

Online Charge and Discharge Estimation of Electric Vehicles in Presence of Uncertainties in Renewable Resources and Number of Distributed Energy Resources

Vahid Bagheri¹, Ph.D. in Electrical Control

1-Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, Email:
V.Bagheri@edu.ikiu.ac.ir

Amir Farhad Ehyaei^{2,*}, Assistant Professor

2-Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, Email:
f.ehyaei@eng.ikiu.ac.ir

Mohammad Haeri³, Professor

3-Electrical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: haeri@sharif.edu

Abstract:

Nowadays, the need has increased to manage distributed energy resources due to advances in the renewable energies industry, the distance between energy resources and local loads, growth in the number of electric vehicles, and high power transmission costs. In this regard, important challenges, such as power exchange management between distributed energy resources and electric vehicle batteries, have been raised for optimal use of the power generated from these resources. Since home consumers are supposed to have wind turbines or photovoltaics installed to the supply part of their power consumption, the impact of wind and solar radiation uncertainties on their output power should be considered. Considering these challenges and in an attempt to flatten the difference curve between the generated power of resources and consumption power of local loads, this paper proposes an efficient method based on mean-field theory to control the charge and discharge of electric vehicle batteries. On the other hand, with the increase in the number of electric vehicles and distributed energy resources, the control of charging and discharging of too many batteries requires heavy and time-consuming calculations. This paper proposes an innovative method by introducing some coefficients for online estimation of the charge and discharge of batteries, which leads to a reduction in the volume of calculations. To this end, a compromise has been made between the performance, the volume of calculation reduction, and the necessity of these calculations. Simulation results illustrate the quality and efficiency of the charge and discharge estimation of batteries based on the proposed method.

Keywords: Battery charge/discharge, electric vehicle, mean-field theory, Monte Carlo, volume of calculations, load curve, wind turbine, photovoltaic.

Submit date: 2022/02/20

Accepted date: 2022/05/08

Corresponding author Name: Amir Farhad Ehyaei

Corresponding author address: Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

تخمین برخط شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در حضور نامعینی‌های توان منابع تجدیدپذیر و تعداد منابع تولید پراکنده

نوع مطالعه: پژوهشی

وحید باقری^۱، دانشجوی دکتری، امیر فرهاد احيائي^{۲*}، استادیار، محمد حائری^۳، استاد

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران

V.Bagheri@edu.ikiu.ac.ir

۲- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران

f.ehyaei@eng.ikiu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران

haeri@sharif.ir

چکیده: امروزه با توجه به پیشرفت در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر، فاصله زیاد منابع تولید انرژی از بارهای محلی، افزایش تعداد خودروهای الکتریکی و هزینه‌های گزاف انتقال توان، لزوم مدیریت منابع انرژی تولید پراکنده بیشتر شده است. در این راستا، چالش‌های مهمی از جمله نحوه تبادل توان بین منابع تولید پراکنده و باتری‌های خودروهای الکتریکی جهت استفاده بهینه از توان تولیدی این منابع مطرح شده است. یکی از راهکارهای افزایش منابع تولید پراکنده، تشویق مصرف کنندگان خانگی به نصب توربین بادی یا سلول‌های خورشیدی جهت تامین بخشی از توان مصرفی است؛ در اینصورت تاثیر نامعینی موجود در باد و تشعشع خورشید بر میزان توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی می‌بایست در نظر گرفته شود. در این مقاله، با در نظر گرفتن چالش‌های فوق، جهت هموار کردن منحنی اختلاف بین توان تولیدی منابع و توان مصرفی بارهای محلی، روشی کارآمد مبتنی بر روش میدان میانگین برای کنترل شارژ و دشارژ باتری خودروهای الکتریکی معرفی شده است. از سوی دیگر با توجه به افزایش تعداد خودروهای الکتریکی و افزایش تعداد منابع تولید پراکنده، کنترل شارژ و دشارژ تعداد بسیار زیادی از باتری‌ها مستلزم محاسبات سنگین و بسیار زمان‌بر است. به همین دلیل در این مقاله، با استفاده از ضرایبی میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها تخمین زده می‌شود که این امر منجر به کاهش چشمگیر حجم محاسبات می‌گردد. در این راستا، بین کیفیت پاسخ، کاهش حجم محاسبات و لزوم استفاده از این محاسبات مصالحه‌ای صورت گرفته است و نتایج شبیه‌سازی، کیفیت و کارایی تخمین شارژ و دشارژ باتری‌ها بر اساس روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شارژ/دشارژ باتری، خودروی الکتریکی، میدان میانگین، مونت کارلو، حجم محاسبات، منحنی بار، توربین بادی، سلول خورشیدی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: امیر فرهاد احيائي

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران

۱- مقدمه

منحنی بار است. در (Khemakhem et al. 2020) یک سیستم مدیریت انرژی مشترک بین خودروهای الکتریکی، خانه‌های هوشمند و تعامل همسایگان جهت هموارسازی منحنی بار طراحی شده است. یک استراتژی کنترل شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی در یک شبکه توزیع مسکونی به منظور دستیابی به پروفایل بار هموار و تنظیم ولتاژ با در نظر گرفتن سود باتری‌ها و سود مالکان خودروها در (Reddy & Meikandasivam, 2018 In EPSR; Reddy & Meikandasivam, 2018 In ITSE) ارائه شده است. یک استراتژی کنترل شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی مبتنی بر چندین عامل به منظور هموار کردن منحنی بار با در نظر گرفتن تنظیم ولتاژ و درآمد مشتری در (Reddy et al. 2019) ارائه شده است. همچنین یک استراتژی شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی به منظور تحقق اهداف شبکه از قبیل هموارسازی منحنی بار و حداقل کردن تغییر بار و همچنین تحقق منافع اقتصادی و اجتماعی مالکان خودروهای الکتریکی در (Tiwari et al. 2020) ارائه شده است. در (Shokri, & Kebriaei, 2018) از روش میدان میانگین به منظور هموارسازی منحنی بار و مینیمم کردن هزینه برق استفاده کرده است.

