ارزیابی راهبرد بهینه پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار برق با ملاحظه پاسخگویی بار و عدم قطعیت ها

محمود اکبری[۱]، محمد تبریزیان* [۲]، حمیدرضا شاهمیرزاد [۳]

۱- کارشناس ارشد برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*۲- استادیار گروه برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
mm_tabrizian@yahoo.com
۳- کارشناس ارشد برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
hr.shahmirzad@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۳۰

چکیده: یکی از دستاوردهای تجدید ساختار صنعت برق، ایجاد فضای رقابتی در بخش تولید برق بوده که در آن مجموعه‌ای از واحدهای تولید مقیاس کوچک به همراه بارها و شبکه تحت پوشش که توسط یک نهاد معین اداره می شود و به نیروگاه مجازی موسوم است، می‌تواند در بازار عمده‌فروشی انرژی و ذخیره چرخان حضور فعال داشته باشد. در این مقاله، چارچوب جدیدی برای برنامه‌ریزی راهبرد بهینه مشارکت نیروگاه‌های مجازی در بازارهای انرژی و ذخیره ارائه می شود و در آن قیمت‌های برق بازار عمده‌فروشی، خرده‌فروشی، ذخیره مورد نیاز و دوره زمانی از جمله پارامترهای مهم هستند. جهت حل مسئله بهینه‌سازی حاصله، از الگوریتم وراثت(ژنتیک) استفاده شده است. عدم قطعیت‌های حاکم بر قیمت عمده‌فروشی و پیش‌بینی نیاز مصرف در منطقه تحت پوشش نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی آنها به ترتیب از توابع توزیع احتمال نرمال لگاریتمی و نرمال استفاده شده و جهت تحقق پارامترهای غیرقطعی از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی این مقاله که توسط نرم افزار متلب صورت گرفته است، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ابزار توانمند و مناسبی جهت تدوین راهبرد بهینه پیشنهاددهی تولید نیروگاه مجازی در بازار برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های واحدهای بادی و خورشیدی و همچنین تعامل مناسب با مصرف‌کنندگان با ملاحظه پاسخگویی بار است.

واژه‌های کلیدی: بازار برق، پیشنهاددهی، نیروگاه مجازی، پاسخگویی بار، عدم قطعیت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

$Loos_{E,t}$	تلفات توان VPP اگر پیشنهاد جهت رزرو چرخان برای تولید فراخوان نشود	$Load_{ER,t}$	بار تامین شده ی VPP اگر پیشنهاد مزایده جهت رزرو چرخان بازار برای تولید فراخوان شود.
$S_{hour,i}$	تنظیمات مجاز ساعت(زمان) که ممکن است اگر قطعی بار لازم باشد، قطع شود	$Loss_{ER,t}$	تلفات توان VPP اگر پیشنهاد جهت رزرو چرخان برای تولید فراخوان شود.
t	شاخص زمان	$i\ , j$	شاخص های باس ها
S_b	تنظیم شاخه های VPP	S_{dg}	تنظیم DG ها
S_{int}	تنظیم بارهای قطع شده	$P_{curt,i,t}$	بار تامین نشده برای تبادل در بازار برق.
S_{str}	تنظیم ذخائر الکتروشیمیایی	$P_{\mathrm{dg,i,t}}$	تولید DG برای بازار برق
S_n	تنظیم منحنی(گره) VPP	$P_{g,i,t}$	مجموع تولید توان واقعی در گره (مسیر حرکت)
$J_{i.t}$	مقادیر باینری نشان دهده ی راه اندازی DG	$P_{i,t}$	تزریق توان واقعی به گره i.
E_t	پیشنهاد VPP برای بازار انرژی	$P_{str,i,t}$	مقدار ظرفیت شارژ / دشارژ ذخیره کننده الکتروشیمیایی در ساعت در کیلو وات
$\theta_{i,t}$	زاویه ولتاژ در گره i	$Q_{\mathrm{g,i,t}}$	توان راکتیو تولیدی در گره i
$I_{i,t}$	مقادیر باینری نشان دهده ی حالت مشارکت یک DG	$K_{i,t}$	مقادیر باینری نشان دهده ی خاموش شدن DG
AR_k	برقراری رزرو مناسب توسط VPP	$R_{curt,i,t}$	بار تامین نشده برای ارائه سرویس رزرو چرخان.
$LOAD_t$	مجموع بار پیش بینی شده ی VPP	$R_{dg,i,t}$	تولید DG برای رزرو چرخان بازار.
$Q_{i,t}$	مجموع توان راکتیو تزریقی به گره i.	R_t	پیشنهاد VPP برای رزرو چرخان بازار
S_{ij}	شارش توان ظاهری از گره i به گره j	V_t	بردار دامنه ی ولتاژ.
$V_{i,t}$	دامنه ی ولتاژ در گره i	θ_t	بردار زاویه ولتاژ
$Load_{E,t}$	بار تامین شده VPP اگر پیشنهاد جهت رزرو چرخان و بازار برای تولید فراخوان نشود	E_{exch}^{max}	به میزان حرارتی اتصال ظرفیت ترانسفورماتور و یا ظرفیت قراردادی برای تبادل قدرت بین VPP و شبکه بالادست اشاره دارد
$Q_{d,i,t}$	توان ی توان راکتیو در گره i	$P_{d,i,t}$	توانی قدرت واقعی در گره i
MSR_i	قابلیت افزایش رزرو DG برحسب کیلو وات بر دقیقه	$P_{str,i}^{max}$	ظرفیت نصب شده ی ذخیره الکتروشیمیایی در کیلووات ساعت.
N_n	تعداد گره های VPP	$P_{curt,i}^{max}$	حد بالا برای قطع کردن بر روی بار قابل قطع
MUT_i	محدودیت حداقل زمان فعالیت و توقف DG در ساعت	$SC_{dg,i,t}$	هزینه های راه اندازی و خاموش کردن DG مرسوم
MDT_i		$SHC_{dg,i,t}$	
S_{ij}^{max}	ظرفیت خط بین گره i و گره j	$\rho_{R,t}$	قیمت بازار ذخیره چرخان
$R_{dgu,i}$	حدود افزایش و کاهش DG برحسب کیلو وات	$R_{str-ch,i}$	ماکزیمم میزان شارژ ودشارژ ذخیره الکتروشیمیایی در کیلووات
$R_{dgd,i}$	برساعت	$R_{str-dch,i}$	
$\rho_{E,t}$	قیمت بازار انرژی	$\rho_{L,t}$	نرخ انرژی خرده فروشیVPP
V_i^{max}	حداکثر و حداقل دامنه ولتاژ در گره i	$C_{str}(P_{srt,i,t})$	هزینه ی عملیاتی ذخیره ساز الکتروشیمیایی
V_i^{min}			
$P_{dg,i}^{min}$	حدود بالا و پایین در تولید DG.	$C_{dg,i,t}(P_{dg,i,t})$	تابع هزینه تولید DG
$P_{dg,i}^{max}$			
$T_{i,t}^{on}$	تعداد ساعاتی که واحدهای DG در t ساعت روشن / خاموش بوده اند	$C_{int,i,t}(P_{curt,i,t})$	منحنی هزینه ی قطعی مصرف کننده برای قطع کردن بار آن
$T_{i,t}^{off}$			

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

۱- مقدمه

با وقوع تجدید ساختار در صنعت برق، بخش های مختلف این صنعت تحت تاثیر قرارگرفته است. ساختار سیستم‌های قدرت در این فضای جدید از حالت یکپارچه با ساختار عمودی خارج شده و به بخش‌های مجزاو رقابتی تقسیم می شود که هر یک از این اجزا تحت مالکیت و بهره‌برداری نهادهای مستقل و در عین حال مرتبط قرار می گیرد. بهبود مدیریت شبکه قدرت از جمله مباحثی است که هم اکنون پیش روی تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران صنعت برق در بسیاری از کشورهای دنیا قرار دارد و ایده اصلی آن تغییر شکل ساختار این صنعت مطابق با روند افزایش کارایی و رقابت در دیگر صنایع است. مالکان نیروگاه مجازی بر طبق مدل انتخابی و پیشنهادی خود در بازار برق شرکت نموده و پیشنهادات خود را در دوره زمانی معین عرضه می‌نمایند. مدل مورد نظر در این پژوهش، الگوی اقتصادی برای ارائه پیشنهاد قیمت در بازار برق براساس یک مدل غیرتعادلی است. مدل غیرتعادلی جهت طراحی یک راهبرد(استراتژی) بهینه جهت پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار برق مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن، قیود مربوط به منابع بار تامین شده، قیود تعادل عرضه و توان و همچنین قیود امنیتی به عنوان قیود اصلی شبکه در نظر گرفته می‌شوند.

صنعت برق به عنوان یک صنعت زیربنایی در دهه‌های اخیر دستخوش تغییرات بنیادی گردیده است که از آن به عناوین مختلفی چون تجدید ساختار یا مقررات زدائی و یا خصوصی‌سازی، یاد می‌شود. در ساختار جدید صنعت برق برخلاف ساختار قدیم آن که مدیریت تولید، انتقال و توزیع، مدیریتی واحد بود، سیستم‌ها به صورت مستقل عمل می کنند و از حالت عملیاتی مرکزی به شکل رقابتی و تحت پوشش بازار برق تبدیل شده‌اند. چارچوب رقابتی در ساختار جدید صنعت برق که بمنظور ارتقاء کارایی عملیاتی سیستم قدرت بوجود آمده است، تأمین برق را با کیفیت مناسبی تضمین نموده و کمترین هزینه را برای مصرف کنندگان (کاربران) نهایی برق به همراه دارد.

ایده به‌کارگیری نیروگاه مجازی به عنوان یکی از اجزای اصلی تشکیل-دهنده شبکه برای سیستم‌های قدرت غیرمتمرکز که متشکل از منابع تولید پراکنده است، امکان بهره‌برداری بهینه مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده با بازده بالا و هم‌چنین امکان حضور آنها را در بازار برق فراهم می‌سازد. بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده موجب شده است تا ساختار متمرکز مدیریت مجموعه سیستم قدرت، تمایل به غیر متمرکز شدن مراکز مدیریت انرژی داشته باشد. در ایدهٔ نیروگاه مجازی چند سلول از سیستم قدرت با هم و به‌صورت یک گروه کنترل‌پذیر درآمده و به‌صورت یک مجموعه واحد در نظر گرفته می‌شوند که این مجموعه واحد می-تواند به عنوان یک واحد نیروگاهی مستقل در بازار برق ظاهر شود تا هم سود خود را بیشینه و هم عملکرد بهینه سیستم قدرت را به دنبال داشته باشد.

در ادامه مقاله و بخش دوم آن به پیشینه تحقیق و مطالعات گذشته و مباحث مرتبط پرداخته شده است. در بخش سوم مدل‌سازی مسئله راهبرد بهینه مشارکت نیروگاه مجازی در بازار برق ارائه خواهد شد و همچنین مدل‌سازی عدم قطعیت ها با استفاده از توابع چگالی نرمال لگاریتمی و نرمال صورت خواهد گرفت. باتوجه به اعمال متغیرهای تصادفی و احتمالی از شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور تاثیر این متغیرها بر استراتژی نیروگاه مجازی جهت شرکت در بازار برق استفاده شده است. در بخش چهارم به نتایج شبیه‌سازی مطالعات موردی و ارزیابی آنها پرداخته خواهد شد. در این مقاله شبیه‌سازی‌ها هم برای بازار انرژی و هم برای بازار رزرو انجام شده است. به این نحو که در ابتدا شبیه‌سازی برای بازار انرژی بدون ملاحظه عدم قطعیت و تحت عنوان شبکه مبنا و سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها شکل گرفته و در ادامه نحوه حضور نیروگاه مجازی در بازار رزرو(ضمن در نظر گرفتن بازار انرژی) تحلیل شده و نهایتا در بخش پنجم مقاله، نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم بیان شده است.

