

Determining the Energy Sources of the Electric Vehicles Charging Station According to Economic Factors

Farzaneh Parsian

MSc. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad , Mashhad, Iran. E-mail: fparsian.ie@gmail.com

Babak Rezaee

*Corresponding author, Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: brezaee@um.ac.ir

Abstract

Objective: Owing to the increasing environmental concerns, the replacement of fuel-based vehicles with electric vehicles and the use of renewable energy in the transportation industry is attracting much attention. The charging station is indispensable for widespread use of electric vehicle, so the design of charging stations with the integration of renewable energy, energy storage systems and grid energy is imperative.

Methods: The present study proposes that a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model which is designed to obtain the optimal size of the photovoltaic and battery storage system, in which all investment costs and operational costs are optimized for a time horizon. In this model, the simultaneous purchasing and selling of power can't happen and incomes and costs are calculated based on economic factors. The data from the public charging station in the Netherlands is employed in this study. The optimal size of the photovoltaic and battery storage systems, the optimal purchasing and selling energy of power grid at any moment are determined based on three defined scenarios according to different policies.

Results: The results showed that each scenario is economically sound under different conditions.

Conclusion: Mixture of renewable energies and storage systems can obtain the best cost-efficient solution and the utilization of those energies in charging stations of electric vehicle would reduce the impact on the electrical grid.

Keywords: Electric vehicle, Optimization, Batteries, Photovoltaic systems, Economic factors.

Citation: Parsian, F., & Rezaee, B. (2019). Determining the Energy Sources of the Electric Vehicles Charging Station According to Economic Factors. *Industrial Management Journal*, 11(2), 233-254. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.2, pp. 233-254

DOI: 10.22059/imj.2019.267930.1007511

Received: November 11, 2018; Accepted: April 18, 2019

© Faculty of Management, University of Tehran



تعیین اندازه منابع انرژی ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی با توجه به فاکتورهای اقتصادی

فرزانه پارسیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: fparsian.ie@gmail.com

بابک رضائی خوشان

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: brezaee@um.ac.ir

چکیده

هدف: به دلیل افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، امروزه، جایگزینی وسایل نقلیه الکتریکی با وسایل نقلیه سوختی به‌عنوان راه‌حلی اقتصادی، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. با توسعه به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طراحی ایستگاه‌های شارژ با ترکیبی از این منابع انرژی و امکان تبادل با شبکه برق امری ضروری است. در این مقاله به مسئله طراحی این ایستگاه‌ها، ظرفیت و تعیین منابع تأمین انرژی در این ایستگاه‌ها پرداخته شده است و تقاضای موجود در بازه‌های زمانی و محدودیت‌های مربوط به ایستگاه شارژ و هر یک از منابع انرژی در نظر گرفته شده‌اند.

روش: مسئله پژوهش، در قالب مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی ایستگاه، برای افق زمانی مشخص فرموله شده است. در این مدل، ایستگاه شارژ قابلیت دارد که به‌صورت غیرهم‌زمان انرژی را از شبکه برق شهری خرید و فروش کند. همچنین، هزینه‌ها و درآمدهای آن با در نظر گرفتن فاکتور ارزش زمانی پول در مدل محاسبه شده است. مدل پیشنهادی برای یک مسئله واقعی مربوط به ایستگاه شارژ عمومی در کشور هلند به‌کار گرفته شده و بر اساس سه سناریوی تعریف‌شده و سیاست‌های مختلف، تعداد بهینه پنل‌های سیستم انرژی خورشیدی، باتری‌های سیستم ذخیره‌سازی انرژی و مقدار بهینه انرژی خریداری‌شده از شبکه برق و انرژی فروخته‌شده به شبکه برق در هر بازه زمانی به‌دست آمد و از نظر اقتصادی بررسی شد.

یافته‌ها: طبق نتایج به‌دست‌آمده، هر سه سناریو تحت شرایط مختلف، توجیه اقتصادی داشته و سودآور بوده‌اند.

نتیجه‌گیری: استفاده از انرژی خورشیدی و باتری‌ها، علاوه بر کاهش وابستگی ایستگاه شارژ به شبکه برق شهری، در سودآوری و درآمدزایی بیشتر برای ایستگاه شارژ، نقش کلیدی دارد.

کلیدواژه‌ها: خودروی الکتریکی، بهینه‌سازی، باتری، سیستم انرژی خورشیدی، فاکتورهای اقتصادی.

استناد: پارسیان، فرزانه؛ رضائی خوشان، بابک (۱۳۹۸). تعیین اندازه منابع انرژی ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی با توجه به فاکتورهای اقتصادی. مدیریت صنعتی، ۱۱(۲)، ۲۳۳-۲۵۴.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۲، صص. ۲۳۳-۲۵۴

DOI: 10.22059/imj.2019.267930.1007511

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

امروزه انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای تغییرات بی‌سابقه‌ای در آب و هوای کره زمین را باعث شده است. اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن است که تقریباً در تمامی فعالیت‌هایی که مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی هستند، تولید می‌شود. در شرایط کنونی کشور ایران در ردیف ده کشور تولیدکننده عمده گازهای گلخانه‌ای قرار دارد. طبق گزارش مؤسسه بین‌دولتی تغییرات آب و هوا^۱ بخش حمل‌ونقل مسئول تولید چهارده درصد گاز دی‌اکسیدکربن در یک سال است که جزء آلاینده‌های زیست‌محیطی و عامل اصلی افزایش دمای کره‌زمین به شمار می‌آید (پاچوری و همکاران^۲، ۲۰۱۴). همچنین این بخش بیش از بیست‌وپنج درصد از کل انرژی جهان را مصرف می‌کند که سهم سوخت‌های فسیلی در تأمین آن در حدود هفتاد درصد است (رحمانی اندبیلی و ونایاگامورثس^۳، ۲۰۱۵). از این رو ایجاد تغییری مطلوب در این بخش، کمک شایان توجهی برای محیط زیست و اقتصاد انرژی خواهد بود. یکی از راه‌های اقتصادی و پایدار برای این تغییر، جایگزینی خودروهای الکتریکی به جای خودروهای سوختی است. در راستای این جایگزینی، ابتدا باید چالش‌ها و مسائل موجود پیرامون خودروهای الکتریکی رفع شوند تا بتوانند مورد پذیرش عمومی قرار بگیرند. یکی از مهم‌ترین مسائل موجود، نبودن زیرساخت لازم برای شارژ خودروهای الکتریکی است. ایجاد و توسعه این زیرساخت، به‌گونه‌ای که ایستگاه‌های شارژ از سطح دسترسی مناسبی برخوردار باشند، در کنار سایر مشوق‌ها می‌تواند سرعت جایگزینی خودروهای سوختی را بیشتر کند. اما بالا بودن هزینه‌های تجهیز و ایجاد ایستگاه‌های شارژ، ضرورت دقت در طراحی آنها را دوچندان می‌کند. زیرا ممکن است، در صورت طراحی نامناسب، نه تنها توجیه اقتصادی نداشته باشند، بلکه به‌عنوان عاملی بازدارنده برای این جایگزینی نیز عمل کنند. از این رو طراحی درست و اقتصادی این زیرساخت امری ضروری است و می‌تواند راهکاری برای تسهیل روند جایگزینی این خودروها باشد. مسئله دیگر شارژ خودروهای الکتریکی، تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز این خودروها است. با افزایش تعداد این خودروها، نیروگاه‌های برق کنونی چه از نظر تأمین تقاضای لازم و چه از نظر کنترل آلودگی‌های تولیدشده پاسخ‌گوی حجم تقاضای به‌وجودآمده، نخواهند بود. از این رو تأمین انرژی ایستگاه‌های شارژ با کمک انرژی‌های تجدیدپذیر موضوعی اجتناب‌ناپذیر است. در حقیقت، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان عامل اساسی در دستیابی به توسعه پایدار معرفی می‌شوند و می‌توانند به تحقق اهداف توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی کشورها کمک کنند (تهامی‌پور، عابدی، کریمی باباحمدی و ابراهیمی‌زاده، ۱۳۹۵)، اما با تمامی این تفاسیر، باید توجه داشت که این انرژی‌ها ماهیت غیرقابل برنامه‌ریزی دارند و زمان و مقدار انرژی تولیدشده توسط آنها کاملاً به شرایط اقلیمی وابسته است. از این رو، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در کنار به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است. دو چالش مطرح‌شده، جزء زمینه‌های مهم پژوهشی موجود در رابطه با خودروهای الکتریکی هستند. در این پژوهش نیز با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی نظیر وجود سیستم ذخیره‌سازی انرژی و سیستم انرژی خورشیدی برای ایستگاه شارژ، تلاش شده تا با ارائه یک مدل بهینه‌سازی، هزینه‌های مربوط به احداث و مدیریت ایستگاه شارژ به‌گونه‌ای کم شود که بتواند همه تقاضاهای رسیده را پاسخ دهد. زیرا اگر ایستگاه‌های شارژ، به‌عنوان

1. Intergovernmental Panel on Climate

2. Pachauri et al.

3. Rahmani-Andebili & Venayagamoorthy

اصلی‌ترین زیرساخت، بتوانند به‌گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر تأمین نیاز مشتریان و کاهش وابستگی به شبکه برق، از نظر اقتصادی نیز سرمایه‌گذاران را به سرمایه‌گذاری تشویق کنند، می‌توان انتظار داشت که روند جایگزینی خودروهای الکتریکی با خودروهای سوختی تسهیل شود.

