



COPYRIGHTS

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Amrollahi M. H. Evaluation and optimal design of electric vehicle charging infrastructure based on renewable energies in Iranian metropolises toward sustainable urban transportation. *Urban Economics and Planning* 7(4):48-64.

DOI: [10.22034/uep.2025.544946.1704](https://doi.org/10.22034/uep.2025.544946.1704)

ارزیابی و طراحی بهینه زیرساخت شارژ خودروهای برقی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در کلان‌شهرهای ایران در راستای حمل‌ونقل پایدار شهری

محمدحسین امراللهی^{۱*}

۱. استادیار، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

چکیده

با توجه به معضلات اساسی آلودگی هوا و محدودیت‌های زیرساختی شبکه توزیع در کلان‌شهرهای پرجمعیت، این تحقیق بر توسعه استراتژی‌های بومی‌سازی شده برای بهبود الگوهای مصرف پایدار تمرکز دارد. مطالعه موردی شش کلان‌شهر ایران (تهران، مشهد، اصفهان، کرج، شیراز و تبریز) مبنای تحلیل این راهکارها قرار گرفته است. این پژوهش به طراحی و ارزیابی فنی - اقتصادی ایستگاه‌های شارژ مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌پردازد و با استفاده از نرم‌افزار HOMER Pro سه سناریوی مختلف شامل اتصال به شبکه برق شهری، سیستم هیبریدی تجدیدپذیر (خورشیدی - بادی - ذخیره) مستقل از شبکه و سیستم هیبریدی متشکل از سامانه‌های فتوولتائیک، توربین بادی، ذخیره‌ساز انرژی و اتصال به شبکه برق شهری مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد سناریوی سوم، یعنی سیستم هیبریدی متصل به شبکه، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی عملکرد به‌مراتب بهتری دارد. در این حالت، هزینه خالص فعلی (NPC) در محدوده منفی بین ۲/۰۱ تا ۳/۲۳ میلیون دلار قرار گرفته که بیانگر بازگشت سرمایه و سودآوری طرح است. همچنین، هزینه نرمالیزه انرژی (LCOE) به حدود ۰/۰۵ دلار بر کیلووات‌ساعت کاهش یافته و انتشار سالانه دی‌اکسید کربن به طور میانگین بیش از ۱/۵ میلیون کیلوگرم کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد ادغام منابع خورشیدی، بادی و ذخیره‌ساز باتری در قالب ریزشبکه‌های هوشمند، علاوه بر تأمین پایدار انرژی مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ، موجب کاهش وابستگی به شبکه برق فسیلی، بهبود کارایی اقتصادی و کاهش قابل توجه آلودگی هوا در شهرهای بزرگ ایران می‌شود. بنابراین، مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای توسعه حمل‌ونقل برقی و تحقق اهداف توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

انرژی‌های تجدیدپذیر
خودروهای برقی
حمل‌ونقل پایدار شهری
کلان‌شهرهای ایران
مدیریت و بهینه‌سازی ایستگاه‌های شارژ

* نویسنده مسئول: m.h.mrollahi@uut.ac.ir

چگونه می‌توان یک ریزش‌بکه هیبریدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر طراحی کرد که بتواند برق مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را با کمترین هزینه و بیشترین پایداری در کلان‌شهرهای ایران تأمین کند؟

سؤالات فرعی:

۱. تفاوت شرایط اقلیمی (شدت تابش خورشید و سرعت باد) در شش کلان‌شهر ایران چه تأثیری بر عملکرد فنی و اقتصادی سیستم دارد؟
 ۲. کدام ترکیب از منابع انرژی (خورشیدی، بادی، ذخیره‌ساز و شبکه) از نظر هزینه تراز‌شده انرژی (LCOE) و کاهش انتشار CO₂ بهینه‌تر است؟
 ۳. مدل بهینه پیشنهادی چه پیامدهایی برای سیاست‌گذاری انرژی و توسعه زیرساخت شارژ در شهرهای ایران دارد؟
- این تحقیق با مدل‌سازی شش کلان‌شهر، مدل ترکیبی متشکل از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، سیستم ذخیره‌سازی باتری و اتصال به شبکه توزیع را به عنوان پیکربندی بهینه از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی معرفی و اثبات خواهد کرد.

۲. پیشینه پژوهش

رشد جهانی خودروهای برقی به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، پیشرفت‌های فناوریانه و نیاز به حمل‌ونقل پاک، شتاب گرفته است. توسعه زیرساخت‌های شارژ کارآمد، به‌ویژه با استفاده از ریزش‌بکه‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر، برای پشتیبانی از این روند حیاتی است. با این حال، ماهیت متغیر و متناوب منابع انرژی تجدیدپذیر، نیاز به سیستم‌های هیبریدی را برجسته می‌کند (Pareek et al., 2020). ترکیب منابعی مانند انرژی خورشیدی، توربین‌های بادی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، پایداری و قابلیت اطمینان لازم را برای ایستگاه‌های شارژ فراهم می‌آورد (Ibrahim et al., 2023).

مطالعات متعددی در سراسر جهان، جنبه‌های مختلف این حوزه را بررسی کرده‌اند: پژوهش‌ها در جزیره‌های ایلالات متحده آمریکا (Singh & Kumar, 2023)، شهر جامشورو پاکستان (Shaikh et al., 2022)، شهر چهار منطقه مختلف دانمارک (Boddapati, Kumar, Daniel, et al., 2022)، چهار شهر بزرگ هند (Boddapati, Kumar, 2022)، و شش مکان با شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی متنوع در نیجریه (Prakash, et al., 2022). کاربرد سیستم‌های هیبریدی انرژی تجدیدپذیر را برای ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی، با تمرکز بر جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این مطالعات اغلب از نرم‌افزارهایی مانند HOMER برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طراحی سیستم‌ها استفاده کرده‌اند.

علاوه بر مطالعات موردی منطقه‌ای، تحقیقات قابل توجهی نیز بر روش‌های مدیریتی و بهینه‌سازی برای شارژ خودروهای برقی متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، پژوهشگران ژاپنی (Takahashi et al., 2020) استراتژی شارژ اولویت‌دار را برای مدیریت ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی در مراکز پارک - سوار، با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی توسعه دادند. این رویکرد که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیاده‌سازی شد، نتایج امیدوارکننده‌ای در کاهش قابل توجه هزینه‌های تجهیزات به همراه داشت. همچنین، مطالعه‌های دیگر

خودروهای برقی به دلیل مزایای زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی، به‌سرعت در حال جایگزینی با خودروهای سنتی هستند و به‌گزینه اصلی حمل‌ونقل در سراسر جهان تبدیل شده‌اند (Singh et al., 2023). افزایش محبوبیت و پذیرش این خودروها، ایجاد زیرساخت شارژ پایدار، کارآمد و مؤثر را برای توسعه پایدار کشورها حیاتی ساخته است (Mohammed et al., 2024). با این حال، ورود این فناوری به بازارهایی که هنوز از یارانه‌های سوخت فسیلی بهره می‌برند، با چالش‌هایی از جمله کمبود زیرساخت شارژ مواجه است که مانع بزرگی در مسیر این تحول تکنولوژیک محسوب می‌شود. همچنین، رشد فزاینده خودروهای برقی، نگرانی‌هایی را در مورد تأثیر آن‌ها بر تولید و شبکه‌های توزیع برق ایجاد کرده است؛ لذا تأمین برق مورد نیاز این خودروها از منابع تجدیدپذیر امری ضروری است (Kougias et al., 2020). در همین راستا، ایستگاه‌های شارژ هیبریدی که انرژی‌های تجدیدپذیر را با شبکه برق سنتی ترکیب می‌کنند، راه‌حلی نویدبخش برای تأمین پایدار و بدون ایجاد فشار بر شبکه برق شهری ارائه می‌دهند (Kchaou-Boujelben, 2021). این ایستگاه‌ها نه تنها منبع تغذیه مطمئنی را فراهم می‌کنند، بلکه به بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش بار شبکه در ساعات اوج مصرف و در نهایت، ایجاد محیطی شهری سبزتر و پایدارتر کمک شایانی می‌کنند (Manousakis et al., 2023).

با رشد فزاینده مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل، مدیریت بهینه این انرژی به یکی از چالش‌های اصلی کشورها تبدیل شده است. گسترش سریع ناوگان خودروهای برقی نیز لزوم توسعه یک شبکه شارژ مقیاس‌پذیر و کارآمد را بیش از پیش آشکار می‌سازد؛ شبکه‌ای که خود می‌تواند فشار قابل توجهی به شبکه برق سراسری وارد کند. از آنجا که تقاضای شارژ خودروهای برقی ارتباط مستقیمی با ظرفیت تولید و پایداری شبکه برق دارد، تضمین تأمین انرژی پایدار و انعطاف‌پذیر، امری حیاتی برای پذیرش بلندمدت این فناوری محسوب می‌شود.

برای غلبه بر این چالش‌ها، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در زیرساخت شارژ خودروهای برقی امری ضروری است. استفاده از انرژی باد، فتوولتائیک خورشیدی یا ترکیبی از این فناوری‌های پاک، می‌تواند ضمن کاهش وابستگی به تولید برق از سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار کربن، پایداری شبکه را نیز ارتقا بخشد (Singh et al., 2020). علاوه بر این، بهره‌گیری از این منابع می‌تواند به بهبود ناترازی انرژی و کاهش مشکلات ناشی از قطعی‌های احتمالی برق که بر زمان فعالیت و کارایی خودروهای برقی تأثیر می‌گذارد، کمک کند (Mohammed et al., 2024). در نهایت، گذار به سمت شارژ خودروهای برقی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، رویکردی امیدوارکننده برای همسوسازی حمل‌ونقل پاک با اهداف توسعه پایدار و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی آن است (Schetinger et al., 2020).

با افزایش تقاضا برای خودروهای برقی در کلان‌شهرهای ایران، فشار قابل توجهی بر شبکه برق شهری وارد می‌شود. نبود زیرساخت‌های تأمین انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی موجب ناپایداری و افزایش هزینه تأمین انرژی در ایستگاه‌های شارژ می‌شود. این پژوهش به دنبال یافتن ترکیب بهینه منابع تجدیدپذیر (خورشید، باد، باتری) و شبکه برق برای تأمین پایدار و اقتصادی انرژی در ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است.

بهینه‌تأمین تقاضای شارژ خودروهای برقی را ارائه می‌دهد. ایران با چالش‌های بزرگی همچون ناترازی انرژی الکتریکی و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از گازهای گلخانه‌ای روبه‌رو است. در این شرایط، حرکت به سمت انرژی‌های پاک، به‌ویژه با توسعه خودروهای برقی، حیاتی است. خودروهای برقی می‌توانند با کاهش آلودگی هوا، سلامت عمومی را بهبود بخشند و در مقابله با تغییرات اقلیمی مؤثر باشند. اما چالش اصلی، ایجاد زیرساخت شارژ کارآمد و پایدار برای این خودروهاست؛ زیرساختی که متکی بر انرژی‌های تجدیدپذیر باشد، پایداری شبکه را تضمین کند و کمترین آسیب زیست‌محیطی را داشته باشد.

