



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 04, 2025
pp. 51-66
Research Paper

Siting and Sizing of Renewable Virtual Power Plants with Power-to-Hydrogen and Hydrogen-to-Power Technologies in the Active Distribution Network

Morteza Jadidoleslam^{1*}, Zahra Moradi-Shahrbabak²

¹ Department of Electrical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

² Department of Electrical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Abstract:

In this article, the planning of renewable virtual power plants with power-to-hydrogen (P2H) and hydrogen-to-power (H2P) technologies in the active distribution network is presented. The proposed plan has an optimization framework. Its objective function is to minimize the annual costs of construction and maintenance of virtual units by considering the planning and operation model of wind, solar, and bio-waste renewable resources, hydrogen storage (combination of P2H, H2P, and hydrogen tank), and the network optimal power flow model. In virtual units, electric and hydrogen energy are managed simultaneously. Scenario-based stochastic optimization is used to model uncertainties of load and renewable resources. The ant lion optimizer algorithm extracts an optimal solution for the proposed design. In the following, the numerical results show the ability of the proposed design to improve the operation of the distribution network by considering the optimal planning of virtual units so that the optimal planning and operation of hydrogen storage along with renewable resources in the form of a virtual unit has been able to improve the operation status of the distribution network by about 19%-44% compared to the load flow of the network.

Keywords: Active Distribution Network, Renewable Virtual Unit, Hydrogen Storage, Energy Management, Ant-Lion Optimizer.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2024.142332.1697>

جایابی و اندازه‌یابی نیروگاه‌های مجازی برق تجدیدپذیر دارای فناوری‌های برق به

هیدروژن و هیدروژن به برق در شبکه توزیع اکتیو

مرتضی جدیدالاسلام زیدآبادی^{۱*}، زهرا مرادی شهراباک^۲

۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
jadidoleslam@sirjantech.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
z.moradi@sirjantech.ac.ir

چکیده: در این مقاله، برنامه‌ریزی نیروگاه‌های مجازی برق تجدیدپذیر دارای فناوری‌های برق به هیدروژن (P2H) و هیدروژن به برق (H2P) در شبکه توزیع اکتیو ارائه شده است. طرح پیشنهادی دارای یک چارچوب بهینه‌سازی است. تابع هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های سالانهٔ احداث، تعمیر و نگهداری واحدهای مجازی را با در نظر گرفتن مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و زیست‌توده، و ذخیره‌ساز هیدروژنی (ترکیب P2H، H2P و تانک هیدروژنی) و مدل پخش توان بهینه شبکه به عهده دارد. در واحدهای مجازی، هم‌زمان انرژی الکتریکی و هیدروژنی مدیریت می‌شوند. بهینه‌سازی تصادفی مبنی بر سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار و منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه یک راه‌حل بهینه را برای طرح پیشنهادی استخراج می‌کند. در ادامه، نتایج عددی بیانگر قابلیت طرح پیشنهادی در بهبود بهره‌برداری شبکه توزیع با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی بهینه واحدهای مجازی است؛ به طوری که برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه ذخیره‌ساز هیدروژنی در کنار منابع تجدیدپذیر در قالب واحد مجازی توانسته است وضعیت بهره‌برداری شبکه توزیع را در حدود ۱۹-۴۴ درصد نسبت به پخش بار شبکه ارتقاء دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی شیر مورچه، ذخیره‌ساز هیدروژنی، شبکه توزیع اکتیو، مدیریت انرژی، واحد مجازی تجدیدپذیر.

۱- مقدمه

شود. این منابع دارای انواعی مختلف مانند توربین بادی (WT)^۲، فتوولتائیک (PV)^۳ و واحد زیست‌توده (BU)^۴ هستند [۲]. توان تولیدی آن‌ها دارای عدم قطعیت و نوسان است [۲]؛ از این رو، به منظور تأمین انرژی پایدار، استفاده از ذخیره‌سازها در VPP مورد توجه است [۳]. ذخیره‌سازها دارای انواع مختلف هستند. یک نوع آن ذخیره‌ساز هیدروژنی است که مجهز به فناوری‌های برق به هیدروژن (P2H)^۵ و هیدروژن به برق (H2P)^۶ است. این ذخیره‌ساز علاوه بر اینکه به عنوان ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی استفاده می‌شود، می‌تواند در تغذیه بار هیدروژنی نیز نقش داشته باشد [۳]؛ از این رو، پیش‌بینی می‌شود این ذخیره‌ساز در VPP به میزان زیاد استفاده شوند [۴]؛ به طوری که حضور

نیروگاه‌های مجازی برق (VPPها)^۱ یک قالب تجمیع‌کننده و هماهنگ‌کننده منابع، ذخیره‌سازها و برنامه‌های مدیریت مصرف انرژی هستند [۱]. به منظور کاهش آلاینده‌گی زیست‌محیطی، عموماً از منابع دوستدار محیط زیست مانند منابع انرژی تجدیدپذیر در VPP استفاده می‌شود.

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

نام نویسنده مسئول: مرتضی جدیدالاسلام زیدآبادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، سیرجان، دانشگاه صنعتی سیرجان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

که در بازار برق انرژی شرکت می‌کند. VPP در این بازار به عنوان یک عامل قیمت‌پذیر رفتار می‌کند که با قیمت‌های برون‌زا مواجه است. VPP شامل واحدهای تجدیدناپذیر، تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز و همچنین، بارهای منعطف است. طرح مشابه [۱۱] در مرجع [۱۲] ارائه شده است؛ با این تفاوت که در آن از بهینه‌سازی تصادفی استفاده شده است. مرجع [۱۳] مکان و اندازه مناسب VPP را در شبکه‌های توزیع پیدا می‌کند؛ در حالی که تاب‌آوری شبکه را در برابر بلایای طبیعی در نظر می‌گیرد. مرجع [۱۴] یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی را برای به دست آوردن مکان و اندازه بهینه VPP‌های منعطف در شبکه‌های توزیع فعال ارائه می‌کند. فرمول سطح بالای مسئله یک تابع هدف نرمال‌شده (یک تابع بدون واحد) را به حداقل می‌رساند که یک جمع نرمال‌شده از هزینه انرژی سالانه مورد انتظار و اتلاف انرژی سالانه مورد انتظار شبکه توزیع است که در معرض پخش توان بهینه AC خطی شده قرار می‌گیرد. همچنین، در مسئله سطح پایین، سرمایه‌گذاری سالانه و هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار منابع انعطاف‌پذیر و تجدیدپذیر محدود به مدل برنامه‌ریزی و عملیاتی این منابع در چارچوب VPP به حداقل می‌رسند. در [۱۵]، مکان‌یابی و اندازه بهینه VPP‌های منعطف در شبکه توزیع هوشمند با ارائه یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی هدف قرار گرفته است. در مسئله سطح بالا، جمع نرمال‌شده تابع انحراف ولتاژ شبکه و هزینه عملیات سالانه به حداقل می‌رسد و به معادلات پخش توان بهینه AC محدود می‌شود. مدل برنامه‌ریزی VPP‌ها نیز در سطح پایین در نظر گرفته شده است.

شکاف‌های پژوهشی عمده‌ای در زمینه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی VPP‌ها در سیستم قدرت وجود دارند. به عنوان یک محدودیت پژوهشی، در بیشتر پژوهش‌ها مانند [۶-۱۰] فقط اثرگذاری بهره‌برداری بهینه VPP‌ها در شبکه توزیع مطرح بوده است؛ ولی برای ارتقای شاخص‌های اقتصادی و فنی در سیستم قدرت، علاوه بر بهره‌برداری VPP‌ها، مکان و اندازه بهینه VPP‌ها می‌تواند اثرگذاری مثبتی در سیستم قدرت داشته باشد؛ ولی در کمتر پژوهشی مانند [۱۱-۱۵]، برنامه‌ریزی VPP‌ها در کنار بهره‌برداری آن‌ها بررسی شده است. البته فقط در [۱۳-۱۵] نیز هم‌زمان جایابی و

آن‌ها در سیستم قدرت به ارتقای اهداف اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی اپراتور سیستم توزیع منجر شود [۵]. این شرایط در گرو مدیریت انرژی مطلوب VPP‌ها و همچنین، برنامه‌ریزی (اندازه‌یابی و جایابی) بهینه آن‌ها در شبکه توزیع است؛ بنابراین، پیش‌بینی می‌شود با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه VPP‌ها در شبکه توزیع بتوان در راستای ارتقای وضعیت فنی شبکه قدم برداشت.

در زمینه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی VPP‌ها در شبکه توزیع پژوهش‌ها و کارهایی مختلف انجام شده‌اند. مرجع [۶] موضوع همکاری چندین ریزشبکه تجمیع‌شده در یک VPP را بررسی می‌کند. VPP که توسط اپراتور VPP مدیریت می‌شود، به عنوان یک نهاد مبنا برای تسهیل عملیات اقتصادی و کم‌کربن ریزشبکه عمل می‌کند. در [۷]، یک سیستم مدیریت انرژی برای بهره‌برداری بهینه یک VPP متشکل از ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی، باتری‌های ثابت و منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. این مدل قادر به بهینه‌سازی فرآیند مناقصه در بازار روز بعد از طریق یک فرمول‌بندی تصادفی دو مرحله‌ای است. در [۸]، یک الگوریتم استوار توزیع‌شده برای تجارت انرژی همتابه‌همتا (P2P) در VPP پیشنهاد شده است که می‌تواند استحکام را در برابر خرابی‌های ارتباطی مانند از دست دادن بسته‌ها و خرابی گره‌های محاسباتی در لایه سایبری بهبود بخشد. در [۹]، بهره‌برداری شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن VPP‌های مبتنی بر اینورتر متناظر با اهداف اپراتور سیستم توزیع ارائه شده است. مجموع وزنی تلفات انرژی مورد انتظار و شاخص امنیت ولتاژ با در نظر گرفتن معادلات پخش توان بهینه AC، محدودیت‌های امنیت شبکه و مدل عملکرد VPP‌های مبتنی بر اینورتر به حداقل می‌رسد. مرجع [۱۰] عملکرد یک شبکه توزیع هوشمند دارای VPP‌های کوپل‌شده با فنرهای برقی را تشریح می‌کند. در واقع، این VPP‌ها به طور هم‌زمان در بازارهای انرژی و خدمات جانبی راکتیو شرکت می‌کنند. هدف اصلی طرح پیشنهادی پیشینه کردن سود مورد انتظار VPP‌ها در بازارهای بیان‌شده است.