در ادامه، ابتدا پیشینه پژوهش بررسی شده و سپس روش پژوهش تشریح می‌شود. در بخش بعد تعریف مسئله به‌همراه فرضیات مربوطه ارائه می‌شود و سپس به بیان مدل ریاضی پیشنهادی پرداخته می‌شود. پس از آن، مدل برای یک مطالعه موردی تحت سه سناریوی مختلف حل شده و نتایج آنها تحلیل می‌شوند. در نهایت، جمع‌بندی و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

پیشینه پژوهش

یکی از محورهای اصلی توسعه در هر کشور، چگونگی تعامل بخش انرژی، محیط زیست و اقتصاد است. صنعت برق از مرحله تولید تا مصرف نهایی، مخاطرات و تبعات زیست‌محیطی بسیاری به وجود می‌آورد. شایان ذکر است که این بخش، زیربنای اساسی کلیه فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی جوامع به شمار می‌رود. فعالیت نیروگاه‌ها سبب انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای می‌شوند (اصغرزاده، مهرگان، شکوری گنجوی، مدرس یزدی و تقی زاده یزدی، ۱۳۹۶). در حال حاضر روند رشد خودروهای الکتریکی در سراسر جهان، بسیار بالاست، به طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ میلادی، پنجاه و چهار درصد از کل خودروهای جهان از نوع خودروهای الکتریکی باشند (داهد^۱، ۲۰۱۷). نفوذ بالای این خودروها در صنعت حمل‌ونقل باعث افزایش مصرف انرژی الکتریکی و وارد کردن بارهای اضافی به شبکه برق می‌شود. این بارهای اضافی اثرهای نامطلوب متعددی مثل ناپایداری شبکه که در نهایت ممکن است باعث خاموشی سراسری شبکه برق شود، بر شبکه برق وارد می‌کنند (آذر، حقی فام و علی بابایی، ۱۳۸۷). در عین حال، استفاده از خودروهای الکتریکی، تأثیرهای مثبتی بر محیط زیست و اقتصاد دارد. این خودروها نه تنها می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها را کاهش دهند، بلکه باعث افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شوند. همچنین، استفاده و فروش انرژی ذخیره‌شده در این خودروها به شبکه برق از لحاظ اقتصادی به سود صاحبان خودروهای الکتریکی خواهد بود. اثرهای خودروهای الکتریکی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: تأثیر انرژی مورد تقاضای خودروهای الکتریکی بر شبکه برق، اثرهای زیست‌محیطی و اثرهای اقتصادی. از مخاطرات احتمالی و دغدغه‌هایی که این خودروها برای حوزه‌های نام‌برده به وجود می‌آورند، نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. از این رو تحقیقات فراوانی برای حل این مسائل صورت گرفته و میلیون‌ها دلار برای توسعه خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن دغدغه‌ها و فرصت‌های موجود، سرمایه‌گذاری می‌شود. به‌طور مثال، گوگل ۱۰ میلیون دلار برای تحقیق و آزمایش خودروی الکتریکی و دولت ایالات متحده ۲ میلیارد دلار برای پیشرفت باتری‌های این خودروها هزینه کرده‌اند (شریف، اسلام و محمد^۲، ۲۰۱۶). علاوه بر این، مطالعات متعددی در زمینه زیرساخت‌های خودروهای الکتریکی انجام شده که توسعه این زیرساخت‌ها، به‌ویژه ایستگاه‌های شارژ

آنها را برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، امری اجتناب‌ناپذیر می‌دانند (نئومان، سشار و بئومگارتنر^۱، ۲۰۱۲). البته نحوه طراحی ایستگاه‌های شارژ دارای انرژی تجدیدپذیر از لحاظ اقتصادی با طراحی ایستگاه‌های شارژ معمولی متفاوت است و باید رویه‌ها و مدل‌های متناسب با آنها ارائه شود. در سال‌های اخیر به موضوع خودروهای الکتریکی و طراحی زیرساخت آنها بسیار توجه شده است و پژوهشگران سعی در دستیابی به اهداف مختلف در این حوزه داشته‌اند. اهدافی مانند بهینه‌سازی هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی ایستگاه‌های شارژ با جریان نقدی سالانه (روزاریو، شمس، رحمان، شریف و باشر^۲، ۲۰۱۵ و داس، هوکو، ماندال، پال و رایحان^۳، ۲۰۱۷) یا به حداکثر رساندن درآمد ایستگاه‌های شارژ (دیکرمن و هارسون^۴، ۲۰۱۰ و سورتومه و آل‌شارکائی^۵، ۲۰۱۵) کاهش تلفات برق در شبکه (آچا، گرین و شاه^۶، ۲۰۱۰ و توشار، آسی، مائیر و یودین^۷، ۲۰۱۴) و به حداقل رساندن بار پیک (لی، آل‌روبا، لیانگ و چاوی^۸، ۲۰۱۵) از اهداف دیگری هستند که می‌توان در رابطه با ایستگاه‌های شارژ به آنها اشاره کرد. در ادامه مقالاتی که به تعیین اندازه بهینه منابع تأمین انرژی ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی پرداخته‌اند، بررسی می‌شوند.

دای، لیو و وای^۹ (۲۰۱۹) یک مدل بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن کل هزینه‌های یک ایستگاه شارژ متصل به شبکه و تعیین اندازه بهینه سیستم انرژی خورشیدی و سیستم ذخیره‌کننده آن ایستگاه ارائه داده‌اند. برای حل مدل از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند عامل (MAPSO)^{۱۰} استفاده شده است و با در نظر گرفتن مقدار انرژی خورشیدی، میزان انرژی خریداری شده از شبکه برق، میزان شارژ و دشارژ باتری را تعیین می‌کند. دومینگوئز ناوارو، دوفو لویز، یوستالویو، آرتال سویل و برنال آگوستین^{۱۱} (۲۰۱۹) در مقاله خود بر اساس تئوری صف و ارزش زمانی پول در یک افق زمانی چندساله، در راستای حداکثر کردن ارزش فعلی درآمد یک ایستگاه شارژ سریع خودروی الکتریکی، یک مدل بهینه‌سازی ارائه می‌دهند. در این مدل‌سازی تعداد بهینه شارژرهای نوع سریع و ظرفیت باتری‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی، پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی تعیین می‌شود. محدودیت‌های مدل شامل معادلات فنی تعادل انرژی ایستگاه شارژ، محدودیت‌های تئوری صف و محدودیت‌های مربوط به روابط انرژی بین منابع مختلف تأمین انرژی با یکدیگر و با تقاضا است. در نهایت مدل برای سه سناریو در حالات مختلف توسط الگوریتم ژنتیک حل و تحلیل شده است. یان، ژانگ و کزونوویک^{۱۲} (۲۰۱۹) برای ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی در یک ساختمان تجاری مجهز به انرژی خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی باتری، یک الگوریتم بهینه‌سازی و کنترل هوشمند چهار مرحله‌ای ارائه داده‌اند. الگوریتم پیشنهاد شده آنها تلاش دارد تا با توجه به عدم اطمینان بالقوه و رضایت مشتری، بیشترین کاهش را در هزینه‌های عملیاتی ایجاد کند. مراحل مختلف الگوریتم بدین شرح است: مراحل نخست: بهینه‌سازی برنامه‌های مدیریت انرژی روز قبل، مرحله دوم: به‌روزرسانی و بهینه‌سازی تخفیف‌ها و پاداش مشارکت خودروهای الکتریکی در حالت چندسطح بودن تخفیفات قیمت شارژ، مرحله سوم: بهینه‌سازی برنامه‌های مدیریت انرژی روزهای بعد و مرحله چهارم: کنترل زمان

1. Neumann, Schär, & Baumgartner

3. Das, Hoque, Mandal, Pal, & Raihan

5. Sortomme & El-Sharkawi

7. Tushar, Assi, Maier & Uddin

9. Dai, Liu, & Wei

11. Domínguez-Navarro, Dufo-López, Yusta-Loyo, Artal-Sevil, & Bernal-Agustín

12. Yan, Zhang, & Kezunovic

2. D'Rozario, Shams, Rahman, Sharif & Basher

4. Dickerman & Harrison

6. Acha, Green & Shah

8. Le, Al-Rubaye, Liang, & Choi

10. Multi-Agent Particle Swarm Optimization

واقعی. بر اساس نتایج، بعد از حل مدل برای یک مطالعه موردی، چنین الگوریتمی در حالی که هزینه را کاهش می‌دهد، برای شرایط پیش‌بینی‌ناپذیر مقاومت بیشتری فراهم می‌کند، انگیزه بیشتری برای شراکت به کاربران خودروهای الکتریکی می‌دهد و سیستم بار ساختمان را با قابلیت اعتماد بیشتر در خدمت مشتریان قرار می‌دهد. کارماکر، احمد، حسین و سایکدر^۱ (۲۰۱۸) در پژوهش خود تلاش دارند تا اندازه بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بیوگاز و سیستم ذخیره‌ساز باتری سرب - اسیدی در یک ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی متصل به شبکه برق را با استفاده از بهینه‌سازی ترکیبی نرم‌افزار چندرسانه‌ای هومر^۲ با هدف کاهش انرژی خریداری‌شده از شبکه برق، کاهش هزینه‌ها، افزایش سودآوری ایستگاه و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، تعیین کنند. سالاپیک، جرژانیچ و کاپودر^۳ (۲۰۱۸) با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی ایستگاه شارژ سریع خودروهای الکتریکی، مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیحی ارائه کردند تا ضمن سنجش اقتصادی بودن طرح، اندازه بهینه سیستم‌های ذخیره باتری را تعیین کند. تجزیه و تحلیل انجام‌شده روی نتایج نشان می‌دهد که ارزش فعلی خالص طرح مثبت و نصب باتری‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی در حالت پایداری و ثبات بارگذاری به نفع سیستم بالادست برق است و ادغام یک سیستم ذخیره باتری با ایستگاه شارژ سریع خودروی الکتریکی، باعث افزایش کنترل و انعطاف‌پذیری در عدم اطمینان موجود سیستم‌های برق در آینده می‌شود و بر شبکه برق تأثیر مثبت دارد. در مقاله‌هایی که اشاره شد، علاوه بر تفاوت در برخی از محدودیت‌های فنی، از ارزش زمانی پول و فاکتورهای اقتصادی و مفاهیم ارزش دفتری و استهلاک تجهیزات صرف نظر شده است. همچنین در اغلب آنها، امکان تبادل دوطرفه انرژی با شبکه برق نیز در نظر گرفته نشده است. حافظ و بهاتاچاریا^۴ (۲۰۱۷) یک ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی را به‌گونه‌ای طراحی کردند که ارزش خالص فعلی هزینه‌ها و انتشار آلودگی محیطی ایستگاه شارژ طی یک افق زمانی بیست‌وپنج‌ساله بر اساس روش بهینه‌سازی ترکیبی نرم‌افزار چندرسانه‌ای هومر به حداقل برسد. منابع انرژی شامل انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ذخیره‌کننده انرژی باتری، شبکه برق و سوخت دیزل است. مدل، برای حل، دو سناریوی کلی دارد و هر سناریو در سه حالت بررسی شده و اقتصادی‌ترین طرح معرفی می‌شود. در سناریوی نخست ایستگاه شارژ به‌عنوان یک ریزشکه جدا از شبکه برق است و در سناریوی دوم این ایستگاه شارژ به شبکه برق متصل می‌شود. تجزیه و تحلیل انجام‌شده بین نتایج نشان می‌دهد که اگر ایستگاه شارژ در محدوده شهری کم تراکم و در امتداد بزرگراه‌ها برای سفرهای طولانی خودروهای الکتریکی باشد، سیستم ترکیبی باتری، انرژی خورشیدی و سوخت دیزلی بهترین عملکرد و کمترین ارزش خالص فعلی هزینه را دارد و اگر ایستگاه در محدوده شهری با تراکم جمعیت بالا باشد، اتصال آن به شبکه برق از نظر اقتصادی مناسب است. تفاوت این مقاله با مقاله حاضر در نوع محدودیت‌های فنی از قبیل سیستم ذخیره‌کننده و برخی محدودیت‌های اقتصادی است، همچنین نوع روش حل مسئله است. یوگیرومورا و هاعس^۵ (۲۰۱۷) ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی کاملاً سبزی، را بر اساس انرژی خورشیدی و سیستم ذخیره‌کننده انرژی بررسی کرده‌اند و یک الگوریتم مبتنی بر جست‌وجو برای حل مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح ارائه داده‌اند تا بتواند اندازه بهینه سیستم انرژی خورشیدی و سیستم ذخیره‌کننده انرژی را تعیین کند و هزینه‌های سرمایه‌گذاری

