

یک مدل شبیه‌سازی جهت مکانیابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی (مطالعه موردی: شهر کرمان)

مقاله علمی-پژوهشی

برنا آقابابایی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*امیررضا ممدوحی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
و استاد وابسته، دانشکده مهندسی عمران، زمین‌شناسی و معدن، دانشگاه فنی مونترال، کانادا

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: armamdoohi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

صفحه ۴۶۲-۴۴۷

چکیده

گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی، برنامه‌ریزی برای توسعه زیرساخت‌های شارژ را به یکی از چالش‌های مهم مدیریت حمل‌ونقل شهری تبدیل کرده است. هدف این پژوهش، تعیین مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شبکه شهری کرمان با استفاده از یک چارچوب یکپارچه مکانی-عملیاتی است. روش شناسی پژوهش بر ترکیب تحلیل مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و شبیه‌سازی خردنگر ترافیکی استوار است و جامعه آماری آن شامل شبکه معابر شهر کرمان و سفرهای روزانه شهری است. در فاز مکانی، ۱۹۰۳ نقطه جاذب سفر استخراج شده از پایگاه داده OpenStreetMap در ۱۱ دسته کاربری اصلی طبقه‌بندی شده‌اند و در فاز عملیاتی، ۱۳۵۰۰ سفر خودروهای الکتریکی به‌عنوان نمونه‌ای از ۷۸۲۱۸۱ سفر روزانه شهر در شبیه‌سازی لحاظ شده است. داده‌های فاز شبیه‌سازی مبتنی بر شبکه معابر شهر کرمان و ماتریس مبدأ-مقصد شهری است. تحلیل داده‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی معیارها، تولید نقشه مطلوبیت، انتخاب نقاط با پتانسیل بالا در سناریوهای مختلف و شبیه‌سازی عملکرد ایستگاه‌ها در محیط SUMO انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد سناریوهای مبتنی بر وزن‌دهی سلسله‌مراتبی و انتخاب نقاط مجاور جایگاه‌های سوخت یا پارکینگ‌ها، پراکندگی مکانی متوازنی ایجاد کرده و افزایش زمان و مسافت سفر را در محدوده قابل قبول نگه می‌دارند. همچنین تحلیل حساسیت بیانگر آن است که افزایش توان شارژ و تعداد درگاه‌های شارژ، نقش معناداری در کاهش زمان انتظار و بهبود عملکرد شبکه دارد و ترکیب مکان‌یابی دقیق با بهینه‌سازی فنی ایستگاه‌ها می‌تواند به توسعه پایدار زیرساخت شارژ شهری منجر شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سلسله‌مراتبی، خودروهای الکتریکی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی حمل و نقل شهری، مکان‌یابی ایستگاه شارژ

۱- مقدمه

الکتریکی در بازار جهانی رشد چشمگیری داشته و بسیاری از کشورها با هدف کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به اهداف اقلیمی، سرمایه‌گذاری قابل توجهی در توسعه زیرساخت‌های شارژ انجام داده‌اند (Ritchie, 2024). با وجود این روند رو به رشد، توسعه نامتوازن زیرساخت شارژ همچنان

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، تشدید بحران تغییر اقلیم و محدودیت منابع فسیلی، حمل‌ونقل را به یکی از کانون‌های اصلی سیاست‌گذاری برای کاهش انتشار آلاینده‌ها تبدیل کرده است. در این میان، خودروهای الکتریکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای گذار به حمل‌ونقل پایدار مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، سهم خودروهای

که همگام با رشد فروش خودروهای الکتریکی، توسعه ایستگاه‌های شارژ عمومی را دنبال کرده‌اند، توانسته‌اند این نسبت را در محدوده مطلوب حفظ کنند، در حالی که اتکای بیش از حد به شارژ خانگی در برخی کشورها منجر به کمبود ایستگاه‌های عمومی و افزایش صف‌های شارژ شده است (IEA, 2024). این یافته‌ها اهمیت برنامه‌ریزی پیش‌نگرانه برای توسعه شبکه شارژ عمومی، به‌ویژه در مراحل اولیه نفوذ خودروهای الکتریکی، را برجسته می‌سازد.

با وجود مزایای تحلیل‌های مبتنی بر 'GIS، بسیاری از این مطالعات به تحلیل‌های ایستای مکانی محدود شده و قادر به بازنمایی عملکرد واقعی ایستگاه‌ها در مرحله بهره‌برداری نیستند. در مقابل، ابزارهای شبیه‌سازی خردنگر ترافیکی مانند 'SUMO امکان مدل‌سازی حرکت تک‌تک خودروها، رفتار کاربران و فرآیند شارژ را در شرایط نزدیک به واقعیت فراهم می‌کنند. این ابزارها به پژوهشگران اجازه می‌دهند شاخص‌هایی نظیر زمان انتظار، زمان شارژ، زمان سفر، مسافت انحرافی و اثر جانمایی ایستگاه‌ها بر عملکرد کل شبکه حمل‌ونقل را ارزیابی کنند (Spachtholz et al., 2024). با این حال، در بسیاری از پژوهش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، مکان ایستگاه‌های شارژ به صورت از پیش تعیین شده فرض شده و فرآیند تصمیم‌گیری مکانی به‌طور نظام‌مند در مدل لحاظ نشده است.

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که شکاف مهمی میان مطالعات مکانی مبتنی بر GIS و مطالعات عملیاتی مبتنی بر شبیه‌سازی وجود دارد. در حالی که رویکردهای مکانی قادر به شناسایی نواحی مناسب برای استقرار ایستگاه‌ها هستند، ارزیابی پویا و واقع‌گرایانه عملکرد این ایستگاه‌ها در شبکه ترافیکی اغلب نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر، مطالعات شبیه‌سازی محور نیز معمولاً فاقد چارچوبی منسجم برای تولید سناریوهای مکانی مبتنی بر معیارهای فضایی هستند. این خلأ روش‌شناختی، ضرورت توسعه چارچوب‌های یکپارچه‌ای را آشکار می‌سازد که بتوانند هم‌زمان مکان‌یابی بهینه و ارزیابی عملکرد عملیاتی ایستگاه‌های شارژ را پوشش دهند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه مکانی-عملیاتی برای مکان‌یابی و ارزیابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در شهر کرمان انجام شده است. در این چارچوب، ابتدا با استفاده از تحلیل مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و وزن‌دهی معیارها به روش فرآیند

یکی از مهم‌ترین موانع گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی در شهرها به شمار می‌رود.

مطالعات نشان می‌دهند که کمبود ایستگاه‌های شارژ یا جانمایی غیربهینه آن‌ها می‌تواند موجب افزایش زمان انتظار کاربران، کاهش بهره‌وری زیرساخت، و تشدید اضطراب ناشی از محدودیت پیمایش شود؛ عواملی که مستقیماً بر پذیرش فناوری خودروهای الکتریکی تأثیر منفی می‌گذارند (Karolemeas et al., 2021؛ Bridi et al., 2024). از این رو، برنامه‌ریزی علمی برای استقرار ایستگاه‌های شارژ به گونه‌ای که دسترسی مناسب و عادلانه را برای کاربران فراهم کند، به یکی از مسائل کلیدی مدیریت حمل‌ونقل شهری تبدیل شده است. مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ، ماهیتی پیچیده و چندمعیاره دارد و تحت تأثیر عواملی نظیر توزیع جمعیت، الگوی جاذب‌های سفر، شبکه معابر شهری، کاربری اراضی و زیرساخت انرژی قرار می‌گیرد (Iravani, 2022). انتخاب مکان‌های نامناسب نه تنها کارایی شبکه شارژ را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را افزایش داده و فشار مضاعفی بر شبکه توزیع برق تحمیل کند (Rezvani et al., 2020).