مرجع [۱۱] یک رویکرد جدید مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم قابل تنظیم برای برنامه‌ریزی VPP را پیشنهاد می‌کند

خورشیدی استفاده شده است؛ این در حالی است که BU نیز یک منبع تجدیدپذیر است که زباله‌های زیست‌محیطی را مصرف می‌کند و در خروجی خود انرژی الکتریکی تولید می‌کند؛ ولی در کمتر پژوهشی در زمینه بهره‌برداری VPP ها، اثرگذاری مثبت بهره‌برداری BU بر روی شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مختلف ارزیابی شده است.

در این مقاله، به منظور جبران و برطرف کردن شکاف‌های پژوهشی مطرح‌شده، جایابی و اندازه‌یابی VPP های تجدیدپذیر مبتنی بر فناوری‌های P2H و H2P در شبکه توزیع اکتیو (ADN)^۲ ارائه می‌شود. در VPP یادشده حضور BU ها نیز نظر گرفته شده است و مدیریت انرژی الکتریکی و هیدروژنی در VPP انجام می‌شود. طرح پیشنهادی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی بیان می‌شود که در آن، مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری VPP های متصل به شبکه ارائه می‌شود. کمینه‌سازی مجموع هزینه سالانه احداث، تعمیر و نگهداری منابع تجدیدپذیر، P2H و H2P و تانک هیدروژنی (HT)^۳ به عنوان تابع هدف لحاظ می‌شود. این مسئله مقید به مدل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی منابع تجدیدپذیر از جمله مزرعه بادی (WF)^۴، مزرعه فتوولتائیک (PVF)^۵ و مزرعه BU ها (BUF)^۶، قیود عملکرد و برنامه‌ریزی P2H، H2P و HT، تعادل توان اکتیو در VPP ها و معادلات پخش توان بهینه شبکه توزیع است. P2H / H2P در این مقاله شامل کنترلایزر (EL)^۷ پیل سوختی (FC)^۸ است. کنترلایزر انرژی الکتریکی را به هیدروژن تبدیل می‌کند. بخشی از هیدروژن تولیدی برای تغذیه بار هیدروژنی استفاده می‌شود و بخشی دیگر در HT ذخیره می‌شود. FC نیز هیدروژن را از HT دریافت و در خروجی خود انرژی الکتریکی تولید می‌کند. البته، در این مقاله ترکیب عملکردهای H2P، P2H و HT معادل عملکرد ذخیره‌ساز هیدروژنی (HS)^۹ است. در این طرح، بار و منابع تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت هستند. برای مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها به منظور دسترسی راه‌حل بهینه مطمئن، از بهینه‌سازی تصادفی مبنی بر سناریو استفاده می‌شود. در ادامه، برای استخراج راه‌حل بهینه برای مسئله پیشنهادی، الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO)^{۱۰}

اندازه‌یابی VPP ها ارائه شده است. در بیشتر پژوهش‌ها، فقط مدیریت انرژی الکتریکی در VPP مد نظر بوده است؛ اما در نقاط مصرف، انرژی‌هایی مختلف مانند گاز، حرارت و برق مصرف می‌شوند. برای مثال، با پیشرفت فناوری‌ها و به منظور کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی، پیش‌بینی می‌شود در آینده تعدادی قابل توجه خودروی الکتریکی مبنی بر پیل سوختی استفاده شوند. این خودروها به هیدروژن نیاز دارند؛ از این رو، انتظار می‌رود در نقاط مصرف علاوه بر مدیریت انرژی الکتریکی لازم باشد مصرف هیدروژن نیز مدیریت شود؛ ولی این موضوع در کمتر پژوهشی در زمینه بهره‌برداری VPP ها بررسی شده است. در عموم پژوهش‌ها در زمینه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی VPP ها، حضور فناوری‌های P2H و H2P لحاظ نشده است. از P2H می‌توان برای تولید هیدروژن بر پایه انرژی تجدیدپذیر استفاده کرد. به عبارتی، در مسیر یک منبع تجدیدپذیر، یک P2H مانند کنترلایزر عمل می‌کند که انرژی الکتریکی تجدیدپذیر را به هیدروژن تبدیل کند. H2P برای تولید انرژی الکتریکی از هیدروژن است که مانند یک پیل سوختی است و در خروجی خود انرژی الکتریکی تولید می‌کند. ترکیب P2H و H2P به همراه یک تانک هیدروژنی تحت عنوان ذخیره‌ساز هیدروژنی شناخته می‌شود. این ذخیره‌ساز از راندمان کاری مطلوبی برخوردار است و دارای عمر مفید زیادی است که می‌تواند در ظرفیت‌های بزرگ نیز احداث شود؛ ولی باید توجه داشت که در بیشتر پژوهش‌ها از باتری به عنوان ذخیره‌ساز در VPP استفاده شده است. گرچه باتری دارای چگالی توان و راندمان زیاد است، اما هزینه سرمایه‌گذاری آن زیاد است و دسترسی به ظرفیت‌های بزرگ دشوار و پرهزینه است. محدودیت‌های بیان‌شده را می‌توان با ذخیره‌ساز هیدروژنی جبران کرد. به علاوه، در ذخیره‌ساز هیدروژنی می‌توان بارهای هیدروژنی را نیز تغذیه کرد. این موضوع در کمتر پژوهشی لحاظ شده است. به عنوان یک شکاف پژوهشی دیگر، به منظور دسترسی به شرایط زیست‌محیطی مطلوب و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در سیستم قدرت، استفاده از منابع تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است؛ ولی در بیشتر پژوهش‌ها مانند [۶-۱۵]، از منبع تجدیدپذیر بادی و

ALO در بخش سوم بیان می‌شود. نتایج عددی به دست آمده از موارد مطالعاتی مختلف در بخش چهارم گزارش شده است. در نهایت، در بخش پنجم نتیجه گیری‌ها ارائه می‌شوند.

۲- بهره‌برداری و برنامه‌ریزی VPP‌های متصل به شبکه

در این بخش، برنامه‌ریزی VPP‌ها مبنی بر فناوری‌های P2H و H2P در ADN ارائه می‌شود. طرح پیشنهادی کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی را با توجه به فیود بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازها و مدل پخش توان بهینه AC در ADN انجام می‌دهد. فرمول‌بندی ریاضی این مسئله به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min \text{AIMC} = & \sum_b (n_b^{WT} AIC^{WT} + n_b^{PV} AIC^{PV} + n_b^{BU} AIC^{BU} \\ & + n_b^{EL} AIC^{EL} + n_b^{FC} AIC^{FC} + n_b^{HT} AIC^{HT} + n_b^{WT} AMC^{WT} \\ & + n_b^{PV} AMC^{PV} + n_b^{BU} AMC^{BU} + n_b^{EL} AMC^{EL} + n_b^{FC} AMC^{FC} + n_b^{HT} AMC^{HT}) \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to:

$$P_{b,t,w}^{WF} = n_b^{WT} \bar{P}_b^{WT} \xi_{b,t,w}^{WT}; \quad \forall b, t, w \quad (2)$$

$$P_{b,t,w}^{PVF} = n_b^{PV} \bar{P}_b^{PV} \xi_{b,t,w}^{PV}; \quad \forall b, t, w \quad (3)$$

$$P_{b,t,w}^{BUF} = n_b^{BU} \bar{P}_b^{BU} \xi_{b,t,w}^{BU}; \quad \forall b, t, w \quad (4)$$

$$\xi_{b,t,w}^{WT} = \begin{cases} 0 & v_b^{CIN} \geq v_{b,t,w}^{WT} \geq v_b^{COUT} \\ \frac{v_{b,t,w}^{WT} - v_b^{CIN}}{v_b^R - v_b^{CIN}} & v_b^{CIN} \leq v_{b,t,w}^{WT} \leq v_b^R \\ 1 & v_b^R \leq v_{b,t,w}^{WT} \leq v_b^{COUT} \end{cases}; \quad \forall b, t, w \quad (5)$$

$$\xi_{b,t,w}^{PV} = \frac{I_{b,t,w}^{PV}}{\bar{I}_b^{PV}}; \quad \forall b, t, w \quad (6)$$

$$\xi_{b,t,w}^{BU} = \frac{G_{b,t,w}^{BU}}{\bar{G}_b^{BU}}; \quad \forall b, t, w \quad (7)$$

$$0 \leq P_{b,t,w}^{EL} \leq n_b^{EL} \bar{P}_b^{EL} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{b,t,w}^{FC} \leq n_b^{FC} \bar{P}_b^{FC} \quad (9)$$

$$P_{b,t,w}^{FC} P_{b,t,w}^{EL} = 0; \quad \forall b, t, w \quad (10)$$

استفاده می‌شود. در نهایت، با مقایسه راه‌کار پیشنهادی و پیشینه پژوهش، اهداف و نوآوری‌های این پژوهش به شرح زیر هستند:

- جایابی، اندازه‌یابی و مدیریت انرژی VPP‌های تجدیدپذیر دارای فناوری‌های P2H و H2P در شبکه توزیع اکتیو،
- مدیریت انرژی هم‌زمان مصرف‌کننده‌های الکتریکی و هیدروژنی در VPP‌های تجدیدپذیر دارای ذخیره‌ساز هیدروژنی،
- ارزیابی عملکرد بهینه BUها، P2Hها و H2Pها در VPP بر روی وضعیت فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی شبکه توزیع.