1. Karmaker, Ahmed, Hossain, & Sikder
 3. Salapić, Gržanić, & Capuder
 5. Ugirumurera & Haas

2. HOMER
 4. Hafez & Bhattacharya

سیستم شارژ را به حداقل برساند. اختلاف این مقاله با مقاله حاضر در نوع روابط و محدودیت‌های فنی مربوط به سیستم ذخیره‌ساز انرژی و نوع روش حل مدل است. همچنین در این مقاله منبع انرژی ایستگاه شارژ عمومی خودروی الکتریکی فقط انرژی خورشیدی است و از انرژی شبکه برق که باعث افزایش اطمینان برای تأمین انرژی خودروهای الکتریکی می‌شود، استفاده نشده است. سیستم تولید انرژی خورشیدی گران‌قیمت است و انرژی تولیدی آن همیشه در دسترس نیست. هرچند مشکل در دسترس نبودن همیشه انرژی خورشیدی توسط سیستم ذخیره‌کننده انرژی تا حدودی رفع شده است اما باز هم محققان مجبور شده‌اند فرض کنند، زمانی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست و باتری‌ها نیز انرژی ندارند، خودرو باید برای به دست آمدن انرژی منتظر بماند و بعد شارژ دریافت کند و در نهایت تلاش دارند تا این میزان تأخیر به حداقل برسد و رضایتمندی مشتری افزایش یابد. نگارستانی، فتوحی‌فیرزآباد، رستگار و رجیبی^۱ (۲۰۱۶) همین مسئله را در افق زمانی یک ساله حل کردند. البته آنها به فاکتورهای اقتصادی ایستگاه توجهی نداشته‌اند و روی پیش‌بینی انرژی مورد تقاضای ایستگاه تمرکز کرده‌اند. مرادی، آبدینی، توسی و حسینیان^۲ (۲۰۱۵) نیز این مسئله را با ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که بر کاهش تلفات برق، بهبود پایداری ولتاژ سیستم و کاهش هزینه‌های شارژ خودروهای الکتریکی تمرکز دارد، حل می‌کنند و بعد اقتصادی و فاکتورهای اقتصادی را در نظر نمی‌گیرند و در نهایت در مقاله خود نشان می‌دهند که استفاده از خودروهای الکتریکی به‌عنوان منبع قدرت فعال و راکتیو به بهبود مشخصات ولتاژ در شبکه کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند.

آتیا و یامادا^۳ (۲۰۱۶) در فضایی خارج از بحث ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی، برای بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی انرژی تجدیدپذیر با یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری در شبکه برق مسکونی، مدل ریاضی خطی مختلطی ارائه داده‌اند. این مدل با در نظر گرفتن رفتار تصادفی ذاتی انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت پیش‌بینی بار الکتریکی تحت سناریوهای عملیاتی مختلف به تحلیل اثر انعطاف‌پذیری بار بر اندازه اجزای سیستم برای یک شبکه برق مسکونی می‌پردازد. در این مقاله منابع تأمین انرژی شامل باد، خورشید، برق شبکه و باتری می‌شوند که با در نظر گرفتن تعاملات انرژی بین این منابع سعی می‌شود هزینه‌های ایستگاه به حداقل برسد. تابع هدف این مدل بهینه‌سازی برابر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی تجهیزات و هزینه خرید انرژی از شبکه برق شهری و درآمد حاصل از فروش انرژی به شبکه برق شهری است. محدودیت‌های مدل نیز شامل محدودیت تعادل انرژی، محدودیت تقاضا، محدودیت فنی مربوط به باتری‌های سیستم ذخیره‌ساز و سیستم انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی خریداری شده از شبکه و انرژی فروخته شده به شبکه برق شهری است. از نوآوری مدل می‌توان به نحوه فرمول‌بندی و تعیین تقاضا با توجه به دو نوع تقاضای کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر و همچنین ترکیب هزینه ساعتی انرژی و هزینه سالانه عملیاتی تجهیزات و هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات برای یک افق زمانی سه‌ساله اشاره کرد. از ایرادهای وارد شده بر مدل در نظر نگرفتن ارزش زمانی پول و فاکتورهای اقتصادی نظیر ارزش دفتری تجهیزات ایستگاه شارژ طی افق زمانی مد نظر است.

1. Negarestani, Fotuhi-Firuzabad, Rastegar, & Rajabi-Ghahnavieh
2. Moradi, Abedini, Tousi, & Hosseinian
3. Atia & Yamada

جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشینه پژوهش

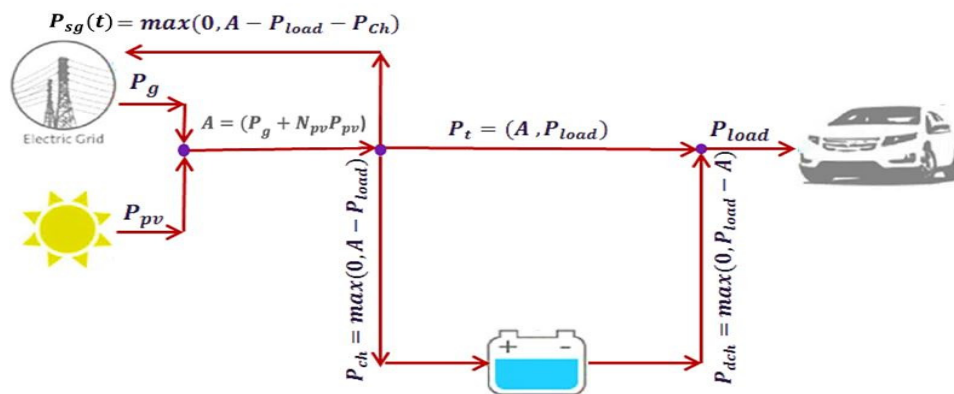
نویسندگان	اهداف	شاخص‌های بررسی شده	ابزار حل	نتایج
دای و همکاران، ۲۰۱۹	به حداقل رساندن هزینه	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر، تعیین الگوی شارژ و دشارژ و تعیین الگوی مبادله انرژی با شبکه	الگوریتم MAPSO	طرح سودآور و الگوریتم پیشنهادی دقیق و کاراست.
دومینگوئز ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹	بیشتر کردن درآمد	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر، تعیین الگوی مبادله انرژی با شبکه و تعداد بهینه شارژهای ایستگاه	الگوریتم ژنتیک	طرح ترکیب انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ مناسب و سودآور است.
یان و همکاران، ۲۰۱۹	به حداقل رساندن هزینه‌ها به گونه‌ای که در هر مرحله اهداف مد نظر تأمین شود.	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر، رضایت مشتری، عدم اطمینان بالقوه بهینه‌سازی برنامه مدیریت انرژی روز قبل، بهینه‌سازی تخفیفات برای شارژ مشتریان، بهینه‌سازی برنامه مدیریت انرژی روز بعد و کنترل زمان واقعی	الگوریتم چهار مرحله جست‌وجو کننده پیشنهادی	این الگوریتم در شرایط غیرقابل پیش‌بینی مقاومت بیشتری داشته، انگیزه بیشتری برای مشارکت با ایستگاه به کاربران داده و هزینه‌ها را به خوبی کاهش می‌دهد.
کارماکر و همکاران، ۲۰۱۸	به حداقل رساندن هزینه‌ها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی و تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر	نرم‌افزار HOMER	استفاده از بیوگاز در درازمدت به صرفه و سودآور است و باعث کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود.
سالاپیک و همکاران، ۲۰۱۸	به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی	الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی	نصب باتری در ایستگاه سودآور بوده و باعث ثبات بارگذاری برای سیستم بالادست می‌شود.
حافظ و بهاتاچاریا، ۲۰۱۷	به حداقل رساندن هزینه‌ها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر و تعیین اندازه سیستم سوخت دیزل	نرم‌افزار HOMER	با توجه تراکم مشتریان مدل پیشنهادی شرایط مختلفی برای تولید انرژی پیشنهاد می‌دهد که اقتصادی است.
یوگیرومورا و هاعس، ۲۰۱۷	به حداقل رساندن هزینه‌ها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی و تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر	الگوریتم جست‌وجو کننده پیشنهادی	الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌های غیرخطی کاراو مناسب است. اندازه سیستم ذخیره‌ساز و انرژی تجدیدپذیر بستگی به ظرفیت صف و تعداد شارژهای ایستگاه دارد.
نگارستانی و همکاران، ۲۰۱۶	به حداقل رساندن هزینه‌ها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی و پیش‌بینی میزان تقاضا وارد شده به ایستگاه در هر لحظه	الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی	سیستم ذخیره‌سازی هزینه‌های ایستگاه را کاهش می‌دهد و افزایش بار پیک شبکه را محدود می‌کند. ظرفیت بهینه سیستم ذخیره‌ساز تحت تأثیر تنوع خودروهای پلاگین موجود در بازار است و اگر دامنه تنوع این خودروها افزایش یابد، اندازه بهینه این سیستم‌ها کاهش می‌یابد.