۱- کلیات و پیشینه تحقیق

یک نیروگاه مجازی(VPP) یک مفهوم عملی اســت که منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف را برای بهبود بهره‌وری مدیریت انرژی و تســهیل تجارت انرژی تجمیع می‌کند. برنامه‌ریزی عملیات برای همه اجزای انرژی در VPPs نقش حیاتی از دیدگاه مدیریت انرژی ایفا می‌کند. محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های فنی و اقتصادی که به طور قابل‌توجهی بر برنامه زمان‌بندی تاثیر می‌گذارند باید به طور همزمان در نظر گرفته شوند. با توجه به زمینه‌های علمی مطالعات مربوط به VPPs، خلاهای پژوهشی درباره فنون بهینه‌سازی، تحلیل فن‌آوری-اقتصادی مشترک و تاثیر عدم قطعیت‌ها عمدتا برر سی شده ا ست[۱]. در[۲] یک مطالعه جامع در مورد پیاده‌سازی منابع انرژی توزیع‌شده مختلف(DERs) در ســاختار VPP با در نظر گرفتن رفتار بســیار تصــادفی آن‌ها ارائه شــده‌اســت که یک رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق بر روی شــبکه حافظه بلندمدت دو جهته(BLSTM) بنا شــده اســت، برای کنترل عدم قطعیت در راهبرد(اســتراتژی) پیشــنهاددهی بهینه یک نیروگاه مجازی(VPP) به کار گرفته می‌شود که استراتژی مناقصه بهینه یک VPPبرای مشــارکت در بازارهای ذخیره انرژی ارائه شــده اســت. این منابع مزایای زیادی را برای محیط‌زیســت به ارمغان می‌آورند؛ با این حال، به دلیل ظرفیت پایین، نمی‌توانند به طور مســتقل در بازار برق شرکت کنند. علاوه بر این، RES و EV ها رفتار ت صادفی ب سیاری دارند، که عدم قطعیت قابل‌توجهی را در تولید RES و پروفیل های رفتار EV ها تحمیل می‌کند. این چالش‌ها را می توان با اســتفاده از مفهوم نیروگاه مجازی(VPP) مورد بررســی قرار داد. عدم قطعیت در پارامترهای تصــادفی این ســیســتم، از جمله عدم قطعیت مربوط به تقاضای بار، قیمت برق و سرعت باد، با استفاده از یک رویکرد یادگیری عمیق براســاس شــبکــه‌هــای حــافظــه بلنــد مــدت دو طرفــه (BLSTM)کنترل شــده اســت. در مرجع[۳] نکات برجســته کاربرد مدل‌های VPP در بازارهای برق مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

گرفته است. مزایا و محدودیت‌های روش‌های بهینه‌سازی برای مدل‌های مختلف VPP مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیب استراتژی‌های خرید و فروش متعدد برق یک چالش آینده است. در سال‌های اخیر، ادغام تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت با استراتژی‌های جدید مدیریت ساختمان همراه شده‌است. بنابراین، افزایش قابلیت‌های مدیریتی با توجه به تجمع تولید پراکنده برق و تقاضا از طریق انواع مختلف نیروگاه‌های مجازی(VPPs) به طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا کرده است. این مرجع بر مرور طبقه‌بندی و تحلیل عمیق مطالعات اخیر تمرکز دارد که مدل‌های VPP شامل تعامل با انواع مختلف بازارهای انرژی را پیشنهاد کرده است. این طبقه‌بندی با توجه به مهم‌ترین جنبه‌هایی که باید برای این VPP ها در نظر گرفته شود، تقسیم‌بندی شده است. این موارد شامل نحوه فرمول‌بندی مدل، تکنیک‌های حل مسائل ریاضی، مشارکت در انواع مختلف بازارها و کاربرد مدل‌های پیشنهادی در مطالعات موردی واقعی است. از تجزیه و تحلیل مطالعات، نتیجه گرفته می‌شود که جدیدترین مدل‌ها علاوه بر ملاحظه تنوع بیشتر در انواع بازارهای برق شامل VPPs ، کامل‌تر و واقع گرایانه تر هستند. هدف از این بررسی شناسایی سودآورترین طرح VPP است که باید در هر محیط نظارتی اعمال شود. همچنین چالش‌های باقی مانده در این زمینه از مطالعه را برجسته می‌کند. در مرجع[۴] استراتژی حراج یک نیروگاه مجازی(VPP) را در بازار خدمات تنظیم و انرژی مورد مطالعه قرار داده است. بهره‌برداری از منابع انرژی توزیع‌شده(DER) و ذخیره انرژی باتری در داخل VPP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است. استراتژی حراج VPP شامل قرارداد رزرو چرخان و قرارداد پیشنهادی حراج روز-پیش مورد بررسی قرار گرفته‌است. یک مدل بهینه سازی قوی دو مرحله‌ای برای تعیین قدرت خرید و فروش VPP در هر قرارداد برای به حداکثر رساندن سود VPPپیشنهاد شده‌است. عدم قطعیت در DER و تقاضا در چارچوب بهینه سازی در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی به یک VPP کوچک شامل سیستم فتوولتائیک(PV) ، ذخیره انرژی باتری(BESS) مجهز به یک مشتری اعمال می‌شود. در مرجع[۵] عدم قطعیت‌های عمده VPP به طور جامع طبقه‌بندی و بررسی شده است که توان تجدید پذیر، قیمت بازار و تقاضای بار به عنوان عوامل اصلی عدم قطعیت طبقه‌بندی شده‌اند و بررسی جامعی از این سه عامل ارائه شده‌است. براساس طبقه‌بندی، توصیف دقیق مدل ریاضی خلاصه شده و سپس اهداف و محدودیت‌های بهینه‌سازی که برای بهبود عملکرد اجرایی VPP با عدم قطعیت اتخاذ شده‌اند، به صورت سیستماتیک جمع می‌شوند، همچنین رویکردها و ابزارهای حل بهینه‌سازی ارائه شده و در نهایت، مطالعات موردی معرفی شده‌اند. در مرجع[۶] به استراتژی ارائه یک نیروگاه مجازی (VPP) می پردازد که در بازارهای انرژی و ذخیره شرکت می کند. VPP به عنوان یک بازیگر قیمت‌ساز رفتار نموده و تصمیمات پیشنهادی خود را یک روز قبل تعیین می‌کند. بنابراین، مشکل تصمیم‌گیری به شدت تحت‌تاثیر عوامل مختلف عدم قطعیت است، از جمله سطوح تولید منابع تجدیدپذیر، ضرایب تقاضای ذخیره بالا/پایین، و قیمت‌های انرژی ذخیره بالا/پایین، که همگی با استفاده از تعدادی سناریو نشان داده می شوند. هدف از مشکل سطح بالا بیشینه‌سازی سود مورد انتظار VPP در حین رعایت محدودیت‌های فنی واحدهای موجود در VPP برای تحقق هر سناریو است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که VPP می‌تواند سود خود را با رفتار به عنوان یک عامل قیمت‌ساز در بازارهای انرژی و ذخیره افزایش دهد. در مرجع[۷]، مدلی برای تدوین استراتژی پیشنهاددهی تولید VPP به بازار عمده فروشی برق ارائه شده است که در آن مسئله بهینه سازی موردنظر، یک مسئله برنامه‌ریزی مشارکت مبتنی بر سود واحدهای تولید(PBUC) می باشد، ضمن اینکه قید توازن عرضه و توان و قیود امنیت VPP نیز در مسئله در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است در مدل اشاره شده قیمت‌های بازار در دوره مورد مطالعه به‌عنوان اطلاعات ورودی بدون خطای پیش‌بینی فرض می‌شود. به عبارت دیگر استراتژی‌های VPP در غیاب عدم قطعیت در قیمت و توان پیش‌بینی شده، لحاظ شده است. در مرجع[۸] به نحوه قیمت‌دهی نیروگاه گیرنده قیمت با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت اشاره شده است. جهت مدل سازی عدم قطعیت، از تابع چگالی احتمال استفاده شده است. در این روش، ضرورت بررسی قیمت‌دهی به گونه‌ای است که بازار به صورت روزانه در نظر گرفته می شود و تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان منحنی پیشنهاد خود را به صورت ساعتی، در بلوک‌های انرژی و قیمت عرضه می‌نمایند. نحوه قیمت گذاری VPP باید ویژگی های یک قیمت‌گذاری مناسب را در سیستم قدرت دارا باشد. علاوه بر آن، این روش قیمت‌گذاری باید انگیزه لازم برای هدایت شرکت‌کنندگان بازار به سوی کاهش هزینه عملکرد سیستم در آینده را فراهم نماید. معمولا فرض می شود که قیمت‌دهی بازار به صورت روزانه است و تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان منحنی پیشنهاد خود را به صورت ساعتی ارائه می‌نمایند. بازار برق مورد نظر در این مطالعه مشتمل بر بازارهای انرژی و ذخیره گردان(چرخان) بوده که نیروگاه مجازی مورد بحث به عنوان بازیگر پیشنهاددهنده قیمت در آن مشارکت می‌کند. در مرجع[۸] تنها از عدم قطعیت قیمت جهت مدل سازی و پیشنهاددهی تولید نیروگاه مجازی استفاده شده است و عدم قطعیت سایر پارامترها لحاظ نشده است، همچنین ملاحظات مربوط به احتمال دستکاری قیمت‌ها توسط شرکت‌های تولید برق و اعمال قدرت بازار نیز درنظر گرفته نشده است.

۲- نحوه مدل‌سازی

یکی از مدل‌های توسعه یافته برای طراحی راهبرد پیشنهاددهی نیروگاه‌ها، مدل PBUC (برنامه‌ریزی مبتنی بر سود و یا مبتنی بر قیمت مشارکت واحدهای تولید) است[۹-۱۲].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

$$\begin{cases} E_t + \sum_{i\in S_{dg}} P_{dg,i,t} - \eta_{str} \sum_{i\in S_{str}} P_{str,i,t} = Load_{E,t} + Loss_{E,t} \\ Load_{E,t} + \sum_{\substack{i\in S_{int} \\ t\in S_{hour,i}}} P_{curt,i,t} = LOAD_t \qquad \forall t = 1:24 \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} E_t + R_t + \sum_{i\in S_{dg}} P_{dg,i,t} + \sum_{i\in S_{dg}} R_{dg,i,t} - \eta_{str} \sum_{i\in S_{str}} P_{str,i,t} = Load_{ER,t} + Loss_{ER,t} \\ Load_{ER,t} = Load_{E,t} - \sum_{\substack{i\in S_{int} \\ t\in S_{hour,i}}} R_{curt,i,t} \qquad \forall t = 1:24 \end{cases} \quad (۲)$$

برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید یک رویکرد مناسب برای پیشنهاددهی در بازارهای متعدد(انرژی و خدمات جانبی) است و می‌تواند تاثیرات زمانی و متغیرهای عدد صحیح مانند حداقل زمان فعالیت/توقف و بسیاری از محدودیت‌های تولید را در نظر گیرد. مساله مورد نظر در این پژوهش، برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولیدی(PBUC) است که توسط VPP در یک دوره زمانی معین (۲۴ ساعته) با وجود پاسخگویی بار و عدم قطعیت‌ها در بازار برق لحاظ می-شود. در این مطالعه مقدار قیمت و میزان تولید هر دو دارای عدم قطعیت است و از توابع احتمال نرمال لگاریتمی و نرمال جهت مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. از روش مونت کارلو نیز جهت بررسی تاثیر متغیرهای احتمالی مورد نظر بر نحوه راهبرد نیروگاه مجازی استفاده شده است، همچنین شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین توزیع آماری سود، پیشنهاد تولید VPP به بازار انرژی، پیشنهاد تولید VPP به بازار رزرو، میزان تولید DG، ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز و دیگر پارامترها استفاده شده است. تابع هدف مساله، بیشینه‌سازی سود VPP جهت شرکت در بازار برق با در نظر گرفتن قیود مختلف مربوطه است. از ویژگی‌های مهم این تحقیق می‌توان به ملاحظه عدم قطعیت‌ها به‌ویژه در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان علاوه بر عدم قطعیت قیمت انرژی اشاره نمود.