در بعضی موارد، از ترکیب روش‌های بریدن قله و پر کردن دره برای رسیدن به یک منحنی بار هموار استفاده می‌کنند. یک الگوریتم شارژ و دشارژ هوشمند متمرکز برای بهینه‌سازی شارژ و دشارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی با هدف بریدن قله^۱ و پر کردن دره^۲ به هموار کردن منحنی بار کمک می‌کند (Ramadan et al. 2018). یک روش هماهنگی میان جمیع کنندگان خودروهای الکتریکی به منظور هموار کردن منحنی بار با در نظر گرفتن بریدن قله و پر کردن دره در (Khan et al. 2021) ارائه شده است. یک روش کنترل شارژ و دشارژ دو مرحله‌ای برای خودروهای الکتریکی با هدف بریدن قله و پر کردن دره در یک شبکه توزیع ۳۳ باس در (Ghobadzadeh et al. 2020) ارائه شده است. در (Solanke et al. 2020) سیستم مدیریت انرژی جمیع‌کننده خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی نظیر تعادل توان و حالت شارژ (SoC) در زمان حقیقی^۳ به منظور بریدن قله و پر کردن دره به صورت بهینه طراحی شده است. یک روش زمان‌بندی شارژ هماهنگ^۴ برای خودروهای الکتریکی در ریزشبکه برای تغییر تقاضای بار از قله به دره در (Zhou et al. 2020) ارائه شده است. به منظور استفاده از قابلیت کنترل باتری‌های خودروهای الکتریکی در طول فازهای شارژ و دشارژ؛ مدل هماهنگی خودرو به شبکه (V2G) و شبکه به خودرو (G2V) ارائه شده در (Jain, P., & Jain, T. 2018)، برای دستیابی به بریدن قله و پر کردن دره در یک منحنی بار شامل دو قله بسیار موثر بوده است. اما روش‌های ارائه شده در مقالات مرور شده، دارای حجم محاسبات بسیار بالایی هستند و در نتیجه زمان اجرای این محاسبات نیز بسیار زیاد می‌باشد. لذا از این محاسبات نمی‌توان در عمل استفاده کرد.

خودروهای الکتریکی به دلیل بازده بالا، آلودگی بسیار کم و صرفه‌جویی در هزینه‌ها دارای رشدی روزافزون در سراسر دنیا هستند. با توجه به تعداد بسیار زیاد خودروهای الکتریکی، عدم کنترل شارژ آنها اثرات مخربی نظیر پیک ولتاژ، افت کیفیت توان و افت ولتاژ شبکه را در پی خواهد داشت. این مسئله در تحقیقات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه مروری بر بعضی از این تحقیقات خواهیم داشت.

خودروهای الکتریکی، برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مناسب بوده و در کاهش آلودگی بسیار موثر هستند (Salama et al., 2020). از سوی دیگر، مدیریت انرژی خودروی الکتریکی در حمل و نقل برقی برای مقابله با پدیده تغییرات آب و هوا ضروری است (Ibrahim & Jiang, 2021). اما طراحی سیستم مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند از طریق باتری‌های خانگی و باتری‌های خودروهای الکتریکی، با چالش‌های متعددی رو به رو است. در این سیستم‌ها معمولاً از باتری خانگی جهت ذخیره‌سازی انرژی اضافی سلول‌های خورشیدی یا توربین بادی استفاده می‌شود. عدم اطمینان در ارتباط با باتری‌های خودروها و ماهیت تصادفی بودن منابع انرژی تجدیدپذیر باعث افزایش چالش‌های پایداری ولتاژ در سیستم مدیریت انرژی این سیستم‌ها شده است. در (Divshali et al., 2017) کنترل عرضه و تقاضا در حضور تعداد زیادی از منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری‌های خودروها ارائه شده است و همچنین محدودیت‌های تنظیم ولتاژ برآورده شده است. در (Lee & Choi, 2020) یک روش یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی برای زمان‌بندی مصرف انرژی لوازم خانگی هوشمند و منابع انرژی تجدیدپذیر شامل باتری‌های ذخیره‌ساز و باتری‌های خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در (Hou et al., 2019) یک مدل جامع جهت اولویت‌بندی کاربران هنگام برنامه‌ریزی استفاده از برق و همچنین یک استراتژی شارژ و دشارژ اختصاصی برای باتری‌های خانگی و باتری‌های خودروها با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری آنها پیشنهاد شده است. در (Wu, Hu, Yin et al. 2016; Wu, Hu, Moura et al. 2016) چالش‌های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر در خانه‌های هوشمند با استفاده از باتری‌های خودروها بررسی شده است. سیستم انرژی خانه‌های هوشمند شامل منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، انرژی الکتریکی تولید شده را برای مصرف خانگی یا برای شارژ باتری‌ها و یا برای درآمدزایی به شبکه تحویل می‌دهد (Koltsaklis et al. 2021). در (Yousefi et al. 2019) مدل‌سازی تصادفی خانه‌های هوشمند همراه با پارامترهای تصادفی و عدم قطعیت برای سلول خورشیدی، باتری‌های خودروها، بارهای خانگی و پمپ حرارتی انجام شده است و دقت هر مدل با داده‌های واقعی اندازه‌گیری می‌شود.

یکی از چالش‌های طراحی سیستم‌های مدیریت انرژی، هموارسازی

³ Real-time

⁴ Coordinated charging scheduling method

¹ Peak shaving

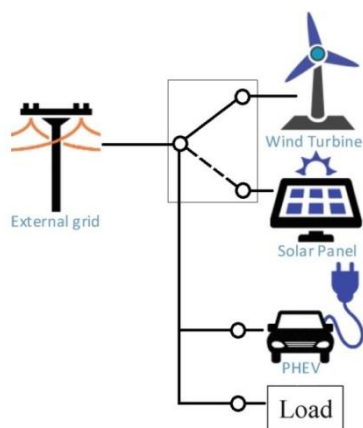
² Valley filling

در بخش ۲، دینامیک وضعیت شارژ خودرو، تابع قیمت، نحوه محاسبه قبض روزانه مشتری‌ها، هزینه استهلاک باتری‌ها و تابع هزینه مشتری‌ها به صورت کامل بیان شده است. همچنین در این بخش، الگوریتم میدان میانگین جهت حل مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است. در بخش ۳، نحوه محاسبه ضرایب استفاده شده در معادله به‌روزرسانی شارژ خودروها آورده شده است. سپس معادله کلی به‌روزرسانی شارژ خودروها به همراه همه ضرایب بیان شده است. در بخش ۴، شبیه‌سازی یک نمونه موردی دارای تعدادی مشتری به همراه سلول خورشیدی و توربین بادی بررسی شده است. توزیع مناسبی برای پروفایل تعداد خودروهای الکتریکی، پروفایل توان خروجی سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی در انواع روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی مسئله

یک شبکه توزیع برق و مجموعه‌ای از مشتری‌های خانگی را در نظر بگیرید. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود؛ هر مشتری، دارای یک خودروی الکتریکی و مجموعه از بارهای خانگی است؛ که بخشی از توان خود را توسط منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل توربین بادی یا سلول خورشیدی با قابلیت نصب در خانه تامین می‌کند.

کل توان مصرفی خانگی و کل توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر برای مشتری $n \in N$ در ساعت $t \in T$ به ترتیب به صورت $p_n^{S,t}$ و $p_n^{D,t}$ در نظر گرفته شده است. در نتیجه کل توان غیرقابل کنترل برای هر مشتری به صورت $p_n^{Un,t} = p_n^{D,t} - p_n^{S,t}$ در نظر گرفته می‌شود. توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر برای مشتری $n \in N$ در ساعت $t \in T$ به صورت $p_n^{PV,t} = p_n^{WT,t} + p_n^{C,t}$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به منحنی توان غیرقابل کنترل در روزهای قبل، منحنی این توان را به عنوان پیش‌بینی توان برای روزهای بعد استفاده می‌کنیم. در نتیجه کل توان مشتری $n \in N$ (شامل باتری خودروی الکتریکی) با معادله زیر قابل بیان است.