ادامه جدول ۱

نویسندگان	اهداف	شاخص‌های بررسی شده	ابزار حل	نتایج
آتیا و یامادا، ۲۰۱۶	به حداقل رساندن هزینه‌ها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر و پیش‌بینی میزان تقاضا در هر لحظه براساس فاکتورهای مختلف	Cpplx	تمرکز مقاله بر بررسی تأثیر انعطاف‌پذیری تقاضای برق واحدهای مسکونی در تعیین اندازه بهینه سیستم ترکیبی تأمین انرژی و برآورد مزین بالقوه اقتصادی چنین سیستم‌هایی در سناریوهای مختلف است و به این نتیجه رسیده‌اند که انعطاف‌پذیری تقاضای برق یک سیستم تأمین انرژی، باعث تشویق این نوع سیستم‌ها به استفاده از تکنولوژی‌های فروش انرژی به شبکه برق می‌شود، به‌خصوص اگر دارای سیستم ذخیره‌ساز انرژی باشد.
مرادی و همکاران، ۲۰۱۵	بهینه‌سازی چند هدفه: کاهش تلفات برق، بهبود پایداری ولتاژ و کاهش هزینه شارژ خودروها	تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی و تعیین اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر	الگوریتم تکاملی دیفرانسیل	ارائه یک برنامه‌ریزی بهینه برای شارژ و دشارژ باتری خودروهای الکتریکی، مشخصات ولتاژ شبکه را بهبود می‌دهد و افزایش ضریب تابع هدف هزینه‌های انرژی، باعث می‌شود تقاضای خودروهای الکتریکی به سمت ساعاتی انتقال یابد که سرعت باد و میزان انرژی خورشیدی بالاست.

با توجه پیشرفت‌های حاصل شده در بخش فنی خودروهای الکتریکی و اهمیت مسائل زیست‌محیطی، روند گسترش خودروهای الکتریکی در بازار، شتاب بیشتر پیدا کرده است. از این رو، طراحی ایستگاه‌های شارژ به‌عنوان زیرساخت اصلی آنها، جزء جدایی‌ناپذیر از صنعت حمل‌ونقل آینده خواهد شد و طراحی این ایستگاه‌ها با در نظر گرفتن زیرساخت‌های شبکه برق و رفع دغدغه‌های مربوط به ادغام آنها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این میان در نظر گرفتن فاکتورهای مالی در یک افق زمانی مشخص (متناسب با پیشرفت فنی خودروهای الکتریکی) هم‌زمان با مسائل فنی، شکاف تحقیقاتی است که در پیشینه پژوهش‌های این حوزه در سال‌های قبل از ۲۰۱۷ کمتر به آن توجه شده است. اهمیت مدل‌سازی ایستگاه شارژ تحت چنین فاکتورهایی را می‌توان به‌خوبی در مقالات سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ که موازی با مقاله حاضر انجام و به چاپ رسیده‌اند، مشاهده کرد. البته شایان ذکر است، در مقالات سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ نیز چنین به نظر می‌رسد که بیشتر ایده افزودن فاکتورهای اقتصادی به مدل و نزدیک کردن هرچه بیشتر آن به دنیای واقعی مد نظر بوده و از پرداختن به جزئیاتی مثل ارزش دفتری و استهلاک تجهیزات یا همجنس نبودن هزینه‌های سالانه عملیاتی تجهیزات با هزینه‌های یک بار پرداخت شده برای سرمایه‌گذاری آنها در ابتدای افق زمانی، تقریباً چشم‌پوشی شده است. مقاله حاضر با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و فاکتورهای اقتصادی (نظیر ارزش دفتری تجهیزات ایستگاه)، برای مسئله طراحی ایستگاه‌های شارژ خودروی الکتریکی در افق زمانی بلندمدت، مدل ریاضی ارائه می‌دهد. در این مدل، ضمن محاسبه هزینه‌ها و درآمدهای ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی مطابق با مفروضات بیان شده،

اندازه بهینه سیستم تولید انرژی خورشیدی و سیستم ذخیره‌کننده انرژی، به گونه‌ای تعیین می‌شوند که تمامی تقاضاهای رسیده به ایستگاه نیز پاسخ داده شوند و حداکثر سود را برای مالک ایستگاه در دوره بهره‌برداری فراهم کند. مدل مفهومی ایستگاه شارژ در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی انرژی خورشیدی تولیدشده از مجموع پنل‌ها و انرژی خریداری‌شده از شبکه به‌عنوان انرژی ورودی، وارد ایستگاه شارژ شده و برای فروش به شبکه، برآوردن تقاضا و شارژ باتری‌ها استفاده می‌شود. اگر انرژی ورودی به ایستگاه از تقاضای رسیده در لحظه t بیشتر باشد، بعد از برآورد تقاضا، مقدار مازاد آن در باتری ذخیره شده و به شبکه فروخته می‌شود. اما اگر تقاضای موجود در لحظه t بیشتر از انرژی ورودی به ایستگاه باشد، همه انرژی ورودی، برای پاسخ‌گویی به تقاضا ارسال شده و سپس باقی‌مانده تقاضا از طریق باتری‌ها تأمین می‌شود.

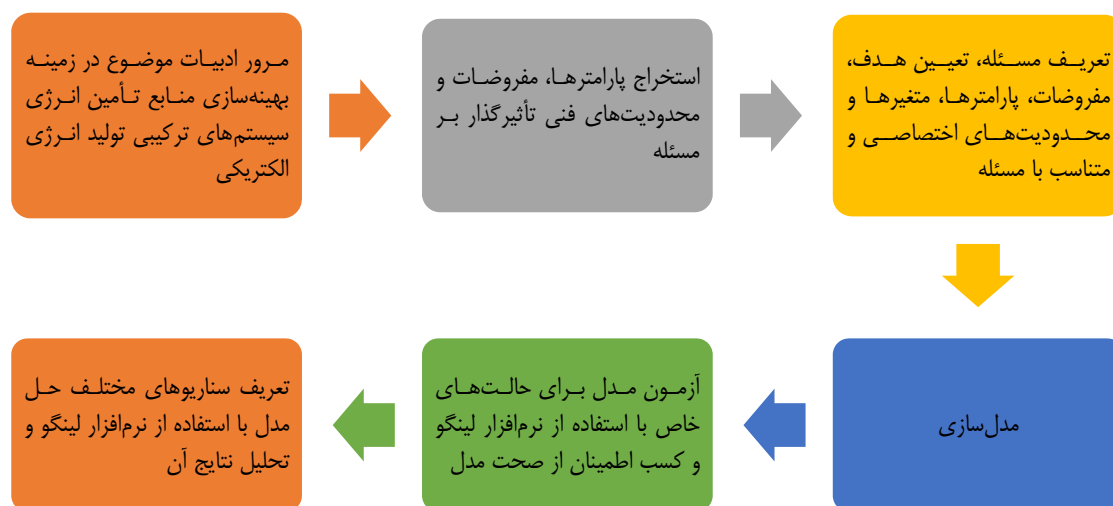


شکل ۱. مدل مفهومی جریان انرژی ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی

روش‌شناسی پژوهش

مسئله پژوهش بر اساس نیازسنجی یکی از شرکت‌های صاحب ایستگاه‌های شارژ فعال در کشور هلند انجام شده است و داده‌های مربوط به تقاضا، داده‌های واقعی برداشت‌شده از بانک اطلاعات این شرکت مربوط سال ۲۰۱۳ هستند. برای سایر داده‌ها نظیر شرایط و محدودیت‌های فنی باتری و سیستم انرژی خورشیدی، با توجه به مشخصات فنی ایستگاه‌های شارژ، از مقالاتی که در منابع ذکر شده و در سال ۲۰۱۶ به چاپ رسیده‌اند، استفاده شده است. ابتدا بر اساس مقالات مرتبط و نظر کارشناسان مربوطه، تعریف درستی از مسئله ارائه شده و هدف آن مشخص شد و سپس پارامترها و متغیرهای آن تعیین شده و طی این پروسه محدودیت‌ها و مفروضات مهم استخراج شده‌اند و در نهایت مدل ریاضی مسئله طراحی شده است. سپس، از نظر درستی روابط و معادلات ریاضی و وجود یا عدم وجود محدودیت‌های زائد، بررسی شد. پس از آن توسط نرم‌افزار لینگو برای مسائل با ابعاد کوچک و بزرگ آزمایش و بررسی شد. در نهایت مدل پیشنهادی برای یک مسئله واقعی به کارگرفته، برای داده‌های آن سناریوهای مختلف تعریف شد و نتایج هر سناریو بررسی و تحلیل شده است. روش تحقیق مقاله حاضر برحسب هدف، کاربردی و قطعی است و از نظر جمع‌آوری داده‌ها از نوع کتابخانه‌ای محسوب می‌شود.