در ادامه، فرمول‌بندی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری VPP در ADN به همراه مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در بخش دوم ارائه می‌شود. سپس، روند حل مسئله مبنی بر الگوریتم

$$E_{b,t,w}^{HT} = (1 - z_t) E_{b,t,w}^{HT} + z_t n_b^{HT} \hat{E}_b^{HT} + \eta_b^{EL} P_{b,t,w}^{EL} - \frac{1}{\eta_b^{FC}} P_{b,t,w}^{FC} - H_{b,t,w}^C; \quad \forall b, t, w, z_{t=1} = 1 \& z_{t \neq 1} = 0 \quad (11)$$

$$n_b^{HT} \underline{E}_b^{HT} \leq E_{b,t,w}^{HT} \leq n_b^{HT} \bar{E}_b^{HT}; \quad \forall b, t, w \quad (12)$$

$$P_{b,t,w}^{VPP} = P_{b,t,w}^{WF} + P_{b,t,w}^{PVF} + P_{b,t,w}^{BUF} + (P_{b,t,w}^{FC} - P_{b,t,w}^{EL}) - P_{b,t,w}^C; \quad \forall b, t, w \quad (13)$$

$$n^{WT}, n^{PV}, n^{BU}, n^{EL}, n^{FC}, n^{HT} = \{1, 2, \dots, n^{\max}\} \quad (14)$$

$$P_{b,t,w}^S + P_{b,t,w}^{VPP} - P_{b,t,w}^C = \sum_l C_{b,l}^L P_{b,l,t,w}^L; \quad \forall b, t, w \quad (15)$$

$$Q_{b,t,w}^S - Q_{b,t,w}^C = \sum_l C_{b,l}^L Q_{b,l,t,w}^L; \quad \forall b, t, w \quad (16)$$

$$P_{b,l,t,w}^L = G_{b,l}^L (V_{b,t,w})^2 - V_{b,t,w} V_{l,t,w} (G_{b,l}^L \cos(\varphi_{b,t,w} - \varphi_{l,t,w}) + B_{b,l}^L \sin(\varphi_{b,t,w} - \varphi_{l,t,w})); \quad \forall b, l, t, w \quad (17)$$

$$Q_{b,l,t,w}^L = -B_{b,l}^L (V_{b,t,w})^2 + V_{b,t,w} V_{l,t,w} (B_{b,l}^L \cos(\varphi_{b,t,w} - \varphi_{l,t,w}) + G_{b,l}^L \sin(\varphi_{b,t,w} - \varphi_{l,t,w})); \quad \forall b, l, t, w \quad (18)$$

$$\varphi_{b,t,w} = 0; \quad \forall b = 1, t, w \quad (19)$$

$$V_{b,t,w} = 1; \quad \forall b = 1, t, w \quad (20)$$

$$\underline{V} \leq V_{b,t,w} \leq \bar{V}; \quad \forall b, t, w \quad (21)$$

$$\sqrt{(P_{b,t,w}^S)^2 + (Q_{b,t,w}^S)^2} \leq \bar{S}_b^S; \quad \forall b, t, w \quad (22)$$

$$\sqrt{(P_{b,l,t,w}^L)^2 + (Q_{b,l,t,w}^L)^2} \leq \bar{S}_{b,l}^L; \quad \forall b, l, t, w \quad (23)$$

اشاره دارند؛ به طوری که در روابط (۲)-(۴) میزان توان اکتیو تولیدی به ترتیب در مزرعه بادی (WF)، مزرعه فنوتولتائیک (PVF) و مزرعه زیست توده (BUF) ارائه شده است. بر اساس این روابط، توان اکتیو تولیدی به دست آمده از منبع تجدیدپذیر برابر حاصل ضرب تعداد منبع، ظرفیت منبع و نرخ توان تولیدی این منبع است. نرخ توان WF بر اساس رابطه (۵) محاسبه می شود که تابعی از سرعت باد است. برای توربین بادی چهار ناحیه کاری وجود دارند. در ناحیه اول، سرعت باد کمتر از سرعت آستانه وصل است و توربین بادی قادر به تولید انرژی نیست. در ناحیه چهار، سرعت باد بیش از سرعت آستانه قطع است. در این ناحیه، برای جلوگیری از آسیب دیدگی بخش های مکانیکی توربین بادی، حالت ترمزی ایجاد می شود و WT توانی را تولید نمی کند؛ بنابراین، میزان نرخ توان تولیدی WF در نواحی اول و چهارم برابر صفر است [۲]. در ناحیه دوم، سرعت باد

الف) تابع هدف:

در رابطه (۱)، کمینه سازی مجموع هزینه سالانه احداث، تعمیر و نگهداری (AIMC) منابع تجدیدپذیر [۱۶] و ذخیره ساز هیدروژنی [۱۷] ارائه شده است. در این ذخیره ساز، الکترولازر (EL)، تانک هیدروژنی (HT) و پیل سوختی (FC) قرار دارند. EL یک نوع سیستم P2H است و FC از انواع مختلف H2P است [۱۷]. در رابطه (۱)، هزینه احداث، تعمیر و نگهداری برای اجزای ذخیره ساز هیدروژنی لحاظ شده است. هزینه احداث (تعمیر و نگهداری) هر تجهیز برابر حاصل ضرب تعداد نصب شده آن تجهیز در VPP در هزینه احداث (تعمیر و نگهداری) آن است.

ب) مدل برنامه ریزی - بهره برداری VPPها:

فیود (۲)-(۷) به مدل برنامه ریزی منابع تجدیدپذیر

HT دخالت خواهد داشت. بر اساس رابطه (۱۱)، انرژی اولیه در HTها برابر حاصل ضرب تعداد HTها و انرژی اولیه یک HT است. محدودیت انرژی ذخیره‌شده در HT متناسب با رابطه (۱۲) است. بر اساس (۱۲)، کمترین (بیشترین) انرژی HTها برابر حاصل ضرب تعداد HTها و کمینه (بیشینه) انرژی یک HT است. در نهایت، تعادل توان اکتیو در VPP متناظر با قید (۱۳) است. بر اساس این رابطه، توان اکتیو VPP برابر مجموع توان اکتیو تولیدی منابع تجدیدپذیر و H2Pها منهای مجموع توان اکتیو مصرفی H2Pها و بار پسیو الکتریکی است. در قید (۱۴)، محدودیت تعداد عناصر نصب‌شده در VPP در نظر گرفته شده است.

پ) بهره‌برداری ADN:

در روابط (۱۵)–(۲۳) فرمول‌بندی بهره‌برداری ADN در حضور VPPها بیان شده است که معرف مدل پخش توان بهینه AC برای ADN است؛ به طوری که قیود (۱۵)–(۲۰) معادلات پخش توان AC هستند [۵ و ۱۰]. در این قیود، تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس‌های مختلف به‌ترتیب متناظر با روابط (۱۵) و (۱۶) هستند. در روابط (۱۷) و (۱۸)، به‌ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع محاسبه می‌شوند [۵]. میزان زاویه و دامنه ولتاژ در باس مرجع به‌ترتیب متناظر با قیود (۱۹)–(۲۰) است. محدودیت‌های بهره‌برداری ADN در روابط (۲۱)–(۲۳) ظاهر شده‌اند [۲ و ۱۰]. همچنین، محدودیت دامنه ولتاژ باس‌ها در رابطه (۲۱) نشان داده شده است. در قیود (۲۲) و (۲۳) نیز به‌ترتیب محدودیت توان ظاهری یا محدودیت ظرفیت پست و خط توزیع مدل‌سازی شده‌اند [۲]. در این بخش، فرض بر این است که ADN از پست توزیع مستقر در باس مرجع (در اینجا باس شماره ۱) به شبکه بالادست متصل است؛ از این رو، متغیرهای PS و QS برای باس ۱ دارای مقدار هستند؛ ولی برای باس‌های دیگر برابر صفر هستند.

ت) مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها:

در طرح پیشنهادی، (۱)–(۲۳)، سرعت باد، v^{WT} ، تابش خورشید بر سطح PV، I^{PV} ، گاز تولیدی BU، G^{BU} ، بار اکتیو و راکتیو، P^C و Q^C ، و بار هیدروژنی، H^C به صورت

