Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity P.P 40-56

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021 ISSN 2322-2344 eISSN 2717-1639

Optimal Operation of Residential Energy Hubs Considering Optimized Capacity of Photovoltaic-based Renewable Energy Systems

Pouria Emrani-Rahaghi[1], Hamed Hashemi-Dezaki[2,*]

[1] *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran*

[1]*p.emrani74@grad.kashanu.ac.ir*

[2] *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, *Corresponding Author*

[2]*hamed.hashemi@kashanu.ac.ir*

Abstract: The deployment of multi-carrier energy systems, which are called energy hubs, is one of the most recent and useful strategies in the field of energy systems. The reliability of energy systems and their operation cost and efficiency could be improved by applying the concepts of energy hubs. The simultaneous management of electrical consumptions and heat demands by the concepts of energy hub would be effective. The energy management of residential energy hubs has received a great deal of attention because the energy consumption of the residential sector is significant in the amount of global energy consumption of the world. There is a knowledge gap in developing a new method simultaneously considering optimal operation and optimal allocation of photovoltaic units in residential energy hubs. This paper tries to fill this knowledge gap. Integrating the optimal planning and optimal scheduling of residential energy hubs could improve the system cost and other features. Considering the capacity of the photovoltaic unit as one of the decision variables in the proposed optimization problem besides other operation and scheduling decision variables is one of the most important contributions of this research. The proposed method is applied to a residential energy hub, including the controllable and uncontrollable appliances, combined heat and power units, plug-in hybrid electric vehicles, heating loads, photovoltaic units, and heat storage systems. The proposed optimization problem is solved by the genetic algorithm in MATLAB. Different case studies are analyzed to assess the impacts of photovoltaic units' capacity, energy storage systems, and simultaneous optimization of planning and operation decision variables. The test results illustrate the advantages of the simultaneous optimization of operation and capacity of the photovoltaic unit in the proposed method. It is inferred from the comparative test results that by applying the proposed method, it is possible to improve the operation cost and efficiency of energy systems, while the constraints of customer satisfaction are concerned. It is revealed that an around 5% improvement in the daily cost of the studied residential energy hub could be achieved compared to conventional studies. The sensitivity analysis is performed to investigate how energy storage systems besides photovoltaic units influence the residential energy hubs.

Keywords: Energy Management, Optimal Operation, Photovoltaic-based Distributed Generation Units, Residential Energy Hubs, Optimal Capacity of Renewable-based Energy Systems

Received: 2020 October 11

Accepted: 2021 April 30

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۴۰-۵۶

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

بهره‌برداری بهینه هاب انرژی خانگی همراه با بهینه‌سازی ظرفیت سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر خورشیدی

نوع مطالعه: پژوهشی

پوریا عمرانی رهقی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، حامد هاشمی دزکی[۱]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
– p.emrani74@grad.kashanu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
–hamed.hashemi@kashanu.ac.ir

چکیده: سیستم‌های چندگانه‌ی انرژی یا به‌اصطلاح هاب‌های انرژی یکی از رویکردهای جدید در سیستم‌های تأمین انرژی با دیدگاه افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی الکتریکی، گاز و ... به‌حساب می‌آید. اجرای طرح مدیریت انرژی در قالب هاب‌های انرژی خانگی نیز با توجه به درصد قابل‌توجه انرژی مصرفی بخش خانگی از مصارف انرژی جهانی می‌تواند بسیار اثرگذار باشد. تا کنون، بهره‌برداری بهینه هاب‌های انرژی خانگی همزمان با تعیین بهینه ظرفیت سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر خورشیدی در کارهای گذشته کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، روش نوینی برای پاسخ به خلأ تحقیقاتی بهینه‌سازی همزمان ظرفیت سیستم خورشیدی و بهره‌برداری هاب انرژی خانگی ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی بر روی یک هاب انرژی خانگی شامل بارهای قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل، واحد تولید همزمان برق و گرما، خودروهای برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه، بارهای گرمایشی و سیستم خورشیدی و ذخیره‌ساز گرمایی پیاده‌سازی می‌گردد. مطالعات انجام شده در حالات مختلف و با دیدگاه مقایسه روش پیشنهادی و روش‌های موجود بهره‌برداری بهینه هاب انرژی خانگی، بهینه‌سازی همزمان موضوعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری با تأکید بر سیستم خورشیدی برای برجسته نمودن مزایای روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. نتایج به‌دست آمده دلالت بر کارآیی روش پیشنهادی برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش بهره‌وری هاب انرژی خانگی با حفظ سطح راحتی مشترک در بالاترین سطح را دارند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت انرژی، بهره‌برداری بهینه، مولدهای تولید پراکنده خورشیدی، هاب انرژی خانگی، ظرفیت بهینه سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: حامد هاشمی دزکی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه کاشان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

متغیرها، علائم و اختصارات

تابع هزینه انرژی	C
هزینه‌ی روزانه‌ی خالص توان الکتریکی خریداری شده از شبکه	C_{Elec}
هزینه‌ی روزانه‌ی گاز طبیعی خریداری شده از شبکه	C_{Gas}
هزینه‌ی روزانه‌ی واحدهای ذخیره‌ساز	C_{PV}
پله زمانی (ساعت)	t
مشخصه تعداد وسایل کنترل‌پذیر	K
نرخ تنزیل	r
طول عمر مفید اجزای سیستم پنل خورشیدی	n
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای هر ماژول	C_{Mudule}
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اینورتر	C_{Inv}
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم بالانس	C_{BoS}
هزینه‌ی سالانه‌ی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از اجزای سیستم پنل خورشیدی	$C_{O\&M}$
شاخص بازگشت سرمایه	CRF
تعداد ماژول	N_{pv}
میزان تابش خورشید بر سطح	I
مساحت موردنیاز برای نصب هر ماژول	S_{pv}
مساحت خالص قابل نصب برای ماژول‌ها	$S_{Rooftop}$
ضریب تصحیح دمایی	β_{ref}
دمای سلول	T_c
دمای استاندارد	T_{stc}
دمای محیط	T_a
دمای نامی عملکرد سلول	$NOCT$
ظرفیت اینورتر	Inv_{size}
حداکثر توان خروجی پنل خورشیدی	$E_{PV}^{\max}$
ظرفیت باتری خودرو الکتریکی	Cap^{PHEV}
تقاضای برق وسایل الکتریکی قابل‌کنترل	E^{c}
تقاضای برق وسایل الکتریکی غیرقابل‌کنترل	E^{uc}
حداکثر توان مصرفی مجاز وسایل قابل‌کنترل	$E_{k}^{\max}$
حداقل توان مصرفی مجاز وسایل قابل‌کنترل	$E_{k}^{\min}$
حداکثر نرخ شارژ خودرو برقی	$E_{ch}^{\max}$
حداقل نرخ شارژ خودرو برقی	$E_{dch}^{\max}$
سطح شارژ خودرو برقی در ابتدای هر روز	E_{0}^{PHEV}
میزان توان الکتریکی ذخیره شده در خودرو برقی	E^{PHEV}
حداکثر توان تولیدی واحد تولید همزمان برق و گرما (CHP)	$E_{\max}^{CHP}$
توان مصرفی خودرو برقی در بیرون از خانه	E_{out}^{PHEV}
میزان شارژ خودرو برقی	E_{ch}^{PHEV}
میزان دشارژ خودرو برقی	E_{dch}^{PHEV}
توان دریافتی از شبکه برق	E_{grid}
توان خروجی پنل خورشیدی	E_{pv}
توان خروجی واحد CHP	E_{CHP}
انرژی مصرفی وسایل الکتریکی خانه	E_{app}
گاز طبیعی دریافتی از شبکه	G
تقاضای گرمای موردنیاز خانه	H_{d}
میزان انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره ساز گرما	H^{HSS}
میزان انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره ساز گرما در ابتدای هر روز	H_{0}^{HSS}
حداکثر نرخ شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	$H_{ch}^{\max}$
حداکثر نرخ دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	$H_{dch}^{\max}$
گرمای تولیدی واحد CHP	H_{CHP}
تقاضای گرمای وسایل قابل‌کنترل	H^{c}
تقاضای گرمای موردنیاز وسایل غیرقابل‌کنترل	H^{uc}
میزان شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	H_{ch}^{HSS}
میزان تخلیه شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	H_{dch}^{HSS}
سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	SOC^{HSS}
حداقل سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	$SOC_{\min}^{HSS}$
حداکثر سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	$SOC_{\max}^{HSS}$
میزان انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره ساز توان الکتریکی	E^{BSS}
میزان انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره ساز توان الکتریکی در ابتدای هر روز	E_{0}^{BSS}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

میزان شارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	E_{ch}^{BSS}
میزان دشارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	E_{dch}^{BSS}
حداکثر نرخ شارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	$E_{ch}^{\max}$
حداکثر نرخ دشارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	$E_{dch}^{\max}$
سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	SOC^{BSS}
حداقل سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	$SOC_{\min}^{BSS}$
حداکثر سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی	$SOC_{\max}^{BSS}$
تعرفه گاز	λ_g
بازده شارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	η_{ch}^{s}
بازده دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	η_{dch}^{s}
بازده مجموع وسایل گازسوز	η_{gapp}
بازده CHP در تبدیل گاز به گرما	η_{g-h}
بازده CHP در تبدیل گاز به توان الکتریکی	η_{g-e}
بازده اینورتر	$\eta_{Inverter}$
بازده ماژول	η_{pv}
بازده سیم‌ها و اتصالات سیستم خورشیدی	η_{wire}

۱- مقدمه

در عصر حاضر، وابستگی شدید به سوخت های فسیلی یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در مبحث تأمین انرژی بوده است (Eladl, El-Afifi et al. 2020). استفاده از سوخت‌های فسیلی و گاهاً بازده پایین روش‌های متداول تبدیل انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، آلودگی قابل‌توجهی را برای محیط زیست به همراه دارد (Bahrami, Toulabi et al. 2018, Liu, Zhang et al. 2019, Majidi and Zare 2019). از این‌رو بسیاری از کشورها، به دنبال ایجاد تحولی در زمینه تأمین انرژی سبز و عدم وابستگی به سوخت‌های فسیلی بوده‌اند (Liu, Zhang et al. 2019). در روش‌های متداول سنتی مدیریت انرژی، انواع تقاضاهای انرژی به‌صورت جداگانه مدیریت شده و مورد بهره‌برداری قرارگرفته است (Eladl, El-Afifi et al. 2020)؛ اما در کنار توسعه و تجاری شدن انرژی‌های تجدیدپذیر، با توسعه سیستم های تولید همزمان برق و گرما (CHP) یا سیستم‌های تولید همزمان برق و تولید سرما و گرما (CCHP)، وابستگی میان حامل‌های مختلف انرژی که اغلب برق و گاز هستند، افزایش یافته است (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017). محققان راهکارهای متعددی برای افزایش بهره‌وری و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های انرژی ارائه داده‌اند که یکی از این مجموعه راهکارها، مدیریت انرژی سیستم های چندحاملی و چندگانه انرژی است (صیاد نوجوان، ۱۳۹۸ و Miao, Yue et al 2020). سیستم‌های چندگانه انرژی یا به اصطلاح هاب های انرژی، سیستم‌هایی مجهز به حامل‌های مختلف انرژی هستند که می‌توانند نیاز های مختلفی از انرژی را برطرف سازند (Liu, Zhang et al. 2019, Majidi and Zare 2019). هاب انرژی با نگاهی جامع، تولید، تبدیل، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی در یک سیستم با حامل های مختلف انرژی را بررسی می‌نماید (Senemar, Rastegar et al. 2019). این سیستم شامل انواع مبدل‌ها، ذخیره‌سازها، منابع تجدیدپذیر، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است (Ghazvini, Steen et al. 2019). سیستم‌های هاب انرژی می‌توانند در سطوح مختلف مانند یک منزل مسکونی، یک شهرک، یک شهر یا یک کشور مطرح شوند (Senemar, Rastegar et al. 2019). از مزایای هاب انرژی می توان به افزایش قابلیت اطمینان و افزایش انعطاف‌پذیری در تأمین بار، بهبود تعاملات با شبکه، بهبود عملکرد اقتصادی و کاهش قیمت‌ها در هنگام پیک بار شبکه اشاره کرد (Moeini-Aghtaie, Dehghanian et al. 2014, Najafi, Falaghi et al. 2017). همچنین این سیستم ها با تولید کمتر گازهای آلوده، باعث حفظ محیط زیست و اتخاذ تصمیم‌هایی متناسب با محیط زیست خواهند بود (Majidi and Zare 2019).

