تعیین استراتژی بهینه نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی و رزرو چرخان

صالح صادقی گوغری[1] ، دانشجوی ارشد، حمیدرضا جهانگیر[1]، دانشجوی دکتری، مسعود علی‌اکبر گلکار[1]، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
salehsadeghi.mail@email.kntu.ac.ir
h.r.jahangir@email.kntu.ac.ir
golkar@kntu.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، ضریب نفوذ منابع انرژی پراکنده در سیستم قدرت به شدت افزایش یافته است، اما از آنجا که ظرفیت این منابع کوچک است، نیاز به ساختاری برای گردآوری این منابع و بررسی مشارکت آنها در بازار انرژی و خدمات جانبی می‌باشد. این هدف با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی قابل دستیابی است. در این مقاله نحوه مشارکت بهینه نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان ارائه شده است. برای بهبود عملکرد نیروگاه مجازی منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی، توربین بادی، ذخیره‌ساز حرارتی و الکتریکی، واحد تولید هم‌زمان برق و حرارت و خودروهای برقی در ساختار نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مسئله بهینه‌سازی در قالب یک مسئله MILP با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه، محدودیت‌های واحدهای تولیدی و شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی انجام شده است. در پایان به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها بر روی یک نیروگاه مجازی ۲۱ باس صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این است که سود نیروگاه مجازی به میزان ۲۳ درصد با شرکت در بازار رزرو چرخان افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه مجازی، بازار انرژی، بازار رزرو چرخان، شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول : مسعود علی‌اکبر گلکار
نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق ـ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ـ تهران ـ ایران - golkar@kntu.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

۱- مقدمه

در گذشته با توجه به اینکه شبکه توزیع یک شبکه غیرفعال[۱]بود منابع انرژی پراکنده[۲](DER) قابلیت مشارکت در خدمات جانبی را نداشتند. اما امروزه به دلیل مزیت‌های فراوان این منابع از جمله کاهش انتشار کربن، قابلیت استفاده در سمت مصرف، همچنین افزایش قیمت و نگرانی‌های ناشی از اتمام سوخت‌های فسیلی تعداد منابع انرژی پراکنده در شبکه‌های برق به شدت افزایش یافته است. در چنین ساختاری نیازمند به روشی برای گردآوری منابع DER مختلف برای استفاده از مزیت‌های آن‌ها و هموار کردن راه ورود این منابع برای شرکت در سرویس‌های جانبی هستیم که نیروگاه مجازی[۳] (VPP) به عنوان یک راه‌حل خوب برای حل این مشکلات در مقاله‌ها ارائه شده است [1]. با توجه به امکان حضور در بازارهای انرژی و همچنین نوع و محدوده مدیریت، نیروگاه مجازی به دو دسته کلی نیروگاه مجازی تجاری[۴] (CVPP) و نیروگاه مجازی فنی[۵] (TVPP) تقسیم می‌شوند [2] و [3]. نیروگاه‌های مجازی تجاری نمایندگی منابع پراکنده انرژی را عهده‌دار هستند و توانایی شرکت در بازار را مشابه با نیروگاه‌های سنتی دارند. این نیروگاه‌ها هیچ یک از جنبه‌های بهره‌برداری شبکه را در نظر نمی‌گیرند و هیچ محدودیت جغرافیایی برای آن‌ها وجود نداشته و منابع انرژی از هر نقطه می‌توانند به شبکه متصل شوند. نیروگاه‌های مجازی فنی مجموعه‌ای از چندین منبع انرژی می‌باشند که در یک محدوده مشخص جغرافیایی به شبکه متصل هستند [4] و [5]. به عبارت دیگر در مشخصه‌های یک TVPP، محل جغرافیایی منابع آن بر روی شبکه توزیع و تأثیرات فنی آن‌ها در بهره‌برداری شبکه در نظر گرفته می‌شود.

امروزه بسیاری از محققان به گردآوری منابع مختلف در ساختار نیروگاه مجازی برای دستیابی به اهداف گوناگون پرداخته‌اند. تعدادی از مقالات مدیریت منابع مختلف را در ساختار نیروگاه مجازی با هدف بیشینه کردن سود یا کمینه کردن هزینه‌ها بررسی کرده‌اند [6]-[11].

در مرجع [6] مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی شامل منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی[۶] (DG) و ذخیره‌سازها در قالب یک مسئله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح[۷] (MINLP) انجام شده است. در مقاله [7] علاوه بر در نظر گرفتن منابع مختلف در ساختار نیروگاه مجازی، پاسخگویی بار نیز در نظر گرفته شده است؛ هدف نیروگاه مجازی در این مرجع افزایش سود، کاهش خطر و همچنین کاهش آلودگی می‌باشد، اما در این مقاله محدودیت‌های مربوط به پخش بار در نظر گرفته نشده‌اند. در مرجع [8] مدیریت منابع با هدف بیشینه کردن سود نیروگاه مجازی انجام شده است. در مرجع [9] برنامه‌ریزی یک نیروگاه مجازی شامل منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی، منابع تجدیدپذیر و خودروهای برقی با هدف کاهش هزینه‌ها صورت گرفته است؛ در این کار همچنین هزینه آلودگی و پاسخگویی بار در نظر گرفته شده است اما مدل‌سازی پخش بار که فاکتور مهمی در برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی می‌باشد انجام نشده است. در مرجع [10] نیروگاه مجازی شامل منابع تجدیدپذیر بادی و ذخیره‌ساز و همچنین واحد تولید هم‌زمان برق و حرارت[۸] (CHP) در قالب یک مسئله MINLP مدل‌سازی شده است؛ تابع هدف در این مقاله کاهش آلودگی و افزایش سود نیروگاه مجازی می‌باشد.

با گردآوری تعداد زیاد منابع DER در قالب نیروگاه مجازی، قابلیت شرکت در تامین خدمات جانبی مانند کنترل اولیه و ثانویه فرکانس، رزرو چرخان[۹] و غیر چرخان، بهبود پروفیل ولتاژ و ... برای این منابع فراهم می‌شود که در مقاله‌های [6]-[11] این موضوع در نظر گرفته نشده است در حالی که می‌تواند تاثیر زیادی بر روی سود نیروگاه مجازی داشته باشد. به همین دلیل تعدادی از مقاله‌ها نیروگاه مجازی را با هدف شرکت در بازار خدمات جانبی به کار برده‌اند که در این مقاله تمرکز بر روی مقاله‌هایی می‌باشد که شرکت نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان را بررسی نموده‌اند [1] و [12]-[17].

مرجع [11] نیروگاه مجازی شامل منابع CHP، تجدیدپذیر و پاسخگویی بار را با هدف شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان به کار برده است. مقاله [12] نیروگاه مجازی شامل منابع قابل برنامه‌ریزی و ذخیره‌سازها را در کنار بارهای قابل قطع برای شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان استفاده کرده است، اما هزینه آلودگی را در نظر نگرفته است. مراجع [1] و [13] با هدف شرکت در بازار انرژی و رزرو از نیروگاه مجازی استفاده کرده‌اند. در [14] به پیشنهاد نیروگاه مجازی برای شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان مبتنی بر ریسک پرداخته شده است و برای در نظر گرفتن ریسک از روش CVAR[۱۰] استفاده شده است. نحوه شرکت یک نیروگاه مجازی که شامل توربین بادی و دیزل ژنراتور می‌باشد در بازار انرژی و رزرو چرخان در [15] بررسی شده است. بررسی مقالات موجود در این زمینه که در جدول (۱) با هم مقایسه شده‌اند نشان می‌دهد ارائه روشی برای تجمیع منابع مختلف شامل منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی، منابع تجدیدپذیر، خودروهای برقی (که نفوذ آنها به دلیل کاهش انتشار کربن به شدت افزایش یافته است)، منابع ذخیره‌ساز (که باعث کاهش نوسانات تولید تجدیدپذیرها می‌شوند) وCHP که باعث افزایش راندمان و بهره‌وری در سیستم‌های قدرت می‌شود ضروری می‌باشد. همچنین در این ساختار ارائه روشی برای شارژ هوشمند خودروها که سبب کاهش پیک‌بار و کاهش نیاز به توسعه شبکه قدرت می‌شود لازم است. با توجه به فراهم شدن زمینه شرکت منابع DER در قالب نیروگاه مجازی برای شرکت در بازار خدمات جانبی لازم است تا شرکت نیروگاه مجازی در بازار خدمات جانبی نیز در نظر گرفته شود که در هیچ‌کدام از مقالات مرور شده این کار به صورت دقیق و کامل انجام نگرفته است (همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شده است). همچنین از آنجا که عدم قطعیت‌های مختلفی مانند عدم قطعیت در قیمت برق، تولید منابع تجدیدپذیر و میزان بار در ساختار نیروگاه مجازی وجود دارد مدل-سازی این عدم قطعیت‌ها فاکتور مهمی در دستیابی به جواب بهینه می‌باشد بدین منظور در این مقاله از روشی مبتنی بر ماشین‌های بردار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