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف مساله بیشینه کردن سود VPP جهت شرکت در بازار برق با در نظر گرفتن قیود مربوطه است:

$$\begin{aligned} Max\ Benefit\ =\ & -\sum_{t=1:24} \rho_{E,t} \times E_t + \sum_{t=1:24} \rho_{R,t} \times R_t + \sum_{t=1:24} \rho_{L,t} \times \\ & Load_t - \sum_{i\ \epsilon\ S_{dg}} \Big(C_{dg,i,t}\big(P_{dg,i,t} + \\ & R_{dg,i,t}\big).I_{i,t} + SC_{dg,i,t}.J_{i,t} + \\ & SHC_{dg,i,t}.K_{i,t} - \\ & \sum_{\substack{i\in S_{int} \\ t\in S_{hour,i}}} C_{int,i,t}\big(P_{curt,i,t} + R_{curt,i,t}\big) - \\ & \sum_{i\in S_{str}} C_{str,i,t}\big(P_{str,i,t}\big) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$Load_t = LOAD_t - \sum_{\substack{i\in Sint \\ t\in Shour}} \big(P_{curt,i,t} + R_{curt,i,t}\big) \quad (۴)$$

۳-۲- قیود (محدودیت‌ها)

۳-۲-۱- قیود توازن عرضه و تقاضا

اگر در حراج رزرو چرخان برای تولید فراخوان نشود از رابطه(۱) استفاده نموده و اگر حراج رزرو چرخان جهت تولید فراخوان شود، از رابطه (۲) استفاده خواهد شد.

۳-۲-۲- قیود واحد تولید پراکنده (DG)

$$P_{dg}, i_{min}.I_{i,t} \le P_{dg,i}, t \le P_{dg}, i_{max}.I_{i,t} \quad (۵)$$

$$R_{i,t}\, I_{i,t} \le min\{10 \times MSR_i, P_{dg}, i_{max} - P_{dg,i}, t\} \quad (۶)$$

$$P_{dg,i}, t+1 - P_{dg,i}, t \ge R_{dgu,i}\ ;\ \forall i \in S_{dg},\ \forall t = 1:24 \quad (۷)$$

$$P_{dg,i}, t - P_{dg}, i, t+1 \ge R_{dgd,i}\ ;\ \forall i \in Sdg,\ \forall t = 1:24 \quad (۸)$$

$$[Ti, t-1^{on} - MUT_i] \times [I_i, t - 1 - I_i, t] \ge 0\ ;\ \forall i \in S_{dg},\ \forall t = 1:24 \quad (۹)$$

$$[Ti, t-1^{off} - MDT_i] \times [I_i, t - 1 - I_i, t] \ge 0\ ;\ \forall i \in S_{dg},\ \forall t = 1:24 \quad (۱۰)$$

$$\begin{cases} I_{i,t} - I_{i,t-1} \le J_{i,t} \\ I_{i,t-1} - I_{i,t} \le K_{i,t} \\ I_{i,t} - I_{i,t-1} \le J_{i,t} - K_{i,t} \end{cases} \quad (۱۱)$$

۳-۲-۳- قیود سیستم ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی

$$-(\mathrm{cap}_{0,i} - P_{str,i}^{min}) \le \sum_{k=1}^{t} P_{str,i,k} \le P_{str,i}^{max} - \mathrm{cap}_{0,I}\ ;\quad \forall i \in S_{str},\ \forall t = 1,2,\ldots,24 \quad (۱۲)$$

اگر ذخیره‌ساز شارژ شده باشد:

$$P_{str,i,t} \le R_{str-ch,i}\ ;\quad \forall i \in S_{str},\ \forall t = 1,2,\ldots,24 \quad (۱۳)$$

اگر ذخیره‌ساز تخلیه(دشارژ) شده باشد:

$$-P_{str,i,t} \le R_{str-ch,i}\ ;\quad \forall I \in S_{str},\ \forall t = 1,2,\ldots,24 \quad (۱۴)$$

۳-۲-۴-قیود بارهای قابل قطع

$$0 \le P_{curt,i,t} \le P_{curt}^{max} \quad \forall I \in S_{int},\ \forall t \in S_{hour} \quad (۱۵)$$

$$0 \le P_{curt,i,t} + R_{curt,i,t} \le P_{curt}^{max} \quad \forall i \in S_{int},\ \forall t \in S_{hour} \quad (۱۶)$$

۳-۲-۵- قیود امنیت حالت ماندگار VPP

$$P_{i,t}(\theta t, V_t) - P_{g,i,t} + P_{d,i,t} = 0\ ,\ t = 1:24 \quad (۱۷)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

$$Q_{i,t}(\theta t\ , V_t) - Q_{g,i,t} + Q_{d,i,t} = 0\ ,\ t = 1:24 \quad (۱۸)$$

$$S_{ij,t}(\theta t\ , V_t) \le S_{ij}{}^{max};\ \forall ij \in S_b,\quad t = 1:24 \quad (۱۹)$$

$$V_i{}^{min} \le V_{i,t} \le V_i{}^{max}\ ;\ \forall i \in S_n,\quad t = 1:24 \quad (۲۰)$$

اگر پیشنهاد رزرو چرخان برای تولید فراخوان نشود:

$$|Et| \le E_{exch}{}^{max}\ ,\ \forall t = 1:24 \quad (۲۱)$$

اگر پیشنهاد رزرو چرخان برای تولید فراخوان شود:

$$|E_t + R_t| \le E_{exch}{}^{max}\ ,\ \forall t = 1:24 \quad (۲۲)$$

۳-۲-۶- قید کفایت VPP

نیروگاه مجازی تلاش می‌کند تا اطمینان حاصل شود که به اندازه کافی DG را وارد عمل نموده است، ظرفیت ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی، قطع بار و ظرفیت خرید توان از شبکه‌ی اصلی برای مطابقت با رزرو حاشیه‌ای در هر ساعت وجود دارد.

اگر پیشنهاد رزرو چرخان برای تولید فراخوان نشود:

$$\sum_{i\in S_{dg}} P_{dg,i}{}^{max}.\ I_{i,t} - \sum_{i\in S_{dg}} P_{dg,i,t}\cdot I_{i,t} + \eta_{str,i}\sum_{i\in S_{str}}\left[cap_{i,0} + \sum_{l=1}^{t} P_{str,i,l}\right] + \sum_{i\in S_{int}}\left[P_{curt,i} - P_{curt,i,t}\right] + E_{exch}{}^{max} - E_t \ge AR_t \quad \forall t = 1:24 \quad (۲۳)$$

اگر پیشنهاد رزرو چرخان برای تولید فراخوان شود:

$$\sum_{i\in S_{dg}} P_{dg}{}^{max}.\ I_{i,t} - \sum_{i\in S_{dg}}\left(P_{dg,i,t} + R_{dg,i,t}\right) + \eta_{str}\sum_{i\in S_{str}}\left[cap_{i,0} + \sum_{l=1}^{t} P_{str,i,l}\right] + \sum_{i\in S_{int}}\left[P_{curt.i.max} - P_{curt,i,t} - R_{curt,i,t}\right] + E_{exch}{}^{max} - E_t - R_t \ge AR_t \quad \forall t = 1:24 \quad (۲۴)$$

۳-۳-تابع هدف مساله توزیع اقتصادی تولید همزمان برق و حرارت

تابع هدف مساله‌ی توزیع اقتصادی تولید همزمان برق و حرارت به صورت رابطه‌ی زیر است[۱۳] :

$$min\ f_{cost} = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j\ (Oj, Hj) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(T_k) \quad (۲۵)$$

۳-۳-۱- قیود تساوی

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i + \sum_{j=1}^{N_c} O_j = P_d \quad (۲۶)$$

$$\sum_{j=1}^{N_c} H_j + \sum_{k=1}^{N_h} T_k = H_d \quad (۲۷)$$

۳-۳-۲- قیود نامساوی

$$P_i{}^{min} \le P_i \le P_i{}^{max},\quad i = 1,...,N_p \quad (۲۸)$$

$$O_j{}^{min}(H_j) \le O_j \le O_j{}^{max},\quad j = 1,...,N_c \quad (۲۹)$$

$$H_j{}^{min}(O_j) \le H_j \le H_j{}^{max},\quad j = 1,...,N_c \quad (۳۰)$$

$$T_j{}^{min} \le T_k \le T_k{}^{max},\quad k = 1,...,N_h \quad (۳۱)$$

$$C_i(P_i) = a_i + b_iP_i + C_iP_i^2 \quad (۳۲)$$

$$C_{j(}Oj,Hj) = a_j + b_jO_j + c_jO_j^2 + d_jH_j + e_jH_j^2 + f_iO_jH_j \quad (۳۳)$$

$$C_k(T_k) = a_k + b_k\,T_k + c_k\,Tk^2 \quad (۳۴)$$

۳-۴- مدل‌سازی عدم قطعیت و الگوریتم حل مساله

از اهداف مهم این تحقیق مدل‌سازی عدم قطعیت است. یکی از روش-هایی که به کمک آن می‌توان تاثیر پارامترهای احتمالی عدم قطعیت بر مساله را بررسی نمود، روش مونت کارلو می‌باشد. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. جهت شبیه‌سازی مونت کارلو، ابتدا باید به حصول درک کافی پیرامون تولید اعداد تصادفی و نحوه‌ی تبدیل آنها توجه کرد.

به دلیل وجود عدم قطعیت در قیمت و توان از توابع توزیع احتمال استفاده می‌شود. لذا با استفاده از تابع نرمال لگاریتمی و نرمال و ویبول مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و توان انجام گردیده است.

توزیع نرمال یکی از مهمترین توابع توزیع احتمالی پیوسته در نظریه احتمالات است. تابع احتمال این توزیع دو پارامتر دارد که یکی تعیین کننده مکان(μ) و دیگری تعیین‌کننده‌ی مقیاس(σ) توزیع هستند. همچنین میانگین توزیع با پارامتر مکان و پراکندگی آن با پارامتر مقیاس برابر است. رابطه چگالی احتمال این توزیع به‌صورت زیر است:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,exp\left[\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (۳۵)$$

در تابع توزیع نرمال لگاریتمی در مقایسه با تابع توزیع نرمال، متغیر تصادفی به‌صورت لگاریتمی است یعنی lnx که با پارامترهای μ و σ دارای توزیع نرمال است. توجه شود که پارامترهای μ و σ مقادیر میانگین و انحراف معیار برای lnx هستند و نه برای خود متغیر x. چگالی احتمال این توزیع بصورت رابطه زیر است:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}}\,exp\left[\frac{-(lnt-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (۳۶)$$

۳-۵- منابع انرژی دارای عدم قطعیت

۳-۵-۱- منابع فتوولتائیک

عدم قطعیت در این منابع معمولا از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کند. به این ترتیب برای ساخت سناریوهای مختلف این منابع، تعداد ۱۰۰۰ سناریوی تصادفی از تابع توزیع نرمال انتخاب گردید. برای این منظور تابع توزیع نرمال بر اساس واریانس داده‌ها به ۷ قسمت تقسیم می‌شود. حالا یک عدد تصادفی بین صفر و ۱ انتخاب شده و هریک از سطوح که عدد تصادفی روی آنها قرار گرفت، به عنوان مقدار تصادفی برای داده مورد نظر انتخاب می‌شود (روش چرخ رولت). ۱۰۰۰ مقدار تصادفی به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

همین شکل برای توان خروجی منابع فتوولتاییک استخراج می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار واریانس داده‌های تصادفی برای منبع فتوولتاییک برابر ۲٪ مقدار میانگین در نظر گرفته شده است[۱].



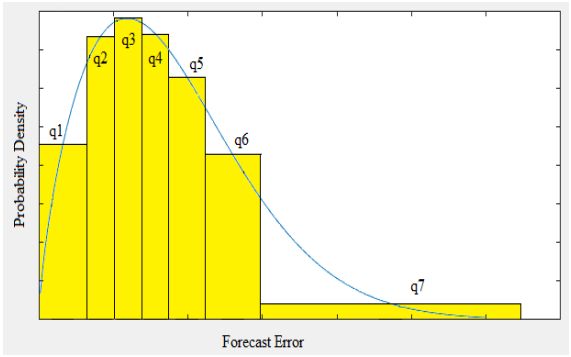
شکل(۱): مکانیزم چرخ رولت برای احتمالات نرمال‌شده خطای پیش‌بینی

۳-۵-۲- منابع بادی

توان خروجی منابع بادی، تابعی درجه سه از سرعت باد است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

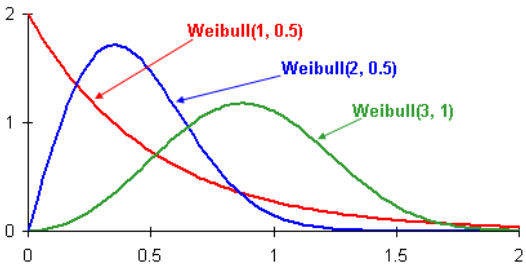
$$pdf(x) = \frac{k}{c}\left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^{k}} \quad (۳۷)$$

سرعت باد در طبیعت دارای خاصیت تصادفی است و از تابع توزیع ویبول (Weibull) پیروی می‌کند. در اینجا نیز برای به دست آوردن سناریوهای مختلف از تابع باد، تابع توزیع Weibull بخش‌بندی شده و الگوریتم چرخ رولت مجدداً روی آن تکرار می‌شود.