مصارف خانگی به‌عنوان سیستم چندگانه انرژی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند. شایان توجه است تقاضای توان الکتریکی در جهان به طور متوسط سالیانه حدود ۲/۸ در صد افزایش می‌یابد (Isnen, Kurniawan et al. 2020) و در دهه‌های گذشته، عواملی همچون ورود لوازم خانگی جدید به منازل مسکونی، افزایش ساعات حضور افراد در خانه و افزایش سطح راحتی مشترکان، تقاضای انرژی به‌خصوص تقاضای توان الکتریکی افزایش چشمگیری داشته است (Oskouei, Mohammadi-Ivatloo et al. 2020). از اینرو منازل مسکونی به یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان توان الکتریکی تبدیل شده‌اند که این موضوع نگرانی تولیدکنندگان برق و مشترکان مصرف برق را به همراه داشته است (Bazydło and Wermiński 2018). به عنوان مثال در سال ۲۰۱۸ به ترتیب ۲۱٪ و ۲۷٪ از کل منابع انرژی در ایالات متحده‌ی آمریکا و اتحادیه اروپا در بخش مسکونی مصرف گردیده است (Oskouei, Mohammadi-Ivatloo et al. 2020). با توجه به وضع کنونی و افزایش روز به روز مصرف انرژی در جهان، تحقیقات نشان می‌دهد که مصرف انرژی مسکونی و تجاری از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۴۰ به میزان ۲۵٪ افزایش خواهد یافت (Senemar, Rastegar et al. 2019)؛ بنابراین ساختمان‌ها نقش بسیار مهمی در مبحث کنترل انرژی و تجزیه و تحلیل آن دارند (Oskouei, Mohammadi-Ivatloo et al. 2020). در سال‌های گذشته سازمان جهانی انرژی بخش مهم و اصلی از تصمیمات خود را به مبحث برنامه‌ریزی به‌منظور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

افزایش بهره‌وری اختصاص داده است (Oskouei, Mohammadi-Ivatloo et al. 2020).

یکی از راه‌های مهم برای کاهش مصرف توان الکتریکی در سمت تقاضا، طرح های مدیریت انرژی در بخش منازل مسکونی است. انعطاف‌پذیری بالای بارهای خانگی سبب گردیده تا به عنوان اهداف اصلی برای کنترل مصرف لحاظ شوند (Koskela, Rautiainen et al. 2019). طرح مدیریت انرژی خانه با هدف اصلی صرفه‌جویی در هزینه‌ها و در عین حال حفظ راحتی مطلوب مصرف‌کنندگان مطرح و اجرا می شود (Nizami, Haque et al. 2019, Mehrjerdi and Hemmati 2020). در طرح مدیریت انرژی خانه و چشم‌انداز خانه‌های هوشمند در آینده، حضور و مشارکت فعال مشترکان بسیار مهم است. بر اساس چنین رویکردی، مشترکان باید در امر برنامه‌ریزی، نظارت و اجرای طرح‌های مدیریت انرژی خانه نقش بسزایی داشته باشند (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017).

طرح های مدیریت انرژی در قالب هاب های انرژی خانگی رویکردی جدید است. با استفاده از برنامه‌های مدیریت انرژی، مشترکان می‌توانند برای کاهش در هزینه های انرژی مصرفی، زمان و میزان مصرف انرژی خود را کنترل کنند یا تغییر دهند (Merdanoğlu, Yakıcı et al. 2020). استفاده از گاز طبیعی برای تولید برق در منازل مسکونی باعث پیک زدایی منحنی بار در ساعات اوج مصرف می‌شود (Gholinejad, Loni et al. 2020). مزایای طرح‌ها مدیریت انرژی در هاب‌های انرژی خانگی مانند سایر هاب های انرژی دست‌یافتنی خواهد بود (Moghaddas-Tafreshi, Jafari et al. 2019). هاب‌های انرژی خانگی معمولاً شامل مبدل‌ها، واحد های ذخیره ساز، خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه، واحد CHP یا CCHP و منابع تولید انرژی تجدید پذیر می‌باشند (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017).

پنل‌های خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی، تأثیر بسیار زیادی بر میزان توان مبادله شده با شبکه و توانایی دستیابی به استقلال از شبکه و کاهش وابستگی‌ها در تأمین انرژی از شبکه را دارند (Boeckl and Kienberger 2019). انتخاب ظرفیت بهینه در کنار زمان‌بندی و بهره‌برداری هاب‌های انرژی خانگی می‌تواند هزینه های بهره‌برداری و بهره‌وری انرژی را به‌صورت مؤثری بهبود دهد.

مطالعات متعددی در زمینه‌ی تأمین انرژی منازل مسکونی صورت گرفته است. مدل‌سازی دقیق وسایل الکتریکی خانه، ذخیره ساز های انرژی و پنل خورشیدی به‌همراه ارائه طرح مدیریت انرژی خانه به‌صورت ارتباط آنلاین با شبکه بالادست توسط نویسندگان در (Nizami, Haque et al. 2019) ارائه شده است. در (Nizami, Haque et al. 2019)، قیود شبکه توزیع نظیر ولتاژ و تراکم خطوط در برنامه‌ریزی وسایل کنترل‌پذیر و ذخیره‌سازها لحاظ شده است. در (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2012) نیز طرح مدیریت انرژی خانه با مدل‌سازی و برنامه‌ریزی وسایل الکتریکی خانه و خودرو برقی هیبریدی با قابلیت اتصال به شبکه، به منظور کاهش هزینه های مشترک ارائه شده است. هاب انرژی مورد مطالعه در (Bozchalui, Hashmi et al. 2012) شامل پنل خورشیدی، باتری و خودرو برقی هیبریدی است؛ که نشان می‌دهد اجرای طرح مدیریت انرژی روی یک هاب انرژی مسکونی در آنتاریو کانادا، کاهش ۲۰ درصدی هزینه های کلی انرژی و کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌ها در زمان پیک بار را در پی دارد. مدلی از هاب انرژی خانگی در (Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015) نیز ارائه شده است که شامل واحد تولید همزمان توان الکتریکی و گرما (micro-CHP)، خودرو برقی هیبریدی، واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی و پنل خورشیدی بوده و به بررسی تأثیرات باتری خودرو هیبرید برقی و واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی در بهبود عملکرد منابع تولید پراکنده و کاهش هزینه‌ها می‌پردازد. همچنین در (Miao, Yue et al. 2020)، استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در قالب هاب انرژی را به عنوان راهی برای دست‌یابی به محیط زیست سالم و پاک بیان می‌کند. ارائه یک روش جدید برای یافتن ظرفیت بهینه‌ی پنل خورشیدی به همراه باتری در یک سیستم مسکونی مستقل از شبکه قدرت در (Okoye and Solyalı 2017) مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان در این اثر با اجرای طرح پیشنهادی در یک منزل مسکونی در نیجریه، معتقدند که استفاده از پنل‌های خورشیدی علاوه بر سازگاری بسیار زیاد با محیط زیست، حدود ۳۰ درصد از دیزل ژنراتورها ارزان‌تر هستند. اهمیت تولید انرژی در منازل مسکونی و لزوم استفاده از ذخیره‌سازها در کنار منابع انرژی تجدید پذیر در (Koskela, Rautiainen et al. 2019) مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه ظرفیت بهینه‌ی پنل خورشیدی و باتری و همچنین تأثیر تعرفه برق بر ظرفیت بهینه‌ی پنل خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی سیستم های پنل خورشیدی شهری با توجه به تقاضای توان الکتریکی به صورت مجموع سالانه و تقاضای ساعتی انرژی در (Lovati, Dallapiccola et al. 2020) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

علیرغم اینکه سیستم های فتوولتایک بسیار مورد استقبال گرفته‌اند و مطالعات زیادی در این حوزه در ساختار هاب های انرژی مطرح شده است تا کنون سهم کمی از مطالعات انجام شده در زمینه هاب انرژی به هاب‌های انرژی خانگی اختصاص پیدا می‌کند. ضمناً همانگونه که در خلاصه مرور منابع مطابق جدول ۱ نشان داده شده است، مطالعه همزمان مدیریت انرژی در محیطی با حامل‌های مختلف انرژی در حضور انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و همچنین بررسی ظرفیت بهینه‌ی پنل خورشیدی با توجه به هزینه‌های سرمایه گذاری، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و تعرفه‌ی ساعتی انرژی، موضوع مهم و مفیدی است که در کارهای گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو در این مقاله، روش نوینی برای مدیریت انرژی بهینه هاب انرژی خانگی با دیدگاه بهینه‌سازی ظرفیت سیستم فتوولتائیک در کنار بهره‌برداری بهینه از هاب ارائه می گردد. هاب انرژی خانگی مورد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

مطالعه در این مقاله شامل micro-CHP، خودروی برقی هیبریدی با قابلیت اتصال به شبکه، ذخیره‌ساز توان الکتریکی (باتری)، ذخیره‌ساز گرما، لوازم و وسایل الکتریکی، بارهای گرمایشی و پنل خورشیدی به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر است.

از دیدگاه علمی، بهره‌برداری بهینه هاب های انرژی خانگی در حوزه بهره‌برداری و با نگاه کوتاه‌مدت مورد توجه است، در حالی که تعیین ظرفیت بهینه پنل‌های خورشیدی یکی از مقوله‌های برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های انرژی با دیدگاه میان‌مدت یا بلند مدت است. از این‌رو ترکیب این دو دیدگاه می‌تواند مزایای بیشتری نسبت به مطالعات جداگانه در حوزه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی داشته باشد.

در مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی که به‌صورت همزمان بهره‌برداری بهینه هاب و ظرفیت بهینه پنل‌های خورشیدی را مشخص می‌نماید، متغیر بهینه‌سازی مربوط به ظرفیت پنل‌های خورشیدی به متغیر های زمان‌بندی اجزای کنترل‌پذیر هاب انرژی، فاکتور توزیع گاز و ... افزوده می شود. اضافه شدن یک متغیر تصمیم به مسئله بهینه سازی پیشنهادی، بار محاسباتی مسئله را به صورت چشمگیری افزایش نخواهد داد، در حالی که امکان دستیابی به هزینه های بهره برداری کمتر با توجه به افزایش بازه تغییرات و تصمیم‌های بهره‌برداری که تابع ظرفیت پنل‌های خورشیدی است، حاصل می‌شود.

به بیان ساده، در صورتی که مسئله بهره‌برداری بهینه هاب انرژی بدون تعیین ظرفیت بهینه پنل‌های خورشیدی مورد نظر باشد، یا ظرفیت پیش‌فرض انتخاب شده کمتر از ظرفیت بهینه است که بخشی از مزایای اقتصادی استفاده از سیستم‌های تجدیدپذیر از دست خواهد رفت. در حالتی نیز که ظرفیت پنل های خورشیدی بیش از ظرفیت بهینه انتخاب شده باشند، از اقتصادی‌ترین حالت فاصله گرفته خواهد شد. با پیاده‌سازی روش پیشنهادی، این امکان فراهم خواهد شد که ظرفیت پنل خورشیدی تا جایی افزایش یابد که سود ناشی از افزایش ظرفیت کمتر از هزینه‌های تحمیلی به سیستم انرژی باشد.

علاوه بر مهم‌ترین نوآوری روش پیشنهادی که بهینه سازی همزمان بهره‌برداری هاب انرژی و تعیین ظرفیت پنل های خورشیدی است، می‌توان به نوآوری‌ها و مزایای زیر اشاره نمود:

- تعیین ظرفیت بهینه‌ی سیستم پنل خورشیدی با توجه به طول عمر، هزینه های سرمایه گذاری، هزینه های تعمیر و نگهداری هر یک از اجزای آن، نرخ تنزیل و نرخ کاهش بازده ماژول‌های فتوولتائیک؛
- بررسی تأثیر تعرفه‌ی خرید انرژی تجدید پذیر بر تعداد بهینه‌ی ماژول و برنامه‌ریزی بهینه‌ی سایر اجزای هاب انرژی خانگی؛
- استفاده همزمان از سیستم ذخیره‌ساز گرما و باتری در هاب انرژی خانگی و بررسی تأثیر آن بر ظرفیت بهینه‌ی سیستم پنل خورشیدی و عملکرد هر یک از اجزای هاب انرژی.