مرور ادبیات نشان می‌دهد بیشتر مطالعات پیشین یا تنها به جنبه‌های فنی و اقتصادی پرداخته‌اند یا اتصال به شبکه و تحلیل زیست‌محیطی را در نظر نگرفته‌اند. تحقیق حاضر با رویکردی یکپارچه، شکاف‌های جدول ۱ را پر می‌کند؛ زیرا (۱) ارزیابی زیست‌محیطی کمی با محاسبه انتشار CO_2 ، NO_x و SO_2 را انجام داده؛ (۲) سناریوهای مختلف اتصال به شبکه را مدل‌سازی کرده و (۳) تحلیل مقایسه‌ای بین شش کلان‌شهر را در مقیاس تجاری ارائه داده است. به این ترتیب، پژوهش حاضر نسبت به مطالعاتی که تنها بر سیستم‌های مستقل تمرکز داشته‌اند، تصویری جامع‌تر از کارایی فنی، اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی در بستر شهری ایران ارائه می‌دهد.

(Kabir et al., 2020) با هدف به حداقل رساندن هزینه شارژ هر خودروی برقی، سیستمی متمرکز را بر مبنای برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به کار گرفت که امکان شارژ سریع‌تر و به‌صرفه‌تر را فراهم می‌کرد.

فراتر از مسائل فنی و بهینه‌سازی در سطح ایستگاه شارژ، تحقیقات به ابعاد گسترده‌تر ادغام خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر نیز پرداخته‌اند. در این زمینه، Casella و همکاران (۲۰۲۲) مروری جامع بر ادغام بخش‌های حمل‌ونقل و شبکه هوشمند ارائه دادند که بر مدیریت خودروهای برقی تأکید داشت. Zhao و همکاران (۲۰۲۲) نیز بر رویکرد بازنگری در برنامه‌ریزی سیستم برق، با در نظر گرفتن نقش کلیدی خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر، تأکید کردند. در حوزه مدیریت انرژی، Ouramdane و همکاران (۲۰۲۲) علاوه بر انرژی‌های تجدیدپذیر و خودروهای برقی، ذخیره‌سازی انرژی را نیز مد نظر قرار دادند، اما تمرکز خود را بر مدیریت انرژی خانگی، به جای بخش تجاری، قرار دادند.

به طور کلی، پیشینه پژوهش نشان می‌دهد سیستم‌های هیبریدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، پتانسیل بالایی برای تأمین پایدار و به‌صرفه انرژی ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی دارند، اما تعیین اندازه بهینه اجزا و مدیریت هزینه‌ها همچنان چالش‌های مهمی هستند که به تحقیقات بیشتری نیاز دارند. جدول ۱، خلاصه‌ای از ادبیات مرتبط، یافته‌ها و شکاف‌های موجود در خصوص طراحی

جدول ۱. خلاصه‌ای از ادبیات مرتبط، یافته‌ها و شکاف‌های موجود در طراحی بهینه تأمین تقاضای شارژ خودروهای برقی

مرجع و سال	مکان	اهداف	الگوریتم/ابزار	نتایج	شکاف‌ها
(Boddapati, Kumar, Prakash, et al., 2022)	چین	استراتژی خودروهای برقی برای بهبود مصرف برق و کاهش هزینه شارژ	بهینه‌سازی	کاهش هزینه شارژ خودروهای برقی	بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی
(Kabir et al., 2020)		کمینه‌سازی هزینه شارژ هر خودروی برقی	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح	شارژ سریع‌تر خودروهای برقی با حداقل قیمت	بدون تحلیل محیطی
(Ouramdane et al., 2022)	فرانسه	مدیریت انرژی خانگی	MATLAB	اندازه بهینه ریزشکبه، ادغام خودروهای برقی	بخش تجاری را پوشش نمی‌دهد
(AlHammedi et al., 2022)	امارات متحده عربی	تعیین اندازه بهینه خودروهای برقی از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر	HOMER	اندازه بهینه ریزشکبه برای برآورده کردن تقاضای بار؛ افزایش ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر؛ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای؛	عدم بررسی اتصال به شبکه برق
(Murat et al., 2020)	ترکیه	سیستم مدیریت انرژی برای خودروهای برقی نصب‌شده در مناطق صنعتی	شبیه‌سازی مونت کارلو	تقاضاهای خودروهای برقی را می‌توان در دوره‌های زمانی مختلف برآورده کرد	بدون ارزیابی مالی؛ بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی
(Sayed et al., 2019)	مصر	سیستم مدیریت انرژی برای کنترل جریان برق از منابع انرژی تجدیدپذیر به خودروهای برقی	MATLAB/Simulink	نتایج خوب از نظر عملکرد فنی و برآورده کردن تقاضای بار	بدون ارزیابی مالی؛ بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی
(Al Wahedi & Bicer, 2022)	قطر	کمینه‌سازی هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی	Pro HOMER.	ترکیب بهینه، اندازه اجزای ایستگاه شارژ خودرو و اتخاذ استراتژی مدیریت انرژی مناسب	بدون تحلیل زیست‌محیطی
(Minh et al., 2021)	ویتنام	پیکربندی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی با انرژی خورشیدی	HOMER Grid	تحلیل سهم انرژی خورشیدی و انرژی شبکه در تأمین برق ایستگاه شارژ خودروهای برقی و آنالیز حساسیت تعرفه برق بر هزینه تمام‌شده انرژی	بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی عدم استفاده از سایر منابع تجدیدپذیر

مرجع و سال	مکان	اهداف	الگوریتم/ ابزار	نتایج	شکاف‌ها
(Syed Mohammed et al., 2022)	هند	تأمین برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی با سیستم‌های هیبریدی مبتنی ذخیره‌ساز هیدروژنی	HOMER	کمینه‌سازی هزینه خالص فعلی	هزینه تمام‌شده انرژی نسبتاً بالا است
(Allouhi & Rehman, 2023)	مراکش	ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر هیبریدی با پلنفرم‌های شارژ خودروهای برقی در سوپرمارکت‌ها	HOMER	کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری کل	بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی
(Baghaei et al., 2024)	ایران	تعیین ظرفیت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره انرژی باتری در یک ایستگاه شارژ	GAMS/Cplex	کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها	عدم بررسی اتصال به شبکه برق
(Kang et al., 2023)	ایالت کالیفرنیا، آمریکا	توسعه مدل بهینه‌سازی دوحده برای کمینه‌سازی هم‌زمان انتشار کربن و پیک توان	Python / CVXPY	کاهش ۱۸/۹ درصد در CO ₂ و ۳۳ درصد در پیک توان	عدم تحلیل هزینه سرمایه‌گذاری و تجهیزات زیرساختی
(Babar et al., 2025)	مرور جامع بین‌المللی	بررسی راهبردهای بهره‌برداری از ایستگاه‌های شارژ سریع و تحلیل تأثیرات فنی - اقتصادی آن‌ها بر شبکه برق و یکپارچگی با منابع تجدیدپذیر.	MATLAB/ Simulink	افزایش پارامترهای کیفیت توان شبکه و بهبود عملکرد شبکه برق	بدون تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی
(Kotarela et al., 2024)	یونان	ارزیابی فنی اقتصادی و زیست‌محیطی یک ایستگاه شارژ سریع مبتنی بر انرژی خورشیدی برای خودروهای خدمات عمومی با هدف جایگزینی ۵۰ درصد ناوگان دیزلی با خودروهای برقی	PVGIS	دوره بازگشت سرمایه بین ۳ تا ۶ سال؛ کاهش ۱۰۰ درصد در انتشار مستقیم CO ₂	اثر یکپارچه‌سازی با شبکه سراسری و سیستم‌های ذخیره انرژی بررسی نشده است

- تحلیل شهری: تمرکز بر شش کلان‌شهر اصلی ایران (تهران، مشهد، اصفهان، کرج، شیراز و تبریز) امکان درک بهتر تفاوت‌های اقلیمی و زیرساختی در توسعه سامانه‌های شارژ خودروهای برقی را فراهم می‌سازد.

با توجه به شکاف‌های شناسایی شده در مطالعات قبلی و نیاز به تحلیل جامع فنی - اقتصادی سیستم‌های هیبریدی در کلان‌شهرهای ایران، بخش بعدی مقاله به تشریح روش‌شناسی و مدل پیشنهادی تحقیق اختصاص یافته است.

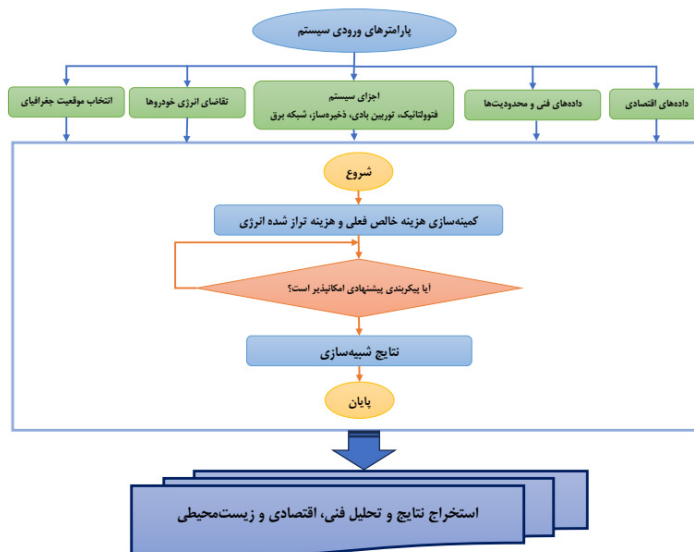
ساختار مقاله شامل پنج بخش اصلی است: (۱) مقدمه و مرور پیشینه: معرفی موضوع و بررسی جامع پیشینه پژوهش؛ (۲) مواد و روش‌ها: تشریح جزئیات متدولوژی تحقیق؛ (۳) معماری سیستم پیشنهادی: ارائه طرح سیستم پیشنهادی برای سناریوهای مختلف؛ (۴) نتایج شبیه‌سازی: تحلیل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی یافته‌ها؛ (۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادها: خلاصه‌ای از یافته‌ها و مسیرهای آتی پژوهش.

۳. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از نرم‌افزار HOMER Pro برای طراحی بهینه و تحلیل جامع (فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی) ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی، با تمرکز بر انرژی‌های تجدیدپذیر، به کار گرفته شده است. این نرم‌افزار با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، به صرفه‌ترین پیکربندی سیستم را بر اساس شاخص‌هایی نظیر هزینه خالص فعلی، هزینه واحد انرژی، نفوذپذیری منابع انرژی تجدیدپذیر و پایداری ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار سیستمی با قابلیت اطمینان بالا و کمترین هزینه را حتی با وجود نوسانات تولید و مصرف تضمین می‌کند (شکل ۱).

پژوهش حاضر برای حل این چالش، با جمع‌آوری داده‌های مصرف انرژی و تحلیل فنی - اقتصادی جامع با نرم‌افزار HOMER، به بررسی بهترین پیکربندی برای ایستگاه‌های شارژ پرداخته است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد بهترین مدل، ترکیبی از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، سیستم ذخیره‌سازی باتری و اتصال به شبکه توزیع است. این مدل، از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، برتری قابل توجهی نسبت به سایر رویکردها دارد. هدف نهایی این مطالعه، تقویت حمل‌ونقل پایدار از طریق بهبود کارایی و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است. این تحقیق به دنبال دستیابی به پیشرفت‌های مهم در طراحی و مدیریت ایستگاه‌های شارژ هیبریدی است که از منابع تجدیدپذیر تغذیه می‌شوند. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان شهری و فعالان حوزه انرژی باشد و نقش مهمی در رسیدن به اهداف جهانی حمل‌ونقل پایدار ایفا کند. نوآوری‌های کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از:

- رویکرد چندبعدی: این مطالعه با در نظر گرفتن ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، تصویری نسبتاً کامل از چالش‌ها و فرصت‌های گذار به حمل‌ونقل برقی پایدار در ایران ارائه می‌دهد.
- کاهش کربن و اهداف جهانی: سیستم پیشنهادی با کاهش چشمگیر انتشار کربن، همسو با اهداف توسعه پایدار جهانی در زمینه انرژی پاک است و می‌تواند الهام‌بخش پروژه‌های مشابه باشد.
- یکپارچه‌سازی شارژ هیبریدی: برای نخستین بار، عملکرد ایستگاه‌های شارژ ترکیبی (خودروهای برقی و انرژی‌های تجدیدپذیر) به‌شدت بررسی شده که نوآوری مهمی در حمل‌ونقل پایدار محسوب می‌شود.