در ابتدای کار، بعد از طرح مسئله، مطالعات انجام شده در حوزه تأمین انرژی برای ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در سال ۲۰۱۷ و قبل از آن بررسی شد که در میان آنها مقالات کمی وجود داشتند که ایده کاری مطرح شده برای حل مسئله را پوشش دهند، از این رو تلاش شد تا دایره مطالعاتی وسیع تر شود و مقالاتی که در رابطه با تأمین انرژی برای سایر حوزه‌ها ارائه شده‌اند (نظیر واحدهای مسکونی) نیز بررسی شوند. سپس بعد از بررسی تمامی مقالات، عواملی که می‌توانستند در تصمیم‌گیری مؤثر باشند شناسایی و به تفکیک بررسی شدند. عواملی مؤثری که می‌توان به‌طور خلاصه مطرح کرد شامل مواردی نظیر فاکتورهای اقتصادی، انواع هزینه‌های هر تجهیز مورد نیاز برای ایستگاه شارژ (سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، سیستم‌های تولید انرژی خورشیدی، مبدل‌ها، امکان خرید و فروش از انرژی شبکه برق)، محدودیت‌های فنی تجهیزات و انرژی‌های تبادل شده درون ایستگاه شارژ و انرژی تبادل شده بین ایستگاه شارژ و خارج از ایستگاه می‌شوند. بعد از تعیین عوامل مؤثر، متغیرها، پارامترها و محدودیت‌های مهم با توجه به شرایط و مفروضات مسئله تعیین و مدل‌سازی انجام شد. بعد از حل مدل و آزمایش صحت آن، مدل برای سه سناریوی مختلف حل شده و نتایج به‌دست‌آمده تحلیل شد.



شکل ۲. گام‌های اجرای پژوهش

تعریف مسئله و مدل‌سازی

مدل مفهومی این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مسئله یک ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی با تقاضاهای مشخص در نظر گرفته شده که قادر است تقاضای خود را از طریق خرید انرژی از شبکه برق شهری و همچنین انرژی تولیدشده از مجموعه پنل‌های خورشیدی، تأمین کند. یک مجموعه باتری نیز به‌عنوان سیستم ذخیره‌کننده انرژی وجود دارد که با ذخیره انرژی مازاد بعد از پاسخ‌گویی به تقاضاهای موجود، وظیفه پشتیبانی از کل مجموعه را به عهده می‌گیرد. همچنین این امکان برای ایستگاه شارژ وجود دارد تا انرژی مازاد را نیز به شبکه برق شهری بفروشد. از آنجا که سرمایه‌گذاری بر ایستگاه‌های شارژ یک مسئله بلندمدت است، در طراحی آنها باید

افق زمانی بلندمدت در نظر گرفته شود. از این رو، فاکتورهای اقتصادی به‌ویژه ارزش زمانی پول طی افق زمانی اهمیت ویژه‌ای می‌یابند. با توجه به این توضیحات، پارامترها و متغیرهای مسئله در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. متغیرها، پارامترها و اندیس‌های مدل

نماد	تعریف	نماد	تعریف
η_{ch}	کارایی شارژ باتری	t	ساعت‌های یک سال
\underline{S}, \bar{S}	حداکثر و حداقل سطح شارژ باتری	C_{pv}	هزینه خرید پنل خورشیدی
$P_{load}(t)$	انرژی مورد تقاضا در لحظه t	M_{pv}	هزینه عملیاتی سالانه پنل خورشیدی
N_{pv}	تعداد پنل‌های خورشیدی	C_b	هزینه خرید باتری
N_b	تعداد باتری‌ها	M_b	هزینه عملیاتی سالانه باتری
$P_{ch}(t)$	انرژی ورودی به باتری‌ها در لحظه t	$C_g(t)$	هزینه خرید انرژی از شبکه برق در لحظه t
$P_g(t)$	انرژی خرید شده از شبکه در لحظه t	\bar{P}	حداکثر میزان شارژ و دشارژ باتری
$P_{ach}(t)$	انرژی خروجی از باتری‌ها در لحظه t	$P_{pv}(t)$	انرژی برداشت شده از پنل در لحظه t
$P_{sg}(t)$	انرژی فروخته شده به شبکه در لحظه t	$\underline{N}_b, \bar{N}_b$	حداکثر و حداقل تعداد باتری
H	آخرین لحظه افق زمانی پنج‌ساله یا در واقع آخرین ساعت از مجموعه ساعات افق زمانی	$\underline{N}_{pv}, \bar{N}_{pv}$	حداکثر و حداقل تعداد پنل‌ها
$S(t)$	سطح شارژ باتری در لحظه t	\bar{P}_g	حداکثر میزان خرید انرژی از شبکه
$U(t)$	متغیر صفر و ۱ (انرژی شبکه برق خریداری می‌شود = ۱ و انرژی به شبکه برق فروخته می‌شود = ۰)	$P_l(t)$	مقدار انرژی رسیده از منابع تأمین انرژی برای تأمین تقاضا در لحظه t
C_{sg}	قیمت فروش انرژی به شبکه برق	-	-

در این پژوهش افق زمانی برابر پنج سال و کلیه جریان‌های ورودی و خروجی انرژی به ایستگاه، یکسان و از نوع DC فرض شده‌اند. تقاضا الگوی مشخصی دارد و ایستگاه شارژ باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که در تمام لحظات، توانایی پاسخ‌گویی به تمامی تقاضاها را داشته باشد. در هر بازه زمانی امکان خرید و فروش انرژی به شبکه وجود دارد. انرژی خریداری شده از شبکه و انرژی فروخته شده به شبکه برق دارای محدودیت برداشت ساعتی بوده و هزینه خرید انرژی از شبکه برق طی ۲۴ ساعت متفاوت است. این الگوی قیمتی برای هر روز طی افق زمانی ثابت است. قیمت فروش انرژی برق نیز به شبکه بر اساس قرارداد تعیین می‌شود. خرید انرژی از شبکه و فروش انرژی به شبکه نمی‌تواند هم‌زمان رخ دهد. طول عمر باتری‌ها برابر با پنج و طول عمر پنل‌ها برابر با ۲۵ سال و هزینه عملیاتی آنها طی افق زمانی، ثابت و برابر با درصدی از هزینه خرید آنها است. به دلیل محدودیت فضا، حداکثر تعداد باتری و پنل قابل نصب در ایستگاه مشخص است. نوع پنل‌ها و باتری‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل‌های فنی از قبل مشخص شده‌اند. شایان ذکر

است، تمامی هزینه‌های ایستگاه شارژ به‌جز هزینه‌های مربوط به پنل‌ها و باتری‌ها، ثابت است و با توجه به اینکه روی تابع هدف مسئله تأثیری ندارند، در نظر گرفته نشده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، در این مسئله هدف نحوه طراحی بهینه و توسعه ایستگاه طی افق برنامه‌ریزی، تعیین میزان تبادلات انرژی با شبکه، تعیین تعداد بهینه منابع (پنل‌های خورشیدی و ظرفیت باتری) است، به‌گونه‌ای که هزینه‌های ایستگاه حداقل و درآمد به‌دست‌آمده حداکثر شود. با توجه به مفروضات مسئله و توضیحات بالا در ادامه مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه خواهد شد و روابط آن تشریح می‌شوند.

تابع هدف مسئله به‌دنبال کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن درآمد ایستگاه است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی سالانه برای پنل‌ها و باتری‌ها و هزینه‌های سالانه خرید انرژی از شبکه است. همچنین درآمدهای فروش انرژی به شبکه برق نیز به‌عنوان تنها درآمد این ایستگاه در نظر گرفته شده است. از آنجا که تقاضای شارژ ثابت بوده و باید به همه این تقاضاها پاسخ داده شود، درآمد حاصل از این بخش ثابت است و در تابع هدف آورده نشده است. بنابراین، تابع هدف مسئله تحت رابطه ۱ ارائه می‌شود:

$$\text{Min}Z = \left(CRF_5 \times C_{PV} - BV_5 \times PW_5 \times CRF_5 + M_{PV} \right) \times N_{PV} + \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\left(CRF_5 \times C_b + M_b \right) \times N_b + \sum_{t=1}^H C_g(t) \times P_g(t) - \sum_{t=1}^H C_{sg} \times P_{sg}(t)$$

در رابطه ۱، CRF_n فاکتور بازیافت در مدت n دوره؛ PW_n فاکتور ارزش فعلی یک بار پرداخت و BV_n ارزش دفتری در دوره n است.

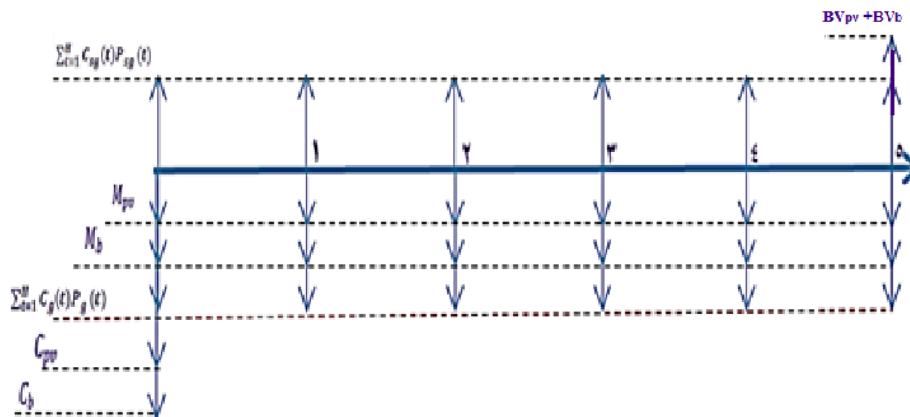
جریان مالی مسئله در شکل ۳ ترسیم شده است. تمام هزینه‌ها و درآمدها در تابع هدف مدل به‌جز ارزش دفتری پنل خورشیدی و هزینه سرمایه‌گذاری برای پنل‌ها و باتری‌ها از جنس یکنواخت سالانه هستند. از این رو برای یکسان‌سازی، ارزش دفتری پنل خورشیدی با استفاده از فاکتور ارزش فعلی یک بار پرداخت به ابتدای افق زمانی منتقل می‌شود و سپس در کنار هزینه سرمایه‌گذاری پنل‌ها و باتری‌ها توسط فاکتور بازیافت سرمایه بر اساس رابطه ۲، به هزینه‌های یکنواخت سالانه تبدیل می‌شوند. پس از تبدیل کلیه هزینه‌های تابع هدف به‌صورت جریان‌های مالی یکنواخت سالانه، مدل بهینه‌سازی حل می‌شود.