پشتیبان[11] (G-SVM) برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. با توجه به موارد فوق، نوآوری‌های این مقاله به طور خلاصه به شرح زیر است:

- در این مقاله یک نیروگاه مجازی شامل منابع تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی، منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها، خودروهای برقی و CHP با هدف شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان مورد مطالعه قرار گرفته است. در نظر گرفتن یک نیروگاه مجازی شامل منابع پراکنده مختلف، با توجه به مزیت‌های هرکدام و افزایش نفوذ آنها در سیستم قدرت ضروری می‌باشد.
- در این مطالعه به منظور برآورد دقیقی از هزینه های عملیاتی نیروگاه مجازی، هزینه فرسودگی ذخیره‌سازها، محدودیت پخش بار شبکه، هزینه آلودگی در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین مسئله در قالب یک مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح[12] (MILP) مطرح شده است که دستیابی به جواب بهینه سراسری را تضمین می‌کند و قابلیت حل مسائل واقعی با سایز بزرگ را فراهم می‌سازد. همچنین در این مقاله به منظور مدل-سازی عدم قطعیت‌های موجود در قیمت برق، تولید منابع بادی و بار از روش G-SVM استفاده شده است که دقت خوبی را در پیش‌بینی فاکتورهای دارای عدم قطعیت از خود نشان می‌دهد.
- با توجه به افزایش نفوذ خودروهای برقی در سیستم قدرت، شارژ هوشمند خودروهای برقی برای جلوگیری از تداخل پیک‌بار شبکه و شارژ خودروها در ساختار نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مقایسه مقالات موجود در زمینه شرکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان

مرجع	منابع در نظر گرفته شده در ساختار نیروگاه مجازی				بازار انرژی	بازار رزرو چرخان	پخش بار	هزینه آلودگی	نوع مسئله بهینه‌سازی	تابع هدف
	DG های قابل برنامه‌ریزی	منابع انرژی تجدیدپذیر	خودروهای برقی	ذخیره‌ساز						
[6]	✓	✓	×	✓	✓	×	×	×	MINLP	کمینه کردن هزینه‌ها
[7]	✓	✓	×	✓	✓	×	×	✓	MILP	چندهدفه
[8]	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	×	MINLP	بیشینه کردن سود
[16]	✓	✓	×	×	✓	×	×	×	MILP	بیشینه کردن سود
[9]	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	MILP	کمینه کردن هزینه‌ها
[10]	✓	✓	×	✓	✓	×	×	✓	MINLP	چندهدفه
[11]	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	×	MILP	بیشینه کردن سود
[12]	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	×	MINLP	بیشینه کردن سود
[1]	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	MINLP	کمینه کردن هزینه‌ها
[13]	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	×	MINLP	بیشینه کردن سود
[14]	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	×	MINLP	بیشینه کردن سود
[17]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	MINLP	بیشینه کردن سود
[15]	✓	✓	×	×	✓	✓	×	✓	MINLP	بیشینه کردن سود
این مقاله	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	بیشینه کردن سود

۲- مدل‌سازی مسئله

۲-۱- تابع هدف

در این مقاله یک نیروگاه مجازی فنی، که تابع هدف آن بیشینه کردن سود با شرکت در بازارهای انرژی و رزرو چرخان است در نظر گرفته شده است که توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$Maximizing\ Profit = \sum_t(-\rho_t^E P_t^E - \rho_t^{RAC} Q_t^E + \rho_t^{RES} P_t^{RES}) + \sum_t \sum_b \rho_t^{RE} P_{b,t}^D - \sum_t\left(\sum_g C_{g,t}^{DG} + \sum_s DEG_{s,t}^{ST} + \sum_w C_{w,t}^{WT} + \sum_c C_{c,t}^{CHP}\right) \quad (1)$$

P_t^E و Q_t^E به ترتیب میزان تبادل توان اکتیو و راکتیو را با شبکه بالادست در بازار انرژی نشان می‌دهند. مقادیر مثبت P_t^E و Q_t^E نشان دهنده خرید توان اکتیو و راکتیو از شبکه بالاست و مقادیر منفی نشان دهنده فروش توان اکتیو و راکتیو به شبکه بالادست می‌باشند. P_t^{RES} میزان مشارکت نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان را نشان می‌دهد. قسمت دوم در رابطه (۱) سود نیروگاه مجازی حاصل از خرده‌فروشی برق به مشتریان را نشان می‌دهد که در این رابطه $P_{b,t}^D$ برابر با مجموع بار مسکونی و میزان شارژ خودروها در هر ساعت است. قسمت سوم در رابطه (۱) مربوط به هزینه نیروگاه مجازی (هزینه بهره‌برداری از DG، هزینه فرسودگی ذخیره‌ساز الکتریکی، توربین بادی و واحد CHP) می‌باشد. نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل منابع DG قابل برنامه‌ریزی، ذخیره‌ساز، توربین بادی، CHP و خودروهای برقی می‌باشد که روابط مربوط به مدل‌سازی آنها در زیر آورده شده است .

مدل‌سازی DG ها:

تابع هزینه DG شامل تابع هزینه درجه دوم سوخت، هزینه روشن و خاموش کردن واحدها و هزینه مربوط به آلودگی DG ها می‌باشد که از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این مطالعه برای خطی سازی تابع درجه دوم از روش تکه‌ای خطی استفاده شده است

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

[18] و خطی سازی حاصل‌ضرب دو متغییر باینری با توجه به مرجع [19] انجام شده است. رابطه (۳) هزینه آلودگی DG [20] و روابط (۴) و (۵) محدودیت مربوط به میزان تولید توان اکتیو و راکتیو برای شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان را نشان می‌دهند. محدودیت‌های مربوط به حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و شیب افزایش توان[۱۳] واحدهای DG با توجه به مرجع [21] در نظر گرفته شده‌اند.

$$C_{g,t}^{DG} = (a_g(P_{g,t}^{DG} + R_{g,t}^{DG})^2 + b_g(P_{g,t}^{DG} + R_{g,t}^{DG}) + c_g)u_{g,t} + SUC_g\, u_{g,t}(1-u_{g,t-1}) + SDC_g\, u_{g,t-1}(1-u_{g,t}) + EC_{g,t}^{DG} \quad (۲)$$

$$EC_{g,t}^{DG} = \sum_e \alpha_e\, EF_{e,g}\,(P_{g,t}^{DG} + R_{g,t}^{DG}) \quad (۳)$$

$$P_g^{DG,MIN}\, u_{g,t} \le R_{g,t}^{DG} + P_{g,t}^{DG} \le P_g^{DG,MAX}\, u_{g,t} \quad (۴)$$

$$Q_g^{DG,MIN}\, u_{g,t} \le Q_{g,t}^{DG} \le Q_g^{DG,MAX}\, u_{g,t} \quad (۵)$$

تابع هزینه DG شامل تابع هزینه درجه دوم سوخت، هزینه روشن و خاموش کردن واحدها و هزینه مربوط به آلودگی DG ها می‌باشد که از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این مطالعه برای خطی سازی تابع درجه دوم از روش تکه‌ای خطی استفاده شده است [18] و خطی سازی حاصل‌ضرب دو متغییر باینری با توجه به مرجع [19] انجام شده است. رابطه (۳) هزینه آلودگی DG [20] و روابط (۴) و (۵) محدودیت مربوط به میزان تولید توان اکتیو و راکتیو برای شرکت در بازار انرژی و رزرو چرخان را نشان می‌دهند. محدودیت‌های مربوط به حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و شیب افزایش توان[۱۳] واحدهای DG با توجه به مرجع [21] در نظر گرفته شده‌اند.

