J. RS. GEOINF. RES. 4(2): 279-292, Summer & Autumn 2026

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)
Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Multi-Objective Linear Optimization and Spatial Analysis for Optimal Location of Metro Stations: A Case Study of Qazvin City

F. Hosseinali*, Sh. Farajvand

Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Received: 13 May 2026
Reviewed: 23 June 2026
Revised: 27 September 2026
Accepted: 02 November 2026

KEYWORDS:
Site Selection
Spatial Analysis
Trip Generation and Attraction
Optimization
Qazvin City

f.hosseinali@sru.ac.ir
(+9821) 22970021

ABSTRACT

Background and Objectives: The rapid growth of urbanization and the increasing volume of intra-city travel in recent decades have made the development of public transportation networks—particularly metro systems—essential in Iranian cities. Selecting the optimal locations for metro stations is one of the most critical stages in the design of such systems, as inappropriate site selection can lead to high construction costs, reduced accessibility for citizens, and decreased network efficiency. This study aims to perform spatial analysis and demand assessment for establishing metro stations in the city of Qazvin using a linear multi-objective optimization approach based on travel attraction and production analysis. approach for Qazvin.

Methods: In the first stage, basic spatial datasets—including layers of road networks, population density, land use, and major trip-generating and trip-attracting centers (such as educational, administrative, and commercial facilities)—were collected. These data were processed in a Geographic Information System (GIS) environment to produce thematic maps representing key spatial criteria. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weights of each criterion based on expert judgments and urban planning principles. The main criteria included population density, proximity to main roads, closeness to trip-attracting land uses, and overall urban accessibility. Subsequently, a weighted linear combination method was applied to generate a final spatial suitability map for potential metro station locations.

In the next phase, candidate points derived from the suitability map were entered into a multi-objective linear programming model. The two main objective functions were:
(1) maximizing total trip attraction and production across the selected stations, and
(2) minimizing overall construction costs and inter-station distances.
To comply with standard metro network design principles, spatial constraints were imposed—namely, a minimum distance of 800 meters and a maximum distance of 1200 meters between adjacent stations. The optimization model was implemented in Python using linear multi-objective programming techniques.

Findings: The proposed model successfully identified an optimal combination of stations that ensures adequate spatial coverage while maximizing trip attraction and production. The spatial distribution of the selected stations corresponded closely with the areas of high population density and key urban activity centers, leading to improved accessibility and enhanced service efficiency within the network. Among the proposed sites, 17 stations were selected as final candidates, two of which were mandatory locations situated at the airport and railway terminal..

Conclusion: The findings demonstrate that integrating GIS-based spatial analysis with multi-objective linear optimization provides a scientifically robust and practical approach for metro station site selection in developing cities. This approach enables urban planners to simultaneously evaluate multiple quantitative and qualitative criteria, achieving a balanced solution between cost, efficiency, and spatial coverage. Furthermore, the proposed model can be adapted for planning other urban public transport systems such as Bus Rapid Transit (BRT) networks.

NUMBER OF REFERENCES
30

NUMBER OF FIGURES
9

NUMBER OF TABLES
3

مقاله پژوهشی

مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های مترو با استفاده از مدل‌های چندهدفه خطی و تحلیل مکانی تولید و جذب سفر در شهر قزوین

فرهاد حسینعلی*، شاهین فرجوند

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: رشد سریع شهرنشینی و افزایش حجم سفرهای درون‌شهری در دهه‌های اخیر، ضرورت توسعه شبکه حمل‌ونقل عمومی به‌ویژه سیستم مترو را در شهرهای ایران دوچندان کرده است. انتخاب مکان بهینه ایستگاه‌های مترو یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی این سیستم است، زیرا مکان‌یابی نامناسب می‌تواند موجب افزایش هزینه‌های احداث، کاهش دسترسی شهروندان و افت کارایی شبکه شود. هدف این پژوهش، تحلیل مکانی و نیازسنجی احداث ایستگاه‌های مترو در شهر قزوین با رویکرد ارزیابی جذب سفر و بهینه‌سازی چندهدفه خطی است.

روش‌ها: در گام نخست، داده‌های پایه شامل لایه‌های مکانی شبکه معابر، تراکم جمعیت، کاربری اراضی، مراکز تولید و جذب سفر (نظیر مراکز آموزشی، اداری و تجاری) و مسیرهای حمل‌ونقل عمومی موجود گردآوری شد. این داده‌ها در محیط سامانه اطلاعات مکانی پردازش و لایه‌های معیارهای مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌ها تولید گردید. سپس با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی وزن هر معیار بر اساس نظر خبرگان و اصول برنامه‌ریزی شهری تعیین شد. معیارهای اصلی شامل تراکم جمعیت، فاصله از معابر اصلی، نزدیکی به کاربری‌های مولد سفر، و قابلیت دسترسی شهری بودند. در ادامه با به‌کارگیری روش ترکیب خطی وزنی نقشه نهایی مطلوبیت مکانی ایستگاه‌ها در محیط GIS تهیه شد.

در مرحله بعد، نقاط کاندید استخراج‌شده از نقشه مطلوبیت به مدل بهینه‌سازی چندهدفه خطی وارد شدند. در این مدل، دو تابع هدف حداکثرسازی میزان جذب و تولید سفر در ایستگاه‌های منتخب و حداقل‌سازی هزینه کلی احداث و فاصله بین ایستگاه‌ها تعیین گردید.

به منظور رعایت اصول شبکه مترو، قیود مکانی شامل حداقل فاصله ۸۰۰ متر و حداکثر فاصله ۱۲۰۰ متر بین ایستگاه‌ها در مدل لحاظ شد. مدل ریاضی در محیط پایتون و با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی چندهدفه حل شد.

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب تحلیل مکانی GIS با مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه خطی رویکردی علمی و کارآمد برای مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو در شهرهای در حال توسعه است. این روش به مدیران شهری امکان می‌دهد تا در فرآیند تصمیم‌گیری، هم‌زمان چندین معیار کمی و کیفی را در نظر گرفته و به راه‌حلی متوازن بین هزینه، کارایی و پوشش فضایی دست یابند. با توجه به قابلیت تعمیم مدل، می‌توان از آن در سایر شهرهای کشور برای طراحی شبکه‌های مترو و اتوبوس‌های تندرو (BRT) نیز بهره گرفت.

از میان اماکن پیشنهادی ۱۷ ایستگاه به‌عنوان گزینه‌های نهایی برگزیده شدند که دو مورد آن به‌طور الزامی در فرودگاه و ایستگاه راه‌آهن قرار دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که مدل ارائه‌شده قادر است ترکیبی بهینه از ایستگاه‌ها را پیشنهاد دهد که ضمن حفظ پوشش مکانی مناسب، بیشترین میزان جذب سفر را در سطح شهر ایجاد می‌کند. علاوه بر این، توزیع مکانی ایستگاه‌های منتخب با تراکم جمعیت و مراکز فعال شهری همخوانی بالایی دارد و منجر به بهبود شاخص دسترسی شهروندان به حمل‌ونقل ریلی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب تحلیل مکانی و بهینه‌سازی چندهدفه، چارچوبی کارآمد برای مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو در شهرهای مشابه فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در طرح‌های جامع حمل‌ونقل شهری قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ داوری: ۰۲ تیر ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۰۵ مهر ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۱ آبان ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:
مکان‌یابی
جذب و تولید سفر
بهینه‌سازی مکانی
شهر قزوین

f.hosseinali@sru.ac.ir
۰۲۱-۲۲۹۷۰۰۲۱

مقدّمه

رشد سریعِ شهرنشینی در دهه‌های اخیر و گسترش کاربری‌های شهری، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، موجب افزایش فشرده تقاضای سفرهای درون‌شهری شده است. این روند، همراه با پراکندگی ناموزون فعالیت‌های شهری، ناکارآمدی شبکه‌های معابر و ضعیف‌بودن پوشش حمل‌ونقل عمومی، مسائل عدیده‌ای نظیر تراکم ترافیک، افزایش زمان سفر، آلودگی هوا و هزینه‌های اجتماعی–اقتصادی را پدید آورده است [۱]. حمل‌ونقل در جوامع امروزی بیش از اینکه یک مسئله فنی و مهندسی باشد، یک مسئله اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی محسوب می‌شود [۲] در این بستر، توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی ریلی (مترو) به‌عنوان راهکاری موثر برای کاهش وابستگی به خودروی شخصی و ارتقای پایداری شهری معرفی شده است. با این حال اثربخشی این سامانه‌ها به شدت وابسته به مکان‌یابی صحیح ایستگاه‌ها است، چرا که جایابی نامناسب می‌تواند منجر به هزینه‌های گزاف، افت پوشش جمعیتی و کاهش کارایی شبکه گردد [۳].

