TEEGES

Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article (2022) 1(4):25-49

Recent Challenges and Trends in the Planning and Development of Electric Vehicle Charging Infrastructure

Zohreh Fotouhi[1], *Lecturer*

[1] *Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran*

Abstract:

The use of electric vehicles is expanding as one of the essential solutions to reduce greenhouse gas emissions and save gasoline fuel consumption. Therefore, the modern transportation industry in many countries is changing and evolving under the influence of electric vehicles' economic and environmental benefits. To accelerate the process of this evolution, proper design and development of the charging infrastructure are crucial. In addition, equipping charging stations with renewable energy sources and managing the intermittent nature of the production of these sources can lead to the improvement of environmental goals. The design and development of the charging infrastructure and the increase in electric vehicles bring various challenges to the power and transportation networks. In this regard, it is essential to provide appropriate solutions for various key issues such as congestion management, determining the location and optimal capacity of charging stations, and managing charging demand, considering both networks' requirements. This paper comprehensively discusses the latest achievements and significant developments in this fascinating and rapidly developing research area by introducing the objectives, methods, and data used. By highlighting the existing challenges, we pave the way for revealing research gaps and helping researchers address the problems.

Keywords: Charging infrastructure, Electric vehicle, Power Network, Transportation network

Received: 03 August 2022
Revised: 19 September 2022
Accepted: 22 October 2022
Corresponding Author: Dr. Zohreh Fotouhi, z.fotouhi@gmail.com
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1966838.1044

فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

چالش‌ها و روندهای اخیر در طراحی و توسعه زیرساخت شارژ خودروهای الکتریکی

زهره فتوحی[1]، مربی

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

چکیده: استفاده از خودروهای الکتریکی به‌عنوان یکی از راه حل‌های اساسی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و صرفه جوئی در مصرف سوخت بنزینی رو به گسترش است. لذا صنعت حمل و نقل مدرن در بسیاری از کشورهای جهان تحت تاثیر مزایای اقتصادی و زیست محیطی وسایل نقلیه الکتریکی در حال تغییر و تحول است. به منظور تسریع روند این تحول، طراحی و توسعه مناسب زیرساخت شارژ اهمیت به‌سزایی دارد. علاوه بر این، تجهیز ایستگاه‌های شارژ به منابع انرژی تجدید پذیر و مدیریت ماهیت متناوب تولید این منابع منجر به بهبود تحقق اهداف زیست محیطی می‌شود. طراحی و توسعه زیرساخت شارژ و افزایش تعداد خودروهای الکتریکی چالش‌های مختلفی را برای شبکه برق و شبکه حمل و نقل به همراه دارد. در این راستا ارائه راهکارهای مناسب برای مسائل کلیدی متنوعی همچون مدیریت ازدحام، تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ و مدیریت تقاضای شارژ با درنظرگرفتن شرایط و الزامات هر دو شبکه حائز اهمیت است. در این مقاله، آخرین دستاوردها و پیشرفت‌های عمده در این حوزه تحقیقاتی جذاب و به‌سرعت درحال توسعه را با معرفی اهداف، روش‌ها و داده‌های مورد استفاده به‌طور جامع مورد بحث و بررسی قرارمی‌دهیم. به‌این‌ترتیب با برجسته‌کردن چالش‌های موجود راه را برای آشکارسازی شکاف‌های تحقیقاتی و کمک به محققان در رسیدگی به مشکلات هموار می‌سازیم.

واژه های کلیدی: زیرساخت شارژ، خودروی الکتریکی، شبکه برق، شبکه حمل و نقل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر زهره فتوحی ، z.fotouhi@gmail.com

DOI: http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1966838.1044

CC BY

۱- مقدمه

گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی ناشی از تولید گازهای گلخانه ای به شدت بر محیط زیست و زندگی بشر بر روی زمین تأثیر می‌گذارد[۱]. بخش حمل و نقل حدود ۳۷ درصد از انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت فسیلی را به خود اختصاص می‌دهد[۲]. لذا این بخش یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه ای به‌ویژه در شهرهای بزرگ و متراکم است[۳, ۴]. گرچه بخش حمل و نقل بیشتر تحت تأثیر همه‌گیری کووید-۱۹ قرار گرفته‌است، با این وجود همچنان انتظار می‌رود که افزایش تقاضا و محدود ماندن مصرف سوخت‌های جایگزین باعث افزایش روند انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص در اقتصادهای در حال توسعه و نوظهور شود.

هم‌اکنون الکتریکی‌کردن ناوگان حمل و نقل به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم بسیاری از دولت‌ها برای مقابله با بحران انرژی و آلودگی هوا می‌باشد. در این راستا فروش سالانه خودروهای الکتریکی به‌ویژه در چین، اروپا و آمریکای شمالی به دلیل مزایای زیست محیطی، سیاست‌های تشویقی دولت‌ها و پیشرفت صنعت ساخت باطری و فناوری نیروی محرکه الکتریکی رشد قابل توجهی دارد[۵, ۶]. بنابر گزارش آژانس بین المللی انرژی (IEA) [۱] علی‌رغم رکود جهانی ناشی از بیماری همه‌گیر کووید-۱۹ در فروش خودرو، نرخ فروش خودروهای الکتریکی در سال ۲۰۲۱ بیش از دو برابر شد و به ۶.۷ میلیون رسید که نزدیک به ۹ درصد از فروش جهانی خودرو را شامل می‌شود. همچنین یکی از اهداف این آژانس و کمپین EV30@30 برای کاهش ۲۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰، افزایش ۳۰ درصدی سهم بازار فروش انواع خودروهای الکتریکی تا سال ۲۰۳۰ است[۷, ۸].

رشد سریع استفاده از خودروهای الکتریکی و ترویج آسان‌تر آن‌ها در بین مصرف‌کنندگان مستلزم طراحی و توسعه فراگیر زیرساخت شارژ قابل دسترس و عملی است[۹]. مسائل متعدد و متنوعی در طراحی و توسعه زیرساخت شارژ مطرح می‌شوند. به‌عنوان مثال، استقرار ایستگاه‌های شارژ در مکان‌ها و فواصل مناسب به حل مشکل ترس رانندگان از دسترسی به خدمات شارژ[۲] کمک می‌کند. به‌این‌ترتیب رانندگان می‌توانند به سهولت برای شارژ مجدد خودرو به ایستگاه‌ها دسترسی پیدا کنند. همچنین استفاده از روش‌های شارژ هوشمند و هماهنگ شده و سیاست‌های تشویقی تغییر رفتار شارژ رانندگان منجر به کاهش زمان انتظار آن‌ها برای دریافت خدمات شارژ، کاهش ازدحام بر حسب معیار احتمال مسدود شدن از سرویس و افزایش کیفیت سرویس در ایستگاه‌های شارژ عمومی و سریع می‌شود[۱۰, ۱۱]. علاوه بر این شارژ همزمان تعداد زیادی از خودروهای الکتریکی قابلیت اطمینان شبکه برق را کاهش می‌دهد و باعث ناپایداری ولتاژ و افزایش اتلاف توان می‌گردد[۱, ۱۲, ۱۳]. لذا استفاده از روش‌های شارژ هوشمند و زمان‌بندی شارژ برای غلبه بر این تأثیرات مخرب نیز حائز اهمیت است. تمامی این مسائل حاکی از آن است که زیرساخت شارژ تحت تأثیر تعاملات بین شبکه جاده ای و شبکه توزیع برق است که روند برنامه‌ریزی و توسعه ایستگاه‌های شارژ را با چالش‌ها و پیچیدگی‌های متعددی همراه می‌کند. علاوه بر این سرمایه‌گذاران زیرساخت شارژ به دنبال طرح‌های توسعه سودآور ایستگاه‌ها می‌باشند. البته مدیریت شارژ و ازدحام ایستگاه‌ها می‌تواند راه را برای استفاده حداکثری از امکانات موجود ایستگاه و افزایش سود اپراتور ایستگاه فراهم کند.

پذیرش استفاده از خودروهای الکتریکی تحت تأثیر نگرش رانندگان از یک سو و سرمایه‌گذاران زیرساخت شارژ از سوی دیگر همچنان با مشکل مواجه می‌شود که می‌توان آن را با نظریه "مرغ یا تخم مرغ" تفسیر کرد[۱۴]. از یک طرف رانندگان منتظر تحقق زیرساخت مناسب شارژ هستند تا از دستیابی به خدمات شارژ با حداقل تأخیر اطمینان حاصل کنند. از طرف دیگر سرمایه‌گذاران زیرساخت شارژ در انتظار افزایش مناسب تعداد خودروهای الکتریکی موجود در جاده‌ها می‌باشند تا کسب و کار آن‌ها سودآور شود. برای حل این مشکل، علاوه بر رفع چالش‌های ذکر شده، سیاست‌های دولت و بهبود تکنولوژی ساخت خودروها، باطری‌های الکتریکی و شارژکننده‌ها برای فراهم‌کردن اطمینان خاطر رانندگان نقش بسیار مهمی دارند[۱۵].

همگام با افزایش سریع تقاضای بار خودروهای الکتریکی و نیاز به افزایش تعداد شارژکننده‌ها در سطح شبکه برق، بسیاری از مراکز تحقیقاتی و شرکت‌های تأمین انرژی کاهش فشار بر شبکه‌های برق محلی را به‌طور جدی درنظر گرفته اند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و خورشید در ایستگاه‌های شارژ یکی از موثرترین راه حل‌ها برای تأمین کمبود انرژی شبکه‌های برق محلی می‌باشند[۱۶]. به‌ویژه، استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی در شبکه قدرت می‌تواند با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی درنیروگاه‌های تولید برق به بهبود محیط زیست کمک کند[۱۷]. لذا ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای توسعه‌یافته در چند سال اخیر به سرعت در حال افزایش است[۱۸]. با این حال عدم‌قطعیت منابع تجدیدپذیر (به‌عنوان مثال، تغییرات فصلی در سرعت باد و تابش

خورشید و تصادفی بودن روزانه در پوشش ابر برای پنل‌های خورشیدی) توأم با ویژگی‌های بار خودروهای الکتریکی متأثر از مشخصات و ظرفیت باطری خودروها و رفتار شارژ رانندگان (شامل زمان توقف، زمان شروع شارژ و وضعیت سطح اولیه شارژ باطری) چالش‌های جدی برای تحقق زیرساخت شارژ می‌باشند.

هدف این پژوهش معرفی چالش‌های مهمی است که در حال حاضر در زمینه طراحی و توسعه زیرساخت شارژ خودروهای الکتریکی از دیدگاه شبکه برق و شبکه حمل و نقل در پیش روی محققین قرار دارند و در تحقیقات اخیر کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به این منظور ابتدا رویکردهای ارائه شده در زمینه‌های مدیریت ازدحام ایستگاه از دیدگاه شبکه توزیع برق و شبکه حمل و نقل، تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ و مدیریت بار شارژ ایستگاه به‌طور جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نقاط قوت و ضعف این رویکردها برشمرده می‌شود و شکاف‌های تحقیقاتی موجود معرفی می‌شوند تا راهگشای ادامه مسیر پژوهش باشد. بخش‌های بعدی این مقاله به شرح زیر است:

ابتدا در بخش ۲ چالش‌های طراحی و توسعه زیرساخت شارژ با معرفی اهداف و شاخص‌های قابل‌توجه شبکه برق و شبکه حمل و نقل معرفی می‌گردد. مدیریت ازدحام ایستگاه شارژ از دیدگاه هر دو شبکه در بخش ۳ با مروری بر پژوهش‌های این حوزه بررسی می‌شود. سپس اهداف، رویکردها و نتایج تحقیقات اخیر در زمینه مکان‌یابی و تعیین ظرفیت ایستگاه در بخش ۴ به‌طور جامع بررسی می‌شود. بخش ۵ مقاله به بیان روش‌های مطرح در زمینه مدیریت تقاضای شارژ ایستگاه و برشمردن مزایا و معایب آن‌ها اختصاص دارد. در بخش ۶ رویکردهای پیشنهادی تحقیقات اخیر مورد بحث قرار می‌گیرد و با مشخص‌کردن مشکلات موجود، رهنمودهایی برای ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود. مقاله در بخش ۷ نتیجه گیری می‌شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق انواع وسائل نقلیه الکتریکی دارای باطری[۳](BEV) و وسائل نقلیه الکتریکی قابل اتصال[۴] (PEV) با عنوان "خودروی الکتریکی[۵]" اطلاق می‌شود. همچنین در بخش‌های بعدی از کلمه " ایستگاه" به‌عنوان جایگزینی برای عبارت "ایستگاه شارژ" استفاده می‌شود.

۲- چالش‌های طراحی و توسعه زیرساخت شارژ

طراحی و توسعه زیرساخت شارژ شامل موضوعات متنوعی است که با درنظر گرفتن معیارهای مختلف از دیدگاه شبکه قدرت، شبکه حمل و نقل، یا احتساب تعاملات این دو شبکه مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته اند. از دیدگاه محققان در حوزه سیستم‌های قدرت توزیع بهینه ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی برای حداقل‌کردن تأثیر بارهای ناشی از شارژ آن‌ها بر شبکه توزیع و در عین حال پوشش تقاضای کل بار حائز اهمیت است. همچنین به دلیل ماهیت بسیار تصادفی بار خودروهای الکتریکی سیار که باعث عدم‌قطعیت عملکردی در شبکه قدرت می‌شود، لازم است زیرساخت شارژ به نحوی تجهیز شود که تقاضای بار ایستگاه‌ها کنترل گردد و الزامات کیفیت توان در سطح کلان اعمال شود[۱۹]. علاوه بر این پیشرفت تجهیزات و ادوات شارژ نیازمند بهبود کارایی سیستم‌های الکترونیک قدرت است. تحقیقات در حوزه صنعت حمل‌ونقل بر حداقل‌کردن هزینه ساخت ایستگاه توأم با قابلیت دسترسی آسان و تأمین تقاضای شارژ با در نظر گرفتن رفتار شارژ و سفر رانندگان و محدودیت‌های اعمال‌شده از سوی کاربر یا شبکه جاده‌ای متمرکز است. از دیدگاه شبکه حمل ونقل معیارهای آماری دراز مدتی همچون زمان انتظار مشتریان برای دسترسی به خدمات شارژ و درصد مشتریان پذیرش شونده در ایستگاه ارزیابی می‌شود[۲۰].

طراحی و توسعه زیرساخت شارژ تأثیرات قابل توجهی بر الگوهای مصرف برق و ترافیک جاده‌ای دارد. افزایش ترافیک خودروهای الکتریکی که بر حسب زمان و مکان جغرافیایی متغیر است، الگوی مصرف برق را به نحوی تغییر می‌دهد که خطر تحمیل اضافه بار بر شبکه برق را افزایش می‌دهد. فشار اضافی ناشی از افزایش بار شارژ خودروها بر شبکه برق می‌تواند به اشکال مختلف ظاهر شود، مانند اضافه بار ترانسفورماتورها و خطوط برق، افزایش تلفات سیستم، انحرافات ولتاژ و عدم تعادل فاز[۲۱-۲۳]. از سوی دیگر استقرار شارژکننده‌ها باعث جذب ترافیک اضافی به مناطق خاص و افزایش زمان جستجو برای پارک و شارژ در مناطق شهری می‌شود. لذا طراحی و توسعه زیرساخت شارژ مستلزم در نظرگرفتن ملاحظات هر دو شبکه برق و حمل و نقل است[۲۴]. البته در نظر گرفتن تعاملات بین دو شبکه توزیع برق و حمل و نقل باعث پیچیدگی مسائل طراحی ایستگاه می‌شود به‌طوری‌که برخی تصمیمات اتخاذ شده ممکن است از دیدگاه هر دو شبکه مفید واقع نشود. به‌عنوان مثال مکان و ظرفیت زیرساخت شارژ از دید شبکه حمل و نقل بر کیفیت عرضه و راحتی اخذ خدمات شارژ و رفتار سفر رانندگان تأثیر می‌گذارد و البته تأثیرات مخرب بر شبکه برق و هزینه‌های ناشی از آن نیز باید مد نظر قرار گیرد. در بخش‌های بعدی اهداف و معیارهای طراحی و توسعه زیرساخت شارژ از منظر شبکه‌های قدرت و حمل و

نقل معرفی می‌شوند، سپس تحقیقات انجام شده در زمینه‌های مدیریت ازدحام ایستگاه، تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه و مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و نکات برجسته این تحقیقات ذکر می‌گردد.