هدف از مدل پیشنهادی در این مقاله، بهینه سازی هزینه های بهره‌برداری هاب انرژی خانگی با ارائه زمان‌بندی بهینه است. فاکتور توزیع گاز طبیعی بین سیستم تولید همزمان برق و گرما و مبدل های حرارتی، زمان و میزان استفاده از وسایل خانگی کنترل پذیر، زمان و میزان شارژ و دشارژ خودرو برقی و واحد ذخیره ساز گرما و واحد ذخیره ساز توان الکتریکی در ساعات مختلف روز و ظرفیت پنل خورشید به عنوان متغیرهای مستقل در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. اجزای هاب انرژی خانگی در محیط نرم‌افزار MATLAB مدل‌سازی شده است و از الگوریتم ژنتیک در این مقاله برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

در ادامه، ساختار هاب انرژی خانگی مورد مطالعه در بخش ۲ شرح داده خواهد شد. بیان روابط و مدل‌سازی مسئله پیشنهادی نیز در بخش ۳ بیان می گردد. در بخش ۴ نیز نتایج پیاده سازی روش پیشنهادی و تحلیل نتایج ارائه خواهد گردید. در پایان نیز نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۵ آورده می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مرور منابع در زمینه بهره‌برداری بهینه هاب انرژی خانگی همراه با بهینه‌سازی ظرفیت پنل‌های خورشیدی

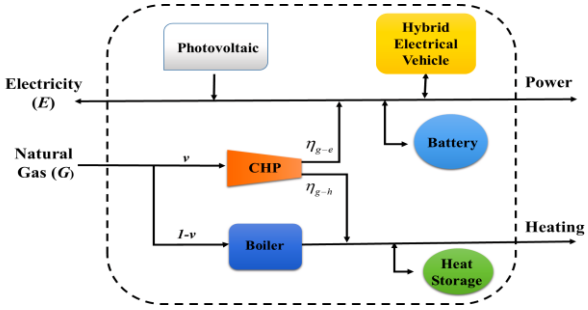
مرجع	سال	زمینه‌ی مورد مطالعه	هاب انرژی	مدیریت انرژی	منبع انرژی تجدیدپذیر	باتری	بهینه‌سازی ظرفیت پنل خورشیدی
(Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015)	۲۰۱۵	بهره‌برداری	✓	✓	✓	✓	✗
(Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2015)	۲۰۱۵	بهره‌برداری	✓	✓	✗	✗	✗
(Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017)	۲۰۱۷	بهره‌برداری	✓	✓	✓	✗	✗
(Okoye and Solyalı 2017)	۲۰۱۷	برنامه‌ریزی	✗	✗	✓	✓	✓
(Nizami, Haque et al. 2019)	۲۰۱۹	بهره‌برداری	✗	✓	✓	✓	✗
(Koskela, Rautiainen et al. 2019)	۲۰۱۹	برنامه‌ریزی	✗	✗	✓	✓	✓
(Senemar, Seifi et al. 2020)	۲۰۲۰	برنامه‌ریزی	✓	✓	✓	✗	✓
روش پیشنهادی	–	برنامه‌ریزی/ بهره‌برداری	✓	✓	✓	✓	✓

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

۲- ساختار هاب انرژی خانگی مورد مطالعه

هاب انرژی شامل تعدادی ورودی و تعدادی خروجی بوده و انرژی برای رسیدن به بارهای سیستم به شکل‌های مختلف تبدیل می شود (Zhang, Che et al. 2017). ساختار هاب انرژی خانگی که در این مقاله درنظر گرفته شده است، در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱. نمایشی مفهومی از هاب انرژی خانگی مورد مطالعه

هاب انرژی مورد مطالعه شامل یک دستگاه خودرو برقی هیبریدی با قابلیت اتصال به شبکه، یک واحد تولید انرژی تجدید پذیر خورشیدی، micro-CHP، بارهای گرمایشی، بویلر، واحدهای ذخیره‌ساز گرما و توان الکتریکی است. ورودی‌های هاب انرژی برق و گاز طبیعی خواهند بود. از آنجایی که گاز طبیعی توسط بویلر و micro-CHP مصرف می‌شود، متغیری به نام فاکتور توزیع v تعریف می گردد. قسمتی از گاز ورودی به هاب انرژی توسط CHP، (v) و قسمتی توسط بویلر ($1-v$) مصرف می‌شود. فاکتور توزیع مقداری بین ۰ تا ۱ دارد و مقدار آن در هر ساعت توسط مسئله‌ی بهینه‌سازی مشخص می‌شود

گرمای موردنیاز هاب، توسط وسایل گاز سوز، گرمای خروجی micro-CHP و ذخیره‌ساز گرما تأمین می‌شود. توان الکتریکی موردنیاز هاب انرژی توسط شبکه برق، توان الکتریکی خروجی micro-CHP، باتری خودرو برقی، واحد ذخیره‌ساز گرما و توان خروجی پنل های خورشیدی نیز تأمین خواهد شد. هاب انرژی می‌تواند در ساعاتی از شبانه روز برق را به شبکه بفروشد که در هر ساعت قیمت فروش برق به شبکه با قیمت خرید برق از شبکه یکسان درنظر گرفته شده است. خودروی هیبرید برقی در ساعات حضور در خانه مانند واحد ذخیره‌ساز انرژی عمل می‌کند. خودروی هیبریدی برقی و واحد ذخیره ساز توان الکتریکی، در ساعاتی مصرف‌کننده انرژی الکتریکی بوده و در ساعاتی برق را به سیستم تزریق می‌نماید. درنتیجه وجود این ذخیره سازها در کنار پنل‌های خورشیدی باعث بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری، کارایی و قابلیت اطمینان در استفاده از پنل‌های خورشیدی می‌شود.

۳- مسئله بهینه‌سازی مدیریت انرژی هاب انرژی

همکاری و مشارکت مشترکین در مدیریت انرژی بسیار حائز اهمیت است. راحتی، رفاه و آسایش ساکنین و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در خانه پیش‌شرط مدیریت انرژی بهینه است. ملاحظات رفاه و آسایش ساکنین یک هاب انرژی خانگی باید در قیود مسئله بهینه‌سازی گنجانده شود. بر اساس قیود متناظر با رفاه ساکنین، فضای شدنی برای حل مسئله بهینه‌سازی مشخص می شود. سطح رضایت مشترکین و شاخص‌های رفاه درنظر گرفته شده تأثیر بسزایی در مشخص شدن فضای شدنی حل مسئله و جواب های نهایی بهینه خواهد داشت (سید مهدی کاظمی و همکاران، ۱۳۹۸). یافتن حداقل هزینه بهره‌برداری هاب انرژی خانگی به‌عنوان تابع هدف در این مقاله مورد نظر است. در این مقاله با ارائه برنامه زمان‌بندی بهینه برای مصارف مختلف، فاکتور توزیع گاز مناسب، ارائه زمان‌بندی شارژ و دشارژ خودروهای برقی هیبریدی و واحدهای ذخیره‌ساز توان الکتریکی و گرما به‌عنوان متغیرهای مستقل مسئله، هزینه سیستم مورد مطالعه کمینه خواهد شد.

در رابطه (۱)، تابع هدف مورد استفاده برای مدیریت انرژی هاب انرژی خانگی مشابه تابع هدف ارائه شده در (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017) نشان داده شده است. تابع هدف پیشنهادی در این مقاله دربرگیرنده هزینه هاب انرژی شامل هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه و گاز ورودی به هاب است. بهینه سازی مدیریت انرژی سیستم برای یک روز (۲۴ ساعت) در فصل های مختلف انجام خواهد شد. در این مقاله کمینه شدن هزینه‌ی حامل‌های مختلف انرژی برای مشترکان همراه با هزینه روزانه مولد خورشیدی خانگی مقیاس کوچک به عنوان تابع هدف مطرح شده است. تابع هدف پیشنهادی برای بهینه سازی همزمان بهره برداری و تعیین ظرفیت نیروگاه خورشیدی به صورت (۱) بیان می گردد. همچنین در شکل (۲)، روندنمای پیاده‌سازی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

$$\text{Min}\, C = C_{Elec} + C_{Gas} + C_{PV} \qquad (۱)$$

که در رابطه بالا C_{Elec} هزینه‌ی توان الکتریکی خالص ورودی به هاب انرژی، C_{Gas} هزینه‌ی خرید گاز طبیعی از شبکه و C_{PV} هزینه‌ی روزانه‌ی پنل خورشیدی را بیان می‌کنند.

هزینه‌های مربوط به توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{Elec} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_e(t) E_{grid}(t) \qquad (۲)$$

$$C_{Gas} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_g(t) G(t) \qquad (۳)$$

در رابطه‌های (۲) و (۳)، λ_e و λ_g به ترتیب تعرفه برق و گاز طبیعی در هر ساعت، $E_{grid}(t)$ توان الکتریکی دریافتی از شبکه و $G(t)$ میزان گاز دریافتی از شبکه در هر ساعت می‌باشد.

حل مسائل بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک به طور گسترده در مطالعات سیستم‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، در (Liu, Agarwal et al. 2016) بهینه‌سازی اجزای سیستم انرژی مورد بررسی با هدف کاهش هزینه های بهره برداری توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در (Mostafavi Sani, Noorpoor

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

et al. 2019, Eladl, El-Afifi et al. 2020) نیز، بهینه‌سازی اجزای هاب انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام گرفته است. در این مقاله نیز از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده شده است. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی را می‌توان با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری یا در نرم‌افزار GAMS حل نمود.

۳-۱- هزینه‌ی روزانه سیستم پنل خورشیدی

هزینه‌ی سیستم پنل خورشیدی شامل هزینه‌ی ماژول، هزینه‌ی اینورتر، هزینه‌ی سیستم بالانس و هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود که در رابطه (۴) ارائه شده است.

$$C_{PV} = C_{Module} + C_{inv} + C_{BoS} + C_{O\&M} \quad (۴)$$

هر یک از اجزای بالا دارای یک طول عمر مفید است که توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود. با استفاده از ضریب بازگشت سرمایه (CRF) که در رابطه (۵) آمده است، می‌توان هزینه‌ی سالیانه‌ی هر یک از اجزا را بدست آورد (Koskela, Rautiainen et al. 2019). توجه شود که هزینه‌های تعمیر و نگهداری به‌صورت سالانه مطرح می‌شود.

$$CRF_n = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (۵)$$

که r نرخ تنزیل سالانه و n طول عمر یا زمان تعویض قطعه می‌باشد. با فرض ثابت بودن نرخ تنزیل در طول یک سال، می‌توان هزینه‌های روزانه را با تقسیم هزینه‌های سالانه بر تعداد روزهای سال بدست آورد؛ بنابراین هزینه‌ی روزانه‌ی سیستم پنل خورشیدی به صورت زیر بدست می‌آید (Koskela, Rautiainen et al. 2019):

$$C_{PV} = \frac{\begin{bmatrix} CRF_n \times C_{Module} + CRF_n \times C_{inv} \\ +CRF_n \times C_{BoS} + C_{O\&M} \end{bmatrix}}{365} \quad (۶)$$

۳-۲- قیود بهینه‌سازی

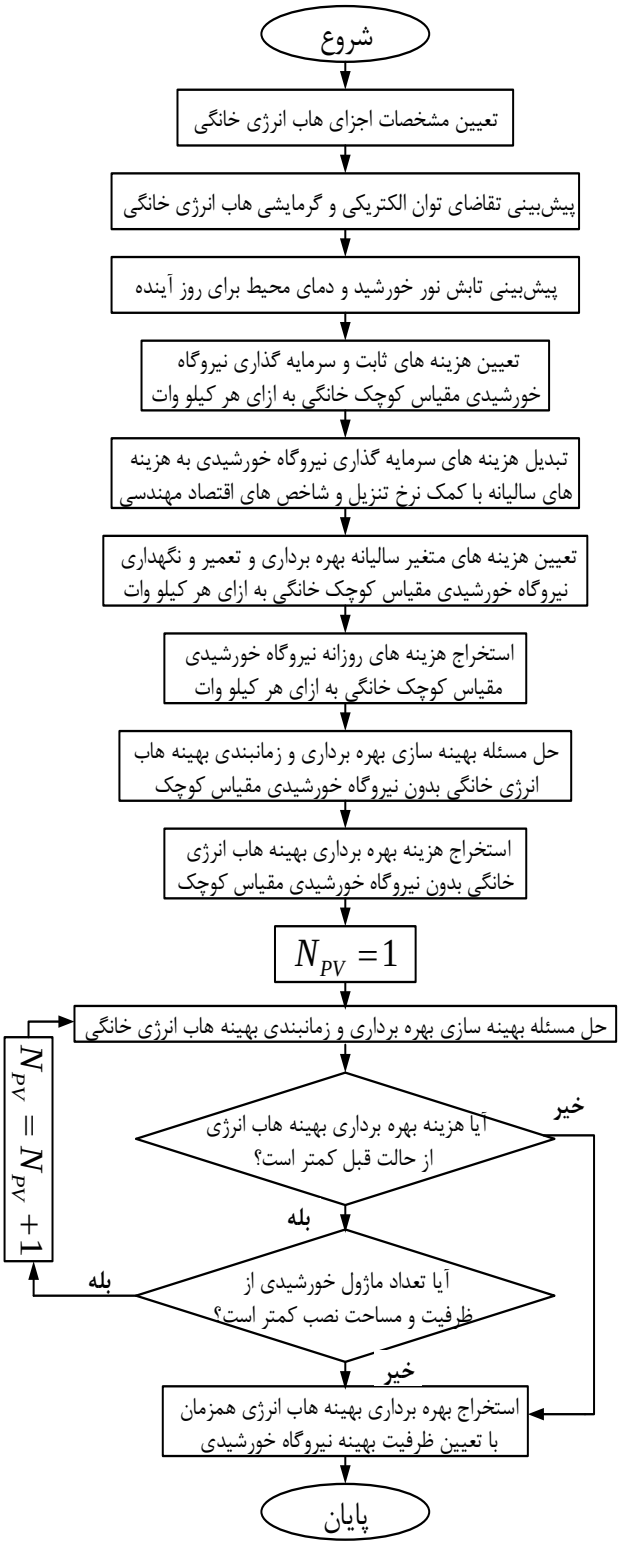
قیود مسئله بهینه‌سازی مربوط به معادلات توان الکتریکی و گرما و همچنین وسایل خانگی در هاب انرژی است. با استفاده از این قیود مسئله‌ی بهینه‌سازی در محدوده مدنظر مشترک انجام می شود. این قیود به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