مدل‌سازی ذخیره‌سازها:

$$DEG_{s,t}^{ST} = C_{deg}(P_{s,t}^{CH} + P_{s,t}^{DCH}) \quad (۶)$$

$$P_{s,t}^{ST} = P_{s,t}^{DCH} - P_{s,t}^{CH} \quad (۷)$$

$$0 \le P_{s,t}^{CH} \le P_s^{MAX,CH} \times u_{s,t}^{ES,CH} \quad (۸)$$

$$0 \le P_{s,t}^{DCH} \le P_s^{MAX,DCH} \times u_{s,t}^{ES,DCH} \quad (۹)$$

$$u_{s,t}^{ES,DCH} + u_{s,t}^{ES,CH} \le 1 \quad (۱۰)$$

$$SOC_{s,t}^{ES} = SOC_{s,t-1}^{ES} + (P_{s,t}^{CH}\eta_s^{ES,CH} - P_{s,t}^{ES,DCH}/\eta_s^{DCH})\Delta t \quad (۱۱)$$

$$SOC_s^{ES,MIN} \le SOC_{s,t}^{ES} \le SOC_s^{ES,MAX} \quad (۱۲)$$

رابطه (۶) هزینه فرسودگی ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد [22]، رابطه (۷) مربوط به میزان شارژ و دشارژ باتری در هر ساعت می‌باشد. روابط (۸) و (۹) محدودیت حداکثر میزان شارژ و دشارژ باتری و رابطه (۱۰) بهره‌بردار نیروگاه مجازی را مقید می‌کند که در هر ساعت باتری فقط یکی از حالت‌های شارژ و دشارژ را داشته باشد. رابطه (۱۱) سطح شارژ باتری[۱۴] و رابطه (۱۲) محدودیت حداقل و حداکثر میزان سطح شارژ باتری در هر ساعت را نشان می‌دهند.

مدل‌سازی خودروهای برقی:

$$P_{i,t}^{EV} \le CR_i \qquad t \in A_i \quad (۱۳)$$

$$SOC_{i,t}^{EV} = SOC_{i,t-1}^{EV} + (P_{i,t}^{EV}\eta_s^{EV,CH})\Delta t \quad (۱۴)$$

$$SOC_{i,t}^{EV} \le BC_i \quad (۱۵)$$

$$SOC_{i,t_i^{dep}}^{EV} \ge 0.9\, BC_i \qquad t \in A_i \quad (۱۶)$$

میزان شارژ خودروها در هر ساعت باید از نرخ توان شارژر خودرو کمتر باشد که توسط رابطه (۱۳) کنترل می‌شود. روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب سطح شارژ باتری خودروها و محدودیت مربوط به حداکثر سطح شارژ باتری در هر ساعت را نشان می‌دهند. رابطه (۱۶) نشان دهنده این است که خودروها در لحظه خروج از پارکینگ حداقل باید به میزان ۹۰ درصد ظرفیت باتری آنها شارژ شده باشند که بیانگر میزان رفاه صاحبان خودروهای برقی می‌باشد.

مدل‌سازی توربین بادی:

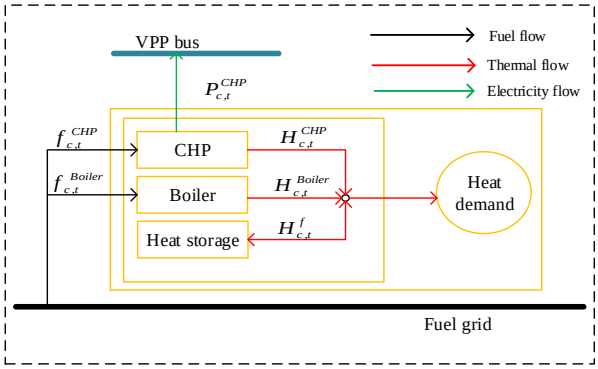
توان خروجی توربین بادی تابعی از سرعت باد می‌باشد که با توجه به رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود و رابطه (۱۸) تابع هزینه توربین بادی را نشان می‌دهد.

$$P_{w,t}^{WT} = \begin{cases} 0 & \vartheta_w < \vartheta_{w,cutin},\ \vartheta_w > \vartheta_{w,cutout} \\ \frac{Pwt_w^{max}(\vartheta_w - \vartheta_{w,cutin})}{\vartheta_{w,rated} - \vartheta_{w,cutin}} & \vartheta_{w,cutin} < \vartheta_w < \vartheta_{w,rated} \\ Pwt_w^{max} & \vartheta_{w,rated} < \vartheta_w < \vartheta_{w,cutout} \end{cases} \quad (۱۷)$$

$$C_{w,t}^{WT} = a_w P_{w,t}^{WT} \quad (۱۸)$$

مدل‌سازی واحد CHP:

در این مقاله، یک واحد CHP به منظور تامین بار حرارتی و بخشی از بار الکتریکی نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده است. برای این منظور، یک سیستم متشکل از یک واحد CHP، یک بویلر و یک ذخیره‌ساز حرارتی مطابق با شکل (۱) در نظر گرفته شده است. واحد بویلر به عنوان یک منبع جایگزین برای تامین حرارت نیروگاه مجازی و ذخیره‌ساز حرارتی به منظور افزایش انعطاف‌پذیری نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱): ساختار سیستم CHP [23]

معادلات (۱۹) - (۲۹) برای مدل‌سازی سیستمCHP به کار می‌روند [23].

$$C_{c,t}^{CHP} = (f_{c,t}^{Boiler} + f_{c,t}^{CHP})\rho^{NG} + EC_{c,t}^{CHP} \quad (۱۹)$$

$$H_{c,t}^{Boiler} = f_{c,t}^{Boiler}\eta_c^{Boiler} \quad (۲۰)$$

$$H_{c,t}^{CHP} = f_{c,t}^{CHP}(\alpha_c/1 + \alpha_c) \quad (۲۱)$$

$$P_{c,t}^{CHP} + R_{c,t}^{CHP} = f_{c,t}^{CHP}(1/1 + \alpha_c) \quad (۲۲)$$

$$H_t^D = \sum_c H_{c,t}^{Boiler} + H_{c,t}^{CHP} + H_{c,t}^{f} \quad (۲۳)$$

$$H_{c,t}^{s} - H_{c,t}^{f} = H_{c,t+1}^{s} \quad (۲۴)$$

$$H_{c,t}^{s} \le H_C^{S,MAX} \quad (۲۵)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

$$H^{S}_{c,0} = H^{S}_{c,24} \quad (۲۶)$$

$$f^{Boiler}_{c,t} \le f^{Boiler,\mathrm{MAX}}_{c} \quad (۲۷)$$

$$f^{CHP}_{c,t} \le f^{CHP,\mathrm{MAX}}_{c} \quad (۲۸)$$

$$EC^{CHP}_{c,t} = \sum_e \alpha_e \, EF_{e,c} \, (f^{Boiler}_{c,t} + f^{CHP}_{c,t}) \quad (۲۹)$$