شکل(۲): تابع توزیع احتمال ویبول(weibull) خطای پیش‌بینی

تابع چگالی احتمال توزیع Weibull دارای شکل کلی زیر است:
دو پارامتر اصلی این توزیع k و c هستند. k ضریب شکل و میزان گستردگی منحنی توزیع را مشخص می‌کند. c ضریب مقیاس است و تغییر آن نقطه اوج منحنی را جابجا می‌کند. تابع توزیع Weibull معمولاً به صورت Weibull(c,k) نشان داده می‌شود.



شکل (۳): تابع توزیع سرعت باد با ضرایب مقیاس مختلف

در عمل مقدار پارامتر c به سرعت باد وابسته است. از آنجا که در این مطالعه مقدار میانگین سرعت باد از توان خروجی مولد بادی در رابطه (۳۷) قابل محاسبه است، با داشتن مقدار میانگین و ضریب k می‌توان پارامتر c را برای توزیع Weibull از طریق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$F(v) = 1 - exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (۳۸)$$

که در آن E(x) امید ریاضی یا میانگین توزیع و Γ تابع گاما است. به این ترتیب ضرایب c به ازای هر ساعت از شبانه‌روز به‌دست می‌آید.

۳-۵-۳- بار مصرفی

عدم قطعیت در بار مصرفی مشترکین نیز از تابع توزیع نرمال پیروی کرده و سناریو سازی آن مشابه سناریوهای مختلف منبع فتوولتاییک است. در اینجا نیز میزان واریانس داده‌ها برابر دو در صد مقدار میانگین در نظر گرفته شده است. پس از تولید همه ۱۰۰۰ سناریو از منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی، شکل کلی سناریوها در هر ساعت به صورت زیر در می‌آید:

$$[P^{s}_{w,l,h,1}, \dots, P^{s}_{w,l,h,Nw}, P^{s}_{v,l,h,1}, \dots, P^{s}_{v,l,h,Nv}, P^{s}_{L,l,h}]$$
$$s = 1,2,\dots,Ns; h = 1,2,\dots,Nh \quad (۳۹)$$

و احتمال وقوع هر سناریو برابر است با:

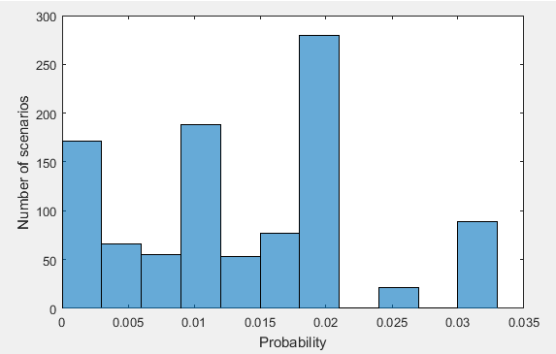
$$\pi_s = \prod_{w} P_{weibull}\left(P^{s}_{w,l,h}\right) \times \prod_{v} P_{nannd}\left(P^{s}_{v,l,h}\right) \times \prod_{L} P_{nannd}\left(P^{s}_{L,l,h}\right) \quad (۴۰)$$

که در آن P احتمال نرمالیزه شده وقوع هر سناریو طبق توزیع مربوطه است. از آنجا که تحلیل مسئله به ازای همه ۱۰۰۰ سناریو در هر ساعت منطقی نیست، وجود یک روش کاهش سناریو به شکلی که بتواند ویژگی‌های سناریوهای اصلی را در حد قابل قبولی حفظ کند، ضروری است.

۳-۵-۴- کاهش تعداد سناریوها

پس از اینکه همه ۱۰۰۰ سناریو برای مولدهای بادی و خورشیدی و همچنین بار مصرفی ایجاد شد، احتمال ناشی از آنها مطابق رابطه (۴۰) محاسبه می‌شود. می‌توان با کمی اغماض گفت سناریوهایی که دارای احتمال مشابه هستند، شباهت بیشتری از نظر نوسانات توان تولیدی یا مصرفی به یکدیگر دارند. در گام اول برای کاهش تعداد سناریوها، آنها را بر اساس احتمال وقوع شان به دسته‌های جداگانه تقسیم می‌کنیم. شکل زیر تقسیم ۱۰۰۰ سناریوی مربوط به ساعت ۲۴ ام را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل(۴): نحوه تقسیم ۱۰۰۰ سناریوی مربوط به ساعت ۲۴

همانطور که در شکل (۴) مشخص است، مثلا حدود ۲۷۰ سناریو دارای احتمال وقوع ۰،۰۱۹۵ ه ستند. حال به منظور کاهش تعداد سناریوها، از هر بازه احتمالاتی، به نسبت تعداد سناریوهای آن بازه، سناریوی تصادفی انتخاب می‌کنیم. به عبارت دیگر اگر تعداد سناریو در هر بازه احتمالاتی برابر n_i بوده و تعداد سناریوی دلخواه پس از کاهش سناریوها sc (در اینجاsc=20) باشد، تعداد r_i سناریو از هر بازه احتمالاتی انتخاب می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i} \times sc \qquad (۴۱)$$

برای روشن شدن بیشتر این روش کاهش سناریو فرض کنیم تعداد ۲۷۰ سناریو از ۱۰۰۰ سناریو دارای احتمال وقوع در محدوده ۰،۰۱۹۵ هستند و تعداد سناریوها پس از کاهش نیز باید ۲۰ باشد. به این ترتیب از کل سناریوهای موجود در بازه ۰،۰۱۹۵ تعداد پنج سناریو به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. این عمل در همه بازه‌های دیگر نیز اتفاق می‌افتد. پس از پایان یافتن ساخت سناریوها، خروجی این تابع شامل سناریوهای به دست آمده برای توان مصرفی، توان تولیدی بادی و توان تولیدی خورشیدی و باتری و احتمال وقوع هر سناریو می‌شود.

در این مقاله، مدل پیشنهادی با ملاحظه تاثیر عدم قطعیت‌های حاکم بر مسئله بر رفتار VPP، در یک دوره زمانی معین مطالعه شده است. در این راستا، مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و توان VPP به عنوان تولیدکننده در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها به ترتیب از توابع توزیع نرمال و نرمال لگاریتمی استفاده شده است. جهت دستیابی به این مهم، شبیه سازی مونت کارلو برای محاسبه توزیع‌های آماری سود و پیشنهاد تولید VPP به بازار انرژی انجام شده است. همچنین در این مطالعه از روش کدگذاری باینری، انتخاب ترتیبی و ترکیب دو نقطه‌ای استفاده شده است. متغیرهای کدگذاری شده شامل: U_t با طول رشته ۱، P_{dg}، $P_{capacity}$ و P_{curt} با طول رشته‌ی ۸ تایی است. اندازه جمعیت اولیه ۲۰۰، احتمال برش ۰/۹۵ و احتمال جهش برابر ۰/۰۵ است. تعداد تکرارهای لازم جهت شبیه سازی مونت کارلو نیز ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، مدل‌سازی نیروگاه مجازی ابتدا بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله ارائه شده است. در ابتدا فقط عدم قطعیت قیمت و سپس عدم قطعیت قیمت و توان به‌طور همزمان در نظر گرفته شده است. در ابتدا برای حالتی که تنها شامل بازار انرژی است، شبیه سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام گردید. با توجه به وجود بارهای قابل قطع در سیستم، امکان قطع بار به میزان حداکثر ۲۵ کیلووات در ساعات ۸-۷ و ۱۸-۱۱ امکان‌پذیر بوده است. همچنین هزینه‌ی بار قطع شده جهت پرداخت به مصرف‌کننده با رابطه (۴۲) در نظر گرفته شده است:

$$C(P) = 0.01P^2 + P \qquad (۴۲)$$

که در آن P مقدار بار تامین نشده است. برای نشان دادن وضعیت روشن و خاموش بودن DG متغیر باینری U_{DG} در نظر گرفته شده است. تابع هزینه‌ی تولید DG نیز طبق رابطه (۴۳) محاسبه گردیده است:

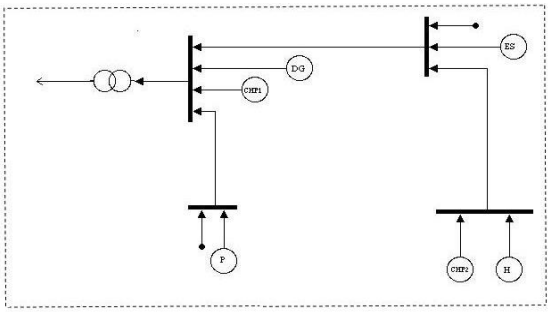
$$C(dg)=0.01P_{dg}^2+8.5P_{dg} \qquad (۴۳)$$

برای برآورده شدن قیدهای حداقل زمان توقف و فعالیت واحدهای تولید پراکنده از روش جابجایی بیت‌ها استفاده شده است[۱۵و۱۴]. جهت اجرای پخش بار در شبکه مورد مطالعه نیز از الگوریتم جاروب رفت و برگشت استفاده شده است. حداقل میزان ظرفیت باقیمانده برای سیستم ذخیره کننده پنج کیلووات فرض شده است و در داخل شبیه سازی، پارامتری جهت نشان دادن مقدار آن در هر ساعت تخصیص یافته است. اطلاعات مربوط به میزان انرژی خرده‌فروشی برای آخرین مصرف کننده، قیمت انرژی، قیمت رزرو و میزان بار پیش بینی شده، مطابق مرجع[۱۵] در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه تاثیر عدم قطعیت در پیش-بینی قیمت انرژی و توان بر راهبرد نیروگاه مجازی سناریوهای متنوعی تعریف گردیده که در جدول (۱) ارائه شده است. دراین سناریوها میزان انحراف معیار دارای مقادیر متفاوتی است که نشان دهنده بی‌ثباتی قیمت بازار است.

جدول (۱): نمونه سناریوهای موجود در مسئله

شماره سناریو	انحراف معیار	عدم قطعیت در قیمت	عدم قطعیت در تولید
۱	-	-	-
۲	۰/۰۲	✓	-
۳	۰/۰۵	✓	-
۴	۰/۱۰	✓	-
۵	۰/۱۵	✓	-
۶	۰/۰۲	✓	✓
۷	۰/۰۵	✓	✓
۸	۰/۱۰	✓	✓
۹	۰/۱۵	✓	✓

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل (۵): نمودار تک‌خطی نیروگاه مجازی مورد مطالعه

۴-۱- بررسی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بازار انرژی

۴-۱-۱- حالت مبنا (بدون ملاحظه عدم قطعیت‌ها)

سناریوی اول مربوط به شبیه‌سازی حالت مبنا به همراه تعداد ۱۰۰ تکرار می‌باشد. مقادیر متفاوت انحراف معیار جهت بررسی تاثیرات پراکندگی بر خروجی‌های موجود در مساله که مهم‌ترین آنها سود و پیشنهاد (خرید یا فروش انرژی) است، در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در دوره‌ی زمانی ۲۴ ساعته و با استفاده از روش مونت کارلو در ۱۰۰ تکرار انجام گرفت و در نهایت میانگین نتایج لحاظ گردید. لنتایج شبیه‌سازی برای توان تولیدی DG (P_{dg})، مقدار توان باقیمانده‌ی دستگاه الکتروشیمیایی($P_{capacity}$)، توان پیشنهادی به بازار(خرید یا فروش)($E(t)$)، میزان بار قطع شده (P_{curt})، مقدار شارژ یا دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی (P_{str})، حاصل از میانگین نتایج تکرارهای مختلف است.