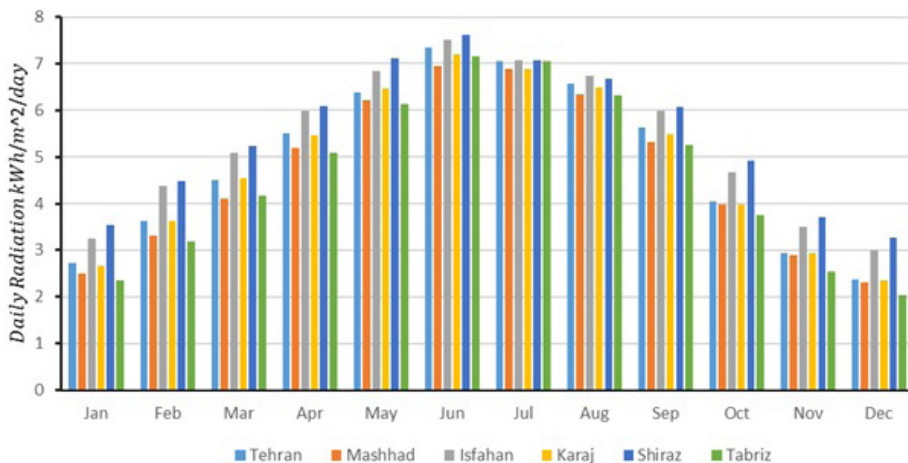


شکل ۱. نمودار جریان بهینه‌سازی ریزشبکه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی

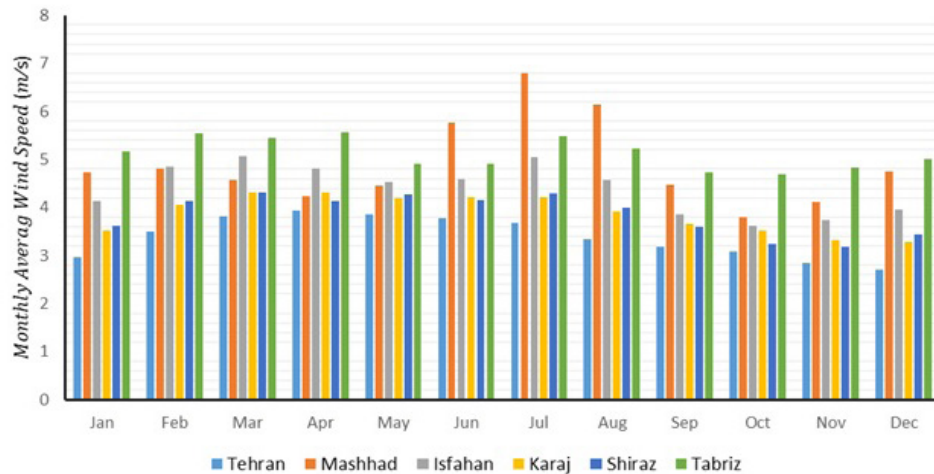
۱.۳. داده‌های هواشناسی

در این تحقیق، شش کلان‌شهر (تهران، مشهد، اصفهان، کرج، شیراز و تبریز) برای احداث ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی انتخاب شده‌اند. داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای ارزیابی این پتانسیل‌ها، که شامل اطلاعات خورشیدی و بادی است (نمایش داده شده در شکل‌های ۲ و ۳)، از پایگاه داده ناسا استخراج شده است. این داده‌ها نقش حیاتی در بهینه‌سازی تولید انرژی تجدیدپذیر و تحلیل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم در هر مکان دارند.

دلیل انتخاب نرم‌افزار HOMER Pro، توانایی آن در مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه برای سیستم‌های انرژی ترکیبی است که هم‌زمان ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را پوشش می‌دهد. افزون بر این، HOMER Pro دارای پایگاه داده معتبر جهانی برای پارامترهای اقلیمی و فنی است که دقت تحلیل‌ها را در مقایسه با سایر ابزارها افزایش می‌دهد.



شکل ۲. میزان تابش خورشید در مناطق نمونه انتخاب شده



شکل ۳. میزان سرعت باد در مناطق نمونه انتخاب شده

۲.۳. تقاضای شارژ خودروهای برقی

بخشی از واقعیت‌های عملی کشور باشند، اما برای تعمیم دقیق‌تر نتایج، در تحقیقات آینده جمع‌آوری داده‌های واقعی از الگوی تردد و رفتار شارژ کاربران ایرانی ضروری است (Al Wahedi & Bicer, 2020).

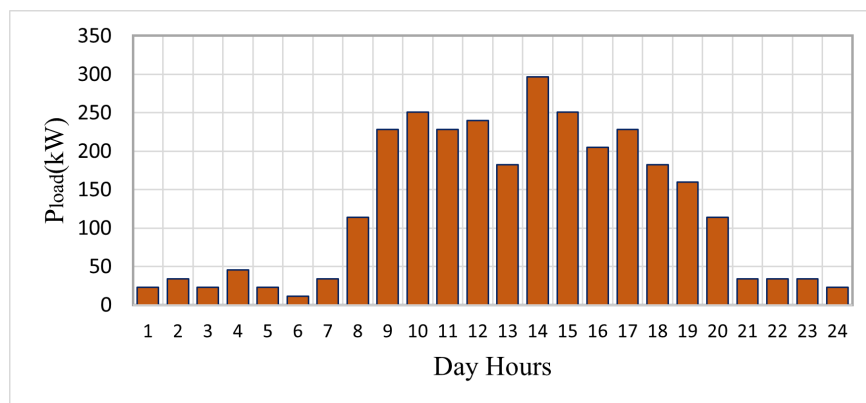
تقاضای شارژ روزانه ۳۰ کیلووات ساعت برای هر EV در این مطالعه بر اساس حقایق زیر در نظر گرفته شده است:

- بیشتر خودروهای برقی از نوع متوسط با ظرفیت باتری ۱۰۰ کیلووات ساعت خواهند بود که این میزان، حد بالایی برای این اندازه محسوب می‌شود (Allouhi & Rehman, 2023).

- بر اساس الگوهای تقاضای ساعتی مرجع (AbdElrazek et al., 2025)، اکثر رانندگان خودروهای برقی در حال حرکت، زمانی که سطح شارژ (SOC) باتری‌شان به ۲۰ درصد می‌رسد، به دنبال ایستگاه شارژ می‌شوند و هدفشان رسیدن به سطح SOC ۸۰ درصد طی ۲۰ دقیقه است.

با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های دقیق تقاضای شارژ خودروهای برقی در کشور، این مطالعه با استفاده از مفروضاتی مدل‌سازی تقاضای بار را انجام داده است. فرض بر این است که هر ایستگاه شارژ سریع شهری روزانه ۱۰۰ خودروی برقی را پذیرش می‌کند و هر خودرو به طور متوسط ۳۰ کیلووات ساعت انرژی برای شارژ نیاز دارد (با در نظر گرفتن شارژ از ۲۰ درصد به ۸۰ درصد طی ۲۰ دقیقه برای خودروهای با باتری ۱۰۰ کیلووات ساعتی). بر این اساس، کل تقاضای انرژی روزانه ۳ هزار کیلووات ساعت برآورد می‌شود.

با توجه به نبود داده‌های میدانی در مورد عادت‌های شارژ روزانه خودروهای برقی در ایران، داده‌های مورد استفاده در این مدل از مطالعات انجام‌شده در کشورهای با اقلیم و ساختار مصرف مشابه (از جمله قطر) اقتباس شده‌اند. البته این داده‌ها می‌توانند نمایانگر



شکل ۴. پروفیل بار متوسط روزانه مطالعه موردی

کرده و پروفایل بار دقیق‌تری را منعکس کند. بر اساس الگوهای تقاضای ساعتی مرجع (AbdElrazek et al., 2025)، پروفایل روزانه تقاضای شارژ مطابق شکل ۴ خواهد بود. در مجموع، این مدل‌سازی، با وجود عدم دسترسی به داده‌های جزئی شهری، تخمین معقولی برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ ارائه می‌دهد.

برای در نظر گرفتن نوسانات احتمالی در تقاضا، پارامترهای تغییرپذیری شامل ۲۰ درصد در مدت زمان شارژ، ۱۰ درصد تغییرپذیری روزانه و ۱۵ درصد تغییرپذیری در گام زمانی به مدل اضافه شده‌اند (Dejkam & Madlener, 2025). این رویکرد به مدل اجازه می‌دهد تا طیف وسیعی از الگوهای شارژ کاربران را شبیه‌سازی

جایگزینی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول تمامی پارامترهای فنی و اقتصادی اجزای ایستگاه‌های شارژ استفاده‌شده در شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

به منظور تضمین دقت و تکرارپذیری شبیه‌سازی‌ها، جزئیات فنی اجزای سیستم شامل نوع پنل خورشیدی، توربین بادی، باتری و مبدل به همراه هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و

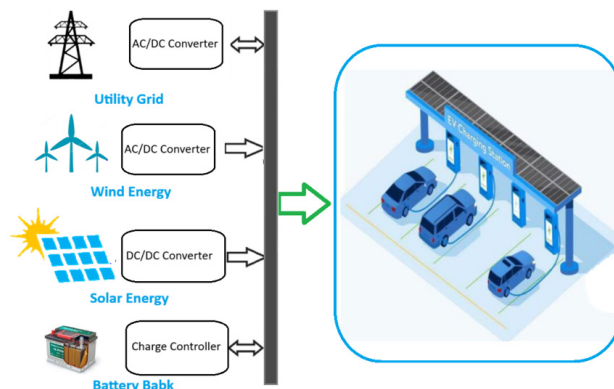
جدول ۲. مشخصات فنی و اقتصادی اجزای ایستگاه شارژ و شاخص‌های اقتصادی (Jahangir et al., 2022), (AbdElrazek et al., 2025), (Razmjoo et al., 2021) و (Ganjooy et al., 2020)

مشخصات مازول فتوولتائیک (Generic flat plate PVU)		مشخصات باتری (Kinetic Battery model)	
Rated capacity	1kW	Rated capacity	1kWh
Investment cost	320\$/unit	Investment cost	300\$/unit
Maintenance cost	2.5\$/year	Replacement cost	300\$/unit
Lift time(years)	25	Efficiency	85%
مشخصات توربین بادی (Generic U)		Maintenance cost	5\$/year
Rated capacity	3kW	Lift time(years)	15
Investment cost	750\$/unit	مشخصات مبدل (Context SW2524)	
Replacement cost	680\$/unit	Rated capacity	1.0 kW
Maintenance cost	20\$/year	Investment cost	250\$/unit
Lift time(years)	20	Replacement cost	250\$/unit
v_{cut-in}	3(m/s)	Maintenance cost	0\$/year
$v_{cut-out}$	20 (m/s)	Efficiency	97%
v_r	9 (m/s)	Lift time(year)	15
Discount rate		15%	
Inflation rate		12%	
Project lifetime		25 years	

برای تولید انرژی تجدیدپذیر نامساعد است، از انرژی ذخیره‌شده یا برق شبکه استفاده می‌شود. بنابراین، باتری‌های ایستگاه به گونه‌ای طراحی شده‌اند که حداقل الزامات ذخیره‌سازی و پشتیبان‌گیری را برآورده کنند. همچنین، استفاده از شبکه برق شهری به منظور کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی و کسب درآمد از فروش برق مازاد سیستم در نظر گرفته شده است.