معادلات (۱۹) – (۲۲)، به ترتیب تابع هزینه سیستم CHP، گرمای تولید شده توسط بویلر، CHP و همچنین انرژی الکتریکی تولید شده توسط واحد CHP را نشان می‌دهند. معادله مربوط به تعادل گرمایی سیستم در رابطه (۲۳)، مقدار گرمای ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز حرارتی برای ساعت بعد در (۲۴)، محدودیت‌های مربوط به ذخیره‌ساز حرارتی در معادلات (۲۵) و (۲۶) بیان شده‌اند. همچنین محدودیت‌های مربوط به میزان سوخت مصرفی توسط واحد بویلر و CHP به ترتیب در معادلات (۲۷) و (۲۸) آورده شده‌اند. رابطه (۲۹) هزینه مربوط به آلودگی سیستم CHP را نشان می‌دهد [20].

$$0 \le P^{RES}_{t} = \sum_g R^{DG}_{g,t} + \sum_c R^{CHP}_{c,t} \quad (۳۰)$$

$$|P^{RES}_{t} + P^{E}_{t}| \le P^{N,MAX} \quad (۳۱)$$

رابطه (۳۰) میزان شرکت نیروگاه مجازی در رزرو چرخان را نشان می‌دهد که برابر با مجموع مشارکت DG ها و واحد CHP در رزرو چرخان می‌باشد. رابطه (۳۱) مربوط به محدودیت میزان مشارکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان است.

مدل‌سازی پخش بار:

محدودیت‌های مربوط به پخش بار با استفاده از پخش بار خطی ارائه شده در مرجع [24] در نظر گرفته شده است که در زیر آورده شده‌اند.

$$P^{D}_{b,t} = P^{Load}_{b,t} + \sum_{i\in b} P^{EV}_{i,t} \quad (۳۲)$$

$$Q^{D}_{b,t} = Q^{Load}_{b,t} + \sum_{i\in b} P^{EV}_{i,t} \times \tan(\varphi^{EV}_{i}) \quad (۳۳)$$

$$(PG_{b,t} - PD_{b,t})/Sbase = (2V_{b,t} - 1) * G_{b,b} + \sum_{l\neq b} G_{b,l}\,(V_{b,t} + V_{l,t} - 1) + B_{b,l}(\theta_{b,t} - \theta_{l,t}) \quad (۳۴)$$

$$(QG_{b,t} - QD_{b,t})/Sbase = -(2V_{b,t} - 1) * B_{b,b} + \sum_{l\neq b} -B_{bl}\,(V_{b,t} + V_{l,t} - 1) + G_{bl}(\theta_{b,t} - \theta_{l,t}) \quad (۳۵)$$

$$PL_{b,l,t} = G_{b,l}\big(V_{b,t} - V_{l,t}\big) + B_{b,l}(\theta_{b,t} - \theta_{l,t}) \quad (۳۶)$$

$$QL_{b,l,t} = -B_{b,l}\big(V_{b,t} - V_{l,t}\big) + G_{b,l}(\theta_{b,t} - \theta_{l,t}) \quad (۳۷)$$

$$SL_{b,l,t} = PL_{b,l,t} + \xi_{b,l,t} * QL_{b,l,t} \quad (۳۸)$$

$$V^{min}_{b} \le V_{b,t} \le V^{max}_{b} \quad (۳۹)$$

$$|SL_{b,l,t}| \le SL^{max}_{b,l} \quad (۴۰)$$

روابط (۳۲) و (۳۳) میزان بار اکتیو و راکتیو در هر ساعت در هر باس را نشان می‌دهند. روابط (۳۴) و (۳۵) مربوط به تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس می‌باشند. روابط (۳۶)، (۳۷) و (۳۸) فلوی توان اکتیو، راکتیو و ظاهری برای خط bl در ساعت t را نشان می‌دهند. روابط (۳۹) و (۴۰) مربوط به محدودیت‌های ولتاژ باس‌ها و حد حرارتی خطوط می‌باشند.

۲-۲- مدلسازی عدم قطعیت‌ها

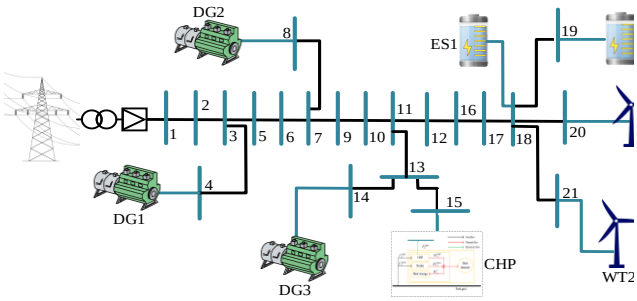
در این مطالعه به منظور مدل‌سازی پارامترهای دارای عدم قطعیت، از روش G-SVM استفاده شده است. SVM یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین است که دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف مانند سرعت باد، تابش خورشید، میزان بار مصرفی و قیمت برق دارد [25]. این موضوع سبب شده است این روش به عنوان یک روش کاربردی مبتنی بر یادگیری ماشین شناخته شود. در حقیقت SVM با استفاده از تابع Kernel داده‌ها را در فضای جدید تصویرسازی می‌کند که منجر به عملکرد مناسب این روش در استخراج ویژگی می‌شود که تأثیر بسزایی در افزایش دقت در پیش‌بینی داده‌های با رفتار تصادفی بالا دارد [25].

۳- مطالعه موردی

در این تحقیق، برای ارزیابی عملکرد نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان، یک نیروگاه مجازی شامل سه عدد DG، دو عدد ذخیره‌ساز، دو توربین بادی و یک واحد CHP مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته شده است. نیروگاه مجازی مورد مطالعه از طریق باس شماره یک به شبکه بالادست متصل می باشد. داده‌های مربوط به شبکه با توجه به مرجع [26] انتخاب شده، همچنین ۲۱۰ خودروی الکتریکی در باس‌های PQ به طور یکنواخت در نظر گرفته شده است که اطلاعات مربوط به سفر، زمان ورود، زمان خروج و همچنین شارژ اولیه خودروها با توجه به مرجع [27] انتخاب شده است. داده‌های ورودی مربوط به منابع نیروگاه مجازی در جدول (۲) تا جدول (۴) آورده شده، همچنین مقدار $\rho^{RAC}_{t} = 0.1 \times \rho^{E}_{t}$ و $C_{deg} = 2.7 \times 10^{-4}$ [22] می‌باشند، ظرفیت توربین‌های بادی ۵۰۰ کیلووات و مقدار a_w برابر با ۰/۰۳ دلار به ازای هر کیلووات در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به هزینه آلودگی منابع با سوخت فسیلی با توجه به مرجع [20] در نظر گرفته شده است و مقدار φ^{EV}_{i} برابر با ۰/۳۲۸۶ می‌باشد. داده‌های مربوط به قیمت گاز، برق، پروفیل بار و تولید تجدیدپذیرها با استفاده از داده‌های بازار CAISO[۱۵] [28] برای روز ۳۰ نوامبر ۲۰۱۸ توسط روش G-SVM پیش‌بینی شده است که در شکل (۳) آورده شده است، بدین منظور داده‌های مربوط به سه سال (از سال ۲۰۱۶ – ۲۰۱۸) به عنوان داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست انتخاب شده است، تعداد کل داده‌ها ۲۶۲۸۰ می‌باشد که ۷۵٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش، ۱۵٪ داده‌های اعتبارسنجی و ۱۰٪ به عنوان داده-های تست انتخاب شده است. لازم به توجه است که به دلیل عدم وجود داده‌های مربوط به قیمت خرده‌فروشی و رزرو، این قیمت با توجه به مقادیر ارائه شده در مرجع [13] بر اساس قیمت انرژی مقیاس گردیده است و مقدار مربوط به بار حرارتی در شکل (۳)(ت) نمایش داده شده است.