شکل ۱: شماتیک ارتباطات برای هر مشتری.

$$p_n = p_n^{Un} + q_n^C - q_n^D \quad (1)$$

در این رابطه، $p_n = [p_n^1 \dots p_n^T]^T$ ، $p_n^{Un} = [p_n^{Un,1} \dots p_n^{Un,T}]^T$ و $q_n^C = [q_n^{C,1} \dots q_n^{C,T}]^T$ می‌باشد. q_n^D نشان‌دهنده شارژ و دشارژ باتری $n \in N$ در ساعت $t \in T$ می‌باشد. دینامیک وضعیت شارژ خودرو را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

در واقعیت با توجه به تعداد بسیار زیاد خلنه‌ها در هر منطقه، کنترل شارژ و دشارژ باتری‌ها تاثیر بسیار زیادی روی منحنی بار، افت ولتاژ شبکه و افت کیفیت توان دارد. از طرفی در مقالات فوق برای کنترل تعداد بسیار زیاد باتری خودروها به محاسبات بسیار طولانی نیاز است. همچنین با در نظر گرفتن نامعینی باد و تشعشع خورشیدی، توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی دچار تغییر می‌شود؛ که با در نظر گرفتن آن حجم محاسبات بسیار بیشتر می‌شود و در عمل نمی‌توان از نتیجه این محاسبات برای کنترل شارژ و دشارژ باتری‌ها استفاده کرد. همچنین با توجه به تغییر تعداد باتری‌های متصل به شبکه در هر ساعت، به‌روزرسانی محاسبات در هر ساعت در عمل به هیچ وجه امکان‌پذیر نیست. زیرا محاسبات لازم برای بدست آوردن میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها در هر ساعت، بیش از چندین ساعت طول می‌کشد. در نتیجه با تغییر تعداد خودروها در هر ساعت نمی‌توان محاسبات را به صورت ساعتی به‌روزرسانی کرد و این امر باعث ایجاد ناهموازی در منحنی بار شده و اثرات مخربی نظیر افت کیفیت توان، افت ولتاژ شبکه و ناپایداری شبکه را به همراه خواهد داشت. لذا، در مقاله حاضر به منظور حل مشکلات فوق راهکار مناسبی پیشنهاد خواهد شد. چالش‌ها و نوآوری‌هایی که در این مقاله مد نظر قرار گرفته‌اند، عبارت هستند از:

- ۱- تعداد خودروها زیاد است، لذا حجم محاسبات زیاد می‌باشد.
- ۲- با توجه به تغییر تعداد خودروها در هر ساعت، باید محاسبات مربوط به شارژ و دشارژ باتری‌ها به‌روزرسانی شود.
- ۳- نامعینی باد و تشعشع خورشیدی، باعث تغییراتی در توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی می‌شود؛ که در نظر گرفتن این نامعینی‌ها حجم محاسبات را افزایش می‌هد.
- ۴- عدم کنترل شارژ و دشارژ باتری‌های خودروها باعث ایجاد ناهموازی در منحنی بار شده و در نتیجه اثرات مخربی نظیر افت کیفیت توان، افت ولتاژ شبکه و ناپایداری شبکه را به همراه خواهد داشت.

لذا برای تعیین میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها با توجه به نامعینی باد و تشعشع خورشیدی، تغییرات تعداد خودروها در هر ساعت و هموارسازی منحنی بار باید با روش‌هایی محاسبات شارژ و دشارژ باتری‌ها را کم حجم‌تر کنیم تا بتوانیم از نتایج محاسبات در عمل استفاده کنیم. برای این منظور محاسبات شارژ و دشارژ باتری‌ها را در حالت خاصی برای ۳۰ درصد تغییر حول میانگین تعداد خودروها و همچنین ۳۰ درصد تغییر حول توان خروجی پیش‌بینی شده برای توربین بادی و سلول خورشیدی انجام می‌دهیم و برای این حالت‌ها مقدار شارژ و دشارژ باتری‌ها را تعیین می‌کنیم. در نهایت با توجه به پروفایل تعداد خودروها در ۲۴ ساعت گذشته، میزان شارژ و دشارژ باتری خودروها را تعیین می‌کنیم و برای به‌روزرسانی شارژ و دشارژ باتری‌ها از محاسبات انجام شده قبلی استفاده می‌شود. روش ارائه شده، نسبت به دقیق‌ترین روش، دارای دقت قابل قبولی بوده و با توجه به زمان بسیار کوتاه به‌روزرسانی محاسبات، در عمل قابل استفاده هستند. همچنین این روش نسبت به دقیق‌ترین روش، اختلاف بسیار کوچکی در شارژ و دشارژ باتری‌ها ایجاد می‌کند که قابل اغماض است.

تخمینی را به بازیگرها ارسال می‌کند. بنابراین ترم مشترک \bar{p} که ترم میدان میانگین نامیده می‌شود؛ با متغیر $z(k)$ تخمین زده می‌شود، که k شماره مرحله الگوریتم است. با اعمال $z(k)$ به جای \bar{p} ، مسئله بهینه‌سازی برای بازیگر $n \in N$ به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$q_n^*(z(k)) = \underset{q_n}{\operatorname{argmin}} U_n(q_n, z(k)) \quad (8)$$

با استفاده از الگوریتم تکرار Mann (Berinde & Takens 2007)، معادله به‌روزرسانی تخمین به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$z(k+1) = (1 - \lambda(k))z(k) + \lambda(k)\Lambda(z(k)) \quad (9)$$

$$\Lambda(z(k)) = \sum_{n \in N} \frac{1}{N} p_n^*(z(k))$$

طوری که $\sum_{k=0}^{\infty} \lambda(k) = \infty$ ، $\sum_{k=0}^{\infty} \lambda(k)^2 < \infty$ و $p_n^*(z(k)) = q_n^{C*}(z(k)) - q_n^{D*}(z(k)) + p_n^{Un}$ برای تکرار k صادق می‌باشد. فرآیند تخمین و بهینه‌سازی در الگوریتم زیر آورده شده است. طبق این الگوریتم، هر بازیگر استراتژی بهینه مربوط به خود را با استفاده از میزان متوسط مصرف شبکه برنامه‌ریزی می‌کند. سپس بنا بر منحنی مصرف بازیگرها در هر مرحله، تخمین جدید منحنی متوسط بار شبکه توسط شرکت توزیع محاسبه و برای بازیگرها ارسال می‌شود. اگر مشتری n نتواند مقدار p_n مربوط به خود را در هر تکرار بفرستد، الگوریتم با آخرین مقدار فرستاده شده توسط بازیگر ادامه می‌یابد.