$$CRF_n = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

شایان ذکر است، پنل‌ها در پایان افق زمانی دارای ارزش دفتری هستند که از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شوند، در این رابطه SV ارزش اسقاطی و P مقدار هزینه سرمایه‌گذاری پنل‌هاست.

$$BV_n = P - \sum_{t=1}^n \frac{P - SV}{n} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$PW_n = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (\text{رابطه ۴})$$



شکل ۳. جریان مالی در طول افق زمانی

در این مدل محدودیت مربوط به انرژی خریداری شده از شبکه برق تحت رابطه ۵ تا رابطه ۷ به این ترتیب بیان می‌شود که مقدار انرژی خریداری شده از شبکه و مقدار انرژی فروخته شده به شبکه در هر بازه زمانی، نمی‌تواند از یک آستانه مشخص بیشتر باشد. همچنین امکان خرید و فروش انرژی به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نیست.

$$P_g(t) \leq \bar{P}_g \times u(t) \quad \forall t, \quad 0 \leq t \leq H \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$P_g(t) \leq \bar{P}_{sg} \times (1 - u(t)) \quad \forall t, \quad 0 \leq t \leq H \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$u(t) \in \{0, 1\} \quad \forall t, \quad 0 \leq t \leq H \quad (\text{رابطه ۷})$$

محدودیت پاسخ‌گویی به تقاضای هر بازه زمانی، از طریق رابطه ۸ بیان می‌شود. در این رابطه، مقدار تقاضای وارد شده به ایستگاه در هر لحظه با جمع انرژی تخلیه شده از باتری‌ها و مجموع انرژی‌های رسیده از منابع تأمین انرژی برابر است تا اطمینان حاصل شود که تمامی تقاضاهای موجود برآورده می‌شوند.

$$P_{load}(t) = P_l(t) + P_{ach}(t) \quad \forall t, \quad 0 \leq t \leq H \quad (\text{رابطه ۸})$$

محدودیت تعادل انرژی‌های ورودی و خروجی مجموعه ایستگاه شارژ به صورت رابطه ۹ در نظر گرفته شده است. این رابطه کنترل می‌کند که در هر ساعت مجموع انرژی‌های رسیده به ایستگاه با مجموع انرژی ارسال شده از ایستگاه برای تأمین تقاضا، شارژ باتری و فروش به شبکه برابر باشد.

$$P_l(t) + P_{ch}(t) + P_{sg}(t) = P_g(t) + N_{pv} \times P_{pv}(t) \quad \forall t, \quad 0 \leq t \leq H \quad (\text{رابطه ۹})$$

محدودیت تعداد پنل و باتری از طریق رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ و محدودیت عدد صحیح و مثبت این تعداد در رابطه ۱۲ معرفی می‌شود. شایان ذکر است، حد بالا برای تعداد باتری و پنل بر اساس محدودیت فضای ایستگاه از قبل تعیین شده است.

$$\underline{N_b} \leq N_b \leq \overline{N_b} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\underline{N_{PV}} \leq N_{pv} \leq \overline{N_{PV}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$N_b \geq 0, \text{int} \quad N_{pv} \geq 0, \text{int} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

محدودیت‌های سیستم ذخیره‌کننده در رابطه‌های ۱۳ تا ۱۶ لحاظ شده‌اند.

$$S(t) = S(t-1) + \eta_{ch} \times P_{ch}(t) - P_{dch}(t) \quad \forall t, 0 \leq t \leq H \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$S_{Min} \times N_b \leq S(t) \leq S_{Max} \times N_b \quad \forall t, 0 \leq t \leq H \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$P_{ch}(t) \leq N_b \times \overline{P} \quad \forall t, 0 \leq t \leq H \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$P_{dch}(t) \leq N_b \times \overline{P} \quad \forall t, 0 \leq t \leq H \quad \text{رابطه ۱۶}$$

رابطه ۱۳، بیان‌کننده سطح شارژ مجموعه باتری‌ها در هر بازه زمانی است. سطح شارژ در ابتدای افق زمانی (لحظه صفر) نیز مقدار ثابت و مشخصی در نظر گرفته شده است. رابطه ۱۴ کنترل می‌کند که سطح شارژ مجموعه باتری‌ها در هر لحظه باید بین مقدار حداقل و حداکثر مجاز قرار گیرد. در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ بیان می‌شود که مقدار انرژی واردشده به ایستگاه برای شارژ باتری و انرژی برداشت‌شده از باتری در هر بازه زمانی نمی‌تواند بیشتر از حداکثر مقدار شارژ و دشارژ باشد. رابطه ۱۷ محدودیت مثبت بودن مقادیر متغیرها را کنترل می‌کند.

$$P_{sg}(t), P_{ch}(t), P_{dch}(t), S(t), P_l(t), P_g \geq 0 \quad \forall t, 0 \leq t \leq H \quad \text{رابطه ۱۷}$$

یافته‌های پژوهش

برای حل مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح از نرم‌افزار لینگو ۹ استفاده شده و الگوریتم حل از نوع انشعاب و تحدید است. این روش یک روش غیرهدفمند اما هوشمند به شمار می‌رود که در مقایسه با سایر روش‌ها زمان حل کمی دارد و برای مسائلی که دارای پیچیدگی زمانی هستند، مناسب‌تر است. در این روش با استفاده از تابع تخمین که تابع محدودکننده است از گسترش نابه‌جا و بیش از حد شاخه‌های درخت جلوگیری می‌شود.

در ادامه مدل ارائه‌شده برای داده‌های یک ایستگاه شارژ در کشور هلند و تحت سه سناریوی مختلف حل می‌شود. در سناریوی نخست مدل بر اساس اطلاعات اولیه مسئله حل شده و در دو سناریوی بعدی نتایج مدل در مقابل تغییر برخی پارامترها بررسی و مقایسه می‌شوند. سناریوی دوم رفتار مدل را در مقابل محدودیت‌های قرارداد خرید از شبکه بررسی می‌کند، این آنالیز می‌تواند به مدیران در انتخاب نوع قرارداد مناسب و تعیین حدود آن کمک کند. در این سناریو محدودیت خرید از شبکه در مقایسه با سناریوی نخست کاهش می‌یابد و در عمل، مقدار این محدودیت با توجه به نوع قراردادها تعیین می‌شود. در سناریوی سوم، هزینه خرید و نرخ کارایی شارژ باتری‌ها در مقایسه با سناریوی نخست

افزایش یافته است. این سناریو به دنبال بررسی تأثیر انواع مختلف سیستم ذخیره کننده انرژی از نظر کارایی شارژ بر نتایج مدل است.

همان طور که در بخش تعریف مسئله نیز اشاره شد، تقاضا برای این ایستگاه طی افق زمانی دارای مقدار مشخصی است. در این مطالعه، از پنل نوع ۹ کیلووات و باتری لیتیوم یونی با اندازه ۹۰ کیلووات استفاده می شود. حداقل تعداد باتری و پنل برای نصب، ۱ و حداکثر تعداد آنها ۵۰ عدد در نظر گرفته شده است. محدودیت برداشت از شبکه حداکثر ۵۰۰ کیلووات در هر ساعت است و نرخ بهره سالانه برابر ۱۰ درصد و ارزش اسقاط برابر ۵ درصد هزینه سرمایه گذاری، فرض شده اند. سایر اطلاعات مسئله در جدول های ۲ و ۳ معرفی شده است. قیمت فروش انرژی به شبکه برق طبق تعرفه تغذیه^۱، ثابت (کوتور، کوری، کریچیک و ویلیامز^۲، ۲۰۱۰) و برابر $0.7 \$/kwh$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. پارامترهای و مشخصات مطالعه موردی

هزینه عملیاتی پنلها و باتری	طول عمر پروژه	SOC	SOC ₀	η_{ch}	هزینه خرید باتری (\$/kw)	هزینه خرید پنل PV (\$/kw)
۲ درصد از هزینه خرید	۵ (سال)	۰/۳	۰/۹۵	۰/۵	۲۵۰۰	۳۰۰۰

منبع: آتیا و یامادا (۲۰۱۶)

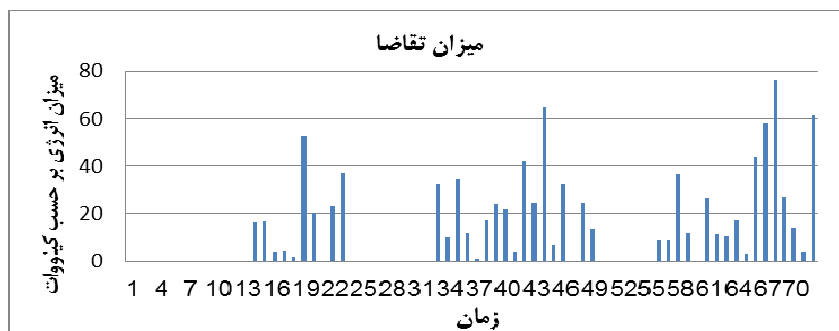
جدول ۴. قیمت انرژی الکتریکی در بازار برق

زمان (h)	قیمت (\$/kwh)	زمان (h)	قیمت (\$/kwh)	زمان (h)	قیمت (\$/kwh)	زمان (h)	قیمت (\$/kwh)
۱	۰/۰۳۳	۷	۰/۰۳۳	۱۳	۰/۲۱۵	۱۹	۰/۰۵۰
۲	۰/۰۲۷	۸	۰/۰۵۴	۱۴	۰/۵۷۲	۲۰	۰/۰۶۱
۳	۰/۰۰۲	۹	۰/۲۱۵	۱۵	۰/۲۸۶	۲۱	۰/۱۸۱
۴	۰/۰۱۷	۱۰	۰/۵۷۲	۱۶	۰/۲۷۹	۲۲	۰/۰۷۷
۵	۰/۰۱۷	۱۱	۰/۵۷۲	۱۷	۰/۰۸۶	۲۳	۰/۰۴۳
۶	۰/۰۲۹	۱۲	۰/۵۷۲	۱۸	۰/۰۵۹	۲۴	۰/۰۳۷