۴. معماری سیستم پیشنهادی برای سناریوها

مطالعه حاضر، یک ایستگاه شارژ سریع با پیکربندی ترکیبی (خورشیدی، بادی، ذخیره‌ساز و شبکه) را برای تأمین تقاضای شارژ سریع روزانه خودروهای برقی پیشنهاد می‌کند (شکل ۵). در این مدل، خودروهای برقی در زمان دسترسی منابع تجدیدپذیر از آن‌ها تغذیه می‌کنند. انرژی مازاد تولیدی یا در بانک باتری‌ها ذخیره می‌شود یا به شبکه تزریق می‌شود. در مواقعی که شرایط آب‌وهوایی



شکل ۵. ساختار ریزشبکه هیبریدی پیشنهادی

کرد (Gol & Ščasný, 2023):

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \times \frac{G_T}{1000} \times [1 + \alpha(T_C - T_{STC})] \quad (1)$$

که در آن G_T کل تابش خورشیدی تابیده شده به پنل های PV، Y_{PV} توان اسمی پنل های PV، f_{PV} ضریب کاهش توان PV، α ضریب دما، T_C دمای PV و T_{STC} دمای سلول تحت شرایط آزمایش استاندارد (STC) (در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) است. دمای سلول به صورت معادله ۲ تخمین زده می شود:

$$T_C = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \times G_T \quad (2)$$

T_a دمای محیط بر حسب درجه سانتی گراد و NOCT دمای اسمی سلول در حال کار است که معمولاً بین ۴۵ تا ۴۷ درجه سانتی گراد است.

۲.۴. مدل سازی سیستم توربین بادی

توربین های بادی انرژی مکانیکی تولید شده هنگام برخورد باد به پره ها را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. توان خروجی یک توربین بادی ($P_{WT}(t)$)، تابعی از سرعت باد است که توسط رابطه ۳ توصیف می شود.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{cut-in} \text{ or } v \geq v_{cut-out} \\ P_r \left(\frac{v^3 - v_{cut-in}^3}{v_r^3 - v_{cut-in}^3} \right), & v_{cut-in} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{cut-out} \end{cases} \quad (3)$$

که v_r ، v_{cut-in} و $v_{cut-out}$ به ترتیب بیانگر سرعت نامی، سرعت قطع پایین و سرعت قطع بالا هستند. P_r نیز بیانگر توان خروجی در سرعت نامی (v_r) است (شکل ۶). برای تعیین سرعت باد در ارتفاع هاب توربین بر حسب سرعت ثبت شده از رابطه ۴ استفاده می شود (Riayatsyah et al., ۲۰۲۲).

$$v_h^t = v_{ref}^t \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^y \quad (4)$$

که h بیانگر ارتفاع هاب توربین، v_{ref}^t بیانگر سرعت ثبت شده در ارتفاع بادسنج h_{ref} است. y عددی بین ۰/۱ (برای محیط های مسطح) تا ۰/۲۵ (برای محیط های جنگلی و پوشیده از درخت) است.

این ایستگاه شارژ می تواند در پنج حالت مختلف عمل کند تا تقاضای شارژ خودروهای برقی را به بهترین نحو تأمین کند:

حالت ۱ (تجدیدپذیر خالص): در صورت تولید کافی انرژی خورشیدی و بادی، ایستگاه کاملاً از این منابع استفاده می کند و از شبکه برق جدا می شود.

حالت ۲ (شبکه): در زمان هایی که منابع تجدیدپذیر (شب، روز ابری یا بدون باد) قادر به تولید برق کافی نیستند، شارژ خودروها از طریق شبکه برق انجام می شود.

حالت ۳ (ترکیبی): هنگامی که انرژی تجدیدپذیر بخشی از نیاز را تأمین می کند، شارژ به صورت هم زمان از منابع تجدیدپذیر و شبکه انجام می شود. میزان استفاده از شبکه بر اساس تولید تجدیدپذیر تنظیم می شود تا توان مورد نیاز شارژ حفظ شود.

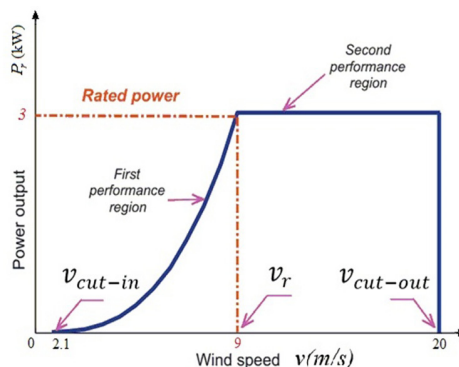
حالت ۴ (فروش به شبکه): در صورت عدم حضور خودرو برای شارژ یا ظرفیت کمتر از تولید، انرژی مازاد تولیدی از منابع تجدیدپذیر به شبکه برق فروخته می شود.

حالت ۵ (باتری پشتیبان): در صورت قطعی برق شبکه یا عدم تولید منابع تجدیدپذیر (به دلیل شرایط آب و هوایی یا نقص فنی)، ایستگاه از باتری های پشتیبان تغذیه می شود. این باتری ها با هدف حداقل کردن هزینه سرمایه گذاری، فقط برای تأمین حداقل نیاز شارژ طراحی شده اند.

سیستم فتوولتائیک (PV) به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب ایران و کاهش هزینه ها، به عنوان منبع اصلی انتخاب شده است. برای پوشش دهی زمان هایی که خورشید در دسترس نیست، یک توربین بادی نیز در نظر گرفته شده است. خروجی هر دو سیستم برای شارژ خودروها و ذخیره در باتری ها استفاده می شود. همچنین، سیستم های ذخیره سازی انرژی برای تضمین پایداری برق، حتی در غیاب باد یا خورشید، به کار گرفته شده اند.

۱.۴. مدل سازی سیستم فتوولتائیک خورشیدی

توان خروجی پنل خورشیدی (PV)، به شدت تابش خورشیدی، ظرفیت جذب، سطح پنل و درجه حرارت پنل بستگی دارد. شدت تابش خورشید ماهیت احتمالی دارد و توان خروجی مربوطه متناوب است. می توان از معادله ۱ برای محاسبه توان خروجی PV استفاده



شکل ۶. منحنی مشخصه توان توربین بادی بر حسب سرعت باد

۳.۴. مدل سازی سیستم ذخیره ساز انرژی (بانک باتری)

بسته به میزان توان تولیدی و توان مصرفی بار، می توان بانک باتری ها را شارژ و یا دشارژ کرد. توان ورودی باتری ها با توجه به

عملکرد شارژ یا دشارژ می تواند مثبت یا منفی باشد (Buestan- Morales et al., 2024) (رابطه ۵).

$$P_B(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) - P_L(t) / \eta_{inv} \quad (5)$$

در این رابطه $P_b(t)$ بیانگر کل بار مصرفی در لحظه t و η_{inv} بازده مبدل هستند. اگر $P_b(t)=0$ باشد آن گاه ظرفیت بانک باتری‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند.

برای $P_b > 0$ ، مازاد توان تولیدی (برای $P_b < 0$)، برای جبران کمبود توان تولیدی) به منظور شارژ (دشارژ) بانک باتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و ظرفیت جدید بانک باتری‌ها از رابطه ۶ قابل تعیین است.

$$SOC_B(t) = SOC_B(t-1) \times (1-\sigma) \pm P_B(t) \times \eta_b \quad (6)$$

در روابط یادشده $SOC_B(t)$ و $SOC_B(t-1)$ وضعیت شارژ باتری‌ها به ترتیب در زمان t و $t-1$ ، σ ضریب تخلیه خودی باتری‌ها، η_b و نیز به ترتیب بازده مبدل و بازده باتری‌ها هستند.

به منظور اطمینان از عملکرد مناسب باتری‌ها و استفاده از عمر مفید آن، دو محدودیت برای فرایندهای شارژ و تخلیه در نظر گرفته می‌شوند. در زمان رسیدن به حداکثر ظرفیت، شارژ باتری‌ها و در زمان رسیدن به حداقل ظرفیت، تخلیه باتری باید متوقف شوند.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (7)$$

برای جلوگیری از کاهش طول عمر مفید هر باتری، محدودیت‌های ارائه شده در رابطه ۸ در فرایندهای شارژ و تخلیه هر باتری در نظر گرفته شده است.

$$E_{batmin} = (1 - DOD) \times E_{batmax} \quad (8)$$

E_{batmin} و E_{batmax} به ترتیب بیانگر حدود بالا و پایین مجاز برای ذخیره انرژی هر باتری و D بیانگر عمق دشارژ مجاز هر باتری است.

۴.۴. ارزیابی اقتصادی

در این مطالعه، هزینه خالص فعلی (NPC) کل سیستم و هزینه ترازشده انرژی (LCOE) به عنوان دو معیار اصلی برای ارزیابی اقتصادی سیستم‌های تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند (AI Wahedi & Bicer, 2022).

هزینه‌های اجزای سیستم

هزینه کل جزء کام یک سیستم، شامل مؤلفه‌های زیر است: هزینه اولیه (IC_k) (شامل خرید، نصب و راه‌اندازی)، هزینه تعویض و جایگزینی (Rep_k)، هزینه تعمیر و نگهداری ($O\&M_k$) و ارزش اسقاطی (RV_k). هزینه کل صرف شده برای هر جزء کام (TUC_k)، از رابطه ۹ تعیین می‌شود.

$$TUC_k = IC_k + Rep_k + O\&M_k - RV_k \quad (9)$$

برای تبدیل هزینه اولیه به هزینه سالانه، از ضریب بازگشت سرمایه (CRF) استفاده می‌شود (۱۰).