در پاسخ به این پیچیدگی، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در ترکیب با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی استفاده کرده‌اند. این رویکردها معمولاً با ایجاد لایه‌های مکانی مرتبط با معیارهایی نظیر تراکم جمعیت، فاصله از شبکه معابر، نزدیکی به مراکز خدماتی، پارکینگ‌ها، جایگاه‌های سوخت و زیرساخت برق آغاز شده و سپس با اعمال وزن‌های حاصل از روش‌هایی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، نقشه‌های مطلوبیت مکانی تولید می‌شوند (Kazempour et al., 2021؛ Banegas & Mamkhezri, 2024). مرور نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد که معیارهای جمعیتی و جغرافیایی تقریباً در تمامی پژوهش‌ها نقش محوری داشته‌اند، هرچند وزن و اولویت این معیارها بسته به شرایط محلی و اهداف تصمیم‌گیری متفاوت بوده است (Soczówka et al., 2024).

در کنار تحلیل‌های مکانی، برخی پژوهش‌ها به بررسی عوامل فنی و اقتصادی مرتبط با توسعه زیرساخت شارژ پرداخته‌اند. نسبت تعداد خودروهای الکتریکی به درگاه‌های شارژ عمومی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی کفایت زیرساخت مطرح شده است. نتایج مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد کشورهای

جمعیت به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی مستقل به مجموعه معیارها اضافه شد تا اثر توزیع فضایی جمعیت در فرآیند مکان‌یابی لحاظ گردد. بدین ترتیب، در مجموع ۱۲ معیار به‌عنوان ورودی تحلیل مکانی در نظر گرفته شده است. (Malczewski, 2025; Nikfal, 2023)

به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌کار گرفته شده و ضرایب وزنی هر معیار از طریق مقایسه‌های زوجی محاسبه شده است. پس از بررسی نرخ سازگاری و اطمینان از اعتبار قضاوت‌ها، ضرایب وزنی حاصل در مراحل بعدی تحلیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سپس، لایه‌های اطلاعاتی متناظر با هر معیار در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استانداردسازی شده و با استفاده از هم‌پوشانی وزنی، نقشه تناسب مکانی تولید شده است. این نقشه، میزان مناسب بودن هر واحد مکانی را برای استقرار ایستگاه شارژ نشان می‌دهد و مبنای انتخاب نقاط کاندید قرار گرفته است. (Hisoğlu et al., 2025; Wu & Li, 2026)

بر اساس نقشه تناسب طبقه‌بندی شده، تمرکز تحلیل بر نواحی با پتانسیل بالا، خیلی بالا و شدیداً بالا قرار داده شده و از میان این نواحی، ۵۰ نقطه کاندید برای استقرار ایستگاه‌های شارژ استخراج شد. انتخاب این نقاط در قالب چهار سناریوی مکانی متفاوت انجام شده که از دو رویکرد اصلی تبعیت می‌کند. در دو سناریوی نخست، ضرایب وزنی به‌دست‌آمده از AHP^۳ در محاسبه فاصله مؤثر به‌کار گرفته شده‌اند. در این حالت، فاصله مؤثر هر نقطه نسبت به هر معیار برابر فاصله اصلی آن نقطه تا معیار مربوطه تقسیم بر ضریب وزنی متناظر تعریف شده است، به‌گونه‌ای که معیارهای با اهمیت بالاتر نقش پررنگ‌تری در فرآیند انتخاب نقاط داشته باشند.

در سناریوی مبتنی بر انتخاب مستقیم، نقاطی انتخاب شده‌اند که فاصله مؤثر آن‌ها تا حداقل یکی از معیارهای جایگاه سوخت یا پارکینگ کمتر از ۲۵۰ متر باشد. پس از اعمال این شرط، نقاط بر اساس سایر معیارهای اصلی فیلتر شده‌اند تا مجموعه نهایی شامل ۵۰ نقطه حاصل شود. در سناریوی مبتنی بر خوشه‌بندی، ابتدا نقاط واقع در نواحی منتخب خوشه‌بندی شده‌اند و سپس برای هر خوشه، فاصله مؤثر نقاط نسبت به تمامی معیارها محاسبه شده است. در ادامه، نقطه‌ای به‌عنوان نماینده هر خوشه انتخاب شده است که کمترین فاصله مؤثر را با یکی از معیارها داشته باشد. علاوه بر این، محدودیت تخصیص حداقل سه ایستگاه به هر یک از معیارهای جاذب سفر اعمال شده است تا

تحلیل سلسله‌مراتبی، نقشه مطلوبیت مکانی و سناریوهای مختلف استقرار ایستگاه‌ها استخراج می‌شود. سپس، این سناریوها در محیط شبیه‌سازی خردنگر SUMO مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر آن‌ها بر شاخص‌های عملکردی خودروها، ایستگاه‌ها و کل شبکه حمل‌ونقل تحلیل می‌گردد. این رویکرد تلفیقی امکان بررسی هم‌زمان کارایی مکانی و عملکردی ایستگاه‌های شارژ را فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری پشتیبان تصمیم برای برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت شارژ در شهرهای در حال گذار به حمل‌ونقل برقی مورد استفاده قرار گیرد.

در بخش نخست، ضمن ارائه مقدمه و بیان مسئله، مروری هدفمند بر ادبیات پیشین مرتبط با مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی، شاخص‌های مؤثر و کاربرد ابزارهای تحلیل مکانی و شبیه‌سازی ترافیکی انجام شده است. در بخش دوم، روش‌شناسی پژوهش تشریح شده و مراحل تحلیل مکانی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، فرآیند وزن‌دهی معیارها، استخراج سناریوهای مکانی و نحوه پیاده‌سازی شبیه‌سازی خردنگر در نرم‌افزار SUMO توضیح داده می‌شود. بخش سوم به ارائه و تحلیل نتایج پژوهش اختصاص دارد که در آن عملکرد سناریوهای مختلف از منظر شاخص‌های زمانی و مکانی شبکه بررسی می‌شود. در بخش چهارم، تحلیل حساسیت نسبت به متغیرهای فنی ایستگاه‌ها شامل تعداد درگاه‌های شارژ و توان شارژ هر درگاه انجام شده و اثر این پارامترها بر عملکرد سیستم ارزیابی می‌گردد. در نهایت، مقاله با جمع‌بندی یافته‌ها و ارائه نتایج به پایان می‌رسد.