۲-۱- اهداف و شاخص‌های طراحی و توسعه زیرساخت شارژ از دیدگاه شبکه قدرت

یکی از اهداف اکثر پژوهش‌های انجام شده در مورد طراحی زیرساخت شارژ بررسی تأثیرات مختلف بر شبکه توزیع است. لذا در مسائل طراحی اهدافی همچون به حداقل‌رساندن تلفات کل در شبکه قدرت، به حداقل‌رساندن تلفات اضافه شده بر شبکه ناشی از شارژ خودروهای الکتریکی، حداکثرکردن قابلیت اطمینان شبکه، به حداقل‌رساندن انحراف ولتاژ با اعمال شرط هزینه جریمه دنبال شده‌است[۲۵-۲۹]. در برخی مراجع هدف حداکثرکردن سود حاصل از شارژ خودروها برای اپراتور ایستگاه با کاهش جریمه ناشی از تخطی از محدودیت‌های شبکه قدرت در نظرگرفته می‌شود[۳۰].

نکته قابل توجه دیگر در فرایند طراحی زیرساخت شارژ هزینه‌های تأمین برق است. در این راستا اهدافی همچون حداقل‌کردن هزینه‌های تولید برق نیروگاه‌ها، هزینه‌های مربوط به تقاضای شارژ، هزینه خرید انرژی از بازار برق برای تأمین کل تقاضای ایستگاه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای منابع انرژی توزیع شده و یا حداکثرکردن درآمد حاصل از فروش انرژی درنظر گرفته شده اند. شاخص دیگری که در برخی تحقیقات مد نظر قرار گرفته‌است هزینه‌های پرداختی شارژ توسط راننده است [۳۱-۳۳]. در برخی از تحقیقات هزینه‌های نصب نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و واحدهای ذخیرساز انرژی حداقل می‌شود [۲۶, ۲۸, ۳۴, ۳۵]. البته دربسیاری از مسائل طراحی مجموعه ای از اهداف ذکر شده توأم با هم درنظر گرفته می‌شوند. به‌عنوان مثال پژوهش[۳۶] هزینه‌های تولید منابع توزیع شده موجود در باس‌های شبکه توزیع، هزینه خرید برق از شبکه اصلی و همچنین هزینه مالیاتی انتشار کربن را در نظر می‌گیرد. سایر اهداف از منظر شبکه قدرت شامل حداقل‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری ادوات لازم در مرحله اولیه استقرار زیرساخت شامل هزینه پست، ترانسفورماتور و فیدر و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری اجزا شبکه است. به‌طور نمونه مولفان در[۲۶, ۳۷] هزینه‌های عملیاتی و نگهداری واحدهای تولید پراکنده را با یافتن پیکربندی بهینه زیرساخت شارژ به حداقل می‌رسانند. همچنین می‌توان هزینه ناشی از تخریب ذخیره‌ساز انرژی را به‌عنوان هزینه عملیاتی در نظر گرفت[۳۸].

۲-۲- اهداف و شاخص‌های طراحی و توسعه زیرساخت شارژ از دیدگاه شبکه حمل و نقل

یکی از مهمترین اهداف از دید شبکه حمل و نقل که در بسیاری از پژوهش‌ها در نظر گرفته شده‌است، برآورده‌کردن تقاضای شارژ رانندگان خودروهای الکتریکی و حداکثرکردن میزان پوشش و دسترسی‌پذیری ایستگاه‌ها می‌باشد[۳۱, ۳۲]. در این راستا پژوهش‌های [۳۹, ۴۰] تقاضاهای شارژ خوردروهایی که به دلایل مختلف (مانند محدودیت‌های بودجه و یا هزینه‌های جریمه ناشی از محدودیت‌های شبکه یا محدودیت‌های زمانی صف) سرویس داده نشده اند، به حداقل می‌رسانند. همچنین در برخی از مسائل تعیین محل استقرار ایستگاه به منظور افزایش قابلیت دسترسی خودروهای الکتریکی به ایستگاه در یک مسیر مشخص، هزینه جریمه برای تکمیل نشدن سفر خودرو به دلیل عدم دریافت مناسب خدمات شارژ در نظر گرفته می‌شود[۴۱].

الگوهای سفر و شارژ رانندگان خودروهای الکتریکی عامل مهم دیگری است که در طراحی زیرساخت شارژ مورد توجه محققین حمل و نقل قرار گرفته‌است. در این رابطه معمولا شاخص‌هایی همچون فاصله سفر، انرژی مورد نیاز و زمان سفر برای رسیدن به ایستگاه بعدی و یا تأخیر ناشی از ترافیک جاده ای در نظر گرفته شده و هزینه‌های ناشی از آن‌ها حداقل می‌گردد. چنانچه ایستگاه برای تاکسی یا اتوبوس الکتریکی تدارک دیده شود، می‌توان هزینه ناشی از اتلاف وقت مسافر به دلیل تغییر مسیر خودرو برای اخذ شارژ را نیز لحاظ نمود [۳۳]. عامل قابل توجه دیگر مدت زمان شارژ و مدت زمان انتظار خودرو در ایستگاه برای اخذ خدمات شارژ است[۳۶, ۴۲]. اگرچه مدت زمان شارژ به‌ویژه به ظرفیت ایستگاه وابسته است، اما همچنان نحوه طراحی زیرساخت نیز بر مدت زمان شارژ خودروها موثر است. گرچه در اکثر پژوهش‌ها کاهش دوره زمانی فرایند شارژ را مستلزم بهبود تکنولوژی ساخت شارژکننده‌ها و باطری‌ها می‌دانند ولی رفتار شارژ و سفر رانندگان خودروهای الکتریکی نیز تأثیر قابل توجهی بر مدت زمان سپری شده در ایستگاه برای اخذ خدمات شارژ دارد. در واقع سطح اولیه شارژ باطری خودرو هنگام مراجعه به ایستگاه به رفتار شارژ و سفر راننده بستگی دارد.

۳- مدیریت ازدحام در ایستگاه شارژ

یکی از چالش‌های مهم در طراحی و توسعه ایستگاه‌های شارژ، بروز ازدحام در ایستگاه است. از دید شبکه توزیع ازدحام در ایستگاه شارژ براساس تعداد خودروهایی که همزمان در حال شارژ شدن می‌باشند، مشخص می‌شود و مدیریت ازدحام یعنی مدیریت تعداد خودروهایی که همزمان شارژ می‌شوند و در صورت کنترل نشدن، سطح فلوی شبکه توزیع را به زیر حد آستانه مطلوب تنزل می‌دهند. در واقع ازدحام در شبکه توزیع به معنی تحمل اضافه بار توسط اجزا شبکه یا افزایش ولتاژ از حد مجاز است. اما ازدحام ایستگاه در شبکه حمل و نقل از دید راننده خودرو اهمیت پیدا می‌کند که به مفهوم شلوغ بودن بیش از حد ایستگاه است و می‌تواند زمان انتظار وی را از حد قابل‌قبول افزایش دهد و منجر به ترک ایستگاه و عدم دریافت سرویس شارژ شود. به این ترتیب بروز ازدحام به تکنولوژی مورد استفاده برای شارژکننده و مدت زمان شارژ بستگی دارد. ازدحام در ایستگاه مجهز به شارژکننده‌های کند و متوسط (سطوح ۱و۲ AC) به‌صورت اشغال شدن تمامی شارژکننده‌ها و عدم دسترسی راننده به شارژکننده در زمان و مکان مناسب و در ایستگاه‌های شارژ سریع به‌صورت تشکیل صف انتظار برای اتصال به شارژکننده رخ می‌دهد و موجب نارضایتی رانندگان می‌شود. در برخی از مطالعات انجام شده، مفهوم اخیر همانند بروز ازدحام در نودهای شبکه مخابرات تفسیر شده‌است به‌طوری‌که در مراجعی همچون [۴۳-۴۶] با مدل‌سازی ریاضی ایستگاه به‌صورت یک صف و بررسی معیارهای سیستم صف همچون زمان انتظار و احتمال مسدود شدن سرویس شارژ به این مسئله پرداخته شده‌است. در این مسائل معمولا از انواع روش‌های مدل‌سازی صف همچون مدل ساده پارامتری M/M/s یا مدل‌های ناپارمتری M/G/s یا G/G/s استفاده می‌شود. مزیت مدل‌های ناپارامتری فراهم‌کردن امکان نمایش واقعی‌تر الگوهای زمان ورود و مدت زمان سرویس‌دهی (زمان شارژ) خودروها با توجه به الگوی متغیر ترافیک و رفتارهای متنوع رانندگان است. مدل‌های صف ناپارامتری از داده‌های ورودی مشاهده شده‌استفاده می‌کنند و به‌این‌منظور لازم است یک شبیه‌ساز تقاضا در سیستم صف ادغام شود.

در پژوهش [۴۴] پدیده ازدحام در مسئله طراحی ایستگاه به منظور تضمین سطح قابل قبول کیفیت سرویس (QoS) [۶] برای کاربران نهایی تجزیه و تحلیل می‌شود و برای مدل‌سازی ازدحام شارژ از صف M/G/s و داده‌های واقعی سفر تاکسی‌ها استفاده می‌شود. در [۴۵] یک مدل صف و دو سیاست کنترل ازدحام بر اساس آستانه طول صف خودروها برای ایستگاه‌های شارژ و تعویض باطری پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق هزینه طراحی ایستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و شرایطی مشخص می‌شود که استفاده از هر یک از دو سیاست کنترل ازدحام را سودمند می‌کند. مرجع [۴۳] مسئله تخصیص شارژکننده‌ها به تاکسی‌های الکتریکی در سراسر یک شهر را با رویکرد داده محور مبتنی بر بهینه‌سازی و با هدف به حداقل‌رساندن سرمایه‌گذاری زیرساخت شارژ حل می‌کند. برای توصیف پدیده ازدحام شارژ یک مدل صف M/M/x/s برای تخمین احتمال شارژ تاکسی‌های الکتریکی در مکان‌های اقامت آن‌ها به کار می‌رود. حل مسئله تخصیص شارژکننده با استفاده از رگرسیون و تبدیل لگاریتمی به‌عنوان یک برنامه خطی عدد صحیح (ILP)[۷] فرمول‌بندی می‌شود. این تحقیق ارتباط متبادل[۸] بین نصب تعداد شارژکننده بیشتر در مقابل فراهم‌کردن فضای انتظار بیشتر و تأثیر توان و هزینه شارژکننده بر زمان انتظار را بررسی می‌کند.

محققان در [۴۷] عملکرد یک ایستگاه شارژ سریع را از نظر وضعیت ازدحام و کیفیت خدمات ارائه شده به مشتریان بر حسب زمان انتظار آن‌ها در صف ارزیابی می‌کنند. مدل پیشنهاد شده برای ارزیابی عملکرد ایستگاه مجهز به شارژکننده‌های AC و DC با سطوح توان بالا از دو صف تشکیل می‌شود. مدل پیشنهادی نرخ ورود خودروهای الکتریکی و الگوهای شارژ مجدد را بر اساس طبقه‌بندی مشخصات داده‌های مربوط به مدل‌های مختلف خودروها (به‌ویژه اندازه باطری) و گزینه شارژ انتخابی DC یا AC برای ارزیابی مدل صف در نظر می‌گیرد و میانگین زمان انتظار در هر صف و سود مورد انتظار اپراتور را تعیین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که اگر خودروهای الکتریکی تحت یک سیاست قیمت‌گذاری با نرخ ثابت شارژ شوند، زمان انتظار صف ممکن است در ساعات اوج ترافیک به سطوح غیرقابل قبولی افزایش یابد. اپراتور می‌تولند برای رفع این مشکل و کاهش ازدحام ایستگاه از سیاست قیمت‌گذاری زمان‌بندی‌شده پیشنهادی استفاده کند. بر اساس این سیاست برای آن دسته از خودروهایی که تقاضای شارژی بیش از سطح آستانه انرژی ثابت و مشخص دارند، تنبیه مالی در نظر گرفته می‌شود. نشان داده شده‌است که این روش قیمت‌گذاری در دوره‌های اوج ترافیک منجر به کاهش زمان انتظار صف‌ها و افزایش حاشیه سود اپراتور ایستگاه می‌گردد. بنابراین قیمت‌گذاری هوشمند یکی ابزار موثر و کارامد برای کنترل وضعیت ازدحام ایستگاه است.

جدول (۱) نمونه‌ای از تحقیقات اخیر در زمینه مدیریت ازدحام

مرجع	هدف	روش	داده واقعی
[۴۴]	پیش‌گویی بار براساس تحلیل داده، مسئله مکان‌یابی p-میانگین، تحلیل ازدحام ایستگاه برای تعیین ظرفیت	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط MILP[۱۰] حل‌شده به روش قطعی شاخه و کران، مدل صف M/G/s	داده‌های سفر تاکسی‌های ICEV[۹]
[۴۵]	تحلیل ازدحام ایستگاه برای صف‌های شارژ و تعویض باطری و معرفی دو سیاست کنترل ازدحام وابسته به طول صف	استفاده از مدل صف LB[۱۱] ، محاسبه توزیع آماری طول صف با استفاده از مدل زنجیره مارکوف	-
[۴۳]	تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه تاکسی‌های الکتریکی، مسئله مکان‌یابی مبتنی بر سلول، حداقل‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری و تحلیل ازدحام	مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (ILP) حل‌شده توسط بهینه‌ساز Gurobi	داده‌های سفر تاکسی‌های ICEV مبتنی بر GIS
[۴۷]	تحلیل ازدحام ایستگاه و بررسی تأثیر سیاست قیمت‌گذاری زمان‌بندی شده بر وضعیت ازدحام	تحلیل دو صف M/G/s چندکلاسه برای شارژکننده کند و سریع، کلاس‌بندی براساس اندازه باطری‌خودروها	مشخصات خودروها وشارژکننده‌ها

لازم به ذکر است که در بسیاری از مسائل طراحی ایستگاه برای اعمال محدودیت‌های ظرفیت و زمان انتظار در ایستگاه از مدل‌های صف استفاده می‌شود، درحالی‌که تحقیقات اندکی به مسئله مدیریت ازدحام ایستگاه موجود پرداخته اند. در کنار مطالعات ذکر شده، پژوهش‌هایی که هدف موازنه بار در ایستگاه‌ها، کنترل فرایند شارژ خودروها در ایستگاه و کاهش تقاضای اوج را دنبال می‌کنند، در واقع به اهداف مدیریت ازدحام از دید شبکه توزیع نائل می‌شوند. در بخش‌های بعد روش‌ها و اهداف تحقیقات جدید در حوزه این مسائل کلیدی معرفی می‌گردد. پژوهش‌های منتخب در زمینه مدیریت ازدحام در جدول ۱ با ذکر اهداف، روش و نوع داده مورد استفاده آن‌ها نشان داده شده‌است.