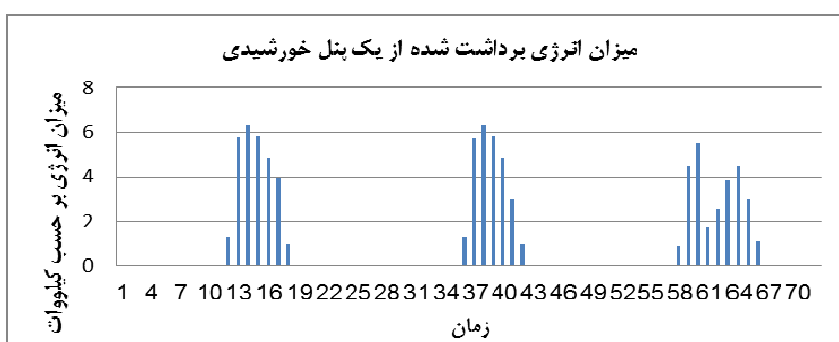
الگوی تقاضاهای ایستگاه شارژ بر اساس داده های واقعی یک ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی برای یک سال به تفکیک ساعت (۸۷۶۰ ساعت) است و این الگو برای هر سال در افق زمانی تکرار می شود (شکل ۴). الگوی تقاضا برای ایستگاه شارژ را نشان می دهد و در شکل ۵ میزان انرژی دریافتی از یک پنل خورشیدی با اندازه ۹ کیلووات نمایش داده شده است که برای وضوح بیشتر، داده های این نمودارها مربوط به سه روز ابتدای افق زمانی است.

1. Feed-in tariff

2. Couture, Cory, Kreycik, & Williams



شکل ۴. نمودار میزان تقاضای سه روز ابتدای سال



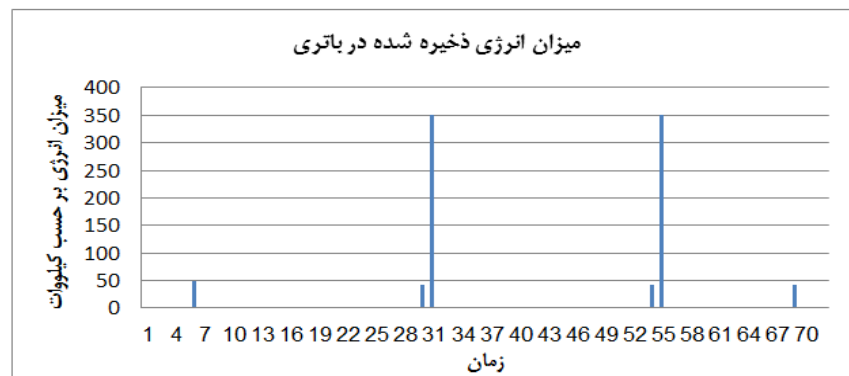
شکل ۵. میزان برداشت از یک پنل ۹ کیلوواتی طی سه روز نخست ابتدای سال

نتایج حل مدل تحت داده‌های سناریوی نخست در جدول ۴ و شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است. در جدول ۴، نتایج حل مدل شامل تعداد بهینه پنل‌ها و باتری‌ها، هزینه سالانه انرژی خریداری شده از شبکه برق شهری، درآمد سالانه انرژی فروخته شده به شبکه برق شهری و مقدار تابع هدف مسئله ارائه شده‌اند.

جدول ۵. نتایج حل مدل بهینه‌سازی سناریوی نخست

مقدار بهینه تابع هدف	مجموع انرژی فروخته شده سالانه به شبکه برق شهری	مجموع انرژی خریداری شده سالانه از شبکه برق شهری	تعداد پنل‌های نصب شده	تعداد باتری‌های نصب شده
\$-۴۲۷۰۹۵	\$۲۶۶۶۲۴/۵۷	\$۳۸۵۵/۹۴	۵۰	۵

شکل ۶ میزان انرژی ذخیره شده در باتری را نشان می‌دهد که برای وضوح بیشتر و مقایسه و تحلیل آنها با سایر اطلاعات، این شکل نیز فقط اطلاعات سه روز نخست افق زمانی را نمایش می‌دهد. با توجه به اطلاعات مسئله نظیر قیمت خرید انرژی از شبکه (جدول ۳)، انرژی خورشیدی (شکل ۵) و انرژی ذخیره شده در باتری (شکل ۶)، مدل، انرژی ذخیره شده در باتری را تا حد امکان از پنل‌های خورشیدی تأمین می‌کند و در بعضی موارد، سعی می‌کند در ساعت‌های غیر پیک که قیمت خرید انرژی از شبکه پایین‌تر است، انرژی ذخیره شده در باتری را از طریق خرید انرژی از شبکه تأمین کند.



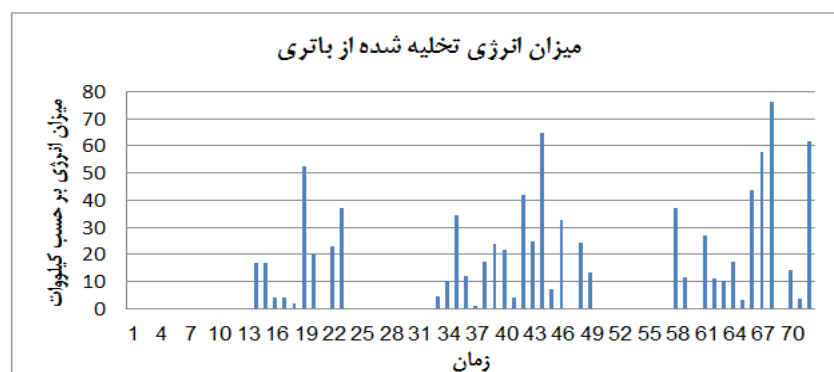
شکل ۶. انرژی ذخیره شده در باتری در هر ساعت برای سناریوی نخست

شکل ۷ نمودار خرید انرژی از شبکه را نشان می‌دهد. از این نمودار چنین بر می‌آید که در تعداد دفعات معدودی که قیمت خرید انرژی حداقل است، خرید از شبکه انجام شده و اتکای ایستگاه برای تأمین تقاضا و فروش به شبکه بر استفاده از پنل‌ها و باتری بوده است.



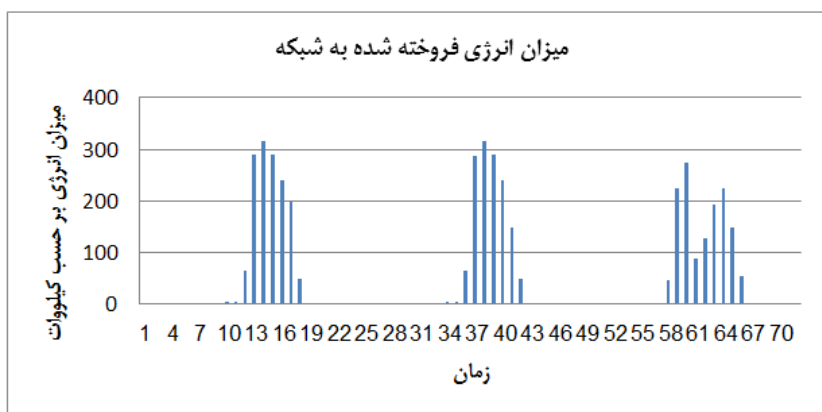
شکل ۷. انرژی خریداری شده از شبکه در هر ساعت برای سناریوی نخست

شکل ۸ انرژی تخلیه شده از باتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان‌هایی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست (مانند زمان ۲۲) و هزینه خرید انرژی از شبکه نیز زیاد است، برای پاسخ‌گویی به تقاضا از باتری استفاده می‌شود.



شکل ۸. انرژی تخلیه شده از باتری در هر ساعت برای سناریوی نخست

شکل ۹ مربوط به نمودار فروش انرژی به شبکه برق است. همان طور که مشاهده می‌شود، با توجه به خرید انرژی از شبکه (شکل ۷) و تقاضا (شکل ۴) فروش انرژی به شبکه برق در ساعت‌هایی که تقاضایی وجود ندارد، تقاضا کم است یا خرید از شبکه انجام نمی‌شود، اتفاق می‌افتد.



شکل ۹. انرژی فروخته شده به شبکه در هر ساعت برای سناریوی نخست

در ادامه، رفتار مدل در مقابل «محدودیت برداشت از شبکه» و «هزینه باتری و پنل» بررسی شده است. در سناریوی دوم، مقدار محدودیت خرید از شبکه در مقایسه با سناریوی نخست، کاهش یافته و برابر ۱۰۰ کیلووات در ساعت در نظر گرفته شده است. نتایج حل این سناریو در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج این جدول، با محدودتر شدن برداشت انرژی از شبکه برق (سناریوی دو)، تعداد باتری‌ها کاهش داشته و تعداد پنل‌ها همچنان برابر با حداکثر تعداد قابل نصب است. همچنین مجموع هزینه انرژی خریداری شده سالانه از شبکه برق در مقایسه با سناریوی نخست به اندازه ۲۱ درصد افزایش یافته است.

جدول ۶. نتایج مدل تحت سناریوی دوم

مقدار تابع هدف	مجموع انرژی فروخته شده سالانه به شبکه برق	مجموع انرژی خریداری شده سالانه از شبکه برق	تعداد پنل‌های نصب شده	تعداد باتری‌های نصب شده
\$-۴۲۶۰۶۸/۲	\$۲۶۵۸۴۹/۴۳	\$۴۹۳۹/۳۱	۵۰	۴

در سناریوی سوم، هزینه خرید باتری‌ها در مقایسه با سناریوی نخست، ۲۰ درصد افزایش داشته است. نرخ کارایی شارژ آنها نیز ۱۰ درصد بهبود داشته و برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. در حقیقت این سناریو تأثیر خرید سیستم‌های ذخیره انرژی با قیمت و کیفیت بالاتر را بررسی می‌کند. نتایج حل مدل این سناریو به شرح جدول ۷ است.

