



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Planning of fast charging station for electric vehicles equipped with renewable energy sources and energy storage system considering economic and environmental objectives

Hannaneh Baghaee^a, Meysam Jafari-Nokandi^{b,*}, Mohammad Alizadeh^c

1. MSc degree , Faculty of electrical and Computer engineering, Noshirvani University of Technology, Babol
2. Associate Professor, Faculty of electrical and computer engineering, Noshirvani University of Technology, Babol
3. Assistant Professor, Faculty of electrical engineering, Imam Khomeini University (RA), Nowshahr

*Corresponding Author: m.jafari@nit.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Emission,
Energy storage,
Epsilon constraint,
Fast charging station,
Renewable energy sources.

ABSTRACT

The development of electric vehicles in the transportation sector requires the establishment of charging infrastructures such as fast charging stations. Besides, in order to reduce the pollutants caused by fossil fuel power plants, renewable energy sources (RESs) and energy storage systems should be integrated with fast charging stations. In this article, a mixed-integer linear programming model is presented to determine the capacity of RESs and battery energy storage system in a charging station, considering two objective functions including the minimization of economic costs and emissions. The proposed model considers the possibility of using wind and solar resources and four types of battery technology including lead-acid, nickel-cadmium, lithium-ion, and sodium-sulfur. Regarding the two contradictory objectives in the proposed model, the epsilon constraint method has been employed to obtain the Pareto front for optimal solutions. Then, the fuzzy satisfying method has been used to determine the final solution. The results of the proposed model have been examined in four different planning horizons. The results show that with the increase in the importance of the objective function of reducing emissions, the installed capacity of renewable resources increases.

© 2013 Published by Semnan University Press. All rights reserved.

DOI: <https://doi.org/>

برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع خودروهای برقی مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز انرژی با اهداف اقتصادی و زیست محیطی

حنانه بقایی^۱، میثم جعفری نوکندی^{۲*}، محمد علیزاده گل محله^۳

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| <p>نوع مقاله:</p> <p>دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵</p> <p>واژگان کلیدی:</p> <p>انتشار آلاینده‌ها، ایستگاه شارژ سریع، ذخیره‌ساز انرژی، محدودیت اسپیلون، منابع انرژی تجدیدپذیر.</p> | <p>توسعه استفاده از خودروهای برقی در بخش حمل و نقل، مستلزم تاسیس زیرساخت‌های شارژ این خودروها مانند ایستگاه‌های شارژ سریع است. ضمن آنکه برای کاهش آلاینده‌های ناشی از فعالیت نیروگاه‌های سوخت فسیلی، باید از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در ایستگاه‌های شارژ سریع استفاده کرد. در این مقاله، یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح به منظور تعیین ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره انرژی باتری در یک ایستگاه شارژ با دو تابع هدف حداقل کردن هزینه‌های اقتصادی و حداقل کردن انتشار آلاینده‌ها ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، امکان استفاده از منابع تولیدی انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و چهار نوع فناوری باتری شامل اسید سرب، نیکل کادمیوم، لیتیوم یون و سولفور سدیم لحاظ شده است. با توجه به دو تابع هدف متناقض در مدل پیشنهادی، از روش محدودیت اسپیلون برای تعیین پاسخ‌های بهینه پارتو و از روش استنتاج فازی جهت تعیین پاسخ نهایی استفاده شده است. نتایج مدل پیشنهادی در چهار افق برنامه‌ریزی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اهمیت تابع هدف کاهش آلاینده‌ها، ظرفیت نصب شده منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد.</p> |
| <p>فهرست علائم</p> <p>شاخص‌ها</p> <p>i شاخص فناوری باتری</p> <p>k شاخص فناوری منبع انرژی تجدیدپذیر</p> <p>s شاخص سناریو</p> <p>t شاخص زمان</p> <p>j شاخص توابع هدف</p> <p>مجموعه‌ها</p> <p>B مجموعه فناوری‌های کاندیدای باتری</p> <p>R مجموعه فناوری‌های منابع انرژی تجدیدپذیر</p> <p>T مجموعه‌ی دوره‌های زمانی</p> <p>TWD دوره‌های زمانی متناظر با روزهای کاری هفته</p> <p>$TWND$ دوره‌های زمانی متناظر با روزهای آخر هفته</p> <p>پارامترها</p> <p>a نرخ بهره (%)</p> <p>CP_1^B هزینه سرمایه‌گذاری توان باتری i [\$/kWh/year]</p> | <p>$CE_i^B$ هزینه سرمایه‌گذاری انرژی باتری i [\$/kWh/year]</p> <p>$CI_i^B$ هزینه نصب باتری i [\$/kWh/year]</p> <p>$CO_1^B$ هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری باتری i [\$/kWh/year]</p> <p>$CP_k^{RES}$ هزینه سرمایه‌گذاری سالانه شده‌ی منبع انرژی تجدیدپذیر k [\$/kWh/year]</p> <p>$CO_k^{RES}$ هزینه سالانه‌ی بهره‌برداری و نگهداری منبع انرژی تجدیدپذیر k [\$/kWh/year]</p> <p>$e_{CO_2}$ میزان انتشار CO_2 به ازای تولید برق [kg/kWh]</p> <p>e_{SO_2} میزان انتشار SO_2 به ازای تولید برق [kg/kWh]</p> <p>e_{NOx} میزان انتشار NOx به ازای تولید برق [kg/kWh]</p> <p>$P_{s,t}^{FGS}$ تقاضای شارژ ایستگاه در سناریوی s و زمان t [kW]</p> <p>s^{min} حداقل سطح شارژ باتری بر حسب درصد</p> <p>TL طول عمر پروژه [year]</p> <p>T_1^B طول عمر باتری i [year]</p> |

* پست الکترونیک نویسنده مسئول : m.jafari@nit.ac.ir

^۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

^۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

^۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

انتشار آلاینده‌ها مطرح می‌شود [۲ و ۱]. البته تأمین انرژی مورد نیاز این خودروها توسط نیروگاه‌های حرارتی، خود منجر به تداوم انتشار آلاینده‌ها می‌گردد. همچنین حضور خودروهای برقی در شبکه توزیع، تلفات و هزینه کل سیستم را افزایش می‌دهد [۳]. لذا ادغام خودروهای برقی با منابع انرژی تجدیدپذیر^۵ (RES)، می‌تواند به تحقق کامل کاهش انتشار آلاینده‌ها توسط خودروهای برقی کمک کند و باعث پذیرش سطح بالایی از انرژی‌های تجدیدپذیر شود [۴]. ایجاد زیرساخت‌های شارژ همراه با منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند پشدگی خطوط را نیز کاهش دهد و به دنبال آن، سرمایه‌گذاری در سیستم قدرت را به تعویق بیندازد [۵]. یکی از اصلی‌ترین مشکلات مرتبط با خودروهای برقی، طراحی و استقرار ایستگاه‌های شارژ مناسب برای آن‌ها است. زیرا در دسترس نبودن ایستگاه‌های شارژ کافی، باعث کاهش اقبال عمومی به استفاده از خودروهای برقی می‌شود. به همین دلیل تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه‌های برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از ایستگاه‌های شارژ سریع انجام گرفته است. در این میان، حضور منابع تولید انرژی تجدیدپذیر همچون فتوولتائیک باعث کاهش ظرفیت اشغال شده ترانسفورماتور و افزایش ظرفیت سیستم ذخیره-ساز انرژی می‌شود [۶]. همچنین هزینه خرید انرژی را نیز به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد که موجب کاهش هزینه سالیانه ایستگاه شارژ می‌شود [۷]. البته به کارگیری منابع تجدیدپذیر در ایستگاه‌های شارژ، نیازمند مدیریت مناسب عدم قطعیت توان تولیدی آنها می‌باشد. مرجع [۸] مدلی را برای مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ و منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌کند که در آن، تفاوت در محدوده رانندگی و زمان ورود و عدم قطعیت سطح شارژ (SOC) خودروها و منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند. در [۹] یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه برای به دست آوردن مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع و منابع تولید پراکنده به طور همزمان با در نظر گرفتن قیودی مانند تعداد خودروهای برقی و تعداد ایستگاه‌های شارژ پیشنهاد شده است. از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^۶ (NSGA-II) برای حل این مسئله غیرخطی آمیخته با عدد صحیح استفاده شده است. در [۱۰] به منظور کاهش هزینه سالیانه