همان‌گونه که بیان شد نتایج مشابه حالت مبنا بوده و فقط از این نتایج پس از ۱۰۰ تکرار میانگین گرفته شده است، لذا اختلاف چندانی با حالت مبنا نداشته است. در قسمت‌های مختلف شکل(۶)، شکل(الف) نمودار خروجی واحد تولید پراکنده را در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین با توجه به این شکل، در ساعات ۵-۱ و۱۵-۱۱و ۲۴-۲۲ واحد تولید پراکنده مرسوم (دیزل ژنراتور) روشن است، زیرا حداکثر سود از طریق روشن ماندن DG حاصل می‌شود. شکل(ب) وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در فرضیات مساله نیز مطرح شد، قطعی بار در ساعات ۷-۸ و ۱۱-۱۸ مجاز بوده است، اما به دلیل آنکه DG در ساعات ۱۶-۱۸ خاموش است و همچنین میزان قیمت خرده‌فروشی زیاد بوده، نیازی به قطعی بار نبوده است.

شکل(ج) میزان شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد که مقادیر مثبت نشان دهنده شارژ دستگاه ذخیره‌ساز و تزریق توان به شبکه و مقادیر منفی نشانگر دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز و جذب توان از شبکه است. شکل(ز) میزان تولید (توان و حرارت) را برای واحد CHP1 نشان می‌دهد. در طی ساعات ۸-۴ و ۱۳-۱۲ و ۲۴-۱۷ واحد تولید کننده توان خاموش است و تولید توان از طریق منابع دیگری انجام می‌گیرد. با توجه به قیود موجود در مساله، واحد دوم CHP و واحد تولیدکننده اول باید در مجموع ۱۵۰ کیلووات تولید توان انجام دهند. با رجوع به شکل‌های(ح) و (ط) این امر به خوبی مشهود است و مجموع توان این سه تولیدکننده ۱۵۰ کیلووات خواهد شد. همچنین در طی ساعات ۸-۶ و ۱۳-۱۲ و ۲۲-۲۰ واحد تولید کننده گرما خاموش است. به‌طور مشابه، واحد دوم تولید همزمان و واحد اول تولیدکننده گرما، با هم این کاستی را جبران نموده و جمعا تولید ۱۵ کیلووات حرارت را انجام می‌دهند. روشن و خاموش بودن واحدها با توجه به کاربرد الگوریتم ژنتیک، شامل کدگذاری و اعمال متغیر باینری(U_1,U_2,U_3,U_4) و اعمال روش جابجایی بیت‌ها می‌باشد. در شکل (د) پیشنهاد نیروگاه به بازار قابل مشاهده است و ملاحظه می‌گردد که در همه زمان‌ها دارای مقادیری منفی است که به معنی فروش انرژی به بازار است. علت این موضوع و تفاوت با شبکه‌ی مبنا، اعمال توان تولیدی واحدهای جدید در محدودیت مربوط به تعادل تولید و مصرف انرژی است. شکل‌های (د) و (ه) به‌ترتیب نتایج پیشنهاد برای بازار انرژی و مقدار سود نیروگاه مجازی را در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که در آن میزان سود بیشینه برابر $۸/۰۸۶۴\times۱۰^{۳}$ به دست آمده است. با توجه به اضافه شدن واحدهای تولیدی، فرصت جهت افزایش تولید بیشتر شده و سود بیشتری عاید نیروگاه خواهد شد. در شکل (و) مقدار ظرفیت باقیمانده موجود در ذخیره‌ساز (باتری) در هر ساعت مشاهده می‌گردد و همان‌طور که قبلا اشاره شد کمینه میزان انرژی باقیمانده‌ی باطری در هرساعت، پنج کیلووات ساعت فرض شده است.

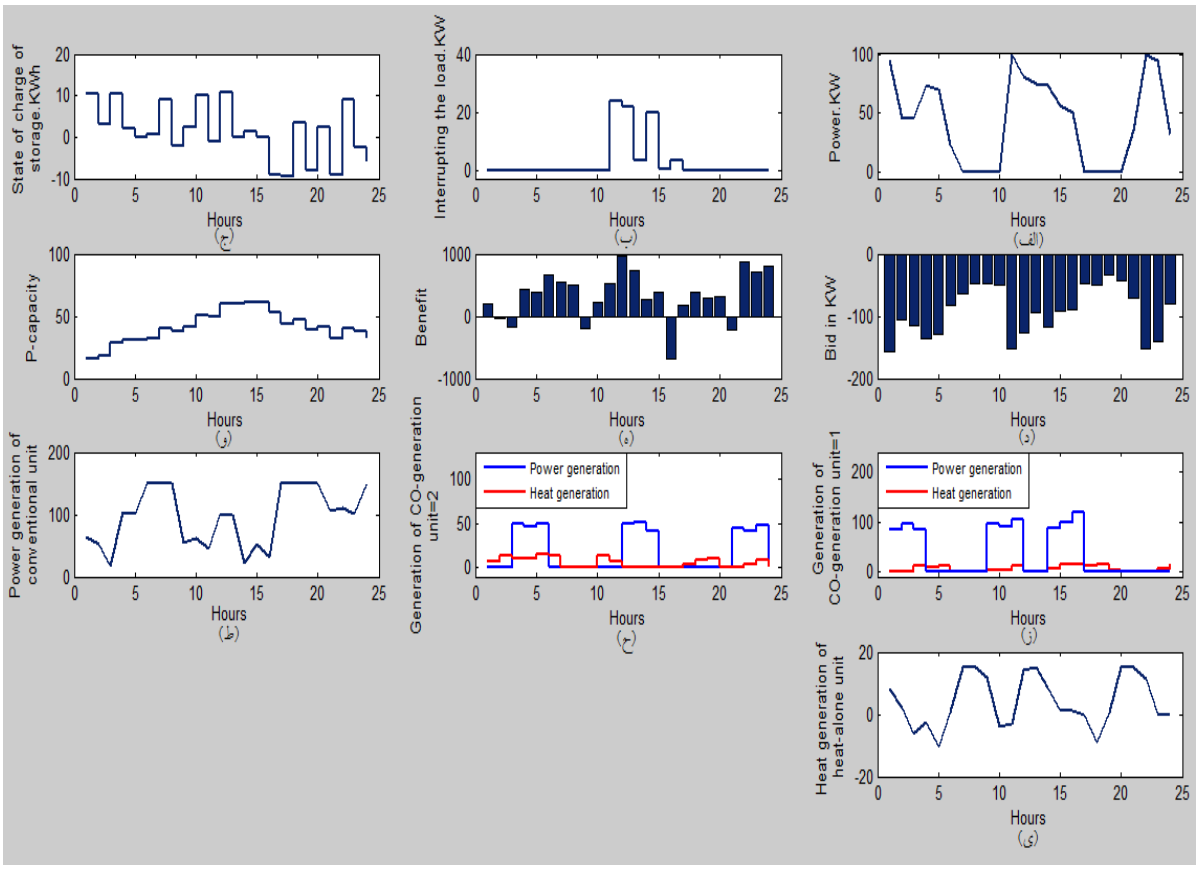
۴-۱-۲- سناریوهای دوم الی پنجم (در حضور عدم قطعیت در قیمت انرژی)

در این بخش نتایج مربوط به عدم قطعیت در قیمت انرژی شبیه‌سازی گردیده و از تابع نرمال لگاریتمی جهت مدل‌سازی استفاده شده است. نتایج حاصله جهت سناریوهای مختلف گردآوری شده است و به دلیل تشابه با شبکه اول از توضیحات جزیی چشم‌پوشی می‌گردد. درشکل(۷) نتایج برای انحراف معیار S=0.02 مشاهده می‌شود. شکل(الف) میانگین تولید DG برای بازار انرژی، شکل(ب) میانگین وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف، شکل(ج) میانگین وضعیت شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، شکل(د) میانگین پیشنهاد برای بازار انرژی، شکل(ه) میانگین مقدار سود در هر ساعت، شکل(و) میانگین مقدار ظرفیت باقیمانده سیستم ذخیره‌ساز، شکل(ز) میانگین تولید CHP1 برای بازار انرژی، شکل(ح) میانگین تولید CHP2 برای بازار انرژی، شکل(ط) میانگین تولید توان واحد۱ برای بازار انرژی، شکل(ی) میانگین تولید حرارت واحد۲ برای بازار انرژی را نشان می‌دهد که در شکل‌های(ز) و (ح) مقادیر تولید نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است.

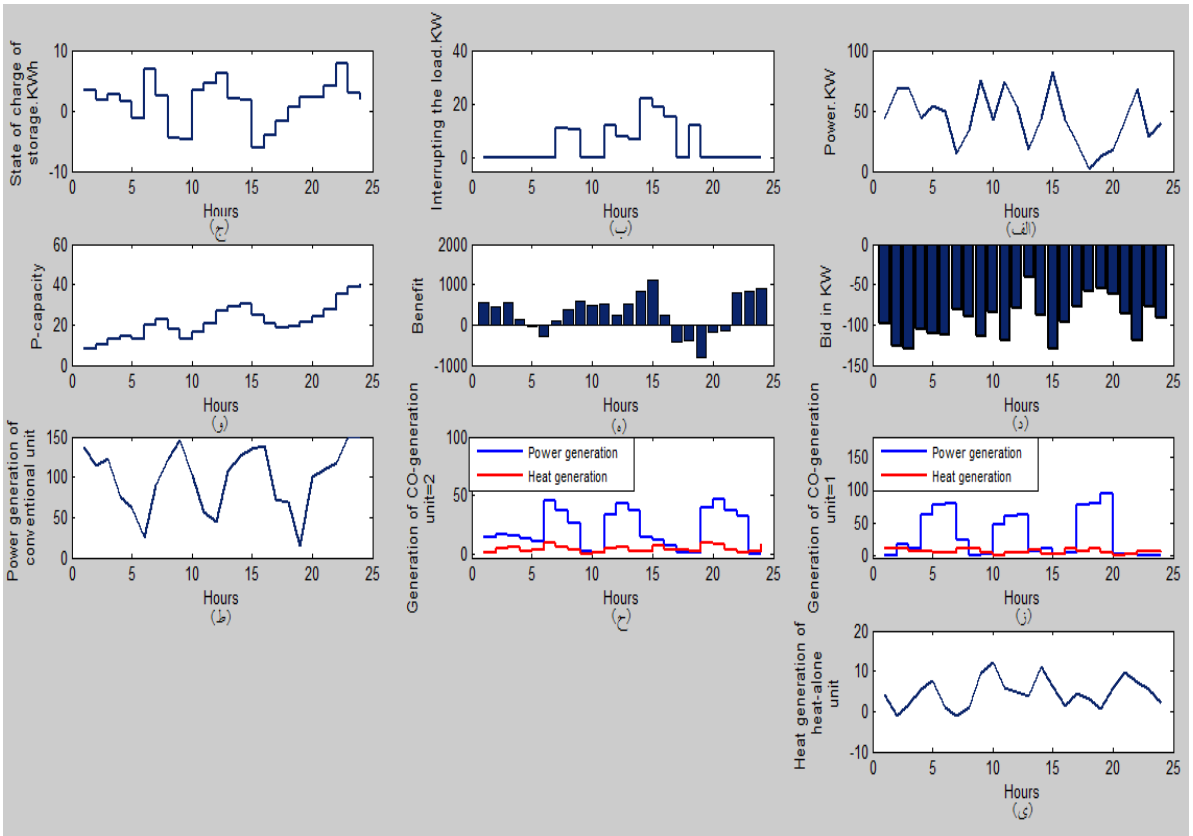
جدول (۲): سود انتظاری VPP (با در نظر گرفتن واحدهای CHP) در بازار انرژی در شرایط عدم قطعیت قیمت

شماره سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
سود (دلار)	$۷/۴۴\times۱۰^{۳}$	$۶/۹۵\times۱۰^{۳}$	$۹/۴۷\times۱۰^{۲}$	$۶/۱۳\times۱۰^{۲}$	۹۸۷.۸۳۴

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بازار انرژی



شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی نیروگاه مجازی (در حضور عدم قطعیت قیمت و S=0.02) با در نظر گرفتن بازار انرژی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