بهترین راه‌حل برای این مشکلات گسترش بهینه خدمات حمل‌ونقل عمومی می‌باشد. در این بین، یکی از به‌صرفه‌ترین و بهترین وسایل حمل‌ونقل عمومی‌قطارهای زیرزمینی شهری یا همان مترو می‌باشند از دیدگاه کلان و مدیریتی، این سیستم‌ها از حیث مسائلی که در درازمدت می‌توانند بر از بین رفتن منابع کشور تأثیر بگذارند و یا هزینه‌های عمومی را افزایش دهند، مقرون به صرفه‌تر به نظر می‌رسند به عنوان مثال قطار مترو در مصرف انرژی ۲۳/۴ برابر بهتر از کامل‌ترین خودرو با بهینه‌ترین مصرف سوخت کارآیی دارد [۴]. از آنجا که برای برطرف شدن بسیاری از نیازهای روزانه احتیاج به حضور فیزیکی درمکان‌های مختلف و طبیعتاً استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل می‌باشد، میزان فاصله از راهگذرهای حمل‌ونقل عامل تعیین کننده‌ای در میزان جذابیت واحدهای مسکونی، تجاری و غیره می‌باشد که همین امر بر بهای واحدهای مختلف مسکونی و نیز بر مدل و درجه توسعه شهری درمناطق مختلف تأثیرگذار است. هماهنگی بین کاربری‌های عمده جاذب سفر و سیاست‌های حمل‌ونقل شهری و زیرساخت‌های آن ازقبیل خدمات، بهداشت و درمان، خدمات تحصیلی، آموزشی، تفریحی و غیره می‌تواند اثر قابل توجهی برکاهش هزینه‌های حمل‌ونقل شهری وکاهش تراکم ترافیک درکلان شهرها داشته باشد [۵]. هرگونه اقدام و تصمیم‌گیری در ارتباط با حمل‌ونقل قبل از آنکه نیاز به بررسی و مطالعات فنی‌ومهندسی داشته باشد نیاز به بررسی‌های اجتماعی و اقتصادی دارد. حتی بررسی‌های فنی و مهندسی نیز باید در راستای واقعیت‌ها و جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی در یک جامعه صورت گیرد [۶]. تجربه سال‌های گذشته درکشورهای پیشرفته توجه آنان را به استفاده بیشتراز سیاست‌های کنترل تقاضای ترافیک و توسعه هم زمان حمل‌ونقل عمومی‌متناسب با اهداف توسعه شهری جلب کرده است. اما آنچه که دارای بیشترین اهمیت می‌باشد جانمایی ایستگاه می‌باشد که منجر به جذب ترافیک بیشتر می‌شود اما برای جانمایی بهینه این ایستگاه‌ها باید عوامل متعددی را در نظر گرفت و سپس چندین مکان را به عنوان کاندیدا یافت و از بین آنها بهترین یا بهترین‌ها را برگزید اولین معیاری که در انتخاب یک سیستم حمل‌ونقل تأثیر بسزایی دارد، دسترسی به آن سیستم است. به همین دلیل است که نقش مهم جانمایی در هر سیستم حمل‌ونقل بسیار حائز اهمیت است. همانطور که گفته شد، سیستم حمل‌ونقل ریلی به دلیل مزایای فراوان مانند مصرف انرژی کمتر، ایمنی بالا، حمل انبوه بار و مسافر، سازگاری با محیط‌زیست و اشغال فضای کمتر از جایگاهی ویژه در صنعت حمل‌ونقل برخوردار می‌باشد [۷]. مترو به طور گسترده‌ای به عنوان گزینه حمل‌ونقل عمومی‌ترجیحی برای کلان شهرهای بزرگ در سراسر جهان در نظر گرفته می‌شود در مواجهه با پراکندگی شهری، ازدحام جمعیت، آلودگی هوا، تغییرات آب‌وهوایی و سایر مسائل اجتماعی و زیست محیطی نوظهور، شهرها روز به روز اقداماتی را برای توسعه یا گسترش سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری خود انجام داده‌اند. برای محققان و سیاست گذاران حوزه حمل‌ونقل، درک عوامل تأثیرگذار در مترو سواری همیشه موضوع مهمی‌بوده است [۸].

حمل‌ونقل عمومی به مجموعه اقدامات و فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که امکان جابه‌جایی انسان‌ها و کالاها را در یک جامعه به گونه‌ای فراهم می‌سازد که تمام افراد جامعه بدون توجه به طبقه اقتصادی-اجتماعی، سن، جنسیت، وضعیت جسمی و مکان جغرافیایی زندگی و کار، قادر به انجام سفرهای ضروری خود باشند و در عین حال از تبعیض‌ها و سفرهای غیرضروری جلوگیری می‌کند [۹]. سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی با کیفیت بالا مانند راه‌آهن و راه‌آهن سبک، توقف‌های کمتر و کوتاه‌تری نسبت به سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی با کیفیت پایین‌تر دارند. این بدان معنی است که ایستگاه‌ها باید در مناطقی با پتانسیل بالای مسافران قرار گیرند تا بهترین خدمات ممکن را برای عموم ارائه دهند. همچنین این امر باعث می‌شود تا حد امکان مسافران از سیستم حمل‌ونقل عمومی استفاده کنند [۱۰].

طبیعتاً مکان‌یابی ایستگاه مترو مسئله‌ای چندوجهی است که هم‌زمان باید جنبه‌های کالبدی، اجتماعی و اقتصادی را مدنظر داشته باشد پژوهش‌های بنیادی نشان می‌دهند که سه بُعد اصلی از محیط ساخته‌شده — تراکم، تنوع کاربری و طراحی شهری مشوق پیاده‌روی در شکل‌دهی تقاضای سفر و انتخاب حالت حمل‌ونقل نقش تعیین‌کننده‌ای دارند [۱۱]. این مطالعات نشان می‌دهند که افزایش تراکم و ترکیب کاربری‌های متنوع، در کنار طراحی شهری پیاده‌محور، سهم سفرهای موتوری را کاهش و سهم سفرهای عمومی و پیاده را افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، معیارهای تراکم و کاربری، از ارکان اصلی هر تحلیل مکان‌یابیِ ایستگاه هستند [۱۲].

در ادبیات حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی شهری، چارچوب‌ها و یافته‌های کلاسیکی نیز وجود دارد که برای سیاست‌گذاری و تحلیلِ مکان‌یابی راهگشا بوده‌اند. به عنوان مثال، مطالعات تاریخی و طبقه‌ای نشان داده‌اند که وجود آستانه‌های حداقلی تراکم در شعاع دسترسی

ایستگاه‌ها برای توجیه اقتصادی سامانه‌های ریلی اهمیت دارد [۱۳]. در برخی پژوهش‌های پایه نیز روابطی میان سطح تراکم و بهره‌برداری از خطوط ریلی گزارش شده است که طراحان شبکه باید آن‌ها را در نظر گیرند. افزون بر این، مفهوم توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل و مدل‌های تحلیلی مانند مدل گره–مکان بر ضرورت تلفیق عملکرد شبکه‌ایِ حمل‌ونقل و کیفیت مکان تأکید می‌کنند. این دیدگاه‌ها پایه نظری تلفیق معیارهای شبکه‌ای و مکانی در مدل‌های مکان‌یابی هستند [۱۴].

در پژوهش‌های معاصر نیز روند به‌کارگیری روش‌های ترکیبیِ تحلیل مکانی با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌های بهینه‌سازی گسترش یافته است. مطالعات جدید نشان می‌دهند که تلفیق داده-محورِ نقشه‌های معیار با وزن‌دهی کارشناسی مانند وزن دهی سلسله مراتبی و سپس استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، امکان دست‌یابی به راه‌حل‌هایی را فراهم می‌آورد که هم از منظر پوشش جمعیتی و هم از منظر هزینه‌های سرمایه‌ای بهینه‌تر هستند بررسی‌های تجربی اخیر در شهرهای گوناگون نیز تأیید کرده‌اند که این رویکردها می‌توانند هزینه‌ها را کاهش و شاخص‌های دسترسی و رضایت را افزایش دهند [۱۵].

با این حال در مطالعات داخلی محدودیت‌هایی وجود دارد: بسیاری از پژوهش‌های ایرانی به تحلیل توصیفی یا به‌کارگیری یک یا دو معیار بسنده کرده‌اند و کمتر از چارچوب‌های چندمعیاره مناقشه‌زدایی‌شده یا مدل‌های چندهدفه استفاده شده است. همچنین کمبود داده‌های دقیق مکانی و بروز نبودن اطلاعات کاربری و تراکم در برخی شهرها، مانع از اعمال یکپارچه روش‌های پیشرفته شده است. از این منظر، ضرورت یک مطالعه کاربردی–تحلیلی که داده‌های مکانی را با وزن‌دهی معتبر و مدل بهینه‌سازی چندهدفه تلفیق کند، برای ارائه راهنماهای تصمیم‌گیری شهری و کمک به سیاست‌گذاران محلی برجسته می‌شود اهداف پژوهش حاضر همگی از درون این ضرورت‌ها بیرون آمده‌اند هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی تلفیقی برای مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های مترو با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه خطی است، به‌گونه‌ای که همزمان اهداف اقتصادی (حداقل‌سازی هزینه)، عملکردی (حداکثرسازی جذب و تولید سفر) و مکانی (رعایت محدودیت‌های مکانی‌ی مانند گسل‌ها و حوزه‌های ممنوعه) را شامل شوند. برای نیل به این هدف، شناسایی و اعمال معیارهای کلیدیِ تولید و جذب سفر، تعیین وزن‌های معتبر برای این معیارها با استفاده از AHP، تولید نقشه‌های معیار و نقشه مطلوبیت نهایی در محیط GIS و انتخاب ترکیب بهینه‌ای از ایستگاه‌ها با اعمال محدودیت‌های فاصله‌ای و کالبدی در قالب یک مدل خطی چندهدفه دنبال می‌شود. با توجه به مسئله و اهداف مطالعه، این سؤال اساسی مطرح می‌شود که معیارهای اصلی مؤثر در انتخاب مکان بهینه ایستگاه‌های مترو کدام‌اند و هر یک از معیارها تا چه اندازه در فرآیند مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو تأثیرگذار هستند؟

از منظر روش‌شناختی، نوآوری اصلی این مطالعه در ترکیب سه ویژگی است که این ویژگی‌ها اتکا به داده‌های مکانی و تولید نقشه‌های معیار با قدرت تفکیک مکانی مناسب، وزن‌دهی نظام‌مند معیارها بر اساس مقایسات زوجیِ کارشناسی و آزمون سازگاری و حل مسئله انتخاب مجموعه‌ای از نقاط به‌صورت چندهدفه با رویکردی است که هم الزام‌های فنی-مکانی و هم اهداف اقتصادی–عملکردی را پوشش دهد این رویکرد، امکان تحلیل حساسیت و بررسی پایداری نتایج نسبت به تغییر وزن‌ها را نیز فراهم می‌کند، امری که در مطالعات پیشین به‌صورت محدود مورد توجه قرار گرفته است.