| | |
|---|--------------------------|
| حداکثر و حداقل نسبت ظرفیت انرژی به توان شارژ باتری i | X_i^{\max}, X_i^{\min} |
| احتمال وقوع سناریوی s | π_s^{RES} |
| قیمت خرید انرژی از بازار در زمان t [\$/kWh] | λ_t^E |
| راندمان مبدل‌ها | η_c |
| راندمان شارژ و دشارژ باتری i | η_i^B |
| متغیرها | |
| هزینه باتری [\$] | BESC |
| هزینه خرید انرژی از شبکه توزیع [\$] | DNEC |
| هزینه منابع انرژی تجدیدپذیر [\$] | RESC |
| ظرفیت ذخیره انرژی باتری i [kWh] | E_i^B |
| میزان انتشار CO ₂ [kg] | E_{CO_2} |
| میزان انتشار SO ₂ [kg] | E_{SO_2} |
| میزان انتشار Nox [kg] | E_{Nox} |
| انرژی ذخیره شده در باتری i در سناریوی s و زمان t [kWh] | $ES_{i,s,t}^B$ |
| بیشترین مقدار تابع هدف J | OF_J^{\max} |
| کمترین مقدار تابع هدف J | OF_J^{\min} |
| توان نامی باتری i [kW] | P_i^B |
| توان نامی منبع انرژی تجدیدپذیر k | P_k^{RES} |
| توان دریافتی از شبکه توزیع در سناریوی s و زمان t [kW] | $P_{s,t}^{in}$ |
| توان دریافتی از شبکه توزیع در سناریوی s و زمان t که صرف شارژ خودروها می‌شود [kW] | $P_{s,t}^G$ |
| توان دریافتی از شبکه توزیع در سناریوی s و زمان t که صرف شارژ باتری می‌شود [kW] | $Pch_{s,t}^{BG}$ |
| توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر در سناریوی s و زمان t [kW] | $P_{s,t}^{RESs}$ |
| بخشی از توان منبع انرژی تجدیدپذیر در سناریوی s و زمان t که صرف شارژ خودروها می‌شود [kW] | $P_{s,t}^R$ |
| توان شارژ باتری i توسط منبع انرژی تجدیدپذیر در سناریوی s و زمان t [kW] | $Pch_{i,s,t}^{BR}$ |
| توان دشارژ باتری i در سناریوی s و زمان t [kW] | $Pdch_{s,t}^B$ |
| توان شارژ باتری i در سناریوی s و زمان t [kW] | $Pch_{i,s,t}^B$ |
| متغیر باینری که یک بودن آن نشان‌دهنده شارژ شدن باتری i در سناریوی s و زمان t است | $u_{i,s,t}$ |

۱- مقدمه

اخیراً آگاهی عمومی در مورد معایب سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است. سوخت‌های فسیلی باعث انتشار آلاینده‌های محیط زیست می‌شوند. بنابراین استفاده از خودروهای برقی^۴ (EV) در بخش حمل و نقل، به عنوان یکی از راه‌های کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش

⁶ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

⁴ Electric Vehicle

⁵ Renewable Energy Sources

II مبتنی بر راه‌حل‌های بهینه پارتو برای حل مسئله استفاده شده است. هدف این مرجع به حداقل رساندن هزینه‌ها و اتلاف انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. سیستم پیشنهادی از باتری‌های کارکرده برای ذخیره‌سازی توان اضافی تولید شده توسط سیستم فتوولتائیک و پشتیبانی بار در زمانی که تولید برق PV ناکافی است، استفاده می‌کند.

با بررسی مراجع گذشته مشخص می‌شود که اهداف متعددی از قبیل کاهش هزینه ایستگاه شارژ سریع، کاهش هزینه خرید توان از شبکه، افزایش منافع اقتصادی و کاهش انتشار آلاینده‌ها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. معمولاً هدف اصلی از دیدگاه مالک ایستگاه، کاهش مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ایستگاه است. با این دیدگاه، ممکن است خرید توان مورد نیاز ایستگاه، از شبکه به صرفه‌تر بوده و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر که هزینه سرمایه‌گذاری زیادی دارند در پروژه‌هایی با طول عمر کم، در اولویت قرار نگیرد. اما از سوی دیگر و با توجه به نگرانی‌های روز افزون در خصوص انتشار آلاینده‌های ناشی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی، لازم است که کاهش انتشار این آلاینده‌ها نیز به عنوان یک هدف دیگر، در مسئله تصمیم‌گیری لحاظ شود تا استفاده از منابع انرژی پاک حتی در برنامه‌ریزی کوتاه مدت نیز توجیه‌پذیر باشد. لذا هدف مقاله حاضر، پیشنهاد یک مدل دو هدفه برای برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع با قابلیت تجهیز به دو نوع منبع انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) و نیز چندین نوع فناوری باتری با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی می‌باشد. مدل پیشنهادی به صورت MILP بوده و با توجه به دو هدفه بودن آن، از روش محدودیت اِپسیلون^{۱۳} برای تعیین جبهه پارتوی متناظر با جواب‌های نامغلوب استفاده شده است. همچنین روش ارضای فازی برای تعیین جواب نهایی (بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده) به کار رفته است. به طور خلاصه، نوآوری‌های مقاله حاضر به شرح زیر است:

- معرفی مدل بهینه‌سازی دو هدفه برای در نظر گرفتن توأم اهداف اقتصادی و زیست محیطی در مسئله برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع

ایستگاه شارژ سریع و کاهش انتشار آلاینده‌ها، به بهینه‌سازی اندازه سیستم فتوولتائیک^۷ (PV) و باتری ذخیره‌ساز انرژی^۸ (BESS) با بهره‌گیری از روش مجموع وزن دهی شده^۹ پرداخته شده است. البته در این مقاله به فناوری‌های مختلف باتری پرداخته نشده است. در [۱۱] یک مدل بهینه برای برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع به همراه سیستم انرژی تجدیدپذیر (باد و فتوولتائیک) و سیستم ذخیره انرژی با هدف حداقل کردن هزینه انرژی الکتریسیته و انتشار آلاینده‌ها پیشنهاد شده است که این تابع چند هدفه با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۰} (MOPSO) و تکنیک اولویت سفارش بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل^{۱۱} (TOPSIS) حل شده است. در این مرجع مدلی برای تعیین تقاضای بار با در نظر گرفتن قیمت مبتنی بر پاسخ تقاضا ارائه شده است و نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌گویی بار نه تنها انعطاف‌پذیری سیستم را بهبود می‌بخشد، بلکه باعث کاهش هزینه برق و بهبود مزایای زیست محیطی می‌شود. در [۱۲] با به کارگیری سیستم فتوولتائیک و سیستم انرژی ذخیره‌ساز، به بررسی تعیین اندازه سیستم فتوولتائیک و باتری ذخیره‌ساز انرژی جهت افزایش منافع اقتصادی با الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. در مرجع [۱۳] چند نمونه ذخیره‌ساز انرژی به عنوان کاندیدا، مطرح شده‌اند تا از بین آن‌ها، ذخیره‌ساز بهینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای ایستگاه شارژ سریع، جهت تعیین ظرفیت فیدر و ترانسفورماتورها و ظرفیت سیستم فتوولتائیک با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه خرید انرژی سالیانه ایستگاه شارژ سریع انتخاب شود. مرجع [۱۴] نیز به صورت یک مسئله تک هدفه با حداقل‌سازی هزینه کل ایستگاه شارژ سریع با در نظر گرفتن هزینه ادغام سیستم ذخیره‌ساز انرژی و منابع تجدیدپذیر بوده است، که به صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح^{۱۲} (MILP) حل شده است. البته در مراجع [۱۴-۱۲] به مسئله انتشار آلاینده‌ها ناشی از تولید توان نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی در شبکه توزیع اشاره‌ای نشده است. مدل پیشنهادی در [۱۵]، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه است و از الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-

¹² Mixed-Integer Linear Programming

¹³ Epsilon Constraint

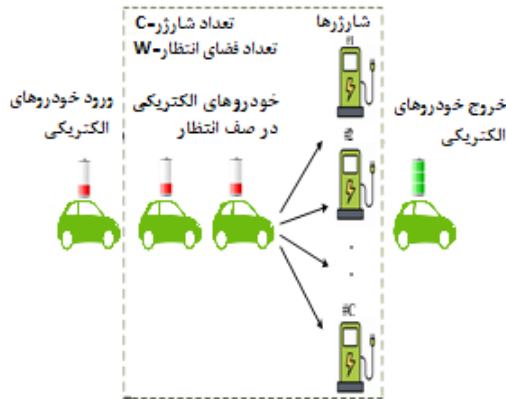
⁷ Photo Voltaic

⁸ Battery Energy Storage System

⁹ weighted sum method

⁷ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

¹¹ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution



شکل (۲) شماتیک ایستگاه شارژ سریع خودروی برقی

در این مدل فرض می‌شود زمانی که، سطح شارژ یک خودرو به یک سطح بحرانی کاهش می‌یابد، راننده تصمیم به شارژ خودرو می‌گیرد و وارد ایستگاه شارژ می‌شود. برای تولید مقادیر تصادفی سطح شارژ بحرانی خودروها از تابع توزیع نرمال استفاده شده است [۱۴]. با رسیدن خودرو به ایستگاه، اگر شارژر خالی در ایستگاه موجود باشد خودرو پس از رسیدن به جایگاه، شارژ می‌شود. در صورتی که شارژرها پر باشند، خودرو در فضای انتظار تا زمان خالی شدن اولین شارژر منتظر می‌ماند. روندنمای مورد استفاده برای تعیین توان مورد تقاضای ایستگاه شارژ در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳-۲- فرمول‌بندی مسأله برنامه ریزی ایستگاه شارژ

در مرحله دوم از مدل پیشنهادی، تصمیم‌گیری در مورد نوع و ظرفیت باتری ذخیره‌ساز انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر، به صورت یک مسئله MILP تعریف شده است و با توجه به اهداف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ و کاهش انتشار آلاینده‌ها از روش محدودیت اپسیلون برای حل این مسئله دو هدفه استفاده شده است. در ادامه به تعریف توابع هدف و قیود پرداخته شده است.

۳-۱- توابع هدف و قیود

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در مدل پیشنهادی، دو تابع هدف حداقل کردن هزینه سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ و حداقل کردن انتشار آلاینده‌ها در نظر گرفته شده است.