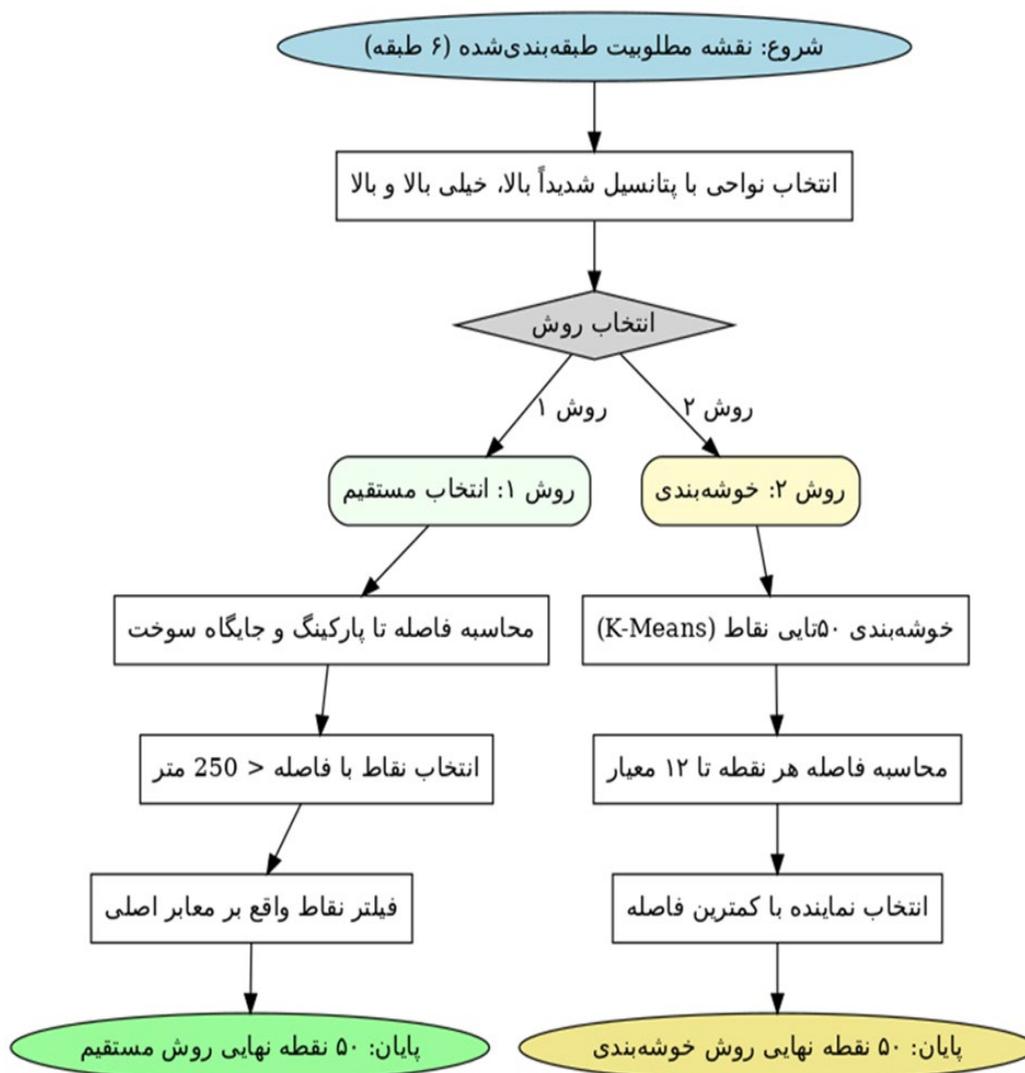
۲- روش‌شناسی پژوهش

در فاز نخست پژوهش، هدف اصلی شناسایی و استخراج مکان‌های بالقوه مناسب برای استقرار ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی بر اساس تحلیل مکانی و تصمیم‌گیری چندمعیاره است. در این راستا، داده‌های اولیه شامل ۱۹۰۳ نقطه جاذب سفر از پایگاه داده OpenStreetMap استخراج و در ۱۱ گروه اصلی شامل جایگاه‌های سوخت، پارکینگ‌ها، اماکن مذهبی، مراکز دولتی، مراکز آموزشی، مراکز خدماتی، اماکن توریستی، مراکز تجاری، مراکز درمانی، ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی و سایر کاربری‌ها دسته‌بندی شدند. علاوه بر این، معیار

- سناریو ۱: مجموعه‌ی حاصل از وزن‌دهی AHP و انتخاب نقاط به روش خوشه‌بندی،
 - سناریو ۲: مجموعه‌ی حاصل از وزن‌دهی AHP و انتخاب نقاط مجاور با پارکینگ یا جایگاه سوخت،
 - سناریو ۳: مجموعه‌ی حاصل از وزن‌دهی یک‌سان و انتخاب نقاط به روش خوشه‌بندی،
 - سناریو ۴: مجموعه‌ی حاصل از وزن‌دهی یک‌سان و انتخاب نقاط مجاور با پارکینگ یا جایگاه سوخت.
- روند کلی فاز اول پژوهش و مراحل استخراج نقاط کاندید و سناریوهای مکانی به صورت شماتیک در شکل ۱ ارائه شده است.

پوشش فضایی متوازن‌تری ایجاد شده و اطمینان حاصل شود که ایستگاه‌های شارژ در مجاورت تمامی انواع کاربری‌های اصلی قرار دارند.

در دو سناریوی دیگر، به‌منظور بررسی اثر وزن‌دهی معیارها، ضرایب وزنی تمامی ۱۲ معیار برابر در نظر گرفته شده است. در این حالت، فاصله مؤثر هر نقطه برابر با فاصله اصلی آن تعریف شده و همان دو رویکرد انتخاب مستقیم و خوشه‌بندی برای استخراج ۵۰ نقطه نهایی به‌کار گرفته شده‌اند. بدین ترتیب، چهار سناریوی مکانی با منطق انتخاب یکسان اما فرض‌های متفاوت در خصوص اهمیت معیارها تولید شده است که در ادامه ارائه شده است:



شکل ۱. فرایند استخراج نقاط نهایی مکان‌یابی اولیه با دو رویکرد نزدیکی به نقاط پر اهمیت و پوشش حداقلی تمام معیارها

نزدیک‌ترین ایستگاه خالی انجام می‌گیرد. خودرو پس از تغییر مسیر، به سمت ایستگاه منتخب حرکت کرده و با ورود به ایستگاه، در صورت اشغال بودن درگاه‌ها وارد صف انتظار می‌شود. پس از آزاد شدن درگاه، فرآیند شارژ آغاز شده و تا رسیدن سطح شارژ باتری به مقدار از پیش تعیین‌شده (۸۰ درصد) ادامه می‌یابد. پس از اتمام شارژ، خودرو ایستگاه را ترک کرده و مسیر خود را به سمت مقصد نهایی از سر می‌گیرد. این چرخه تصمیم‌گیری، حرکت، شارژ و ادامه سفر تا رسیدن خودرو به مقصد، به صورت پویا در کل دوره شبیه‌سازی تکرار می‌شود. (Barthauer, 2025)

پس از اجرای کامل شبیه‌سازی برای هر یک از سناریوهای مکانی، خروجی‌ها به منظور مقایسه عملکرد سناریوها استخراج و تحلیل شده‌اند. در سطح خودرو، شاخص‌هایی شامل میانگین زمان انتظار در صف ایستگاه‌ها، میانگین زمان حضور خودرو در ایستگاه (شامل زمان انتظار و مدت شارژ) و انرژی کل شارژ‌شده برای هر خودرو محاسبه شده است که امکان تحلیل رفتار کاربران و میزان تقاضای واقعی از شبکه شارژ را فراهم می‌سازند.