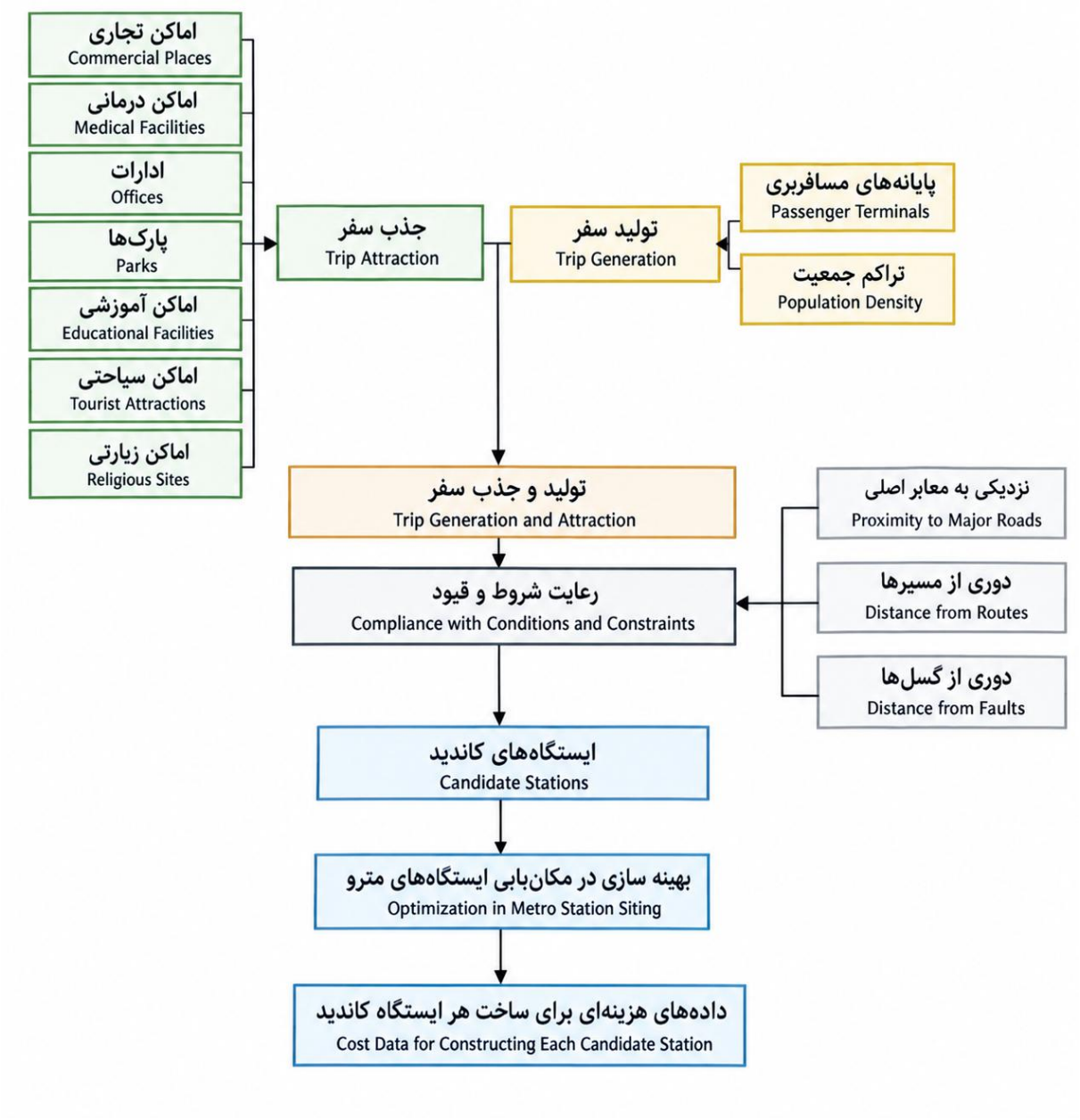
در پایان، می‌توان گفت توسعه چنین چارچوبی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو می‌تواند ابزار تصمیم‌گیری قدرتمندی در اختیار برنامه‌ریزان شهری قرار دهد. ابزاری که هم‌راستا با آموزه‌های کلاسیک در حوزه تراکم و شبکه و مطابق با روش‌های نوین تحلیل داده‌محور و بهینه‌سازی طراحی شده باشد. این مطالعه تلاش می‌کند شکاف موجود بین نظریه و کاربرد در حوزه مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو را کاهش دهد و الگوی قابل تعمیمی برای شهرهای مشابه ارائه نماید.

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع کاربردی-تحلیلی می‌باشد که با هدف بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو با استفاده از ابزارهای تحلیلی و تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه داده‌های مکانی انجام شده است. روش تحقیق ترکیبی از تحلیل مکانی در محیط سیستم اطلاعات مکانی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و بهینه‌سازی چندهدفه خطی می‌باشد. استفاده از GIS در انواع تحلیل‌های مکانی [۱۶-۱۹] از جمله مدل‌سازی شهری به دلیل توانایی این سیستم در ترکیب، تحلیل و تجسم داده‌های مکانی در محیطی یکپارچه، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۲۰]. شکل ۱ روند تحقیق را در قالب یک نمودار به تصویر کشیده است.

فرآیند انجام تحقیق در پنج گام انجام گرفته است. در گام اول شناسایی معیارها و جمع‌آوری داده‌ها انجام می‌گیرد. در این گام، معیارهای مؤثر بر تولید و جذب سفر بر اساس مرور پیشینه و مصاحبه با کارشناسان با تهیه مجموعه‌ای جامع از داده‌های مکانی که بتوانند مؤلفه‌های تولید و جذب سفر را به صورت کمّی و مکانی نشان دهند مشخص می‌شوند.

در گام سوم برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از معیارها، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده می‌شود. این روش که توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ میلادی معرفی شده، از پیچیدگی مفهومی تصمیم‌گیری به طور قابل توجهی می‌کاهد، زیرا تنها دو مؤلفه در یک زمان بررسی می‌گردند این روش به دلیل ماهیت ساده و در عین حال جامع مورد استقبال مدیران و کارشناسان مختلف در زمینه‌های گوناگون از جمله برنامه‌ریزی شهری و شهرسازی قرار گرفته است [۲۱].



شکل ۱: نمودار روند تحقیق
Fig. 1: The research's Flowchart

در گام چهارم شهر قزوین که به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است و در ادامه شرایط آن توضیح داده خواهد شد به بلوکهای دو کیلومتر در دو کیلومتر افراز می‌شود و سلولهای دارای بیشترین امتیاز کسب شده (پس از اعمال محدودیتهایی مانند حریم رودخانه و نزدیکی به گذرهای اصلی) روی آن انتخاب و سپس نقاط خیلی نزدیک به هم با در نظر گرفتن اولویتها حذف می‌شوند تا نقاط کاندیدا باقی بمانند. در گام پنجم و پایانی، برای انتخاب ترکیب بهینه‌ای از ایستگاه‌ها که هم هزینه ساخت را حداقل و هم جذب و تولید سفر را حداکثر کند، از مدل بهینه‌سازی چندهدفه خطی استفاده می‌شود. در این مدل، اهداف تحقیق به‌صورت توابع ریاضی تعریف می‌شوند. تابع اول، حداکثرسازی مجموع امتیاز جذب و تولید سفر در ایستگاه‌های منتخب است و تابع دوم، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها.

با توجه به تضاد این دو هدف، از روش مجموع وزنی اهداف استفاده شد تابع هدف ترکیبی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$Min/Max \;\; Z_k = [Z_1(x), Z_1(x), \dots, Z_K(x)] \qquad (۱)$$

بامحدودیت:

$$A.x \leq b \quad , \quad x \geq 0$$

- x = بردار متغیرهای تصمیم
- A = ماتریس ضرایب محدودیت‌ها
- b = بردار محدودیت‌ها

فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه سبب می‌شود که مجموعه‌ای از راه حل‌ها حاصل شود که در آن هیچ راه حل دیگری وجود نداشته باشد که بتواند یکی از اهداف را بدون بدتر کردن دیگری بهبود دهد [۲۶].

پیاده‌سازی

همانگونه که به صورت مختصر به آن اشاره شد، هدف اصلی این تحقیق، یافتن مناسب‌ترین مکان‌ها برای ایستگاه‌های مترو در شهر قزوین و در یک افق بلندتر، طراحی خطوط مترو برای این شهر با توجه به ایستگاه‌های مورد نیاز است. بر این اساس لازم است ابتدا منطقه مورد مطالعه به صورت مختصر معرفی شود.

