علی. (۱٤۰۳ب). راهکارهای بهبود نگرش و افزایش تمایل شهروندان به دوچرخه‌سواری در سفرهای درون‌شهری (مطالعه موردی، شهر قم). *پژوهشنامه حمل‌ونقل*، ۲۱(۳)، ٤۰۱–٤۱٤.

-سرایی، محمدحسین، و حج‌فروش، شهاب‌الدین. (۱٤۰۱). ارزیابی مطلوبیت طراحی مسیرهای شهری برای دوچرخه‌سواری با رویکرد شهر دوستدار دوچرخه: مطالعه موردی شهر یزد. *فصلنامه علمی‌پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۳۱(۱۲۲)، ٤۳–٦۱.

–شیرمحمدی، حمید، رحیمی، فرزاد، و حدادی، فرهاد. (۱۴۰۲). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر انتخاب مسیر دوچرخه‌سواری با هدف بهبود ترافیک شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهر تهران). *پژوهشنامه حمل‌ونقل*، ۲۰(۳)، ۳۵۹–۳۷۸.

–صیامی، قدیر، انصاری، کوروش، و رستگار، سینا. (۱۴۰۲). برنامه‌ریزی مکانی انتخاب مسیر بهینه و ایمن دوچرخه در شهر مشهد با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). *پژوهشنامه حمل‌ونقل*، ۲۰(۴)، ۲۸۹–۳۰۶.

–مرادی، شعله، و رحیمی، محمود. (۱۴۰۴). شناسایی و رتبه‌بندی گزینه‌های توسعه مسیر دوچرخه‌سواری با رویکرد کاهش ترافیک در بافت‌های تاریخی شهر تهران با استفاده از روش Fuzzy TOPSIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۵(۳)، ۴۳۵–۴۵۲.

Aimsun SL. (2023). AIMSUN Next User's Manual, Version 22. *Barcelona,* Spain.

-Chen, C., Lin, X., & Yu, G. (2026). Infrastructure matters: A systematic review of bicycle infrastructure design influencing cycling crash and injury risk. *Journal of Safety Research,* 98, 190-203.

-Güldü, E., Kuşçu Şimşek, Ç., & Selim, S. (2025). A study on the improvement of bicycle transportation in Sivas city using hybrid multi-criteria model based network analysis. Environment, *Development and Sustainability,* 27(12), 2967-29716.

–Liu, S., Siddiq, A., & Zhang, J. (2025). Planning bike lanes with data: Ridership, congestion, and path selection. *Management Science,* 71(9), 7631–7654.

-Montoya-Zamora, R., Ramírez-Granados, L., López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J. B., & Guzmán-Cruz, R. (2024). Predicting cyclist speed in urban contexts: A neural network approach. *Modelling,* 5(4). 1607-1617.

–Pinto, J. P. D., Pinheiro, F. L., & Bação, F. (2026). Frameworks for prioritizing cycling network investments: A systematic literature review. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 35, Article 101782.

–Schön, P., Heinen, E., & Manum, B. (2024). A scoping review on cycling network connectivity and its effects on cycling. *Transport Reviews,* 44(4), 912–936.

–Schuhmacher, L., Wilkes, G., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2025). Cycling speeds in urban traffic. *Findings.*

–Lopez, M., & Garcia, F. (2022). Cycling infrastructure and urban congestion mitigation strategies. *Urban Studies Journal,* 59(7), 1450–1468.

–Montoya-Zamora, R., Ramírez-Granados, L., & López-Lara, T. (2024). Predicting cyclist speed in urban contexts: A neural network approach. *Modelling,* 5(4), 1601–1617.

–Nguyen, T., & Hoang, K. (2023). Optimization of bicycle routes in dense metropolitan areas. *Journal of Cleaner Production,* 387, 135–150.

–Schuhmacher, L., Wilkes, G., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2025). Cycling speeds in urban traffic. *Findings,* 141204, 1–12.

–Smith, P., & Clark, D. (2020). Active transport and reduction of urban travel delays. *International Journal of Transportation Science and Technology,* 9(4), 300–312.

–Williams, J., & Taylor, B. (2021). Effects of dedicated cycling lanes on travel behavior and time savings. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* 11, 100–112.

–Zhang, Y., Li, X., & Sun, J. (2021). Impact of cycling lanes on travel time reduction in congested cities. *Journal of Urban Transport Systems,* 15(3), 210–225.

Multi-Objective Optimization of Bicycle Network Design and Dedicated Cycling Routes for Travel Time Reduction in Metropolitan Areas

Mohsen Moradifar, M.Sc., Student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
***Saeid Hesami,** Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.*

E-mail: s.hesami@nit.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
Air pollution and traffic congestion caused by the excessive use of private vehicles have posed significant challenges to metropolitan areas. The development of cycling infrastructure and the designation of dedicated bicycle routes are considered effective strategies for travel demand management. In the present study, five potential cycling routes in the city of Qom were evaluated based on six key criteria: hourly traffic volume, longitudinal gradient, roadway width, number of intersections, speed limit, and on-street parking conditions. The Friedman test was employed to determine the weights of the evaluation criteria using questionnaire data collected from 384 users and 15 experts. Subsequently, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method was applied to rank the candidate routes. In addition, the consistency index was calculated using the Analytic Hierarchy Process (AHP).The results indicated that Route No. 3 (Tohid Street), with a consistency index of -2.4 and the shortest distance to the positive ideal solution in the TOPSIS analysis, was identified as the most suitable option in terms of balancing geometric and traffic-related conditions. Under a scenario involving a 31% reduction in private vehicle usage, based on users' stated willingness in the questionnaire survey, travel time decreased by 40%, while traffic flow speed increased by 57%. The final outcome of the study is an operational framework consisting of six sequential steps, ranging from criteria selection to traffic simulation, which can be adapted and applied to other densely populated cities.

Keywords: Bicycle, Travel Demand Management (TDM), Geometric and Traffic Variables, Air Pollution