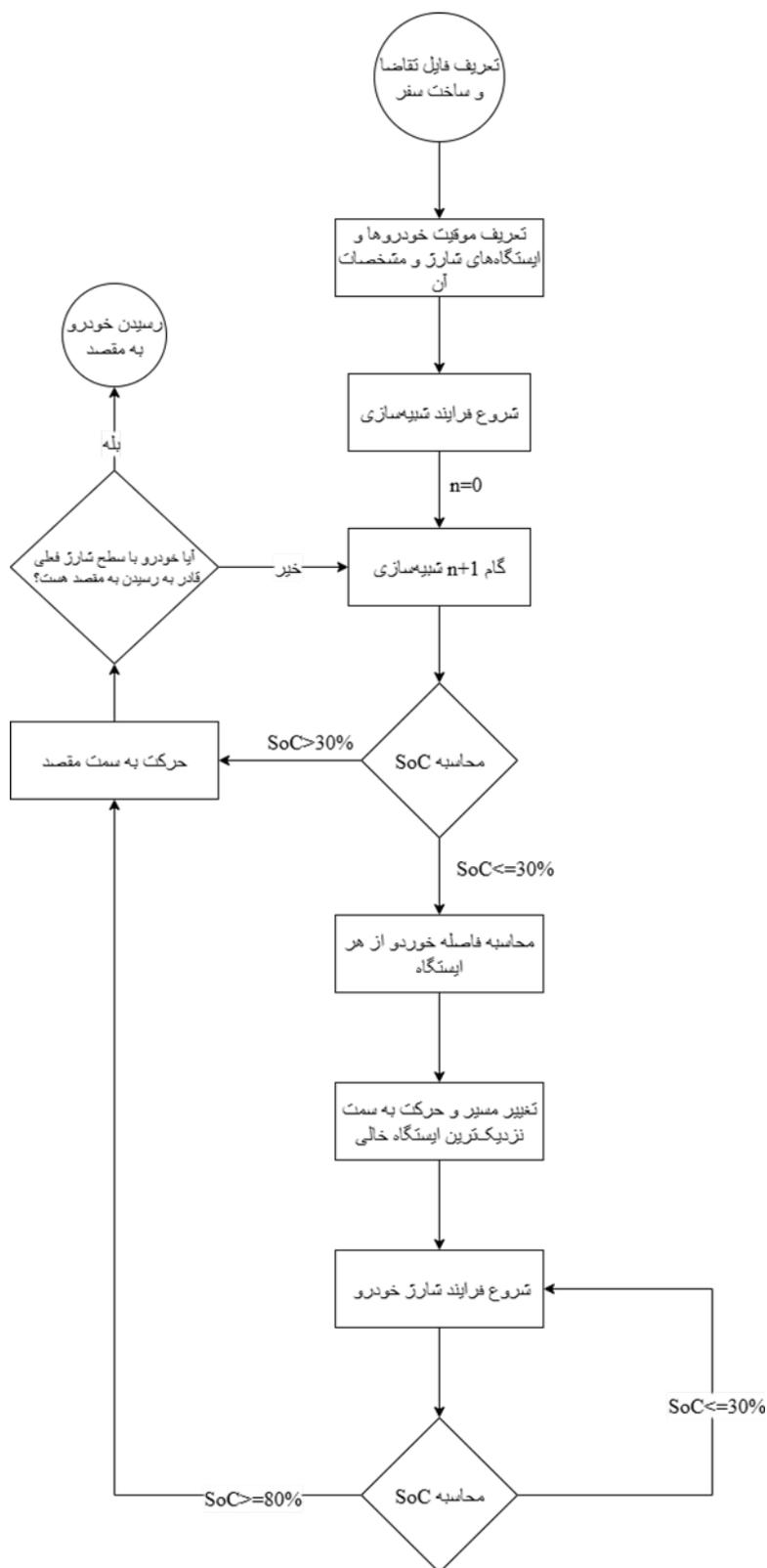
در سطح ایستگاه، عملکرد هر ایستگاه شارژ بر اساس تعداد کل خودروهای سرویس‌دهی‌شده به تفکیک هر درگاه شارژ و میانگین زمان اشغال درگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. این شاخص‌ها نشان‌دهنده میزان استفاده، توزیع بار و کارایی بهره‌برداری از ایستگاه‌های شارژ در سناریوهای مختلف هستند. علاوه بر این، در مقیاس با کل شبکه حمل‌ونقل، شاخص‌هایی شامل میانگین زمان تأخیر ناشی از نیاز به شارژ در مسیر و میانگین افزایش مسافت طی‌شده خودروها نسبت به حالت بدون نیاز به شارژ استخراج شده است. این شاخص‌های کلان امکان ارزیابی اثر کلی استقرار ایستگاه‌های شارژ بر عملکرد شبکه شهری را فراهم کرده و مبنایی برای مقایسه کمی سناریوهای مکانی مختلف ایجاد می‌کنند.

در فاز دوم پژوهش، سناریوهای مکانی استخراج‌شده از فاز نخست به منظور ارزیابی عملکرد عملیاتی در یک محیط شبیه‌سازی خردنگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور، شبکه معابر شهر کرمان وارد محیط شبیه‌سازی شده و به‌عنوان بستر حرکت خودروهای الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه شبیه‌سازی شده شامل گره‌ها و یال‌های متناظر با ساختار واقعی شبکه شهری بوده و امکان بازنمایی مسیرهای حرکتی و تعامل خودروها با ایستگاه‌های شارژ را فراهم می‌سازد.

تقاضای سفر در شبکه بر اساس ماتریس مبدأ-مقصد شهر کرمان تعریف شده و وسایل نقلیه الکتریکی به‌عنوان خروجی این ماتریس در مدل شبیه‌سازی ایجاد گردیده‌اند. برای هر خودرو، مبدأ و مقصد سفر مشخص شده و مسیر حرکت آن در شبکه تعیین می‌شود. در ابتدای شبیه‌سازی، موقعیت اولیه خودروها، سطح شارژ باتری و مشخصات ایستگاه‌های شارژ مطابق سناریوی مکانی مربوطه مقداردهی اولیه می‌گردد و سپس فرآیند شبیه‌سازی به صورت گام‌به‌گام آغاز می‌شود.

در طول شبیه‌سازی، رفتار خودروهای الکتریکی بر اساس یک سیاست تصمیم‌گیری مشخص برای انجام فرآیند شارژ مدل‌سازی شده است. این سیاست (شکل ۲) بر مبنای پایش مداوم وضعیت شارژ باتری خودرو (SoC) عمل می‌کند. در هر گام زمانی، سطح شارژ باتری خودرو محاسبه می‌شود و در صورتی که خودرو با سطح شارژ فعلی قادر به رسیدن مستقیم به مقصد خود باشد، حرکت به سمت مقصد ادامه می‌یابد. در مقابل، هنگامی که سطح شارژ باتری از آستانه تعیین‌شده کمتر شود، فرآیند تصمیم‌گیری برای شارژ فعال شده و خودرو به‌عنوان متقاضی شارژ شناسایی می‌شود.

در این حالت، فاصله خودرو تا تمامی ایستگاه‌های شارژ موجود در شبکه محاسبه شده و نزدیک‌ترین ایستگاه دارای ظرفیت خالی به‌عنوان مقصد جدید خودرو انتخاب می‌شود. بدین ترتیب، تخصیص خودرو به ایستگاه‌ها بر اساس اصل



شکل ۲. الگوریتم فرایند شارژ خودروهای الکتریکی در شبیه‌سازی

۳- نتایج تحلیل

هستند، اما به دلیل ماهیت عملکردی خود نقش مکملی در پوشش فضایی تقاضای سفر ایفا می‌کنند. این طبقه‌بندی، مبنای تعریف معیارهای مکانی و انجام تحلیل‌های بعدی مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ در این پژوهش قرار گرفته است.

در گام نخست فاز اول پژوهش، ۱۹۰۳ نقطه جاذب سفر استخراج شده از پایگاه داده OpenStreetMap بر اساس نوع کاربری و نقش آن‌ها در جذب سفرهای شهری، در ۱۱ دسته اصلی طبقه‌بندی شدند. نتایج این دسته‌بندی که به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است، نشان می‌دهد که کاربری‌های تجاری بیشترین سهم را در میان جاذب‌های سفر دارند و پس از آن، پارکینگ‌ها و مراکز درمانی قرار می‌گیرند. سایر دسته‌ها نظیر کاربری‌های تحصیلی، خدماتی، مذهبی، توریستی و دولتی اگرچه از نظر تعداد دارای فراوانی کمتری

جدول ۱. دسته‌بندی نقاط جاذب سفر، تعداد و مصادیق هر دسته

| نوع دسته | تعداد | نمونه مصادیق |
|-----------------|-------|---|
| سوخت | ۴۸ | پمپ‌بنزین، جایگاه CNG |
| تجاری | ۸۹۹ | فروشگاه، مرکز خرید، نانوايي، سوپر مارکت |
| درمانی | ۱۶۱ | بیمارستان، درمانگاه، داروخانه، دندان‌پزشکی و دامپزشکی |
| تحصیلی | ۱۲۳ | مدرسه، دانشگاه، کتابخانه، آموزشگاه زبان |
| پارکینگ | ۲۸۹ | پارکینگ عمومی، پارک حاشیه‌ای |
| حمل و نقل عمومی | ۲۴ | ایستگاه اتوبوس، تاکسی و ترمینال شهری |
| دولتی | ۲۳ | شهرداری، فرمانداری، کلانتری، دادگاه |
| خدماتی | ۱۲۱ | کارواش، تعمیرگاه خودرو، دفاتر پست و آتش‌نشانی |
| مذهبی | ۷۰ | مسجد و کلیسا |
| توریستی | ۲۰ | آتشکده و بازار |
| سایر | ۱۲۵ | سرویس بهداشتی و کیوسک |

معیارهای جایگاه‌های سوخت و پارکینگ‌ها نیز سهم قابل توجهی در تعیین مطلوبیت مکان‌ها دارند. در مقابل، معیارهایی نظیر مراکز گردشگری، اماکن مذهبی و سایر کاربری‌ها دارای وزن کمتری بوده‌اند که بیانگر تأثیر محدودتر آن‌ها در تصمیم‌گیری مکانی است. این ضرایب وزنی به‌عنوان ورودی اصلی در تولید نقشه مطلوبیت و استخراج سناریوهای مکانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارهای مکانی مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد که بر مبنای تشکیل ماتریس مقایسات زوجی و استخراج ضرایب وزنی معیارها عمل می‌کند (Saaty, 1980). در این مرحله، معیارهای تعریف شده با یکدیگر به صورت زوجی مقایسه شده و وزن نهایی هر معیار بر اساس قضاوت‌های تصمیم‌گیری و بررسی سازگاری ماتریس محاسبه گردید.