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad i = \frac{r}{1+r} \quad (10)$$

که i نرخ بهره، r نرخ تورم سالانه و n طول عمر سیستم و η_k طول عمر جزء کام است. در این تحقیق نرخ بهره اسمی و تورم مورد انتظار به ترتیب برابر با ۱۵ درصد و ۱۲ درصد در نظر گرفته شده‌اند. هزینه سالانه اولیه جزء کام از رابطه ۱۱ تعیین می‌شود.

$$AIC_k = IC_k \times CRF \quad (11)$$

هزینه تعویض و جایگزینی سالانه جزء کام نیز به صورت رابطه ۱۲ است:

$$AREP_k = Rep_k \times \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{n_k} \rfloor - 1} \frac{1}{(1+i)^{m \times n_k}} \quad (12)$$

ارزش اسقاطی جزء کام در رابطه ۱۳ ارائه شده است.

$$ARV_k = RV_k \times \sum_{m=1}^{\lfloor \frac{n}{n_k} \rfloor} \frac{1}{(1+i)^{m \times n_k}} \quad (13)$$

بنابراین هزینه سالانه جزء کام برابر خواهد بود با:

$$ATUC_k = AIC_k + AREP_k + OM_k - ARV_k \quad (14)$$

برای محاسبه هزینه خالص فعلی جزء کام از معادله ۱۵ استفاده می‌شود:

$$NPCU_k = ATUC_k / CRF(i, k) \quad (15)$$

شاخص ارزش فعلی خالص کل سیستم (NPV) که نشان‌دهنده مجموع تمام هزینه‌ها و درآمدهای عمر پروژه است که به ارزش‌های فعلی آن‌ها تنزیل شده از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$NPC = \sum_k NPCU_k \quad (16)$$

هزینه ترازشده انرژی (LCOE)، که به عنوان هزینه واحد برق طی عمر یک سیستم نیز شناخته می‌شود، یکی از شاخص‌های مهم برای مقایسه به صرفه بودن فناوری‌های مختلف انرژی است. LCOE به عنوان نسبت کل هزینه سالانه به کل تولید انرژی مفید سالانه محاسبه می‌شود. فرمول‌های اقتصادی یادشده برای الگوریتم بهینه‌سازی اساسی هستند و نقش مهمی در تعیین به صرفه‌ترین کارآمدترین پیکربندی برای یک سیستم انرژی هیبریدی ایفا می‌کنند (Islam et al., 2023):

$$LCOE = \frac{\sum_k ATUC_k}{\sum_t^{8760} P_{WT}(t) + P_{PV}(t)} \quad (17)$$

۵.۴. تحلیل زیست‌محیطی

توسعه خودروهای برقی و نگرانی‌های مربوط به تغییرات اقلیمی، نیاز به تأمین انرژی پایدار و پاک برای این ناوگان را برجسته می‌کند. در این زمینه، ریزشکبه‌های مستقل که ایستگاه‌های شارژ را با منابع تجدیدپذیر تغذیه می‌کنند، به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش ردپای کربن حمل‌ونقل الکتریکی مطرح شده‌اند.

برای ارزیابی دقیق مزایای زیست‌محیطی این ریزشکبه‌ها، ابتدا فاکتورهای انتشار گازهای نیروگاه‌های متعارف کشور با توجه به ظرفیت تولید، نوع و میزان سوخت مصرفی، و پارامترهای عملیاتی محاسبه می‌شوند. سپس، با میانگین‌گیری وزنی بر اساس انرژی الکتریکی تولیدی در هر نیروگاه و با در نظر گرفتن کل انرژی تولیدی از منابع فسیلی، برق آبی و بادی در سطح ملی، فاکتور انتشار گازهای اصلی تعیین می‌شود.

با استناد به پژوهش‌های Nazari و همکاران (۲۰۰۹) و Mousavi و SADATINEJAD (۲۰۲۱)، فاکتور انتشار گازهای خروجی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی کشور برای گاز CO_2 ، $640gr/kWh$ ، گاز SO_2 ، $2.75gr/kWh$ و گاز NO_x ، $2.4gr/kWh$ محاسبه شده است.

این ارقام، مبنایی برای محاسبه میزان انتشار گازها در صورت تأمین انرژی از شبکه برق شهری (که عمدتاً متکی بر سوخت‌های فسیلی است) فراهم می‌کنند.

۵. یافته‌ها

شبکه اصلی برق در وضعیت موجود با ناترازی انرژی مواجه است و اگر خودروهای برقی توسعه یابند، این ناترازی را تشدید خواهد کرد، و از طرفی وضعیت آلودگی هوا مناسب نیست. لذا استفاده از خودروهای برقی و استفاده از منابع انرژی‌های برقی ایستگاه

۱.۵. سناریوی اول

در این سناریو، ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به طور کامل به شبکه برق شهری متکی هستند. این وابستگی، در شرایطی که شبکه برق کشور با چالش‌های جدی روبه‌روست، می‌تواند در درازمدت مشکلاتی نظیر ناترازی عرضه و تقاضا (که به خاموشی‌ها می‌انجامد)، فرسودگی زیرساخت‌ها (که باعث هدررفت انرژی و قطعی‌های مکرر می‌شود)، و اتکا به سوخت‌های فسیلی (با پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی) همگی به ناپایداری شبکه کمک می‌کنند.

افزودن بار ناشی از ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به این شبکه، فشار مضاعفی وارد کرده و وضعیت موجود را پیچیده‌تر خواهد کرد. این شرایط در تمامی کلان‌شهرها یکسان فرض شده است. جدول ۳ خلاصه‌ای از این وضعیت را به تصویر می‌کشد: این جدول شامل میزان خرید سالیانه انرژی از شبکه، حجم انرژی تأمین‌نشده، درصد عدم دسترسی به برق و مقدار آلاینده‌های تولیدی برای تأمین برق هر ایستگاه شارژ در هر سال است.

خودروهای برقی پیشنهاد می‌شود که علاوه بر تأمین برق مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی، از لحاظ زیست‌محیطی می‌تواند وضعیت خیلی مطلوبی را رقم بزند، حتی می‌توان در بازه‌های زمانی که تولید منابع تجدیدپذیر بیش از مصارف ایستگاه‌های شارژ است، به شبکه اصلی برق، انرژی تزریق کرد. برای بررسی توسعه حمل‌ونقل برقی داخل شهری، ۶ کلان‌شهر به عنوان نمونه انتخاب شده و تحلیل‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای سناریوهای مختلف انجام شده است.

برای شبیه‌سازی دقیق‌تر وضعیت موجود شبکه برق شهری، سناریوی قطعی‌های برنامه‌ریزی‌شده در ساعات اوج مصرف تابستان و زمستان در نظر گرفته شده است. این قطعی‌ها به این شرح هستند: از ۱۵ خرداد تا ۱۵ شهریور (تابستان) در روزهای کاری از ساعت ۱۳ تا ۱۵ و از ۱۵ آذر تا ۱۵ اسفند (زمستان) در روزهای کاری از ساعت ۱۸ تا ۲۰. این شبیه‌سازی، وضعیت شبکه را در شرایط اوج بار و در زمان قطعی‌های احتمالی، به صورت واقع‌گرایانه‌تری مدل می‌کند.

جدول ۳. جزئیات سیستم پیشنهادی تأمین برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی از طریق شبکه برق شهری

Term	Unit	Value
Energy Purchased	kWh/yr	1,041,435
Unmet Electric Load	kWh/yr	53,565
Capacity Shortage	%	5.38
Emission Carbon Dioxide	kg/yr	658,187
Emission Sulfur Dioxide	kg/yr	2,854
Emission Nitrogen Oxides	kg/yr	1,396

۲.۵. سناریوی دوم

کلان‌شهرها یکسان فرض شده، که بیشترین هزینه ارزش فعلی به تهران و کمترین آن به تبریز اختصاص دارد. این تفاوت ناشی از میانگین سالیانه سرعت باد در تبریز (۵/۱۲ متر بر ثانیه) در مقایسه با تهران (۳/۳۹ متر بر ثانیه) است. ظرفیت نیروگاه بادی پیشنهادی در تبریز ۲۴ درصد بیش از تهران و تولید انرژی توربین بادی در تبریز ۸۲ درصد بیش از تهران است. همچنین، هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی در تبریز ۲۷ درصد کمتر از تهران برآورد شده است.

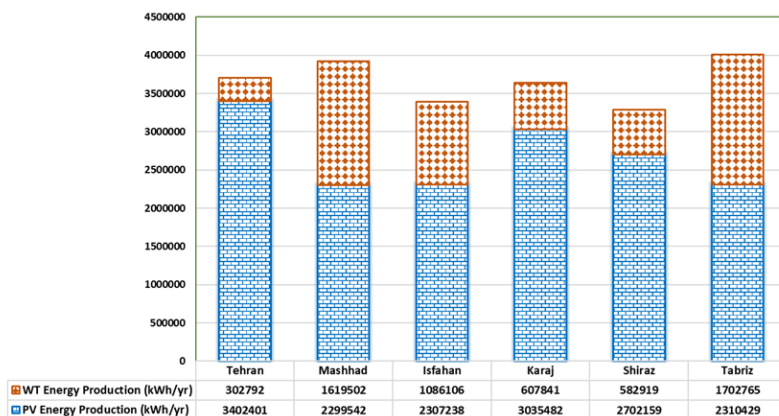
در سناریوی مد نظر، برای دستیابی به کمترین هزینه برق، پیکربندی شامل پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و ذخیره‌ساز باتری در نظر گرفته شده است. ظرفیت واحدهای هر جزء ریزشبکه ایستگاه‌های شارژ، میزان انرژی تولیدی منابع تجدیدپذیر و تحلیل اقتصادی این پیکربندی در جدول ۴ به تفصیل آورده شده است. در این سناریوی، ظرفیت بهینه اجزا بر اساس دستیابی به کمترین هزینه ارزش فعلی کل تعیین شده است. بار مصرفی برای تمامی

جدول ۴. جزئیات سیستم پیشنهادی تأمین برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به تفکیک کلان‌شهر از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر

Term \ City	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
Rated Capacity of PV units (kW)	2116	1504	1320	1905	1545	1529
Rated Capacity of WT units (kW)	834	1215	1149	948	918	1101
Rated Capacity of Battery bank units (kWh)	2639	1802	1524	2238	1956	1829
Rated Capacity of Converter units (kW)	407	387	369	418	411	384
PV Energy Production (kWh/yr)	3402401	2299542	2307238	3035482	2702159	2310429
WT Energy Production (kWh/yr)	302792	1619502	1086106	607841	582919	1702765
Excess Electricity (kWh/yr)	2540328	2774743	2246278	2488899	2129673	2878275
Total NPC (\$)	3267106	2678726	2483400	2933312	2729554	2380222
Levelized COE (\$/kWh)	0.166	0.136	0.126	0.149	0.139	0.121

استفاده ترکیبی از منابع تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها به هموار شدن منحنی تولید انرژی و در نتیجه، کاهش نیاز به سیستم‌های ذخیره‌سازی منجر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نیز این موضوع را تأیید می‌کند؛ به عنوان مثال، ظرفیت بانک باتری در تهران ۲/۲ برابر تبریز گزارش شده است.

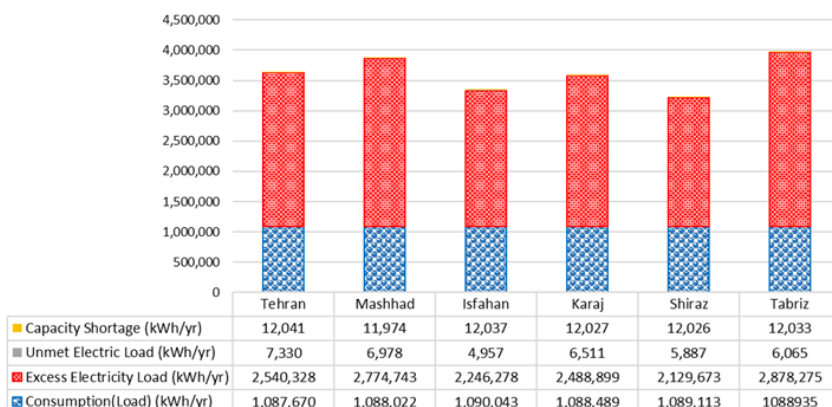
سهم هر یک از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی کلان‌شهرهای نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است؛ تهران بیشترین و مشهد کمترین تولید انرژی فتوولتائیک را دارد، در حالی که تبریز بیشترین سهم تولید بادی و تهران کمترین تولید انرژی بادی را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۷. سهم هر یک از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی کلان‌شهرهای نمونه

تغذیه ریزشبه از طریق منابع تجدیدپذیر، در شکل ۸ نشان داده شده است.