- استفاده از روش محدودیت اپسیلون و منطق فازی برای حل مدل پیشنهادی

ساختار مقاله در ادامه به این شرح می‌باشد: در بخش دوم به بررسی مدل پیشنهادی و تعیین تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع پرداخته شده است. توابع هدف، قیود و روش حل مسئله بهینه‌سازی در بخش سوم بررسی شده است. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج عددی نیز در بخش چهارم صورت می‌گیرد و در انتها، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲- مدل پیشنهادی

تعیین تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع نقش مهمی در برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه و انتخاب نوع و اندازه منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری‌های ذخیره انرژی دارد. لذا در این مقاله از یک مدل دو مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ استفاده شده است که در مرحله اول، توان مورد نیاز ایستگاه شارژ برای روزهای عادی و تعطیل مشخص می‌شود [۱۴]. در مرحله دوم، با معلوم بودن تقاضای شارژ FCS، نوع و اندازه بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری تعیین می‌شود. مدل دو مرحله‌ای پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

مرحله اول

ورودی: تعداد خودروها، تعداد شارژرها، تعداد فضای انتظار
خروجی: تقاضای ایستگاه شارژ سریع در هر ساعت

مرحله دوم

تابع هدف: حداقل کردن هزینه اقتصادی ایستگاه شارژ و انتشار آلاینده‌گی
ورودی: هزینه نصب و نگهداری باتری و منابع تجدیدپذیر، داده‌های آلاینده‌گی
خروجی: توان باتری و منابع تجدیدپذیر، هزینه ایستگاه شارژ، آلاینده‌گی

شکل (۱): مدل دو مرحله‌ای پیشنهادی

۲-۱- تعیین تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع

شکل (۲) شماتیک کلی از ایستگاه شارژ سریع را نمایش می‌دهد، که توان آن از شبکه توزیع، ذخیره‌ساز باتری و منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود.

$$E_{CO_2}(t) + E_{SO_2}(t) + E_{NOx}(t) = 365 \sum_{s \in S} \pi_s^{RES} (e_{CO_2} + e_{SO_2} + e_{NOx}) \cdot \left[\frac{5}{7} P_{s,t \in TWD}^{in} + \frac{2}{7} P_{s,t \in TWND}^{in} \right] \quad (6)$$

با توجه به تفاوت الگوی حضور خودروها در ایستگاه شارژ در روزهای مختلف هفته، در روابط (۳) و (۶) هزینه خرید برق از شبکه و میزان انتشار آلاینده‌ها در روزهای کاری و آخر هفته به صورت مجزا محاسبه شده‌اند و با استفاده از ضریب وزنی $\frac{2}{7}$ و $\frac{5}{7}$ ، مقدار متوسط روزانه برای آنها محاسبه شده است. به این ترتیب با ضرب در تعداد روزهای سال، مقدار سالانه آنها تعیین می‌شود. هزینه‌های سرمایه‌گذاری در (۴) و (۵) با ضرب در نرخ بازگشت سرمایه (۷) به سرمایه‌گذاری سالیانه تبدیل می‌شوند.

$$\text{capital recovery factor} = \frac{a(1+a)^{TL}}{(1+a)^{TL}-1} \quad (7)$$

رابطه (۸) توان مورد نیاز ایستگاه شارژ سریع را در سناریوی s و زمان t نمایش می‌دهد که به ترتیب توسط شبکه الکتریکی، باتری‌ها و منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. با توجه به اینکه توان‌های مورد نظر باید از طریق مبدل‌ها، به شارژرها منتقل شوند، در این رابطه، ضرایب مربوط به بازده مبدل‌ها در توان آنها ضرب شده است. رابطه (۹) نیز توان دریافتی از شبکه را نمایش می‌دهد، که صرف شارژ خودروها و شارژ باتری‌ها می‌شود.

$$P_{s,t}^{FCS} = \eta_{c3} P_{s,t}^G + \sum_{i \in B} \eta_{c4} P_{s,i,t}^B + \eta_{c5} P_{s,t}^R \quad (8)$$

$$P_{s,t}^{in} = P_{s,t}^G + \sum_{i \in B} P_{s,i,t}^B \quad \forall s, \forall t \quad (9)$$

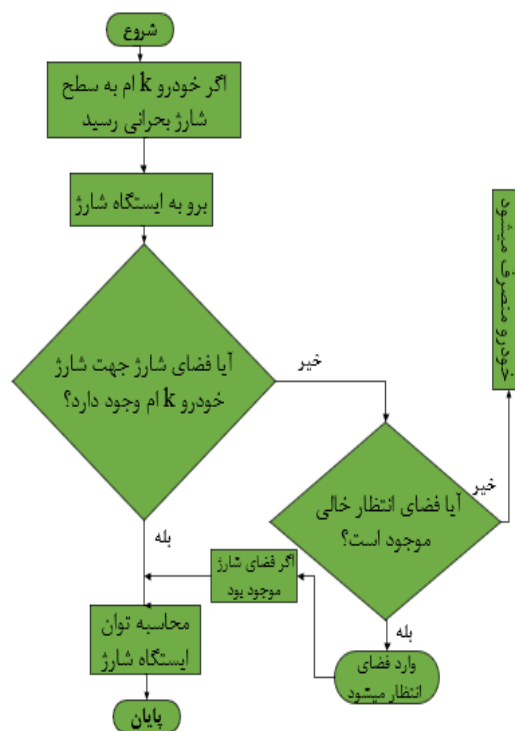
توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، با رابطه (۱۰) نشان داده می‌شود که در آن، ظرفیت نامی هر منبع نصب شده در ایستگاه شارژ در ضریب مربوط به پیش‌بینی توان تولیدی در سناریوی s (برحسب پریونیت) ضرب می‌شود. مطابق رابطه (۱۱)، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر صرف شارژ باتری و تأمین توان مورد نیاز شارژهای ایستگاه می‌شود.

$$P_{s,t}^{RESS} = \sum_{k \in R} P_k^{RES} \rho_{k,s,t}^{RES} \quad \forall s, \forall t \quad (10)$$

$$P_{s,t}^{RESS} \geq \sum_{i \in B} P_{s,i,t}^{BR} + P_{s,t}^R \quad \forall s, \forall t \quad (11)$$

در معادله (۱۲) توان مورد نیاز برای شارژ باتری‌ها تعریف شده است که بخشی از این توان توسط شبکه و بخش دیگر توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین می‌شود.

$$P_{s,i,t}^B = \eta_{c1} P_{s,i,t}^{BG} + \eta_{c2} P_{s,i,t}^{BR} \quad \forall i, \forall s, \forall t \quad (12)$$



شکل (۳): روندنمای تعیین تقاضای شارژ ایستگاه شارژ

رابطه (۱) تابع هدف سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ را نشان می‌دهد که به ترتیب شامل هزینه خرید انرژی از شبکه، هزینه سرمایه‌گذاری باتری و هزینه سرمایه‌گذاری منابع انرژی تجدیدپذیر است. رابطه (۲) نیز تابع هدف انتشار آلاینده‌ها را نشان می‌دهد که معادل با میزان آلاینده‌هایی است که در اثر خرید توان مورد نیاز ایستگاه شارژ از شبکه بالادست برای تأمین تقاضای شارژ خودروها، ایجاد می‌شوند. مؤلفه‌های تابع هدف سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ به ترتیب با روابط (۳)، (۴) و (۵) تعیین می‌شوند. میزان انتشار آلاینده‌ها نیز مطابق معادله (۶) محاسبه می‌گردد.

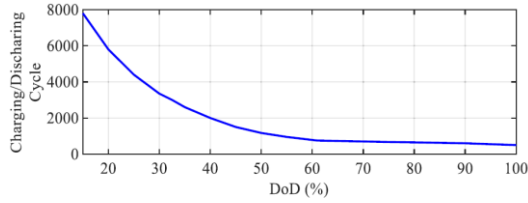
$$OF_1 = DNEC + BESC + RESC \quad (1)$$

$$OF_2 = \sum_{t \in T} (E_{CO_2}(t) + E_{SO_2}(t) + E_{NOx}(t)) \quad (2)$$

$$DNEC = 365 \left(\left[\frac{5}{7} \sum_{t \in TWD} \lambda_t^E \left(\sum_{s \in S} \pi_s^{RES} P_{s,t}^{in} \right) + \frac{2}{7} \sum_{t \in TWND} \lambda_t^E \left(\sum_{s \in S} \pi_s^{RES} P_{s,t}^{in} \right) \right] \right) \quad (3)$$

$$BESC = \sum_{i \in B} P_i^B (CP_i^B + CO_i^B) + E_i^B (CE_i^B + CI_i^B) \quad (4)$$

$$RESC = \sum_{k \in R} P_k^{RES} (CP_k^{RES} + CO_k^{RES}) \quad (5)$$



شکل (۴): چرخه کاری باتری نیکل کادمیم برحسب سطح دشارژ [۱۲]

با توجه به اینکه طول عمر باتری نباید از طول عمر پروژه کمتر باشد، این قید به صورت (۱۹) بیان می‌شود.

$$T_i^B \geq TL \quad \forall i \in B \quad (19)$$

۳-۲- روش محدودیت اسیلون

در مسائل چند هدفه برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه و به خاطر وجود چند هدف متعارض به جای تنها یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه یا جبهه پارتو بدست می‌آید. روش محدودیت اسیلون یکی از الگوریتم‌های رایج برای حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه است. یکی از مزیت‌های روش محدودیت اسیلون آن است که برخلاف روش وزن‌دهی، به راحتی می‌توان تعداد جواب‌های مؤثر تولید شده را از طریق تنظیم تعداد تقسیم‌بندی دامنه هر یک از توابع هدف کنترل کرد [۱۷].