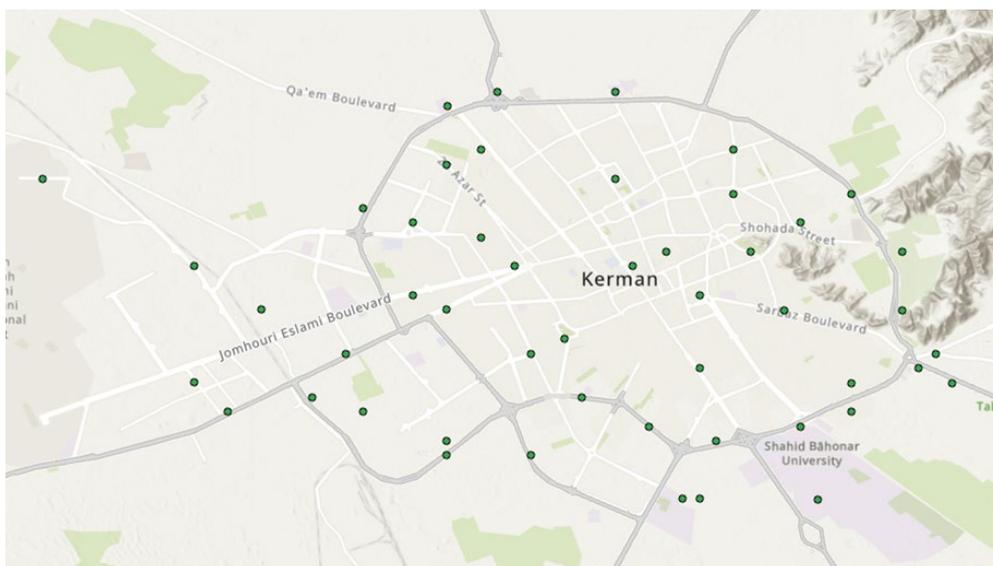
نتایج وزن‌دهی که به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد که معیار جمعیت با بیشترین وزن، مهم‌ترین عامل در فرآیند مکان‌یابی محسوب می‌شود، در حالی که

جدول ۲. ضرایب وزنی معیارها جهت استفاده در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

| ردیف | معیار | وزن نهایی |
|------|----------------------------|-----------|
| ۱ | جمعیت | ۰.۲۲۷ |
| ۲ | جایگاه‌های سوخت | ۰.۱۷۳ |
| ۳ | پارکینگ‌ها | ۰.۱۶۹ |
| ۴ | کاربری تجاری | ۰.۱۰۳ |
| ۵ | مراکز بهداشتی-درمانی | ۰.۰۶۷ |
| ۶ | ادارات دولتی | ۰.۰۶۵ |
| ۷ | مراکز آموزشی | ۰.۰۴۶ |
| ۸ | ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی | ۰.۰۴۶ |
| ۹ | مراکز خدماتی | ۰.۰۳۶ |
| ۱۰ | اماکن مذهبی | ۰.۰۳ |
| ۱۱ | مراکز گردشگری | ۰.۰۲۱ |
| ۱۲ | سایر کاربری‌ها | ۰.۰۱۶ |

این چهار سناریوی مکانی در شکل ۳ نمایش داده شده است که مربوط به حالتی است که در آن وزن‌دهی معیارها بر اساس فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده و انتخاب نقاط نهایی با استفاده از روش خوشه‌بندی صورت گرفته است. این شکل، نحوه توزیع فضایی ایستگاه‌های پیشنهادی را در نواحی با مطلوبیت بالا نشان می‌دهد و بیانگر نقش وزن‌دهی معیارها و روش انتخاب نقاط در ایجاد یک الگوی مکانی متوازن‌تر است.

پس از محاسبه ضرایب وزنی معیارها و تولید نقشه مطلوبیت مکانی، نواحی با پتانسیل بالا برای احداث ایستگاه‌های شارژ شناسایی شدند و فرآیند انتخاب نقاط کاندید از میان این نواحی انجام گرفت. مطابق با روش‌شناسی ارائه‌شده، انتخاب نقاط نهایی در قالب دو رویکرد خوشه‌بندی و انتخاب مستقیم صورت گرفت و در مجموع، برای هر سناریو ۵۰ نقطه به‌عنوان مکان‌های پیشنهادی ایستگاه‌های شارژ استخراج شد. یکی از



شکل ۳. نقاط خروجی فاز مکان‌یابی اولیه، براساس خوشه‌بندی با ضرایب وزنی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (سناریو ۱)

نیاز به شارژ بر عملکرد شبکه، نتایج شبیه‌سازی با یک حالت پایه مقایسه شد که در آن سطح شارژ اولیه خودروها ۱۰۰ در صد و مصرف انرژی در طول مسیر برابر صفر فرض شده بود. لازم به ذکر است سطح شارژ اولیه خودروها با توزیع نرمال در بازه ۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت باتری تعیین شده است. در مجموع ۹۰۶ خودرو از این مجموعه در ابتدای ورود آن‌ها به شبیه‌سازی سطح شارژ کمتر از آستانه‌ی ۳۰ درصد دارند. مقایسه نتایج نشان داد که در سناریوهای دارای فرآیند شارژ، میانگین زمان سفر در کل شبکه و همچنین مسافت طی شده خودروها نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. میزان این افزایش به‌عنوان شاخصی از اثر استقرار ایستگاه‌های شارژ و انحراف مسیر ناشی از نیاز به شارژ، در جدول ۳ برای زمان سفر و در جدول ۴ برای مسافت طی شده ارائه شده است.

در فاز دوم پژوهش، پس از ورود شبکه معابر شهر کرمان به محیط شبیه‌سازی، محدوده شهری به ۱۴۱ ناحیه ترافیکی تقسیم شد و ماتریس مبدأ-مقصد متناظر با این نواحی برای تولید تقاضای سفر مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس این ماتریس، فرآیند شبیه‌سازی سفرها انجام شد؛ به‌گونه‌ای که از مجموع ۷۸۲۱۸۱ سفر روزانه، تعداد ۱۳۵۰۰ سفر به‌عنوان سفرهای انجام‌شده توسط خودروهای الکتریکی در مدل لحاظ گردید. شبیه‌سازی در سه بازه زمانی ۷-۹، ۹-۱۶ و ۱۶-۱۸ به‌عنوان ساعات پرتردد روز انجام شد که سهم هر بازه به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۳۰ درصد از کل تقاضای سفر در نظر گرفته شد. در ادامه، نقاط استخراج شده در فاز اول به‌عنوان ایستگاه‌های شارژ در شبکه معرفی شدند و در حالت پایه، برای هر ایستگاه سه درگاه شارژ با توان ۲۲ کیلووات تعریف گردید. به‌منظور ارزیابی اثر

جدول ۳. نسبت شاخص زمان سفر شبکه در سناریوهای مختلف به سناریو پایه (مدل بدون باتری)

| سناریو | میانگین (دقیقه) | مجموع (ساعت) | نسبت به سناریو پایه (درصد) |
|--------|-----------------|--------------|----------------------------|
| پایه | ۹,۴۱ | ۲۱۱۸ | - |
| ۱ | ۱۳,۶۷ | ۳۰۷۶ | ۴۵,۳ |
| ۲ | ۱۳,۳۸ | ۳۰۱۰ | ۴۲,۱ |
| ۳ | ۱۳,۳۸ | ۳۰۱۱ | ۴۲,۱ |
| ۴ | ۱۳,۳۹ | ۳۰۱۳ | ۴۲,۳ |