۳-۱-۴- سناریوهای ششم الی نهم (با ملاحظه عدم قطعیت در قیمت و توان)

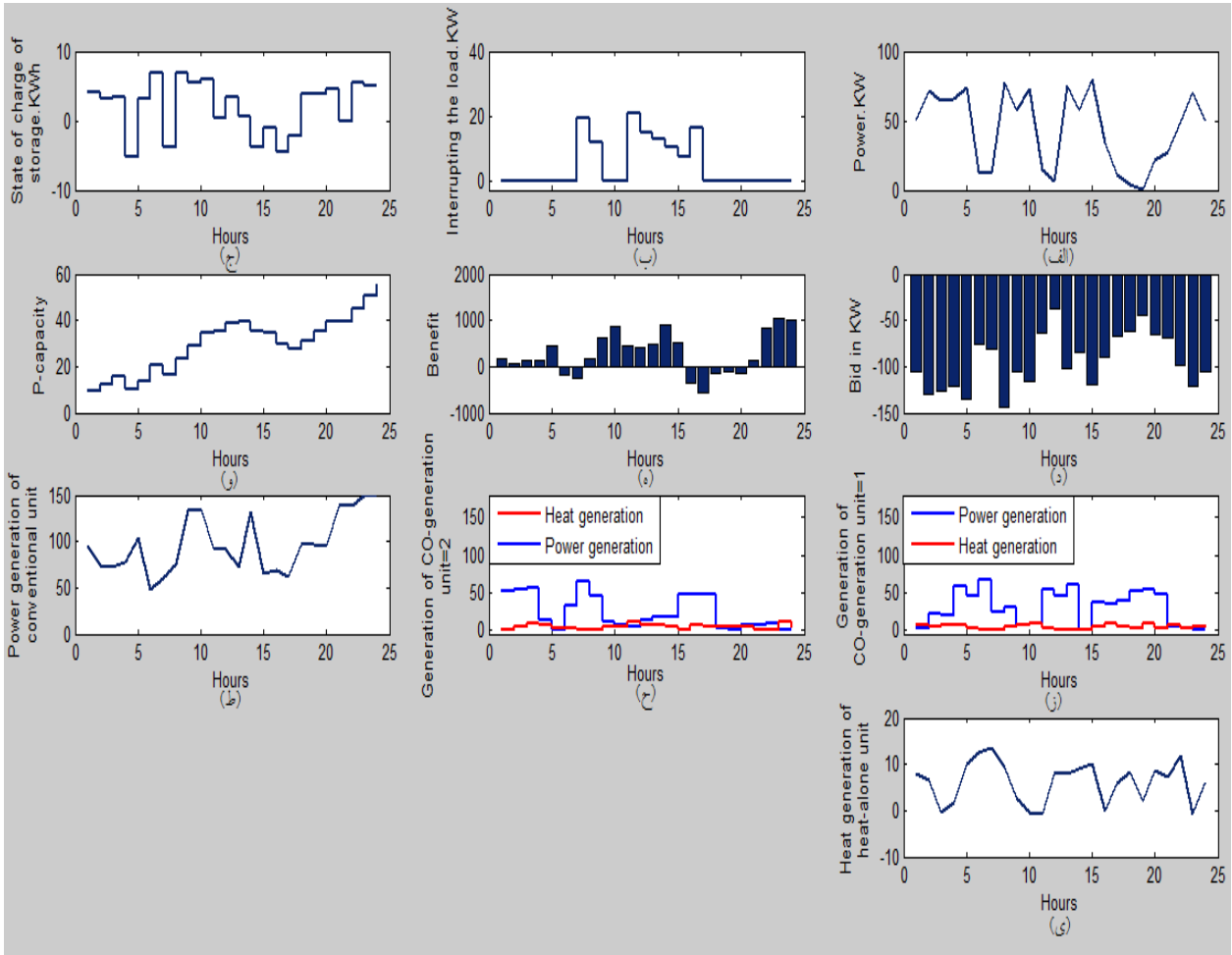
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی با ملاحظه عدم قطعیت درتوان شبیه سازی گردیده و از تابع نرمال جهت مدل‌سازی استفاده شده است. با لحاظ نمودن عدم قطعیت توان در کنار عدم قطعیت قیمت، میزان پراکندگی نتایج افزایش یافته و نتایج دستخوش تغییرات اغلب کاهشی شده است. همان‌گونه که در نتایج سناریوهای مختلف در شکل (۸) مشاهده می‌گردد در شکل(الف) میانگین تولید DG برای بازار انرژی، شکل(ب) میانگین وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف، شکل(ج) میانگین وضعیت شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، شکل(د) میانگین پیشنهاد برای بازار انرژی، شکل(ه) میانگین مقدار سود در هر ساعت، شکل(و) میانگین مقدار ظرفیت باقیمانده ذخیره‌ساز، شکل(ز) میانگین تولید CHP1 برای بازار انرژی، شکل(ح) میانگین تولید CHP2 برای بازار انرژی، شکل(ط) میانگین تولید توان واحد۱ برای بازار انرژی، شکل(ی) میانگین تولید حرارت واحد ۲ برای بازار انرژی را نشان می‌دهد.

جدول (۳): سود انتظاری VPP (با در نظر گرفتن واحدهای CHP) در بازار انرژی در شرایط عدم قطعیت

شماره سناریو	۶	۷	۸	۹
سود(دلار)	۶/۵۷×۱۰^{۳}	۷/۱۲×۱۰^{۲}	۴/۸۹×۱۰^{۲}	۶۴۳/۷۸۰۳

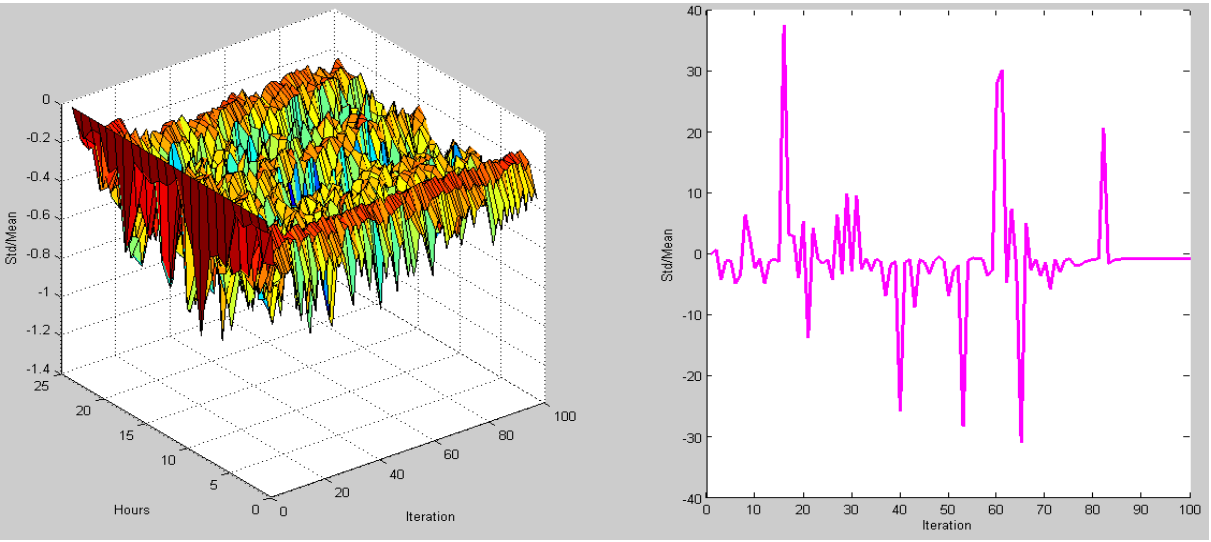
۴-۱-۴- نتایج تحلیل نسبت انحراف معیار به میانگین جهت توقف شبیه‌سازی مونت کارلو

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، نسبت انحراف معیار به میانگین در ساعت۱۷ به همگرایی میل می‌کند، این امر بیانگر تغییرات ناچیز و حصول نتیجه منطقی بوده و می‌تواند معیار مناسبی جهت توقف شبیه‌سازی مونت کارلو به حساب آید. در شکل (۹) نمودار سمت راست نسبت انحراف معیار به میانگین سود در ساعت ۱۷ با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت به ازای انحراف معیار ۰/۰۲، و در نمودار سمت چپ، نسبت انحراف معیار به میانگین خرید و فروش انرژی با اعمال عدم قطعیت قیمت به ازای انحراف معیار ۰/۰۲ در دوره زمانی ۲۴ساعته است.



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی نیروگاه مجازی (در حضور عدم قطعیت قیمت و توان و S=0.02) با در نظر گرفتن بازار انرژی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل (۹): نسبت انحراف معیار به میانگین (در حضور عدم قطعیت قیمت و S=0.02) با درنظر گرفتن بازار انرژی

۲-۴- بررسی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بازار رزرو

۱-۲-۴- حالت مبنا (بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت)

در این قسمت به بررسی حضور نیروگاه مجازی در بازار رزرو پرداخته می‌شود. مشابه با شبکه اول، فرض بر این است که DG و بارهای قابل قطع تامین‌کننده رزرو هستند. شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) قسمت (الف) تولید DG در ساعات مختلف برای بازار انرژی و رزرو تواماً نشان داده شده است. در طی ساعات ۱۷-۱۶ و ۲۲-۲۱ تولید DG جهت بازار رزرو در مقدار کمی قرار دارد و طی ساعاتی که قیمت بازار رزرو ارزان می‌باشد، روشن است. در طی ساعات ۱۶-۱۷ و ۲۲-۲۱ با وجود ارزان بودن قیمت بازار رزرو، DG خاموش است. دلیل این امر تولیدات کم واحدهای دیگر(واحدهای جدید) و تامین قید عرضه و توان است. شکل‌های بعدی مشابه با حالتی است که تنها بازار انرژی در نظر گرفته می‌شود و از توضیحات مشابه خودداری می‌شود. تنها شاخص جدید پارامتر $R(t)$ می‌باشد، با توجه با منابع تامین کننده‌ی این شاخص((DG) و بارهای قابل قطع سیستم) در طی ساعات ۱۷-۱۶ و ۲۲-۲۱ تولید DG برای بازار رزرو مقدار کمی بوده و از طرفی به جز ساعت ۱۶ در سه ساعت دیگر باری از سیستم قطع نگردیده است، لذا مقدار آن نزدیک صفر است. در این قسمت میزان سود $۲/۹۸۸۰\times۱۰^{۴}$ می‌باشد. شکل(ب) وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف، شکل(ج) وضعیت شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، شکل(د) میزان پیشنهاد برای بازار انرژی، شکل(ه) مقدار سود در هر ساعت، شکل(و) مقدار ظرفیت باقیمانده ذخیره‌ساز، شکل(ز) تولید CHP1 برای بازار انرژی، شکل(ح) تولید CHP2 برای بازار انرژی، شکل(ط) تولید توان واحد۱ برای بازار انرژی و شکل(ی) تولید حرارت واحد ۲ برای بازار انرژی را نشان می‌دهند.