٤- تعیین محل استقرار و اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ

یک چالش کلیدی در برنامه‌ریزی زیرساخت شارژ آینده، یافتن یک مکان جغرافیایی مناسب و اندازه بهینه برای ایستگاه‌های شارژ جدید بر حسب تعداد و نوع شارژکننده‌های ایستگاه است[۴۸] به گونه ای که تقاضای حمل و نقل را برآورده کند و در عین حال از دیدگاه شبکه برق مقرون به صرفه باشد. در نظر گرفتن هر دو دیدگاه با کاهش هزینه‌های کلی از منظر سیستمی و در نتیجه افزایش رفاه اجتماعی، روند استقرار زیرساخت شارژ را تسریع می‌بخشد[۲۴]. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اهداف متنوعی را دنبال می‌کنند، از جمله دسترسی پذیر بودن ایستگاه‌ها و پوشش بهینه تقاضای شارژ، رعایت فواصل مناسب بین مکان نصب ایستگاه‌ها با توجه به رفتار سفر و شارژ رانندگان، توجه به مکان نصب شارژکننده‌ها با توجه به ساختار شبکه توزیع و تعیین ظرفیت مناسب ایستگاه‌ها برحسب تعداد شارژکننده با در نظر گرفتن ملاحظات شبکه توزیع و همچنین برآوردن تقاضای شارژ خودروها، بهینه‌سازی هزینه نصب و راه اندازی ایستگاه‌ها از دیدگاه شبکه برق و حمل و نقل. رسیدن به این اهداف در عین حال به کاهش ازدحام در ایستگاه‌ها نیز کمک می‌کند. عوامل مختلفی بر محل ایستگاه تأثیر می‌گذارند که شامل رضایت‌بخش بودن ارائه خدمات شارژ به مشتریان، ملاحظات اقتصادی اپراتورها، اتلاف برق وسایل نقلیه، ایمنی شبکه برق و ترافیک سیستم حمل‌ونقل [۴۹-۵۱]می‌باشد.

٤-١- انواع روش‌های ریاضی در مسائل تعیین مکان و اندازه ایستگاه

مطالعات انجام شده در زمینه مکان‌یابی ایستگاه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوعی همچون انواع روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح (ILP، MILP، MINLP [۱۲]) و انواع روش‌های فرا ابتکاری همچون الگوریتم‌های ژنتیک (GA, NSGA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO, IPSO)[۱۳] استفاده می‌کنند[۵۲]. در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به دلیل توانایی حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در مدت زمان قابل قبول رواج بیشتری یافته اند [۱۹]. همچنین در این مسائل برای مدل‌سازی تقاضای شارژ از مدل‌های ریاضی متنوع و شناخته شده در مطالعات سیستم‌های حمل و نقل استفاده می‌شود. مدل مکان‌یابی جذب جریان (FCLM)[۱۴]، مدل مکان‌یابی سوخت گیری جریان (FRLM)[۱۵] و مدل تعادل کاربر (UE)[۱۶] که برای حل مسئله تخصیص ترافیک به کار می‌رود[۵۳,

۵۴]، ازجمله رویکردهایی می‌باشند که تقاضا را در قالب جریان‌های ترافیکی در نظر می‌گیرند و معمولاً به داده‌های مبدأ-مقصد و جریان در یک شبکه هدایت‌شده نیاز دارند. هدف این مدل‌ها معمولا قرار دادن ایستگاه‌ها در مکان‌هایی است که جریان ترافیکی عبوری از این ایستگاه‌ها به حداکثر برسد. مدل میانگین p[۱۷] ، مدل مکان‌یابی پوشش مجموعه[۱۸] و مدل مکان‌یابی پوشش حداکثر[۱۹] از جمله روش‌هایی می‌باشند که تقاضای شارژ را به‌صورت یک گره یا یک منطقه در مدل گراف شبکه حمل و نقل مشخص می‌کنند و هدف آن‌ها برآورده‌کردن تقاضای گره‌ها در فضای جغرافیایی مدل شده و تطابق بین مکان‌ها و پروفایل تقاضای ثابت متصل به گره‌ها است. در این مدل‌ها عموماً رفتار شارژ کاربر به روش ساده‌سازی شده ای مدل می‌شود زیرا پروفایل تقاضا ثابت فرض می‌شود. درحالی که تأثیر رفتار ناهمگون شارژ و سفر رانندگان بر تقاضای شارژ را می‌توان با رویکردهای مبتنی بر عامل به خوبی توصیف کرد[۵۵]. روش‌های مدل‌سازی تقاضای مبتنی بر عامل قابلیت نمایش رفتارهای تصادفی عوامل را دارند و حجم زیادی از داده‌های واقعی الگوهای شارژ و سفر رانندگان و مشخصات رانندگان را به کار می‌برند. روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر عامل در مسائل مکان‌یابی ایستگاه‌ها بیشتر برای دستیابی به اهداف شبکه حمل و نقل به کار گرفته شده‌است. همانطور که در بخش قبل ذکر شد، در مسائل طراحی زیرساخت شارژ به منظور اعمال محدودیت‌های ظرفیت بر تقاضای شارژ معمولا از انواع روش‌های مدل‌سازی صف استفاده می‌شود. همچنین در مدل‌های مبتنی بر عامل می‌توان روابط تقاضا و عرضه را به‌عنوان بخشی از یک سیستم صف مدل‌سازی نمود. برای مدل‌سازی شبکه توزیع برق و گنجاندن محدودیت‌های جریان قدرت معمولا از مدل‌های جریان برق بهینه (OPF[۲۰] یا OPF آرامش محدب) استفاده می‌شود.

۴-۲- بررسی اهداف و نتایج تحقیقات اخیر در زمینه مکان‌یابی و تعیین ظرفیت ایستگاه

در این بخش تعدادی از مقالات اخیر در زمینه تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرند و رویکردهای مورد توجه برای حل این گونه مسائل معرفی می‌گردند. مرور این مقالات چالش‌هایی را مشخص می‌کند که کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته اند. این چالش‌ها در بخش۶ مورد بحث قرار می‌گیرند . در بسیاری از پژوهش‌های موجود در زمینه مکان‌یابی ایستگاه از روش‌های مبتنی بر جریان برای مدل‌سازی تقاضا استفاده شده‌است. به‌طور نمونه مسئله مکان‌یابی جذب جریان به‌صورت MINLP در [۵۶] مطرح گردیده است و برای حل آن یک الگوریتم بهینه‌سازی آنتروپی متقابل و همچنین مدل‌سازی مبتنی بر گراف برای مقیاس‌پذیرکردن روش در ساختارهای شبکه ای مختلف پیشنهاد شده‌است که هدف آن حداقل‌کردن هزینه ساخت ایستگاه و هزینه‌های سرمایه‌گذاری دراز مدت برای تنظیم ولتاژ است. راندمان محاسباتی روش پیشنهادی بر روی یک شبکه مصنوعی شامل انطباق یک فیدر آزمایشی شبکه توزیع با ۱۲۳ گره و یک شبکه حمل و نقل ۳۳ گره ای تایید می‌شود. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در [۵۷] برای طراحی زیرساخت شارژ سریع بهینه در مناطق شهری معرفی شده‌است. این مدل مسئله مکان‌یابی سوخت‌گیری جریان را با درنظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت سرویس فرمول بندی می‌کند. از جمله اهداف این مسئله حداقل‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری ادوات شبکه قدرت و حداقل‌کردن هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو از شبکه بالادست است. این رویکرد برای یک سیستم در مقیاس کوچک و یک سیستم در مقیاس بزرگ شامل انطباق شبکه‌های آزمایشی برق و حمل و نقل اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند برای سیستم‌های نیمه‌مقیاس بزرگ، با قابلیت کاهش هارمونیک‌ها و جبران توان راکتیو در شبکه برق مورد استفاده قرار گیرد. در [۵۸] مسئله مکان‌یابی مبتنی بر جریان بهینه زیرساخت شارژ سریع در امتداد یک بزرگراه بر اساس برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و به روش شاخه و کران[۲۱] حل می‌شود. همچنین در این تحقیق از یک مدل تخصیص ترافیک با اعمال محدودیت‌های تعادل جریان استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در این مسئله ورودی‌های جمعیت خودروها، محدوده رانندگی و سطح شارژ باطری خودروها تأثیر قابل توجهی بر نتایج برنامه‌ریزی دارد.

در [۲۵] برای حل مسئله تخصیص زیرساخت شارژ سریع در مناطق مسکونی از بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه با تصمیم‌گیری مبتنی بر رضایت فازی را استفاده می‌شود. این مسئله به‌صورت مدل جذب جریان فرمول بندی شده‌است. به کمک روش پیشنهادی در این تحقیق می‌توان به یک مبادله مناسب بین تلفات توان، انحرافات ولتاژ و تقاضای شارژ برآورده شده دست یافت. نتایج این تحقیق تأثیر عمده انتخاب شعاع سرویس و زمان انتظار بر نتایج برنامه‌ریزی زیرساخت شارژ را نشان می‌دهد. یک مسئله مکان‌یابی سوخت گیری جریان در تحقیق [۳۶] معرفی شده‌است که از یک مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم برای بهینه‌سازی مسیرهای رانندگی خودروهای الکتریکی و زیرساخت شارژ سریع در بزرگراه‌ها استفاده می‌کند. در این مسئله انتخاب مسیرهای متعدد برای سفر بین مبدأ و مقصد امکان پذیر است و با هدف حداقل‌کردن زمان شارژ و در نظرگرفتن جریمه برای زمان طولانی سفر حل‌شده‌است.

نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که مسیریابی مناسب جریان‌های ترافیکی خودروهای الکتریکی رفاه اجتماعی را بهبود می‌بخشد و بهینه‌سازی چندهدفه منجر به مبادله مناسب بین مزایای شبکه برق و راننده خودروی الکتریکی می‌شود.

در مسائل طراحی ایستگاه استفاده از مولدهای انرژی تجدید پذیر هم مورد توجه است. مسئله برنامه‌ریزی بهینه زیرساخت شارژ سریع و نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به‌صورت یک مدل برنامه‌نویسی دو سطحی در[۴۲] فرمول‌بندی شده‌است و توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جایگزین[۲۲] حل می‌شود. یکی از اهداف این مسئله حداقل‌کردن هزینه مورد انتظار خرید سالانه انرژی است که با لحاظ‌کردن درآمد حاصل از فروش مازاد انرژی ایستگاه مشخص می‌شود. پیاده سازی روش در یک مطالعه موردی نشان می‌دهد که با استفاده از یک استراتژی قیمت‌گذاری بهینه می‌توان تقاضاهای شارژ در مکان‌های مختلف را متعادل نمود و به این ترتیب میزان استفاده از زیرساخت شارژ افزایش یافته و زمان‌های انتظار در صف کاهش می‌یابد. این تحقیق ازدحام در شبکه حمل و نقل را نیز مدل کرده است. برنامه‌ریزی ترکیبی زیر ساخت شارژ سریع در حضور نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در[۲۶] مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مسئله ترکیبی از مکان‌یابی جذب جریان و مدل تخصیص ترافیک تعادل کاربر است که به‌صورت برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با خوشه‌بندی k-means فرمول بندی شده و با یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر تجزیه چندهدفه چبی‌چف حل‌شده‌است. این مسئله بهینه‌سازی اهداف متنوعی دارد، همچون حداقل‌کردن هزینه نصب منابع تجدید پذیر و هزینه‌های عملیاتی این منابع ، هزینه‌های مرتبط با ادوات شبکه برق و تلفات کل شبکه قدرت. نتایج شبیه‌سازی توانایی مدل برای دستیابی به مزایای اقتصادی و زیست محیطی را تایید می‌کند. محققین در [۲۷] بهینه‌سازی چندهدفه را برای برنامه‌ریزی مشترک زیرساخت شارژ و تولید منابع بادی توزیع شده در مناطق مسکونی و تجاری پیشنهاد می‌کنند. نتایج ارزیابی مطالعات موردی نشان می‌دهد که این روش تلفات توان و انحرافات ولتاژ را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

دسته دیگری از مسائل طراحی ایستگاه از روش‌های مبتنی بر گره برای مدل‌سازی تقاضای شارژ استفاده کرده اند. پژوهش [۲۸] مسئله مکان‌یابی تعداد p شارژکننده سریع را با هدف حداقل‌کردن فاصله وزن‌دار بین نقاط تقاضا و حداقل‌کردن تلفات کل شبکه توزیع، هزینه ذخیره‌ساز انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری زیرساخت شارژ با رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حل می‌کند. در این طراحی بهینه، زیرساخت شارژ به تولید باد و پنل‌های خورشیدی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی مجهز است. مدل بر روی یک شبکه حمل و نقل با ۲۵ گره منطبق شده بر یک شبکه توزیع با ۳۳ گره آزمایش شده‌است و نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر به افزایش نرخ نفوذ انرژی تجدیدپذیر و بهبود ولتاژ سیستم است. یک مدل مبتنی بر سلول برای تعیین مکان ایستگاه‌ها در [۵۹] معرفی شده‌است که تقاضای بالقوه ایستگاه را برآورده می‌کند و به‌صورت یک مدل MILP با دو هدف شامل حداقل‌کردن هزینه‌های ساخت و تجهیزات ایستگاه و حداکثرکردن کیفیت خدمات، فرمول بندی شده‌است. در این مسئله تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه و ارائه دو نوع خدمات شارژ شامل شارژ سریع و تعویض باطری نیز درنظر گرفته شده‌است. برای حل مسئله، یک الگوریتم تکاملی ترکیبی شامل الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[۲۳] (NSGA) پیشنهادشده‌است که می‌تواند راه‌حل‌های پارتو بیشتر را در زمان بسیار کوتاه‌تر برای نمونه‌های مقیاس بزرگ به‌دست آورد. همچنین نتایج شبیه‌سازی مطالعات موردی مبادله بین هزینه و کیفیت را نشان می‌دهد و مجموعه ای کارآمد از راه حل‌های ممکن به‌دست می‌آورد. مشاهده شده‌است که بهینه‌سازی با هدف هزینه منجر به تعداد کمتر ایستگاه‌ها با ظرفیت متمرکز و نسبت بالاتر ایستگاه‌های شارژ سریع می‌شود. بهینه‌سازی با هدف کیفیت منجر به تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها با ظرفیت غیرمتمرکز و نسبت بالاتری از ایستگاه‌های تعویض باطری می‌شود.

مطالعه دیگری در [۳۱] هدف یافتن مکان بهینه زیرساخت مجهز به شارژکننده‌های آهسته و سریع با نرخ‌های شارژ متفاوت را با مدل پوشش مجموعه تقاضای شارژ در نظر می‌گیرد. مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه به روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر داده‌های GIS با هدف حداقل‌کردن هزینه شارژ حل‌شده‌است و برای بزرگراهی در اطراف شهر پکن شبیه‌سازی شده‌است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که لازم است دولت با سرمایه‌گذاری بیشتر در مراحل اولیه ساخت ایستگاه‌ها، روند گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی را تسریع کند. محققان در [۲۹] به بررسی مسئله طراحی زیرساخت شارژ سریع همراه با مسیریابی بهینه خودروها برای حمل و نقل بار بر مبنای یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط می‌پردازند. مسیریابی بهینه روشی مبتنی بر گره است که با فرض وجود الگوهای تقاضای ثابت اجرا می‌شود. محققان نتیجه می‌گیرند که روش پیشنهادی می‌تواند به تبادل مناسب بین مسیریابی بهینه خودروها، مکان‌یابی بهینه ایستگاه و به حداقل‌رساندن تلفات شبکه توزیع دست یابد.

در [۳۲] برای حل مسئله مکان‌یابی پوشش حداکثر زیرساخت شارژ آهسته و سریع، ترکیبی از دو روش بهینه‌سازی ازدحام جوجه‌ها (CSO)[۲۴]و بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری آموزش (TLBO)[۲۵] به‌صورت چندهدفه را استفاده می‌کند و انتخاب از مجموعه راه حل‌های بهینه پارتو به روش تصمیم‌گیری فازی انجام می‌شود. پژوهش [۶۰] یک مسئله تخصیص زیرساخت شارژ چندهدفه را با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های ناشی از قابلیت V2G[۲۶] و با تکنیک‌های بهینه‌سازی تکامل دیفرانسیلی و شاهین هریس[۲۷] حل می‌کند. اهداف مهم این مسئله حداکثرکردن محدوده سرویس‌دهی ایستگاه و حداقل‌کردن تلفات شبکه برق و انحراف ولتاژ است و برای شارژ خودرو در مناطق مسکونی، سوپرمارکت‌ها و تقاطع‌های جاده‌ای و با توان‌های شارژ مختلف آزمایش می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تغییر توان شارژ تأثیر قابل توجهی بر نتایج تخصیص زیرساخت شارژ ندارد.