جدول ۴. نسبت شاخص مسافت سفر شبکه در سناریوهای مختلف به سناریو پایه (مدل بدون باتری)

| سناریو | میانگین (کیلومتر) | مجموع (کیلومتر) | نسبت به سناریو پایه (درصد) |
|--------|-------------------|-----------------|----------------------------|
| پایه | ۶,۳۷ | ۸۶۰۱۶ | - |
| ۱ | ۶,۵۶ | ۸۸۵۷۶ | ۳,۰ |
| ۲ | ۶,۴۸ | ۸۷۴۴۹ | ۱,۷ |
| ۳ | ۶,۴۷ | ۸۷۳۱۵ | ۱,۵ |
| ۴ | ۶,۴۳ | ۸۶۸۰۶ | ۰,۹ |

جدول ۵. تحلیل حساسیت نسبت به تعداد درگاه شارژ

| شاخص سناریو | تعداد درگاه شارژ | | میزان | تعداد درگاه شارژ | | میزان | تعداد درگاه شارژ | | |
|-------------|-----------------------------|-----|-------|---------------------------|------|-------|--------------------------|-------|-----|
| | میانگین زمان انتظار (ثانیه) | | | میانگین زمان شارژ (دقیقه) | | | میانگین زمان سفر (دقیقه) | | |
| | ۴ | ۳ | | ۴ | ۳ | | ۴ | ۳ | |
| ۱ | ۲۹ | ۱۰۹ | ۷۳ | ۴۲,۶ | ۴۳,۲ | ۱,۵ | ۱۳,۶۷ | ۱۳,۲۵ | ۳,۱ |
| ۲ | ۳۱ | ۱۰۰ | ۷۰ | ۴۰,۰ | ۴۳,۱ | ۷,۳ | ۱۳,۳۸ | ۱۳,۰۹ | ۲,۱ |
| ۳ | ۲۴ | ۷۷ | ۶۹ | ۳۹,۷ | ۴۰,۲ | ۱,۱ | ۱۳,۳۸ | ۱۳,۱۴ | ۱,۸ |
| ۴ | ۲۵ | ۷۰ | ۶۵ | ۴۰,۱ | ۴۳,۳ | ۷,۳ | ۱۳,۳۹ | ۱۳,۱۵ | ۱,۸ |

۴- نتایج تحلیل حساسیت

می‌کند. در این راستا، دو پرسش اصلی مورد بررسی قرار گرفت:

- افزایش تعداد درگاه‌های شارژ فعال در هر ایستگاه از ۳ به ۴ چه اثری بر زمان سفر، میانگین زمان شارژ و زمان انتظار خودرو در ایستگاه‌ها دارد؟

- افزایش توان هر درگاه شارژ از ۲۲ به ۶۰ کیلووات چه میزان اثری بر شاخص‌های مربوط به کاربران دارد؟

به منظور ارزیابی میزان تأثیرپذیری عملکرد سیستم از تغییر در پارامترهای کلیدی، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، اثر تغییر مشخصات فنی ایستگاه‌های شارژ بر شاخص‌های عملکردی شبکه و کاربران بررسی می‌شود تا مشخص گردد که تصمیم‌های طراحی تا چه حد می‌توانند عملکرد کلی سیستم را بهبود یا تضعیف کنند. تحلیل حساسیت علاوه بر آشکارسازی نقاط قوت و ضعف سناریوهای پیشنهادی، نقش مهمی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های اجرایی در مقیاس عملیاتی ایفا

۴-۱- تحلیل حساسیت نسبت به تعداد درگاه شارژ

برابر ۲۲ کیلووات در نظر گرفته شده است تا اثرات مشاهده شده صرفاً به افزایش ظرفیت نسبت داده شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد درگاه‌های شارژ از ۳ به ۴، میانگین زمان انتظار خودروها در صف ایستگاه‌ها به طور محسوسی کاهش یافته است، در حالی که تغییر معناداری در زمان شارژ و

در این سناریو، هدف بررسی اثر افزایش ظرفیت هم‌زمان سرویس‌دهی ایستگاه‌ها بر شاخص‌های عملکردی، به‌ویژه زمان انتظار در صف، میانگین زمان شارژ و میانگین زمان سفر خودروها در کل شبکه است. در این آزمایش، تنها متغیر «تعداد درگاه شارژ فعال» تغییر داده شده و توان هر درگاه شارژ ثابت و

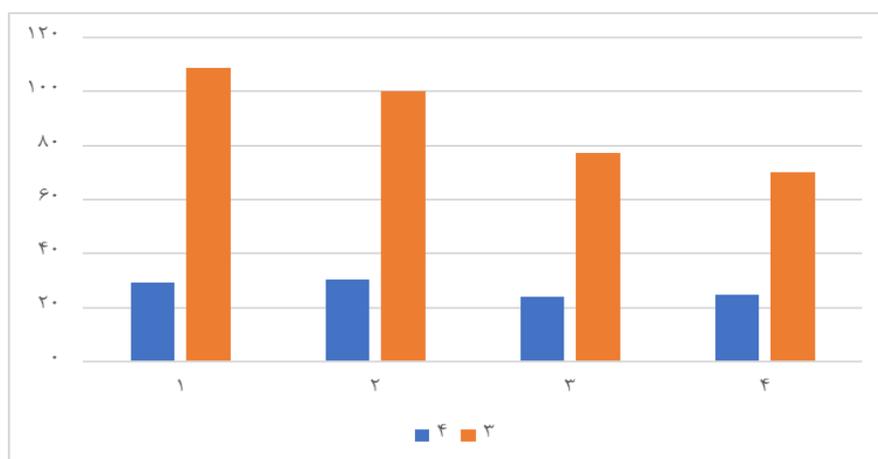
نداشته و تنها کاهش اندکی در آن مشاهده می شود که ناشی از تسهیل دسترسی به درگاه‌های شارژ آزاد و کاهش نیاز به انحراف مسیرهای طولانی است. مقایسه کمی شاخص‌های عملکردی این سناریو با حالت پایه در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین، مقایسه زمان انتظار در صف و زمان اشغال درگاه‌های شارژ به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نمایش داده شده است.

میانگین مسافت سفر مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که بخش عمده بهبود عملکرد در این سناریو ناشی از کاهش ازدحام و افزایش ظرفیت پذیرش هم‌زمان خودروها بوده و نه افزایش سرعت فرآیند شارژ. مقایسه کمی شاخص‌های عملکردی این سناریو با حالت پایه در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، روند کاهش میانگین زمان انتظار خودروها در صف ایستگاه‌های شارژ در اثر افزودن یک درگاه شارژ اضافی در شکل ۴ نمایش داده شده است که به خوبی اثر مستقیم افزایش ظرفیت ایستگاه‌ها بر کاهش صف را نشان می‌دهد.

۴-۲- تحلیل حساسیت نسبت به توان درگاه‌های شارژ در هر ایستگاه

در این بخش، اثر افزایش توان هر درگاه شارژ از ۲۲ به ۶۰ کیلووات بر شاخص‌های عملکردی کاربران و شبکه بررسی شده است. در این آزمایش، تعداد درگاه‌های شارژ فعال در هر ایستگاه ثابت و برابر سه عدد در نظر گرفته شده و تنها پارامتر متغیر، توان شارژ هر درگاه است. هدف اصلی این تحلیل، سنجش تأثیر سرعت بالاتر شارژ بر میانگین زمان انتظار، میانگین زمان شارژ، میانگین زمان سفر کاربرانی که از ایستگاه شارژ استفاده کردند است.