برای ارزیابی روش پیشنهادی دو مطالعه انجام می‌شود. مطالعه اول برای حالتی انجام شده که نیروگاه مجازی تنها می‌تواند در بازار انرژی شرکت نماید. در مطالعه دوم نیروگاه مجازی علاوه بر شرکت در بازار انرژی توانایی شرکت در بازار رزرو چرخان را نیز دارد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]



شکل (۲): دیاگرام تک‌خطی نیروگاه مجازی

جدول (۲): داده‌های واحد CHP

شماره باس	$f_c^{CHP,MAX}$ kW	$f_{c,t}^{Boiler,MAX}$ kW	η_c^{Boiler}	$H_C^{S,MAX}$ kWh	α_c	$H_{c,0}^{S}$ kWh
۱۵	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۰/۸۵	۸۰۰	۲	۲۵۷/۷

جدول (۳): داده‌های واحدهای تولید پراکنده

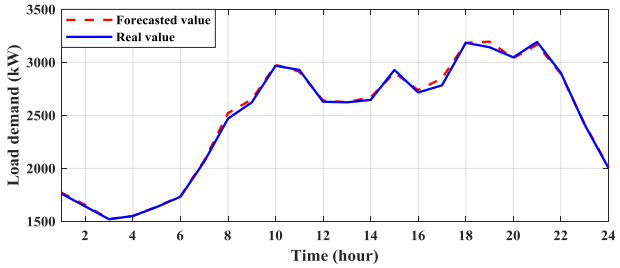
پارامتر	شماره باس		
	۴	۸	۱۴
a_g ($\frac{\$}{kWh^2}$)	۴/۶×۵-۱۰	۴/۴×۵-۱۰	۴/۵×۵-۱۰
b_g ($\frac{\$}{kWh}$)	۷×۴-۱۰	۶/۷×۴-۱۰	۶/۸×۴-۱۰
c_g ($\frac{\$}{h}$)	۴/۶×۳-۱۰	۳/۹×۳-۱۰	۴/۲×۳-۱۰
$P_g^{DG,MIN}$ (kW)	۹۰	۵۰	۶۵
$P_g^{DG,MAX}$ (kW)	۹۰۰	۵۰۰	۷۰۰
$Q_g^{DG,MIN}$ (kVar)	-۱۸۰	-۱۶۰	-۱۷۰
$Q_g^{DG,MAX}$ (kVar)	۵۴۰	۲۵۰	۳۵۰
SUC_g ($)	۱۵	۹۵	۹۵
SDC_g ($)	۵	۱۵	۱۵

جدول (۴): داده‌های واحدهای ذخیره‌ساز

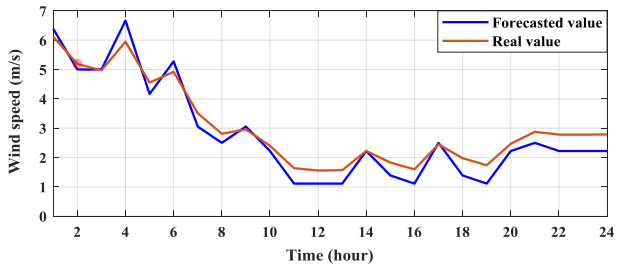
شماره باس	$SOC_s^{ES,MIN}$ kWh	$SOC_s^{ES,MAX}$ kWh	$P_s^{MAX,DCH}$ kW	$P_s^{MAX,CH}$ kW	η_s^{DCH}	$\eta_s^{ES,CH}$
۱۸	۵۰	۷۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۰/۸۶	۰/۸۶
۱۹	۱۰	۲۵۰	۵۰	۵۰	۰/۸۶	۰/۸۶

مسئله بهینه‌سازی برای این دو مطالعه انجام گردیده و نتایج شبیه‌سازی در شکل (۴) و شکل (۵)، همچنین جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس شکل‌های (۴)(الف) و شکل (۴)(ت)، واحد CHP در تمامی ساعات بیشترین میزان توان خود را تولید کرده است تا علاوه بر تامین بار حرارتی نیروگاه مجازی بخشی از بار الکتریکی را نیز تامین نماید. همچنین بر اساس شکل (۴)(ب) که میزان توان مبادله شده بین نیروگاه مجازی و شبکه بالادست را در مطالعه اول نشان می‌دهد، نیروگاه مجازی در ساعات پیک‌بار از شبکه بالادست توان خریداری می‌نماید، ولی در ساعات ۵-۹ و ۲۳-۲۴ زمانی که میزان بار آن کم بوده و قیمت بازار انرژی نیز پایین می‌باشد به شبکه بالادست توان می‌فروشد. شکل (۴)(پ) و شکل (۴)(ث)، به ترتیب سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی را در ساعات مختلف نشان می‌دهند.

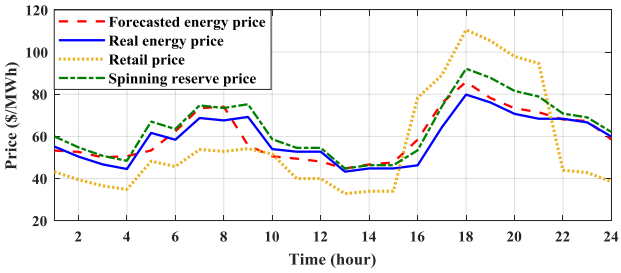
شکل (۴)(ت) میزان حرارت تولید شده توسط واحد CHP در طول روز را برای تامین بار حرارتی نیروگاه مجازی نمایش می‌دهد. شکل (۴)(ج) مربوط به میزان شارژ ناوگان خودروهای برقی در طول ۲۴ ساعت است، همان‌گونه که در این شکل نیز مشاهده می‌شود قسمتی از شارژ خودروهای برقی در ساعات ابتدایی روز که میزان بار مسکونی کم بوده است انجام شده است و قسمتی نیز در ساعات ۱۶-۲۱ انجام شده که متناسب با سود نیروگاه مجازی می‌باشد.



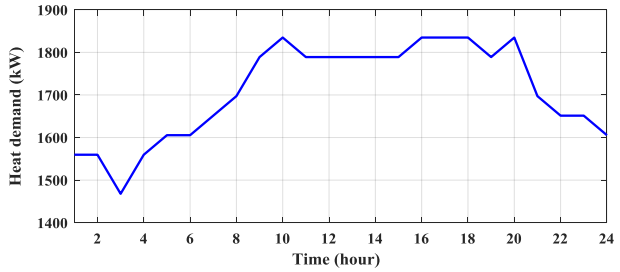
(الف)



(ب)



(پ)