منطقه مورد مطالعه

طبق سیاست‌های کلی کشور، احداث خطوط قطار شهری یا مترو در کلانشهرهای کشور دارای اهمیت زیادی است و از همین رو در بیشتر کلانشهرهای کشور، خطوط مترو ایجاد شده و یا در حال احداث می‌باشد. شهر قزوین با جمعیتی نزدیک به ۵۰۰ هزار نفر به عنوان مرکز استان قزوین و یکی از نزدیکترین مراکز استان به تهران، رشد فیزیکی سریعی را در سالیان گذشته تجربه کرده است و این رشد سریع فشار زیادی را بر سیستم حمل و نقل عمومی شهر وارد آورده است و در عین حال موجب افزایش سریع ترافیک شهری و کندی عبور و مرور در داخل شهر شده است. به همین دلیل احداث قطار شهری زیرزمینی یکی از گزینه‌های مورد بررسی برای کمک به حمل و نقل عمومی شهر قزوین می‌باشد. بر همین اساس است که احداث مترو در قزوین مورد مطالعه و امکانسنجی قرار گرفته تا جایی که اتصال قزوین به خط متروی کرج هم مورد بحث و برنامه‌ریزی می‌باشد.

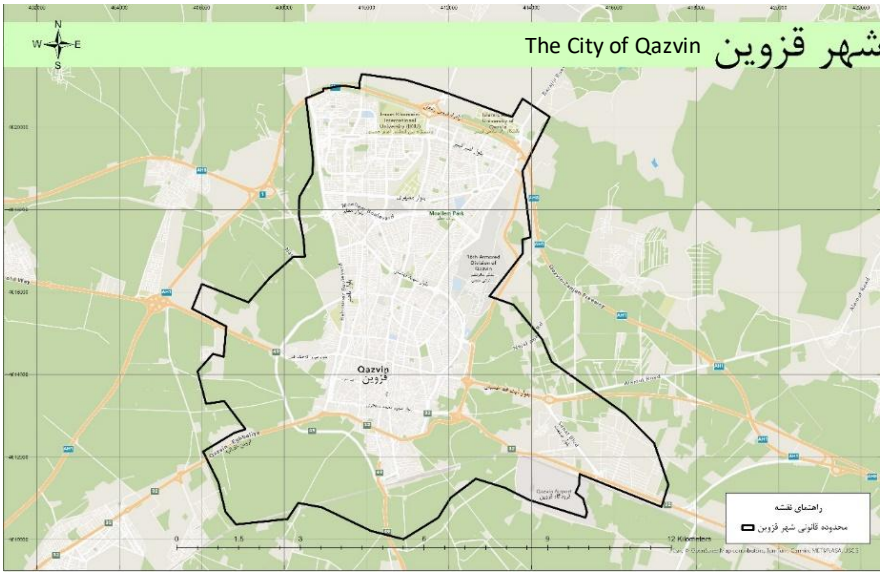
شکل ۲ موقعیت و شرایط فعلی شهر قزوین را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۲ پیدا است، شهر قزوین توسط چندین شهر و شهرک اقماری در بر گرفته شده است و همین امر موجب می‌شود که نیاز به حمل و نقل در شهر قروین مختص ساکنان خود شهر نباشد و باید به صورتی باشد که تکاپوی استفاده ساکنان مناطق مسکونی مجاور را که برای گذران امور خود به شهر مراجعه می کنند را نیز بدهد. همین امر در یافتن مکانهای مناسب برای احداث ایستگاه‌های مناسب در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

مراحل اجرا و نتایج

به طور کلی می‌توان اینطور خلاصه کرد که در این پژوهش ابتدا داده‌های مکانی مرتبط با شهر مورد مطالعه گردآوری و در محیط GIS پردازش شده‌اند. سپس معیارهای مؤثر در تولید و جذب سفر شناسایی، کمی‌سازی و وزن‌دهی شده و در نهایت، از مدل بهینه‌سازی برای انتخاب ترکیب بهینه‌ای از ایستگاه‌ها استفاده گردید.

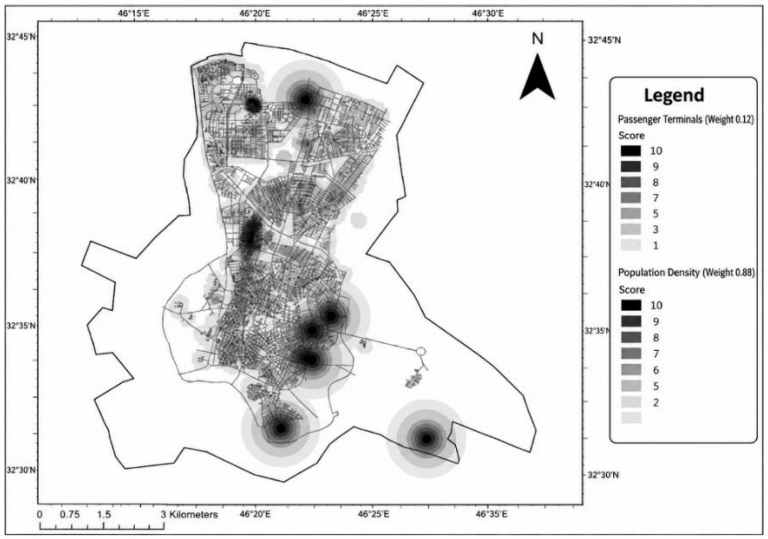
با به‌کارگیری این رویه، معیارهای اصلی مشخص شده عبارت بودند از: تراکم جمعیت (به‌عنوان شاخص تولید سفر)، کاربری اراضی (تجاری، اداری، آموزشی، درمانی و فرهنگی)، فاصله از شبکه معابر اصلی، نزدیکی به پایانه‌های مسافربری، ایستگاه‌های قطار و فرودگاه ، فاصله از مراکز جذب سفر و محدودیت‌های کالبدی شامل رودخانه‌ها، گسل‌ها و اراضی غیرقابل ساخت. داده‌ها از منابع رسمی شامل چون سازمان نقشه‌برداری کشور، مرکز آمار ایران، شهرداری قزوین و طرح‌های جامع و تفصیلی شهر گردآوری شدند. بعد از آن تمامی لایه‌ها به سیستم مختصات یکسان (UTM Zone 39N) تبدیل و هم‌مقیاس شدند تا قابلیت تحلیل هم‌زمان داشته باشند و سپس به فرمت رستر با اندازه سلول ۳۰ متر تبدیل گردیدند.