بیش از سرعت آستانه وصل و کمتر از سرعت نامی است. در این ناحیه، نرخ توان تولیدی با افزایش سرعت باد از مقدار صفر به سمت مقدار ۱ حرکت می‌کند. در ناحیه سوم، سرعت باد بین سرعت نامی و آستانه قطع قرار دارد. در این ناحیه به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی WT، نرخ توان تولیدی در مقدار ۱ ثابت می‌ماند [۲]. در رابطه (۵)، مدل نرخ توان تولیدی PV لحاظ شده است [۱۸]. نرخ توان تولیدی PV برای هر لحظه بهره‌برداری برابر نسبت میزان تابش خورشید به مقدار پیک تابش خورشید است [۱۸]. نرخ توان تولیدی BU در هر ساعت نیز بر اساس رابطه (۷) برابر نسبت گاز BU به مقدار پیک این گاز است. مدل عملکرد ذخیره‌ساز هیدروژنی با در نظر گرفتن بارهای هیدروژنی در قیود (۸)–(۱۲) ارائه شده است [۳]. در قید (۸)، محدودیت ظرفیت H2Pها (ELها) فرمول‌بندی شده است. بر اساس رابطه (۸)، بیشترین توان اکتیو مصرفی H2Pها برابر حاصل ضرب تعداد H2Pها و ظرفیت یک EL است. در قید (۹)، محدودیت توان اکتیو تولیدی H2Pها (FCها) بیان شده است. بیشترین توان اکتیو تولیدی FCها نیز بر اساس (۹) برابر حاصل ضرب تعداد H2Pها و ظرفیت یک FC است. در ذخیره‌ساز هیدروژنی، سیستم‌های H2P و H2P نباید هم‌زمان روشن باشند. این موضوع در رابطه (۱۰) مدل‌سازی شده است [۳]؛ به طوری که اگر ELها دارای توان اکتیو مصرفی باشند، FCها خاموش هستند و توانی را تولید نمی‌کنند. برعکس این موضوع نیز صادق است. در قید (۱۱)، میزان انرژی ذخیره‌شده در تانک هیدروژنی (HT) محاسبه می‌شود. بر اساس این رابطه، انرژی ذخیره‌شده در HT برابر مجموع انرژی ذخیره‌شده در ساعت قبل، انرژی مستخرج‌شده از H2Pها منهای مجموع انرژی تخلیه‌شده توسط H2Pها و بار هیدروژنی است [۳]. در ساعت ۱، انرژی ذخیره‌شده ساعت قبل برابر انرژی اولیه HT است؛ از این رو، پارامتر Z فقط در ساعت ۱:۰۰ دارای مقدار یک است و در ساعت‌های دیگر آن برابر صفر است. در این بخش، فرض شده است که بخشی از هیدروژن تولیدی H2Pها در HT ذخیره می‌شود و بخشی دیگر از آن برای تغذیه بارهای هیدروژنی استفاده می‌شود؛ از این رو، در رابطه (۱۱)، بار هیدروژنی در محاسبه انرژی ذخیره‌شده

متغیرهای وابسته بر اساس قیود (۲)-(۷)، (۱۱)، (۱۳) و (۱۵)-(۲۰) بر پایه مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شوند. برای حل مدل پخش توان، (۱۵)-(۲۰)، از تکنیک پسر - پیشرو [۲۱] استفاده می‌شود. برای برآورده کردن قیود (۱۰)، (۱۲) و (۲۱)-(۲۳) از تکنیک تابع جریمه استفاده می‌شود [۲۲]. تابع جریمه برای هر قید a و $a = b$ $\leq b$ به ترتیب به صورت $\lambda.(b - a)$ و $\mu.\max(0, a - b)$ است. $\lambda \in (-\infty, +\infty)$ و $\mu \geq 0$ به عنوان ضرایب لاگرانژ شناخته می‌شوند که در دسته متغیرهای تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند. در ادامه، تابع برازندگی (FF) برابر مجموع ATMC و مجموع توابع جریمه است. FF بر اساس رابطه (۱) باید کمینه شود؛ از این رو، در قدم بعدی N مقدار برای FF محاسبه می‌شوند و سپس، کمترین مقدار آن استخراج می‌شود. در مراحل بعد، باید مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری به‌هنگام‌سازی شود. برای به‌روزرسانی این متغیرها در این بخش از الگوریتم ALO استفاده می‌شود. به‌هنگام‌سازی متغیرهای یادشده بر اساس کمترین مقدار FF خواهد بود؛ از این رو، در فرآیند ALO، در ابتدا N مقدار به‌هنگام‌سازی شده برای متغیرهای تصمیم‌گیری بر اساس محدودیت‌های خودشان، مقدار کمینه FF در مرحله قبل و جزئیات تکنیک ALO به دست می‌آید. جزئیات کامل فرآیند ALO در [۲۰] بیان شده است. سپس، N مقدار برای متغیرهای وابسته و FF بر اساس مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شوند و در ادامه، کمینه مقدار FF استخراج می‌شود. فرآیند به‌هنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری تا دسترسی به همگرایی ادامه می‌یابد. در این بخش، فرض شده است که ALO بعد از رسیدن به حداکثر تعداد تکرار (J_{max}) به نقطه بهینه دست پیدا می‌کند.

۴- نتایج عددی

۴-۱- داده‌ها

طرح پیشنهادی در این بخش بر روی شبکه توزیع اکتیو ۱۱۹ باسه [۲۳] به صورت شکل (۱) اعمال می‌شود. این شبکه دارای توان مبنای ۱۰ MVA است و ولتاژ مبنای آن نیز برابر ۱۱ kV است. باس ۱ باس مرجع است که دامنه

پارامترهای دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله، از بهینه‌سازی تصادفی مینی بر سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های یادشده استفاده شده است. در این روش، ابتدا مکانیسم چرخ رولت تعدادی زیاد سناریو تولید می‌کند. در هر سناریو، مقدار پارامترهای عدم قطعیت بر اساس مقدار میانگین و انحراف معیار خودشان تعیین می‌شود [۲]. در ادامه، احتمال مقادیر انتخاب‌شده برای پارامترهای عدم قطعیت در هر سناریو محاسبه می‌شود. در این روش، برای پارامترهای بار و گاز تولیدی BU از تابع توزیع نرمال استفاده می‌شود [۲ و ۱۶]. برای محاسبه احتمال سرعت باد و تابش خورشید به ترتیب از تابع توزیع احتمال ویبول و بتا استفاده می‌شود [۵]. احتمال هر سناریوی تولیدشده (ρ^0) برابر حاصل ضرب احتمال پارامترهای عدم قطعیت است. در ادامه، روش کانترویج [۱۹] به عنوان تکنیک کاهش سناریو، تعدادی مشخص از سناریوهای تولیدشده را انتخاب می‌کند و به روابط (۱)-(۲۳) اعمال می‌کند. در این روش، سناریوهایی انتخاب می‌شوند که کمترین فاصله را نسبت به یکدیگر داشته باشند. جزئیات و مراحل این روش در [۱۹] بیان شده‌اند. در ادامه، احتمال هر سناریوی جدید (ρ) برابر نسبت ρ^0 متناظر با این سناریو بر مجموع ρ^0 تمامی سناریوهای انتخاب‌شده است.

۳- روند حل مسئله بر پایه ALO

طرح پیشنهادی با فرمول‌بندی (۱)-(۲۳) دارای چارچوب بهینه‌سازی غیرخطی عدد صحیح است. در این بخش، برای استخراج راه‌حل بهینه مطمئن از الگوریتم بهینه‌سازی ALO استفاده می‌شود. بر اساس [۲۰]، این الگوریتم روشی قدرتمند برای مسائل پیچیده مهندسی است. همچنین، قابلیت این الگوریتم در بخش (۲-۴) بررسی می‌شود. در این الگوریتم، در ابتدا N (معرف اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری شامل N^{HT} ، N^{FC} ، N^{EL} ، N^{BU} ، N^{PV} ، N^{WT} و P^{FC} و P^{EL} به ترتیب بر اساس قیود (۸) و (۹) تولید می‌شوند. دیگر متغیرهای موجود در فرمول‌بندی (۱)-(۲۳) به عنوان متغیر وابسته تعیین می‌شوند. در ادامه، N مقدار برای

برخوردار هستند؛ از این رو، در این محدوده‌ها می‌توان اندازه بزرگ‌تر برای VPP را به دست آورد. این موضوع می‌تواند در بهبود شرایط بهره‌برداری مانند تلفات انرژی شبکه مؤثر باشد. VPP‌هایی که در انتهای فیدر قرار دارند، به منظور بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه مانند پروفیل ولتاژ استفاده می‌شوند. به عنوان نکته‌ای دیگر، باس‌هایی که در شکل (۱) دارای بار هیدروژنی بودند، در آن‌ها VPP نصب می‌شود؛ زیرا در این مقاله فرض شده است که بارهای هیدروژنی توسط VPP‌ها تغذیه شوند. در جدول (۲)، اندازه یا تعداد بهینه منابع تجدیدپذیر و عناصر ذخیره‌ساز هیدروژنی ارائه شده است. در بیشتر مکان‌های منتخب VPP‌ها، بیشینه تعداد WT‌ها، یعنی ۵ تا بر اساس جدول (۱)، در VPP نصب شدند؛ زیرا WT‌ها نسبت به BU‌ها و PV بر اساس جدول (۱) دارای هزینه نصب کمتری هستند. نصب BU‌ها در الویت دوم قرار دارد؛ زیرا هزینه نصب آن‌ها کمتر از PV است؛ اما در جاهایی که ظرفیت بزرگ منابع تجدیدپذیر لازم نیست، الویت نصب بعد از WT با PV است. برای مثال، در VPP2، نیاز به ۳ تا WT است و از آنجا که انتخاب یک WT یا BU دیگر در این VPP به عدم برآورد قیود شبکه منجر می‌شود، PV در این VPP نصب می‌شود. بر اساس جدول (۱)، ظرفیت یک PV بسیار کمتر از WT و BU است. در VPP‌هایی که در انتهای فیدر نصب می‌شوند، کمترین تعداد منابع وجود دارند؛ زیرا ظرفیت خطوط متصل به این باس‌ها کم است؛ ولی VPP‌هایی که در باس‌های ابتدا و وسط فیدر قرار دارند، دارای تعدادی بیشتر از منابع هستند.

تعداد عناصر ذخیره‌ساز هیدروژنی بر اساس اندازه منابع تجدیدپذیر و میزان بار هیدروژنی تعیین می‌شود؛ به طوری که در VPP‌هایی که دارای تعداد منابع تجدیدپذیر زیاد هستند ولی بار هیدروژنی ندارند، تعداد P2H‌ها، H2P‌ها و HT‌ها زیاد است. در VPP‌هایی که بار هیدروژنی وجود دارد، تعداد P2H‌ها نسبت به P2H‌ها و HT‌ها بیشتر است؛ از این رو، در این VPP‌ها تعداد منابع نیز زیاد خواهد بود؛ زیرا به منظور بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه لازم است تعداد منابع تجدیدپذیر زیاد باشد.