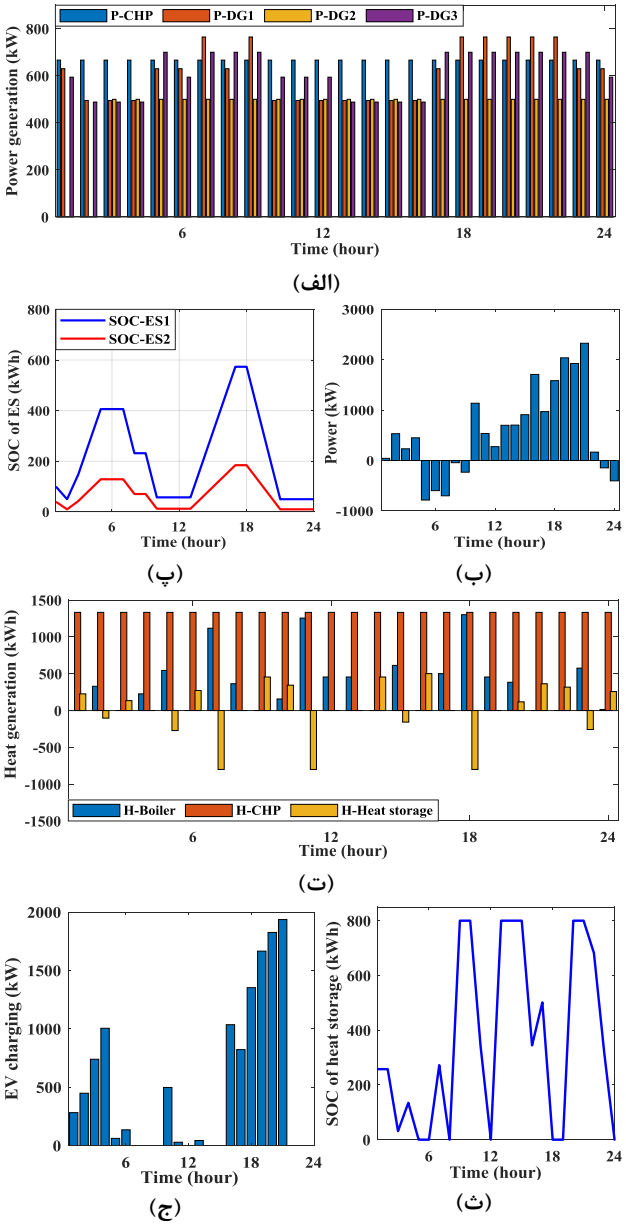
(ت)

شکل (۳): داده‌های روز ۳۰ نوامبر ۲۰۱۸. (الف) بار؛ (ب) سرعت باد؛ (پ) قیمت بازار روز بعد؛ (ت) بار حرارتی.

نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه دوم که مربوط به شرکت هم‌زمان نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان است در شکل (۵) ارائه شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده در شکل (۴) و شکل (۵) مشاهده می‌شود که در مطالعه دوم اپراتور نیروگاه مجازی بخشی از تولید خودش را برای شرکت در بازار رزرو چرخان اختصاص داده است. این موضوع باعث شده است که نیروگاه مجازی در تمامی ساعات در بازار

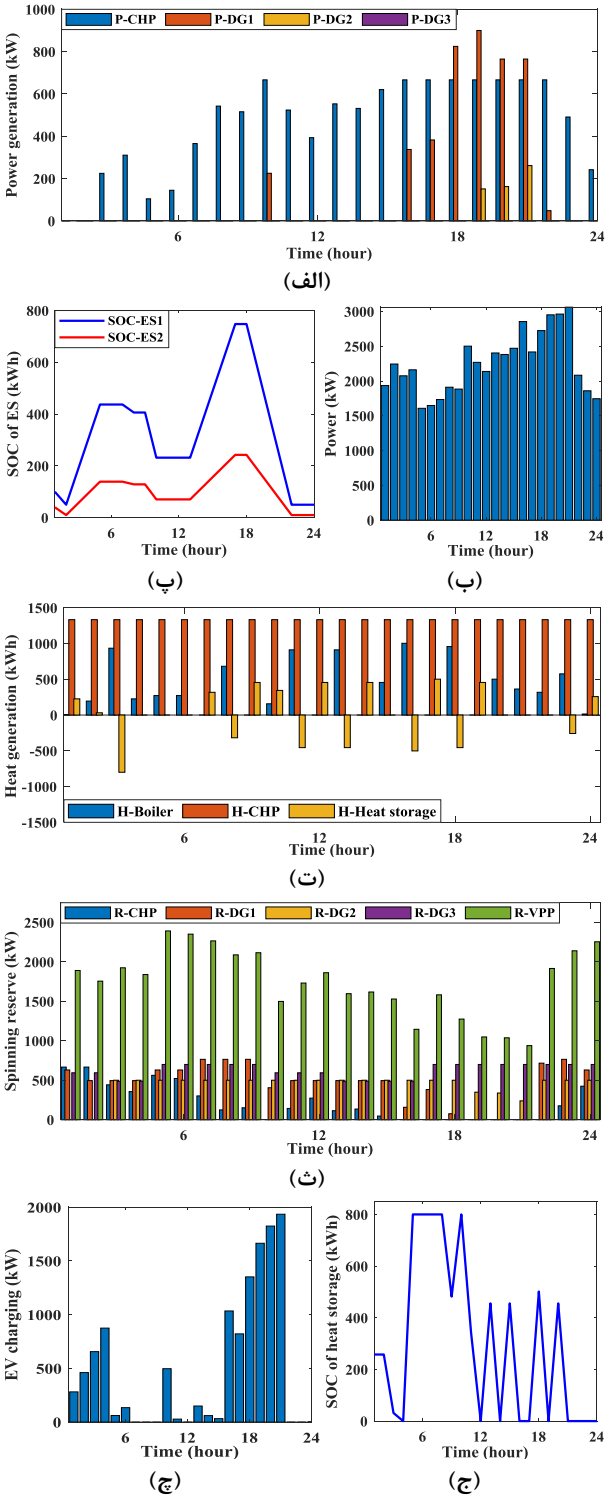
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

انرژی از شبکه بالادست توان خریداری نماید (شکل (۵)(ب)). همین موضوع سبب کاهش میزان مشارکت منابع تولید پراکنده و CHP در بازار انرژی برای مطالعه دوم نسبت به مطالعه اول شده است که در شکل (۵)(الف) ارائه شده است. شکل (۵)(پ) و شکل (۵)(ج) به ترتیب سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی را در طول ۲۴ ساعت برای مطالعه دوم نشان می‌دهند. شکل (۵)(ت) میزان گرمای تولید شده توسط واحد بویلر، CHP و ذخیره‌ساز حرارتی را برای تامین بار حرارتی نیروگاه مجازی نمایش می‌دهند. شکل (۵)(ث) میزان مشارکت واحد CHP، منابع تولید پراکنده و نیروگاه مجازی را در بازار رزرو چرخان نمایش می‌دهد. میزان شارژ خودروهای برقی در شکل (۵)(چ) برای این مطالعه آورده شده است.



شکل (۴): نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه اول. (الف) توان تولید شده توسط واحد CHP و واحدهای تولید پراکنده برای بازار انرژی؛ (ب) توان مبادله شده بین نیروگاه مجازی و شبکه بالادست؛ (پ) سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در مدت ۲۴ ساعت؛ (ت) میزان گرمای تولید شده در نیروگاه مجازی؛ (ث) سطح شارژ ذخیره‌ساز حرارتی؛ (ج) میزان شارژ خودروهای برقی در ساعات مختلف.

همچنین به منظور بررسی تأثیر شرکت نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان میزان جزییات سود و هزینه‌های نیروگاه مجازی برای مطالعات اول و دوم در جدول (۵) با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از نتایج جدول (۵) قابل مشاهده است زمانی که نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان شرکت می‌نماید سود آن به میزان ۲۰۱ دلار یعنی ۲۳ درصد افزایش پیدا می‌کند.



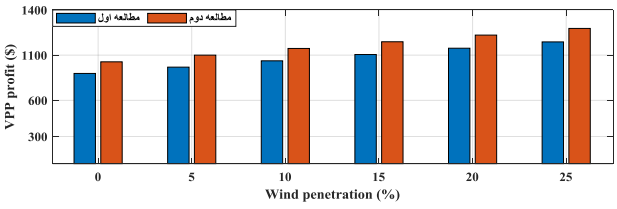
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه دوم. (الف) توان تولید شده توسط واحد CHP و واحدهای تولید پراکنده؛ (ب) توان مبادله شده بین نیروگاه مجازی و شبکه بالادست؛ (پ) سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در مدت ۲۴ ساعت؛ (ت) میزان گرمای تولید شده در نیروگاه مجازی؛ (ث) میزان شرکت واحد CHP، منابع تولید پراکنده و نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان؛ (ج) سطح شارژ ذخیره‌ساز حرارتی؛ (چ) میزان شارژ خودروهای برقی در ساعات مختلف.