شکل ۲: منطقه مورد مطالعه: شهر قزوین

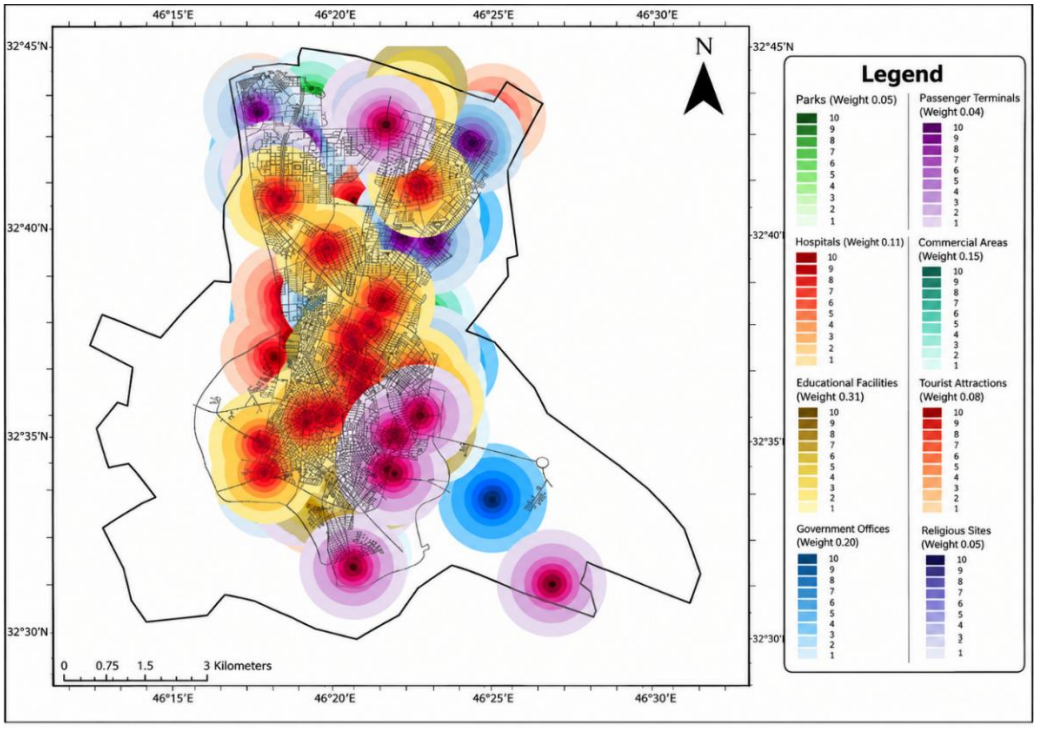
Fig. 1: The study area: Qazvin city

برای این منظور، پرسشنامه‌ای حاوی مقایسه زوجی معیارها میان پنج کارشناس حوزه حمل‌ونقل شهری و برنامه‌ریزی مکانی توزیع گردید پس از جمع‌آوری داده‌ها، میانگین هندسی قضاوت‌ها محاسبه و ماتریس مقایسات نهایی تشکیل شد. در ادامه، وزن نسبی هر معیار از طریق نرمال‌سازی ماتریس و استخراج بردار ویژه حاصل گردید. در پایان، نرخ ناسازگاری IR برای بررسی سازگاری قضاوت‌ها محاسبه شد. چنانچه مقدار IR کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری مطلوب فرض می‌شود و اگر IR بیشتر از ۰/۱ باشد، باید داده‌ها بازبینی شوند [۲۲]. این بخش از تحلیل به کمک نرم‌افزار پایتون انجام شد و مقدار نرخ ناسازگاری محاسبه شده کمتر از ۰/۱ به دست آمد که نشان از سازگاری مقایسه‌ها می‌باشد جدول‌های ۱ تا ۳ وزن‌های به دست آمده توسط روش تحلیل سلسله مراتبی را به ترتیب برای زیرمعیارهای تولید و جذب سفر و سپس وزن تولید و جذب سفر نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نقشه معیارهای تولید و جذب سفر را نشان می‌دهند که پس از ترکیب بر اساس وزن‌های تعیین شده در شکل ۵ نقشه معیار نهایی را برای یافتن مکان ایستگاه‌ها حاصل نموده‌اند.



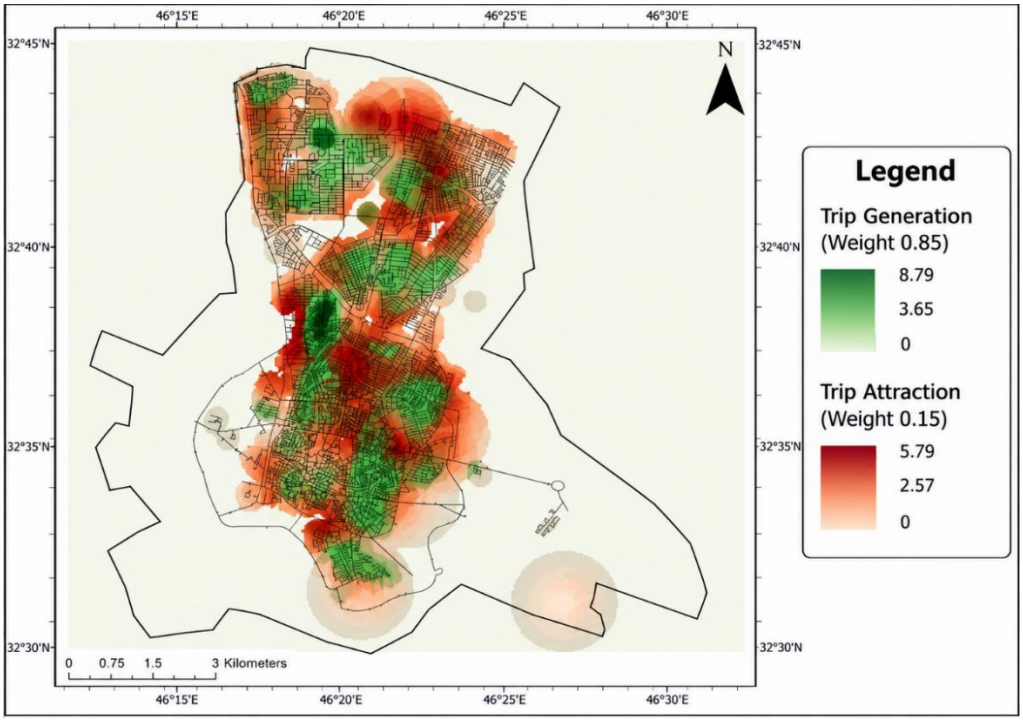
شکل ۳: نقشه معیارهای تولید سفر

Fig. 3: Travel production criteria map



شکل ۴: نقشه معیارهاری جذب سفر

Fig. 4: Travel attraction criteria map



شکل ۵: نقشه ترکیب تولید و جذب سفر

Fig. 5: Travel production and attraction map

جدول ۱: وزن‌های تولید سفر

Table1: Travel production weights

تولید سفر Trip Generation	
معیار Standard	وزن Weight
تراکم جمعیت Population density	0.88
پایانه‌های مسافربری Passenger Terminals	0.12

جدول ۲: وزن‌های جذب سفر

Table2: Travel Attraction weights

تولید سفر Trip Generation	
معیار Standard	وزن Weight
بیمارستان Hospital	0.11
ادارات Offices	0.20
پارک Park	0.05
اماکن تجاری Commercial Premises	0.15
اماکن زیارتی Pilgrimage Sites	0.05
اماکن سیاحتی Tourist Attractions	0.08
اماکن آموزشی Educational Facilities	0.31
پایانه‌های مسافربری Passenger Terminals	0.04

جدول ۳: وزن تولید و جذب سفر

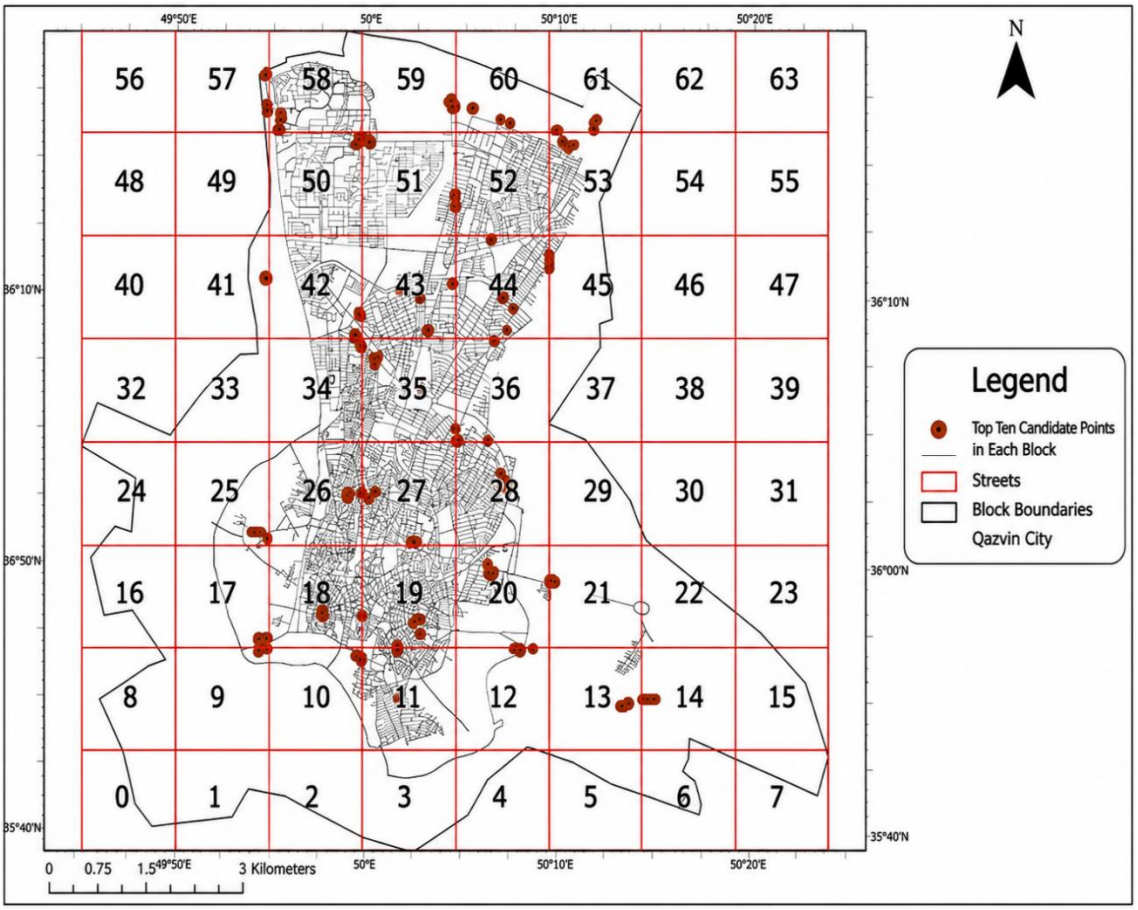
Table3: Travel production and attraction weights

تولید و جذب سفر Trip Generation and Attraction	
معیار Standard	وزن Weight
تولید سفر Trip Generation	0.85
جذب سفر Trip Attraction	0.15

سطح دسترسی به ایستگاه‌های مترو معمولاً بر اساس فاصله‌ای که مسافران می‌توانند به‌صورت پیاده طی کنند، تعیین می‌شود این فاصله معمولاً بین ۳۰۰ تا ۷۵۰ متر در نظر گرفته می‌شود، اما استانداردهای مختلفی در کشورهای گوناگون وجود دارد در این تحقیق با توجه به پژوهش انجام شده توسط گوپتا و بیوینا [۲۳] تا محدوده ۱۰۰۰ متری در هشت دسته امتیازدهی خواهند شد.