تعداد معدودی از مقالات برای حل مسئله تعیین مکان ایستگاه روش‌های مبتنی بر عامل را به کار برده اند. به‌طور نمونه محققین در [۳۳] مسئله استقرار زیرساخت شارژ سریع را برای تاکسی‌های الکتریکی با شبیه‌سازی چند عاملی و به کمک الگوریتم ژنتیک بهبود یافته معرفی کرده اند که تاکسی الکتریکی، ایستگاه شارژ عمومی و گره ترافیک را به‌عنوان عامل‌ها در نظر می‌گیرد. حداقل‌کردن هزینه ناشی از مدت زمان شارژ، مدت زمان انتظار برای دریافت خدمات شارژ در ایستگاه و هزینه زمان سفر برای رسیدن به ایستگاه بعدی از جمله اهداف مهم این مسئله است. نتایج نشان می‌دهد که استراتژی شارژ خرده فروش تأثیر زیادی بر سودآوری زیرساخت شارژ دارد. محققان در [۶۱] مسئله تعیین مکان و اندازه ایستگاه شارژ عمومی درون شهری را با در نظر گرفتن مدل زنجیره سفر مبتنی بر عامل برای نشان دادن الگوهای سفر و شارژ صاحبان خودروهای الکترکی با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل می‌کنند. همچنین برای اعمال تأثیر میزان کاربری زمین بر ماهیت پویا و تصادفی رفتارهای شارژ از روش تقسیم سلولی جغرافیایی استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی یک مطالعه موردی نشان می‌دهد که مقدار تقاضای شارژ سرویس‌دهی شده تا حد زیادی تحت تأثیر رفتار شارژ رانندگان، مکان و محدوده خدمات‌رسانی ایستگاه است و بر سودآوری ایستگاه موثر می‌باشد. علاوه بر این قیمت شارژ عامل مهم دیگری است که بر سودآوری ایستگاه و رقابت بین ایستگاه‌های شارژ عمومی کند و سریع تأثیر می‌گذارد. در جدول ۲ زیرمجموعه ای از مراجع بررسی‌شده در این بخش به‌طورخلاصه گردآوری شده‌اند.

۵- مدیریت و کنترل تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی

افزایش تعداد خودروهای الکتریکی به‌طور قابل‌توجهی بر پروفیل بار الکتریکی سیستم‌های قدرت تأثیر می‌گذارد و تقاضاهای پویا و پیش‌بینی نشده شارژ چالش‌ها و محدودیت‌های جدیدی را در شبکه ایجاد می‌کند. به‌ویژه فرایند شارژ همزمان و کنترل نشده تعداد زیادی خودروی الکتریکی اوج تقاضا در شبکه را افزایش می‌دهد و منجر به بارگذاری بیش از حد شبکه توزیع می‌شود. این اضافه بار بسته به ترکیب سیستم انرژی، نوع شبکه و تعداد خودروها تأثیرات مخربی بر شبکه توزیع محلی دارد[۶۲]. از سوی دیگر افزایش تعداد خودروهای الکتریکی و اضافه بار ناشی از شارژ آن‌ها لزوم افزایش ظرفیت تولید را می‌طلبد. اگر ظرفیت تولید و انتقال برق موجود برای تأمین تقاضای شارژ ایستگاه کافی نباشد، توسعه ایستگاه هزینه زیادی را برای ارتقا سیستم کنونی به صاحب خود تحمیل می‌کند. لذا استفاده حداکثر از ظرفیت موجود ایستگاه توسط راهکارهای کنترل ازدحام ایستگاه و کنترل زمان شارژ خودروها، ارتقاء ظرفیت ایستگاه را به تعویق می‌اندازد به‌طوری‌که سرمایه‌گذاری برای توسعه ایستگاه به مرور زمان متناسب با توسعه تقاضا و با هزینه کمتری انجام خواهد شد. لذا مطالعات متنوعی به پیشنهاد روش‌های مختلف کنترل و هماهنگ‌کردن شارژ خودروها برای حل این مشکلات پرداخته‌اند.

مسئله هماهنگی شارژ بخشی از سیستم مدیریت شارژ (EMS)[۲۸] است که پارامترهای شارژ را کنترل می‌کند و اهداف عملیاتی همچون صاف‌کردن منحنی بار، دریافت عادلانه خدمات شارژ، به حداکثررساندن استفاده کارآمد از توان منابع تجدید پذیر، به حداقل‌رساندن تغییرات ولتاژ ، اجتناب از اضافه بار ترانسفورماتور و یا اهداف مالی را برآورده می‌کند. نمونه‌هایی از اهداف مالی عبارتند از حداقل‌کردن هزینه عملیاتی برای جلب رضایت راننده، به حداقل‌رساندن هزینه شارژ و تلفات توان، به حداکثر رساندن سود اپراتور و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه توزیع [۶۳, ۶۴].

جدول (۲) نمونه‌ای از تحقیقات اخیر در زمینه تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه شارژ

مرجع	هدف	روش	شبیه‌سازی-داده واقعی	تجهیزات
[۲۵]	مکان‌یابی جذب جریان و تعیین اندازه بهینه ایستگاه با در نظرگرفتن تأثیر شعاع خدمات‌رسانی و مدت زمان انتظار	بهینه‌سازی چندهدفه MINLP حل‌شده با الگوریتم فرااکتشافی گرگ خاکستری، مدل‌سازی صف ایستگاه M/M/k با توزیع پواسن ناهمگن‌ورود	شبکه‌های آزمایشی قدرت و حمل و نقل– داده‌های‌ترافیکی ICEV	–
[۴۲]	مکان‌یابی مبتنی بر جریان، تعیین قیمت بهینه شارژ متغیر با زمان همراه با تحلیل ازدحام ایستگاه برای تعیین ظرفیت	برنامه‌نویسی دو سطحی حل‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جایگزین، مدل‌سازی صف M/G/k	شبکه‌های آزمایشی قدرت و حمل و نقل	مولد خورشیدی
[۲۶]	مکان‌یابی جذب جریان با لحاظ‌کردن هزینه عملیاتی و نگهداری منابع توزیع شده و تعیین اندازه ایستگاه	بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای با خوشه‌بندی k-means حل‌شده با الگوریتم تکاملی مبتنی بر تجزیه چندهدفه چبی چف، مدل‌سازی صف M/M/k	شبکه های آزمایشی قدرت و حمل و نقل	مولد خورشیدی و بادی
[۲۸]	تعیین مکان تعداد p شارژکننده با هدف حداقل‌کردن فاصله وزن دار بین نقاط تقاضا	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حل‌شده با بهینه‌ساز CPLEX	شبکه‌های آزمایشی قدرت و حمل و نقل	مولد خورشیدی، بادی و واحد ذخیره‌ساز
[۵۹]	مکان‌یابی مبتنی بر سلول با اهداف حداقل‌کردن هزینه و حداکثرکردن کیفیت خدمات و تعیین اندازه بهینه ایستگاه	بهینه‌سازی MILP دوهدفه حل‌شده با الگوریتم تکاملی ترکیبیNSGA	شبکه حمل و نقل- داده‌های واقعی مسیرهای ترافیکی مبتنی بر GIS	تعویض باطری خودروها
[۳۲]	مکان‌یابی پوشش حداکثر، تحلیل ازدحام و درنظر گرفتن هزینه زمان انتظار و هزینه نصب تجهیزات	ترکیبی از دو روش بهینه‌سازی چندهدفه CSO و TLBO با تصمیم گیری فازی	مطالعه موردی با داده‌های واقعی شبکه‌های حمل و نقل و قدرت	-
[۶۱]	تعیین مکان و اندازه ایستگاه با استفاده از مدل زنجیره سفر مبتنی بر عامل با هدف حداکثرکردن سود سرمایه‌گذاری	بهینه‌سازی MILP و روش تقسیم سلولی جغرافیایی	مطالعه موردی با داده‌های واقعی شبکه حمل و نقل سوئد	-

محققان تا کنون روش‌های متنوع مدیریت انرژی را برای هماهنگ سازی شارژ خودروهای الکتریکی معرفی نموده‌اند که می‌توان آن‌ها را در سه گروه طبقه بندی نمود: مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی، مدیریت انرژی مبتنی بر قانون [۶۵] و مدیریت انرژی مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشین[۶۲, ۶۴, ۶۶]. مدیریت شارژ مبتنی بر بهینه‌سازی محیط را به‌صورت یک مدل ریاضی فرمول‌بندی می‌کنند و تابع هزینه سیستم را معمولا با رویکردهای آفلاین و مبتنی بر پیش‌بینی محاسبه می‌کنند. شیوه مدیریت شارژ مبتنی بر بهینه‌سازی علاوه بر نیاز به دانش قبلی از سیستم، هزینه محاسباتی بالایی دارد. علی الخصوص، این شیوه عدم‌قطعیت‌های بین موجودیت‌های مختلف سیستم، همچون وضعیت شبکه برق، تقاضای سایر خودروهای الکتریکی، زمان ورود و خروج خودروی الکتریکی، وضعیت شارژ باطری، در دسترس بودن شارژکننده‌ها، قیمت برق، ترجیحات شارژ و ماهیت متناوب تولید منابع انرژی تجدیدپذیر، را درنظر نمی‌گیرد.

اخیراً استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین در مدل‌سازی و کنترل زیرساخت شارژ بسیار محبوب شده‌است و محققان اغلب از روش‌های تحلیل پیش‌بینی‌کننده برای حل مسائل مدیریت شارژ خودروها استفاده می‌کنند. استراتژی‌های مبتنی بر یادگیری ماشین بین داشتن یک طرح برخط و دستیابی به راه‌حل بهینه تعادل برقرار می‌کنند[۶۷]. مدل‌های یادگیری ماشین حجم زیادی از داده‌های تاریخی و همچنین طیف گسترده‌ای از متغیرهای مرتبط با داده‌های آب‌وهوا و ترافیک را به‌کار می‌برند تا رفتارهای شارژ را به‌طوردقیق ثبت کنند. درحالی‌که مدیریت چنین حجمی از داده‌ها برای سایر روش‌های مدیریت شارژ چالش برانگیز است [۶۸].

چالش بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی نظارت‌شده و بدون نظارت یادگیری ماشین وابستگی به ماهیت مجموعه داده‌ها است. چنانچه این مدل‌ها برای مجموعه داده‌های متعلق به مکان خاصی آموزش ببینند، قابل تعمیم برای داده‌های سایر مکان‌ها نمی‌باشند. لذا استفاده از

تکنیک‌های یادگیری تقویتی (RL)[۲۹] و یادگیری تقویتی عمیق (DRL[۳۰]) در محیط‌های پویا توصیه می‌شود. در یادگیری تقویتی عامل یادگیرنده از محیط و اعمال قبلی آموزش می‌بیند بدون آن‌که به مدلی از محیط نیاز داشته باشد و از روش آزمون و خطا برای انتخاب بهترین اعمال با هدف حداکثرنمودن پاداش تجمعی استفاده می‌کند. یادگیری تقویتی عمیق از تلفیق روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی حاصل می‌شود که می‌تواند قدرت یادگیری این روش برای تعیین برنامه‌های زمانی برخط شارژ خودروهای الکتریکی را به‌ویژه به دلیل قابلیت تعامل عامل یادگیرنده با تغییرات زمان واقعی قیمت برق افزایش دهد.

۵-۱- انواع روش‌های کنترل شارژ خودروهای الکتریکی

یکی از مطرح‌ترین روش‌های کنترل شارژ خودروهای الکتریکی در تحقیقات موجود شارژ هوشمند است. سیستم شارژ هوشمند با مدیریت مجموعه‌ای از پارامترها از طریق برقراری ارتباط و تبادل داده بین خودروهای الکتریکی، ارائه‌دهنده خدمات و اپراتور ایستگاه، عملیات شارژ را خودکار می‌کند به‌نحوی که برای تمامی آن‌ها منفعت حاصل شود[۶۲]. برای سهولت دستیابی به مزایای حاصل از شارژ هوشمند معمولا از قیمت‌گذاری پویا استفاده می‌شود. در قیمت‌گذاری پویا ارائه‌دهنده خدمات شارژ که معمولا یک اپراتور سیستم توزیع یا یک اپراتور ایستگاه است، قیمت انرژی را به‌طور پویا مطابق با تغییرات شرایط عملیاتی شبکه تغییر می‌دهد. به‌عنوان مثال، قیمت‌های شارژ در دوره‌هایی که تولید انرژی هزینه زیادی دارد، همانند ساعات اوج مصرف، افزایش داده می‌شود. همچنین قیمت‌گذاری پویای شارژ امکان استفاده از انعطاف‌پذیری رانندگان ناشی از کنترل رفتار آن‌ها را فراهم می‌کند[۶۳]. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، شارژ هوشمند و مشوق‌های طراحی شده برای کاربر، مانند قیمت‌گذاری پویا، را دو عامل کلیدی برای فراهم‌کردن پتانسیل انعطاف‌پذیری شارژ خودروهای الکتریکی می‌داند، که برای گسترش موفقیت‌آمیز استفاده از آن‌ها و انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده مورد نیاز است[۶۹]. انعطاف‌پذیری رانندگان به معنای قابلیت جابه‌جایی و تنظیم به موقع تقاضای شارژ آن‌ها به‌منظور متعادل‌کردن بار، محدودکردن اوج‌های پروفایل تقاضا و حداکثرکردن استفاده از توان متغیر منابع تجدیدپذیر است[۶۵, ۷۰, ۷۱]. همچنین تأمین‌کنندگان انرژی می‌توانند با استفاده از شارژ هوشمند و فناوری خودرو به شبکه (V2G) سود خود را در بازارهای مبادله انرژی و خدمات جانبی افزایش دهند[۷۲]. در فناوری V2G مازاد انرژی تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر در باطری خودرو ذخیره می‌شود و این شارژ اضافی در طول ساعات اوج تقاضای انرژی به شبکه تزریق و فروخته می‌شود. همچنین V2G برای ارائه خدمات جانبی همچون پیک سایی و ذخیره چرخشی به کار می‌رود[۱۸, ۷۳].

در پژوهش‌های موجود رویکردهای کنترل شارژ از منظرهای مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. محققان در [۷۴] استراژی‌های کنترل شارژ را در سه نوع زمان‌بندی، خوشه‌بندی و پیش‌بینی بار شارژ مورد بررسی قرارداده اند و نقاط قوت و ضعف هر روش را شرح داده اند. تمرکز اصلی این تحقیق بر شیوه‌های متداول زمان‌بندی شارژ با اهداف بهینه‌سازی مانند صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش پیک، استفاده بهتر از ظرفیت شبکه و مشارکت در بازار است. زمان‌بندی مناسب برای شارژ خودروی الکتریکی می‌تواند پایداری شبکه برق را حفظ کرده و تعادل بین عرضه و تقاضای برق را تضمین کند. همچنین خدمات V2G را از طریق برنامه‌ریزی هماهنگ امکان پذیر می‌کند[۷۵]. چالش‌های بالقوه روش‌های زمان‌بندی نیاز به زیرساخت ارتباطی مناسب در سراسر شبکه برق و رفع مشکلات امنیتی حاصل از بهره برداری از اطلاعات خصوصی ذکر شده‌است.

استراتژی خوشه‌بندی یک روش داده کاوی بدون نظارت است که برای تحلیل منحنی‌های بار شارژ، پروفایل‌های بار روزانه مرتبط را در خوشه‌های مشابه گروه‌بندی می‌کند. الگوریتم‌های خوشه‌بندی پروفایل‌های بار را با بررسی شباهت رفتارهای مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کنند. مطالعات خوشه‌بندی در فرآیند ارزیابی پروفایل بار اغلب همراه با استفاده از معیارهای آماری پیشنهاد شده‌است. نتایج حاصل از ارزیابی پروفایل بار با روش خوشه بندی معمولا برای ناحیه جغرافیایی مشخصی معتبر است و قابل تعمیم به نواحی دیگر نیست[۷۶, ۷۷]. همچنین روش‌های پیش‌بینی بار و شناسایی الگوی شارژ خودروهای الکتریکی بر مبنای روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی بررسی شده‌اند و مشکل مقیاس‌پذیری این روش‌ها ذکر گردیده است[۴۹, ۷۸, ۷۹].