الگوریتم میدان میانگین برای مسئله شارژ خودروهای الکتریکی (Shokri, & Kebriaei 2018):

initialization

randomly initialize $z(0)$, $k \leftarrow 0$

iteration

for $n \in N$

$$q_n^*(z(k)) \leftarrow \underset{q_n}{\operatorname{argmin}} U_n(q_n, z(k))$$

$$p_n^*(z(k)) \leftarrow p_n^{Un} + q_n^{C*}(z(k)) - q_n^{D*}(z(k))$$

end

$$\Lambda(z(k)) \leftarrow \sum_{n \in N} \frac{1}{N} p_n^*(z(k))$$

$$z(k+1) \leftarrow (1 - \lambda(k))z(k) + \lambda(k)\Lambda(z(k))$$

$$k \leftarrow k + 1$$

مطابق قضیه ۳ در (Shokri, & Kebriaei 2018)، اگر فرضیات قضیه ۲ در (Shokri, & Kebriaei 2018) برقرار باشد و جمعیت بازیگرها به بی‌نهایت میل کند؛ آنگاه الگوریتم ارائه شده به نقطه تعادل نش همگرا می‌شود.

۳- طرح پیشنهادی

با افزایش تعداد خودروهای الکتریکی، حجم محاسبات و زمان انجام آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر تعداد خودروها در هر ساعت، باید بهینه‌سازی مربوط به کنترل شارژ و دشارژ باتری‌ها را به‌روزرسانی کنیم. در نتیجه محاسبات و زمان انجام محاسبات چندین برابر می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن نامعینی باد و تشعشع خورشید، توان توربین بادی و سلول خورشیدی دارای نامعینی می‌باشد. با در نظر گرفتن نامعینی‌های موجود در توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی،

$$s_n^t = s_n^{t-1} + \frac{\mu_n}{\varsigma_n} q_n^{C,t} - \frac{\mu_n^{-1}}{\varsigma_n} q_n^{D,t} \quad (2)$$

$$0 \leq s_n^t \leq 1$$

$$0 \leq q_n^{C,t} \leq q_n^{C,\max}$$

$$0 \leq q_n^{D,t} \leq q_n^{D,\max}$$

در این رابطه، s_n^t وضعیت شارژ مشتری n در زمان t را نشان می‌دهد. دینامیک وضعیت شارژ به میزان شارژ اولیه s_n^0 وابسته می‌باشد. تابع قیمت به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$T_n^t(p_n^t, \bar{p}^t) = a_{e,n}^t p_n^t + b_e^t \bar{p}^t + c_e^t \quad (3)$$

که $a_{e,n}^t \geq 0$ و $b_e^t > 0$ است و \bar{p} به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\bar{p} = \sum_{n \in N} \frac{1}{N} p_n \quad (4)$$

که $\bar{p} = [\bar{p}^1 \dots \bar{p}^T]^T$ می‌باشد. ضرایب $a_{e,n}^t$ ، b_e^t و c_e^t از قبل مشخص شده است. تابع قیمت (۳)، هم در جابجایی بار (با توجه به وابستگی تابع قیمت به \bar{p}^t) و هم کاهش بار (با توجه به وابستگی تابع قیمت به p_n^t) تاثیرگذار است. با توجه به تابع قیمت برای مشتری n ، قبض روزانه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E_n^t(p_n^t, \bar{p}^t) = T_n^t(p_n^t, \bar{p}^t) p_n^t \quad (5)$$

در تابع قیمت، قیمت برق را به توان دو می‌رساند که باعث تشویق مشتری‌ها برای کاهش میزان مصرف می‌شود. $b_e^t \bar{p}^t$ باعث تشویق مشتری‌ها برای عدم مصرف در ساعات‌های پیک منحنی بار می‌گردد و به هموارسازی منحنی بار کمک می‌کند. c_e^t برای تغییر تعرفه برق در زمان‌های مختلف روز توسط شرکت توزیع می‌باشد.

هزینه استهلاک باتری‌های خودروهای الکتریکی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$H_n(q_n^t) = a_{n,n} \left((q_n^{C,t})^2 + (q_n^{D,t})^2 \right) + b_n (q_n^{C,t} + q_n^{D,t}) \quad (6)$$

که $q_n^t = [q_n^{C,t} \quad q_n^{D,t}]^T$ می‌باشد. بنابراین تابع هزینه مشتری n به صورت زیر تعریف می‌شود

$$U_n(q_n, \bar{p}) = \sum_{t \in T} (E_n^t(p_n^t, \bar{p}^t) + H_n(q_n^t)) \quad (7)$$

که $q_n = [q_n^C \quad q_n^D]^T$ می‌باشد. مسئله اصلی برای هر مشتری، بدست آوردن مقدار بهینه q_n با هدف کمینه‌سازی تابع هزینه (۷) می‌باشد.

با توجه به رابطه (۷) استراتژی هر مشتری روی سایر مشتری‌ها از طریق ترم \bar{p}^t اثر می‌گذارد. همچنین چون سایر بازیگرهای موجود در بازی اطلاعاتی در باره استراتژی سایر بازیگرها ندارند، در نتیجه این بازی با اطلاعات کامل نیست. اما با وجود ترم \bar{p} به عنوان ترم مشترک در تابع هزینه همه بازیگرها، هیچ بازیگری نیازی به داشتن اطلاعات از استراتژی بهینه سایر بازیگرها ندارد. با در نظر گرفتن این نکته، بهینه‌سازی غیرمتمرکز میدان میانگین برای حل مسئله پیشنهاد می‌شود. در این روش، بین بازیگرها هیچ تبادل اطلاعاتی صورت نمی‌گیرد و فقط بین بازیگرها و شرکت توزیع، انتقال اطلاعات انجام می‌شود. در این حالت شرکت توزیع استراتژی بهینه همه بازیگرها را محاسبه می‌کند و پس از محاسبه ترم میدان میانگین و تخمین این ترم برای مرحله بعدی، مقدار

سلول خورشیدی بر روی میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها، تعداد خودروها را برابر با مقدار نامی (میانگین تعداد خودروها) و توان توربین بادی را نیز برابر با توان نامی (توان پیش‌بینی شده در روزهای قبل) در نظر می‌گیریم. در این قسمت، به جای تغییر دادن تعداد خودروها، توان خروجی سلول خورشیدی را در ساعت r حول توان نامی (توان پیش‌بینی شده در روزهای قبل) بر اساس رابطه (۱۱)، ۱۵ درصد اضافه و کم می‌کنیم و سپس ضرایب $k_{r,r+z}^2$ را به همان روش قبلی محاسبه می‌کنیم. در این قسمت دقت می‌کنیم که در ساعت‌های که تشعشع خورشید وجود ندارد، توان خروجی سلول خورشیدی برابر با صفر می‌باشد. به همین دلیل برای این ساعت‌ها ضرایب محاسبه نمی‌شوند.

$$p^{WT} = \begin{bmatrix} [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 - \frac{15}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 - \frac{10}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 - \frac{5}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 + \frac{5}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 + \frac{10}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \\ [p_{prd}^{WT}(1) \dots p_{prd}^{WT}(r-1)] \left(1 + \frac{15}{100}\right) p_{prd}^{WT}(r) [p_{prd}^{WT}(r+1) \dots p_{prd}^{WT}(24)] \end{bmatrix} \quad (12)$$

به همین ترتیب برای بدست آوردن ضریب سوم ناشی از تغییرات توان توربین بادی بر روی میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها، تعداد خودروها را برابر با مقدار نامی (میانگین تعداد خودروها) و توان سلول خورشیدی را نیز برابر با توان نامی (توان پیش‌بینی شده در روزهای قبل) در نظر می‌گیریم. در این قسمت، به جای تغییر دادن تعداد خودروها، توان خروجی توربین بادی را در ساعت r حول توان نامی (توان پیش‌بینی شده در روزهای قبل) بر اساس (۱۲)، ۱۵ درصد اضافه و کم می‌کنیم و سپس ضرایب $k_{r,r+z}^3$ را به همان روش قبلی محاسبه می‌کنیم.