شایان ذکر است که لایه‌های مکانی معیارها بر اساس وزن‌های حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی تلفیق گردیدند تا نقشه نهایی مطلوبیت مکانی ایجاد شود. تلفیق این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام گرفت، به‌گونه‌ای که وزن هر معیار در مقدار نرمال‌شده آن ضرب و سپس مجموع وزن‌دار محاسبه شد. بدین ترتیب، نقشه نهایی نقاط با بالاترین امتیاز ترکیبی برای مکان‌یابی ایستگاه‌ها را مشخص نمود این فرآیند بر مبنای روش‌های مرسوم در تحلیل تصمیم‌گیری مکانی چندمعیاره در محیط GIS است که در مطالعات مختلفی نیز به کار رفته است [۲۴][۲۵]. از میان مجموعه راه‌حل‌های جبهه جواب، گزینه‌ای انتخاب خواهد شد که ضمن برقراری تعادل میان دو هدف، از نظر توزیع مکانی ایستگاه‌ها نیز منطقی‌تر بود.

نتیجه این فرآیند نقشه‌ای پیوسته است که در آن مقادیر بالاتر نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر برای احداث ایستگاه مترو می‌باشد. در این مرحله سلول‌های دارای مقادیر مطلوبیت در نقشهٔ معیار مطابق شکل ۶ در یک شبکه با ابعاد دو کیلومتری قرار گرفتند. در هر سلول شبکه ده سلول با مقادیر برتر مطلوبیت پیدا شده و سپس به نقطه تبدیل شدند. این نقاط نیز در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶: بلوک‌بندی شهر قزوین

Fig. 6: Tesselation of Qazvin city

پس از استخراج نقاطی با بیشترین امتیاز تولید و جذب سفر در هر بلوک، ممکن است برخی از این نقاط به‌لحاظ مکانی به‌صورت بسیار متراکم و نزدیک به یکدیگر واقع شده باشند. انتخاب چندین نقطه با فاصله بسیار کم در فضای شهری می‌تواند منجر به تراکم نامتوازن ایستگاه‌ها یا تحلیل‌های اشتباه در مرحله مکان‌یابی شود. از این‌رو، لازم است از میان نقاطی که در فاصله‌ی کمتر از ۲۰۰ متر از یکدیگر قرار دارند، فقط نقطه‌ای با بالاترین امتیاز حفظ شود و سایر نقاط حذف گردند.

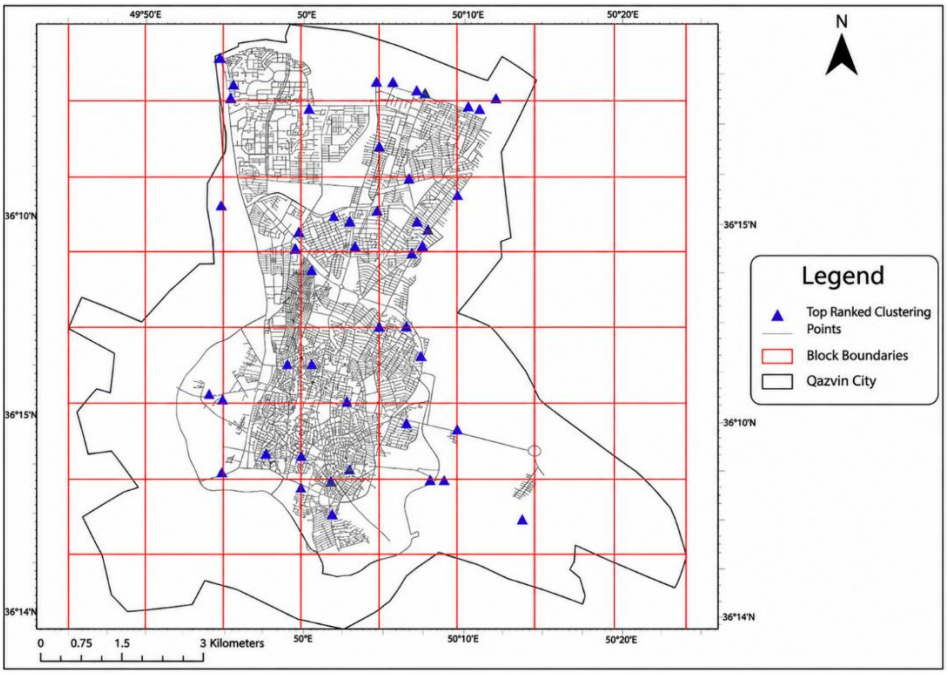
نخست با استفاده از ابزار Near، فاصله مکانی هر نقطه تا نزدیک‌ترین نقطه دیگر در همان لایه محاسبه گردید. در نتیجه، جدولی با فیلدهایی از جمله NEAR_DIST و NEAR_FID تولید شد که بیانگر فاصله هر نقطه تا نزدیک‌ترین نقطه دیگر بود. به‌منظور شناسایی و خوشه بندی نقاطی که در محدوده ۲۰۰ متری از یکدیگر قرار دارند، از ابزار Aggregate Points استفاده گردید. خروجی این ابزار یک لایه چندپخشی است که محدوده خوشه‌های ۲۰۰ متری را نشان می‌دهد. پس از ایجاد خوشه‌ها، از ابزار Spatial Join برای اتصال مجدد نقاط به خوشه‌ها استفاده شد سپس نقاط در هر خوشه بر اساس مقدار تولید و جذب سفر به‌صورت نزولی مرتب شدند. در نهایت با استفاده از فیلترهای آماری، فقط نقطه دارای بیشترین امتیاز در هر خوشه باقی ماند و سایر نقاط حذف شدند.

در پایان این فرآیند، نقشه نهایی با ۴۷ کاندیدا به‌دست آمد که در آن، هیچ دو نقطه‌ای در فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از یکدیگر قرار نداشتند و در هر محدوده ۱۰۰ متری، فقط نقطه‌ای با بیشترین امتیاز ترکیبی تولید و جذب سفر حفظ شده بود که این نقشه در شکل ۷ نمایش داده شده است. این مرحله، به افزایش کیفیت تحلیل نهایی و جلوگیری از تمرکز غیرمنطقی ایستگاه‌های پیشنهادی کمک شایانی نمود.

اعتبار داده‌ها از طریق تطبیق با داده‌های میدانی و منابع رسمی ارزیابی شد. برای سنجش اعتبار مدل، شاخص همپوشانی مکانی بین نقشه پیشنهادی و ایستگاه‌های موجود محاسبه گردید. نتایج نشان داد که نقاط منتخب مدل، هم‌پوشانی بالایی با نواحی دارای تراکم جمعیتی و مراکز جذب سفر دارند که حاکی از صحت و کارایی مدل است. همچنین مقایسه با پژوهش‌های مشابه در ایران و دیگر نقاط جهان [۲۷] [۲۸] نشان داد که رویکرد پیشنهادی توانسته است نتایج و منطقی‌ای را برای مکانیابی ایستگاه‌های مترو فراهم نماید. در این مرحله، نقاط کاندیدا باید وارد فرآیند بهینه‌سازی شوند تا مکانهای نهایی بر اساس اهداف و قیود تعیین شده به دست آیند. دو هدف اصلی در این مرحله وجود دارد که عبارتند از حداکثرسازی جذب مسافر و حداقل‌سازی هزینه. برای یافتن هزینه ساخت هر ایستگاه مطالعات زیادی انجام شد و روش احتمالی ساخت هر ایستگاه هم تعیین شد که در اینجا مجال پرداختن به آن

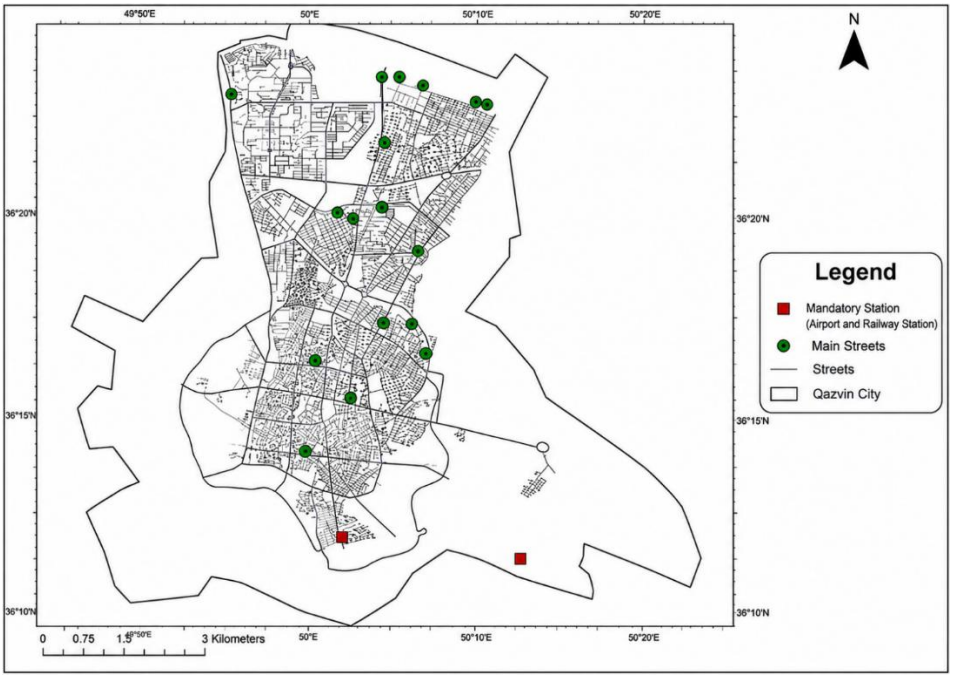
وجود ندارد. سپس با در نظر گرفتن قیود با استفاده از برنامه‌ریزی خطی چند هدفه، مکان‌های بهینه انتحاب شدند.