در اکثر مطالعات استراتژی‌های هماهنگی شارژ بسته به نوع اطلاعات موجود و قابلیت‌های ارتباطی بین خودروها و شبکه قدرت به انواع متمرکز و غیرمتمرکز تقسیم شده‌است[۸۰]. در استراتژی متمرکز، یک واحد مرکزی به نام تجمیع‌کننده اطلاعاتی در مورد شبکه، تولید برق و شارژ خودروها جمع‌آوری می‌کند تا در مورد زمان شارژ و تخلیه ناوگان خودروها و سطوح قیمت انرژی تصمیم بگیرد. داده‌هایی که از کاربران جمع‌آوری می‌شود شامل مکان و مشخصات سفر خودروهای الکتریکی، سطح شارژ باطری خودروها، زمان‌های حرکت

پیش‌بینی‌شده و سایر مشخصات شارژ است[۸۱]. استراتژی غیرمتمرکز یک استراتژی شارژ توزیع شده‌است که در آن هر راننده به‌صورت استراتژیک رفتار می‌کند و تصمیم می‌گیرد چه زمانی باطری را شارژ کند تا هزینه‌های شارژ خود را حداقل کند، با فرض اینکه کنترل‌کننده مرکزی وجود نداشته باشد. توان و زمان شارژ با توجه به پارامترها و معیارهای بهینه‌سازی مربوط به رانندگان انتخاب می‌شود و هر خودروی الکتریکی پیشنهادات خود را فرموله می‌کند و تجمیع‌کننده صرفاً نقش تجمیع این پیشنهادات را دارد. در روش هماهنگی غیرمتمرکز، مشوق‌های مالی مستقیماً توسط ارائه دهنده انرژی (DSO)[۳۱] یا تجمیع‌کننده با دسترسی توأم به ایستگاه‌های شارژ و بازار انرژی تنظیم می‌شود. هماهنگی متمرکز فرایند شارژ به دلیل عدم مقیاس پذیری، نیاز به آگاهی از رفتار کاربر و نیازهای محاسباتی بالا با چالش مواجه می‌شود. در مقابل استراتژی‌های غیرمتمرکز مقیاس‌پذیر می‌باشند اما به پیش‌بینی دقیق واکنش رانندگان نیاز دارند. لذا در محیط بسیار پویای ایستگاه‌ها شارژ با مشکل عدم‌قطعیت موجودیت‌ها مواجه می‌شوند. اکثر محققان برای کاهش هزینه‌های سیستم از روش‌های مدیریت غیرمتمرکز یا ترکیبی (متمرکز-غیرمتمرکز) استفاده می‌کنند.

۵-۲- بررسی اهداف و نتایج تحقیقات اخیر در زمینه مدیریت شارژ

در این بخش نمونه‌هایی از مطالعات اخیر در زمینه مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخی از تحقیقات از روش‌های احتمالاتی برای زمان‌بندی بار شارژ استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال مسئله مدیریت انرژی بهینه یک ریزشبکه مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر (RMG)[۳۲] در حضور خودروهای الکتریکی در [۸۲] مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مطالعه فرض می‌شود که RMG پیشنهادی به یک پارکینگ به منظور کنترل و تجمیع خودروهای الکتریکی مجهز شده‌است. برای حل مسئله یک روش زمان‌بندی شارژ متمرکز با استفاده از مدل تصادفی مبتنی بر سناریو پیشنهاد شده‌است. در این مسئله هدف مالک ریزشبکه به حداقل‌رساندن هزینه از طریق تولید برق با ژنراتورهای محلی خود و تجارت انرژی با بازار برق با توجه به قیمت بازار است. همچنین، ریزشبکه مالکان خودروها را تشویق می‌کند تا در برنامه‌های پاسخ به تقاضا[۳۳] به‌عنوان یک بار انعطاف‌پذیر شرکت کنند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌است که روش زمان‌بندی پیشنهادی هزینه ریزشبکه را با بهره‌برداری از پارکینگ کاهش می‌دهد و اجرای برنامه پاسخ تقاضا در طول فرآیند شارژ خودروها به‌طور موفقیت‌آمیزی سود صاحبان RMG و خودرها را افزایش می‌دهد.

استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در مسائل زمان‌بندی بار اخیرا بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. یک روش زمان‌بندی غیرمتمرکز مبتنی بر یادگیری ماشین نظارت شده در [۸۳] برای یک ایستگاه شارژ واقع در محوطه یک پارکینگ عمومی ارائه شده‌است. در این روش ترکیبی از الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)[۳۴] و الگوریتم‌های جستجوی محلی وام گرفته شده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهبود عملکرد به کار می‌رود. هدف اصلی این روش برآوردن تقاضای شارژ رانندگان و در عین حال استفاده بهینه از توان تخصیص یافته به ایستگاه است. پیچیدگی محاسباتی قابل قبول این روش امکان استفاده از آن را برای زمان‌بندی برخط در یک شبکه قدرت با مقیاس کوچک فراهم می‌کند. مدیریت انرژی مبتنی بر قانون (REMS)[۳۵] شیوه متداول دیگری است که در [۶۵] برای شارژ خودروی الکتریکی در ایستگاه متصل به شبکه و مجهز به پنل خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی معرفی شده‌است. در این طرح مدیریت جریان انرژی بین پنل خورشیدی، واحد ذخیره‌ساز انرژی و شبکه طبق قوانین تعریف شده در REMS صورت می‌گیرد و ارائه شارژ روزانه بدون وقفه با قیمت ثابت تضمین می‌شود. همچنین عملیات پرکردن دره در ساعات غیر اوج مصرف شبکه توسط واحد ذخیره‌ساز و خودروهای الکتریکی همراه با فروش مازاد انرژی خورشیدی به شبکه برای جبران خسارات اقتصادی سیستم اجرا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی کاهش قیمت شارژ و بار شبکه در این طرح را نسبت به فرایند شارژ استاندارد شبکه نشان می‌دهد.

راستای دیگر پژوهش‌های اخیر استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و تجزیه تحلیل آماری برای مدل‌سازی رفتار راننده خودروی الکتریکی بر اساس مجموعه داده‌های تاریخی شارژ است که به‌عنوان یک پیش نیاز مهم برای مدل‌سازی بار و مدیریت شارژ مطرح می‌شود. به‌طور نمونه در تحقیق [۷۶] یک رویکرد ترکیبی شامل خوشه‌بندی K-Means و پرسپترون چند لایه به‌عنوان روش موثری برای در نظر گرفتن عدم‌قطعیت رفتاری رانندگان در پیش‌بینی بار و مدیریت هوشمند انرژیِ خودروهای الکتریکی ارائه شده‌است. نتایج تجربی و ارزیابی عملکرد الگوریتم نشان می‌دهد که تکنیک پیشنهادی برای انواع مختلف زمان‌بندی کنترل شارژ قابل استفاده است. روش پیشنهادی برچسب‌گذاری مجموعه داده را به یک فرآیند خودکار تبدیل می‌کند که می‌توان از آن در کنار کنترل بلادرنگ استفاده کرد زیرا با پیوستن هر کاربر جدید به شبکه شارژ نیازی به انجام خوشه‌بندی مجدد نمی‌باشد. در یک مطالعه دیگر [۷۷] الگوریتم نقشه ویژگی خودسازماندهی(SOM) [۳۶] برای خوشه‌بندی خودکار پروفایل‌های مختلف بار معرفی شده‌است. در این روش ناهمگونی رفتار

رانندگان از منظر ویژگی‌هایی همچون توزیع مسافت طی شده در طول روز، زمان شروع شارژ، تعداد دفعات شارژ در روز، مسافت طی‌شده بین شارژهای متوالی، سطح شارژ باطری قبل و بعد از شارژ و تقاضای برق در طول روز بررسی می‌شود. نتایج تجربی برای داده‌های منطقه‌ای در پکن به دست آمده است که قابل‌تعمیم به سایر مناطق نمی‌باشد. به‌عنوان مثال رانندگان خودروها رفتارهای شارژ محافظه‌کارانه‌ای دارند که منجر به فواصل کوتاه مدت بین رویدادهای شارژ متوالی می‌شود و تعداد قابل توجهی از رانندگان خودروی خود را در طول روز شارژ می‌کنند.

جنبه قابل توجه دیگر در تحقیقات مرتبط با مدیریت شارژ، پیش‌بینی بار با استفاده از یادگیری ماشین و روش‌های احتمالاتی است. محققان در[۷۸] برای پیش‌بینی کوتاه مدت بار شارژ اتوبوس‌های الکتریکی استفاده از یک شبکه عصبی موجک (WNN)[۳۷] را پیشنهاد می‌کنند. ابتدا برای بررسی تأثیر عوامل خارجی مختلف همچون مانند آب و هوا و سیاست بر مصرف برق اتوبوس‌های الکتریکی از روش تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری (GRA) [۳۸] استفاده می‌شود و سپس مدل پیش‌بینی مصرف توان با آموزش شبکه عصبی موجک برای عوامل مصرف انرژی به کمک داده‌های مرتبط ایجاد می‌شود. با استفاده از این پیش‌بینی، یک مدل شارژ بهینه نیز برای اتوبوس‌های الکتریکی ارائه شده‌است که هزینه عملیاتی شرکت اتوبوس‌رانی را حداقل می‌کند. در مطالعه انجام شده در[۷۹] رویکرد برنامه نویسی تصادفی دو مرحله ای برای پیش‌بینی میان‌مدت بار شارژ خودروهای الکتریکی و طراحی شبکه ایستگاه شارژ عمومی موجود در محوطه پارکینگ معرفی شده‌است که برای حل آن از روش تقریب میانگین نمونه استفاده می‌شود. در این روش عدم‌قطعیت‌های مربوط به زمان ورود به ایستگاه، مدت زمان توقف در ایستگاه، سطح شارژ باطری در زمان ورود، اولویت شارژ رانندگان و الگوهای تمایل به راه رفتن در برآورد تقاضای ایستگاه در نظر گرفته شده‌است. در این مسئله مسافت پیاده‌روی راننده تا مقصد نهایی به‌عنوان عامل تعیین‌کننده در انتخاب پارکینگ در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول بر اساس ترجیح راننده در مورد طول مسافت مجاز برای پیاده‌روی، مجموعه‌ای از پارکینگ‌های احتمالی تعیین می‌شود که راننده می‌تواند خودروی الکتریکی را پارک نموده و از شارژکننده موجود در پارکینگ استفاده کند. در مرحله دوم راننده به‌طور تصادفی به یکی از پارکینگ‌ها اختصاص داده می‌شود. اگر در هر یک از پارکینگ‌هایی که در فاصله پیاده‌روی راننده قرار دارند شارژکننده‌ای نصب شده باشد و در زمان ورود خودرو در دسترش باشد، راننده به یکی از آن پارکینگ‌ها جذب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که روش پیشنهادی پذیرش پیش‌بینی‌شده رانندگان به شبکه شارژ عمومی را به حداکثر می‌رساند ولی برای مسائل طراحی و زمان‌بندی ایستگاه در مقیاس بزرگ به دلیل هزینه محاسباتی بالا مناسب نیست.

در مطالعات اخیر الگوریتم‌های یادگیری تقویتی در زمینه مدیریت شارژ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. محققین در [۸۴] از الگوریتم زمان‌بندی مبتنی بر یادگیری Q[۳۹] برای کنترل عملیات شارژ و تخلیه خودروهای الکتریکی در یک شبکه هوشمند که از فناوری V2G پشتیبانی می‌کند، استفاده می‌کنند. زمان‌بندی خودروهای الکتریکی به‌ویژه همراه با استفاده از قابلیت V2G حائز اهمیت است زیرا مدیریت هوشمند شارژ و تخلیه بر اساس قیمت‌های بلادرنگ و نیازهای مالکان را امکان‌پذیر می‌کند و هزینه انرژی خودروها کاهش می‌یابد. یادگیری Q نسخه پیشرفته الگوریتم SARSA می‌باشد که بدون مدل است به این معنا که الگوریتم به هیچ مدل تصادفی فرضی از رویدادهای نامشخص متکی نیست. الگوریتم یادگیری Q مجموعه ای از حالات، مجموعه ای از اعمال و مجموعه ای از جفت‌های حالت-عمل را تعریف می‌کند، برای انتخاب عمل در هر حالت از الگوریتم Epsilon-Greedy استفاده می‌کند و بر این اساس مقادیر حالت و مقادیر زوج حالت-عمل را برای رسیدن به یک خط مشی بهینه مطلق به روز می‌کند. عامل یادگیرنده تابع پاداش را براساس داده‌های قیمت‌گذاری در دنیای واقعی حداکثر می‌کند[۸۵]. در این تحقیق تابع پاداش با هدف به حداقل‌رساندن هزینه شارژ و افزایش رفاه راننده خودرو طراحی شده‌است. اگرچه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش زمان‌بندی پیشنهادی هزینه انرژی راننده را تا یک سوم هزینه روش شارژ کنترل نشده کاهش می‌دهد ولی همچنان الگوریتم یادگیری Q برای کار بر روی فضای حالت با ابعاد بالا و گسسته‌سازی فضای حالت و فضای عمل دچار مشکل می‌شود.

در برخی از پژوهش‌ها از یادگیری تقویتی عمیق به‌عنوان نسخه توسعه یافته یادگیری Q برای حل مشکل ابعاد بالای فضای حالت و فضای عمل استفاده می‌شود. شبکه عمیق Q یا DQN [۴۰] نوعی از یادگیری تقویتی عمیق است که عامل یادگیری آن از شبکه‌های عصبی عمیق به‌عنوان تقریبگر تابع استفاده می‌کند و به کمک آن مجموعه ای از ارزش‌های عمل را برای هر حالت مشخص می‌کند. همچنین برای اعمال یادگیری تقویتی در فضای عمل پیوسته ترکیبی از الگوریتم گرادیان خط مشی قطعی DPG[۴۱] و الگوریتم DQN استفاده می‌شود که با نام گرادیان سیاست قطعی عمیق DDPG [۴۲] شناخته می‌شود[۸۶].