فرض می‌کنیم که مجموع اختلاف بین شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به صورت زیر تعریف شود.

$$p_{phev} = \sum_{n \in N} (q_n^{C,t} - q_n^{D,t}), \quad (13)$$

برای تخمین میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها؛ با در نظر گرفتن تغییرات تعداد خودروها در ۲۴ ساعت شبانه روز، تغییرات توان خروجی سلول خورشیدی و تغییرات توان خروجی توربین بادی از ضرایب بدست آمده به صورت رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$p_{phev,new}^r = p_{phev,old}^r + k_{r,r-2}^1 (N_{r-2}^{new} - N_{r-2}^{avg}) + k_{r,r-1}^1 (N_{r-1}^{new} - N_{r-1}^{avg}) + k_{r,r}^1 (N_r^{new} - N_r^{avg}) + k_{r,r+1}^1 (N_{r+1}^{new} - N_{r+1}^{avg}) + k_{r,r+2}^1 (N_{r+2}^{new} - N_{r+2}^{avg}) + k_{r,r-2}^2 (p_{r-2}^{PV,new} - p_{r-2}^{PV,prd}) + k_{r,r-1}^2 (p_{r-1}^{PV,new} - p_{r-1}^{PV,prd}) + k_{r,r}^2 (p_r^{PV,new} - p_r^{PV,prd}) + k_{r,r+1}^2 (p_{r+1}^{PV,new} - p_{r+1}^{PV,prd}) + k_{r,r+2}^2 (p_{r+2}^{PV,new} - p_{r+2}^{PV,prd}) + k_{r,r-2}^3 (p_{r-2}^{WT,new} - p_{r-2}^{WT,prd}) + k_{r,r-1}^3 (p_{r-1}^{WT,new} - p_{r-1}^{WT,prd}) + k_{r,r}^3 (p_r^{WT,new} - p_r^{WT,prd}) + k_{r,r+1}^3 (p_{r+1}^{WT,new} - p_{r+1}^{WT,prd})$$

محاسبات بسیار پیچیده‌تر می‌شود؛ به نحوی که در عمل هرگز نمی‌توان از این محاسبات برای کنترل شارژ و دشارژ باتری‌های خودروها استفاده کرد. در نتیجه عدم تنظیم مجدد شارژ و دشارژ باتری‌ها باعث ایجاد ناهموازی منحنی بار، افت کیفیت توان، افت ولتاژ شبکه و ناپایداری شبکه می‌شود.

با توجه به شکل ۱۱ در (VanDeventer et al. 2019) و با توجه به جدول ۱ در (Lin, Z. & Liu, X. 2020)، بیشترین درصد خطای توان خروجی پیش‌بینی شده برای سلول خورشیدی و توربین بادی، ۱۵٪ می‌باشد. همچنین تعداد خودروها در هر ساعت از شبانه‌روز، نهایتاً ۱۵٪ حول میانگین تغییر می‌کنند. در نتیجه برای تخمین شارژ و دشارژ باتری‌ها؛ تغییرات توان خروجی سلول خورشیدی و توربین بادی و تغییرات تعداد خودروها را برابر با $\pm 15\%$ در نظر می‌گیریم.

جهت استفاده از محاسبات انجام شده در عمل، سه ضریب برای تخمین شارژ و دشارژ باتری‌ها با استفاده از شارژ و دشارژ برون خط^۵ بدست می‌آوریم. ضریب اول جبران اثر تغییرات تعداد خودروها، ضریب دوم برای جبران اثر تغییرات مربوط به توان خروجی سلول خورشیدی و ضریب سوم برای جبران اثر تغییرات مربوط به توان خروجی توربین بادی بر روی میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها می‌باشد.

$$N = \begin{bmatrix} N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 - \frac{15}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 - \frac{10}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 - \frac{5}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 + \frac{5}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 + \frac{10}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \\ N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (r-1)} & \left(1 + \frac{15}{100}\right) N_{avg} & N_{avg}[1 \dots 1]_{1 \times (24-r)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

برای بدست آوردن ضریب اول در ساعت r ، تعداد خودروها در ساعت r را با ۳۰ درصد تغییرات حول میانگین تعداد خودروها و برای بقیه ساعت‌ها برابر با میانگین تعداد خودروها در نظر می‌گیریم. همچنین توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی را برابر با توان نامی (توان پیش‌بینی شده در روزهای قبل) در نظر می‌گیریم.

در این حالت، متناظر با هر سطر (۱۰)، میزان شارژ و دشارژ باتری‌ها بدست می‌آید. سپس در هر ستون ماتریس مربوط به شارژ و دشارژ باتری‌ها، اختلاف سطر سوم نسبت به بقیه سطرها را بر اختلاف سطر سوم نسبت به بقیه سطرها در ماتریس N و در ستون r تقسیم می‌کنیم و در ماتریس بدست آمده، از نقاط مربوط به هر ستون یک خط عبور می‌دهیم. برای محاسبه ضریب $k_{r,r}^1$ از شیب خط متنج از ستون r و برای محاسبه ضریب $k_{r,r+z}^1$ از شیب خط متنج از ستون $r+z$ استفاده می‌کنیم.

$$p^{PV} = \begin{bmatrix} [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 - \frac{15}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 - \frac{10}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 - \frac{5}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 + \frac{5}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 + \frac{10}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \\ [p_{prd}^{PV}(1) \dots p_{prd}^{PV}(r-1)] \left(1 + \frac{15}{100}\right) p_{prd}^{PV}(r) [p_{prd}^{PV}(r+1) \dots p_{prd}^{PV}(24)] \end{bmatrix} \quad (11)$$

به همین ترتیب برای بدست آوردن ضریب دوم ناشی از تغییرات توان

⁵ Offline

توزیع یکنواخت بین ۱۴۵ و ۱۶۵ تعیین می‌کنیم؛ به نحوی که میانگین هر پروفایل، به صورت $154.9 \leq avg(N) \leq 155.1$ و واریانس هر پروفایل، به صورت $34.99 \leq var(N) \leq 35.01$ باشد. برای در نظر گرفتن نامعینی‌های توان خروجی سلول خورشیدی در ۲۴ ساعت، ۱۰۰ پروفایل ۲۴ ساعته تولید می‌کنیم. در هر پروفایل، با توجه به تشعشع خورشید از ساعت ۸ تا ۱۷؛ توان خروجی سلول خورشیدی در بقیه ساعت‌ها برابر صفر می‌باشد. در نتیجه از ساعت ۸ تا ۱۷، در هر ساعت توان خروجی سلول خورشیدی را با توزیع یکنواخت بین $\pm 10\%$ توان پیش‌بینی‌شده در روز قبل تعیین می‌کنیم؛ به نحوی که میانگین هر پروفایل، به صورت $0.351 \leq avg(p^{PV}) \leq 0.35$ و واریانس هر پروفایل، به صورت $0.101 \leq var(N) \leq 0.1$ باشد. برای در نظر گرفتن نامعینی‌های توان خروجی توربین بادی در ۲۴ ساعت، ۱۰۰ پروفایل تولید می‌کنیم. در هر پروفایل، در هر ساعت توان خروجی توربین بادی را با توزیع یکنواخت بین $\pm 10\%$ توان پیش‌بینی‌شده در روز قبل تعیین می‌کنیم؛ به نحوی که میانگین هر پروفایل، به صورت $0.1421 \leq avg(N) \leq 0.142$ و واریانس هر پروفایل، به صورت $0.0101 \leq var(N) \leq 0.01$ باشد.