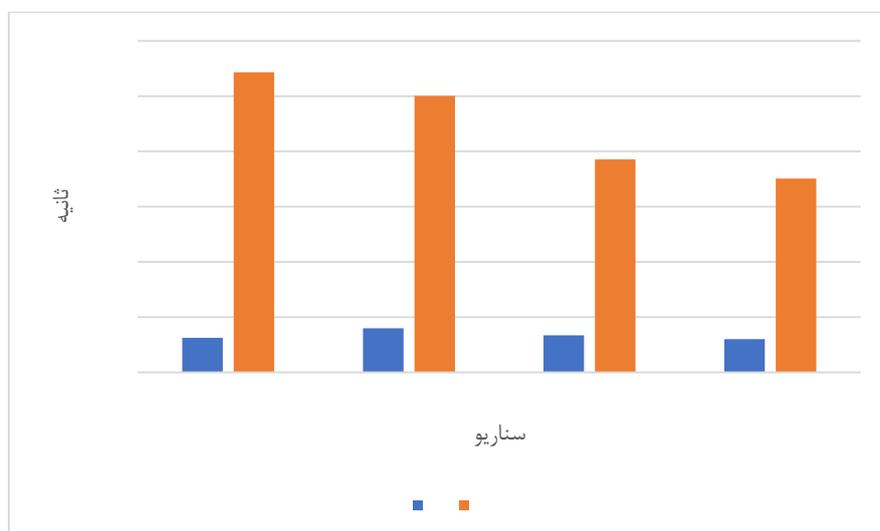
نتایج نشان می‌دهد که افزایش توان شارژ، منجر به کاهش چشمگیر زمان اشغال درگاه‌های شارژ و در نتیجه کاهش قابل توجه زمان انتظار خودروها در صف می‌شود. این بهبود عملکرد، به طور مستقیم باعث کاهش زمان سفر کاربران استفاده‌کننده از ایستگاه‌های شارژ شده و در مقیاس کل شبکه نیز کاهش میانگین زمان سفر نسبت به حالت پایه را به دنبال داشته است. در مقابل، میانگین مسافت سفر تغییر قابل توجهی



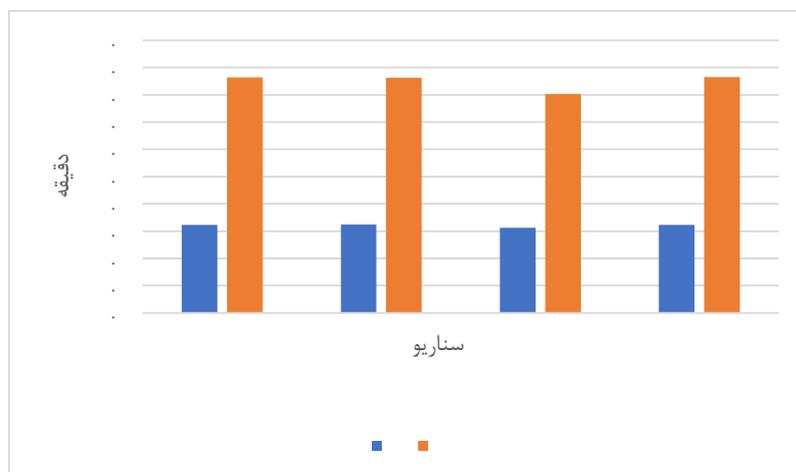
شکل ۴. میانگین زمان انتظار خودرو در صف ایستگاه شارژ با ۳ و ۴ درگاه با توان ۲۲ کیلووات

جدول ۶. تحلیل حساسیت شاخص‌های مرتبط با کاربرد نسبت به توان درگاه شارژ

| میزان بهبود (درصد) | توان شارژ (کیلووات) | | میزان بهبود (درصد) | توان شارژ (کیلووات) | | میزان بهبود (درصد) | توان شارژ (کیلووات) | | شاخص سناریو |
|--------------------|--|------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|-----|-------------|
| | ۶۰ | ۲۲ | | ۶۰ | ۲۲ | | ۶۰ | ۲۲ | |
| | میانگین زمان سفر خودروهای شارژ شده (دقیقه) | | میانگین زمان شارژ (دقیقه) | | میانگین زمان انتظار (ثانیه) | | | | |
| ۶۴,۷ | ۱۹,۷ | ۵۶,۰ | ۶۲,۶ | ۱۶,۲ | ۴۳,۲ | ۸۸ | ۱۳ | ۱۰۹ | سناریو ۱ |
| ۶۶,۱ | ۱۹,۱ | ۵۶,۴ | ۶۲,۴ | ۱۶,۲ | ۴۳,۱ | ۸۴ | ۱۶ | ۱۰۰ | سناریو ۲ |
| ۷۰,۸ | ۱۵,۶ | ۵۳,۶ | ۶۱,۱ | ۱۵,۶ | ۴۰,۲ | ۸۳ | ۱۳ | ۷۷ | سناریو ۳ |
| ۶۶,۲ | ۱۸,۴ | ۵۴,۶ | ۶۲,۶ | ۱۶,۲ | ۴۳,۳ | ۸۳ | ۱۲ | ۷۰ | سناریو ۴ |



شکل ۵. میانگین زمان انتظار خودرو در صف ایستگاه شارژ با توان ۶۰ و ۲۲ کیلووات



شکل ۶. میانگین زمان شارژ خودرو در ایستگاه شارژ با توان ۶۰ و ۲۲ کیلووات

۵- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف تعیین مکان بهینه و ارزشیابی عملکرد عملیاتی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در شهر کرمان انجام شد. در این راستا، یک چارچوب یکپارچه مکانی-عملیاتی مبتنی بر تحلیل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و شبیه‌سازی خردنگر ترافیکی ارائه گردید. در گام نخست، مکان‌یابی اولیه ایستگاه‌ها با استفاده از معیارهایی نظیر فاصله از مراکز جاذب سفر، توزیع جمعیت و وزن‌دهی به روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد و نقشه مطلوبیت مکانی تولید گردید. سپس نقاط منتخب با استفاده از روش‌های مبتنی بر فاصله و خوشه‌بندی مکانی استخراج و برای ارزیابی عملکرد در شرایط بهره‌برداری واقعی، به محیط شبیه‌سازی SUMO منتقل شدند. در ادامه، به منظور سنجش پایداری نتایج و بررسی اثر پارامترهای فنی ایستگاه‌ها، تحلیل حساسیت نسبت به تعداد درگاه‌های شارژ و توان شارژ هر درگاه انجام گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش در قالب دو دیدگاه اصلی به شرح زیر است.

دیدگاه موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها

از منظر پراکنندگی مکانی، سناریوهای مبتنی بر وزن‌دهی تحلیلی معیارها، توزیع فضایی متوازن‌تری نسبت به ایستگاه‌های شارژ دارند. این ویژگی موجب می‌شود تعداد کمتری از ایستگاه‌ها

دیدگاه مشخصات فنی ایستگاه‌ها

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مشخصات فنی ایستگاه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت سرویس‌دهی و عملکرد شبکه دارند. افزایش تعداد درگاه‌های شارژ فعال در هر ایستگاه از ۳ به ۴، تأثیر معناداری بر کاهش زمان انتظار در صف ایستگاه‌ها داشته و موجب کاهش حدود ۷۰ درصدی این شاخص می‌شود. این تغییر اثر محسوس‌تری بر میانگین مسافت سفر نداشته و تنها کاهش محدودی در زمان سفر کل شبکه (حدود ۲٫۱ درصد) ایجاد می‌کند. اثر این اقدام برای کاربران ایستگاه‌ها بسیار محسوس‌تر بوده و زمان سفر آنان را حدود ۲۲ درصد کاهش می‌دهد. در مقایسه، افزایش توان نامی درگاه‌های شارژ از ۲۲ به ۶۰ کیلووات اثرات گسترده‌تری بر شاخص‌های عملکردی نشان می‌دهد. این اقدام موجب کاهش چشمگیر (حدود ۸۴ درصد) زمان انتظار در صف،

بتوانند بخش قابل توجهی از تقاضای شارژ را پوشش دهند که از دید اقتصادی و مدیریتی، رویکرد به‌صرفه‌تری است. در مقابل، سناریوهای مبتنی بر خوشه‌بندی صرف، گرایش بیشتری به تمرکز ایستگاه‌ها در نواحی خاص نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم خوشه‌بندی، به دلیل تراکم بالای کاربری‌های تجاری، ایستگاه‌ها را به سمت این نواحی سوق می‌دهد. این تمرکز از یک سو دسترسی کاربران به خدمات شارژ را بهبود می‌بخشد، و از سوی دیگر می‌تواند موجب افزایش در میانگین مسافت سفر شود. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که افزایش مسافت سفر در تمامی سناریوها کمتر از ۳ درصد بوده و در محدوده قابل قبول عملکرد شبکه قرار دارد. از نظر عملکرد زمانی و مکانی شبکه، سناریوی دوم بهترین توازن را میان شاخص‌های کلیدی ارائه می‌دهد. این سناریو کمترین افزایش در میانگین زمان سفر شبکه را نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد و از منظر طول مسیر نیز افزایش کمتر از ۲ درصد دارد. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب وزن‌دهی تحلیلی معیارها با انتخاب نقاط مناسب از نظر مکانی، می‌تواند به ایجاد الگویی متعادل از استقرار ایستگاه‌های شارژ منجر شود که هم دسترسی کاربران و هم کارایی شبکه را بهبود می‌بخشد.