در جدول (۳)، میزان مجموع هزینه سالانه نصب

ولتاژ آن برابر 1 p.u. است و زاویه ولتاژ در این باس برابر صفر است. محدوده مجاز دامنه ولتاژ برابر $1/1 \cdot 0/9 \text{ p.u.}$ است. مشخصات خطوط و پست توزیع به علاوه داده‌های پیک بار این شبکه در [۲۳] ارائه شده‌اند. میزان بار در هر ساعت برابر حاصل ضرب پیک بار و ضریب بار است. منحنی روزانه مورد انتظار ضریب بار در شکل (۲-الف) ارائه شده است [۵ و ۲۴]. فرض شده است که در شبکه یادشده ۵ باس دارای بار هیدروژنی هستند که باید توسط VPP‌ها تغذیه شوند. مکان بار هیدروژنی و میزان پیک بار آن در شکل (۱) مشخص است. مشخصات منابع تجدیدپذیر، P2H، H2P، و HT در جدول (۱) ارائه شده‌اند. منحنی روزانه مورد انتظار مقدار نسبی سرعت باد، تابش خورشیدی و گاز BU در شکل (۲-ب) ترسیم شده است [۲ و ۱۸].

۲-۴- نتایج

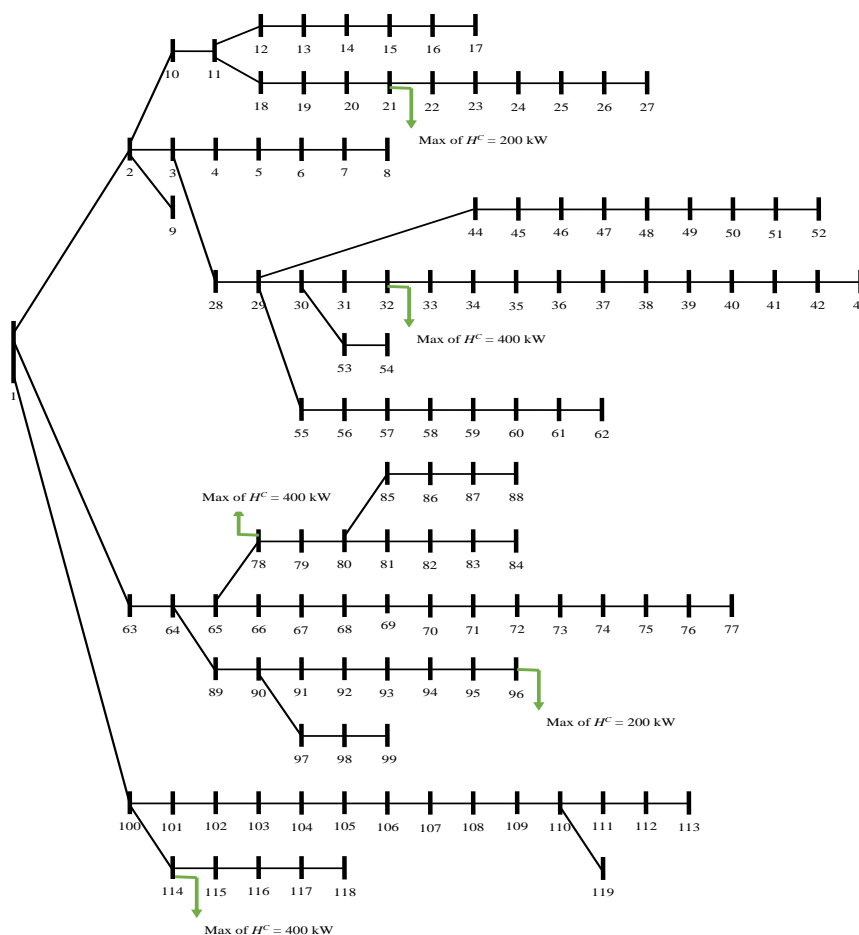
طرح پیشنهادی (۱)-(۲۳)، متناظر با الگوریتم ALO ارائه شده در بخش ۳، در محیط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. اندازه جمعیت و حداکثر تعداد تکرارها در ALO به ترتیب برابر ۸۰ و ۵۰۰۰ هستند و میزان پارامترهای تنظیم آن در [۲۰] بیان شده‌اند. در بهینه‌سازی تصادفی، چرخ رولت در ابتدا ۲۰۰۰ سناریو را تولید می‌کند. انحراف معیار پارامترهای عدم قطعیت برابر ۱۰ درصد است. روش کانترویج نیز ۸۰ سناریوی تولیدشده را انتخاب و به مسئله اعمال می‌کند.

الف) برنامه‌ریزی اقتصادی VPP‌های تجدیدپذیر مبتنی بر فناوری‌های P2H و H2P:

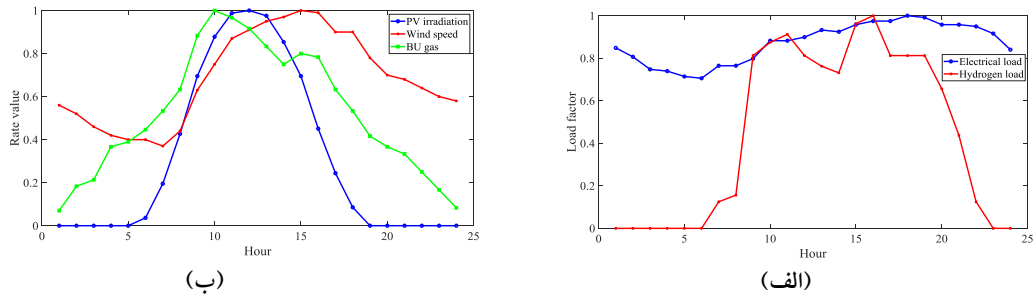
در جدول (۲)، مکان بهینه VPP‌های تجدیدپذیر دارای P2H و H2P در شبکه توزیع ۱۱۹ باسه متناسب با شکل (۱) ارائه شده است. ۱۲ تا VPP به منظور برقراری شرایط بهینه برای اهداف بهره‌برداری اپراتور سیستم توزیع در شبکه یادشده احداث می‌شوند. با مقایسه نتایج این جدول و شکل (۱)، بیشتر VPP‌ها در باس‌های ابتدا و وسط فیدر قرار می‌گیرند و تعدادی کمتر از آن‌ها در باس‌های انتهای فیدر قرار گرفتند. این موضوع به این دلیل است که خطوط توزیع موجود در ابتدا و وسط فیدر عموماً از ظرفیتی زیاد

بیشترین هزینه یادشده برای BUFها و ذخیره‌سازهای انرژی رخ داده است؛ زیرا آن‌ها بر اساس سطر آخر جدول (۲) دارای تعداد زیاد و همچنین، بر اساس جدول (۱)، دارای هزینه نصب و تعمیر و نگهداری جالب توجهی هستند. هزینه یادشده برای ذخیره‌ساز هیدروژنی شامل هزینه‌های P2Hها، H2Pها و HTها در این VPPها وجود کمترین AIC و AMC برای VPPهای ۲، ۸ و ۱۲ وجود دارند. این VPPها دارای کمترین تعداد منابع و ذخیره‌سازهای هیدروژنی هستند؛ زیرا بر اساس جدول (۱) و شکل (۱)، این VPPها در باس‌های انتهایی فیدر قرار دارند. در سطر آخر جدول (۳)، مجموع AIC و AMC برای عناصر مختلف تمامی VPPها بیان شده است.

برای عناصر مختلف تمامی VPPها بیان شده است.



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع ۱۱۹ باسه [۲۳] به همراه مکان بارهای هیدروژنی.



شکل (۲): منحنی روزانه مورد انتظار، (الف) ضریب بار [۲۴]، (ب) مقدار نسبی سرعت باد، تابش خورشید و گاز BU [۲۸]

جدول (۱): داده‌های منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز هیدروژنی

داده‌های WF [۱۶]		\bar{P}^{BU} (kW)	۱۰۰
n^{\max}	۵	Max of G^{BU} (m^3)	۴۳۹۰۰
AIC^{WT} (\$/year)	۱۶۰۰۰	داده‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی [۱۷]	
AMC^{WT} (\$/year)	۵۰۰	$P2H$ برای n^{\max}	۱۰
\bar{P}^{WT} (kW)	۱۰۰	AIC^{EL} (\$/year)	۷۰۰۰
v^{CIN}, v^{COUT}, v^R (m/s)	۱۰، ۱۳، ۲/۵	AMC^{EL} (\$/year)	۵۰
Max of v^{WT} (m/s)	۹/۸	\bar{P}^{EL} (kW)	۵۰
داده‌های PVF [۱۸]		η^{EL} (%)	۷۵
n^{\max}	۱۰۰	$H2P$ برای n^{\max}	۱۰
AIC^{PV} (\$/year)	۱۰۵۰	AIC^{FC} (\$/year)	۳۲۰۰
AMC^{PV} (\$/year)	۰	AMC^{FC} (\$/year)	۲۴
\bar{P}^{PV} (kW)	۳	\bar{P}^{FC} (kW)	۲۰
Max of I^{PV} (kW/m^2)	۰/۸۲	η^{FC} (%)	۵۱
داده‌های BUF [۱۶]		HT برای n^{\max}	۱۰
n^{\max}	۵	AIC^{HT} (\$/year)	۱۰۰۰۰
AIC^{BU} (\$/year)	۳۲۵۰۰	AMC^{HT} (\$/year)	۷۰
AMC^{BU} (\$/year)	۶۰۰	$\bar{E}^{HT}, \underline{E}^{HT}, \bar{E}^{HT}$ (kWh)	۲۰۰، ۲۰، ۲۰