۳-۲-۱- معادلات توان الکتریکی و گرما

با توجه به شکل (۱)، همواره بین انرژی ورودی و خروجی به هاب انرژی خانگی باید تعادل برقرار باشد که این قید به‌صورت رابطه (۷) و (۸) مطرح می‌شود:

$$E_{grid}(t) + \eta_{inverter} E_{PV}(t) + E_{chp}(t) + \eta_{dch}^{PHEV} E_{dch}^{PHEV}(t) + \eta_{dch}^{BSS} E_{dch}^{BSS}(t) = \frac{1}{\eta_{app}} E_{app}(t) + \frac{1}{\eta_{ch}^{PHEV}} E_{ch}^{PHEV}(t) + \frac{1}{\eta_{ch}^{BSS}} E_{ch}^{BSS}(t) \quad (۷)$$

$$H_{app}(t) + H_{chp}(t) + \eta_{dch}^{HS} H_{dch}^{HS}(t) = H_d(t) + \frac{1}{\eta_{ch}^{HS}} H_{ch}^{HS}(t) \quad (۸)$$



شکل ۲. روندنمای روش پیشنهادی بهینه‌سازی همزمان ظرفیت سیستم پنل خورشیدی و بهره‌برداری هاب انرژی خانگی

۳-۲-۲- وسایل خانه

بخش زیادی از انرژی الکتریکی مصرفی در خانه ها مربوط به وسایل برقی بوده و از این‌رو برنامه‌ریزی برای مدیریت مصرف وسایل الکتریکی خانه در جهت کاهش هزینه ها بسیار حائز اهمیت است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

وسایل الکتریکی خانه می‌تواند به دو دسته کنترل‌پذیر و غیرقابل‌کنترل تقسیم شود. دسته اول وسایل غیرقابل‌کنترل مانند روشنایی، تلویزیون، لپ‌تاپ و ... می‌باشند که مشترک فارغ از قیمت و میزان تقاضای برق در هر ساعت، تصمیم به استفاده از آن‌ها می‌گیرد. دسته‌ی دوم، وسایل قابل‌کنترل است که زمان و میزان استفاده از آن‌ها در ساعات مختلف روز می‌تواند توسط مشترک کنترل شود. بارهایی مانند ماشین‌لباسشویی، ماشین‌ظرفشویی، خشک‌کن، آبگرمکن برقی، سیستم تهویه هوا و ... جزء بارهای قابل‌کنترل محسوب می‌شوند.

فرض بر این است که میزان تقاضای برق و گرمای وسایل غیرقابل‌کنترل در مسئله بهینه‌سازی مشخص و تعریف شده است و به‌منظور افزایش رفاه مشترکان، این وسایل توسط خود آن‌ها انتخاب می‌شود مثلاً مشترک تصمیم می‌گیرد که وسایلی مانند روشنایی خانه، تلویزیون، یخچال و... جزء وسایل غیرقابل‌کنترل باشند. در این مقاله آبگرمکن، ماشین‌لباسشویی و سیستم تهویه هوا به عنوان وسایل الکتریکی قابل‌کنترل درنظر گرفته شده است(Alimi and Ouahada 2018, Nizami, Haque et al. 2019).

بر اساس توضیحات ارائه شده، مجموع تقاضای وسایل الکتریکی در هاب انرژی، برابر است با مجموع توان موردنیاز و وسایل کنترل پذیر و غیرقابل‌کنترل در هر ساعت که به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

$$E_{app}(t) = E^{c}(t) + E^{uc}(t) \qquad (۹)$$

قیود مربوط به وسایل کنترل‌پذیر را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته‌ی اول وسایلی مانند سیستم تهویه هوا که ممکن است به‌صورت پیوسته در طول روز مورد استفاده قرار گیرد. قیود مربوط به این وسایل در روابط (۱۲-۱۰) مطرح شده است. دسته دوم مربوط به وسایل کنترل‌پذیری مانند ماشین لباسشویی است که تنها در مدت زمان محدودی در روز ممکن است مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین برای این دسته از وسایل کنترل پذیر، یک بازه زمانی در طول روز $[t_1, t_2]$ و نیز حداکثر زمان موردنیاز برای تکمیل فرایند Δt توسط مشترک تعیین می‌گردد.

$$E_k^{\min}(t) \le E_k(t) \le E_k^{\max}(t) \qquad (۱۰)$$
$$\forall k \in K \ , \forall t \in AI_k$$

$$\sum_{t \in AI_k} E_{k(t)} \ge E_k \qquad \forall k \in K \qquad (۱۱)$$

$$E^{c}(t) = \sum_{k \in K} E_k(t) \qquad \forall t \qquad (۱۲)$$

رابطه (۱۰) بیانگر کمترین و بیشترین مقدار توان مصرفی مجاز برای هر وسیله‌ی کنترل‌پذیر در هر ساعت است. این مقادیر با توجه به داده‌های آماری برای هر وسیله بدست می‌آید. علاوه بر وجود یک مقدار حداقل و حداکثر برای هر وسیله‌ی کنترل پذیر، برای افزایش سطح راحتی و آسایش مشترکان، باید مجموع توان مصرفی وسایل کنترل‌پذیر از یک مقدار مشخص بیشتر باشد که رابطه (۱۱) بیانگر این موضوع است. در هر ساعت مجموع انرژی مصرفی توسط وسایل کنترل‌پذیر برابر است با $E^{c}(t)$ که از رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

۳-۲-۳- خودرو برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه

استفاده از خودروهای برقی در کنار منابع تولید تجدیدپذیر به عنوان ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان، کارایی و بازده منابع تولید تجدیدپذیر شود (Mehrjerdi and Hemmati 2020). در این مقاله حالت عملکرد خودرو برقی در خانه هوشمند در حالت دوسویه شارژ و همچنین تزریق به شبکه در صورت لزوم لحاظ شده است. باتری خودرو از طریق یک مبدل DC/AC به شبکه متصل می‌شود و این مبدل می‌تواند جریان برق را به صورت یک‌طرفه یا دوطرفه کنترل کند.

خودروی برقی هیبریدی طبق برنامه‌ریزی در ساعاتی توان الکتریکی را از شبکه دریافت کرده و در ساعاتی توان الکتریکی را به هاب انرژی تزریق می‌کنند. قیود مربوط به خودرو برقی مانند آن چیزی است که در آمده است. نرخ شارژ و دشارژ و میزان توان الکتریکی ذخیره‌شده در باتری خودرو در هر لحظه، باید کمتر از مقداری باشد که برای باتری تعریف شده است. این قیود به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$E_{ch}^{PHEV} \le E_{ch}^{\max} \qquad (۱۳)$$

$$E_{dch}^{PHEV} \le E_{ch}^{\max} \qquad (۱۴)$$

مفروض است خودرو برقی هر روز در فاصله زمانی مشخص [g-c] و تنها یکبار در روز بیرون از خانه باشد. در نتیجه در این زمان‌ها شارژ یا دشارژ صورت نمی‌گیرد. میزان انرژی ذخیره شده در باتری خودرو هیبرید برقی در زمان‌هایی که ماشین در خانه پارک شده است، بر اساس (Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E^{PHEV}(t) = \begin{cases} E_0^{PHEV} + \sum_{h=1}^{t} \begin{pmatrix} E_{ch}^{PHEV}(h) \\ -E_{dch}^{PHEV}(h) \end{pmatrix} & \forall t \le g\text{-}1 \\ E_0^{PHEV} - E_{out}^{PHEV} + \sum_{h=1}^{t} \begin{pmatrix} E_{ch}^{PHEV}(h) \\ -E_{dch}^{PHEV}(h) \end{pmatrix} & \forall t \ge c+1 \end{cases} \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، مقدار E^{PHEV} همواره مثبت بوده و نشان دهنده میزان انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت t است. علاوه بر این بیشینه سطح شارژ باتری باید کمتر یا برابر ظرفیت نامی باتری ماشین باشد که این قید توسط رابطه (۱۶) مطرح می‌شود. مشترک انتظار دارد هنگامی که از خانه بیرون می‌رود سطح شارژ باتری خودرو بیشینه باشد. رابطه (۱۷) بیان می‌کند که سطح شارژ خودرو هنگام خروج مشترک از خانه (ساعت g-1) برابر با ظرفیت نامی باتری باشد. یکی دیگر از فرضیات، میزان شارژ خودرو در آخرین ساعت روز (ساعت ۲۴)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

است که باید از یک مقدار معین و تعریف شده‌ای بیشتر باشد. این قید توسط رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$E^{PHEV}(t) \le cap^{PHEV} \quad (۱۶)$$

$$E^{PHEV}(g-1) = cap^{PHEV} \quad (۱۷)$$

$$E_{24}^{PHEV} = E_0^{PHEV} \quad (۱۸)$$

۳-۲-۴- واحد ذخیره‌ساز گرما

یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی و مدیریت انرژی در سیستم‌های هوشمند انرژی، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز گرما از قبیل تانک ذخیره آب و واحد ذخیره‌ساز گرما، است. استفاده از واحدها تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی دارد (Mguirk, Dowling et al. 2019, Sharifi and Maghouli 2019). در انتهای هر ساعت، انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره‌ی گرما از رابطه (۱۹) بدست می‌آید؛ مانند خودروی برقی، در هر ساعت سطح شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما باید کمتر یا برابر از حدی تعریف شده باشد که روابط (۲۰) و (۲۱) بیانگر این قیود است. فرض می‌شود که در انتهای هر روز (ساعت ۲۴) سطح شارژ واحد ذخیره ساز گرما از یک مقدار تعریف شده بزرگتر یا مساوی باشد. این قید به صورت رابطه (۲۲) مطرح می‌شود.

$$H^{HSS}(t) = H_0^{HSS} + \sum_{h=1}^{t} H_{ch}^{HSS}(h) - H_{dch}^{HSS}(h) \quad (۱۹)$$

$$H_{ch}^{HSS}(t) \le H_{ch}^{\max} \quad (۲۰)$$

$$H_{dch}^{HSS}(t) \le H_{dch}^{\max} \quad (۲۱)$$

$$H^{HSS}(24) \ge H_0^{s} \quad (۲۲)$$

سطح شارژ واحد ذخیره ساز گرما در هر ساعت از رابطه (۲۳) بدست می‌آید. علاوه بر این سطح شارژ واحد ذخیره ساز گرما در هر ساعت باید بین دو مقدار تعریف شده باشد (Merdanoğlu, Yakıcı et al. 2020). این قید در رابطه (۲۴) مطرح می‌شود.

$$SOC^{HSS}(t) = \frac{H_{HSS}(t)}{Cap^{HSS}} \quad (۲۳)$$

$$SOC_{\min}^{HSS} \le SOC^{HSS}(t) \le SOC_{\max}^{HSS} \quad (۲۴)$$

۳-۲-۵- واحد micro-CHP

استفاده از واحدهای CHP در هاب های انرژی، مزایای فراوانی همچون افزایش قابلیت اطمینان سیستم، افزایش کارایی و بهره‌وری، کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی را برای سیستم به همراه دارد (Chen, Zhou et al. 2018). قید اصلی برای واحدهای micro-CHP، میزان گاز ورودی به آن‌ها است که طبق رابطه (۲۵) به $E_{\max}^{CHP}$ محدود می‌شود.

$$v(t)G(t) \le E_{\max}^{CHP} \quad (۲۵)$$

۳-۲-۶- پنل خورشیدی

توان خروجی پنل خورشیدی در هر لحظه به میزان تابش نور خورشید بر سطح پنل و دمای محیط در هر لحظه وابسته است (Okoye and Solyalı 2017)؛ بنابراین توان خروجی پنل خورشیدی در هر ساعت برابر است با:

$$E_{pv}(t) = N_{pv} \times I(t) \times \eta_{wire} \times \eta_{pv}(t) \quad (۲۶)$$

که در رابطه (۲۶)، N_{pv} تعداد ماژول‌ها، $I(t)$ میزان تابش نور خورشید، η_{wire} بازده اتصالات و کل سیستم انتقال انرژی و η_{pv} بازده ماژول مورد استفاده در هر ساعت است. مجموع توان پنل خورشیدی نصب شده در منزل مسکونی می‌تواند با قیودی همچون قیود مربوط به شبکه (محدودیت‌های تراکم و ولتاژی)، سرمایه‌گذاری و مساحت جایگذاری پنل محدود شود. در این مقاله قیود مربوط به شبکه و همچنین با توجه به اینکه فرض می‌شود که پنل‌ها بر روی پشت‌بام منزل مسکونی نصب گردد، قید هزینه‌ی مکان نصب درنظر گرفته نمی‌شود. از طرف دیگر با توجه به محدودیت مساحت نصب پنل خورشیدی بر روی پشت‌بام، قیدی به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

$$0 \le N_{pv} \times S_{pv} \le S_{Rooftop} \quad (۲۷)$$

که S_{pv} مساحت موردنیاز برای نصب هر ماژول و $S_{Rooftop}$ مساحت خالص قابل نصب برای پنل‌های خورشیدی روی پشت‌بام می‌باشد.