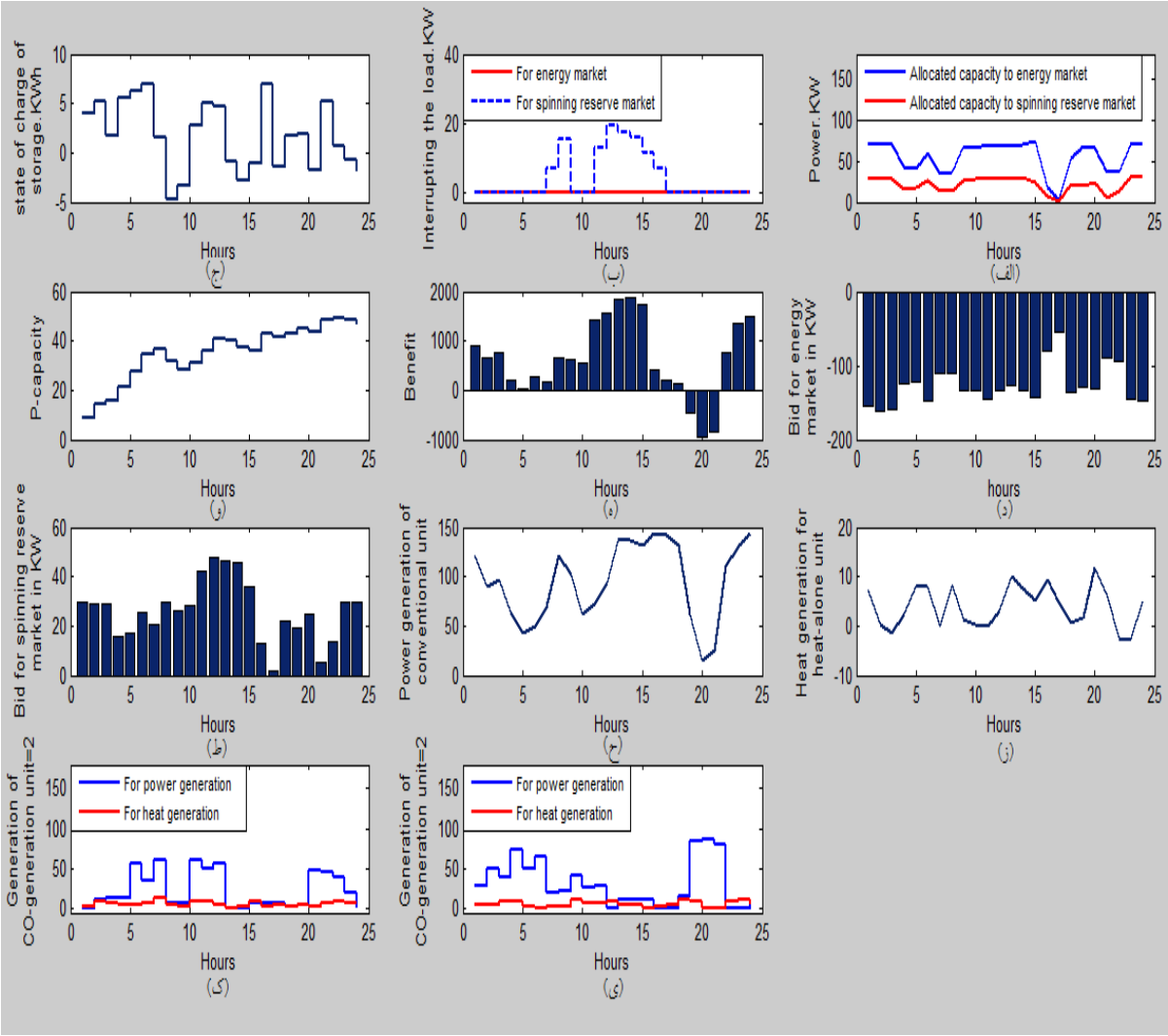
۲-۲-۴- سناریوهای دوم الی پنجم (در حضور عدم قطعیت در قیمت انرژی)

در شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی برای انحراف معیار S=0.02 نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که سهم مشارکت واحدها، مقدار سود و مقادیر پیشنهادی برای بازار انرژی و رزرو کاهش یافته است. در شکل(الف) میانگین تولید DG برای بازار، شکل(ب) میانگین وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف، شکل(ج) میانگین وضعیت شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، شکل(د) میانگین پیشنهاد برای بازار انرژی، شکل(ه) میانگین مقدار سود در هر ساعت، در شکل (و) میانگین مقدار ظرفیت باقیمانده ذخیره‌ساز، شکل(ز) میانگین تولید CHP1 برای بازار انرژی، شکل(ح) میانگین تولید CHP2 برای بازار انرژی، شکل(ط) میانگین تولید توان واحد۱ برای بازار انرژی و در شکل(ی) میانگین تولید حرارت واحد ۲ برای بازار انرژی ارائه شده است

جدول (۴): سود انتظاری VPP (با در نظر گرفتن واحدهای CHP) در بازار رزرو در شرایط عدم قطعیت قیمت

شماره سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
سود(دلار)	$۲/۴۵\times۱۰^{۴}$	$۱/۷۶\times۱۰^{۴}$	$۸/۳۶\times۱۰^{۳}$	$۲/۲۳\times۱۰^{۳}$	$۴/۱۹\times۱۰^{۲}$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی شبکه‌ی جدید با در نظر گرفتن بازار رزرو

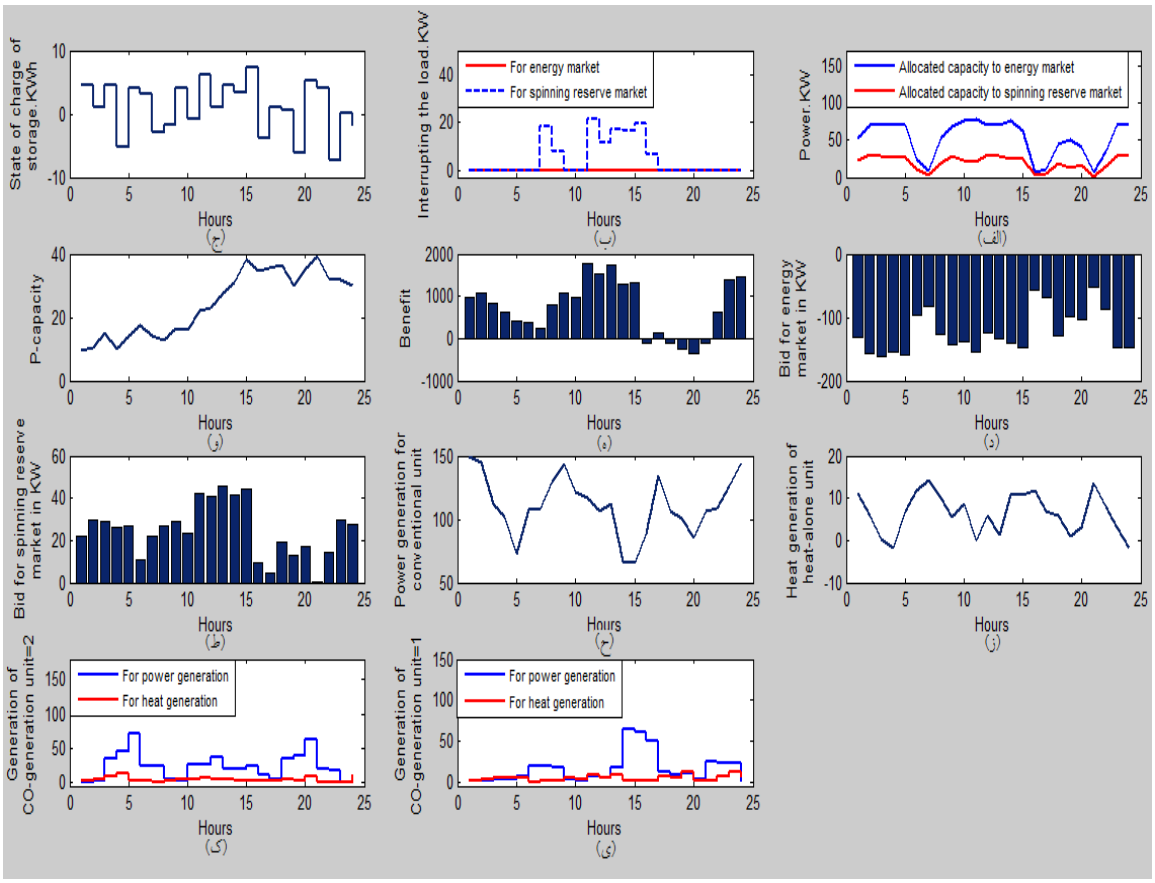
۳-۲-۴- سناریوهای ششم الی نهم (در حضور عدم قطعیت در قیمت انرژی و پیش بینی توان)

با اعمال عدم قطعیت توان در کنار عدم قطعیت قیمت، ملاحظه می‌شود که مطابق شکل (۱۲) مقادیر پارامترهای موجود در مساله کاهش می-یابد، شکل(الف) میانگین تولید DG برای بازار، شکل(ب) میانگین وضعیت بار قطع شده در زمان‌های مختلف، شکل(ج) میانگین وضعیت شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، شکل(د) میانگین پیشنهاد برای بازار انرژی، شکل(ه) میانگین مقدار سود در هر ساعت، شکل(و) میانگین مقدار ظرفیت باقیمانده ذخیره‌ساز، شکل(ز) میانگین تولید CHP1 برای بازار انرژی، شکل(ح) میانگین تولید CHP2 برای بازار انرژی، شکل(ط) میانگین تولید توان واحد۱ برای بازار انرژی و شکل(ی) میانگین تولید حرارت واحد ۲ برای بازار انرژی را نشان می-دهند.

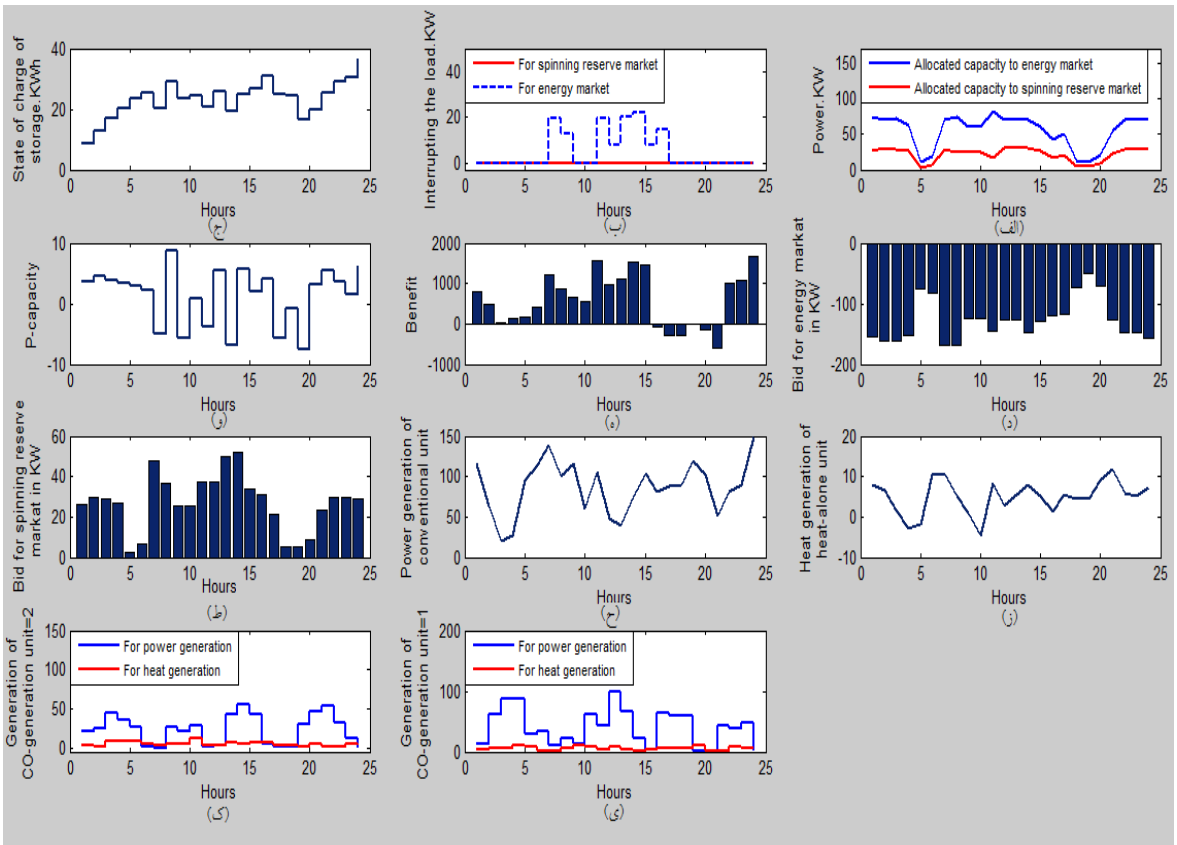
جدول (۵): سود انتظاری VPP (با در نظر گرفتن واحدهای CHP) در بازار رزرو در شرایط عدم قطعیت

شماره سناریو	۶	۷	۸	۹
سود(دلار)	۱/۴۳×۱۰۴	۶/۲۲×۱۰۳	۱/۰۹×۱۰۳	۲/۵۳×۱۰۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی شبکه‌ی جدید (در حضور عدم قطعیت قیمت و S=0.02) با در نظر گرفتن بازار رزرو