جدول (۲): اندازه و مکان بهینه VPPها

VPP	مکان (باس)	تعداد					
		WTs	PVs	BUs	P2Hs	H2Ps	HTs
۱	۲۱	۵	۱۷	۲	۴	۱	۲
۲	۲۶	۳	۲۸	۰	۲	۲	۲
۳	۳۲	۵	۲۶	۴	۸	۲	۳
۴	۴۹	۵	۲۹	۱	۴	۴	۳
۵	۵۷	۵	۶۷	۵	۶	۷	۵
۶	۷۰	۵	۲۶	۲	۴	۴	۳
۷	۷۸	۵	۱۰۰	۵	۹	۴	۴
۸	۸۸	۳	۲۵	۰	۳	۳	۲
۹	۹۶	۵	۲۱	۱	۵	۲	۲
۱۰	۱۰۵	۵	۶۳	۵	۶	۷	۴
۱۱	۱۱۴	۵	۱۰۰	۵	۱۰	۳	۴
۱۲	۱۱۹	۳	۳۰	۰	۳	۳	۲
تعداد کل		۵۴	۵۳۲	۳۰	۶۴	۴۲	۳۶

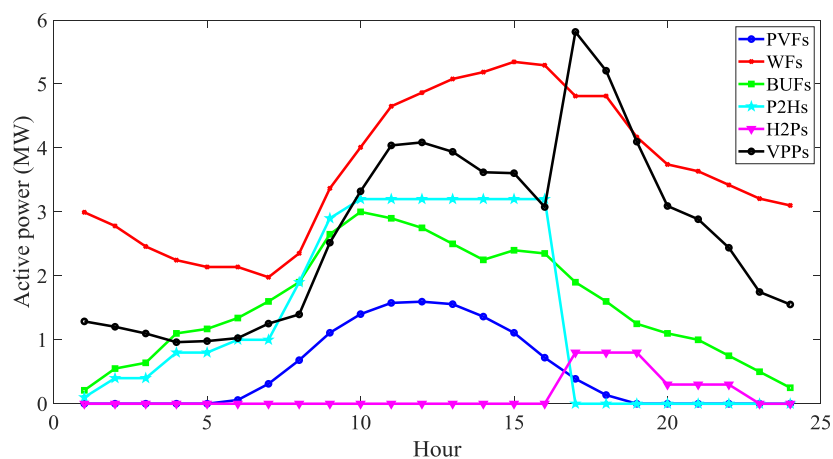
(ب) بررسی عملکرد VPP های تجدیدپذیر:

در شکل (۳)، منحنی روزانه مورد انتظار توان اکتیو VPP ها و عناصر آن‌ها بر اساس تعداد بهینه آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس شکل (۳) و مقایسه آن با شکل (۲-ب)، دیده می‌شود که روند تغییرات زمانی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر متناظر با روند تغییرات زمانی نرخ پدیده‌های طبیعی است. برای مثال، منحنی روزانه توان WF ها همانند منحنی روزانه نرخ سرعت باد است؛ این دو منحنی فقط از لحاظ عددی متفاوت هستند. بر اساس جدول (۲)، تعداد ۵۴ تا WT در تمامی VPP ها نصب می‌شوند. ظرفیت هر WT بر اساس جدول (۱) حدود ۱۰۰ kW است؛ از این رو، WF ها بر اساس شکل (۳) قادر هستند بیشینه توان اکتیوی حدود ۵/۴ MW را به VPP ها تزریق کنند. PVF ها و BUF ها نیز به ترتیب بیشینه توان اکتیو برابر ۳ MW و ۱/۶ MW را به تمامی VPP ها تزریق می‌کنند. در شکل (۳)، منحنی روزانه توان اکتیو P2H ها و H2P ها رسم شده است. بر اساس جدول (۲)، ۳۶ تا HT با ظرفیت ۲۰۰ kWh در VPP ها نصب می‌شوند. کمینه انرژی ذخیره شده در آن‌ها برابر ۲۰ kWh است؛ از این رو، HT ها می‌توانند انرژی برابر ۶۴۸۰ kWh یا ۶/۴۸ MWh، (۲۰ - ۲۰۰)×۳۶، را از VPP ها دریافت و در خود ذخیره کنند. بر اساس شکل (۱)، پیک بار هیدروژنی برابر ۱۶۰۰ kW است؛ از این رو، میزان انرژی مصرفی هیدروژنی توسط این بارها متناظر با منحنی ضریب بار در شکل (۲-الف) حدود ۱۷/۲ MWh است؛ بنابراین، P2H ها در خروجی خود باید ۲۳/۷ MWh (۶/۴۸ + ۱۷/۲) انرژی تولید کنند. از آنجا که راندمان آن در جدول (۱) برابر ۷۵ درصد است، آن‌ها باید حدود ۳۱/۶ MWh انرژی را به صورت الکتریکی از

VPP ها دریافت کنند. H2P ها فقط قادر هستند انرژی ذخیره شده در HT ها را به صورت انرژی الکتریکی به VPP ها تزریق کنند. راندمان H2P ها بر اساس جدول (۱) برابر ۵۱ است؛ از این رو، H2P ها در خروجی خود ۳/۳ (۶/۴۸×۰/۵۱) انرژی الکتریکی تولید می‌کنند؛ بنابراین، بر اساس شکل (۳)، سطح توان اکتیو P2H ها نسبت به H2P ها بسیار بیشتر است. این موضوع در جدول (۳) نیز قابل مشاهده است؛ به طوری که ظرفیت نصب شده P2H ها بسیار بیشتر از H2P ها است. P2H ها در ساعت‌های کم باری و میان باری، ۱۶:۰۰-۱:۰۰، فعال هستند. بر اساس شکل (۳)، توان تولید منابع تجدیدپذیر در ساعت‌های میان باری، ۸:۰۰-۱۶:۰۰، زیاد است. برای اینکه اضافه ولتاژ شدید در این ساعت‌ها در شبکه توزیع ایجاد نشود، P2H ها توان اکتیو را از منابع تجدیدپذیر در این ساعت‌ها دریافت می‌کنند. همچنین، در ساعت‌های کم باری، ۱:۰۰-۷:۰۰، قیمت انرژی کم است؛ از این رو، P2H ها نیز در این ساعت‌ها فعال هستند؛ ولی در ساعت‌های پرباری، ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰، قیمت انرژی زیاد است؛ از این رو، P2H ها خاموش می‌شوند و H2P ها وصل می‌شوند، تا اینکه آن‌ها توان اکتیو را به VPP ها یا شبکه توزیع تزریق کنند و افت ولتاژ زیاد در ساعت‌های پربار را کاهش دهند. منحنی روزانه توان اکتیو VPP ها در شکل (۳) ترسیم شده است. این توان از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است. بر اساس شکل (۳)، VPP ها در تمامی ساعت‌ها انرژی الکتریکی تولید می‌کنند. بیشترین توان مشاهده می‌شود اکتیو تولیدی آن‌ها در ساعت‌های میان باری و پرباری، ۸:۰۰-۲۲:۰۰، به دست آمده است؛ زیرا بر اساس شکل (۳)، در این ساعت‌ها منابع تجدیدپذیر و P2H ها توان اکتیو جالب توجهی را تولید می‌کنند.

جدول (۳): AIMC برای VPPها

VPP	AIMC (\$/year)							
	WF	PVF	BUF	P2Hs	H2Ps	HTs	HSs	کل
۱	۸۲۵۰۰	۱۷۸۵۰	۶۶۲۰۰	۲۸۲۰۰	۳۲۲۴	۲۰۱۴۰	۵۱۵۶۴	۲۱۸۱۱۴
۲	۴۹۵۰۰	۲۹۴۰۰	۰	۱۴۱۰۰	۶۴۴۸	۲۰۱۴۰	۴۰۶۸۸	۱۱۹۵۸۸
۳	۸۲۵۰۰	۲۷۳۰۰	۱۳۲۴۰۰	۵۶۴۰۰	۶۴۴۸	۳۰۲۱۰	۹۳۰۵۸	۳۳۵۲۵۸
۴	۸۲۵۰۰	۳۰۴۵۰	۳۳۱۰۰	۲۸۲۰۰	۱۲۸۹۶	۳۰۲۱۰	۷۱۳۰۶	۲۱۷۲۵۶
۵	۸۲۵۰۰	۷۰۳۵۰	۱۶۵۵۰۰	۴۳۳۰۰	۲۲۵۶۸	۵۰۳۵۰	۱۱۵۲۱۸	۴۳۳۵۶۸
۶	۸۲۵۰۰	۲۷۳۰۰	۶۶۲۰۰	۲۸۲۰۰	۱۲۸۹۶	۳۰۲۱۰	۷۱۳۰۶	۲۴۷۴۰۶
۷	۸۲۵۰۰	۱۰۵۰۰۰	۱۶۵۵۰۰	۶۳۴۵۰	۱۲۸۹۶	۴۰۲۸۰	۱۱۶۶۲۶	۴۶۹۶۲۶
۸	۴۹۵۰۰	۲۶۲۵۰	۰	۲۱۱۵۰	۹۶۷۲	۲۰۱۴۰	۵۰۹۶۲	۹۸۴۸۲
۹	۸۲۵۰۰	۲۲۰۵۰	۳۳۱۰۰	۳۵۲۵۰	۶۴۴۸	۲۰۱۴۰	۶۱۸۳۸	۱۹۹۴۸۸
۱۰	۸۲۵۰۰	۶۶۱۵۰	۱۶۵۵۰۰	۴۳۳۰۰	۲۲۵۶۸	۴۰۲۸۰	۱۰۵۲۴۸	۴۱۹۲۹۸
۱۱	۸۲۵۰۰	۱۰۵۰۰۰	۱۶۵۵۰۰	۷۵۰۰	۹۶۷۲	۴۰۲۸۰	۱۲۰۴۵۲	۴۷۳۴۵۲
۱۲	۴۹۵۰۰	۳۱۵۰۰	۰	۲۱۱۵۰	۹۶۷۲	۲۰۱۴۰	۵۰۹۶۲	۱۳۱۹۶۲
کل AIMC(\$/year)	۸۹۱۰۰۰	۵۵۸۶۰۰	۱۰۰۸۰۰۰	۴۵۱۲۰۰	۱۳۵۴۰۸	۳۶۲۵۲۰	۹۴۹۱۲۸	۳۴۰۶۷۲۸