در روش محدودیت اسیلون، تابع هدف دوم به عنوان قید نامساوی مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود و با کاهش تدریجی مقدار اسیلون، نتایج به صورت جواب‌های بهینه پارتو حاصل می‌شود. بنابراین رابطه (۲۰) محدوده هزینه انتشار آلاینده‌ها را به عنوان یک قید در مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌کند.

$$OF_2 \leq OF_2^{max} - \varepsilon * \left(\frac{OF_2^{max} - OF_2^{min}}{N_{it} - 1} \right) \quad (20)$$

برای محاسبه کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف دوم، باید مسئله بهینه‌سازی را در دو مرحله مطابق زیر اجرا کرد:

۱- تابع هدف مسئله فقط شامل تابع هدف اول باشد: حل این مسئله به عنوان یک مسئله مینی‌م‌سازی، کمترین مقدار تابع هدف اول و در نتیجه بیشترین مقدار تابع هدف دوم (OF_2^{max}) را تعیین می‌کند.

۲- تابع هدف مسئله، فقط شامل تابع هدف دوم باشد: حل این مسئله به عنوان یک مسئله مینی‌م‌سازی، کمترین مقدار تابع هدف دوم (OF_2^{min}) را تعیین می‌کند.

با توجه به رابطه (۱۳)، سطح شارژ باتری در هر ساعت بستگی به سطح شارژ باتری در ساعت قبل و توان شاز و دشارژ باتری در همان ساعت دارد. همچنین سطح شارژ باتری در همه سناریوها یکسان فرض می‌شود، که معادله (۱۴) نشان‌دهنده این امر می‌باشد.

$$ES_{s,i,t}^B = \begin{cases} ES_{s,i,t=24}^B + (\eta_i^B Pch_{s,i,t}^B - Pdch_{s,i,t}^B) \Delta t, & t = 1 \\ ES_{s,i,t-1}^B + (\eta_i^B Pch_{s,i,t}^B - Pdch_{s,i,t}^B) \Delta t, & t \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

$$ES_{s,i,t}^B = ES_{s-1,i,t}^B \quad \forall i, \forall s \in S - \{s_1\}, \forall t \quad (14)$$

هر فناوری باتری دارای توان نامی مشخصی است که بر سرعت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز تأثیر می‌گذارد. این توان نامی باید برای احداث یک تصمیم اقتصادی مناسب، در نظر گرفته شود. قیود (۱۵) و (۱۶) توان شارژ و دشارژ باتری را به توان نامی آن‌ها محدود می‌کنند. اگر $u_{s,i,t}$ صفر باشد، وضعیت شارژ قرار دارد و اگر یک باشد باتری در وضعیت دشارژ قرار دارد. بنابراین مطابق این دو رابطه، باتری نمی‌تواند به طور همزمان شارژ و دشارژ شود. مطابق رابطه (۱۷)، سطح شارژ باتری نباید از یک مقدار حداقل، کمتر شود و از ظرفیت آن هم بیشتر نمی‌شود. علاوه بر این، محدودیت‌های عملی برای نسبت مقدار نامی انرژی باتری به توان نامی آن وجود دارد. با توجه به معادله (۱۸) و با در نظر گرفتن نسبت تبدیل انرژی به توان (χ)، می‌توان محدوده انرژی باتری را به صورت قید تعیین کرد.

$$0 \leq Pch_{s,i,t}^B \leq P_i^B (1 - u_{s,i,t}) \quad \forall i, \forall s, \forall t \quad (15)$$

$$0 \leq Pdch_{s,i,t}^B \leq P_i^B u_{s,i,t} \quad \forall i, \forall s \quad (16)$$

$$s^{min} E_i^B \leq ES_{s,i,t}^B \leq E_i^B \quad (17)$$

$$\chi_i^{min} P_i^B \leq E_i^B \leq \chi_i^{max} P_i^B \quad \forall i \quad (18)$$

یکی از ملاحظات مهم در استفاده از باتری‌ها، در نظر گرفتن تأثیر حداکثر عمق دشارژ^{۱۴} (DoD) باتری بر عمر مفید آن است. زیرا هر چه عمق دشارژ باتری در هر سیکل، افزایش یابد چرخه عمر باتری کاهش می‌یابد. شکل (۴)، منحنی کاهش تعداد چرخه کاری باتری بر حسب عمق دشارژ آن را برای فناوری نیکل کادمیم نشان می‌دهد. با توجه به خطی بودن مدل پیشنهادی، از روش تقریب تکه ای خطی برای مدل سازی این منحنی استفاده شده است [۱۴].

¹⁴ Depth of discharge

بین سطوح ارضای توابع هدف و مقدار به دست آمده برای آنها را داشته باشد.

$$\min_X \left(\max_j \left| \mu_{S_j} - \mu_{f_j}(X) \right| \right) \quad (23)$$

که X مجموعه پاسخ های پارتو، $\mu_{f_j}(X)$ مقدار تابع هدف f_j در پاسخ پارتو α و μ_{S_j} سطح رضایت تابع هدف f_j است. بدیهی است هر چقدر ضریب وزنی یک تابع هدف بیشتر باشد، آن هدف اهمیت بیشتری برای طراح دارد.

۳-۳-۳- عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر

توان خروجی منابع بادی و خورشیدی به عوامل طبیعی چون سرعت وزش باد و میزان تابش خورشید بستگی دارد که با عدم قطعیت همراه است. برای مدل سازی عدم قطعیت تولید منابع انرژی بادی و خورشیدی می توان از روش های تصادفی و آماری که همراه با تخصیص توابع چگالی احتمال مناسب به عوامل عدم قطعیت می باشد، استفاده کرد. در اغلب مراجع برای مدل سازی سرعت باد و تابش خورشید به ترتیب از تابع توزیع ویبول و تابع توزیع بتا استفاده می شود زیرا می توان با تغییر پارامترهای مربوطه، تابع توزیع ویبول و بتا را با شکل مورد نظر تطبیق داد. بنابراین در این مقاله از این توابع برای بیان عدم قطعیت توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی استفاده شده است [۱۸].

۳-۴- خطی سازی مدل پیشنهادی

مدل معرفی شده در بخش قبل به دلیل استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶)، یک رابطه غیرخطی است لذا جهت خطی سازی مدل پیشنهادی، از روابط (۲۴) الی (۲۸) استفاده شده است.

$$F_{i,s,t} \leq u_{i,s,t} \times bigM \quad (24)$$

$$F_{i,s,t} \leq PB_i + (1 - u_{i,s,t}) \times bigM \quad (25)$$

$$F_{i,s,t} \geq PB_i - (1 - u_{i,s,t}) \times bigM \quad (26)$$

$$0 \leq Pch_{s,i,t}^B \leq P_i^B - F_{i,s,t} \quad (27)$$

$$0 \leq Pdch_{s,i,t}^B \leq F_{i,s,t} \quad (28)$$

۴- نتایج به دست آمده

۴-۱- تعیین توان مورد نیاز ایستگاه شارژ سریع

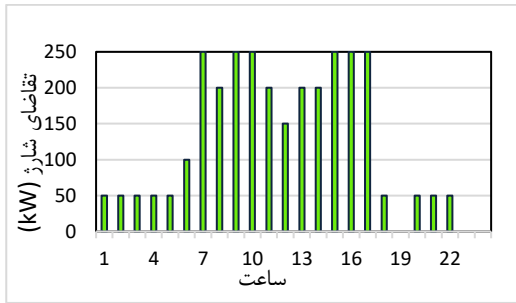
به منظور برآورد دقیق مدل تقاضای ایستگاه شارژ سریع، باید رفتار ناهماهنگ رانندگان خودروهای برقی در تصمیم گیری برای شارژ خودروها در نظر گرفته شود. در این

در مسائل چند هدفه که سطح انتظارات متفاوتی نسبت به اهداف مد نظر در مسئله تصمیم گیری وجود دارد می توان از روش ارضای فازی استفاده کرد، زیرا این روش در عین سادگی، شباهت زیادی به نحوه قضاوت بشر در تصمیم گیری ها دارد. در روش ارضای فازی، از معادلاتی که تابع عضویت نامیده می شوند استفاده می شود و با استفاده از آنها، به هر یک از اهداف مورد نظر، مجموعه های فازی نسبت داده می شود. تابع عضویت به صورت یک تابع یکنواخت نزولی است که دارای حدود پایین و بالا می باشد و مقدار هر یک از اهداف در جواب مورد نظر را به یک مقدار فازی بین $[0,1]$ تبدیل می کند. سپس با استفاده از یک روش (به عنوان مثال $minmax$)، جوابی که بهترین ویژگی را از نظر مقادیر فازی شده دارد، انتخاب می شود. برای تبدیل مقدار هر یک از دو تابع هدف به مقدار فازی آن، ابتدا باید با حل مسئله بهینه سازی تک هدفه، مقدار کمینه و بیشینه هر تابع هدف (OF^{min} و OF^{max}) تعیین شود. پس از آن، می توان هر مقداری از تابع هدف که در طی جواب های مختلف به دست می آید را با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲)، به مقدار فازی تبدیل کرد:

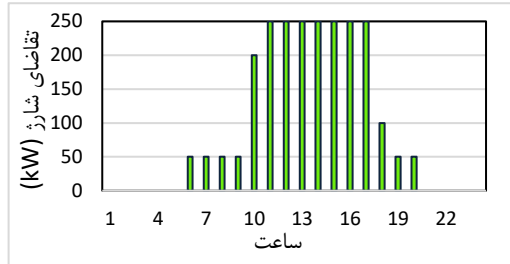
$$\mu_{f_1}(X) = \frac{OF_1(X) - OF_1^{max}}{OF_1^{min} - OF_1^{max}} \quad (21)$$

$$\mu_{f_2}(X) = \frac{OF_2(X) - OF_2^{max}}{OF_2^{min} - OF_2^{max}} \quad (22)$$

رابطه (۲۱) مقادیر فازی شده ی تابع هدف اول که متناظر با هزینه های اقتصادی است را محاسبه می کند و رابطه (۲۲) نیز مقادیر فازی شده تابع هدف دوم که متناظر با انتشار آلاینده ها است را به دست می دهد. بدیهی است که هر چه نتیجه طرح به مقدار بهینه تابع هدف f_j زام نزدیکتر باشد، مقدار فازی آن (μ_{f_j}) به یک نزدیکتر است و برعکس. با تعیین تابع عضویت برای هر طرح، برنامه ریز باید سطح ارضای هر معیار را مشخص کند، در نهایت با مشخص شدن ضرایب وزنی هر تابع هدف (μ_{S_j}) توسط طراح، جواب پایانی و بهینه مورد نظر با استفاده از روش بهینه سازی Minimax مطابق رابطه (۲۳) انتخاب می شود [۱۷]. در این روش حداکثر مقدار اختلاف سطح ارضای تعیین شده با توابع هدف بدست آمده از روش فازی برای مجموعه پاسخ های پارتو محاسبه می شود و در نهایت، پاسخی به عنوان جواب بهینه انتخاب می شود که کمترین اختلاف



(الف)



(ب)

شکل (۵): تقاضای ساعتی ایستگاه شارژ (الف) روزهای کاری (ب) آخر هفته

جدول (۱): مشخصات انواع باتری

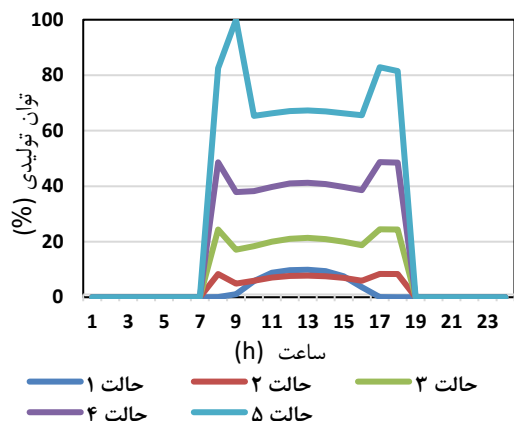
| فناوری | Pb-Acid | NiCd | NaS | Li-ion |
|--|---------|------|------|--------|
| هزینه توان نامی (\$/kW) | ۲۰۰ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۳۰۰ |
| هزینه انرژی نامی | ۲۰۰ | ۴۷۴ | ۳۵۰ | ۶۹۵ |
| هزینه بهره برداری و نگهداشت (\$/kW/year) | ۵۰ | ۲۰ | ۸۰ | - |
| هزینه نصب (\$/kWh) | ۲۰ | ۱۲ | ۸ | ۳/۶ |
| بازده | ۷۰ | ۸۵ | ۹۵ | ۹۸ |
| $\chi_i^{min}, \chi_i^{max}$ | ۱, ۸ | ۱, ۸ | ۱, ۶ | ۱, ۸ |
| طول عمر (سال) | ۱۲ | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰ |
| چرخه عمر در حداکثر DoD | ۵۵۰ | ۵۰۰ | ۲۵۰۰ | ۳۰۰۰ |

با توجه به عدم قطعیت توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، کمبود توان مورد نیاز ایستگاه شارژ با خریداری از شبکه توزیع تأمین می‌شود. قیمت انرژی خریداری شده از شبکه توزیع در هر ساعت به صورت شکل (۷) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که برای سادگی، هزینه خرید انرژی از شبکه توزیع برای روزهای عادی و تعطیل، یکسان فرض شده است.

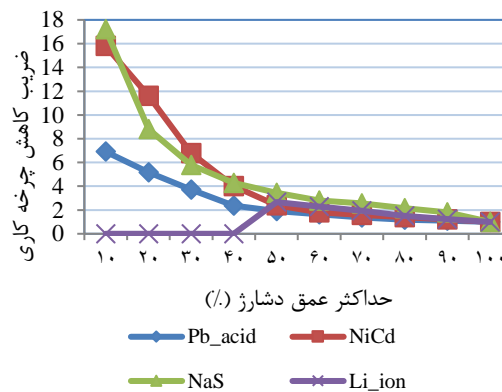
مقاله، مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۱ از یک روش مدل‌سازی برای زمان رسیدن خودروهای الکتریکی به ایستگاه شارژ سریع و سطح شارژ اولیه خودروها در زمان رسیدن به ایستگاه شارژ استفاده شده است. تعداد خودروها ۱۰۰ دستگاه در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که رانندگان به محض اینکه سطح شارژ خودرویشان به یک مقدار بحرانی (SOC_{cr}) کاهش یافت، تصمیم می‌گیرند باتری خودروی خود را شارژ کند. پارامتر SOC_{cr} به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است که از تابع توزیع نرمال $N(15, 30)$ پیروی می‌کند. پس از ورود خودرو به ایستگاه و آغاز عملیات شارژ، زمانی که سطح شارژ خودرو به ۸۰ درصد شارژ کامل رسید، خودرو ایستگاه را ترک می‌کند. همچنین ایستگاه شارژ مورد مطالعه شامل ۵ شارژر و ۵ فضای انتظار می‌باشد. شکل (۵) تقاضای ایستگاه شارژ سریع در ساعات مختلف به ازای روزهای کاری و آخر هفته را نمایش می‌دهد [۱۴]. با توجه به شکل (۵)، در تعطیلات آخر هفته بیشترین تقاضای شارژ خودروهای برقی بین ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۷:۰۰ رخ می‌دهد، در صورتی که در روزهای کاری اغلب آنها در صبح و عصر که بیشتر رانندگان در مسیر رفتن و یا برگشت از محل کار خود هستند شارژ می‌شوند.

۲-۴- اطلاعات ورودی

در این مقاله، تکنولوژی باتری ذخیره‌ساز انرژی به چهار گروه اسید سرب (Pb-Acid)، نیکل کادمیوم (NiCd)، لیتیوم یون (Li-ion) و سولفور سدیم (NaS) دسته‌بندی می‌شود، که مشخصات فناوری هر یک از باتری‌ها، و نقاط متناظر با منحنی کاهش چرخه عمر باتری نسبت به حداکثر عمق دشارژ به ترتیب در جداول (۱) و شکل (۶) گردآوری شده است. در ایستگاه شارژ مورد مطالعه، سیستم‌های فتوولتائیک و بادی به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر، قابل سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری هستند. که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع انرژی تجدیدپذیر از [۱۴] قابل استخراج است.



شکل (۹): توان تولیدی سیستم فتوولتائیک

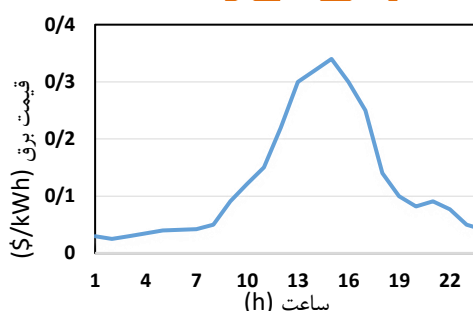


شکل (۶): منحنی کاهش چرخه عمر باتری‌ها نسبت به حداکثر عمق دشارژ

در این مقاله، یک روز به عنوان نماینده هر فصل انتخاب شده است تا تغییرات تولید منابع تجدیدپذیر در فصول مختلف در نظر گرفته شود. در نهایت، توان‌های تولیدی به صورت میانگین توان چهار فصل گزارش شده است.

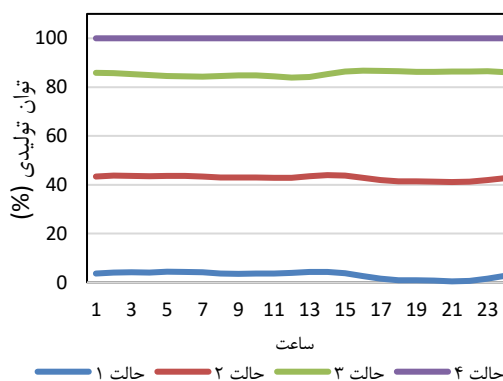
در مدل پیشنهادی با توجه به حضور ذخیره‌سازها و منابع انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر بررسی هزینه‌های اقتصادی ایستگاه شارژ، به بررسی انتشار آلاینده‌های زیست محیطی نیز پرداخته شده است. مقدار e_{CO_2} ، e_{SO_2} و e_{NOx} به عنوان ضرایب انتشار گازهای CO_2 ، SO_2 و NOx به ترتیب برابر $0.1997/0.03$ ، 0.15 و 0.15 کیلوگرم به ازای هر کیلووات ساعت انرژی خریداری شده از شبکه، فرض شده است.