مدل در محیط Python با استفاده از کتابخانه‌های Pandas و PuLP پیاده‌سازی شد. داده‌های ورودی شامل مختصات، هزینه ساخت، جذب سفر و تولید سفر برای هر یک از ۴۷ نقطه کاندیدا بود. در محدودیت‌های مدل باید فاصله بین ایستگاه‌ها بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر باشد و ایستگاه‌ها نباید در محدوده رودخانه‌ها، گسل‌ها یا کاربری‌های غیرمجاز قرار گیرند و انتخاب بیش از یک ایستگاه در هر بلوک مکانی مجاز نباشد. پس از چندین تکرار، ۱۷ ایستگاه به‌عنوان مجموعه بهینه انتخاب شدند که هر دو هدف را در حالت بهینه نگه می‌داشتند. همچنین یک ایستگاه در جنوب شرق قزوین به برای فرودگاه و یک ایستگاه هم در میدان راه‌آهن به صورت اجباری در نظر گرفته شد. مکان‌های نهایی به دست آمده برای ایستگاه‌ها در شکل ۸ قابل ملاحظه هستند.



شکل ۷: نقاط برتر به دست آمده برای انتخاب محل ایستگاه‌ها

Fig. 7: The superior points obtained to select the locations of the stations



شکل ۸: هفده نقطه کاندید نهایی

Fig. 8: 17 candidate points

نتایج و بحث

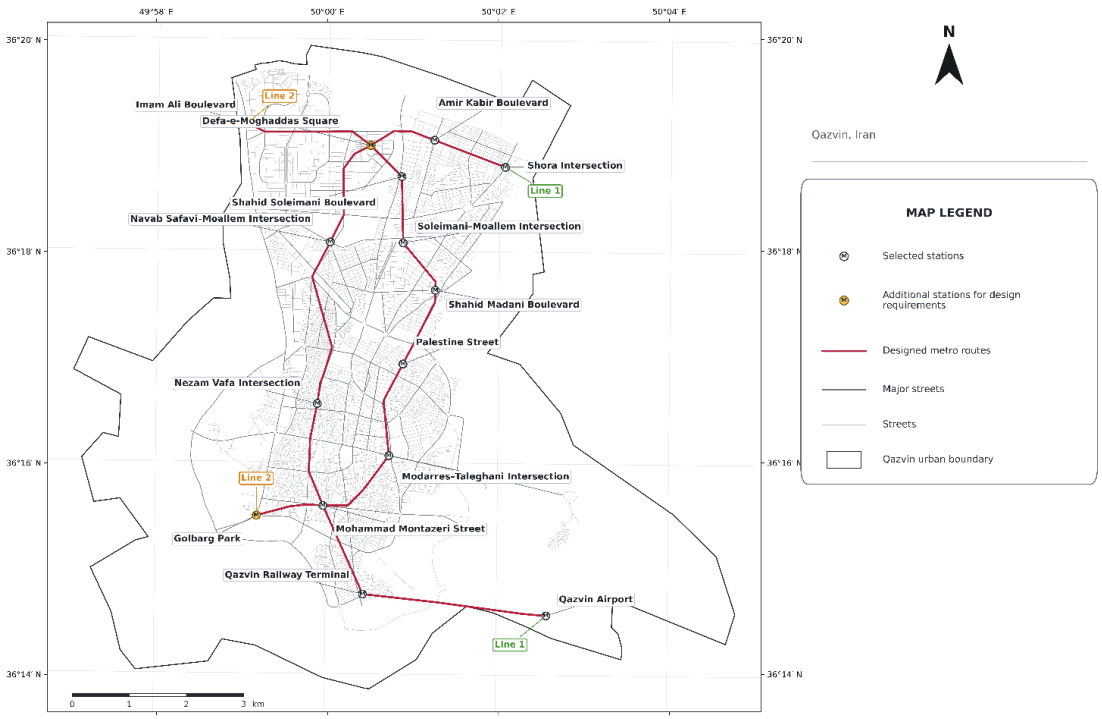
در این پژوهش، از یک چارچوب ترکیبی شامل تحلیل مکانی در محیط GIS، وزن‌دهی معیارها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و انتخاب نهایی مکان ایستگاه‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه خطی استفاده شد. هدف، بیشینه‌سازی جذب سفر و کمینه‌سازی هزینه با رعایت محدودیت فاصله‌ای بود. پس از اجرای مدل، از میان ۴۷ نقطه کاندید، ۱۷ ایستگاه به‌عنوان مجموعه بهینه انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها از نظر مکانی، توزیع متوازن‌تری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشتند و فاصله بین ایستگاه‌ها بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بود که با استانداردهای طراحی خطوط مترو مطابقت دارد. نتایج نشان داد که مجموعه‌ی بهینه انتخاب‌شده از میان ۴۷ نقطه کاندیدا، توانست پوشش جمعیتی و جاذبه‌های سفر را به‌طور معناداری افزایش دهد، در حالی‌که طول مسیر شبکه و تعداد ایستگاه‌ها در محدوده منطقی حفظ شد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات مشابه در زمینه طراحی شبکه‌های مترو سازگار است [۲۹].

بعد از یافتن مکان‌های بهینه برای ایستگاه‌ها، برای تکمیل تحقیق، تصمیم گرفته شد که خطوط مترو هم‌برای گذر از این ایستگاه‌ها طراحی شود. ملاحظات فنی نظیر گذر از زیر خیابان‌های اصلی و پرهیز از نزدیک شدن به گسل و هم‌راستا شدن با مسیل‌ها و رودخانه‌ها و حداقل شعاع قوس‌ها در این طراحی در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به تعداد ایستگاه‌ها و پراکندگی آن‌ها دو خط مترو برای شهر قزوین، مناسب تشخیص داده شد. بر این اساس دو خط مترو پیشنهادی شامل به صورت زیر طراحی گردید:

- خط اول: از جنوب‌شرقی تا شمال‌شرقی شهر به طول تقریبی ۲۱/۴ کیلومتر
- خط دوم: از جنوب‌غربی تا شمال‌غربی به طول ۱۱/۱ کیلومتر

این دو خط طبق شکل ۹ در میدان دفاع مقدس و خیابان محمد منتظری (کورش) با یکدیگر تلاقی دارند. جالب توجه اینکه با توجه به ملاحظات فنی طراحی خطوط، پس از طراحی خط، بعضی از ایستگاه‌ها به دلیل ایجاد اختلال در مسیر حذف شدند و ایستگاه‌های باقی مانده در همانموقعیت بهینه به ۱۵ ایستگاه کاهش یافتند.

تحلیل حساسیت نشان داد که وزن‌دهی معیارهای مرتبط با جذب سفر، مانند نزدیکی به مراکز اشتغال، خدمات شهری و تراکم جمعیت، بیشترین تأثیر را بر انتخاب نهایی دارد. هنگامی‌که وزن این معیارها افزایش یافت، الگوریتم، نقاطی را اولویت‌بندی کرد که جذب سفر بیشتری داشتند، هرچند هزینه‌ی شبکه نیز افزایش یافت. این موضوع اهمیت تعیین دقیق وزن معیارها در فرآیند سلسله‌مراتبی را تأیید می‌کند و با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در زمینه مکان‌یابی با ترکیب تصمیم‌گیری چندهدفه و GIS هم‌راستااست [۳۰]. از سوی دیگر، تحلیل حساسیت وزن اهداف نشان داد که افزایش وزن تابع هدف مربوط به هزینه، باعث انتقال برخی ایستگاه‌ها به نواحی کم‌تراکم‌تر اما ارزان‌تر می‌شود؛ در حالی که افزایش وزن تابع جذب سفر، منجر به تمرکز ایستگاه‌ها در مرکز شهر می‌گردد. این یافته بیانگر ماهیت متضاد اهداف و ضرورت استفاده از مدل چندهدفه است.



شکل ۹: نقشه نهایی خطوط طراحی شده

Fig. 9: Designed lines

برای بررسی میزان کارایی مدل، نتایج مکانی با طرح‌های پیشنهادی شبکه حمل‌ونقل در طرح جامع شهر مقایسه شد. میزان هم‌پوشانی مکانی بین نتایج مدل و خطوط پیشنهادی طرح جامع حدود ۸۲ درصد بود که نشان‌دهنده تطابق بالا و عملکرد قابل‌اعتماد مدل بهینه‌سازی است. همچنین، شاخص‌های جذب سفر در نواحی پیرامون ایستگاه‌های منتخب به‌طور متوسط ۱/۷ برابر بالاتر از میانگین شهر برآورد شد که نشان می‌دهد مکان‌های انتخاب‌شده در نواحی با پتانسیل ترافیکی بالا واقع شده‌اند. از سوی دیگر بررسی‌ها نشان داد که حدود ۷۰ درصد جمعیت شهر در سعاع ۸۰۰ متری ایستگاه‌های در نظر گرفته شده ساکن هستند.

در این پژوهش با توجه به تعداد کاندیداها و اهداف و قیود در نظر گرفته شده، از روش بهینه‌سازی قطعی استفاده شد که دستیابی به بهترین نتیجه را تضمین می‌نماید. با این حال در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، حجم کار و محدودیت‌های زمانی و سخت‌افزاری به نحوی است که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد در این بین الگوریتم ژنتیک از جمله روش‌های موفقی است که برای مسأله مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵].