یک الگوریتم مبتنی بر DQN برای زمان‌بندی شارژ و تخلیه یک خودروی الکتریکی در پاسخ به قیمت ساعتی برق در[۸۷] معرفی شده‌است. روش پیشنهادی از تخمین چگالی هسته (KDE)[۴۳] برای مدل‌سازی الگوی استفاده از یک شارژکننده خاص در یک مکان خاص استفاده می‌کند که الگوی زمان ورود خودرو به ایستگاه و مدت زمان شارژ را تولید می‌کند. به این منظور تابع چگالی تخمینی ناپارامتری برای نمونه‌برداری از متغیرهای مربوط به الگوی استفاده از شارژکننده استفاده می‌شود تا امکان استفاده از متغیرها در فرآیند آموزش عامل یادگیری تقویتی فراهم شود. الگوریتم DQN پیشنهادی با هدف کاهش هزینه شارژ خودروهای الکتریکی و در عین حال افزایش قابلیت اطمینان شبکه طراحی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی مبتنی بر DQN با موفقیت کل هزینه شارژ را در طول دوره آزمایش کاهش می‌دهد و با افزایش ضریب بار هدف مسطح شدن بار را حاصل می‌کند. محدودیت این روش در نظر گرفتن فضای عمل به‌عنوان یک فضای گسسته است که می‌توان به کمک روش DDPG یک فضای پیوسته را مدیریت کرد. همچنین محققان در [۸۷] فرض کرده اند که باطری خودروها در زمان ترک ایستگاه به‌طور کامل شارژ شده‌است. درحالی‌که این فرض ساده‌سازی غیرواقعی است و رفتار تصادفی رانندگان خودروهای الکتریکی درانتخاب زمان ورود و ترک ایستگاه بر میزان شارژ باطری هنگام ترک ایستگاه تأثیرگذار است. محققان در [۸۸] برای حل این مشکل، مسئله زمان‌بندی شارژ و تخلیه خودروی الکتریکی را به‌عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مقید (CMDP)[۴۴] فرمول‌بندی کرده اند تا رفتار تصادفی شارژ خودروها و قیمت متغیر برق را درنظر بگیرند. هدف یافتن یک استراتژی برنامه‌ریزی شارژ و تخلیه مقید برای به حداقل‌رساندن هزینه شارژ و همچنین تضمین شارژ کامل خودرو است. برای حل CMDP، یک رویکرد بدون مدل مبتنی بر یادگیری تقویت عمیق ایمن (SDRL)[۴۵] پیشنهاد شده‌است. روش پیشنهادی به‌طور مستقیم یاد می‌گیرد که برنامه‌های بهینه شارژ و تخلیه مشروط را به کمک یک شبکه عصبی عمیق تولید کند. برخلاف روش‌های معمول یادگیری تقویتی عمیق، رویکرد پیشنهادی نیازی به طراحی دستی یک عبارت جریمه یا تنظیم ضریب جریمه ندارد. نتایج تجربی نشان داده است که رویکرد پیشنهادی محدودیت‌های شارژ را به خوبی برآورده کند و هزینه شارژ را در مقایسه با راه‌حل‌های پایه کاهش می‌دهد. در این تحقیق صرفا دیدگاه رانندگان در نظر گرفته می‌شود و تأثیر شارژ خودرو بر سیگنال قیمت لحاظ نمی‌شود. اما هنگامی‌که تعداد زیادی از رانندگان الگوریتم یادگیری پیشنهادی را اعمال کنند و اقدامات شارژ خود را خودخواهانه به دوره‌های قیمت پایین تغییر دهند، اوج جدیدی در پروفایل تقاضا در آن دوره‌ها به وجود می‌آید. در این صورت لازم است شرکت برق قیمت شارژ را تعدیل کند و در نتیجه عمل شارژ یک خودرو منجر به تغییرات قیمت برق در آینده می‌شود و به نوبه خود بر فرایند یادگیری برای تمام خودروهای الکتریکی تأثیر می‌گذارد و لازم است این موضوع پیچیده تر از منظر سیستمی مورد بحث قرار گیرد. یک سیستم مدیریت شارژ مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق چند عاملی برای ایستگاه شارژ مجهز به پنل خورشیدی و یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی در[۸۹] پیشنهاد شده‌است. حل این مسئله زمان‌بندی با مدیریت داده‌های متغیر با زمان شامل مقدار انرژی شارژ شده در ذخیره‌ساز، قیمت شارژ و تقاضای کل ایستگاه به‌صورت توزیع شده محاسبه می‌شود. برای انتخاب خط مشی در الگوریتم یادگیری تقویتی، پاداش‌ها بر اساس هزینه عملیات ایستگاه برای عملیات شارژ و تخلیه و ضرر ناشی از شارژ بیش از حد در طول فرآیند شارژ تعیین شده‌است.

برای طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا همراه با برنامه‌های مدیریت شارژ، استفاده از رویکردهای یادگیری تقویتی قابل‌توجه است. مولفان در[۹۰] برای حل مسئله زمان‌بندی شارژ خودروهای الکتریکی در یک ایستگاه عمومی و قیمت‌گذاری بهینه از رویکرد یادگیری تقویتی مبتنی بر الگوریتم SARSA[۴۶] استفاده می‌کنند. در این مسئله زمان ورود خودروها به ایستگاه و زمان ترک ایستگاه تصادفی فرض می‌شود و برای غلبه بر چالش پیوسته زمان بودن فضای حالت و عمل تقریب‌کننده تابع ویژگی خطی باینری برای تابع حالت-مقدار به کار می‌رود تا کارایی و توانایی تعمیم الگوریتم پیشنهادی افزایش یابد. نتایج شبیه‌سازی بر روی داده‌های دنیای واقعی نشان می‌دهد که این روش سود اپراتور ایستگاه را به‌طور قابل توجهی نسبت به الگوریتم‌های معیار معروف افزایش می‌دهد و متوسط هزینه شارژ رانندگان و بار اوج شبکه را نیز کاهش می‌دهد.

در تحقیق [۹۱] مسئله زمان‌بندی شارژ و تخلیه خودروی الکتریکی به‌صورت یک فرایند تصمیم مارکوف با احتمالات گذار ناشناخته از دیدگاه کاربر فرمول‌بندی می‌شود. برای حل چالش تصادفی‌بودن قیمت برق و رفتار رفت و آمد رانندگان یک رویکرد مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق برای تعیین یک استراتژی بهینه برای زمان‌بندی بلادرنگ پیشنهاد شده‌است که از یک شبکه نمایش مبتنی بر LSTM برای استخراج ویژگی‌ها از قیمت برق استفاده می‌کند. سپس این ویژگی‌ها با ویژگی سطح شارژ باطری الحاق می‌شود و ویژگی‌های الحاقی به دست آمده به یک شبکه Q تزریق می‌شوند تا تابع مقدار-عمل بهینه برای یافتن برنامه زمان‌بندی تقریب زده شود. پارامترهای

این دو شبکه به روش گرادیان کاهشی در طول فرآیند آموزش به روز می‌شوند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند با ترجیحات کاربران مختلف برای رسیدن به هدف صرفه‌جویی در هزینه شارژ و کاهش اضطراب محدوده تطبیق داده شود.

یک استراتژی بهینه شارژ خودروی الکتریکی در یک شبکه توزیع برای به حداکثررساندن سود اپراتورهای سیستم توزیع و در عین حال ارضای تمام محدودیت‌های فیزیکی و ممانعت از نقض ناحیه امنیتی ولتاژ در[۹۲] پیشنهاد شده‌است. برای درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های ناشی از رفتار رانندگان، یک مدل فرآیند تصمیم مارکوف معرفی گردیده است و سپس تکنیک یادگیری DDPG برای تجزیه و تحلیل تأثیر عدم‌قطعیت‌ها بر استراتژی شارژ استفاده شده‌است. MDP و تکنیک‌های یادگیری آنلاین می‌توانند به‌طور کامل همبستگی‌های زمانی را در نظر بگیرند و روش انتخابی برای تعیین خط‌مشی در فضاهای عملی با ابعاد بالا و پیوسته مناسب است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استراتژی شارژ بهینه خودروها برای تنظیم ولتاژ از طریق شارژ و تخلیه در دوره‌های زمانی مناسب مفید خواهد بود که به نوعی پاسخ تقاضا را ارائه می‌کند. روش پیشنهادی امنیت ولتاژ را به خوبی تضمین می‌کند زیرا کنترل خودروها در یک دوره زمانی بر شرایط مرزی مدل در دوره زمانی بعدی تأثیر می‌گذارد که این تأثیر در روش آنلاین زمان‌بندی لحاظ شده‌است.

قابلیت انعطاف‌پذیری فوق‌العاده خودروهای الکتریکی به واسطه امکان استفاده از فناوری V2G بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌است[۹۳]. در پژوهش [۹۴] مسئله قیمت‌گذاری شارژ خودروهای الکتریکی توسط تجمیع‌کننده را با در نظر گرفتن قابلیت انعطاف خودروهای الکتریکی مطرح کرده اند و رویکرد یادگیری تقویتی عمیق مبتنی بر الگوریتم DDPG و استراتژی تکرار تجربه اولویت‌دار را برای حل مسئله برای دست‌یابی به خط‌مشی‌های بهتر و یادگیری سریع‌تر ارائه کرده اند. این روش علاوه بر قابلیت V2G، ماهیت گسسته سطوح شارژ و تخلیه خودروها را در نظر می‌گیرد. نتایج بررسی مطالعات موردی نشان می‌دهد که تأثیر کلی انعطاف‌پذیری خودروی الکتریکی بر سود کل تجمیع‌کننده به ویژگی‌های سناریو بستگی دارد و به‌طور مطلق سودمند یا مضر نیست. همچنین انعطاف‌پذیری خودرو باعث کاهش قیمت‌های خرده‌فروشی ارائه‌شده توسط تجمیع‌کننده در ساعات اوج مصرف می‌شود که منجر به کاهش میانگین هزینه برق تمامی خودروهای الکتریکی می‌شود. این تأثیر مفید برای خودروهای الکتریکی انعطاف‌پذیر به‌طور قابل‌توجهی بیشتر است.

الگوریتم تکرار برازش‌شده[۴۷] Q یکی از روش‌های یادگیری تقویتی دسته‌ای[۴۸] می‌باشد که در مجموعه دیگری از تحقیقات حوزه مدیریت شارژ به کار رفته است. الگوریتم تکرار برازش‌شده Q مانند یادگیری Q، خط مشی بهینه را از طریق تکرارها می‌آموزد تا زمانی‌که بهترین اعمال انتخاب شود و رفتار عامل در این روش مستقل از خط مشی به‌روز شده‌است. خط مشی بهینه برای انتخاب اعمال بر اساس تجربیات به دست آمده از استقرار یک خط‌مشی تصادفی و سپس مشاهده پویایی گذار تعیین می‌شود. پویایی گذار حالت در این روش براساس دسته‌ای از گذارهای حالت نمونه آموخته می‌شود. نویسندگان در [۹۵] یک رویکرد مبتنی بر یادگیری تقویتی دسته‌ای و الگوریتم تکرار برازش‌شده Q را برای کنترل مشترک تقاضای شارژ گروهی از ایستگاه‌های شارژ پیشنهاد می‌کنند تا برنامه شارژ خودروها در ایستگاه‌ها با هدف هموارکردن پروفایل بار تدوین شود. در این چارچوب از یک MDP مقیاس پذیر استفاده می‌شود تا ویژگی‌های مختلف شارژ خودرو (یعنی زمان رسیدن، شارژ و مدت زمان اتصال) در گروهی از ایستگاه‌ها در نظر گرفته شود. فرمول‌های روش پیشنهادی مستقل از تعداد ایستگاه‌های شارژ و نرخ شارژ می‌باشند. نتایج ارزیابی مدل با داده‌های شارژ دنیای واقعی تایید می‌کند که رویکرد پیشنهادی سیاستی را می‌آموزد که هزینه عادی هماهنگی شارژ نسبت به سیاست شارژ کنترل نشده را کاهش می‌دهد بدون آن‌که دانش کاملی از جلسات شارژ آینده داشته باشد. همچنین سیاست شارژ حاصل برای هماهنگ‌کردن شارژ گروه بزرگ‌تری از ایستگاه‌ها قابل تعمیم است به شرطی‌که توزیع زمان‌های ورود و خروج و تقاضای انرژی خودروهای الکتریکی یکسان باشد. در جدول ۳ زیرمجموعه‌ای از مراجع بررسی‌شده در این بخش با ذکر اهداف، روش‌ها، نوع داده‌های مورد استفاده و تجهیزات اضافی ایستگاه به‌طورخلاصه نشان داده شده اند.

۶- بحث و ارائه رهنمودهای پژوهشی

در این پژوهش رویکردهای مختلف برای حل چالش‌های موجود در زمینه طراحی و توسعه زیرساخت شارژ خودروهای الکتریکی در تحقیقات اخیر مورد بررسی قرار گرفتند. در این بخش با مروری کلی بر نکات برجسته این تحقیقات، چالش‌هایی معرفی می‌شوند که کمتر مورد توجه قرار گرفته اند تا راهگشایی برای ادامه مسیر تحقیقات باشد.

جدول (۳) نمونه ای از تحقیقات اخیر در زمینه مدیریت شارژ

مرجع	هدف	روش	داده	تجهیزات
[۸۲]	زمان‌بندی شارژ متمرکز خودروها در RMG با هدف حداقل‌کردن هزینه RMG و رانندگان	مدل تصادفی مبتنی بر سناریو	-	توربین بادی و پارکینگ برای شارژ EV
[۸۳]	زمان‌بندی متمرکز پویا و برخط شارژ با هدف برآوردن تقاضای شارژ رانندگان و استفاده بهینه از توان تخصیص یافته به ایستگاه	الگوریتم ABC ترکیب شده با الگوریتم‌های جستجوی محلی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک	داده آماری	ایستگاه واقع درمحوطه پارکینگ
[۶۵]	زمان‌بندی شارژ متمرکز با هدف پرکردن دره‌های پروفایل بار و کاهش هزینه شارژ	مدیریت انرژی مبتنی بر قانون، در نظرگرفتن قابلیت V2G	-	مولد خورشیدی و ذخیره‌ساز
[۷۶]	مدل‌سازی رفتار رانندگان در یک زیرساخت شارژ هوشمند به‌صورت کاربردی برای مسائل زمان‌بندی شارژ بلادرنگ	ترکیبی از خوشه‌بندی K-Means و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه	داده واقعی رفتار شارژ	مولد خورشیدی و قابلیت V2G
[۷۷]	مدل‌سازی ناهمگونی رفتار رانندگان خودروها	الگوریتم SOM برای خوشه بندی خودکار پروفایل بار	داده‌های واقعی شارژ و سفر EV	-
[۷۸]	پیشگویی کوتاه مدت بار شارژ اتوبوس‌های الکتریکی و زمان‌بندی بهینه شارژ با هدف حداقل‌کردن هزینه عملیاتی شرکت اتوبوس رانی	آموزش داده‌ها با شبکه عصبی WNN و زمان‌بندی شارژ با IP حل‌شده با الگوریتم ژنتیک	داده واقعی اتوبوس‌های الکتریکی	-
[۷۹]	پیشگویی میان مدت بار شارژ و طراحی شبکه ایستگاه با هدف حداکثرکردن پذیرش خودروها	برنامه نویسی تصادفی دو مرحله ای حل‌شده به روش تقریب میانگین نمونه و بهینه‌ساز Gurobi	داده‌های سفر ICEV و داده‌های آماری EV	ایستگاه واقع در محوطه پارکینگ
[۸۴]	زمان‌بندی شارژ و تخلیه خودرو بر اساس قیمت بلادرنگ شارژ با هدف کاهش هزینه رانندگان	یادگیری تقویتی، الگوریتم یادگیری Q	داده‌های واقعی قیمت برق	فناوری V2G
[۸۷]	زمان‌بندی شارژ با هدف کاهش هزینه شارژ خودرو و افزایش قابلیت اطمینان شبکه	الگوریتم DQN، مدل‌سازی الگوی زمان ورود خودرو به ایستگاه و مدت زمان شارژ با استفاده از KDE	داده‌های واقعی شارژ EV	-
[۸۸]	زمان‌بندی شارژ وتخلیه با هدف حداقل سازی هزینه شارژ و تضمین شارژ کامل خودرو	مدل‌سازی رفتار تصادفی شارژ خودروها با CMDP و قیمت متغیر برق و حل با الگوریتم SDRL	داده‌های واقعی قیمت برق	-
[۸۹]	زمان‌بندی شارژ با مدیریت داده‌های متغیر شامل مقدار انرژی شارژ شده در ذخیره‌ساز، قیمت شارژ و تقاضای کل ایستگاه به‌صورت توزیع‌شده	یادگیری تقویتی عمیق چندعاملی	-	مولد خورشیدی و ذخیره‌ساز
[۹۰]	زمان‌بندی شارژ و قیمت‌گذاری بهینه انرژی با هدف افزایش سود اپراتور و کاهش هزینه رانندگان و بار اوج شبکه	یادگیری تقویتی با الگوریتم SARSA	داده‌های واقعی قیمت شارژ و زمان ورود EV	مولد خورشیدی و ذخیره‌ساز
[۹۲]	زمان‌بندی بهینه شارژ با هدف حداکثرسازی سود اپراتورهای سیستم توزیع و ممانعت از نقض ناحیه امنیتی	مدل‌سازی رفتار تصادفی رانندگان با MDP و یادگیری تقویتی مبتنی بر DDPG	داده مصنوعی	-
[۹۴]	قیمت‌گذاری شارژ توسط تجمیع‌کننده با هدف کاهش قیمت‌های خرده‌فروشی در ساعات اوج مصرف	یادگیری تقویتی عمیق مبتنی بر DDPG و استراتژی تکرار تجربه اولویت‌دار	داده‌های سفر ICEV	قابلیت V2G
[۹۵]	زمان‌بندی مشترک شارژ گروهی از ایستگاه‌ها با هدف هموارکردن پروفایل بار	مدل‌سازی رفتار تصادفی رانندگان با MDP، یادگیری تقویتی دسته ای و الگوریتم تکرار برازش‌شده Q	داده‌های واقعی شارژ EV	-

مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اغلب مسئله ازدحام ایستگاه از دیدگاه کاربر با مدل ریاضی صف و به منظور اعمال محدودیت ظرفیت بررسی می‌شود. درحالی‌که تحقیقات مستقل در زمینه مدیریت ازدحام در ایستگاه‌های شارژ موجود با هدف تأمین ارائه خدمات مطلوب و مورد رضایت کاربر و استفاده حداکثری از ظرفیت موجود ایستگاه کمتر انجام شده‌است. همچنین اکثر پژوهش‌ها برای بررسی وضعیت ازدحام از ساده‌ترین مدل صف M/M/s استفاده می‌کنند که درآن زمان ورود خودروها به ایستگاه و مدت زمان شارژ آن‌ها به‌صورت فرآیند پواسن مشخص می‌شود. این فرضیات با رفتار واقعی رانندگان در انتخاب زمان مراجعه به ایستگاه و مدت زمان شارژ هماهنگی ندارد. علاوه بر این معمولا از تقریب‌های خطی در مدل صف استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال میانگین مدت زمان انتظار راننده در صف محاسبه می‌شود درحالی‌که محاسبه توزیع مدت زمان انتظار راننده، دید خیلی صحیح‌تر و واقعی‌تری فراهم می‌کند.