با توجه به استفاده از روش محدودیت اپسیلون برای حل مدل پیشنهادی، تابع هدف آلاینده‌گی به ۴۰ قسمت برابر تقسیم شده است و به ازای هر قسمت، یک پاسخ برای مقدار انتظاری هزینه‌های اقتصادی ایستگاه شارژ و انتشار آلاینده‌ها به دست آمده است. با در نظر گرفتن سطح رضایت برای هر یک از توابع هدف، یک جواب بهینه از بین دسته جواب‌های پارتو به انتخاب می‌شود. در این بخش با اعمال سطح رضایت 0.8 برای هزینه اقتصادی و سطوح رضایت متغیر 0.5 الی 0.9 برای انتشار آلاینده‌ها نتایج شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی در نرم افزار GAMS و با حل کننده CPLEX پیاده سازی و حل شده است. مدل پیشنهادی در چهار افق برنامه‌ریزی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال، پیاده‌سازی شده است که در ادامه، مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۷): هزینه خرید انرژی الکتریکی دریافتی از شبکه

شکل‌های (۸) و (۹) توان تولیدی منابع بادی و فتوولتائیک را در سناریوهای مختلف نمایش می‌دهند. برای توان تولیدی سیستم فتوولتائیک، پنج سناریو و برای توان تولیدی توربین بادی، چهار سناریو در نظر گرفته شده است. بنابراین در هر ساعت ۲۰ سناریو تولید می‌شود.

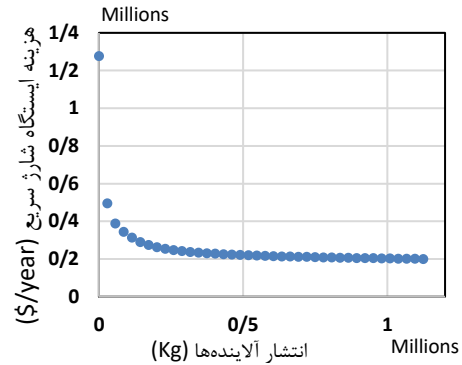


شکل (۸): توان تولیدی توربین بادی

۳-۴- تحلیل نتایج

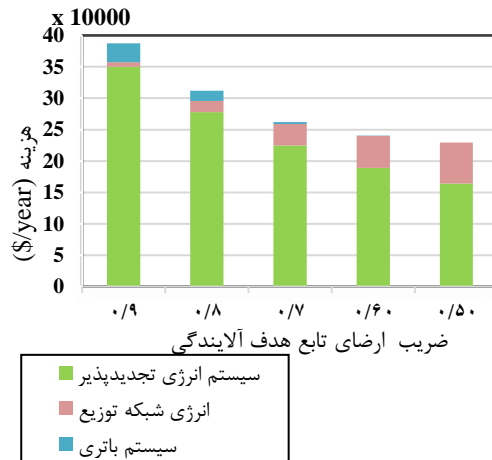
• افق برنامه ریزی ۵ ساله:

جواب‌های نامغلوب در جبهه پارتو برای مدل پیشنهادی در افق برنامه‌ریزی ۵ ساله در شکل (۱۰) نشان داده شده است. اجرای مدل با پردازنده Core i7 و ۴RAM GB، پس از مدت زمان ۱۰۰ دقیقه به جواب بهینه رسیده است که این زمان به دلیل تعداد زیاد سناریوها است.



شکل (۱۰): جبهه پارتوی جواب‌های بدست آمده در افق ۵ ساله

شکل (۱۱) هزینه‌های اقتصادی مرتبط با برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع اعم از هزینه انرژی خریداری شده از شبکه توزیع، هزینه باتری و هزینه منابع انرژی تجدیدپذیر را در افق برنامه‌ریزی ۵ ساله نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱)، با سطح ارضای ۰/۵ برای آلاینده‌گی، استفاده از ذخیره‌ساز انرژی، توجیه اقتصادی ندارد. ولی برای سطوح رضایت ۰/۶ تا ۰/۹، علاوه بر منابع تجدیدپذیر، از باتری نیز استفاده شده است.



شکل (۱۱): هزینه‌های ایستگاه شارژ سریع در افق ۵ سال

با افزایش سطح ارضای آلاینده‌گی، سرمایه‌گذاری روی منابع

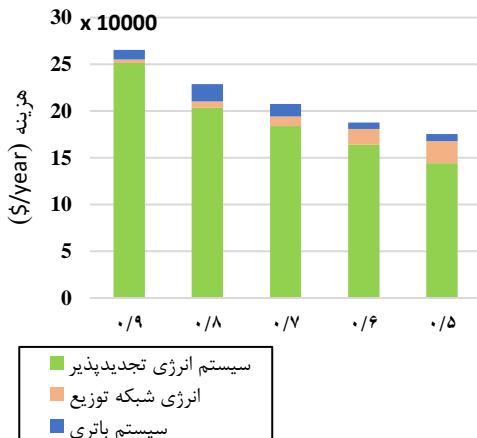
تجدیدپذیر و باتری افزایش پیدا می‌کند و در عین حال، انرژی کمتری از شبکه توزیع تأمین می‌شود. در این شرایط و با توجه به بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر و باتری در مقایسه با قیمت خرید انرژی از شبکه توزیع، مجموع هزینه اقتصادی ایستگاه شارژ نیز افزایش می‌یابد. مشخصات باتری و منبع تجدیدپذیر به ازای سطح ارضای ۰/۹ برای تابع هدف آلاینده‌گی، در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به جدول (۳)، بطور همزمان از منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و باتری با فناوری سدیم-سولفور (NAS) در ایستگاه شارژ استفاده شده است. در این حالت، مقدار انتظاری هزینه اقتصادی سالانه ایستگاه شارژ برابر \$ ۳۸۷,۳۲۲ و انتشار آلاینده‌ها برابر ۵۷,۶۸۷ kg به دست آمده است.

جدول (۳): مشخصات باتری و منابع تجدیدپذیر نصب شده در افق ۵ ساله در سطح رضایت ۰/۹ برای آلاینده‌گی

| | |
|------------|---------------------------------|
| PV-Wind | فناوری منبع تجدیدپذیر |
| ۴۶۹/۶۲-۲/۳ | توان نامی منبع تجدیدپذیر (kW) |
| ۳۵۰.۴۶۶ | هزینه منابع تجدیدپذیر (\$/year) |
| NAS | فناوری باتری |
| ۷۸/۰۱ | توان نامی باتری (kW) |
| ۲۲۸/۹۴ | ظرفیت انرژی نامی باتری (kWh) |
| ۱۰۰ | عمق دشارژ انتخابی (%) |
| ۲۹.۹۰۸ | هزینه باتری (\$/year) |

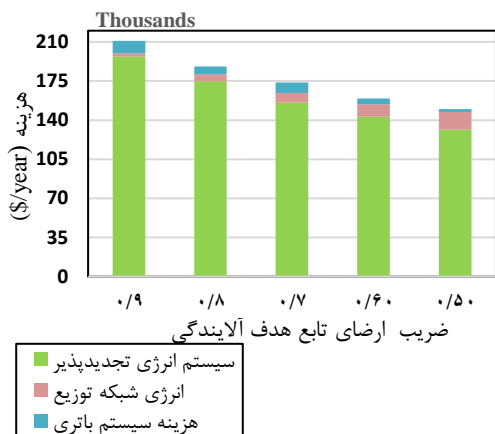
• افق برنامه ریزی ۱۰ ساله:

شکل (۱۲) نمودار هزینه‌های مرتبط با ایستگاه شارژ را به ازای افق برنامه ریزی ۱۰ سال نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): هزینه‌های ایستگاه شارژ سریع در افق ۱۰ سال

تأمین تقاضای شارژ خودروها نیز از مقدار $15,787 \text{ \$/year}$ به مقدار $2,913 \text{ \$/year}$ کاهش یافته است. در مجموع، با افزایش سطح رضای انتشار آلاینده‌ها از $0/5$ به $0/9$ ، هزینه ایستگاه شارژ از مقدار $149,945 \text{ \$/year}$ به مقدار $210,993 \text{ \$/year}$ افزایش و انتشار آلاینده‌ها از $108,061 \text{ kg}$ به $30,874 \text{ kg}$ کاهش یافته است.



شکل (۱۳): هزینه‌های ایستگاه شارژ سریع در افق ۱۵ سال

جدول (۵): مشخصات باتری و منابع نصب شده در افق ۱۵ ساله در سطح رضایت 0/9 برای آلاینده‌ها

| PV-Wind | فناوری منبع تجدیدپذیر |
|---------------|---|
| 717/97-175/55 | توان نامی منبع تجدیدپذیر (kW) |
| 196,810 | هزینه منبع تجدیدپذیر ($\text{\$/year}$) |
| Li_ion | فناوری باتری |
| 57/35 | توان نامی باتری (kW) |
| 154/73 | انرژی نامی باتری (kWh) |
| 70 | عمق دشارژ انتخابی (%) |
| 11,269 | هزینه باتری ($\text{\$/year}$) |

• افق برنامه ریزی ۲۰ ساله:

جدول (۶)، هزینه‌های ایستگاه شارژ را در افق برنامه ریزی ۲۰ ساله نمایش می‌دهد. به ازای سطح رضای 0/5 برای انتشار آلاینده‌ها با وجود تولید توان منابع انرژی تجدیدپذیر و انرژی خریداری شده از شبکه توزیع، از باتری استفاده نشده است. در حالی که در ضرایب وزنی 0/6 تا 0/8 از باتری Li-ion و در ضریب وزنی 0/9 از باتری NaS استفاده شده است. در همه سطوح رضای آلاینده‌ها، از منابع بادی و خورشیدی استفاده شده است به نحوی که با افزایش سطح رضای تابع هدف آلاینده‌ها از 0/5 به 0/9، ظرفیت منابع