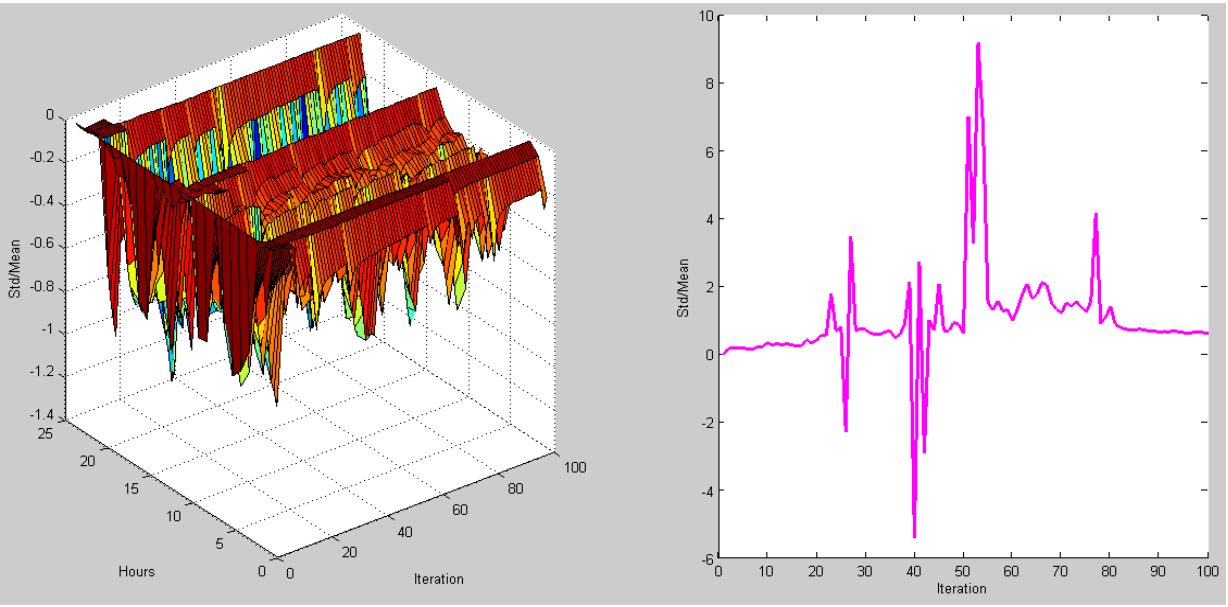


شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی شبکه جدید (در حضور عدم قطعیت ها و S=0.02) با در نظر گرفتن بازار رزرو

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

۴-۲-۴- نتایج تحلیل نسبت انحراف معیار به میانگین جهت توقف شبیه‌سازی مونت کارلو

نتایج نسبت انحراف معیار به میانگین (در حضور عدم قطعیت قیمت و $S=0.02$) با درنظر گرفتن بازار رزرو در شکل(۱۳) ارائه شده است.
شکل سمت راست نسبت انحراف معیار به میانگین سود در ساعت ۱۷ با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت به ازای انحراف معیار ۰/۰۲ و شکل سمت چپ نسبت انحراف معیار به میانگین خرید و فروش انرژی با اعمال عدم قطعیت قیمت به ازای انحراف معیار ۰/۰۲ در دوره‌ی زمانی ۲۴ساعته را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نسبت انحراف معیار به میانگین (در حضور عدم قطعیت قیمت و S=0.02) با درنظر گرفتن بازار رزرو

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی غیرتعادلی مبتنی بر برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای نیروگاهی(PBUC) برای طراحی راهبرد(استراتژی) پیشنهاد تولید نیروگاه مجازی(VPP) به بازار انرژی در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. شبکه‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل نیروگاه مجازی با ترکیبی از واحدهای تولید پراکنده، ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی و مصرف‌کنندگان نهایی به همراه دو واحد تولید همزمان برق و حرارت، یک واحد تولیدکننده‌ی حرارت و یک واحد تولید کننده انرژی(دیزل ژنراتور سنتی) در نظر گرفته شد. نیروگاه مجازی یک شرکت‌کننده‌ی بازار برق با نقش دوگانه تولیدکننده و مصرف‌کننده در جهت تبادل با شبکه‌ی بالادست است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در غیاب عدم قطعیت‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این پژوهش، ابزار مناسبی جهت تدوین استراتژی پیشنهاد تولید VPP در بازار انرژی و رزرو و تعامل آن با مصرف‌کنندگان دارای قابلیت قطع بار است. هم-چنین شبیه‌سازی‌های انجام شده در حضور عدم قطعیت‌های VPP نشان می‌دهد که سود نیروگاه مجازی متاثر از عدم قطعیت‌های بازار برق است، به‌طوری‌که با افزایش میزان بی‌ثباتی در قیمت و توان، استراتژی VPP تحت تأثیر بیشتری قرار می‌گیرد، به نحوی که موجب زیان VPP در بازه‌هایی از زمان نیز می‌شود. تعداد تکرارها در شبیه‌سازی مونت کارلو در روش پیشنهادی محدود بوده است که علت آن استفاده از الگوریتم وراثت(ژنتیک) در حل مسئله بهینه سازی و کند بودن آن در هریک از تکرارهای شبیه‌سازی است که در صورت استفاده از الگوریتم‌های ریاضی برای حل مسئله بهینه‌سازی، با افزایش تعداد تکرار در شبیه سازی مونت کارلو، احتمالا می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت. با توجه به استفاده از الگوریتم ژنتیک در فرآیند شبیه‌سازی، می‌توان به کند بودن و زمان بر بودن آن از جمله نقاط ضعف اشاره نمود، لیکن با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی پیشرفته و سایر الگوریتم‌های فراابتکاری جدید نظیر جهش قورباغه، اجتماع مورچگان و ... نیز می‌توان تعداد تکرارهای شبیه سازی مونت کارلو را افزایش داد. از داده های مورد استفاده در این مساله یکی از اطلاعات ورودی، میزان انرژی خرده‌فروشی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعت بوده است. با توجه به تابع هدف و قیود موجود در مساله، می‌توان این داده را نیز در دوره زمانی بیشتر (به عنوان مثال در طی یک سال) به عنوان متغیر مجهول فرض نمود و مقادیر آنرا بدست آورد. زیرا این پارامتر می بایست به صورت روزانه در دسترس باشد، اما با بسط این مدت زمان به دوره طولانی‌تر نیز می توان این پارامتر را با دقت بیشتر ملاحظه نمود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

مراجع

[1] H. Rouzbahani, H. Karimipour, L. Lei "A review on virtual power plant for energy management", Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 47, 2021.

[2] S. Sadeghi, H.R. Jahangiri, M. Golkar, A. Ahmadian, M. Golkar, "Optimal participation of a virtual power plant in electricity market considering renewable energy: A deep learning-based approach", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 26, 2021.

[3] N. Naval, J. Yusta, "Virtual power plant models and electricity markets - A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 149, 2021.

[4] H. Duc, N. Hong, "A study on the bidding strategy of the Virtual Power Plant in energy and reserve market", Energy Reports, vol.. 6, pp. 622-626, 2020.

[5] S. Yu, F. Fang, j. Liu, "Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures", Applied Energy, vol. 239, pp. 454-470, 2019.

[6] L.Baringo, M.Freire, R.Garcia & M.Rahimian, "Offering strategy of a price-maker virtual power plant in energy and reserve markets". Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 28, 2021.

[7]E. Mashhour and S.M. Moghadas-Tafreshi, "bidding sterategy of virtual power plant participating in energy and spinning reserve market-part I. IEEE Trans Power Syst., vol. 26, no. 2, 2011.

[8]A. J. Conejo, F. J. Nogales, and J. M. Arroyo," Price-Taker Bidding Strategy Under Price Uncertainty," IEEE Trans Power Syst., vol.17.no.4, 1081-1087, 2002.

[9]A.B.Moreno, "A Methodology to Develop Optimal Schedules and Offering Strategies for a Generation Company Operating in a Short-Term Electricity Market", PHD Thesis, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2002.

[10]R.W.Ferrero, S.M.Shahidehpour "Application of Games With Incomplete Information For Pricing Electricity in Deregulated Power Pools", IEEE Transaction on Power System, Vol.13, No.1, 1998.

[11]S. Soleymani, A.M Ranjbar, A.R. Shirani, " Optimal Bidding Strategic of GENCOs for Competition in Dayahead Energy Market", 20th International Power System Conference, pp.14-16. 2005.

[12]A. David and F. Wen, "Strategic bidding in competitive electricity market: A literature survey," in Proc. IEEE Power Eng. Society Summer Meeting, Seattle, WA,pp. 16–20, 2000.

[13]P. Subbaraj, R. Rengaraj, S. Salivahanan "Enhancement of combined heat and power economic dispatch using self adaptive real-coded genetic algorithm", ELSEVIER, 2008.

[14]Zhang, Gao, et al. "Bidding strategy analysis of virtual power plant considering demand response and uncertainty of renewable energy." IET Generation, Transmission & Distribution 11.13, pp. 3268-3277, 2017.

[15]C.Wang and S. M. Shahidehpour, "Ramp-rate limits in unit commitment and economic dispatch incorporating rotor fatigue effect," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, pp. 1539–1545, 1994.

رزومه



محمود اکبری در سال ۱۳۵۰ متولد شده است، تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی برق قدرت(۱۳۷۷) از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت(۱۳۹۹) از دانشگاه آزاد واحد یادگار امام(ره)، سپری کرده است. زمینه‌های پژوهشی و علاقمندی ایشان تولید انرژی الکتریکی، بهره برداری سیستم‌های قدرت، نیروگاه مجازی و ریزشبکه ها است و در حال حاضر به عنوان کارشناس ارشد صنعت نیروگاهی برق مشغول به کار است.



محمد تبریزیان در سال ۱۳۴۹ متولد شده است، تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۷۷) و دکترای مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۹) سپری کرده است، فعالیت پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده و بازار برق، برنامه‌ریزی و مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی، مهندسی انرژی و مدیریت انرژی است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) می‌باشد، از نامبرده تاکنون حدود چهل مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.



حمیدرضا شاهمیرزاد در تهران متولد شده است(۱۳۶۴). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندس برق-الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد(۱۳۸۹) و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) (۱۳۹۸) سپری کرده است. علاقه‌مندی و فعالیت‌های ایشان در زمینه‌های بهینه‌سازی و مدیریت انرژی، بازار برق، اینترنت اشیاء، طراحی، تامین و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی پلنت‌های صنعتی، بومی‌سازی تجهیزات خاص الکتریکی صنایع مادر تخصصی است و در حال حاضر کارشناس ارشد شرکت بین المللی مهندسی ایران(ایریتک) از زیرمجموعه‌های سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران(ایمیدرو) می‌باشد. از نامبرده تاکنون حدود بیست مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی منتشر شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

Optimal Bidding Strategy Assesment of Virtual Power Plant in Electricity Market Considering Demand Response and Uncertainties

Mahmoud Akbari[1], Mohamad Tabrizian[*1], Hamidreza Shahmirzad[1]

Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mm_tabrizian@yahoo.com

Abstract: One of the achievements of the restructuring of the electricity industry is the creation of a competitive environment in the electricity generation sector, in which a set of small-scale generation units with loads and a covered network, which managed by a specific institution and is called a virtual power plant, can Have an active presence in the wholesale market of energy and rotating storage. This study presents a new framework for planning the optimal bidding strategy for the participation of virtual power plants in the energy and reserve markets, in which wholesale electricity prices, retail market, required storage, and period are the main parameters. A genetic algorithm is used to solve the resulting optimization problem. Uncertainties governing wholesale prices and forecasting consumption needs in the area covered by the virtual power plant are considered. The logarithmic and normal probability distribution functions were used, respectively. The method of Monte Carlo simulation is used to considering uncertain parameters. The simulation results of this paper show that the proposed method is a powerful and appropriate tool to develop an optimal strategy for virtual power plant bidding in the electricity market, taking into account uncertainties and its proper interaction with consumers with consideration of demand response.

Keywords: Electricity Market, Bidding, Virtual Power Plant, Demand Response, Uncertainty

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023