در زمینه تعیین مکان بهینه برای ایستگاه مدل‌سازی تقاضای شارژ خودروها از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین پیش‌بینی تقاضا برای تدوین برنامه‌های هماهنگ‌سازی و مدیریت شارژ خودروها و به‌ویژه بهره بردن هرچه بیشتر از امکانات موجود ایستگاه‌ها اهمیت دارد. در اکثر مسائل طراحی ایستگاه، تقاضا در قالب جریان‌های ترافیکی مدل می‌شود به‌طوری‌که جریان ترافیکی عبوری از ایستگاه‌های مستقرشده به حداکثر برسد. لذا در این مدل‌ها فرض بر این است که شارژ خودرو در طول سفر انجام می‌شود. دسته دیگری از تحقیقات با تخصیص دادن تقاضای شارژ به گره‌ها یا مناطق موجود در مدل گراف شبکه حمل و نقل به مدل‌سازی تقاضای شارژ می‌پردازند که این روش مستلزم فرضیه غیرواقعی ایستابودن پروفایل تقاضا است. درمقابل روش‌های مبتنی بر عامل برای مدل‌سازی تقاضای شارژ کمتر مورد توجه قرارگرفته‌اند. درحالی‌که این روش‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های واقعی شارژ و سفر خودروهای الکتریکی تقاضای شارژ را به‌خوبی با در نظرگرفتن ویژگی‌های رفتاری رانندگان مدل کنند. چالش مهم در مدل‌سازی تقاضا به روش‌های مبتنی بر عامل دسترسی به داده‌های واقعی رخدادهای شارژ و سفر خوردوهای الکتریکی است. در زمینه پیش‌بینی پروفایل تقاضای شارژ روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین اخیرا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند ولی همچنان تقاضای پیش‌بینی شده توسط این روش‌ها وابسته به داده های منطقه جغرافیایی خاصی خواهد بود که مانع از عمومیت یافتن این روش‌ها می‌شود.

مدل‌سازی مفید و موثر تقاضای شارژ مستلزم روشی است که توزیع احتمال تقاضا را با احتساب تأثیر عوامل متنوع به دست آورد. مهمترین عوامل تأثیرگذار بر تقاضای شارژ شامل مشخصات متفاوت خودروها از لحاظ ظرفیت باطری و میزان محدوده رانندگی مجاز با شارژ کامل، مشخصات و سرعت‌های مختلف شارژکننده‌ها، مشخصات تصادفی رفتار شارژ رانندگان همچون مقدار اولیه سطح شارژ باطری هنگام مراجعه به ایستگاه، مقدار نهایی سطح شارژ باطری هنگام ترک ایستگاه، زمان ورود به ایستگاه و مدت زمان شارژ می‌باشند[۹۶, ۹۷]. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی ایستگاه با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی شده، تأثیر رفتار تصادفی واقعی رانندگان بر تقاضای شارژ نادیده گرفته شده‌است که منجر به عدم‌عمومیت یافتن مدل‌های شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی معرفی شده توسط آن‌ها به‌ویژه در کاربردهای عملی است. به‌عنوان مثال سطح اولیه یا نهایی شارژ خودروها مقدار ثابت و مشخصی فرض می‌شود یا با نمونه برداری از یک توزیع نرمال به‌دست می‌آید[۹۸-۱۰۰].

در زمینه مدیریت و زمان‌بندی شارژ خودروهای الکتریکی یک هدف مهم فراهم‌آوردن قابلیت استفاده از انعطاف پذیری بار شارژ خودروهای الکتریکی است که در تحقیقات اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌است. قابلیت انعطاف بار خودروهای الکتریکی از طریق قابلیت V2G فراهم می‌شود و به استفاده هرچه بیشتر از توان منابع انرژی تجدیدپذیر و حداقل‌کردن تأثیر تغییرات انرژی تولید شده توسط این منابع بر شبکه قدرت کمک می‌کند. معمولا در نظر گرفتن تعاملات انرژی بین شبکه برق و خودروها در ایستگاه‌های مجهز به منابع تجدیدپذیر و واحدهای ذخیره ساز منجر به پیچیده شدن حل مسائل طراحی ایستگاه و مدیریت شارژ می‌شوند که نیازمند معرفی راهکارهای مناسب است. برای زمان‌بندی شارژ خودروهای الکتریکی از روش‌های متعددی استفاده شده است، شامل: مدل‌های احتمالاتی، طرح مسئله بهینه‌سازی و حل آن‌ها به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های یادگیری ماشین. الگوریتم‌های یادگیری تقویتی بدون مدل همچون DQN و DDPG به‌عنوان متداول‌ترین روش‌های یادگیری ماشین در تحقیقات اخیر برای مدل‌سازی و حل مسائل زمان‌بندی توزیع‌شده شارژ و قیمت‌گذاری پویا می‌باشند. الگوریتم‌های یادگیری تقویتی پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی دارند و به‌ویژه برای کار در محیط‌های پویا همچون ایستگاه شارژ مناسب می‌باشند و می‌توانند در زمان کوتاه‌تری به پاسخ نزدیک بهینه همگرا شوند. برای ارزیابی عملکرد روش‌های مدیریت شارژ مبتنی بر یادگیری تقویتی اغلب از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی استفاده می‌شود. یکی دیگر از مزایای مهم روش‌های کنترل شارژ مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری تقویتی امکان لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت‌های ناشی از عوامل مختلف رفتاری رانندگان و مشخصات متنوع خودروها و امکانات ایستگاه بر برنامه‌های شارژ است. یکی از

جنبه‌های تحقیقاتی جذاب و مورد توجه استفاده از قابلیت الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای مدیریت تعامل انرژی در ایستگاه‌های مجهز به منابع تجدیدپذیر و واحدهای ذخیره‌ساز و با وجود قابلیت V2G برای خودروهای الکتریکی با هدف تأمین رضایت رانندگان و سود دوطرفه رانندگان و اپراتور ایستگاه می‌باشد.

چالش دیگر در مسائل طراحی ایستگاه شارژ تمرکز اکثر تحقیقات بر استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری است که معمولا بدون استفاده از داده‌های واقعی و بر روی شبکه‌های آزمایشی قدرت و حمل و نقل ارزیابی می‌شوند. روش‌های موجود که به روش نظری بررسی می‌شوند ممکن است به علت نادیده گرفتن برخی شرایط و یا استفاده از فرض‌های ساده‌سازی برای استفاده عملی مطلوب نباشند. بنابراین یک نیاز مهم امکان‌سنجی عملی روش‌های مکان‌یابی و تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ به‌ویژه با درنظرگرفتن تأثیر عوامل ناهمگن رفتاری، اجتماعی و اقتصادی می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله آخرین پژوهش‌ها در زمینه طراحی و توسعه زیرساخت شارژ به‌طور جامع مورد بررسی قرارگرفت. ابتدا اهداف و شاخص‌های مهم طراحی و توسعه زیرساخت شارژ از دیدگاه شبکه قدرت و حمل و نقل معرفی شدند. سپس اهداف، روش‌ها و داده‌های مورد استفاده برای حل مسائل مدیریت ازدحام، مکان یابی و تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه و مدیریت بار شارژ مورد بررسی قرارگرفتند. یکی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده لزوم استفاده از داده‌های واقعی رفتار سفر و رانندگی خودروهای الکتریکی و در نظرگرفتن تأثیر رفتار تصادفی و ناهمگن رانندگان بر تقاضای شارژ است. در این‌صورت مسائل متنوع طراحی زیرساخت شارژ که نیازمند برآورد صحیحی از تقاضای شارژ است، با دید واقعی‌تری تحلیل می‌گردند و با استفاده حداکثری از امکانات موجود، برنامه های توسعه به‌طور مقرون به صرفه برای ایستگاه‌ها تدوین می‌شوند. همچنین استفاده از فرض‌های ساده‌سازی و نادیده‌گرفتن برخی شرایط در راهکارهای نظری باعث می‌شود که این راهکارها در عمل برای طراحی و توسعه زیرساخت شارژ مطلوب نباشند. لذا امکان‌سنجی عملی روش‌های مکان‌یابی و تعیین ظرفیت ایستگاه‌ها و مدیریت شارژ ارزشمند است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در مسائل مکان‌یابی ایستگاه‌ها از روش‌های مدل‌سازی تقاضا مبتنی بر عامل به دلیل نیاز به داده‌های واقعی خودروهای الکتریکی کمتر استفاده شده‌است. همچنین به‌دلیل مشابه در مسائل تحلیل ازدحام ایستگاه محاسبه توزیع مدت زمان انتظار راننده کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای حل مسائل مدیریت و زمان‌بندی شارژ خودروها اخیرا به‌شدت مورد استقبال قرار گرفته‌است. زیرا به‌کمک این روش‌ها می‌توان عدم‌قطعیت های ناشی از موجودیت‌های متنوع را درنظر گرفت. بنابراین گردآوری مجموعه داده‌های غنی حاوی مشخصات متنوع رفتاری، اجتماعی و اقتصادی رانندگان خودروهای الکتریکی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا تدوین مشوق‌ها و سیاست‌گذاری دولت‌ها برای حمایت از راهکارهای عملی در زمینه طراحی و توسعه زیرساخت شارژ برای تحقق آرمان‌های زیست‌محیطی پیشرفت در این حوزه را تسریع می کند.

مراجع

[1] L. González, E. Siavichay, and J. Espinoza, "Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 309-318, 2019.

[2] "IEA, "Transport, Improving the sustainability of passenger and freight transport, " International Energy Agency, Paris, Tech. Rep, 2022. [Online]. Available https://www.iea.org/topics/transport."

[3] R. Fachrizal, M. Shepero, D. van der Meer, J. Munkhammar, and J. Widén, "Smart charging of electric vehicles considering photovoltaic power production and electricity consumption: A review," *ETransportation*, vol. 4, p. 100056, 2020.

[4] E. Delmonte, N. Kinnear, B. Jenkins, and S. Skippon, "What do consumers think of smart charging? Perceptions among actual and potential plug-in electric vehicle adopters in the United Kingdom," *Energy Research & Social Science*, vol. 60, p. 101318, 2020.

[5] C. M. Martinez, X. Hu, D. Cao, E. Velenis, B. Gao, and M. Wellers, "Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Recent progress and a connected vehicles perspective," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 4534-4549, 2016.

[6] H.-C. Liu, X.-Y. You, Y.-X. Xue, and X. Luan, "Exploring critical factors influencing the diffusion of electric vehicles in China: A multi-stakeholder perspective," *Research in Transportation Economics*, vol. 66, pp. 46-58, 2017.

[7] "CEM, "EV30@30 Campaign, " Clean Energy Ministerial, Tech. Rep., 2022. [Online]. Available: https://www.cleanenergyministerial.org/initiatives-campaigns/ev3030-campaign/ ".

[8] "IEA, "Global EV outlook 2022, " International Energy Agency, Paris, Tech. Rep., 2022. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/executive-summary.."

[9] U. Illmann and J. Kluge, "Public charging infrastructure and the market diffusion of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 86, p. 102413, 2020.

[10] S. Sachan, S. Deb, and S. N. Singh, "Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles," *Sustainable cities and society*, vol. 60, p. 102238, 2020.

[11] Z. Fotouhi, M. R. Hashemi, H. Narimani, and I. S. Bayram, "A general model for EV drivers' charging behavior," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7368-7382, 2019.

[12] N. Garwa and K. R. Niazi, "Impact of EV on Integration with Grid System–A Review," in *2019 8th international conference on power systems (ICPS)*, 2019, pp. 1-6: IEEE.

[13] S. Deb, K. Kalita, and P. Mahanta, "Distribution network planning considering the impact of electric vehicle charging station load," in *Smart Power Distribution Systems*: Elsevier, 2019, pp. 529-553.

[14] D. L. Greene, E. Kontou, B. Borlaug, A. Brooker, and M. Muratori, "Public charging infrastructure for plug-in electric vehicles: What is it worth?," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 78, p. 102182, 2020.

[15] S. Mishra *et al.*, "A comprehensive review on developments in electric vehicle charging station infrastructure and present scenario of India," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2396, 2021.

[16] G. Alkawsi, Y. Baashar, D. Abbas U, A. A. Alkahtani, and S. K. Tiong, "Review of renewable energy-based charging infrastructure for electric vehicles," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 3847, 2021.

[17] S. R. Sinsel, R. L. Riemke, and V. H. Hoffmann, "Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review," *renewable energy*, vol. 145, pp. 2271-2285, 2020.

[18] A. Dik, S. Omer, and R. Boukhanouf, "Electric Vehicles: V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration," *Energies*, vol. 15, no. 3, p. 803, 2022.

[19] A. R. Kizhakkan, A. K. Rathore, and A. Awasthi, "Review of electric vehicle charging station location planning," in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, 2019, pp. 1-5: IEEE.

[20] I. S. Bayram, A. Tajer, M. Abdallah, and K. Qaraqe, "Capacity planning frameworks for electric vehicle charging stations with multiclass customers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1934-1943, 2015.

[21] N. Shaukat *et al.*, "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1329-1349, 2018.

[22] P. Pradhan, I. Ahmad, D. Habibi, G. Kothapalli, and M. A. Masoum, "Reducing the impacts of electric vehicle charging on power distribution transformers," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 210183-210193, 2020.

[23] C. Crozier, T. Morstyn, and M. McCulloch, "The opportunity for smart charging to mitigate the impact of electric vehicles on transmission and distribution systems," *Applied energy*, vol. 268, p. 114973, 2020.

[24] T. Unterluggauer, J. Rich, P. B. Andersen, and S. Hashemi, "Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks: A review," *ETransportation*, p. 100163, 2022.

[25] A. Shukla, K. Verma, and R. Kumar, "Multi-objective synergistic planning of EV fast-charging stations in the distribution system coupled with the transportation network," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 15, pp. 3421-3432, 2019.

[26] V. H. Fan, Z. Dong, and K. Meng, "Integrated distribution expansion planning considering stochastic renewable energy resources and electric vehicles," *Applied energy*, vol. 278, p. 115720, 2020.