جدول ۱: توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی (Moghaddam et al. 2011)

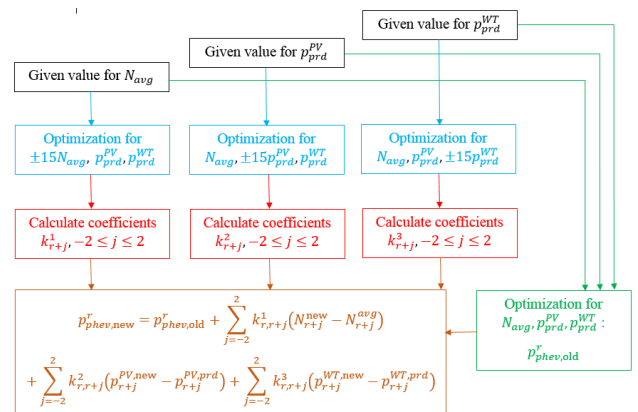
ساعت	توان سلول خورشیدی (kW)	توان توربین بادی (kW)
1	0.119	0
2	0.119	0
3	0.119	0
4	0.119	0
5	0.119	0
6	0.061	0
7	0.119	0
8	0.087	0.008
9	0.119	0.15
10	0.206	0.301
11	0.585	0.418
12	0.694	0.478
13	0.261	0.956
14	0.158	0.842
15	0.119	0.315
16	0.087	0.169
17	0.119	0.022
18	0.119	0
19	0.0867	0
20	0.119	0
21	0.0867	0
22	0.0867	0
23	0.061	0
24	0.041	0

سپس برای این ۱۰۰ پروفایل تصادفی تولید شده، بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم و با استفاده از میانگین و انحراف استاندارد نتایج ۱۰۰ بار اجرا در هر ساعت، شکل ۳ بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، منحنی بار نسبتاً هموار می‌باشد.

با توجه به تغییرات تعداد خودروها، توان توربین بادی و توان سلول خورشیدی در هر ساعت؛ باید محاسبات شارژ باتری‌ها در هر ساعت به‌روزرسانی شود. اما زمان به‌روزرسانی محاسبات بسیار زیاد می‌باشد و

$$+k_{r,r+2}^3(p_{r+2}^{WT,new} - p_{r+2}^{WT,prd}) \quad (14)$$

در این رابطه $p_{phev,new}^r$ مقدار به‌روزرسانی شده شارژ و دشارژ کلی باتری‌ها در ساعت r مقدار نامی شارژ و دشارژ باتری‌ها در ساعت r می‌باشد. N_{r+j}^{new} نشان‌دهنده تعداد خودروها در ساعت $r+j$ و N_{r+j}^{avg} نشان‌دهنده میانگین تعداد خودروها در ساعت $r+j$ می‌باشد. $p_{r+j}^{PV,new}$ مقدار واقعی سلول خورشیدی در ساعت $r+j$ و $p_{r+j}^{PV,prd}$ مقدار پیش‌بینی‌شده سلول خورشیدی در ساعت $r+j$ بر اساس روزهای قبل می‌باشد. $p_{r+j}^{WT,new}$ مقدار واقعی توربین بادی در ساعت $r+j$ و $p_{r+j}^{WT,prd}$ مقدار پیش‌بینی‌شده توربین بادی در ساعت $r+j$ بر اساس روزهای قبل می‌باشد. بر این اساس، فلوجارت روش پیشنهادی به صورت شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲: فلوجارت روش پیشنهادی.

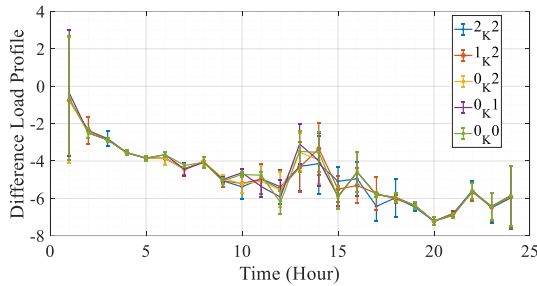
برای ارزیابی کارایی این روش، تعداد زیادی آزمایش انجام می‌دهیم و سپس دقت این روش را با استفاده از روش مونت کارلو بررسی می‌کنیم.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

جهت ارزیابی روش پیشنهادی ارائه شده، یک نمونه شامل ۱۵۰ مشتری که هر مشتری دارای یک خودروی الکتریکی، بار خانگی و یک منبع تولید پراکنده با قابلیت نصب در خانه می‌باشد در نظر می‌گیریم. بار مصرفی خانه‌ها را از شکل ۶ در (Safdarian et al. 2014) استخراج می‌کنیم. همچنین مقدار پیش‌بینی توان خروجی سلول خورشیدی و توربین بادی را از جدول ۷ در (Moghaddam et al. 2011) استخراج می‌کنیم. در این جدول توان خروجی بر اساس توان واحدهای نصب شده آورده شده است. توان نصب شده سلول خورشیدی و توربین بادی در این مقاله، 1kW می‌باشد. در نتیجه توان خروجی سلول خورشیدی و توربین بادی بر اساس جدول گفته شده و توان واحدهای نصب شده به صورت جدول ۱ می‌باشد. مقادیر پارامترها به صورت $a_{e,n}^t = 1000$ ، $a_{h,n}^t = 1.2$ ، $c_e^t = 0$ ، $b_e^t = 13.5$ ، $q_n^{C,max} = q_n^{D,max}$ ، $b_h = 0$ ، $\mu_n = 0.95$ و $\zeta_n = 7.1$ ، 2.8 می‌باشند.

با استفاده از روش ارائه شده، مقادیر $k_{r,r+j}^1$ ، $k_{r,r+j}^2$ و $k_{r,r+j}^3$ را محاسبه می‌کنیم. برای تعداد خودروها در ۲۴ ساعت، ۱۰۰ پروفایل تولید می‌کنیم. در هر پروفایل ۲۴ ساعته، در هر ساعت تعداد خودروها را با

را نشان می‌دهد. این مقادیر در جدول ۲ آورده شده است.