کاهش (حدود ۶۲ درصد) زمان شارژ و کاهش (حدود ۶۶ درصد) زمان سفر کاربران ایستگاه‌ها می‌شود. علاوه بر این، بهبود قابل توجهی (معادل ۱۹٫۱ درصد) در میانگین زمان سفر کل شبکه مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سرعت شارژ مهم‌ترین عامل فنی مؤثر بر کیفیت سرویس‌دهی ایستگاه‌های شارژ و رضایت کاربران است. از منظر اقتصادی و اجرایی، با توجه به هزینه‌ی به‌مراتب بالاتر احداث ایستگاه‌های شارژ سریع نسبت به ایستگاه‌های عادی، نتایج پژوهش پیشنهاد می‌کند که راهبرد بهینه توسعه زیرساخت شارژ، مبتنی بر ترکیب افزایش ظرفیت (افزایش تعداد درگاه‌ها) در تمامی ایستگاه‌ها و افزایش توان شارژ در بخشی از ایستگاه‌های پرتردد باشد. این رویکرد ضمن حفظ پایداری عملکرد شبکه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری را کنترل کرده و امکان توسعه مرحله‌ای و

کاهش زمان سفر، بهبود بهره‌وری شبکه ترافیکی و صرفه‌ی اقتصادی در توسعه زیرساخت شارژ شهری را محقق سازد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری مدیران شهری و سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

هدفمند زیرساخت شارژ شهری را فراهم می‌سازد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق مکان‌یابی دقیق مبتنی بر تحلیل‌های مکانی و ارزیابی عملکرد عملیاتی در محیط شبیه‌سازی، می‌تواند چارچوبی کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت شارژ خودروهای الکتریکی فراهم آورد. این چارچوب قادر است به‌طور هم‌زمان سه هدف اصلی شامل

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Geographic Information System
2. Simulation of Urban Mobility
3. Analytic Hierarchy Process
4. State of Charge

۷- مراجع

-Mirko Barthauer. (2025). Effects of Charging Strategies and Policies on Electric Vehicles and Infrastructure from a Microscopic Perspective. *SUMO Conference Proceedings*, 6, 51–63. doi.org/10.52825/scp.v6i.2622

-Malczewski, J. (2025). GIS and multicriteria decision analysis. <https://books.google.com/books?>

-Milad Kazempour, Heba Sabboubeh, Kamyar Pirouz Moftakhari, Najafi, R., & Fusco, G. (2024). GIS-Based geospatial analysis for identifying optimal locations of residential on-street electric vehicle charging points in birmingham, UK. *Sustainable Cities and Society*, 105988. doi.org/10.1016/j.scs.2024.105988

-Nikfal, S., & Khavarian, H. (2023). Locating electric vehicle charging stations (Case study: Ardabil city). *Journal of Environmental Science Studies*. <https://elmnet.ir/doc/2553472-52732>

-Piotr Soczówka, Lasota, M., Franke, P., & Żochowska, R. (2024). Method of determining new locations for electric vehicle charging stations using GIS tools. *Energies*, 17, 4546. doi.org/10.3390/en17184546

-Ritchie, H. (2024). Tracking global data on electric vehicles. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org>

-Banegas, J., & Mamkhezri, J. (2021). A systematic review of geographic information systems based methods and criteria used for electric vehicle charging station site selection. *SSRN Electronic Journal*. doi.org/10.2139/ssrn.4130761

-Bridi, R. M., Marwa Ben Jabra, Naeema Al Hosani, & Almurshidi, A. H. (2024). The propensity to adopt electric vehicles in the united arab emirates: An analysis of economic and geographic factors. *Sustainability (Switzerland)*, 16(2). doi.org/10.3390/su16020770

-IEA. (2024). Trends in electric vehicle charging – global EV outlook 2024 – analysis.

-Iravani, H. (2022). A multicriteria GIS-Based decision-making approach for locating electric vehicle charging stations. *Transportation Engineering*, 100135. doi.org/10.1016/j.treng.2022.100135

-Karolemeas, Stefanos Tsigdinos, Tzouras, P. G., Nikitas, A., & Efthimios Bakogiannis. (2021). Determining electric vehicle charging station location suitability: A qualitative study of greek stakeholders employing thematic analysis and analytical hierarchy process. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–21. doi.org/10.3390/su13042298

Vehicles in SUMO Simulation Environment and Their Impact on the Traffic Flow. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 301–307.

doi.org/10.1007/978-3-031-70392-8_43

-Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management Science*, 26, 641–658.

doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641

-Wu, K., & Li, W. (2026). Dynamic spatiotemporal electric vehicle charging station placement and pricing using mixed integer linear programming. *Journal of Energy Storage*, 150, 120558.

doi.org/10.1016/j.est.2026.120558

-Rezvani, S. M., Asghar, A., & Mohammad. (2020). Evaluation of Key Factors for Siting Electric Vehicle Charging Stations in Electrical Distribution Networks. 5, 17. <https://www.researchgate.net/publication>.

-Sinem Hisoğlu, Resul Çömert, Antila, M., Aman, R., & Aapo Huovila. (2025). Towards solar-energy-assisted electric vehicle charging stations: A literature review on site selection with GIS and MCDM methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 75, 104193.

doi.org/10.1016/j.seta.2025.104193

-Spachholz, E., Glomsda, M., Ingmar Kranefeld, Kracht, F. E., & Schramm, D. (2024). Charging Stations for Electric

A Simulation Model for Locating Electric Vehicle Charging Stations (Case Study: Kerman City)

*Borna Aghababaei, M.Sc., Graduate, Faculty of Civil and Environmental Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Amir Reza Mamdoohi, Associate Professor, Faculty of Civil & Environmental Eng.,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; &
Adjunct Professor, Department of Civil, Geological & Mining Eng., Polytechnique Montreal,
Canada.*

E-mail: armamdoohi@modares.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

The rapid adoption of electric vehicles has made the location of charging infrastructure a critical challenge for urban transportation planners. This study aims to identify optimal locations for electric vehicle charging stations and to evaluate their operational impacts on the street network of Kerman City through an integrated spatial–operational framework. The proposed methodology combines spatial analysis within a Geographic Information System (GIS) environment with microscopic traffic simulation. The study area comprises the street network of Kerman City and its associated daily travel demand. In the spatial analysis phase, 1,903 trip-attracting points extracted from the OpenStreetMap database are classified into 11 major land-use categories. In the operational phase, 13,500 electric vehicle trips are simulated as a representative sample of the city's 782,181 daily trips, using the street network and the corresponding origin–destination matrix. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is employed to weight location criteria, generate suitability maps, and identify high-potential sites under different planning scenarios, which are subsequently evaluated through charging station performance simulations in SUMO environment. The results indicate that scenarios based on AHP-derived weights and site selection near existing fuel stations or parking facilities achieve a well-balanced spatial distribution of charging stations while limiting increases in travel time and travel distance to acceptable levels. Furthermore, sensitivity analysis reveals that increasing charging power and the number of charging ports substantially reduces waiting times and enhances overall network performance. These findings underscore the importance of integrating spatial planning with technical and operational optimization to support the sustainable development of urban electric vehicle charging infrastructure.

Keywords: Charging Station Location, Electric Vehicles (EV), Geographic Information System (GIS), Analytic Hierarchy Process (AHP), Simulation of Urban Mobility(SUMO)