[27] S. Sun, Q. Yang, J. Ma, A. J. Ferré, and W. Yan, "Hierarchical planning of PEV charging facilities and DGs under transportation-power network couplings," *renewable energy*, vol. 150, pp. 356-369, 2020.

[28] C. Li, L. Zhang, Z. Ou, Q. Wang, D. Zhou, and J. Ma, "Robust model of electric vehicle charging station location considering renewable energy and storage equipment," *Energy*, vol. 238, p. 121713, 2022.
[29] A. Arias, J. Sanchez, and M. Granada, "Integrated planning of electric vehicles routing and charging stations location considering transportation networks and power distribution systems," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 9, no. 4, pp. 535-550, 2018.
[30] C. Luo, Y.-F. Huang, and V. Gupta, "Placement of EV charging stations—Balancing benefits among multiple entities," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 759-768, 2015.
[31] Y. Zhang, Q. Zhang, A. Farnoosh, S. Chen, and Y. Li, "GIS-Based Multi-Objective Particle Swarm Optimization of charging stations for electric vehicles," *Energy*, vol. 169, pp. 844-853, 2019.
[32] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, "Charging station placement for electric vehicles: a case study of Guwahati city, India," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100270-100282, 2019.
[33] A. Pan, T. Zhao, H. Yu, and Y. Zhang, "Deploying public charging stations for electric taxis: A charging demand simulation embedded approach," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17412-17424, 2019.
[34] R. Sa'adati, M. Jafari-Nokandi, and J. Saebi, "Allocation of RESs and PEV fast-charging station on coupled transportation and distribution networks," *Sustainable cities and society*, vol. 65, p. 102527, 2021.
[35] H. Kikusato *et al.*, "Electric vehicle charge–discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3186-3197, 2018.
[36] H. Zhang, Z. Hu, and Y. Song, "Power and transport nexus: Routing electric vehicles to promote renewable power integration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3291-3301, 2020.
[37] G. Battapothula, C. Yammani, and S. Maheswarapu, "Multi-objective simultaneous optimal planning of electrical vehicle fast charging stations and DGs in distribution system," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 923-934, 2019.
[38] S. Wang, Z. Y. Dong, C. Chen, H. Fan, and F. Luo, "Expansion planning of active distribution networks with multiple distributed energy resources and EV sharing system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp. 602-611, 2019.
[39] B. Zhou, G. Chen, T. Huang, Q. Song, and Y. Yuan, "Planning PEV fast-charging stations using data-driven distributionally robust optimization approach based on ϕ-divergence," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 170-180, 2020.
[40] B. Zhou, G. Chen, Q. Song, and Z. Y. Dong, "Robust chance-constrained programming approach for the planning of fast-charging stations in electrified transportation networks," *Applied energy*, vol. 262, p. 114480, 2020.
[41] X. Zhang *et al.*, "Yen's algorithm-based charging facility planning considering congestion in coupled transportation and power systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 1134-1144, 2019.
[42] Z. Luo, F. He, X. Lin, J. Wu, and M. Li, "Joint deployment of charging stations and photovoltaic power plants for electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 79, p. 102247, 2020.
[43] J. Yang, J. Dong, and L. Hu, "A data-driven optimization-based approach for siting and sizing of electric taxi charging stations," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 77, pp. 462-477, 2017.
[44] H. Chen, H. Zhang, Z. Hu, Y. Liang, H. Luo, and Y. Wang, "Plug-in electric vehicle charging congestion analysis using taxi travel data in the central area of beijing," *arXiv preprint arXiv:1712.07300*, 2017.
[45] D. I. Choi and D.-E. Lim, "Analysis of the state-dependent queueing model and its application to battery swapping and charging stations," *Sustainability*, vol. 12, no. 6, p. 2343, 2020.
[46] P. Fan, B. Sainbayar, and S. Ren, "Operation analysis of fast charging stations with energy demand control of electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1819-1826, 2015.
[47] I. Zenginis, J. Vardakas, N. Zorba, and C. Verikoukis, "Performance evaluation of a multi-standard fast charging station for electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4480-4489, 2017.

[48] A. Khaksari, G. Tsaousoglou, P. Makris, K. Steriotis, N. Efthymiopoulos, and E. Varvarigos, "Sizing of electric vehicle charging stations with smart charging capabilities and quality of service requirements," *Sustainable cities and society*, vol. 70, p. 102872, 2021.

[49] W. Kong, Y. Luo, G. Feng, K. Li, and H. Peng, "Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid," *Energy*, vol. 186, p. 115826, 2019.

[50] C. Lee and J. Han, "Benders-and-Price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 106, pp. 130-152, 2017.

[51] J. He, H. Yang, T.-Q. Tang, and H.-J. Huang, "An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 86, pp. 641-654, 2018.

[52] F. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf, and M. Marzband, "Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2314-2333, 2022.

[53] F. Teng, Z. Ding, Z. Hu, and P. Sarikprueck, "Technical review on advanced approaches for electric vehicle charging demand management, Part I: Applications in electric power market and renewable energy integration," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5684-5694, 2020.

[54] W. Wei, W. Danman, W. Qiuwei, M. Shafie-Khah, and J. P. Catalao, "Interdependence between transportation system and power distribution system: A comprehensive review on models and applications," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 433-448, 2019.

[55] K. Chaudhari, N. K. Kandasamy, A. Krishnan, A. Ukil, and H. B. Gooi, "Agent-based aggregated behavior modeling for electric vehicle charging load," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 856-868, 2018.

[56] D. Mao, J. Tan, and J. Wang, "Location planning of PEV fast charging station: an integrated approach under traffic and power grid requirements," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 483-492, 2020.

[57] S. N. Hashemian, M. A. Latify, and G. R. Yousefi, "PEV fast-charging station sizing and placement in coupled transportation-distribution networks considering power line conditioning capability," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 4773-4783, 2020.

[58] H. Zhang, S. J. Moura, Z. Hu, and Y. Song, "PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2595-2605, 2016.

[59] X. Bai, K.-S. Chin, and Z. Zhou, "A bi-objective model for location planning of electric vehicle charging stations with GPS trajectory data," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 128, pp. 591-604, 2019.

[60] A. Pal, A. Bhattacharya, and A. K. Chakraborty, "Allocation of electric vehicle charging station considering uncertainties," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 25, p. 100422, 2021.

[61] H. Lin, C. Bian, Y. Wang, H. Li, Q. Sun, and F. Wallin, "Optimal planning of intra-city public charging stations," *Energy*, vol. 238, p. 121948, 2022.

[62] K. Hajar, B. Guo, A. Hably, and S. Bacha, "Smart charging impact on electric vehicles in presence of photovoltaics," in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2021, vol. 1, pp. 643-648: IEEE.

[63] S. Limmer, "Dynamic pricing for electric vehicle charging—a literature review," *Energies*, vol. 12, no. 18, p. 3574, 2019.

[64] H. M. Abdullah, A. Gastli, and L. Ben-Brahim, "Reinforcement learning based EV charging management systems–a review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 41506-41531, 2021.

[65] A. R. Bhatti and Z. Salam, "A rule-based energy management scheme for uninterrupted electric vehicles charging at constant price using photovoltaic-grid system," *renewable energy*, vol. 125, pp. 384-400, 2018.

[66] S. Deb, "Machine Learning for Solving Charging Infrastructure Planning Problems: A Comprehensive Review," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7833, 2021.

[67] S. Shahriar, A.-R. Al-Ali, A. H. Osman, S. Dhou, and M. Nijim, "Machine learning approaches for EV charging behavior: A review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 168980-168993, 2020.

[68] D. Zhang, X. Han, and C. Deng, "Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 362-370, 2018.

[69] "IRENA, "Innovation Outlook: Smart Charging for Electric Vehicles, " International Renewable Energy Agency, Paris, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available https://www.irena.org/publications/2019/May/Innovation-Outlook-Smart-Charging.."

[70] G. Barone, A. Buonomano, F. Calise, C. Forzano, and A. Palombo, "Building to vehicle to building concept toward a novel zero energy paradigm: Modelling and case studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 625-648, 2019.

[71] D. Papadaskalopoulos *et al.*, "Quantifying the potential economic benefits of flexible industrial demand in the European power system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 5123-5132, 2018.

[72] K. Chaudhari, A. Ukil, K. N. Kumar, U. Manandhar, and S. K. Kollimalla, "Hybrid optimization for economic deployment of ESS in PV-integrated EV charging stations," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 106-116, 2017.

[73] P. Bhatt, C. Long, and M. Saiyad, "Review of the impact of vehicle-to-grid schemes on electrical power systems," *Advances in Electric Power and Energy Infrastructure*, pp. 199-208, 2020.

[74] A. S. Al-Ogaili *et al.*, "Review on scheduling, clustering, and forecasting strategies for controlling electric vehicle charging: Challenges and recommendations," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128353-128371, 2019.

[75] Y. Zheng, Y. Shang, Z. Shao, and L. Jian, "A novel real-time scheduling strategy with near-linear complexity for integrating large-scale electric vehicles into smart grid," *Applied energy*, vol. 217, pp. 1-13, 2018.

[76] Y. Xiong, B. Wang, C.-C. Chu, and R. Gadh, "Electric vehicle driver clustering using statistical model and machine learning," in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, pp. 1-5: IEEE.

[77] J. Yang, J. Dong, Q. Zhang, Z. Liu, and W. Wang, "An investigation of battery electric vehicle driving and charging behaviors using vehicle usage data collected in Shanghai, China," *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 24, pp. 20-30, 2018.

[78] Y. Gao, S. Guo, J. Ren, Z. Zhao, A. Ehsan, and Y. Zheng, "An electric bus power consumption model and optimization of charging scheduling concerning multi-external factors," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2060, 2018.

[79] S. Faridimehr, S. Venkatachalam, and R. B. Chinnam, "A stochastic programming approach for electric vehicle charging network design," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 1870-1882, 2018.

[80] J. J. A. Saldanha, E. M. Dos Santos, A. P. C. De Mello, and D. P. Bernardon, "Control strategies for smart charging and discharging of plug-in electric vehicles," *Smart Cities Technologies*, vol. 1, pp. 121-141, 2016.

[81] A. M. Ghazvini and J. Olamaei, "Optimal sizing of autonomous hybrid PV system with considerations for V2G parking lot as controllable load based on a heuristic optimization algorithm," *Solar Energy*, vol. 184, pp. 30-39, 2019.

[82] P. Aliasghari, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Alipour, M. Abapour, and K. Zare, "Optimal scheduling of plug-in electric vehicles and renewable micro-grid in energy and reserve markets considering demand response program," *Journal of cleaner production*, vol. 186, pp. 293-303, 2018.

[83] J. Garcia Alvarez, M. Á. González, C. Rodriguez Vela, and R. Varela, "Electric vehicle charging scheduling by an enhanced artificial bee colony algorithm," *Energies*, vol. 11, no. 10, p. 2752, 2018.

[84] N. Mhaisen, N. Fetais, and A. Massoud, "Real-time scheduling for electric vehicles charging/discharging using reinforcement learning," in *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*, 2020, pp. 1-6: IEEE.

[85] J. Sharma, P.-A. Andersen, O.-C. Granmo, and M. Goodwin, "Deep q-learning with q-matrix transfer learning for novel fire evacuation environment," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 12, pp. 7363-7381, 2020.

[86] Z. Wei, Z. Quan, J. Wu, Y. Li, J. Pou, and H. Zhong, "Deep deterministic policy gradient-drl enabled multiphysics-constrained fast charging of lithium-ion battery," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 3, pp. 2588-2598, 2021.

[87] J. Lee, E. Lee, and J. Kim, "Electric vehicle charging and discharging algorithm based on reinforcement learning with data-driven approach in dynamic pricing scheme," *Energies*, vol. 13, no. 8, p. 1950, 2020.
[88] H. Li, Z. Wan, and H. He, "Constrained EV charging scheduling based on safe deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2427-2439, 2019.
[89] M. Shin, D.-H. Choi, and J. Kim, "Cooperative management for PV/ESS-enabled electric vehicle charging stations: A multiagent deep reinforcement learning approach," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 5, pp. 3493-3503, 2019.
[90] S. Wang, S. Bi, and Y. A. Zhang, "Reinforcement learning for real-time pricing and scheduling control in EV charging stations," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 2, pp. 849-859, 2019.
[91] Z. Wan, H. Li, H. He, and D. Prokhorov, "Model-free real-time EV charging scheduling based on deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5246-5257, 2018.
[92] T. Ding, Z. Zeng, J. Bai, B. Qin, Y. Yang, and M. Shahidehpour, "Optimal electric vehicle charging strategy with Markov decision process and reinforcement learning technique," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5811-5823, 2020.
[93] P. J. Ramírez, D. Papadaskalopoulos, and G. Strbac, "Co-optimization of generation expansion planning and electric vehicles flexibility," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1609-1619, 2015.
[94] D. Qiu, Y. Ye, D. Papadaskalopoulos, and G. Strbac, "A deep reinforcement learning method for pricing electric vehicles with discrete charging levels," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5901-5912, 2020.
[95] N. Sadeghianpourhamami, J. Deleu, and C. Develder, "Definition and evaluation of model-free coordination of electrical vehicle charging with reinforcement learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp. 203-214, 2019.
[96] Y. Wang, E. Yao, and L. Pan, "Electric vehicle drivers' charging behavior analysis considering heterogeneity and satisfaction," *Journal of cleaner production*, vol. 286, p. 124982, 2021.
[97] L. Cheng, X. Chen, S. Yang, J. Wu, and M. Yang, "Structural equation models to analyze activity participation, trip generation, and mode choice of low-income commuters," *Transportation Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 341-349, 2019.
[98] D. Tang and P. Wang, "Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 627-636, 2015.
[99] S. Sun, Q. Yang, and W. Yan, "A novel Markov-based temporal-SoC analysis for characterizing PEV charging demand," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 156-166, 2017.
[100] T. Yi, C. Zhang, T. Lin, and J. Liu, "Research on the spatial-temporal distribution of electric vehicle charging load demand: A case study in China," *Journal of cleaner production*, vol. 242, p. 118457, 2020.

زیر نویس‌ها

[1] International Energy Agency (IEA)
[2] Range Anxiety
[3] Battery Electric Vehicle (BEV)
[4] Plug-in Electric Vehicle (PEV)
[5] Electric Vehicle (EV)
[6] Quality of Service (QoS)
[7] Integer Linear Programming (ILP)
[8] Tradeoff
[9] Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)
[10] Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[11] Leaky Bucket (LB)
[12] Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)

[13] Particle Swarm Optimization (PSO)
[14] Flow Capturing Location Model (FCLM)
[15] Flow Refueling Location Model (FRLM)
[16] User Equilibrium (UE)
[17] P-Median Model
[18] Set Covering Location Model
[19] Maximal Covering Location Model
[20] Optimal Power Flow (OPF)
[21] Branch and Bounce Method
[22] Surrogate-Based Optimization
[23] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)
[24] Chicken Swarm Optimization (CSO)
[25] Teaching Learning-Based Optimization (TLBO)
[26] Vehicle to Grid (V2G)
[27] Harris Hawks Optimization
[28] Energy Management System (EMS)
[29] Reinforcement Learning (RL)
[30] Deep Reinforcement Learning (DRL)
[31] Distribution System Operator (DSO)
[32] Renewable energy sources based Micro Grid (RMG)
[33] Demand Response (DR)
[34] Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm
[35] Rule-based Energy Management System (REMS)
[36] Self-Organizing Map (SOM) Algorithm
[37] Wavelet Neural Network (WNN)
[38] Grey Relational Analysis (GRA)
[39] Q-learning
[40] Deep Q Network (DQN)
[41] Deterministic Policy Gradient (DPG)
[42] Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)
[43] Kernel Density Estimation (KDE)
[44] Constrained Markov Decision Process (CMDP)
[45] Safe Deep Reinforcement Learning (SDRL)
[46] State Action Reward State Action (SARSA)
[47] Fitted Q-iteration
[48] Batch RL