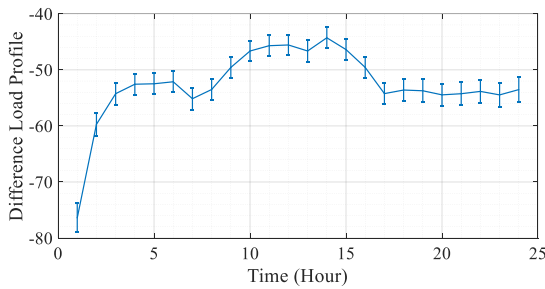


شکل ۶: اختلاف منحنی بار دقیق با پروفایل‌های بار تخمین زده شده.

جدول ۲: انتگرال قدر مطلق اختلاف بین پروفایل دقیق و پروفایل‌های تخمین زده شده.

Method	Integral (difference load profile)
2 Back 2 Forward	111.9700
1 Back 2 Forward	112.7599
0 Back 2 Forward	113.7364
0 Back 1 Forward	114.2636
0 Back 0 Forward	114.7706

اختلاف بین منحنی بار دقیق با منحنی بار غیردقیق را در شکل ۷ مشاهده می‌کنید. انتگرال قدر مطلق منحنی شکل ۷، نشان‌دهنده میزان عدم دقت منحنی غیردقیق نسبت به منحنی دقیق می‌باشد. این مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۷: اختلاف منحنی بار دقیق با پروفایل بار غیردقیق.

جدول ۳: انتگرال قدر مطلق اختلاف بین پروفایل دقیق و پروفایل غیردقیق.

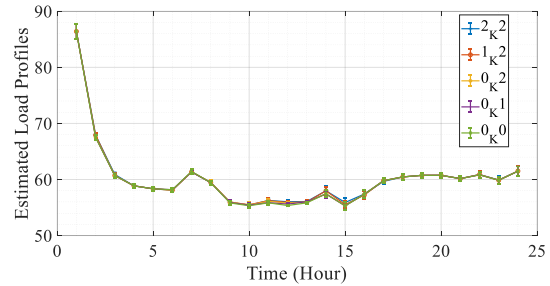
Method	Integral (difference load profile)
Inexact and Exact	138.4786

برای مقایسه روش‌های تخمینی با دقیق‌ترین روش و روش نادقیق، واریانس این روش‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از روش (Shokri, & Kebriaei 2018)، واریانس منحنی بار برابر با ۴۷.۳۵۷۱ می‌باشد که از دقیق‌ترین روش بسیار فاصله دارد. در بین روش‌های تخمینی، کمترین واریانس مربوط به ۲ ضریب عقب و ۲ ضریب جلو می‌باشد و این روش، در بین روش‌های تخمینی، بهترین روش می‌باشد. واریانس منحنی بار دقیق‌ترین روش نیز، برابر با ۲۸.۳۷۵۱ می‌باشد که همانطور که انتظار می‌رود، کمترین مقدار واریانس است.

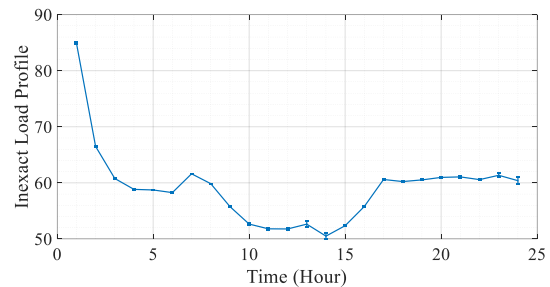
جدول ۴: مقایسه واریانس منحنی‌های بار بدست آمده از روش‌های مختلف.

Method	Load profile variance
Inexact Method	47.3571
2 Back 2 Forward	38.4080

اپراتور باید از محاسبات انجام شده مبتنی بر پیش‌بینی تعداد خودروها و توان پیش‌بینی‌شده توربین بادی و سلول خورشیدی در روز قبل استفاده کند. سپس باید تغییرات تعداد خودروها، توان خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی در ۱۰۰ پروفایل تولید شده را بر منحنی بار بدست آمده اعمال کند. پس از اعمال تغییرات این ۱۰۰ پروفایل، منحنی بار به صورت شکل ۴ بدست می‌آید. در حقیقت این شکل، از روش موجود در (Shokri, & Kebriaei 2018) پس از اعمال تغییرات بدست آمده است که با منحنی بار دقیق و تخمین زده شده بسیار فاصله دارد.

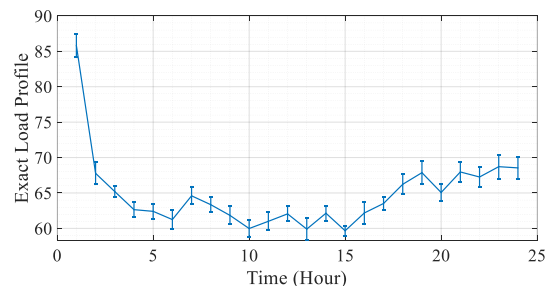


شکل ۳: منحنی بار تخمین زده شده برای ۱۰۰ بار اجرا در هر ساعت.



شکل ۴: منحنی بار غیردقیق برای ۱۰۰ بار اجرا در هر ساعت.

در این قسمت، با توجه به تغییرات تعداد خودروها، توان توربین بادی و توان سلول خورشیدی در هر ساعت، محاسبات شارژ باتری‌ها در هر ساعت به‌روزرسانی می‌شود. به‌روزرسانی محاسبات بهینه‌سازی در هر ساعت، دقیق‌ترین جواب را می‌دهد. اما زمان اجرای این روش، ۳۶ ساعت و ۴۲ دقیقه می‌باشد و هرگز نمی‌توانیم از این محاسبات در عمل استفاده کنیم. در حالی که زمان اجرای روش تخمینی ارائه شده کمتر از یک ثانیه می‌باشد. نتیجه اجرای این بهینه‌سازی با دقیق‌ترین روش را در شکل ۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵: منحنی بار دقیق برای ۱۰۰ بار اجرا در هر ساعت.

اختلاف بین منحنی بار دقیق با منحنی‌های بار تخمین زده شده را در شکل ۶ مشاهده می‌کنید. انتگرال قدر مطلق منحنی‌های شکل ۶، میزان از دست دادن دقت محاسبات روش تخمینی نسبت به دقیق‌ترین روش

Ibrahim, A., & Jiang, F. (2021). "The electric vehicle energy management: An overview of the energy system and related modeling and simulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, 111049.

Jain, P., & Jain, T. (2018). "Application of V2G and G2V coordination of aggregated electric vehicle resource in load levelling", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 19, issue. 2.

Khan, S. U., Mehmood, K. K., Haider, Z. M., Rafique, M. K., Khan, M. O., & Kim, C. H. (2021). "Coordination of multiple electric vehicle aggregators for peak shaving and valley filling in distribution feeders", *Energies*, 14(2), 352.

Khemakhem, S., Rezik, M., & Krichen, L. (2020). "A collaborative energy management among plug-in electric vehicle, smart homes and neighbors' interaction for residential power load profile smoothing", *Journal of Building Engineering*, vol. 27, 100976.