بر اساس آنچه در (Okoye and Solyalı 2017) اشاره شده است، بازده ماژول در هر ساعت به بازده مرجع (η_{ref})، ضریب تصحیح دمایی (β_{ref}) که برای ماژول‌های کریستالی مقداری متوسط بین ۰/۰۳- تا ۰/۰۶- است، دمای سلول (T_c) و دمای استاندارد (T_{stc}) بستگی دارد که این مقادیر توسط شرکت سازنده ماژول ارائه می‌گردد. بازده ماژول در هر ساعت از رابطه محاسبه می‌شود.

$$\eta_{PV}(t) = \eta_{ref}\left[1 - \beta_{ref}(T_c(t) - T_{stc})\right] \quad (۲۸)$$

در رابطه‌ی (۲۸)، دمای سلول در هر ساعت به‌صورت زیر بدست می‌آید:

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} I_{stc} \quad (۲۹)$$

که در رابطه بالا، $T_a(t)$ دمای محیط در هر ساعت، $NOCT$ دمای نامی عملکرد سلول و I_{stc} تابش استاندارد می‌باشد.

۳-۲-۷- اینورتر

اینورتر توان خروجی DC پنل خورشیدی را به توان AC قابل مصرف برای بارهای خانگی تبدیل می‌کند. تبدیل برق مستقیم به متناوب با بازدهی ۱۰۰ درصد همراه نیست و تلفاتی را به‌همراه دارد که در این صورت برای هر اینورتر بازده $\eta_{Inverter}$ تعیین می‌گردد (Lovati, Dallapiccola et al. 2020). علاوه‌براین برای تبدیل یک مقدار مشخص توان به AC مقدار بیشتری توان DC نیاز است (Koskela,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

Rautiainen et al. 2019)؛ بنابراین برای عملکرد کارآمد و مطمئن سیستم پنل خورشیدی، نیاز است تا ظرفیت اینورتر موردنیاز ۱۰ درصد از توان بیشینه‌ی ماژول‌ها بیشتر باشد (Koskela, Rautiainen et al. 2019). رابطه (۳۰) ظرفیت مؤثر اینورتر را بر حسب تعداد ماژول‌ها نشان می‌دهد.

$$Inv_{size} = 1.1 \times E_{PV}^{\max} \times N_{PV} \quad (۳۰)$$

۳-۲-۸- واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی

اگرچه منابع تولید انرژی تجدیدپذیر دارای مزایای قابل‌توجهی هستند، اما دارای ماهیت غیرقابل پیش‌بینی هستند و متناسب با شرایط آب و هوایی، توان خروجی دارای عدم قطعیت است (Babaei, Azizi et al. 2020)؛ بنابراین برای افزایش کارایی و بهره‌وری واحد-های تولید انرژی تجدیدپذیر، لازم است که انرژی تولید شده توسط این واحدها در شرایط مازاد تولید یا وابسته به قیمت انرژی الکتریکی ذخیره شود (Vonsien and Madlener 2020). بنابراین وجود سیستم‌های ذخیره‌ساز توان الکتریکی و شارژ و دشارژ هوشمند این واحدها، می‌تواند سبب افزایش انعطاف‌پذیری و پویایی در سیستم تأمین انرژی شود (Koskela, Rautiainen et al. 2019). مانند واحد ذخیره‌ساز گرما، میزان انرژی ذخیره شده در باتری در انتهای هر ساعت، قیود مربوط به مقادیر بیشینه و کمینه‌ی شارژ باتری در هر ساعت، مقدار انرژی در ساعت اولیه روز، سطح شارژ باتری در هر ساعت و قید مربوط به سطح شارژ باتری به ترتیب در روابط (۳۶-۳۱) آمده است.

$$E^{BSS}(t) = E_0^{BSS} + \sum_{h=1}^{t} E_{ch}^{BSS}(h) - E_{dch}^{BSS}(h) \quad (۳۱)$$

$$E_{ch}^{BSS}(t) \le E_{ch}^{\max} \quad (۳۲)$$

$$E_{dch}^{BSS}(t) \le E_{dch}^{\max} \quad (۳۳)$$

$$E^{BSS}(24) \ge E_0^{s} \quad (۳۴)$$

$$SOC^{BSS}(t) = \frac{E^{BSS}(t)}{Cap^{BSS}} \quad (۳۵)$$

$$SOC_{\min}^{BSS} \le SOC^{BSS}(t) \le SOC_{\max}^{BSS} \quad (۳۶)$$

۴- نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش طرح مدیریت انرژی هاب انرژی خانگی بر روی یک خانه مستقل اجرا می شود. در اینجا برای بررسی اثربخشی طرح پیشنهادی، سه مورد مطالعه موردی مختلف بررسی می‌شود.

در مطالعه موردی ۱، طرح مدیریت انرژی هاب انرژی خانگی بدون لحاظ کردن پنل خورشیدی و باتری اجرا می‌شود. میزان فاکتور توزیع گاز طبیعی در هر ساعت، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودرو هیبرید برقی و برنامه‌ریزی استفاده از وسایل الکتریکی قابل‌کنترل تعیین خواهد شد.

در مطالعه موردی ۲، پنل خورشیدی به هاب انرژی خانگی مورد مطالعه اضافه می‌شود. در این قسمت به بررسی تأثیر اضافه شدن پنل-های خورشیدی به هاب انرژی خانگی و بهینه‌سازی ظرفیت پنل های خورشیدی با توجه به هزینه‌های ثابت، هزینه‌های متغیر و تعرفه‌ی برق پرداخته می‌گردد و درنتیجه برنامه‌ریزی بهینه زمان و میزان شارژ و دشارژ این واحد به‌منظور کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی هاب انرژی بدست می‌آید.

در مطالعه موردی ۳ نیز یک واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی با ظرفیت مشخص به سیستم اضافه شده و عملکرد هاب انرژی خانگی دارای منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر خورشیدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

خانه مورد بررسی دارای یک واحد micro-CHP، یک عدد خودرو هیبرید برقی، پنل خورشیدی و سه وسیله‌ی الکتریکی قابل‌کنترل و سایر وسایل مصرف‌کننده برق و گاز است. وسایل کنترل-پذیر شامل آبگرمکن برقی، ماشین لباسشویی و سیستم تهویه هوا است. برای ماشین لباسشویی فرض بر این است که مشترک در فاصله زمانی ۱۲ تا ۱۹ بعد از ظهر به ۱ ساعت زمان برای استفاده از ماشین لباسشویی نیاز دارد. همچنین میزان مصرف توان وسایل الکتریکی قابل‌کنترل در هر ساعت در محدوده‌ی مشخصی تعریف شده است که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جداول (۲) و (۳) آمده است. فرض می‌شود که میزان کل مصرف انرژی الکتریکی آبگرمکن برقی و سیستم تهویه‌ی هوا در کل روز به ترتیب از ۷/۵ و ۵/۶ کیلووات ساعت بیشتر باشد (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017). مشخصات واحد micro-CHP، واحد ذخیره‌ساز گرما و خودرو برقی (Cao, Wang et al. 2020, Ghorbani, Aghahosseini et al. 2020)، با فرض اینکه این خودرو تنها یکبار در روز و آن هم در ساعات ۸ تا ۱۷ بیرون از خانه باشد (Wu, Hu et al. 2018) در جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به اینکه طرح مدیریت انرژی پیشنهادی در این مقاله برای روز آینده انجام می‌شود؛ بنابراین فرض می‌شود تا در پایان هر روز سطح شارژ واحدهای ذخیره‌ساز از یک سطح مشخص بیشتر باشد. در بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت انرژی، سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز در پایان هر روز مقداری مشخص و تعریف شده دارد (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017, Senemar, Rastegar et al. 2019, Senemar, Seifi et al. 2020). اما با این وجود هزینه‌ی بهره‌برداری هاب انرژی برای مقادیر مختلف سطح شارژ در پایان هر روز یکسان نمی‌باشد. در مقالاتی مانند (Massrur, Niknam et al. 2019)، با انجام آنالیز حساسیت، به بررسی تأثیر میزان سطح شارژ اولیه در ابتدای هر روز بر هزینه بهره‌برداری پرداخته

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

شده است. نتایج و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، با تغییر سطح شارژ اولیه و پایان هر روز میزان هزینه‌های بهره‌برداری تغییرات کمی در حدود ۳ درصد خواهد داشت. اگرچه در این مقاله، سطح شارژ اولیه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت پیش‌فرض درنظر گرفته شده است اما می‌توان در کارهای آتی، روش پیشنهادی را با تأکید بر این موضوع و انتخاب بهینه سطح شارژ اولیه تکمیل نمود.

ضمناً میزان تقاضا توان وسایل الکتریکی غیرقابل‌کنترل، تقاضا انرژی گرمایشی موردنیاز هاب انرژی، تعرفه برق و گاز طبیعی به‌صورت ساعتی در شکل (۳) نمایش داده شده است (Mehrjerdi and Rakhshani 2019, Oskouei, Mohammadi-Ivatloo et al. 2020).

جدول ۲. محدوده مجاز برای مصرف توان الکتریکی آبگرمکن

ساعت	کمترین توان مجاز (کیلووات)	حداکثر توان مجاز (کیلووات)
۵-۱ و ۲۴	۰	۰/۲۵
۲۳-۶	۰/۲۵	۰/۵

جدول ۳. محدوده مجاز برای مصرف توان الکتریکی سیستم تهویه هوا

ساعت	کمترین توان مجاز (کیلووات)	حداکثر توان مجاز (کیلووات)
۱۷-۸	۰/۱	۰/۲
۵-۱ و ۱۸-۲۰	۰/۲	۰/۳
۷-۶ و ۲۱-۲۴	۰/۳	۰/۴

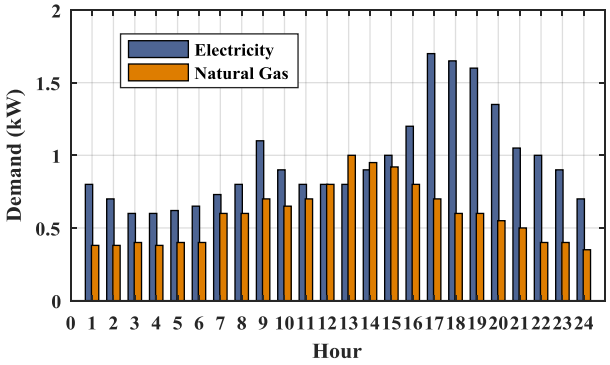
جدول ۴. مشخصات واحد CHP و خودرو برقی

پارامتر	مقدار	واحد
ظرفیت باتری خودرو	۱۰	کیلووات ساعت
بازده شارژ/دشارژ باتری خودرو برقی	۹۵	درصد
بیشینه شارژ/دشارژ باتری خودرو برقی	۳/۳	کیلووات
میزان شارژ اولیه باتری خودرو	۵	کیلووات ساعت
بازده micro-CHP در تبدیل گاز به برق	۰/۳۵	درصد
بازده micro-CHP در تبدیل گاز به گرما	۰/۴	درصد
حداکثر توان تولیدی واحد micro-CHP	۱	کیلووات
ظرفیت واحد ذخیره‌ساز	۳	کیلووات ساعت
بازده شارژ/دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	۹۵	درصد
بیشینه شارژ/دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما	۳	کیلووات
میزان شارژ اولیه واحد ذخیره‌ساز گرما	۱/۵	کیلووات ساعت

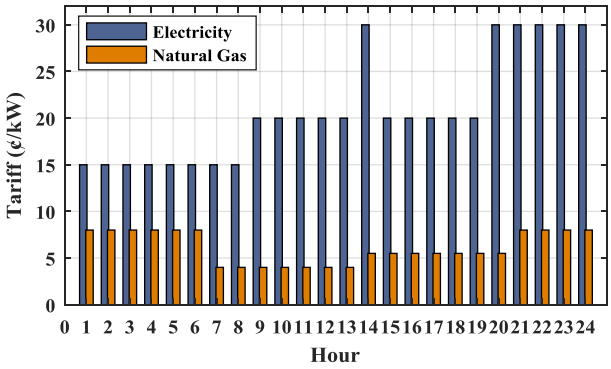
در این مقاله برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در حالی که جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک در تمامی مطالعه‌های موردی ۳۰۰ و تعداد تکرار ها ۱۵۰۰ لحاظ گردیده است.

۴-۱- نتایج مطالعه موردی ۱

همان‌گونه که توضیح داده شد، در این مورد هاب انرژی خانگی مورد مطالعه بدون سیستم پنل خورشیدی و باتری درنظر گرفته شده است. با حل مسئله بهینه‌سازی و استخراج بهره‌برداری بهینه، میزان انرژی الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه به صورت شکل (۴) است.

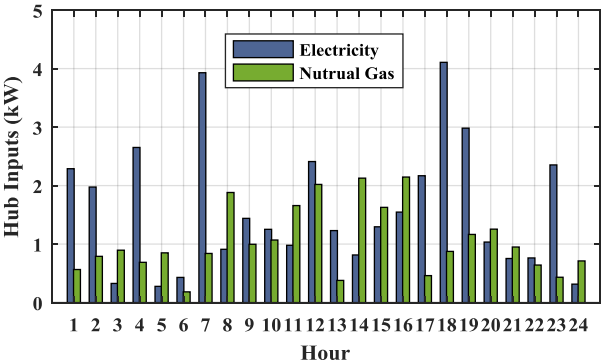


(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) میزان تقاضای وسایل الکتریکی غیرقابل‌کنترل و گرمایشی و (ب) تعرفه خرید توان الکتریکی و گاز طبیعی از شبکه



شکل ۴. توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه در مطالعه موردی ۱

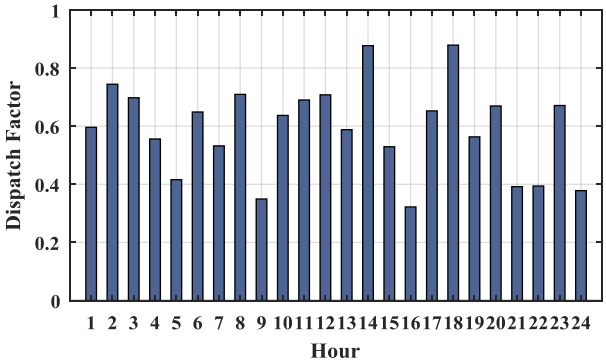
میزان توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه به ترتیب برابر با ۳۸/۲۳ و ۲۵/۲۱ کیلووات ساعت است. در این حالت هزینه بهره‌برداری هاب انرژی نیز برابر با ۹۰۳/۳۲ سنت در روز است. شکل (۵) مقدار فاکتور توزیع بهینه در مطالعه موردی ۱ را نشان می‌دهد.