جدول (۵): سود نیروگاه مجازی در روز ۳۰ نوامبر سال ۲۰۱۸

پارامتر	مطالعه اول	مطالعه دوم
سود کل نیروگاه مجازی	۸۷۷/۷۱	۱۰۷۹/۰۱
هزینه توان راکتیو	۱۳۵/۷۶	۱۳۵/۷۶
هزینه منابع تولید پراکنده	۱۳۹۹/۳۰	۱۴۷۴/۱۵
هزینه ذخیره‌ساز الکتریکی	۰/۶۵	۰/۶۷
هزینه توربین بادی	۲۱	۲۱
سود خرده‌فروشی برق	۴۳۹۸/۱۲	۴۳۹۷/۷۴
هزینه واحد CHP	۱۱۵۱/۲۴	۱۱۵۱/۲۴
سود شرکت در بازار رزرو چرخان	۰	۲۶۵۹/۷۹
سود/هزینه شرکت در بازار انرژی	-۸۱۲/۴۵	-۳۱۹۵/۶۹

همچنین، از آنجا که یکی از مهمترین اهداف نیروگاه مجازی کمک به افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، مساله بهینه‌سازی به ازای ضریب نفوذهای مختلف منابع تجدیدپذیر حل گردیده که نتایج آن در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود هر چه میزان نفوذ منابع بادی افزایش پیدا کرده است سود نیروگاه مجازی در مطالعه اول و دوم نیز افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده موثر بودن مفهوم نیروگاه مجازی در کنار استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در کمک به افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر است.



شکل (۶): میزان سود نیروگاه مجازی در مطالعه اول و دوم به ازای ضریب نفوذ مختلف منابع بادی.

مطالعه انجام شده در این مقاله، لزوم توجه به مفهوم نیروگاه مجازی در شبکه قدرت را نشان می‌دهد که علاوه بر هموار کردن ورود منابع DER در بازار انرژی (که به افزایش نفوذ این منابع در سیستم قدرت کمک می‌کند)، می‌تواند با استفاده از این منابع در بازار خدمات جانبی نیز شرکت نماید که هم برای سیستم قدرت و هم برای صاحبان منابع انرژی پراکنده به صرفه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل کاملی برای شرکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه و واحدهای تولیدی در قالب یک مسئله MILP ارائه شد. همچنین در این مقاله شارژ خودروهای برقی که جزو بارهای مهم در سیستم قدرت هستند با توجه به قیمت خرده‌فروشی برق انجام گردید. ویژگی مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله در نظر گرفتن منابع مختلف با مدل‌سازی دقیق محدودیت‌های آنها در قالب یک مسئله MILP است که دستیابی به جواب بهینه سراسری را در مسائل با سایز بزرگ تضمین می‌کند. در پایان، دو مطالعه برای نشان دادن تأثیر شرکت نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از منابع مختلف در ساختار نیروگاه مجازی، سود نیروگاه مجازی هم در بازار انرژی و هم رزرو چرخان افزایش پیدا می‌کند. همچنین سود نیروگاه مجازی با شرکت در بازار رزرو چرخان به میزان ۲۳ درصد نسبت به حالتی که تنها در بازار خدمات جانبی شرکت نمی‌کند افزایش پیدا می‌کند.

مراجع

[1] Z. Yi, Y. Xu, W. Gu, and W. Wu, "A Multi-time-scale Economic Scheduling Strategy for Virtual Power Plant Based on Deferrable Loads Aggregation and Disaggregation," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2019.

[2] R.-A. Hooshmand, S. M. Nosratabadi, and E. Gholipour, "Event-based scheduling of industrial technical virtual power plant considering wind and market prices stochastic behaviors-A case study in Iran," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1748–1764, 2018.

[3] Q. Zhao, Y. Shen, and M. Li, "Control and bidding strategy for virtual power plants with renewable generation and inelastic demand in electricity markets," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 562–575, 2016.

[4] J. Hu, Y. Liu, and C. Jiang, "An optimum bidding strategy of CVPP by interval optimization," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, 2018.

[5] M. Zajc, M. Kolenc, and N. Suljanović, "Virtual power plant communication system architecture," in *Smart Power Distribution Systems*, Elsevier, 2019, pp. 231–250.

[6] M. J. Kasaei, M. Gandomkar, and J. Nikoukar, "Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant," *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 1180–1188, 2017.

[7] L. Ju, Q. Tan, Y. Lu, Z. Tan, Y. Zhang, and Q. Tan, "A CVaR-robust-based multi-objective optimization model and three-stage solution algorithm for a virtual power plant considering uncertainties and carbon emission allowances," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 107, pp. 628–643, 2019.

[8] G. Chen and J. Li, "A fully distributed ADMM-based dispatch approach for virtual power plant problems," *Appl. Math. Model.*, vol. 58, pp. 300–312, 2018.

[9] H. Barati and F. Ashir, "Managing and Minimizing Cost of Energy in Virtual Power Plants in the Presence of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Considering Demand Response Program," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 568–579, 2018.

[10] S. Hadayeghparast, A. S. Farsangi, and H. Shayanfar,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

"Day-ahead stochastic multi-objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant," *Energy*, vol. 172, pp. 630–646, 2019.
[11] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, S. Jadid, and A. Kazemi, "Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 608–620, 2016.
[12] P. Karimyan, M. Abedi, S. H. Hosseinian, and R. Khatami, "Stochastic approach to represent distributed energy resources in the form of a virtual power plant in energy and reserve markets," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 8, pp. 1792–1804, 2016.
[13] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 949–956, 2011.
[14] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Risk assessment of virtual power plants offering in energy and reserve markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 3572–3582, 2016.
[15] A. Shayegan Rad, A. Badri, A. Zangeneh, and M. Kaltschmitt, "Risk- based optimal energy management of virtual power plant with uncertainties considering responsive loads," *Int. J. Energy Res.*, 2019.
[16] M. Shabanzadeh, M.-K. Sheikh-El-Eslami, and M.-R. Haghifam, "The design of a risk-hedging tool for virtual power plants via robust optimization approach," *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 766–777, 2015.
[17] A. Shayegan-Rad, A. Badri, and A. Zangeneh, "Day-ahead scheduling of virtual power plant in joint energy and regulation reserve markets under uncertainties," *Energy*, vol. 121, pp. 114–125, 2017.
[18] A. Soroudi, *Power System Optimization Modeling in GAMS*. Springer, 2017.
[19] N. Norouzi, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Ghazanfari, M. Alinaghian, and A. Salamatbakhsh, "A new multi-objective competitive open vehicle routing problem solved by particle swarm optimization," *Networks Spat. Econ.*, vol. 12, no. 4, pp. 609–633, 2012.
[20] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, "System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 398–407, 2010.
[21] H. Shayan and T. Amraee, "Network Constrained Unit Commitment Under Cyber Attacks Driven Overloads," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2019.
[22] Z. Liang, Q. Alsafasfeh, T. Jin, H. Pourbabak, and W. Su, "Risk-Constrained Optimal Energy Management for Virtual Power Plants Considering Correlated Demand Response," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2017.
[23] S. You, C. Træholt, and B. Poulsen, "Developing virtual power plant for optimized distributed energy resources operation and integration," 2010.
[24] B. Vatandoust, A. Ahmadian, M. A. Golkar, A. Elkamel, A. Almansoori, and M. Ghaljehei, "Risk-Averse Optimal Bidding of Electric Vehicles and Energy Storage Aggregator in Day-ahead Frequency Regulation Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2018.
[25] H. Jahangir *et al.*, "A Novel Electricity Price Forecasting Approach Based on Dimension Reduction Strategy and Rough Artificial Neural Networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, p. 1, 2019.
[26] M. Sedghi, A. Ahmadian, E. Pashajavid, and M. Aliakbar-Golkar, "Storage scheduling for optimal energy management in active distribution network considering load, wind, and plug-in electric vehicles uncertainties," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, p. 33120, 2015.
[27] H. Jahangir *et al.*, "Charging Demand of Plug-in Electric Vehicles: Forecasting Travel Behavior Based on a Novel Rough Artificial Neural Network Approach," *J. Clean. Prod.*, 2019.
[28] "CAISO Open Access Same-Time Information System (OASIS). Accessed on May 2016. [Online]. Available: http://oasis.caiso.com/mrioasis/logon.do." .