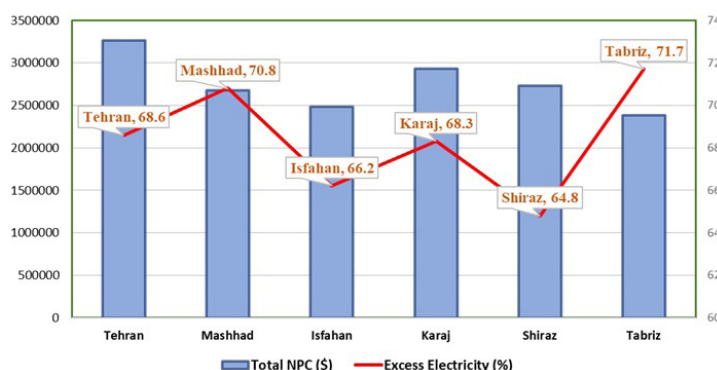
جزئیات بیشتر در خصوص میزان سالیانه انرژی مصرفی، انرژی تولیدی مازاد مصرف و میزان بار تأمین‌نشده در سال، برای سناریوی



شکل ۸. میزان سالیانه انرژی مصرفی، انرژی تولیدی مازاد مصرف و میزان بار تأمین‌نشده سناریو دوم به تفکیک کلان‌شهرهای نمونه

فراتر رود، یک چالش اساسی است. نتایج نشان می‌دهند به طور متوسط ۶۸/۴ درصد از انرژی تجدیدپذیر مازاد بوده و هدر می‌رود. این اتلاف انرژی، ناشی از ماهیت متناوب و غیرقابل کنترل منابع تجدیدپذیر، منجر به عدم تطابق بین تولید و مصرف می‌شود. دلایل این عدم تطابق شامل ظرفیت تولید بالا برای تضمین پایداری، نوسانات ذاتی منابع تجدیدپذیر (مانند تابش خورشید و سرعت باد) و الگوی نامنظم شارژ خودروهای برقی است که همگی پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی دارند.

شکل ۹، هزینه ارزش فعلی کل را برای شش شهر مورد مطالعه، همراه با درصد تولید مازاد مصرف انرژی ریزشبه، نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که کلان‌شهر تبریز کمترین هزینه و بیشترین تولید مازاد انرژی را دارد، در حالی که کلان‌شهر تهران بیشترین هزینه و شیراز کمترین تولید مازاد انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. این تفاوت‌ها به دلیل اختلاف در پتانسیل منابع تجدیدپذیر در کلان‌شهرها و ماهیت متغیر این منابع است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، مدیریت مازاد تولید انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه زمانی که تولید از تقاضای ایستگاه‌های شارژ



شکل ۹. هزینه ارزش فعلی کل و درصد تولید مازاد مصرف برای ۶ شهر مورد مطالعه

برق شهری متصل می‌شود. این سیستم می‌تواند انرژی مازاد را ذخیره کرده یا به شبکه سراسری تزریق کند. این رویکرد، با بهره‌گیری از زیرساخت‌های موجود شهری، مزایایی همچون افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌ها، و افزایش قابلیت اطمینان را به همراه دارد.

ظرفیت اسمی اجزای ریزشبهه، میزان تولید سالیانه منابع تجدیدپذیر، مقدار انرژی خریداری شده و فروخته شده به شبکه برق شهری، انرژی مازاد، درصد تأمین انرژی ایستگاه‌های شارژ از منابع تجدیدپذیر خورشیدی، بادی و شبکه برق شهری، نرخ بازگشت داخلی و مدت بازگشت سرمایه به تفکیک کلان‌شهرهای مورد مطالعه، در جدول ۵ ارائه شده است.

بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی شش کلان‌شهر، ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی سهم قابل توجهی از انرژی خود را از خورشید تأمین می‌کنند. در این میان، تهران با ۸۷/۲ درصد بیشترین سهم را از انرژی خورشیدی به خود اختصاص داده و تبریز با ۵۶ درصد کمترین سهم را دارد. در مقابل، تبریز در بهره‌گیری از انرژی بادی پیش‌تاز بوده و با ۴۱/۳ درصد بیشترین سهم را دارد، در حالی که تهران با ۷/۸ درصد کمترین سهم را به خود اختصاص داده است. به طور کلی، ۹۶ درصد از کل انرژی مورد نیاز این ایستگاه‌ها از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود و تنها ۴ درصد از شبکه برق شهری خریداری می‌شود (همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است). نکته قابل توجه دیگر این است که ۶۸/۳ درصد از این انرژی تجدیدپذیر تولیدی، معادل ۲۳۴۶ مگاوات‌ساعت در سال انرژی مازاد بر نیاز هر ایستگاه بوده و به شبکه برق شهری فروخته می‌شود. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم‌های شارژ مبتنی بر انرژی‌های پاک و پتانسیل آن‌ها در کمک به پایداری شبکه برق شهری است.

برای مقابله با این هدررفت، دو راهکار اصلی وجود دارد: کاهش ظرفیت تولید و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازها. کاهش ظرفیت تولید، اگرچه مازاد را کم می‌کند، اما ممکن است به بهینه‌سازی هزینه ارزش فعلی کل (TPVC) منجر نشود، زیرا در زمان اوج تقاضا، امکان شارژ کامل محدود می‌شود. از سوی دیگر، افزایش ذخیره‌سازها پایداری سیستم را بهبود می‌بخشد، اما هزینه‌های بالای اولیه و نگهداری آن، در صورت عدم تحلیل اقتصادی دقیق، می‌تواند TPVC را افزایش دهد.

ریزشبکه‌های ایستگاه شارژ با حذف نیروگاه‌های سوخت فسیلی، سالانه از انتشار حدود ۷۰۰/۸ تن CO_2 ، ۳ تن SO_2 و ۲/۶ تن NO_x به ازای هر ایستگاه جلوگیری می‌کنند. این امر ضمن کربن‌زدایی حمل‌ونقل و بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی، تاب‌آوری شبکه برق را افزایش داده و وابستگی به سوخت فسیلی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، توسعه این ریزشبهه‌ها، سرمایه‌گذاری مؤثری به منظور حمایت از خودروهای برقی، کاهش آلودگی هوا و دستیابی به اهداف زیست‌محیطی است که مسیری روشن به سوی آینده‌ای پاک‌تر و پایدارتر در صنعت حمل‌ونقل و انرژی ترسیم می‌کند.

بنابراین، ایجاد تعادل بین هزینه‌ها، اطمینان‌پذیری و میزان مازاد تولید، یک چالش پیچیده بهینه‌سازی محسوب می‌شود. دستیابی به کمترین TPVC مستلزم تحلیل چندمعیاره دقیق جنبه‌های فنی و اقتصادی، شامل هزینه‌های تولید، ذخیره‌سازی و ارزش انرژی از دست‌رفته است. هدف غایی، کاهش هدررفت انرژی و رسیدن به بهینه‌سازی اقتصادی سیستم برای تأمین پایدار انرژی ایستگاه‌های شارژ است، نه فقط کاهش مازاد تولید.

۳.۵. سناریوی سوم

در پیکربندی سوم، ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی متشکل از سلول‌های خورشیدی، توربین بادی و ذخیره‌ساز انرژی به شبکه

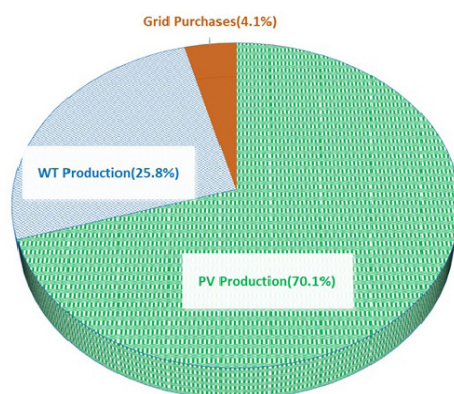
جدول ۵. تأمین برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی از طریق ریزشبهه هیبریدی منابع انرژی تجدیدپذیر و شبکه برق شهری

Term \ City	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
Rated Capacity of PV units (kW)	2116	1504	1320	1905	1545	1529
Rated Capacity of WT units (kW)	834	1215	1149	948	918	1101
Rated Capacity of Battery bank units (kWh)	297	202	286	281	310	199
Rated Capacity of Converter units (kW)	1648	1180	1038	1498	1235	1174

Term \ City	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
PV Energy Production (kWh/yr)	3,403,118	2,299,643	2,306,727	3,034,993	2,702,752	2,310,836
WT Energy Production (kWh/yr)	302,792	1,619,502	1,086,106	607,841	582,919	1,702,765
Energy Purchased (kWh/yr)	194,820	148,949	140,608	163,599	163,313	111,585
Energy Sold (kWh/yr)	2,552,211	2,748,975	2,249,885	2,480,993	2,161,456	2,805,990
Excess Electricity (kWh/yr)	160,100	162,522	125,041	147,428	117,644	162,384
PV Production (%)	87.2	56.54	65.3	79.7	78.4	56
WT Production (%)	7.76	39.8	30.7	16	19.6	41.3
Grid Purchases (%)	4.99	3.66	3.98	4.3	4.74	2.7
IRR (%)	30	42	41	32	36	31
Simple Payback (yr)	3.3	2.4	2.5	3.1	2.8	3.3

میانگین سرعت باد متوسط است. در حالی که در شهرهای شمال غربی و جنوبی (تبریز و شیراز) سهم انرژی بادی به دلیل میانگین بالاتر سرعت باد افزایش یافته است. این تنوع اقلیمی باعث شده ترکیب بهینه هر شهر متفاوت باشد و مدل پیشنهادی از انعطاف مکانی برخوردار شود.

ردیف‌های ۱۰ تا ۱۱ جدول ۵ سهم نسبی هر منبع (خورشید، باد، شبکه) در تولید کل سالانه را برای هر شهر نشان می‌دهد. اختلاف سهم منابع تجدیدپذیر در شهرهای مختلف ناشی از ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه است. در مناطق مرکزی (اصفهان، تهران و کرج) تابش خورشید عامل اصلی تأمین انرژی است، سهم انرژی بادی نسبتاً ضعیف است. در مناطق شمال شرقی (مشهد) اقلیم خشک و



شکل ۱۰. سهم منابع تأمین انرژی ایستگاه‌های شارژ

با محیط زیست و کارایی در تأمین توان مورد نیاز با انعطاف‌پذیری، بهترین عملکرد را داشته است. نکته قابل توجه، صفر بودن انتشار آلاینده‌هایی مانند مونوکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و ذرات معلق است، چرا که هیچ‌گونه ژنراتور سوخت فسیلی یا احتراق سوختی در این سیستم وجود ندارد و برق مازاد نیز به شبکه شهری تزریق می‌شود. در مجموع، این سیستم یک راه‌حل زیست‌محیطی کارآمد و سازگار برای ایستگاه‌های شارژ است.

با انتقال تمرکز از ذخیره‌سازی به تزریق انرژی مازاد به شبکه (مقایسه سناریوهای دوم و سوم)، ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی ۸۷ درصد کاهش یافته، در حالی که ظرفیت مبدل دوطرفه برای این منظور ۶۹ درصد افزایش یافته است.