ضمناً با حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در هاب انرژی خانگی در مطالعه موردی ۱ با دیدگاه بهینه‌سازی بهره‌برداری، زمان‌بندی بهینه‌ی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

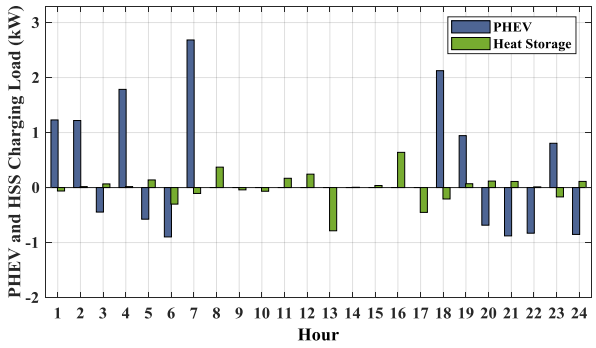
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

شارژ و دشارژ باتری خودرو برقی هیبریدی و واحد ذخیره‌ساز گرما به‌صورت شکل (۶) حاصل می‌شود.

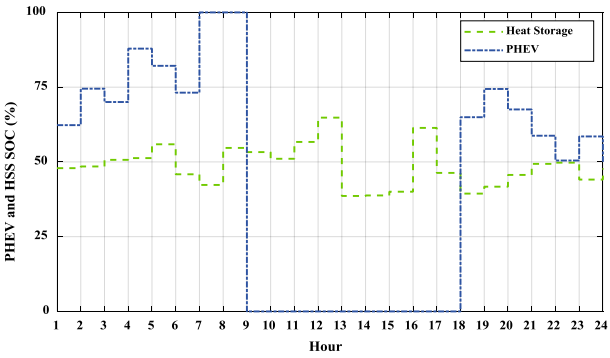


شکل ۵. مقدار ساعتی فاکتور توزیع گاز طبیعی

در همه‌ی فصول میزان شارژ و دشارژ باتری خودرو بر قی در هر ساعت بین دو مقدار ۳/۳ و ۳/۳- محدود است. علاوه بر این فرض می‌شود که خودرو همه روزه در ساعات مشخص ۹ الی ۱۷ در خانه نمی‌باشد، پس عملاً در این ساعات از روز شارژ یا دشارژ صورت نمی‌گیرد. باتری خودرو معمولاً در ساعات قبل از خروج شارژ می‌شود تا ظرفیت باتری خودرو به مقدار حداکثر خود برسد. همچنین خودرو در زمان خروج از خانه فرض می شود مقدار ثابت و مشخص ۵/۶۳ کیلووات ساعت انرژی مصرف کند.



(الف)

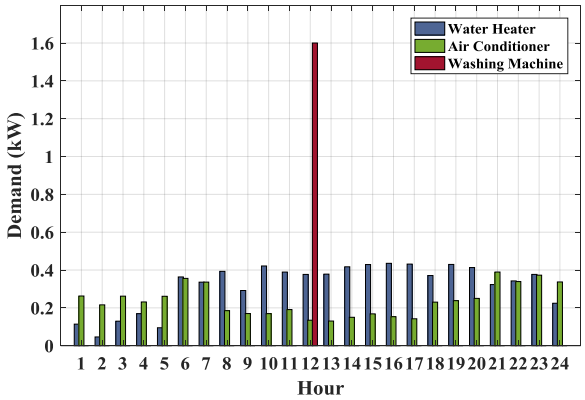


(ب)

شکل ۶. نتایج بهره‌برداری بهینه باتری خودروی برقی هیبریدی و ذخیره‌ساز گرما در مطالعه موردی ۱: (الف) شارژ و دشارژ بهینه خودرو برقی هیبریدی و واحد ذخیره‌ساز گرما و (ب) سطح شارژ خودرو برقی هیبریدی و واحد ذخیره‌ساز گرما

همانطور که در شکل (۶) مشخص است، برای حفظ راحتی مشترک، سطح شارژ باتری خودرو در هنگام خروج از خانه ۱۰۰ درصد است و بدین منظور قبل از خروج از خانه و در ساعاتی که تعرفه برق پایین است عملیات شارژ باتری صورت می‌گیرد. در هنگام ورود به خانه و در ساعات ۱۸ و ۱۹ که تعرفه برق کمتر است شارژ شده و در ساعات ۲۰ الی ۲۲ دشارژ می‌شود. همچنین میزان شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز گرما همواره بین ۳ و ۳- است. همچنین طبق آنچه فرض شد، سطح شارژ خودرو برقی و واحد ذخیره‌ساز گرما در ساعت ۲۴ هر روز نصف ظرفیت نامی خود (۵۰٪) است.

شکل (۷) زمان‌بندی بهینه تقاضای توان الکتریکی آبگرمکن برقی، ماشین لباسشویی و سیستم تهویه هوا را به عنوان سه وسیله‌ی الکتریکی قابل‌کنترل در این مقاله نشان می‌دهد. با کنترل میزان و زمان استفاده از این وسایل و انتقال آن به ساعات کم‌باری و ساعاتی که تعرفه برق پایین است، می‌توان هزینه‌های انرژی مصرفی هاب انرژی را در حدود ۲۰ درصد کاهش داد.



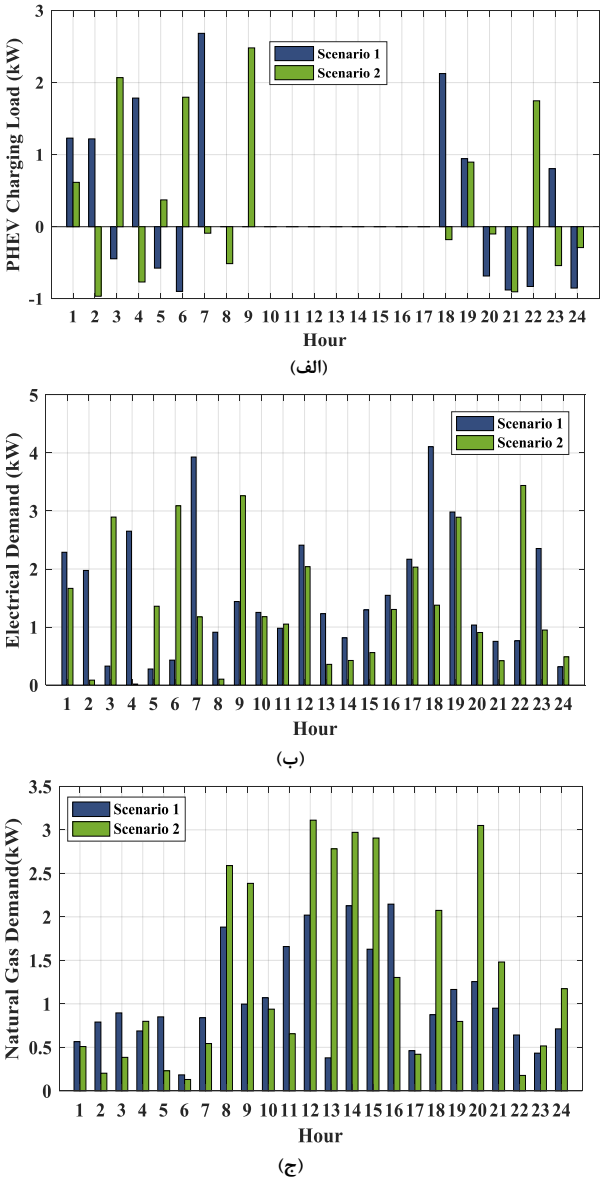
شکل ۷. مصرف توان الکتریکی آبگرمکن برقی و سیستم تهویه هوای مطالعه موردی ۱

خودروهای الکتریکی و اثرات ناشی آن در طرح‌های مدیریت انرژی و هاب‌های انرژی خانگی یکی از چالش‌هایی است که بهره‌بردار سیستم با آن مواجه بوده و این موضوع در سال‌های آینده نیز اهمیت دوچندانی می‌یابد. در طرح پیشنهادی مدیریت هاب انرژی خانگی، فرض شده است که خودرو تنها یک‌بار در طول روز و در ساعات مشخص [g-c] در خانه حضور ندارد و عملاً باتری خودرو در این ساعات شارژ و دشارژی ندارد. در مطالعاتی مانند (Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015, Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2015, Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017, Emrani-Rahaghi and Hashemi-Dezaki 2020) که در زمینه‌ی مدیریت هاب انرژی با حضور خودرو برقی متصل به شبکه صورت گرفته است خودرو هر روز در بازه زمانی مشخص و تعریف شده در خانه حضور ندارد. برای بررسی تأثیر زمان خروج و ورود خودروی برقی بر مسئله‌ی بهینه‌سازی، در مطالعه موردی ۱، ۲ سناریو بر اساس زمان ورود و خروج خودروی الکتریکی لحاظ گردیده است. در سناریوی اول مانند اطلاعات هاب انرژی مورد مطالعه، خودروی الکتریکی در بازه زمانی ۸ الی ۱۷ در خانه حضور ندارد و در سناریوی دوم بر اساس مطالعه‌ی صورت گرفته در (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017)، خودرو الکتریکی در ساعت ۱۰ الی ۱۷ در خانه نمی‌باشد و عملاً در این ساعات شارژ یا دشارژی صورت نمی‌گیرد. با اجرای مسئله‌ی بهینه‌سازی برای سناریوی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

دوم، هزینه‌ی بهره‌برداری هاب انرژی خانگی برابر با ۸۹۴/۴۸ می‌گردد؛ علاوه‌براین برنامه‌ریزی بهینه‌ی شارژ و د شارژ باتری خودرو و توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه برای دو سناریو مختلف بیان‌شده به‌ترتیب در شکل (۸) نمایش داده شده است.



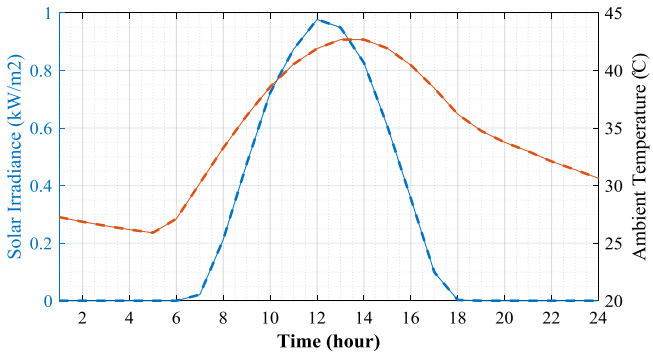
شکل ۸. نتایج مقایسه سناریوهای مختلف زمان ورود و خروج خودرو الکتریکی در مطالعه موردی ۱: (الف) شارژ و دشارژ بهینه خودرو برقی هیبریدی و واحد ذخیره‌ساز گرما، (ب) توان الکتریکی وردی هاب انرژی و (ج) میزان گاز مصرفی هاب انرژی

نتایج نشان می‌دهد با تغییر زمان خروج و ورود خودرو برقی به خانه‌ی مورد مطالعه، زمان‌بندی بهینه‌ی اجزای هاب انرژی تغییر می‌یابد. در سناریو دوم با توجه به افزایش زمان حضور خودرو بر قی دا خل خا نه، قابلیت مانور شارژ و دشارژ باتری خودرو افزایش یافته و خودرو بر قی می‌تواند عملکرد بهتری در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری هاب ا نرژی داشته باشد.

۴-۲- نتایج مطالعه موردی ۲

در مطالعه موردی ۲، حالت پنل خورشیدی به هاب ا نرژی مورد مطالعه اضافه می‌شود. ورودی‌های مسئله برای بهی نه سازی ظرف یت سیستم پنل خورشیدی در جدول (۵) ارائه شده ا ست (Okoye and Solyalı 2017, Lovati, Dallapiccola et al. 2020). م یزان متوسط تابش نور خورشید و دمای م حیط ن یز در شکل (۹) ن مایش داده شده است.

فرض بر این است که قیمت فروش برق به شبکه برابر با ۰/۲۷ قی مت خر ید برق از شبکه ا ست (Boeckl and Kienberger 2019, Lovati, Dallapiccola et al. 2020). بر اساس حل م سئله بهی نه‌سازی پیشنهادی، تعداد ماژول‌ها ۱۵ عدد و ظرفیت بهی نه‌ی سی ستم پنل خورشیدی ۲ کیلووات بدست آ مده ا ست. با ا ضافه شدن پ نل خورشیدی به مسئله‌ی بهینه‌سازی، میزان توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه در مطالعه موردی دوم به‌صورت شکل (۱۰) خوا هد بود.