فهرست لغات

پارامترها :

a_g, b_g, c_g	ضرایب مربوط به هزینه سوخت DG ها
a_w	ضریب هزینه بهره‌برداری نیروگاه بادی ($/kWh)
BC_i	ظرفیت باتری خودروها (kWh)
C_{deg}	ضریب هزینه فرسودگی ($/kW)
CR_i	ظرفیت شارژر خودروهای برقی (kW)
$EF_{e,g}$, $EF_{e,c}$	ضریب آلودگی DG و CHP ($/lb)
$f_c^{Boiler,MAX}$, $f_c^{CHP,MAX}$	حداکثر میزان سوخت ورودی بویلر و CHP (kW)
$G_{b,l}$, $B_{b,l}$	سوسپتانس و کنداکتانس خط bl (p.u)
H_t^D	بار حرارتی نیروگاه مجازی (kWh)
$H_C^{S,MAX}$	حداکثر ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی (kWh)
$P_g^{DG,MIN}$,$P_g^{DG,MAX}$	حداقل و حداکثر میزان تولید DG ها (kW)
$P_{b,t}^{Load}$, $Q_{b,t}^{Load}$	میزان بار اکتیو (kW) و راکتیو (kVar) مسکونی در هر ساعت و در هر باس
$P^{N,MAX}$	محدودیت حداکثر میزان تبادل توان بین نیروگاه مجازی و شبکه بالادست (kW)
$P_s^{MAX,CH}$, $P_s^{MAX,DCH}$	حداکثر مقدار شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی (kW)
Pwt_w^{max}	توان بیشینه توربین بادی (kW)
$Q_g^{DG,MIN}$, $Q_g^{DG,MAX}$	حداقل و حداکثر میزان توان راکتیو تولیدی توسط DG ها (kVar)
Sbase	توان ظاهری مبنا (kVA)
$SL_{b,l}^{max}$	حداکثر میزان توان ظاهری خطوط (kVA)
$SOC_s^{ES,MIN}$, $SOC_s^{ES,MAX}$	حداقل و حداکثر سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی (kWh)
SUC_g, SDC_g	هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها ($)
V_b^{min}, V_b^{max}	حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ باس‌ها (p.u)
α_e	ضریب هزینه آلودگی منابع (lb/kWh)
ϑ_w	سرعت باد (m/s)
$\vartheta_{w,cutin}$	سرعت قطع پایین[15] توربین بادی (m/s)
$\vartheta_{w,cutout}$	سرعت قطع بالا[16] توربین بادی (m/s)
$\vartheta_{w,rated}$	سرعت نامی توربین بادی (m/s)
Δt	بازه زمانی برنامه‌ریزی (ساعت)
η_c^{Boiler}	بازده بویلر
$\eta_s^{ES,CH}$, $\eta_s^{ES,DCH}$	بازده شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$\eta_s^{EV,CH}$	بازده شارژ خودروهای برقی
$\xi_{b,l,t}$	ضریب پخش بار خطی
ρ_t^E, ρ_t^{RAC}	قیمت توان اکتیو و راکتیو در بازار انرژی ($/kWh)
ρ^{NG}	قیمت گاز طبیعی ($/kWh)
ρ_t^{RE}	قیمت خرده‌فروشی برق ($/kWh)
ρ_t^{RES}	قیمت توان اکتیو در بازار رزرو چرخان ($/kWh)
φ_i^{EV}	زاویه فاز شارژ خودروهای برقی

متغییرها:

$C_{g,t}^{DG}$, $C_{w,t}^{WT}$, $C_{c,t}^{CHP}$	تابع هزینه DG، توربین بادی و واحد CHP ($)
$DEG_{s,t}^{ST}$	هزینه فرسودگی ذخیره‌ساز الکتریکی ($)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]

$EC_{g,t}^{DG}$, $EC_{c,t}^{CHP}$	هزینه آلودگی DG و CHP ($)
$f_{c,t}^{Boiler}$, $f_{c,t}^{CHP}$	میزان سوخت مصرفی توسط بویلر و CHP (kW)
$H_{c,t}^{Boiler}$, $H_{c,t}^{CHP}$	میزان حرارت تولیدی توسط بویلر و CHP (kWh)
$H_{c,t}^{f}$	فلوی حرارت تولیدی ذخیره‌ساز حرارتی (kWh)
$H_{c,t}^{s}$	میزان حرارت ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز حرارتی (kWh)
$P_{s,t}^{CH}$,$P_{s,t}^{DCH}$	میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در هر ساعت (kW)
$P_{b,t}^{D}$, $Q_{b,t}^{D}$	میزان بار اکتیو (kW) و راکتیو (kVar) در هر باس و هر ساعت
$P_{g,t}^{DG}$,$P_{s,t}^{ST}$, $P_{i,t}^{EV}$, $P_{w,t}^{WT}$, $P_{c,t}^{CHP}$	میزان شرکت DG، ذخیره‌ساز، خودروی برقی، توربین بادی و CHP در بازار انرژی (kW)
P_{t}^{E}, Q_{t}^{E}	میزان مشارکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی
P_{t}^{RES}	میزان مشارکت نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان (kW)
$\mathrm{PG_{b,t}}$, $\mathrm{QG_{b,t}}$	میزان توان اکتیو (kW) و راکتیو (kVar) تولید شده در هر باس و هر ساعت
$PL_{b,l,t}$, $QL_{b,l,t}$, $SL_{b,l,t}$	فلوی توان اکتیو (kW)، راکتیو (kVar) و ظاهری (kVA) خطوط
$\mathrm{Q_{g,t}^{DG}}$	میزان توان راکتیو تولیدی توسط DG (kVAr)
$R_{g,t}^{DG}$, $\mathrm{R_{c,t}^{CHP}}$	میزان مشارکت DG و CHP در بازار رزرو چرخان (kW)
$SOC_{s,t}^{ES}$, $SOC_{i,t}^{EV}$	سطح شارژ ذخیره‌ساز و خودرو در هر ساعت (kWh)
$u_{g,t}$	متغییر باینری تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن DG ها
$u_{s,t}^{ES,CH}$, $u_{s,t}^{ES,\mathrm{DCH}}$	متغییر باینری تعیین وضعیت شارژ و دشارژ باتری
$\mathrm{V_{b,t}}$, $\mathrm{\theta_{b,t}}$	دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها (p.u)
اندیس‌ها :	
$A_i \subset t$	ساعت‌هایی که هر خودرو در دسترس است
e	اندیس نوع آلودگی (NO_x یا CO_2 یا SO_2)
i, g, w, s, c	اندیس خودرو، DG، توربین بادی، ذخیره‌ساز و واحد CHP
$b\ l,$	اندیس باس‌ها
t	اندیس زمان
t_i^{dep}	زمان خروج خودروها

زیرنویس‌ها

[1] Passive network
[2] Distributed energy resource
[3] Virtual power plant
[4] Commercial virtual power plant
[5] Technical virtual power plant
[6] Dispatchable distributed generation
[7] Mixed-integer nonlinear programming
[8] Combined heat and power
[9] Spinning reserve
[10] Conditional value-at-risk
[11] Gaussian support vector machine
[12] Mixed-integer linear programming
[13] Ramp rates
[14] State of charge
[15] California Independent System Operator

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.6.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.60]