شکل (۳): منحنی روزانه توان اکتیو مورد انتظار منابع تجدیدپذیر، H2Pها، P2Hها و VPPها

- مورد IV: مورد III به علاوه بار هیدروژنی در جدول (۴)، میزان شاخص‌های بهره‌برداری شامل تلفات انرژی، بیشینه افت ولتاژ (MVD)، بیشینه اضافه ولتاژ (MOV) و پیک بار قابل حمل (PLCC) به‌ازای موارد مطالعاتی مختلف گزارش شده است. PLCC یعنی ADN با منحنی روزانه ضریب بار به صورت شکل (۲-الف) تا چه پیک باری را می‌تواند تغذیه کند. بدترین وضعیت شاخص‌های یادشده در مورد مطالعاتی I به دست آمده است؛ به طوری که آن دارای بیشترین تلفات انرژی و MVD است. کمترین PLCC نیز در این مورد مطالعاتی

پ) ارزیابی وضعیت بهره‌برداری شبکه توزیع اکتیو:

در این بخش، به منظور ارزیابی طرح پیشنهادی در ارتقای وضعیت بهره‌برداری شبکه توزیع، موارد مطالعاتی مختلف زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- مورد I: مطالعات پخش بار شبکه
- مورد II: طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن تنها حضور منابع تجدیدپذیر در VPPها
- مورد III: مورد II به علاوه ذخیره‌سازهای هیدروژنی بدون بار هیدروژنی

[۲۸] استفاده شده است. اندازه جمعیت و بیشینه تکرار همگرایی برای تمامی الگوریتم‌های یادشده به ترتیب برابر ۸۰ و ۵۰۰۰ هستند. پارامترهای تنظیم آن‌ها از [۲۵-۲۸] انتخاب شده‌اند. برای محاسبه انحراف معیار پاسخ نهایی، هر الگوریتم مسئله یادشده را ۳۰ بار حل می‌کند. بر اساس جدول (۵)، مشاهده می‌شود کمترین مقدار AIMC توسط ALO به دست می‌آید. همچنین، این نقطه بهینه در تعداد تکرار تا همگرایی و زمان محاسباتی کمتر به دست می‌آید. علاوه بر این، انحراف معیار پاسخ نهایی برای ALO حدود ۰/۹۸ درصد است؛ ولی این پارامتر برای دیگر الگوریتم‌های یادشده بیش از ۱/۵ درصد است؛ بنابراین، برای طرح پیشنهادی، ALO یک روش حل مناسب است که توانسته است بهترین و دقیق‌ترین راه‌حل مسئله را با سرعت همگرایی زیاد به دست آورد.

جدول (۵): وضعیت همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای طرح

پیشنهادی

الگوریتم	AIMC (\$/year)	تکرار همگرایی	زمان محاسباتی (دقیقه)	انحراف معیار (%)
ALO	۳۴۰۶۷۲۸	۳۴۸۴	۲۳/۴	۰/۹۸
CSA	۳۳۲۱۴۲۲	۳۹۸۲	۲۹/۶	۱/۵۴
SCA	۳۳۳۵۱۷۳	۴۱۲۹	۳۱/۲	۱/۶۱
GWO	۳۷۰۴۸۲۶	۴۴۷۸	۳۳/۱	۲/۲۱
GA	۳۷۵۳۷۴۹	۴۹۶۷	۴۰/۵	۳/۴۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جایابی و اندازه‌یابی واحدهای مجازی تجدیدپذیر مجهز به فناوری‌های P2H و H2P در شبکه توزیع اکتیو ارائه شد. در این واحدها، مدیریت انرژی الکتریکی و هیدروژنی برقرار است. P2H و H2P در کنار HT، یک ذخیره‌ساز هیدروژنی را نیز تشکیل می‌دهند. در مسئله پیشنهادی، برنامه‌ریزی واحدهای مجازی متناظر با کمینه‌سازی مجموع هزینه سالانه احداث، تعمیر و نگهداری منابع و ذخیره‌سازهای هیدروژنی و مقید به مدل برنامه‌ریزی بهره‌برداری این عناصر و مدل پخش توان بهینه شبکه است. در ادامه، بهینه‌سازی تصادفی مبنی بر سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار و پدیده‌های تجدیدپذیر

وجود دارد. با حضور تنه‌های منابع تجدیدپذیر در VPP‌ها متناظر با مورد II، تلفات انرژی و MVD به ترتیب حدود ۳۸/۹ و ۳۲/۳ درصد نسبت به مورد I کاهش دارند. همچنین، PLCC حدود ۱۰/۴ درصد نسبت به مطالعات پخش بار ارتقاء یافته است. این شرایط به‌زای ایجاد بیشینه اضافه ولتاژ ۰/۲۳ p.u. در ADN است. در مورد III، حضور ذخیره‌سازهای هیدروژنی و منابع تجدیدپذیر در VPP لحاظ شده است. شاخص‌های بهره‌برداری، مانند تلفات انرژی و MVD در مورد III به ترتیب حدود ۶/۵ و ۳۶/۶ درصد نسبت به مورد I کاهش می‌یابند. MOV نیز حدود ۳۹/۱ درصد نسبت به مورد II کاهش دارد و PLCC نسبت به مورد I حدود ۲۴ درصد افزایش دارد. در مورد IV، حضور بار هیدروژنی در VPP لحاظ شده است. در این حالت، نسبت به مورد III، تلفات انرژی و MVD افزایش می‌یابند و PLCC نیز کمتر می‌شود؛ اما مورد IV توانسته است نسبت به مورد I، تلفات انرژی و MVD را به ترتیب حدود ۴۳/۶ و ۳۸/۵ درصد ارتقاء دهد. PLCC نیز حدود ۱۹ درصد نسبت به مورد I ارتقاء یافته است. در مورد II، MOV حدود ۴۳/۵ درصد نسبت به مورد II کاهش دارد.

جدول (۴): میزان شاخص‌های بهره‌برداری شبکه

شاخص	مورد I	مورد II	مورد III	مورد IV
تلفات انرژی (MWh)	۶/۳۷	۳/۸۹	۳/۴۱	۳/۵۹
MVD (p.u.)	۰/۰۹۶	۰/۰۶۵	۰/۰۵۸	۰/۰۵۹
MOV (p.u.)	۰	۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳
PLCC (MW)	۲۳/۷	۲۶/۱	۲۹/۴	۲۸/۲

ت) وضعیت همگرایی طرح پیشنهادی:

در جدول (۵)، وضعیت همگرایی طرح پیشنهادی به‌زای روش‌های حل مختلف گزارش شده است. در این بخش، برای حل مسئله پیشنهادی از روش‌های ALO، الگوریتم جست‌وجوی کلاغ (CSA) [۲۵]، الگوریتم سینوس کوسینوس (SCA) [۲۶]، بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) [۲۷] و الگوریتم ژنتیک (GA) [۲۸]

C^L	ماریس تلاقی باس و خط توزیع
$\hat{E}^{HT}, \underline{E}^{HT}, \bar{E}^{HT}$	انرژی اولیه، کمینه و بیشینه انرژی ذخیره‌شده در HT (MWh)
$\bar{I}^{PV}, \bar{G}^{BU}$	بیشینه مقدار تابش خورشید (kW/m^2) و گاز تولیدی BU (m^3)
n^{max}	بیشینه تعداد یک عنصر نصب‌شده در VPP
P^C, Q^C, H^C	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVar) مصرف‌کننده الکتریکی، بار هیدروژنی (MW)
$\bar{P}^{WT}, \bar{P}^{PV}, \bar{P}^{BU}, \bar{P}^{EL}, \bar{P}^{FC}$	بیشینه توان اکتیو (ظرفیت) BU, PV, WT, EL و FC (MW)
\bar{S}^S, \bar{S}^L	بیشینه توان ظاهری (ظرفیت) پست و خط توزیع (MVA)
\underline{V}, \bar{V}	کمینه و بیشینه مقدار مجاز دامنه ولتاژ (p.u.)
v^{CIN}, v^{COUT}, v^R	سرعت باد آستانه وصل، آستانه قطع و نامی (m/s)
v^{WT}, I^{PV}, G^{BU}	سرعت باد (m/s)، تابش خورشید (kW/m^2) و گاز تولیدی BU (m^3)
η^{EL}, η^{FC}	راندمان EL و FC
ρ	احتمال سناریو
$\xi^{WT}, \xi^{PV}, \xi^{BU}$	نرخ توان تولیدی برای PV, WT و BU

متغیرها

$AIMC$	هزینه سالانه احداث و تعمیر و نگهداری (\$/year)
E^{HT}	انرژی ذخیره‌شده در تانک هیدروژنی (HT) برحسب MWh
$n^{WT}, n^{PV}, n^{BU}, n^{EL}, n^{FC}, n^{HT}$	تعداد نصب‌شده توربین بادی (WT)، فتوولتائیک (PV)، واحد زیست توده (BU)، الکترولیزر (EL)، پیل سوختی (FC) و HT در نیروگاه مجازی برق (VPP)
p^L, p^S	توان اکتیو (MW) خط و پست توزیع (MW)
$p^{WF}, p^{PVF}, p^{BUF}, p^{EL}, p^{FC}, p^{VPP}$	توان اکتیو (MW) مزرعه بادی (WF)، مزرعه PV (PVF)، مزرعه BU (BUF)، EL، FC و VPP
Q^L, Q^S	توان راکتیو (MVar) خط و پست توزیع
V, φ	دامنه (p.u.) و زاویه ولتاژ (رادیان)