جدول ۶ کاهش سالانه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق توسط سیستم هیبریدی تجدیدپذیر در ایستگاه شارژ پیشنهادی در شش کلان‌شهر را نشان می‌دهد. این سیستم به دلیل سازگاری بالا

جدول ۶. جزئیات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی

	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
Carbon Dioxide (kg/year)	2,371,782	2,508,253	2,171,413	2,331,414	2,102,829	2,568,705
Sulfur Dioxide (kg/year)	8,894	9,406	8,143	8,743	7,886	9,633
Nitrogen Dioxide (kg/year)	10,154	10,738	9,296	9,981	9,003	10,997

این سیستم با کاهش تقریبی ۲۳۴۲/۴ تن دی‌اکسید کربن در سال برای هر ایستگاه شارژ، نقش بسزایی در کاهش آلاینده‌گی ایفا می‌کند؛ این میزان طی عمر ۲۵ ساله پروژه به حدود ۵۸ میلیون تن می‌رسد! علاوه بر این، سالانه ۸/۹ تن از انتشار دی‌اکسید گوگرد و ۱۰ تن از انتشار اکسیدهای نیتروژن را نیز کاهش می‌دهد.

با کاهش تقریبی ۲۳۴۲/۴ تن دی‌اکسید کربن در سال برای هر ایستگاه شارژ، نقشی بسزا در کاهش آلاینده‌گی ایفا می‌شود؛ این میزان طی عمر ۲۵ ساله پروژه به حدود ۵۸ میلیون تن می‌رسد! علاوه بر این، سالانه ۸/۹ تن از انتشار دی‌اکسید گوگرد و ۱۰ تن از انتشار اکسیدهای نیتروژن نیز کاهش داده می‌شود.

جدول ۷ مقایسه شاخص‌های کلیدی سناریوها به صورت مجزا را نشان می‌دهد. نتایج جدول نشان می‌دهد عملکرد سه سناریوی مورد بررسی در ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی در شش کلان‌شهر کشور، تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر هزینه اقتصادی،

قیمت تمام‌شده انرژی و میزان انتشار کربن دارد. در سناریوی اول، که نشان‌دهنده وضعیت پایه یا شبکه سنتی بدون مشارکت منابع تجدیدپذیر است، هزینه خالص فعلی (NPC) در همه شهرها برابر و نسبتاً پایین (۱/۴۱ میلیون دلار) است، اما هزینه نرمالیزه انرژی (LCOE) نسبتاً بالا (۰/۰۷۵ دلار بر کیلووات‌ساعت) و میزان انتشار دی‌اکسید کربن بسیار زیاد (حدود ۶۵۸ هزار کیلوگرم در سال) است. این وضعیت نشان‌دهنده وابستگی کامل سیستم به شبکه برق فسیلی و نبود بهره‌وری زیست‌محیطی است.

در سناریوی دوم، که معمولاً بیانگر استفاده از منابع تجدیدپذیر بدون تبادل دوطرفه انرژی است، هزینه‌های سرمایه‌گذاری افزایش یافته و NPC بین ۲/۳ تا ۳/۲ میلیون دلار متغیر است، در حالی که انتشار کربن به صفر می‌رسد. هرچند این سناریو از دید زیست‌محیطی مطلوب است، اما هزینه بالای انرژی (LCOE تا ۰/۱۶۶ دلار در تهران) نشان‌دهنده نیاز به بهینه‌سازی اقتصادی بیشتر است.

جدول ۷. مقایسه شاخص‌های کلیدی سناریوها

Term/City	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
NPC (\$) (Net Present Cost)	Scenario 1	1.41M	1.41M	1.41M	1.41M	1.41M
	Scenario 2	3.27M	2.68M	2.48M	2.93M	2.73M
	Scenario 3	-2.33M	-3.03M	-2.27M	-2.34M	-2.01M
LCOE(\$/kWh) Levelized Cost of Energy	Scenario 1	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	0.0750
	Scenario 2	0.166	0.136	0.126	0.149	0.139
	Scenario 3	0.0532	0.0522	0.0501	0.0533	0.0445
Emission (kg/yr) Carbon Dioxide	Scenario 1	658187	658187	658187	658187	658187
	Scenario 2	0	0	0	0	0
	Scenario 3	-1489871	-1643216	-1333063	-1464612	-1262827

کارترین گزینه برای توسعه زیرساخت شارژ خودروهای برقی در کلان‌شهرهای ایران است.

۶. تحلیل حساسیت پارامترهای اقتصادی

برای بررسی پایداری اقتصادی مدل پیشنهادی در برابر نوسانات کلان اقتصادی، تأثیر دو پارامتر کلیدی - نرخ بهره اسمی و نرخ تورم - با تغییرات ۲۰ درصد ± مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج در جدول ۸ نشان داده است.

در مقابل، سناریوی سوم بهترین نتایج را ارائه می‌دهد. در این حالت، NPC منفی شده (به معنای بازگشت سرمایه و سود اقتصادی)، هزینه تولید انرژی کاهش یافته (حدود ۰/۰۵ دلار بر کیلووات‌ساعت)، و انتشار کربن منفی شده است؛ یعنی ایستگاه‌ها نه تنها آلاینده نیستند بلکه با بازگرداندن انرژی پاک به شبکه، به کاهش انتشار کمک می‌کنند. در میان شهرها، تبریز و مشهد بهترین عملکرد را از نظر صرفه‌جویی اقتصادی و زیست‌محیطی داشته‌اند. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد پیاده‌سازی سناریوی سوم، پایدارترین و

جدول ۸. تحلیل حساسیت پارامترهای اقتصادی

City	Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz	
Term NPV (\$) (Net Present Value)	Nominal Discount Rate 12%	3.79M	4.65M	3.56M	3.76M	3.23M	4.91M
	15%	2.33M	3.03M	2.27M	2.34M	2.01M	3.23M
	18%	1.42M	2.01M	1.45M	1.45M	1.24M	2.16M
LCOE(\$/kWh) Levelized Cost of Energy	12%	0.0438	0.0445	0.0402	0.0400	0.0374	0.0436
	15%	0.0532	0.0522	0.0501	0.0533	0.0445	0.0515
	18%	0.0638	0.0609	0.0583	0.0633	0.0526	0.0635

City		Tehran	Mashhad	Isfahan	Karaj	Shiraz	Tabriz
Term	Nominal Discount Rate						
Inflation Rate							
NPV (\$) (Net Present Value)	9.6%	1.54M	2.14M	1.56M	1.54M	1.34M	2.30M
	12%	2.33M	3.03M	2.27M	2.34M	2.01M	3.23M
	14.4%	3.44M	3.03M	3.26M	3.43M	2.94M	4.51M
LCOE(\$/kWh)	9.6%	0.0620	0.0595	0.0569	0.0616	0.0513	0.0619
Levelized Cost of Energy	12%	0.0532	0.0522	0.0501	0.0533	0.0445	0.0515
	14.4%	0.0454	0.0459	0.0415	0.0461	0.0387	0.0450

شرایط کمبود تولید تجدیدپذیر، از شبکه برق شهری خریداری می‌شود. این ترکیب انرژی ضمن تضمین تأمین برق ایستگاه‌های شارژ با قابلیت اطمینان بالا، امکان تولید سالانه ۲۳۴۶۱۰۶ کیلووات‌ساعت انرژی مازاد (معادل ۶۸/۳ درصد کل انرژی تجدیدپذیر تولیدی ایستگاه‌های شارژ) را فراهم می‌سازد که می‌تواند به شبکه سراسری فروخته شود و از نظر اقتصادی مزیت مضاعفی ایجاد کند. علاوه بر این، این سیستم‌ها با کاهش قابل ملاحظه انتشار گازهای گلخانه‌ای (به‌ویژه بیش از ۲۳۴۲ تن CO₂ در سال به ازای هر ایستگاه شارژ)، تأثیر مثبت زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارند. در مجموع، نتایج به‌روشنی بیانگر آن است که سیستم‌های شارژ هیبریدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، نه‌تنها بازدهی اقتصادی مطلوبی دارند، بلکه با تقویت پایداری شبکه برق شهری، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، و ارتقای شاخص تاب‌آوری انرژی، گامی مؤثر در مسیر گذار به زیرساخت‌های شارژ سبز و هوشمند در کلان‌شهرهای ایران محسوب می‌شوند.

با وجود چالش‌هایی مانند تغییرات فصلی در تولید انرژی، طراحی دقیق سیستم‌ها و استفاده از فناوری‌های مدیریت انرژی مانند شبکه‌های هوشمند، برای اطمینان از قابلیت اطمینان و مدیریت بهینه انرژی ضروری است. اجرای موفق این پروژه‌ها نیازمند رویکردی جامع است که عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در بر گیرد. تحقیقات آتی باید بر تأثیر شارژ خودروهای برقی بر شبکه‌های برق و یافتن استراتژی‌هایی برای بهینه‌سازی این ادغام تمرکز کنند تا حمل‌ونقل الکتریکی پایدارتر شود.

۱.۷. پیشنهادها

درخور یادآوری است که این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی در مورد پروفایل‌های بار خودروهای برقی در منطقه، از داده‌های کشورهای هم‌جوار استفاده کرده است. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود یک مدل بار پویا با در نظر گرفتن انواع مختلف خودروهای برقی و شارژرها، همچنین تفاوت‌های بین مکان‌های مسکونی، آموزشی و صنعتی، توسعه یابد.

بزرگ‌ترین مانع برای نصب ایستگاه‌های شارژ خورشیدی با ظرفیت بالا، وجود فضای باز است. محدودیت زمین موجود، به‌ویژه در مناطق شهری پرجمعیت، انتخاب مکان‌های مناسب برای زیرساخت‌های خورشیدی را چالش‌برانگیز می‌کند. لازم است مکان مناسب هم از لحاظ فضای فیزیکی و هم از منظر دسترسی بیشتر به منابع تجدیدپذیر دقیق‌تر مطالعه شود.

نرخ بهره اسمی:

این نرخ به عنوان نرخ تنزیل اصلی تأثیر مستقیم بر ارزش فعلی خالص (NPV) و هزینه‌ی نرمالیزه‌ی انرژی (LCOE) دارد. با کاهش ۲۰ درصد در نرخ بهره، NPV تا ۸۹/۳ درصد افزایش و LCOE تا ۱۸/۱ درصد کاهش یافت، که بیانگر بهبود سودآوری در شرایط مالی مناسب است. در مقابل، افزایش ۲۰ درصد در نرخ بهره موجب کاهش ۳۶ درصد در NPV و افزایش ۱۸/۹ درصد در LCOE شد.

نرخ تورم سالانه:

کاهش ۲۰ درصد در تورم باعث افت ۳۱/۵ درصد در NPV و ۱۵/۹ درصد در LCOE شد. افزایش ۲۰ درصد در تورم به رشد ۳۵/۵ درصد در NPV و کاهش ۱۳/۸ درصد در LCOE منجر شد.

بنابراین، NPV بیشترین حساسیت را نسبت به نرخ بهره اسمی دارد، به طوری که تغییر ۲۰ درصد در آن موجب نوسان حدود ۹۰ درصد در NPV می‌شود. در مجموع، مدل پیشنهادی در برابر تغییرات اقتصادی تا حدود $\pm 20\%$ درصد پایدار است، هرچند سودآوری آن نسبت به تغییر نرخ بهره آسیب‌پذیرتر است.

۷. نتیجه‌گیری

بحران‌های انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی، امروزه دغدغه‌های اصلی سیاست‌گذاران در سراسر جهان هستند. در این میان، خودروهای برقی با کاهش ردپای کربن و مزایای زیست‌محیطی خود، نقشی کلیدی در حمل‌ونقل پایدار ایفا می‌کنند. شارژ این خودروها با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، نه تنها به پایداری شبکه برق کمک می‌کند، بلکه قابلیت اطمینان و عملکرد زیست‌محیطی را نیز بهبود می‌بخشد.