شکل ۹. میانگین تابش نور خورشید و دمای محیط

جدول ۵. داده‌های ورودی در طراحی سیستم پنل خورشیدی

پارامتر	مقدار	واحد
فضای موردنیاز برای نصب هر ماژول	۱	m^2
مساحت مؤثر پشت‌بام برای نصب	۵۰	m^2
بازده هر ماژول	۱۶	%
قیمت هر ماژول	۲۸۶/۴	دلار
عمر هر ماژول	۲۵	سال
هزینه اینورتر برای هر کیلووات	۳۱۰	دلار
عمر اینورتر	۱۰	سال
بازده اینورتر	۹۰	%
هزینه سیستم بالانس	۲۰	درصد از کل
هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری	۱۰	درصد از کل
بازده سیستم	۹۸	%
ضریب تصحیح دمایی ماژول	-۰/۴	1/°C %
دمای نامی عملکرد ماژول	۴۷	°C
دمای استاندارد	۲۷	°C
ضریب خطی کاهش بازده ماژول	۰/۷۵	%
نرخ تنزیل	۳/۲	%

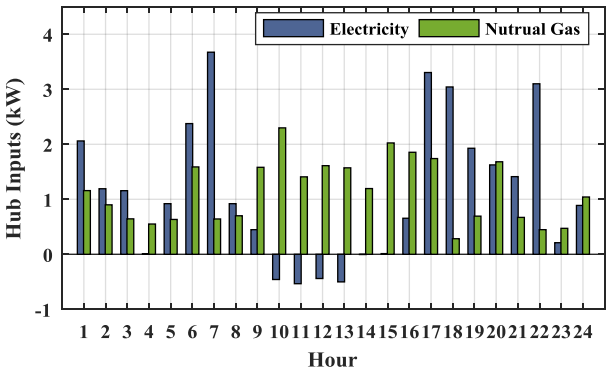
در شکل (۱۰)، در ساعاتی که توان الکتریکی منفی است، بیانگر فروش برق به شبکه است. همانطور که در شکل مشخص است در ساعات ۱۰ تا ۱۵ توان دریافتی از شبکه صفر است و علاوه بر این در ا ین ساعات مقداری توان الکتریکی به شبکه تزر یق شده ا ست. در ا ین حا لت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

هزینه‌ی بهره‌برداری از هاب انرژی همراه با هزینه‌های روزانه‌ی سیستم خورشیدی که برابر با ۱۲۲/۳۵ سنت است، به ۸۵۷/۷ سنت کاهش می‌یابد؛ بنابراین استفاده از پنل خورشیدی، کاهش هزینه های بهره‌برداری و صرفه‌جویی روزانه ۴۵/۵ سنت را برای مشترکان به‌همراه داشته است. در این حالت توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه به ترتیب برابر است با ۲۷ و ۲۷/۴ کیلووات ساعت که نشان می‌دهد استفاده از سیستم پنل خورشیدی کاهش ۱۱/۲۳ کیلووات در انرژی الکتریکی دریافتی از شبکه را به‌همراه داشته است. شکل (۱۱) برنامه‌ریزی شارژ دشارژ خودرو برقی و واحد ذخیره‌ساز گرما، برنامه‌ریزی عملکرد وسایل کنترل‌پذیر و مقادیر فاکتور توزیع را در مطالعه موردی ۲ نشان می‌دهد.

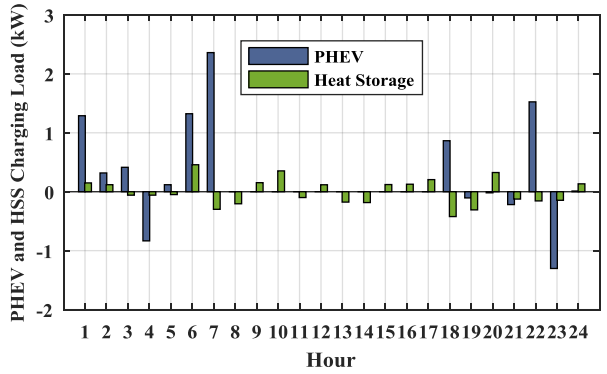
پارامترهایی مانند قیمت فروش برق به شبکه، نرخ تنزیل و ... می‌تواند تأثیر زیادی بر مسئله‌ی بهینه‌سازی و ظرفیت بهینه‌ی سیستم خورشیدی داشته باشد. برای مثال در مطالعه موردی ۲ اگر قیمت فروش برق به شبکه برابر یا بیشتر از قیمت خرید برق از شبکه باشد، تعداد بهینه‌ی ماژول‌ها ۵۰ عدد یا همان مقدار حداکثری براساس قید مساحت بدست می‌آید. برای حالتی که قیمت خرید و فروش برق از شبکه یکسان درنظر گرفته شده است، هزینه‌ی روزانه هاب انرژی خانگی برابر با ۶۴۷ سنت است که هزینه های روزانه سیستم پنل خورشیدی برابر ۴۰۷/۶۶ سنت است. شکل (۱۲) توان الکتریکی دریافتی از شبکه در دو حالت خرید و فروش برق از شبکه با تعرفه‌ی متفاوت و یکسان را نشان می‌دهد.



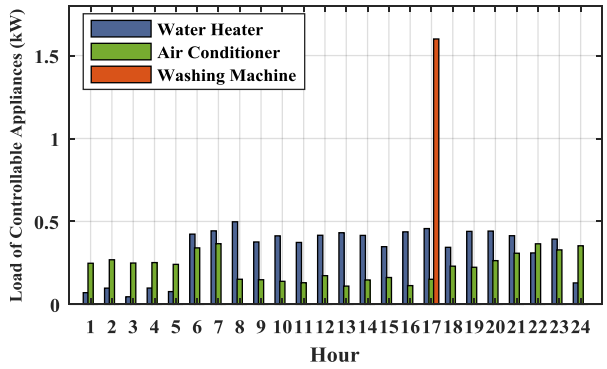
شکل ۱۰. توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه در مطالعه موردی ۲

مطالعه موردی ۲ بر اساس روش‌های موجود مانند روش‌های ارائه شده در مراجع (Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015, Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017, Nizami, Haque et al. 2019) با درنظرگیری ظرفیت پنل‌های خورشیدی به‌صورت پیش‌فرض انجام گرفته است.

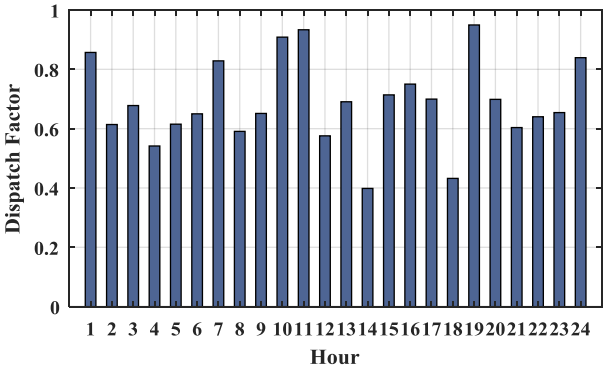
برای نشان دادن اهمیت ظرفیت پنل‌های خورشیدی بر هزینه‌های روزانه هاب انرژی، آنالیز حساسیت برای تعداد مختلف ماژول در مطالعه موردی ۲ مطابق شکل (۱۳) انجام گرفته است. نتایج آنالیز حساسیت انجام شده نشان می‌دهد استفاده بیشتر یا کمتر از ۱۵ ماژول با توجه به تعرفه‌ی خرید برق از نظر اقتصادی بهینه نخواهد بود.



(الف)

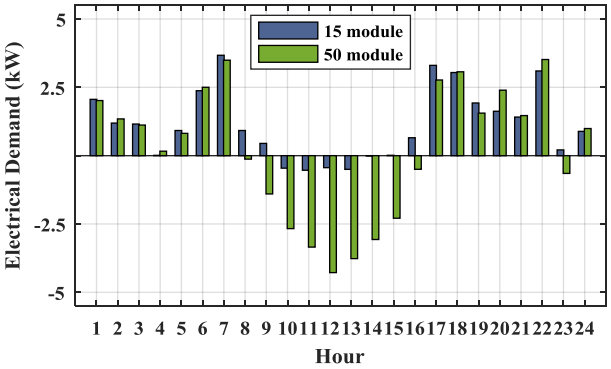


(ب)



(ج)

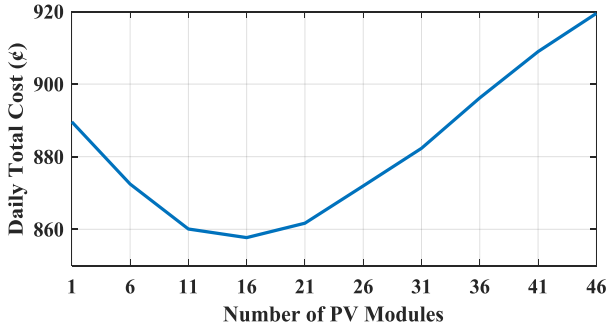
شکل ۱۱. زمان‌بندی‌های بهینه هاب انرژی خانگی در مطالعه موردی ۲: (الف) برنامه شارژ و دشارژ خودرو برقی و واحد ذخیره‌ساز گرما، (ب) توان الکتریکی مصرفی آبگرمکن برقی و سیستم تهویه هوا و ماشین لباسشویی و (ج) فاکتور توزیع گاز



شکل ۱۲. توان الکتریکی دریافتی از شبکه با تعرفه‌های متفاوت خرید برق از شبکه در مطالعه موردی ۲

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]



شکل ۱۳. آنالیز حساسیت هزینه روزانه هاب انرژی بر اساس ظرفیت پنل‌های خورشیدی در مطالعه موردی ۲

۴-۳- نتایج مطالعه موردی ۳

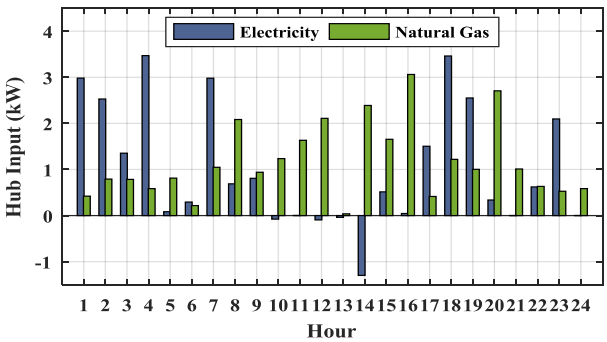
در این قسمت واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی به هاب انرژی مورد مطالعه اضافه می‌شود. مشخصات واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی درنظر گرفته شده در جدول (۶) بیان شده است (Rastegar and Fotuhi-Firuzabad 2015).

در این مقاله مانند (Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2015, Rastegar, Fotuhi-Firuzabad et al. 2017)، سطح شارژ واحد ذخیره‌ساز در پایان هر روز مقداری مشخص و تعریف شده برابر با ۵۰ درصد ظرفیت نامی باتری خودروی الکتریکی یا سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در مسئله‌ی بهینه‌سازی درنظر گرفته شده است.

جدول ۶. مشخصات واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی

پارامتر	مقدار	واحد
ظرفیت باتری	۷/۸	کیلووات ساعت
بازده شارژ/دشارژ باتری	۰/۸۸	درصد
بیشینه شارژ/دشارژ باتری در هر ساعت	۱/۴	کیلووات
میزان شارژ اولیه	۲	کیلووات ساعت

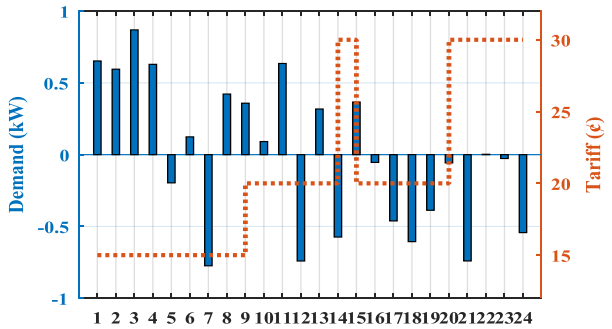
با اضافه شدن واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی به ظرفیت ۷/۸ کیلووات ساعت و اجرای مسئله‌ی بهینه‌سازی، ظرفیت بهینه‌ی پنل خورشیدی با تعداد ۱۷ ماژول به ۲/۳ کیلووات افزایش پیدا می‌کند. در این حالت نیز قیمت فروش برق به شبکه برابر ۰/۲۷ قیمت خرید برق از شبکه درنظر گرفته شده است. شکل (۱۴)، میزان توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. توان الکتریکی و گاز طبیعی دریافتی از شبکه در مطالعه موردی ۳

در این حالت هزینه‌ی بهره‌برداری هاب انرژی با ۷۶۷/۹۴ سنت است که ۱۳۸/۶۱ سنت آن مربوط به هزینه‌ی روزانه‌ی سیستم پنل خورشیدی هست. نتایج نشان می‌دهد که کاهش ۱۰ در صدی در هزینه‌ی روزانه بهره‌برداری از هاب انرژی خانگی را به‌همراه دارد. در اینجا نیز می‌توان نشان داد که سیاست‌های قیمت گذاری در تعرفه‌ی فروش برق به شبکه می‌تواند بر برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ و عملکرد سیستم ذخیره‌ساز توان الکتریکی تأثیرگذار باشد. برای مثال در اینجا فرض شده تا قیمت فروش برق به شبکه حدود یک‌سوم قیمت خرید برق از شبکه باشد. شکل (۱۵) برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی را نشان می‌دهد. بنابراین همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ باتری به گونه‌ای انجام شده که مصرف برق به ساعات ۱ تا ۸ صبح که ارزان‌ترین تعرفه‌ی برق در شبکه است انتقال یابد و در این ساعات باتری شارژ می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، در ساعت ۱۴ که تعرفه برق بیشترین مقدار را دارد، بیشترین مقدار برق به شبکه فروخته شده است و باتری نیز در این ساعت دشارژ شده است. باتری بلافاصله در ساعت ۱۵ که تعرفه خرید برق کاهش یافته است، شارژ می شود. در ساعات ۱۹ الی ۲۴ نیز که پیک بار شبکه است و تعرفه برق بیشترین مقدار را دارد، باتری دشارژ می‌شود؛ بنابراین باتری باعث انتقال نسبی بار از ساعات پیک مصرف به ساعات کم‌باری می‌شود. می توان گفت استفاده از باتری در کنار منابع تجدیدپذیر باعث افزایش قابلیت مانور در مدیریت انرژی در طول روز و افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان در تأمین بار می‌شود.