جدول ۷. حل مدل تحت سناریوی سوم

مقدار تابع هدف	مجموع انرژی فروخته شده سالانه به شبکه برق	مجموع انرژی خریداری شده سالانه از شبکه برق	تعداد پنل‌های نصب شده	تعداد باتری‌های نصب شده
\$-۴۲۵۳۵۷/۱	\$۲۶۶۶۷۳/۹۳	\$۳۴۴۶/۴۶	۵۰	۵

در این سناریو، تعداد پیل و باتری در مقایسه با سناریوی نخست تغییری نداشته است، انرژی خریداری شده سالانه از شبکه برق، به اندازه $1492/85$ کمتر شده و به این دلیل است که همان تعداد باتری در هر بار دریافت انرژی از شبکه با نرخ کارایی بهتری، میزان انرژی بیشتری در مقایسه با سناریوی نخست ذخیره می‌کنند. در این سناریو مقدار تابع هدف بهینه به اندازه $1737/9$ افزایش یافته که به این معنا است که هزینه‌های ایستگاه افزایش یافته‌اند. با این حال اگر ایستگاه شارژ عوامل دیگری از قبیل کاهش وابستگی به شبکه برق را مد نظر داشته باشد، این سناریو مناسب است، زیرا مجموع برق خریداری شده از شبکه برق، کمتر شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در حال حاضر آلودگی زیست‌محیطی و گرمای زمین برای دنیا تهدیدی جدی محسوب می‌شوند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و وسایل نقلیه الکتریکی راه‌حلی پایدار و اقتصادی به شمار می‌آیند. علی‌رغم مزایای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین انرژی ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی، غیرقابل پیش‌بینی بودن این منابع، استفاده از آنها را با دغدغه‌ها و مشکلاتی نیز همراه کرده است و نیاز به وجود سیستم ذخیره‌کننده انرژی را در کنار این منابع به وجود می‌آورد. به دلیل هزینه‌های بالای این زیرساخت‌ها، طراحی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی از اهمیت بالایی برخوردارند.

این مقاله به مسئله طراحی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی و تعیین اندازه بهینه سیستم ذخیره‌کننده انرژی و سیستم تولید انرژی خورشیدی با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های ایستگاه شارژ می‌پردازد. برای این منظور، مدل ریاضی ارائه شد تا ضمن در نظر گرفتن فاکتورهای اقتصادی و پاسخ‌گویی به تمامی تقاضاها در هر بازه زمانی، اتصال ایستگاه به شبکه و امکان خرید و فروش برق به آن و محدودیت‌های مربوطه را در نظر بگیرد و با توجه به افق برنامه‌ریزی مد نظر پارامترهای ایستگاه شارژ را تعیین کند. مدل پیشنهادی روی داده‌های واقعی یک ایستگاه شارژ در کشور هلند پیاده‌سازی شد و همچنین نتایج مدل برای سه سناریو تحلیل و بررسی شدند.

برخلاف اغلب مقالات ارائه شده در حوزه طراحی ایستگاه‌های شارژ که بیشتر مسئله را از دید فنی و بدون در نظر گرفتن بعد زمان بررسی کرده‌اند، مدل ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن افق بلندمدت و فاکتورهای اقتصادی به طراحی این ایستگاه و تعیین اندازه بهینه منابع تأمین انرژی ایستگاه شارژ، از دید سرمایه‌گذار، پرداخته است. یکی از مواردی که در این مدل در نظر گرفته نشده، محدودیت‌های شبکه برق است. به بیان دیگر، می‌توان این مسئله را به صورت هم‌زمان از دیدگاه سرمایه‌گذار و شبکه برق نیز مدل‌سازی کرد که در این صورت می‌توان آن را در قالب یک مدل ریاضی چندهدفه بررسی کرد. مسئله مورد بررسی در این پژوهش، متعلق به پارکینگ خودروهای الکتریکی یک شرکت است (تعداد و رفتار خودروها از قبل مشخص و ثابت در نظر گرفته شده‌اند). این در حالی است که روند توسعه این پارکینگ‌ها به گونه‌ای است که اغلب در مکان‌های عمومی و برای طیف وسیعی از کاربران طراحی می‌شوند. از این رو، نرخ ورود خودروها، وضعیت و الگوی رفتاری آنها ثابت نیستند. بر این اساس پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، مدل حاضر برای این قبیل پارکینگ‌ها توسعه داده شود. پارامترها و متغیرهای این پژوهش، قطعی در نظر گرفته شده‌اند، یکی

دیگر از زمینه‌ها برای پژوهش‌های آتی، می‌تواند توسعه مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی از آنها باشد.

منابع

- آذر، عادل؛ حقی فام، محمودرضا؛ علی بابایی، نیما (۱۳۸۷). مدل‌سازی و بهینه‌سازی کاهش بار و جابه‌جایی میزان تولید نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری شبکه انتقال برق. مدیریت صنعتی، ۱(۱)، ۳-۲۰.
- اصغرزاده، عزت‌اله؛ مهرگان، محمدرضا؛ شکوری‌گنجوی، حامد؛ مدرس یزدی، محمد؛ تقی‌زاده یزدی، محمدرضا (۱۳۹۶). ارائه مدل ریاضی برای توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده و با هدف کنترل دی اکسیدکربن. مدیریت صنعتی، ۹(۴)، ۵۸۷-۶۰۸.
- تهامی‌پور، مرتضی؛ عابدی، سمانه؛ کریمی باباحمدی، رضا؛ ابراهیمی‌زاده، مرتضی (۱۳۹۵). بررسی تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر سرانه رشد اقتصادی واقعی ایران، پژوهش‌نامه اقتصاد انرژی ایران، ۵(۱۹)، ۵۳-۷۷.

References

- Acha, S., Green, T. C., & Shah, N. (2010). *Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses*. Paper presented at the IEEE PES T&D 2010.
- Asgharizadeh, E., & Mehrgan, M.R., & Shakouri, H., & Modarres Yazdi, M., & Taghizadeh Yazdi, M.R. (2017). Proposing a Mathematical Model to Expand Power Generation Capacity Considering Dispersed Generation Units to Decrease Carbon Dioxide. *Journal of Information Technology Management*, 9(4), 587-608. (in Persian)
- Atia, R., & Yamada, N. (2016). Sizing and analysis of renewable energy and battery systems in residential microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1204-1213.
- Azar, A., & Haghifam, M.R., & Alibabae, N. (2008). Modeling and Optimization of Load Shedding and Generation Reallocation at Compulsive Condition of Electrical Transmission System. *Journal of Information Technology Management*, 1(1), 3-20. (in Persian)
- Couture, T. D., Cory, K., Kreycik, C., & Williams, E. (2010). *Policymaker's guide to feed-in tariff policy design*. Retrieved from: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/44849.pdf>.
- Dahad, N. (2017). *Electric vehicles to reach 54 percent of car sales by 2040*. Retrieved from <https://www.google.com/amp/www.thenextsiliconvalley.com/2017/07/09/2019-electric-vehicles-to-reach-54-percent-of-car-sales-by-2040/amp>.
- Dai, Q., Liu, J., & Wei, Q. (2019). Optimal Photovoltaic/Battery Energy Storage/Electric Vehicle Charging Station Design Based on Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm. *Sustainability*, 11(7), 1973.
- Das, B. K., Hoque, N., Mandal, S., Pal, T. K., & Raihan, M. A. (2017). A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh. *Energy*, 134, 775-788.

- Dickerman, L., & Harrison, J. (2010). A new car, a new grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(2), 55-61.
- Domínguez-Navarro, J., Dufo-López, R., Yusta-Loyo, J., Artal-Sevil, J., & Bernal-Agustín, J. (2019). Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 46-58.
- D'Rozario, J., Shams, S., Rahman, S., Sharif, A., & Basher, E. (2015). Cost effective solar-biogas hybrid power generation system. *Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*.
- Hafez, O., & Bhattacharya, K. (2017). Optimal design of electric vehicle charging stations considering various energy resources. *Renewable energy*, 107, 576-589.
- Karmaker, A. K., Ahmed, M. R., Hossain, M. A., & Sikder, M. M. (2018). Feasibility assessment & design of hybrid renewable energy based electric vehicle charging station in Bangladesh. *Sustainable cities and society*, 39, 189-202.
- Le, T. N., Al-Rubaye, S., Liang, H., & Choi, B. J. (2015). *Dynamic charging and discharging for electric vehicles in microgrids*. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW).
- Moradi, M. H., Abedini, M., Tousi, S. R., & Hosseini, S. M. (2015). Optimal siting and sizing of renewable energy sources and charging stations simultaneously based on Differential Evolution algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 1015-1024.
- Negarestani, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., & Rajabi-Ghahnavieh, A. (2016). Optimal sizing of storage system in a fast charging station for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 443-453.
- Neumann, H. M., Schär, D., & Baumgartner, F. (2012). The potential of photovoltaic carports to cover the energy demand of road passenger transport. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(6), 639-649.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., . . . Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC*.
- Rahmani-Andebili, M., & Venayagamoorthy, G. K. (2015). SmartPark placement and operation for improving system reliability and market participation. *Electric Power Systems Research*, 123, 21-30.
- Salapić, V., Gržanić, M., & Capuder, T. (2018). *Optimal sizing of battery storage units integrated into fast charging EV stations*. Paper presented at the 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON).
- Shareef, H., Islam, M. M. & Mohamed, A. (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 403-420.
- Sortomme, E., & El-Sharkawi, M. A. (2011). Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 131-138.

- Tahami Pour, Morteza, & Abedi, Samaneh, & Karimi Baba Ahmadi, Reza, & Ebrahimi Zadeh, Morteza. (2016). The Investigation of Renewable Energy Effects on Iranian Per Capita Real Economic Growth. *Journal of Iranian Energy Economics*, 5(19), 53-77.
- Tushar, M. H. K., Assi, C., Maier, M., & Uddin, M. F. (2014). Smart microgrids: Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 239-250.
- Ugirimurera, J., & Haas, Z. J. (2017). Optimal Capacity Sizing for Completely Green Charging Systems for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(3), 565-577.
- Yan, Q., Zhang, B., & Kezunovic, M. (2019). Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 2096-2106.