مراجع

- [1] H. M. Rouzbahani, H. Karimipour, L. Lei, "A Review on Virtual Power Plant for Energy Management", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 47, p. 101370, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101370>
- [2] M. Aryannezhad, A. Rastgou, S. Ghasemi, "Optimal Power Management and Energy Cost Saving for the Hybrid Microgrids under

استفاده شد. سپس، الگوریتم شیر مورچه برای استخراج راه‌حل بهینه استفاده شد. بر اساس نتایج عددی به‌دست‌آمده، واحدهای مجازی عموماً در باس‌های ابتدا و وسط فیدر نصب می‌شوند. این واحدها می‌توانند دارای اندازه‌های بزرگ باشند؛ اما تعدادی کم از این واحدها در انتهای فیدر به منظور بهبود وضعیت بهره‌برداری شبکه نصب می‌شوند. اندازه منابع، $P2H$ ، $H2P$ ها و تانک هیدروژنی در این واحدها کوچک است؛ از این رو، کمترین هزینه برنامه‌ریزی برای واحدهای مجازی مستقر در انتهای فیدرها وجود دارد. در واحدهای مجازی مستقر در ابتدای فیدر و دارای بار هیدروژنی، بیشترین هزینه برنامه‌ریزی به دست می‌آید. $P2H$ ها به منظور تغذیه بار هیدروژنی و ذخیره‌سازی انرژی در تانک هیدروژنی دارای ظرفیتی بسیار زیاد نسبت به $H2P$ هستند. با عملکرد بهینه منابع و ذخیره‌سازهای هیدروژنی، واحدهای مجازی در شبکه توزیع به صورت تولیدکننده انرژی فعالیت می‌کنند؛ از این رو، طرح پیشنهادی نسبت به مطالعات پخش بار قادر است شرایط بهره‌برداری را حدود ۱۹-۴۴ درصد ارتقاء دهد. الگوریتم شیر مورچه توانسته است در تعداد تکرار تا همگرایی و زمان محاسباتی کمتر راه‌حل بهینه را برای طرح پیشنهادی به دست آورد؛ به طوری که انحراف معیار پاسخ‌های آن حدود ۰/۹۸ درصد است.

فهرست علامت‌های اختصاری

اندیس‌ها

b, t, w	اندیس باس، زمان و سناریو
l	اندیس باس

پارامترها

$AIC^{EL}, AIC^{FC}, AIC^{HT}$	هزینه احداث سالانه EL، FC و HT (\$/year)
$AIC^{WT}, AIC^{PV}, AIC^{BU}$	هزینه احداث سالانه WT، PV و BU (\$/year)
$AMC^{EL}, AMC^{FC}, AMC^{HT}$	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه EL، FC و HT (\$/year)
$AMC^{WT}, AMC^{PV}, AMC^{BU}$	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه WT، PV و BU (\$/year)
B^L, G^L	سوسپتانس و رسانایی خط توزیع (p.u.)

- Constrained Stochastic Approach”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 132, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107081>
- [13] M. Dehghan, M. Zadehbagheri, M. J. Kiani, “Virtual Power Plants Planning in the Distribution Network Constrained to System Resiliency Under Extreme Weather Events”, *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 4243-4256, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.080>
- [14] A. Z. G. Seyyedi, S. A. Nejadi, R. Parsibenehkoal, “Bi-Level Siting and Sizing of Flexi-Renewable Virtual Power Plants in the Active Distribution Networks”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 137, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107800>
- [15] Z. Z. Wu, Y. P. Xu, Z. L. Cheng, “Optimal Placement and Sizing of the Virtual Power Plant Constrained to Flexible-Renewable Energy Proving in the Smart Distribution Network”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 49, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101688>
- [16] F. Khalafian, N. Iliaee, E. Diakina, P. Parsa, “Capabilities of Compressed Air Energy Storage in the Economic Design of Renewable Off-Grid System to Supply Electricity and Heat Costumers and Smart Charging-Based Electric Vehicles”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 78, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109888>
- [17] H. Sun, A. G. Ebadi, M. Toughani, “Designing Framework of Hybrid Photovoltaic-Biowaste Energy System with Hydrogen Storage Considering Economic and Technical Indices Using Whale Optimization Algorithm”, *Energy*, Vol. 238, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121555>
- [18] A. Maleki, A. Askarzadeh, “Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel System with Battery Storage for Electrification to an Off-Grid Remote Region: A Case Study of Rafsanjan, Iran”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 7, pp. 147-153, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.005>
- [19] A. Jamali, J. Aghaei, M. Esmaili, A. Nikoobakht, “Self-Scheduling Approach to Coordinating Wind Power Producers with Energy Storage and Demand Response”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, pp. 1210-1219, 2019.
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2920884>
- [20] M. Mani, O. Bozorg-Haddad, X. Chu, “Ant Lion Optimizer (ALO) Algorithm”, *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms*, Springer, 2018.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-5221-7>
- [21] P. R. Babu, C. P. Rakesh, M. N. Kumar, G. Srikanth, “A Novel Approach for Solving Distribution Networks”, *Annual IEEE India Conference*, 2009.
<https://doi.org/10.1109/INDCON.2009.5409363>
- [22] Z. Yang, M. Ghadamyari, H. Khorramdel, Uncertainties of Wind Speed and Solar Radiation Considering Demand Side Management (DSM)”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 15, pp. 15-42, 2024.
<https://doi.org/10.22108/isee.2023.134620.1576>
- [3] M. Karami, M. Zadehbagheri, M. J. Kiani, S. Nejatian, “Retailer Energy Management of Electric Energy by Combining Demand Response and Hydrogen Storage Systems Renewable Sources and Electric Vehicles”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, pp. 18775-18794, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.285>
- [4] N. Naval, J. M. Yusta, “Virtual Power Plant Models and Electricity Markets-A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 149, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111393>
- [5] S. A. F. Asl, L. Bagherzadeh, S. Pirouzi, M. Norouzi, “A New Two-layer Model for Energy Management in the Smart Distribution Network Containing Flexi-Renewable Virtual Power Plant”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 194, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107085>
- [6] W. Chang, Q. Yang, “Low Carbon Oriented Collaborative Energy Management Framework for Multi-Microgrid Aggregated Virtual Power Plant Considering Electricity Trading”, *Applied Energy*, Vol. 351, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121906>
- [7] D. Falabretti, F. Gulotta, D. Siface, “Scheduling and Operation of RES-based Virtual Power Plants with E-mobility: A Novel Integrated Stochastic Model”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 144, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108604>
- [8] X. Wei, J. Liu, Y. Xu, “Virtual Power Plants Peer-to-Peer Energy Trading in Unbalanced Distribution Networks: A Distributed Robust Approach Against Communication Failures”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 2017 – 2029, 2023.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3308101>
- [9] A. Azarhooshang, A. Rezazadeh, “Energy Management of Distribution Network with Inverter-Based Renewable Virtual Power Plant Considering Voltage Security Index”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 18, 2024.
<https://doi.org/10.1049/rpg2.12902>
- [10] M. Yao, Z. Moradi, S. Pirouzi, “Stochastic Economic Operation of Coupling Unit of Flexi-Renewable Virtual Power Plant and Electric Spring in the Smart Distribution Network”, *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 75979- 75992, 2023.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3296254>
- [11] A. Baringo, L. Baringo, J. M. Arroyo, “Robust Virtual Power Plant Investment Planning”, *Sustainable Energy Grids and Networks*, Vol. 35, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101105>
- [12] A. Baringo, L. Baringo, A. J. Arroyo, “Holistic Planning of a Virtual Power Plant with a Nonconvex Operational Model: A Risk-

- “Crow Search Algorithm (CSA)”, *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms*, Springer, 2018.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-5221-7>
- [26] S. Mirjalili, “SCA: a Sine Cosine Algorithm for Solving Optimization Problems”, *Knowledge-based systems*, Vol. 96, pp. 120-133, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>
- [27] H. Rezaei, O. Bozorg-Haddad, X. Chu, X. “Grey Wolf Optimization (GWO) Algorithm”, *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms*, Springer, 2018.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-5221-7>
- [28] S. Mirjalili, “Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications”, Springer, 2019.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-93025-1>
- “Robust Multi-Objective Optimal Design of Islanded Hybrid System with Renewable and Diesel Sources/Stationary and Mobile Energy Storage Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 148, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111295>
- [23] S. Ghasemi, J. Moshtagh, “Radial Distribution Systems Reconfiguration Considering Power Losses Cost and Damage Cost Due to Power Supply Interruption of Consumers”, *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, Vol. 5, 2013.
<http://dx.doi.org/10.15676/ijeei.2013.5.3.5>
- [24] Q. Wang, Y. Wang, Z. Chen, “Stackelberg Equilibrium-Based Energy Management Strategy for Regional Integrated Electricity-Hydrogen Market”, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 11, 2023.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1169089>
- [25] B. Zolghadr-Asli, O. Bozorg-Haddad, X. Chu,

-
- ¹ Virtual power plants
 - ² Wind Turbine
 - ³ Photovoltaic
 - ⁴ Bio-waste unit
 - ⁵ Power to hydrogen
 - ⁶ Hydrogen to power
 - ² Active distribution network
 - ³ Hydrogen tank
 - ⁴ Wind farm
 - ⁵ Photovoltaics farm
 - ⁶ Bio-waste units farm
 - ⁷ Electrolyzer
 - ⁸ Fuel cell
 - ⁹ Hydrogen storage
 - ¹⁰ Ant-lion optimizer
 - ¹¹ Crow Search Algorithm
 - ¹² Sine Cosine Algorithm
 - ¹³ Gray Wolf Optimization
 - ¹⁴ Genetic Algorithm