با توجه به شکل (۱۲)، در همه سطوح رضای 0/5 تا 0/9 برای آلاینده‌ها، علاوه بر خرید توان مورد نیاز از شبکه توزیع، از باتری ذخیره‌ساز و منابع انرژی تجدیدپذیر نیز برای تأمین تقاضای شارژ خودروها استفاده شده است. در سطح رضای 0/9 برای آلاینده‌ها، مشخصات باتری و منبع تجدیدپذیر در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): مشخصات باتری و منابع مستقل نصب شده در افق ۱۰ ساله در سطح رضایت 0/9 برای آلاینده‌ها

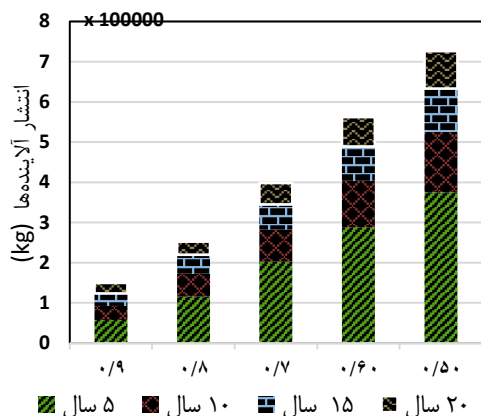
| PV-Wind | فناوری منبع تجدیدپذیر |
|---------------|---|
| 695/62-164/11 | توان نامی منبع تجدیدپذیر (kW) |
| 251,554 | هزینه منبع تجدیدپذیر ($\text{\$/year}$) |
| Li_ion | فناوری باتری |
| 66/25 | توان نامی باتری (kW) |
| 93/48 | انرژی نامی باتری (kWh) |
| 90 | عمق دشارژ انتخابی (%) |
| 10,501 | هزینه باتری ($\text{\$/year}$) |

با توجه به جدول (۴)، $695/6$ کیلووات منبع خورشیدی و $164/11$ کیلووات منبع بادی با مجموع هزینه سرمایه‌گذاری $251,554 \text{ \$/year}$ به طور همزمان در ایستگاه شارژ نصب شده است. همچنین یک باتری لیتیوم-یون (Li-ion) با توان نامی $66/25$ کیلووات و انرژی نامی $93/48$ کیلووات ساعت نیز در ایستگاه نصب شده است. با حضور این تجهیزات، مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ایستگاه شارژ برابر $265,589 \text{ \$/year}$ و انتشار آلاینده‌ها برابر $34,706 \text{ kg}$ به دست آمده است.

• افق برنامه ریزی ۱۵ ساله:

شکل (۱۳) هزینه ایستگاه شارژ به ازای افق برنامه ریزی ۱۵ سال را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب وزنی آلودگی از 0/5 به 0/9، سرمایه‌گذاری بیشتری روی باتری و سیستم انرژی تجدیدپذیر انجام شده است. در سطح رضایت 0/9 برای انتشار آلاینده‌ها، مشخصات باتری و منبع تجدیدپذیر در جدول (۵) آورده شده است.

در سطح رضای 0/5، باتری از نوع NAS با ظرفیت $48/13$ kWh و هزینه $2,532 \text{ \$/year}$ نصب شده است. در صورتی که در سطح رضای 0/9، تکنولوژی باتری لیتیوم-یون با ظرفیت $154/73$ kWh و هزینه $11,269 \text{ \$/year}$ نصب شده است. به تبع آن هزینه برق دریافتی از شبکه برای



شکل (۱۴): میزان انتشار آلاینده‌ها به ازای سطح ارضای مختلف

تجدیدپذیر در افق ۱۰ ساله با سطح رضایت ۰/۷ برای آلاینده‌گی بررسی می‌شود. در جدول (۷)، قیمت خرید انرژی از شبکه از ۶۰٪ تا ۱۴۰٪ قیمت پایه با پله‌های ۲۰٪ افزایش یافته است. در همه این بازه تغییرات قیمتی، علاوه بر باتری NAS بعنوان ذخیره‌ساز، از منابع بادی و خورشیدی نیز استفاده شده است. با افزایش قیمت خرید انرژی از شبکه، ظرفیت نصب‌شده ذخیره‌ساز و منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. در نتیجه، هزینه کل ایستگاه شارژ حدود ۳۸٪ افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش هزینه ایستگاه شارژ به دلیل افزایش ظرفیت نصب باتری و منابع تجدیدپذیر، باعث کاهش انتشار آلاینده‌ها به میزان ۶۰٪ شده است.

در جدول (۸) حساسیت استراتژی‌های سرمایه‌گذاری، با تغییرات در هزینه منابع تجدیدپذیر از ۶۰٪ تا ۱۴۰٪ قیمت پایه با پله‌های ۲۰٪ ارزیابی شده است. با کاهش ۲۰ و ۴۰ درصدی در هزینه‌های نصب و بهره‌برداری منابع انرژی تجدیدپذیر، از باتری Li-ion استفاده شده است. با افزایش هزینه منابع تجدیدپذیر، ظرفیت نصب شده و در نتیجه

جدول (۶): هزینه کل ایستگاه شارژ سریع در افق ۲۰ سال

| سطح ارضای انتشار آلاینده‌ها | ۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۰/۵ |
|---|------------|-------------|------------|------------|------------|
| فناوری انتخاب شده برای باتری | NAS | Li_ion | Li_ion | Li_ion | - |
| توان نامی (kW) | ۴۶/۵۵ | ۵۹/۰۶ | ۷۲/۹ | ۴۴/۰۷ | - |
| انرژی نامی (kWh) | ۱۸۶/۲ | ۱۲۲/۲۳ | ۸۱ | ۴۸/۹۷ | - |
| فناوری انتخاب شده برای منبع تجدیدپذیر | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind |
| توان نامی منابع تجدیدپذیر (kW) | ۷۹۸/۲۲-۲/۸ | ۷۰۵/۶۳-۱۲/۹ | ۵۵۵/۱۱-۲/۶ | ۵۴۲/۶۵-۱/۸ | ۵۰۹/۴۶-۱/۹ |
| هزینه باتری (\$/year) | ۹,۶۵۶/۴ | ۷,۵۸۶/۶ | ۵,۷۷۳/۱ | ۳,۴۹۰/۲ | - |
| هزینه منابع انرژی تجدیدپذیر (\$/year) | ۱۷۸,۷۰۲ | ۱۶۳,۱۳۴ | ۱۴۰,۴۷۹ | ۱۲۷,۲۷۴ | ۱۲۰,۵۲۵ |
| هزینه انرژی خریداری شده از شبکه (\$/year) | ۱,۹۹۶ | ۳,۳۵۲ | ۷,۵۶۳ | ۱۰,۱۵۳ | ۱۲,۷۴۴ |
| هزینه کل ایستگاه شارژ (\$/year) | ۱۹۰,۳۵۵ | ۱۷۴,۰۷۳ | ۱۵۳,۸۱۵ | ۱۴۰,۹۱۸ | ۱۳۳,۲۶۹ |
| انتشار آلاینده‌ها (kg) | ۲۶,۶۱۳/۶۶ | ۳۳,۲۶۷/۰۷ | ۵۳,۲۲۷/۳۲ | ۷۳,۱۸۷/۵۹ | ۹۳,۱۴۷/۸ |

بادی و خورشیدی نصب شده به ترتیب ۵۶٪ و ۱۵٪ افزایش می‌یابد. هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه نیز از مقدار ۱۳۳,۲۶۹ به ۱۹۰,۳۵۵ دلار افزایش و مقدار انتشار آلاینده‌ها از مقدار ۹۳,۱۴۷ به ۲۶,۶۱۳ کیلوگرم کاهش می‌یابد.

• انتشار آلاینده‌ها در افق‌های برنامه ریزی مختلف

در مدل پیشنهادی با توجه به حضور ذخیره‌ساز و منابع تجدیدپذیر علاوه بر بررسی هزینه‌های ایستگاه شارژ، به بررسی آلودگی زیست محیطی نیز پرداخته شده است. شکل (۱۴) میزان انتشار آلاینده‌ها به ازای ضرایب وزنی متفاوت را در چهار افق برنامه‌ریزی نمایش می‌دهد. با ملاحظه شکل (۱۴) می‌توان دریافت که اهمیت بخشیدن به میزان انتشار آلاینده‌ها، موجب کاهش انرژی دریافتی از شبکه و افزایش به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر می‌شود. بنابراین در همه افق‌های برنامه‌ریزی و با افزایش ضرایب وزنی آلاینده‌گی، مقدار آلاینده‌گی کاهش می‌یابد. همچنین با بیشتر شدن افق برنامه‌ریزی، مقدار آلاینده‌گی کاهش می‌یابد. دلیل این امر، توجه‌پذیر شدن سرمایه‌گذاری بیشتر روی منابع تجدیدپذیر و باتری، از لحاظ اقتصادی و در نتیجه کاهش مقدار انرژی تأمین شده از طریق خرید از شبکه است.