این مقاله به بررسی چگونگی ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد با ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی می‌پردازد. هدف اصلی، طراحی سیستمی پایدار و قابل اعتماد برای شارژ خودروها با استفاده از انرژی پاک است. این ادغام با در نظر گرفتن الگوهای مصرف انرژی خودروها، ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری، امکان‌پذیر می‌شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد سیستم‌های پیشنهادی، مشکل از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، سامانه باتری و اتصال به شبکه برق شهری، از بالاترین کارایی فنی و اقتصادی برای تأمین پایدار برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی برخوردار است. تحلیل سهم منابع نشان می‌دهد انرژی خورشیدی با ۷۰/۴ درصد و انرژی بادی با ۲۵/۴ درصد، عمده‌ی نیاز برق ایستگاه‌ها را تأمین می‌کنند؛ در حالی که تنها ۴ درصد از کل انرژی مورد نیاز، در

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسنده مقاله برابر با ۱۰۰ درصد است.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر حامی مادی و معنوی ندارد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.

منابع

- ci, M., Parodi, L., & Robba, M. (2022). Towards the integration of sustainable transportation and smart grids: A review on electric vehicles' management. *Energies*, 15(11), 4020. <https://doi.org/10.3390/en15114020>
- Dejkam, R., & Madlener, R. (2025). Green mobility infrastructure: A techno-economic analysis of hybrid wind-solar PV charging stations for electric vehicles in Germany. *Energy*, 137450. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137450>
- Gol, A. E., & Ščasný, M. (2023). Techno-economic analysis of fixed versus sun-tracking solar panels. *International Journal of Renewable Energy Development-IJRED*, 12(3). <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.50165>
- Ibrahim, K. H., Hassan, A. Y., AbdElrazek, A. S., & Saleh, S. M. (2023). Economic analysis of a stand-alone PV-battery system based on a new power assessment configuration in Siwa Oasis-Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.034>
- Islam, M. M. M., Kowsar, A., Haque, A. M., Hossain, M. K., Ali, M. H., Rubel, M., & Rahman, M. F. (2023). Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for a healthcare centre in Northwest Bangladesh. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7(1), 315-328. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107145>
- Jahangir M. H., Toopshekan A., & Kargarzadeh A. (2022). The Fair Subsidy of the Domestic PV/Battery On-Grid System According to the Peak Load of the City Grid. *Urban Economics and Planning*, 3(1): 1-15. doi: [10.22034/UE.2022.3.01.01](https://doi.org/10.22034/UE.2022.3.01.01) [In Persian]
- Kabir, M. E., Assi, C., Tushar, M. H. K., & Yan, J. (2020). Optimal scheduling of EV charging at a solar power-based charging station. *IEEE Systems Journal*, 14(3), 4221-4231. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2968270>
- Kang, Z., Ye, Z., Lam, C.-M., & Hsu, S.-C. (2023). Sustainable electric vehicle charging coordination: Balancing CO2 emission reduction and peak power demand shaving. *Applied Energy*, 349, 121637. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121637>
- Kchaou-Boujelben, M. (2021). Charging station location problem: A comprehensive review on models and solution approaches. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103376. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103376>
- Kotarela, F., Rigogiannis, N., Glavinou, E., Mpailis, F., Kyritsis, A., & Panikolaou, N. (2024). Techno-economic and environmental assessment of a photovoltaic-based fast-charging station for public utility vehicles. *Energies*, 17(3), 632. <https://doi.org/10.3390/en17030632>
- Kougias, I., Nikitas, A., Thiel, C., & Szabó, S. (2020). Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102180. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.009>
- Manousakis, N. M., Karagiannopoulos, P. S., Tsekouras, G. J., & Kanelos, F. D. (2023). Integration of renewable energy and electric vehicles in power systems: A review. *Processes*, 11(5), 1544. <https://doi.org/10.3390/pr11051544>
- Minh, P. V., Le Quang, S., & Pham, M.-H. (2021). Technical economic analysis of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations under different solar irradiation conditions in Vietnam. *Sustainability*, 13(6), 3528. <https://doi.org/10.3390/su13063528>
- Mohammed, A., Saif, O., Abo-Adma, M., Fahmy, A., & Elazab, R. (2024). Strategies and sustainability in fast charging station deployment for electric vehicles. *Scientific reports*, 14(1), 283. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50825-7>
- Mousavi R. S. M., & SADATINEJAD S. J. (2021). Calculation of Environmental Costs of Electricity Generation (Case Study of Thermal Power Plants in Tehran). doi: [10.22034/UE.2020.09.04.01](https://doi.org/10.22034/UE.2020.09.04.01) [In Persian]
- AbdElrazek, A. S., Soliman, M., & Khalid, M. (2025). Evaluating the Techno-Economic Viability of a Solar PV-Wind Turbine Hybrid System with Battery Storage for an Electric Vehicle Charging Station in Khobar, Saudi Arabia. arXiv preprint *arXiv:2502.05654*. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100099>
- Al Wahedi, A., & Bicer, Y. (2020). A case study in Qatar for optimal energy management of an autonomous electric vehicle fast charging station with multiple renewable energy and storage systems. *Energies*, 13(19), 5095. <https://doi.org/10.3390/en13195095>
- Al Wahedi, A., & Bicer, Y. (2022). Techno-economic optimization of novel stand-alone renewables-based electric vehicle charging stations in Qatar. *Energy*, 243, 123008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123008>
- AlHamadi, A., Al-Saif, N., Al-Sumaiti, A. S., Marzband, M., Alsumaiti, T., & Heydarian-Forushani, E. (2022). Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems designed for electric vehicle charging: A case study from the United Arab Emirates. *Energies*, 15(18), 6621. <https://doi.org/10.3390/en15186621>
- Allouhi, A., & Rehman, S. (2023). Grid-connected hybrid renewable energy systems for supermarkets with electric vehicle charging platforms: Optimization and sensitivity analyses. *Energy Reports*, 9, 3305-3318. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.02.005>
- Babar, R., Muhammad, A., Khan, R. S., Khan, W., Aziz, A., Yousaf, M. Z., ... & Zaitsev, I. (2025). Operational strategies for EV fast-charging and their impact on the power grid and renewable integration. *Energy Exploration & Exploitation*, 01445987251352551. <https://doi.org/10.1177/01445987251352551>
- Baghaei H., Jaafari, M., & Alizadeh, M. (2024). Planning of a Fast Charging Station for Electric Vehicles Equipped with Renewable Energy Sources and an Energy Storage System, Considering Economic and Environmental Objectives. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77): 245-259. <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30309.2430> [In Persian]
- Boddapati, V., Kumar, A. R., Daniel, S. A., & Padmanaban, S. (2022). Design and prospective assessment of a hybrid energy-based electric vehicle charging station. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102389. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102389>
- Boddapati, V., Kumar, A. R., Prakash, D., & Daniel, S. A. (2022). Design and feasibility analysis of a solar PV and biomass-based electric vehicle charging station for metropolitan cities (India). *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 793-818. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561603035>
- Buestan-Morales, E., Fajardo-Castillo, S., Barragán-Escandón, A., Zalamea-León, E., & Serrano-Guerrero, X. (2024). Feasibility analysis of an electric vehicle charging station with solar energy and battery storage. *Energies*, 17(15), 3818. <https://doi.org/10.3390/en17153818>
- Casella, V., Fernandez Valderrama, D., Ferro, G., Minciardi, R., Paoluc-

- Murat, A., Dokur, E., & BAYINDIR, R. (2020). *Energy management for EV charging based on solar energy in an industrial microgrid*. 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), doi: [10.1109/ICRE-RA49962.2020.9242663](https://doi.org/10.1109/ICRE-RA49962.2020.9242663)
- Nazari S., Sohrabi-Kashani A., Davari S., & Delavar-Moghaddam Z. (2009). Determination of Co₂, So₂ and Nox Emission Factors in Irans Thermal Power Plants Comparing with North American Countries. *Iranian journal of energy*, 12(3): 25-36. URL: <http://necjournals.ir/article-1-56-en.html> [In Persian]
- Ouramdane, O., Elbouchikhi, E., Amirat, Y., Le Gall, F., & Sedgh Gooya, E. (2022). Home energy management considering renewable resources, energy storage, and an electric vehicle as a backup. *Energies*, 15(8), 2830. <https://doi.org/10.3390/en15082830>
- Pareek, S., Sujil, A., Ratra, S., & Kumar, R. (2020). *Electric vehicle charging station challenges and opportunities: A future perspective*. 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), doi: [10.1109/ICONC345789.2020.9117473](https://doi.org/10.1109/ICONC345789.2020.9117473)
- Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO₂ emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, 164, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>
- Riyatsyah, T., Geumpana, T., Fattah, I. R., Rizal, S., & Mahlia, T. I. (2022). Techno-economic analysis and optimisation of campus grid-connected hybrid renewable energy system using HOMER grid. *Sustainability*, 14(13), 7735. <https://doi.org/10.3390/su14137735>
- Sayed, K., Abo-Khalil, A. G., & S. Alghamdi, A. (2019). Optimum resilient operation and control DC microgrid based electric vehicles charging station powered by renewable energy sources. *Energies*, 12(22), 4240. <https://doi.org/10.3390/en12224240>
- Schetinger, A. M., Dias, D. H. N., Borba, B. S. M. C., & Pimentel da Silva, G. D. (2020). Techno-economic feasibility study on electric vehicle and renewable energy integration: A case study. *Energy Storage*, 2(6), e197. <https://doi.org/10.1002/est2.197>
- Shaikh, A., Soomro, A. M., Kumar, M., & Shaikh, H. (2022). Assessment of a stand-alone hybrid PV-hydrogen based electric vehicle charging station model using HOMER. *Journal of Applied Engineering & Technology (JAET)*, 6(1), 11-20. <https://doi.org/10.55447/jaet.06.01.59>
- Shakouri G. H., Kazemi A., Abdolahpour S., & Goldansaz S. (2020). Economic, Social, and Environmental Assessment of Electricity Generation from Renewable and Gas Technologies. *IJE*, 23(3): 7-33. <http://necjournals.ir/article-1-1563-fa.html> [In Persian]
- Singh, B., & Kumar, A. (2023). Optimal energy management and feasibility analysis of hybrid renewable energy sources with BESS and impact of electric vehicle load with demand response program. *Energy*, 278, 127867. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127867>
- Singh, D., Paul, U. K., & Pandey, N. (2023). Does electric vehicle adoption (EVA) contribute to clean energy? Bibliometric insights and future research agenda. *Cleaner and Responsible Consumption*, 8, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100099>
- Singh, S., Chauhan, P., & Singh, N. J. (2020). Feasibility of grid-connected solar-wind hybrid system with electric vehicle charging station. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 295-306. doi: [10.35833/MPCE.2019.000081](https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000081)
- Syed Mohammed, A., Anuj, Lodhi, A. S., & Murtaza, Q. (2022). Techno-economic feasibility of hydrogen based electric vehicle charging station: A case study. *International journal of energy research*, 46(10), 14145-14160. <https://doi.org/10.1002/er.8132>
- Takahashi, K., Masrur, H., Nakadomari, A., Narayanan, K., Takahashi, H., & Senju, T. (2020). *Optimal sizing of a microgrid system with EV charging station in Park & Ride facility*. 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), doi: [10.1109/APPEEC48164.2020.9220479](https://doi.org/10.1109/APPEEC48164.2020.9220479)
- Zhao, S., Li, K., Yang, Z., Xu, X., & Zhang, N. (2022). A new power system active rescheduling method considering the dispatchable plug-in electric vehicles and intermittent renewable energies. *Applied Energy*, 314, 118715. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118715>