شکل ۱۵. زمان‌بندی بهینه شارژ و دشارژ باتری و تعرفه برق در مطالعه موردی ۳

نتایج مقایسه‌ای در مطالعه‌های موردی مختلف برای برجسته نمودن مزایای بهینه‌سازی همزمان بهره‌برداری و ظرفیت پنل‌های خورشیدی در مطالعه موردی ۱ و مطالعه موردی ۳ دلالت بر کارآیی روش پیشنهادی به‌صورت عملی دارد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد با توجه به تعرفه‌ی خرید برق تجدیدپذیر تولیدی در هاب انرژی و تعداد بهینه‌ی ماژول‌های خورشیدی در مسئله‌ی بهینه سازی، هزینه های بهره‌برداری هاب انرژی خانگی پیشنهادی از ۹۰۳/۳۲ سنت در روز (در مطالعه موردی ۱ بدون تعیین ظرفیت بهینه پنل‌های خورشیدی) به ۷۳۵/۳۵ سنت (در مطالعه موردی ۳ بر اساس روش پیشنهادی) کاهش می‌یابد. کاهش ۱۶۷/۹۷ سنت (۱۸/۶٪) که مقدار قابل توجهی است، اهمیت و مزایای تعیین ظرفیت بهینه پنل های خورشیدی در کنار بهره‌برداری بهینه را تائید می‌نماید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش نوینی برای بهره‌برداری بهینه همراه با تعیین ظرفیت بهینه سیستم تولید پراکنده تجدیدپذیر خورشیدی برای هاب انرژی خانگی معرفی گردید. در کارهای انجام شده در زمینه هاب‌های انرژی، به‌ویژه هاب انرژی خانگی، حل مسئله بهینه‌سازی توأمان موضوعات برنامه‌ریزی مانند ظرفیت بهینه سیستم خورشیدی و موضوعات بهره‌برداری و زمان‌بندی استفاده از وسایل الکتریکی قابل‌کنترل کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است که این مقاله تلاش نموده است این خلأ تحقیقاتی را پوشش دهد. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در حالات مختلف مدیریت انرژی هاب دلالت بر کارآیی مؤثر تعیین ظرفیت سیستم خورشیدی در کنار ارائه بهره‌برداری بهینه هاب انرژی خانگی دارد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با کمک تعیین ظرفیت بهینه سیستم خورشیدی و با لحاظ هزینه روزانه سیستم خورشیدی مرتبط با هزینه-های سرمایه‌گذاری آن، می‌توان حدود ۵٪ هزینه‌های بهره‌برداری هاب انرژی خانگی را کاهش داد. همچنین استفاده همزمان از سیستم خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز باتری علاوه بر باتری خودروهای برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه می‌تواند کارآیی سیستم خورشیدی را افزایش دهد.

۶-مراجع

Alimi, O. A. and K. Ouahada (2018). Smart Home Appliances Scheduling to Manage Energy Usage. 2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST).

Babaei, M., E. Azizi, M. T. H. Beheshti and M. Hadian (2020). "Data-Driven load management of stand-alone residential buildings including renewable resources, energy storage system, and electric vehicle." Journal of Energy Storage **28**: 101221.

Bahrami, S., M. Toulabi, S. Ranjbar, M. Moeini-Aghtaie and A. M. Ranjbar (2018). "A Decentralized Energy Management Framework for Energy Hubs in Dynamic Pricing Markets." IEEE Transactions on Smart Grid **9**(6): 6780-6792.

Bazydło, G. and S. Wermiński (2018). "Demand side management through home area network systems." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **97**: 174-185.

Boeckl, B. and T. Kienberger (2019). "“Sizing of PV storage systems for different household types”." Journal of Energy Storage **24**: 100763.

Bozchalui, M. C., S. A. Hashmi, H. Hassen, C. A. Canizares and K. Bhattacharya (2012). "Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids." IEEE Transactions on Smart Grid **3**(4): 1755-1766.

Cao, Y., Q. Wang, Z. Wang, K. Jermsittiparsert and M. Shafiee (2020). "A new optimized configuration for capacity and operation improvement of CCHP system based on developed owl search algorithm." Energy Reports **6**: 315-324.

Chen, X., H. Zhou, W. Li, Z. Yu, G. Gong, Y. Yan, L. Luo, Z. Wan and Y. Ding (2018). "Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system." Energy Conversion and Management **160**: 384-395.

Eladl, A. A., M. I. El-Afifi, M. A. Saeed and M. M. El-Saadawi (2020). "Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO2 emissions." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **117**: 105719.

Emrani-Rahaghi, P. and H. Hashemi-Dezaki (2020). "Optimal Scenario-based Operation and Scheduling of Residential Energy Hubs Including Plug-in Hybrid Electric Vehicle and Heat Storage System Considering the Uncertainties of Electricity Price and Renewable Distributed Generations." Journal of Energy Storage: 102038.

Ghazvini, M. A. F., D. Steen and L. A. Tuan (2019). A Centralized Building Energy Management System for Residential Energy Hubs. 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST).

Gholinejad, H. R., A. Loni, J. Adabi and M. Marzband (2020). "A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids." Journal of Building Engineering **28**: 101028.

Ghorbani, N., A. Aghahosseini and C. Breyer (2020). "Assessment of a cost-optimal power system fully based on renewable energy for Iran by 2050–Achieving zero greenhouse gas emissions and overcoming the water crisis ".Renewable Energy **146**: 125-148.

Isnen, M., S. Kurniawan and E. Garcia-Palacios (2020). "A-SEM: An adaptive smart energy management testbed for shiftable loads optimisation in the smart home." Measurement **152**: 107285.

Koskela, J., A. Rautiainen and P. Järventausta (2019). "Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization." Applied Energy **239**: 1175-1189.

Liu, D., R. Agarwal and Y. Li (2016). "Numerical simulation and optimization of CO2-enhanced water recovery by employing a genetic algorithm." Journal of Cleaner Production **133**: 994-1007.

Liu, T., D. Zhang, H. Dai and T. Wu (2019). "Intelligent Modeling and Optimization for Smart Energy Hub." IEEE Transactions on Industrial Electronics **66**(12): 9898-9908.

Lovati, M., M. Dallapiccola, J. Adami, P. Bonato, X. Zhang and D. Moser (2020). "Design of a residential photovoltaic system: the impact of the demand profile and the normative framework." Renewable Energy **160**: 1458-14.67

Majidi, M. and K. Zare (2019). "Integration of Smart Energy Hubs in Distribution Networks Under Uncertainties and Demand Response Concept." IEEE Transactions on Power Systems **34**(1): 566-574.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]

Massrur, H. R., T. Niknam and M. Fotuhi-Firuzabad (2019). "Day-ahead energy management framework for a networked gas–heat–electricity microgrid." IET Generation, Transmission & Distribution **13**(20): 4617-4629.

Mehrjerdi, H. and R. Hemmati (2020). "Coordination of vehicle-to-home and renewable capacity resources for energy management in resilience and self-healing building." Renewable Energy **146**: 568-579.

Mehrjerdi, H. and E. Rakhshani (2019). "Optimal operation of hybrid electrical and thermal energy storage systems under uncertain loading condition." Applied Thermal Engineering **160**: 114094.

Merdanoğlu, H., E. Yakıcı, O. T. Doğan, S. Duran and M. Karatas (2020). "Finding optimal schedules in a home energy management system." Electric Power Systems Research **182**: 106229.

Mguirk, P. M., R. Dowling and C. Carr" .(2019) The material politics of smart building energy management: A view from Sydney's commercial office space." Political Geography **74**: 102034.

Miao, P., Z. Yue, T. Niu, A. a. Alizadeh and K. Jermsittiparsert (2020). "Optimal emission management of photovoltaic and wind generation based energy hub system using compromise programming." Journal of Cleaner Production: 124333.

Moeini-Aghtaie, M., P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad and A. Abbaspour (2014). "Multiagent Genetic Algorithm: An Online Probabilistic View on Economic Dispatch of Energy Hubs Constrained by Wind Availability." IEEE Transactions on Sustainable Energy **5**(2): 699-708.

Moghaddas-Tafreshi, S. M., M. Jafari, S. Mohseni and S. Kelly (2019). "Optimal operation of an energy hub considering the uncertainty associated with the power consumption of plug-in hybrid electric vehicles using information gap decision theory." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **112**: 92-108.

Mostafavi Sani, M., A. Noorpoor and M. Shafie-Pour Motlagh (201" .(9Optimal model development of energy hub to supply water, heating and electrical demands of a cement factory." Energy **177**: 574-592.

Najafi, A., H. Falaghi, J. Contreras and M. Ramezani (2017). "A Stochastic Bilevel Model for the Energy Hub Manager Problem." IEEE Transactions on Smart Grid **8**(5): 2394-2404.

Nizami, M. S. H., A. N. M. M. Haque, P. H. Nguyen and M. J. Hossain (2019). "On the application of Home Energy Management Systems for power grid support." Energy **188**: 116104.

Okoye, C. O. and O. Solyalı (2017). "Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings." Energy **126**: 573-584.

Oskouei, M. Z., B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, A. Ahmadian and M. J. Piran (2020). "A novel economic structure to improve the energy label in smart residential buildings under energy efficiency programs." Journal of Cleaner Production **260**: 121059.

Rastegar, M. and M. Fotuhi-Firuzabad (2015). "Load management in a residential energy hub with renewable distributed energy resources." Energy and Buildings **107**: 234-242.

Rastegar, M., M. Fotuhi-Firuzabad and F. Aminifar (2012). "Load commitment in a smart home." Applied Energy **96**: 45-54.

Rastegar, M., M. Fotuhi-Firuzabad and M. Lehtonen (2015). "Home load management in a residential energy hub." Electric Power Systems Research **119**: 322-328.

Rastegar, M., M. Fotuhi-Firuzabad, H. Zareipour and M. Moeini-Aghtaieh (2017). "A Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs." IEEE Transactions on Smart Grid **8**(5): 2217-2.227

Senemar, S., M. Rastegar, M. Dabbaghjamanesh and N. D. Hatziargyriou (2019). "Dynamic Structural Sizing of Residential Energy Hubs." IEEE Transactions on Sustainable Energy: 1-1.

Senemar, S., A. R. Seifi, M. Rastegar and M. Parvania (2020). "Probabilistic Optimal Dynamic Planning of Onsite Solar Generation for Residential Energy Hubs." IEEE Systems Journal **14**(1): 832-841.

Sharifi, A. H. and P. Maghouli (2019). "Energy management of smart homes equipped with energy storage systems considering the PAR index based on real-time pricing." Sustainable Cities and Society **45**: 579-587.

Vonsien, S. and R. Madlener (2020). "Li-ion battery storage in private households with PV systems: Analyzing the economic impacts of battery aging and pooling." Journal of Energy Storage **29**: 101407.

Wu, X., X. Hu, X. Yin and S. J. Moura (2018). "Stochastic Optimal Energy Management of Smart Home With PEV Energy Storage." IEEE Transactions on Smart Grid **9**(3): 2065-2075.

Zhang, X., L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab and A. Abusorrah (2017). "Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for Multiple Energy Hubs." IEEE Transactions on Smart Grid **8**(4): 1658-1667.

کاظمی رزی، م؛ عسکریان ابیانه، ح؛ نفیسی، ح؛ مرزبند، م؛ صمدیان ذکریا، م؛ (۱۳۹۸). بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه به وسیله پاسخ‌گویی بار حرارتی با درنظر گرفتن بهبود آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان، *نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، ۸ (۳)، ۶۸-۷۷.

نوجوان، ص؛ مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی در مجتمع‌های مسکونی، *نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، ۸ (۳)، ۱-۹.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-07-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.4.1]