۴-۴- تحلیل حساسیت

در این بخش، اثر تغییرات قیمت خرید انرژی از شبکه و هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر بر هزینه ایستگاه شارژ، انتشار آلاینده‌ها و مشخصات باتری و منابع

می‌شود. در افق برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت (۵ سال) و زمانی که به میزان انتشار آلاینده‌ها توجه چندانی نشود (سطح ارضای ۰/۵)، استفاده از باتری توجیه پذیر نیست ولی در سطوح ارضای بالاتر، علاوه بر باتری، از منابع تجدیدپذیر نیز استفاده شده است. با افزایش سطح ارضای تابع هدف آلاینده‌ها، هزینه ایستگاه شارژ تا ۶۹٪ افزایش و انتشار آلاینده‌ها تا ۸۴٪ کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در افق‌های برنامه‌ریزی طولانی تر (۱۰ سال و بیشتر)، در همه سطوح ارضای آلاینده‌ها، بطور همزمان، باتری و منابع انرژی تجدیدپذیر در ایستگاه شارژ نصب می‌شود.

هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به کاهش ظرفیت منابع تجدیدپذیر نصب شده در ایستگاه شارژ، میزان انرژی خریداری شده از شبکه افزایش می‌یابد که افزایش انتشار آلاینده‌ها را در پی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

مدل بهینه‌سازی دو هدفی پیشنهادی، قابلیت تعیین نوع و ظرفیت بهینه منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی در یک ایستگاه شارژ سریع برای به حداقل رساندن دو تابع هدف هزینه‌های اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها را دارا می‌باشد. نتایج به دست آمده به ازای افق‌های برنامه‌ریزی مختلف و تغییر در قیمت انرژی شبکه و هزینه به کارگیری منابع تجدیدپذیر نشان می‌دهد که هر چه سطح رضایت مربوط به تابع هدف آلاینده‌ها افزایش پیدا می‌کند سرمایه‌گذاری بیشتری روی منابع تجدیدپذیر و باتری انجام می‌شود. با افزایش ظرفیت منابع تجدیدپذیر و باتری، توان خریداری شده از شبکه و در نتیجه، مقدار آلاینده‌ها نیز کاهش می‌یابد. همچنین هر چه افق برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد سرمایه‌گذاری بیشتری روی منابع تجدیدپذیر و باتری انجام

جدول (۷): اثر تغییرات قیمت خرید انرژی از شبکه

| هزینه انرژی شبکه توزیع | ۰/۶λ | ۰/۸λ | λ | ۱/۲λ | ۱/۴λ |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| نوع سیستم ذخیره انرژی | NAS | NAS | NAS | NAS | NAS |
| توان نامی باتری (kW) | ۱۷/۰۹ | ۳۷/۲۶ | ۴۶/۹۶ | ۷۱/۳۲ | ۴۸/۸۴ |
| انرژی نامی باتری (kWh) | ۸۰/۰۴ | ۱۲۴/۵۳ | ۱۷۵/۲۵ | ۲۵۱/۹۴ | ۲۳۵/۸۹ |
| فناوری سیستم انرژی تجدیدپذیر | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind |
| توان نامی تجدیدپذیر (kW) | ۳۱۴/۲۶-۱۶۴/۲۶ | ۴۲۷/۱۵-۱۸۱/۶۱ | ۴۴۰/۱۳-۲۰۱/۳۶ | ۴۶۰/۱۸-۲۳۱/۲۱ | ۴۴۸/۹۹-۲۲۵/۲۱ |
| هزینه کل ایستگاه شارژ سریع (\$/year) | ۱۵۹,۰۱۷ | ۱۹۵,۶۳۴ | ۲۰۷,۴۶۳ | ۲۱۵,۹۷۲ | ۲۱۹,۸۱۶ |
| انتشار آلاینده‌ها (kg) | ۱۷۳,۰۶۳ | ۹۵,۶۶۰ | ۸۰,۹۸۱ | ۷۲,۶۴۳ | ۷۰,۲۲۳ |

جدول (۸): اثر تغییرات هزینه منابع تجدیدپذیر

| هزینه سیستم انرژی تجدیدپذیر | ۰/۶(CP _k +CO _k) | ۰/۸(CP _k +CO _k) | (CP _k +CO _k) | ۱/۲(CP _k +CO _k) | ۱/۴(CP _k +CO _k) |
|--------------------------------------|--|--|-------------------------------------|--|--|
| تکرار بهینه | ۳۱ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۴ | ۳۴ |
| نوع سیستم ذخیره انرژی | Li_ion | Li_ion | NAS | NAS | NAS |
| توان نامی (kW) | ۵۰/۵۹ | ۷۸/۱۳ | ۴۶/۹۶ | ۳۱/۷۹ | ۱۸/۹۱ |
| انرژی نامی (kWh) | ۵۶/۲۱ | ۸۶/۹۳ | ۱۷۵/۲۵ | ۱۲۷/۷۰ | ۸۹/۹۹ |
| فناوری سیستم انرژی تجدیدپذیر | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind | PV/Wind |
| توان نامی (kW) | ۵۵۴/۵۸-۲/۴ | ۵۴۲/۹۳-۲/۶ | ۴۴۰/۱۳-۲/۴ | ۳۰۷/۷۲-۲/۱ | ۲۹۷/۶۸-۲/۶ |
| هزینه کل ایستگاه شارژ سریع (\$/year) | ۱۵۱,۴۷۰ | ۱۸۴,۱۷۹ | ۲۰۷,۴۶۳ | ۲۰۲,۵۱۳ | ۲۲۱,۸۴۶ |
| انتشار آلاینده‌ها (kg) | ۴۷,۵۳۵/۴ | ۶۱,۹۳۸/۴ | ۸۰,۹۸۱/۵ | ۱۵۵,۱۲۶/۷ | ۱۸۲,۰۰۱/۶ |

مراجع

- [1] T. Wu, X. Wei, X. Zhang, G. Wang, J. Qiu and S. Xia, "Carbon-Oriented Expansion Planning of Integrated Electricity-Natural Gas Systems With EV Fast-Charging Stations," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 8, No. 2, June 2022, pp. 2797-2809.
- [2] M. Alizadeh, M. Jafari-Nokandi and M. Shahabi, "Resiliency-oriented islanding of distribution network in the presence of charging stations for electric vehicles," *International Transactions on Electrical and Energy Systems*, Vol. 30, No. 12, December 2020, e12670.
- [3] R.P. Narasipuram and S.Mopidevi, "A technological overview & design considerations for developing electric vehicle charging stations , " *Journal of Energy Storage*, Vol. 43, November 2021, 103225.
- [4] A. Pal, A. Bhattacharya and A.K. Chakraborty, "Placement of Public Fast-Charging Station and Solar Distributed Generation with Battery Energy Storage in Distribution Network Considering Uncertainties and Traffic Congestion, " *Journal of Energy Storage*, Vol. 41, September 2021, 102939.
- [5] A. Hussain, V. Bui and H. Kim, "Optimal Sizing of Battery Energy Storage System in a Fast EV Charging Station Considering Power Outages," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, No. 2, June 2020, pp. 453-463.
- [6] W.u.Rehman, R.Bo, H.Mehdipourpicha, J.W.Kimball, "Sizing battery energy storage and PV system in an extreme fast charging station considering uncertainties and battery degradation, " *Applied Energy*, Volume 313, 1 May 2022.
- [7] H. Shareef, Md. M.Islam and A. Mohamed, " A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles, " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, October 2016, pp 403-420.
- [8] R. Saadati, 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, February 2021, 102527.
- [9] 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*, July 2019, pp. 923-934.
- [10] C. Leone, M. Longo, L. M. Fernández-Ramírez and P. García-Triviño, "Multi-Objective Optimization of PV and Energy Storage Systems for Ultra-Fast Charging Stations," *IEEE Access*, Vol. 10, 2022, pp.14208-14224.
- [11] B. Sun, "A multi-objective optimization model for fast electric vehicle charging stations with wind, PV power and energy storage, " *Journal of Cleaner Production*, Vol. 288, March 2021, 125564.
- [12] C. Leone, C. Peretti, A. Paris and M.Longo, "Photovoltaic and battery systems sizing optimization for ultra-fast charging station integration," *Journal of Energy Storage*, Vol. 52, August 2022, 104995.
- [۱۳] علی نوبری، محمد صادق سپاسیان، "تعیین اندازه سیستم ذخیره ساز انرژی در طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی"، کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی- چهارمین کنفرانس انجمن علمی انرژی ایران با رویکرد انرژی، ایمنی و محیط زیست، ۱۳۹۶.
- [14] M. Moradzadeh and M. M. A. Abdelaziz, "A New MILP Formulation for Renewables and Energy Storage Integration in Fast Charging Stations," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, No. 1, March 2020, pp. 181-198.
- [15] J. Li, S. He, Q. Yang, T. Ma and Z. Wei, "Optimal Design of the EV Charging Station with Retired Battery Systems Against Charging Demand Uncertainty," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, pp. 1-1.
- [16] F. Si, J. Wang, Y. Han and Q. Zhao, "Risk-Averse Multiobjective Optimization for Integrated Electricity and Heating System: An Augment Epsilon-Constraint Approach," *IEEE Systems Journal*, Vol. 16, No. 4, December 2020, pp 5142-5153.
- [۱۷] م. خاکپور، م. جعفری نوکندی، ع.ا. عبدوس، "برنامه‌ریزی همزمان توسعه تولید و انتقال در بازار برق با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، " *هوش محاسباتی در مهندسی برق*، دوره ۶، شماره ۳، آبان ۱۳۹۴، صفحات ۹۹-۱۱۴.
- [18] M.Abdelaziz, M.Moradzadeh, " Monte-Carlo simulation based multi-objective optimum allocation of renewable distributed generation using OpenCL," *Electric Power Systems Research*, Vol. 170, May 2019, pp 81-91.