Koltsaklis, N., Panapakidis, I. P., Pozo, D., & Christoforidis, G. C. (2021). "A prosumer model based on smart home energy management and forecasting techniques", *Energies*, vol. 14, no. 6, 1724.

Lee, S., & Choi, D.H. (2020). "Energy management of smart home with home appliances, energy storage system and electric vehicle: A hierarchical deep reinforcement learning approach", *Sensors*, vol. 20, no. 7, pp. 2157.

Lin, Z. and Liu, X. (2020). "Wind power forecasting of an offshore wind turbine based on high-frequency SCADA data and deep learning neural network", *Energy*, vol. 201, 117693.

Moghaddam, A.A., Seifi, A., Niknam, T., & Pahlavani, M.R.A. (2011). "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source", *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6490-6507.

Ramadan, H., Ali, A., Nour, M., & Farkas, C. (2018). "Smart charging and discharging of plug-in electric vehicles for peak shaving and valley filling of the grid power", *In 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 735-739.

Reddy, K. R., & Meikandasivam, S. (2018). "Load flattening and voltage regulation using plug-in electric vehicle's storage capacity with vehicle prioritization using anfis", *IEEE Transactions on Sustainable Energy (ITSE)*, vol. 11, issue. 1, pp. 260-270.

Reddy, K. R., & Meikandasivam, S. (2018). "Optimal distribution of Plug-In-Electric Vehicle's storage capacity using Water Filling Algorithm for load flattening and vehicle prioritization using ANFIS", *Electric Power Systems Research (EPSR)*, vol. 165, pp. 120-133.

Reddy, K. R., Meikandasivam, S., & Vijayakumar, D. (2019). "A novel strategy for maximization of plug-In electric vehicle's storage utilization for grid support with consideration of customer flexibility", *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 158-175.

Safdarian, A., Degefa, M.Z., Lehtonen, M., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2014). "Distribution network reliability improvements in presence of demand response", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 12, pp. 2027-2035.

Salama, H.S., Said, S.M., Aly, M., Vokony, I., & Hartmann, B. (2021). "Studying impacts of electric vehicle functionalities in wind energy-powered utility grids with energy storage device", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45754-45769.

Shokri, M., & Kebriaei, H. (2018). "Mean field optimal energy management of plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 113-120.

Solanke, T. U., Khatua, P. K., Ramachandaramurthy, V. K., Yong, J. Y., Kanesan, J., Tariq, M., & Kasinathan, P. (2020). "Optimal design of EV aggregator for real-time peak load

1 Back 2 Forward	38.6544
0 Back 2 Forward	38.6335
0 Back 1 Forward	38.8847
0 Back 0 Forward	39.0304
Exact Method	28.3751

با توجه به جدول ۲، روش تخمینی با ۲ ضریب عقب و ۲ ضریب جلو نسبت به دقیق‌ترین روش، به میزان ۱۱۱.۹۷٪ از دقت منحنی بار کاسته است. اگر این عدد را بر ۲۴ ساعت تقسیم کنیم به میزان ۴.۶۶۵۴ برای ۱۵۰ ماشین در هر ساعت از دقت محاسبات کاسته شده است. در نهایت اگر این عدد را بر ۱۵۰ عدد ماشین تقسیم کنیم، به میزان ۰.۰۳٪ از دقت محاسبات شارژ و دشارژ ماشین‌ها در هر ساعت کاسته شده است. یعنی در صورت استفاده از روش تخمینی، محاسبات شارژ هر خودرو در هر ساعت به میزان ۰.۰۳٪ از دقیق‌ترین روش فاصله دارد که این عدد قابل اغماض است. در ضمن علاوه بر هموارتر شدن منحنی بار، محاسبات این روش در کمتر از یک ثانیه انجام می‌شود و در عمل می‌توانیم از این روش استفاده کنیم.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ۱۰۰ بار اجرای مختلف که در هر اجرا تعداد خودروها، توان سلول خورشیدی و توان توربین بادی به صورت جداگانه دارای توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده‌اند؛ مشاهده گردید که منحنی بار بسیار هموارتر شده است. زمان اجرای روش تخمینی کمتر از یک ثانیه بوده و دقت محاسبات شارژ و دشارژ بدست آمده، قابل قبول می‌باشد. خطای روش تخمینی نسبت به دقیق‌ترین روش بسیار کوچک و قابل اغماض است. همچنین در صورت عدم استفاده از این روش، واریانس منحنی بار بسیار زیاد شده و محاسبات بدست آمده از روش نادقیق، فاصله بسیار زیادی نسبت به دقیق‌ترین روش دارند.

در تحقیقات آینده، می‌توانیم زمان ورود و خروج خودروها و شارژ اولیه و نهایی خودروها را لحاظ کنیم. همچنین می‌توانیم تغییرات زمان ورود و خروج و تغییرات شارژ اولیه و نهایی خودروها را با روش تخمینی ارائه شده بررسی کنیم. ضمناً می‌توانیم انواع خانه‌های مسکونی، تجاری و صنعتی را به مسئله اضافه کنیم.

مراجع

- Berinde, V., & Takens, F. (2007). *Iterative Approximation of Fixed Points*, vol. 1912, Berlin: Springer.
- Divshali, P.H., Choi, B.J., & Liang, H. (2017). "Multi-agent transactive energy management system considering high levels of renewable energy source and electric vehicles", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 15, pp. 3713-3721.
- Ghobadzadeh, A. M., Bathaei, S. M. T., & Keshavarz-Mohammadiyan, A. (2020). "Peak Shaving and Valley Filling in Distribution Network Using Electric vehicles", *In 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1-6.
- Hou, X., Wang, J., Huang, T., Wang, T., & Wang, P. (2019). "Smart home energy management optimization method considering energy storage and electric vehicle", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144010-144020.

- shaving and valley filling”, In 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 1-5.
- Tiwari, D., Sheikh, M. A. A., Moyalán, J., Sawant, M., Solanki, S. K., & Solanki, J. (2020). “Vehicle-to-Grid Integration for Enhancement of Grid: A Distributed Resource Allocation Approach”, *IEEE Access*, vol. 8, 175948-175957.
- VanDeventer, W. Jamei, E. Thirunavukkarasu, G. S. Seyedmahmoudian, M. Soon, T. K. Horan, B. Mekhilef, S. and Stojcevski, A. (2019). “Short-term PV power forecasting using hybrid GASVM technique”, *Renewable energy*, vol. 140, pp. 367-379.
- Wu, X., Hu, X., Moura, S., Yin, X., & Pickert, V. (2016). “Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array”, *Journal of Power Sources*, vol. 333, pp. 203-212.
- Wu, X., Hu, X., Yin, X., & Moura, S.J. (2016). “Stochastic optimal energy management of smart home with PEV energy storage”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2065-2075.
- Yousefi, M., Hajizadeh, A., & Soltani, M.N. (2019). “A comparison study on stochastic modeling methods for home energy management systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4799-4808.
- Zhou, K., Cheng, L., Wen, L., Lu, X., & Ding, T. (2020). “A coordinated charging scheduling method for electric vehicles considering different charging demands”, *Energy*, vol. 213, 118882.