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، با هدف مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های مترو در شهر قزوین، از رویکردی ترکیبی شامل تحلیل مکانی در محیط GIS، وزن‌دهی معیارها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و بهینه‌سازی چندهدفه خطی استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که استفاده توأم از این روش‌ها، چارچوبی علمی، سیستماتیک و قابل اعتماد برای تصمیم‌گیری‌های مکانی فراهم می‌کند. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از داده‌های مکانی شامل تراکم جمعیت، شبکه معابر، کاربری اراضی، فاصله از مراکز خدماتی، و محدودیت‌های کالبدی، نقشه‌های معیار تولید شدند سپس وزن‌دهی معیارها به کمک تحلیل سلسله‌مراتبی انجام گرفت و وزن هر معیار در شرایط تأمین سازگاری مقایسات تعیین شد. در ادامه، مدل بهینه‌سازی خطی چندهدفه برای انتخاب مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها که هم‌زمان بیشترین جذب سفر و کمترین هزینه ساخت را داشته باشند، پیاده‌سازی گردید.

در بخش نهایی بر اساس مکان‌های تعیین شده برای ایستگاه‌ها اقدام به طراحی خط مترو با در نظر گرفتن کلیهٔ ملاحظات فنی شد. خروجی ایت بخش دو خط مترو به طول مجموع ۳۲/۵ کیلومتر و ۱۵ ایستگاه منتخب بود که در دو نقطه (میدان دفاع مقدس و خیابان محمد منتظری) با یکدیگر تلاقی دارند. حدود ۷۰ درصد از جمعیت شهر در شعاع ۸۰۰ متری ایستگاه‌ها قرار گرفتند که بیانگر سطح بالای پوشش مکانی است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از رویکردهای تحلیلی و داده‌محور در مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو، می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش ترافیک، ارتقاء عدالت فضایی، صرفه‌جویی اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی شهری باشد. مدل ترکیبی ارائه‌شده در این تحقیق، به عنوان الگویی بومی و علمی، قابلیت تعمیم به سایر شهرهای ایران را داراست و می‌تواند پایه‌ای برای مطالعات آتی در زمینه مکان‌یابی سامانه‌های ریلی و حمل‌ونقل عمومی محسوب شود

مشارکت نویسندگان

ایده‌پردازی و هدایت این تحقیق بر عهدهٔ آقای فرهاد حسینعلی بوده است. جمع‌آوری داده‌ها و انجام تحلیل‌ها و نگارش متن اولیه بر عهده آقای شاهین فرجوند بوده است. همچنین فرهاد حسینعلی تصحیح و ویرایش متن را به انجام رسانده است.

تشکر و قدردانی

از تمام عزیزانی که با در اختیار گذاشتن داده‌ها ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، سپاسگزاریم

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافعی توسط نویسندگان گزارش نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Gehl J. Cities for People. Washington (DC): Island Press; 2010. 288 p.

[2] Parvin S, Kalantari A, Moradi A. Tehran Subway and Daily Life. Iranian Journal of Anthropological Research. 2015;5(2):99-116. [In Persian]. DOI: 10.22059/ijar.2015.59021

[3] Litman T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs: Best Practices Guidebook. Victoria (BC): Victoria Transport Policy Institute; 2021.

[4] Yang X, Li X, Gao Z, Wang H, Tang T. A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2012;14(1):438-447. DOI: 10.1109/TITS.2012.2219620

[5] Ashenaie H, Gharagozlou A, Vafaeinejad A. Investigating the Interaction Between Urban Transportation (Metro, BRT) and Urban Density Based on Land and Housing Indicators Using GIS (Case study: Tehran Region 8). Environmental Science and Technology. 2017;19(3):49-65. [In Persian].

[6] Sahelgozin M, Alimohammadi A. Optimization of Subway Trains Service Schedule Using NSGA-II in order to Decrease Passengers Travel Time, System Economic Loss and Energy Consumption. Quarterly Journal of Transportation Engineering. 2016;8(1):29-51. [In Persian]. DOI:20.1001.1.20086598.1395.8.1.9.8

[7] Pyrgidis CN. Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation. Boca Raton (FL): CRC Press; 2021.

[8] Khaksari A. Social Dimensions of Transportation in Tehran. Tehran: Tehran Research and Planning Center; 2008. [In Persian].

[9] Porto MF, LC DM, Nunes NTR, Santos C. The feasibility study for establishment of passenger rail in the metropolitan region of Belo Horizonte/Brazil. In: Proceedings of the 5th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC); 2014; Orlando (FL). 2014.

[10] Pramanik MA, Kayes ANM, Fahim A, Jmil Jany KMA. Assessment of metro station development on urban landscape and property values: A TOD-based study in Dhaka, Bangladesh. Case Studies on Transport Policy. 2026;24:101821. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2026.101821

[11] Calthorpe P. The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. New York: Princeton Architectural Press; 1993.

[12] Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 1997;2(3):199-219. https://10.1016/S1361-9209(97)00009-6.

[13] Holtzclaw J. Using Residential Patterns and Transit to Decrease Auto Dependence and Costs. San Francisco: Sierra Club; 1994.

[14] Pushkarev BS, Zupan JM. Public Transportation and Land Use Policy. Bloomington (IN): Indiana University Press; 1977.

[15] Lyu G, Bertolini L, Pfeffer K. How urban density, network topology and socio-economy influence public transport ridership. Cities. 2023;139:104347. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.07.002

[16] Hosseinali F, Alesheikh AA, Nourian F. Rapid Urban Growth in the Qazvin Region and Its Environmental Hazards: Implementing an Agent-Based Model. Polish Journal of Environmental Studies. 2014;23(3):727-734.

[17] Ghahari N, Hosseinali F, Cervantes de Blois C, Alesheikh H. A space-time analysis of disparities in age at diagnosis of autism spectrum disorder: environmental and socioeconomic risk factors. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021;19(2):1941-1950. DOI: 10.1007/s40201-021-00746-2

[18] Mohammadi M, Hosseinali H. Assessment and comparison the location of six universities in Tehran City using GIS and multi criteria decision making methods. International Journal of Environment and Geoinformatics. 2019;6(1):143-147. DOI:10.30897/ijegeo.551753

[19] Azariasgari E, Hosseinali H. Evaluating the VGI Users' Level of Expertise: An Application of Statistical and Artificial Neural Network Approaches. International Journal of Applied Geospatial Research. 2023;14(1):1-16. https://doi.org/10.4018/IJAGR.316770

[20] Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW. Geographic Information Science and Systems. 4th ed. Hoboken (NJ): Wiley; 2015.

[21] Robinson AJ, Voronkov A, editors. Handbook of Automated Reasoning. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier; 2001.

[22] Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences. 2008;1(1):83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

[23] Gupta A, Bivina G, Parida M. How far people can walk to access metro? A study of access trip characteristics of Delhi metro users. In: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS); Srilanka, 2019.

[24] Danso SY. GIS-driven hybrid multicriteria model for flood susceptibility assessment in a coastal metropolis of Ghana. Geosystems and Geoenvironment. 2026;5(1):100462. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100462

[25] Li Y, Zhang X. Research of metro stations with varying ridership patterns and their relationship with built environment. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2023;171:103722. https://doi.org/10.3390/su15129533

[26] Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester: John Wiley & Sons; 2001.

[27] Qiannan Wu, Yang Li, Pengrui Dan, Optimization of urban rail transit station spacing for minimizing passenger travel time. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2022; 22:100317. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2022.100317

[28] Huang J, Zhang T, Zhang T, Yu C, Zou H. Two-stage optimization for site selection and resource allocation of metro rescue stations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport. 2025;178(7):475-491. https://doi.org/10.1680/jtran.24.00117

[29] Król A. The design of a metro network using a genetic algorithm. Applied Sciences. 2019;9(3):433. https://doi.org/10.3390/app9030433

[30] Guler D. Yomralioglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. 2020; 26(2):169-189. https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1737226

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES.



فرهاد حسینعلی دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری (گرایش سامانه اطلاعات مکانی) از دانشگاه تهران و دکتری تخصصی همین رشته از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران می‌باشد. وی هم‌اکنون عضو هیأت علمی گروه مهندسی

نقشه برداری دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی تهران است و در زمینه‌های متنوع مرتبط با اطلاعات مکانی از جمله هوش مصنوعی، تصمیمگیری چند معیاره مکانی، تحلیل مدل‌های شهری، مدلسازی عامل-مبنا و غیره به فعالیت مشغول می‌باشد. حاصل این تلاش تا کنون بیش از ۴۵ مقاله چاپ شده در مجلات علمی گوناگون داخلی و خارجی بوده است.

Hosseinali, F. Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rahjaee Teacher Training University, Tehran, Iran

f.hosseinali@sru.ac.ir



شاهین فرجوند فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سامانه‌های اطلاعات مکانی است وی مدرک کارشناسی خود را در رشتهٔ مهندسی نقشه‌برداری در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب دریافت کرده و علاقه‌مند به پژوهش در موضوعات شهری است.

Farajvand, SH. *Master's Graduate* at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

shahin.frj@gmail.com

Citation (Vancouver): Hosseinali F, Farajvand Sh. [Multi-Objective Linear Optimization and Spatial Analysis for Optimal Location of Metro Stations: A Case Study of Qazvin City]. *J. RS. GEOINF. RES. 2026; 4(2): 279-292*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113071.1126

COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)