

بهره‌برداری اقتصادی-آلاینده‌گی شبکه توزیع مجهز به هاب انرژی با به کارگیری روش رضایت‌بخش فازی

امید نارویی، محمود اوکاتی صادق* و مسعود قدرتی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده. این مقاله به مسئله برنامه‌ریزی یک هاب انرژی متصل به شبکه توزیع می‌پردازد. مسئله مورد نظر یک مسئله چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و حداقل نمودن میزان انتشار آلاینده‌ها است. از پاسخگویی بار و منابع انرژی تجدیدپذیر در راستای نیل به اهداف ذکر شده، استفاده می‌شود. جهت مدل‌سازی پاسخگویی بار از یک مدل قیمت‌محور استفاده شده است که انتقال بار نام دارد. نیروگاه خورشیدی و توربین بادی به عنوان منابع تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجائیکه عدم قطعیت برخی از پارامترها موجب بروز مشکلاتی در راستای بهره‌برداری از شبکه توزیع می‌گردد؛ در این مقاله مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها مدنظر بوده است. شبکه استاندارد ۳۳ باس IEEE به عنوان شبکه تست در نظر گرفته شده و مسئله غیرخطی بیان شده، در محیط نرم‌افزار گمز (GAMS) پیاده‌سازی و حل شده است. جهت حل مسئله چندهدفه از روش جمع وزنی و برای انتخاب بهترین حل از روش رضایت‌بخش فازی استفاده شده است. نتایج مطالعات عددی اثر پاسخگویی بار، منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت بر روی هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی، به‌کارگیری روش‌های نوین برای بهره‌وری هر چه بیشتر از آن الزامی است. در طی دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه افزایش بهره‌وری انرژی انجام و راهکارهای مختلفی بیان شده است. سیستم‌های انرژی چندحاملی از جمله راهکارهای پیشنهادی است که مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. این سیستم‌ها که هاب نیز نامیده می‌شوند شامل حامل‌های ورودی، مبدل‌ها و حامل‌های خروجی انرژی هستند و برای اولین بار در [۱۳] بیان شده‌اند.

سیستم‌های هاب انرژی جهت افزایش بهره‌وری انرژی توسعه یافته‌اند. به علاوه منابع انرژی تجدیدپذیر از طریق اتصال به هاب انرژی برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزایای سیستم‌های هاب انرژی، بهینه‌سازی ساختاری آن‌ها را در مرحله برنامه‌ریزی ضروری نموده است. بر اساس مدل هاب انرژی، مرجع [۱۶] یک روش جهت انتخاب تجهیزات بهینه و همچنین تعیین ساختار بهینه آن معرفی کرده است. طراحی بهینه هاب انرژی با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در [۹] انجام شده است. هاب انرژی مورد نظر باید توانایی تامین تقاضای الکتریکی و حرارتی را داشته باشد. [۳۱] به طراحی هاب انرژی با میزان آلاینده‌گی کربنی کم در یک محیط دانشگاهی پرداخته است.

در ساختار هاب انرژی از تجهیزات مختلفی می‌توان استفاده کرد. واحد تولید همزمان برق و حرارت [۳۸]، بویلر [۲]، پیل سوختی [۳۲]، میکروتوربین [۱۴]، چیلر جذبی [۷] و مبدل برق به گاز^۱ [۳۵] از جمله مبدل‌های به کار رفته در ساختار هاب انرژی هستند. نیروگاه خورشیدی [۲۲]، نیروگاه بادی [۱۹]، بیوگاز [۳۷] و نیروگاه هیدروژنی [۲۷] به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر در ساختار هاب انرژی به کار می‌رود.

جهت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از هاب انرژی می‌توان از مفهوم پاسخگویی بار استفاده کرد. برنامه پاسخگویی بار را می‌توان بر بارهای الکتریکی [۲۹]، حرارتی [۳] و برودتی [۳۰] اعمال کرد.

با توجه به اینکه انرژی‌های تجدیدپذیر ماهیت غیرقابل پیش‌بینی دارند، در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر امری ضروری است. هم‌چنین میزان تقاضای مصرف‌کننده غیرقطعی است و اعمال عدم قطعیت میزان تقاضا در برنامه‌ریزی هاب انرژی ضرورت دارد. عدم قطعیت میزان تابش خورشید [۱۴]، تقاضای الکتریکی، سرعت باد [۱۲] و تقاضای

¹Power to Gas

حرارتی [۱۰] از جمله منابع عدم قطعیت هستند. هم چنین به علت گسترش استفاده از مفهوم بازار انرژی در رابطه با قیمت انرژی نمی توان به طور قطعی اظهار نظر کرد فلذا عدم قطعیت قیمت برق [۴] یکی دیگر از منابع عدم قطعیت می باشد.

برنامه ریزی هاب انرژی با اهداف مختلف انجام می شود. به عنوان مثال، مرجع [۳۷] به بهره برداری از ریزشکه های متصل به هم با هدف کاهش هزینه بهره برداری هر یک از ریزشکه ها و هم چنین کاهش هزینه بهره برداری کل سیستم می پردازد. هاب انرژی مورد مطالعه در [۲۷] شامل انرژی های تجدیدپذیر است که هدف آن کاهش ریسک های عملکردی در بهره برداری از هاب انرژی است. برنامه ریزی احتمالاتی هاب انرژی در حضور برنامه پاسخگویی بار و ذخیره سازهای انرژی، با هدف حداقل نمودن هزینه های بهره برداری در [۳، ۳۸] انجام شده است. در [۱۰] بهره برداری از هاب انرژی شامل منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها می باشد. در [۴] برنامه ریزی هاب انرژی را با هدف حداکثر نمودن درآمد انجام داده است. ایجاد ارتباط بین ریزشکه ها موجب افزایش انعطاف آن ها می گردد.

افزایش نگرانی در مورد مسائل زیست محیطی موجب تمایل به استفاده از برنامه های مدیریت انرژی با در نظر گرفتن آلاینده ها شده است. ریزشکه موجود در [۳۲] با هدف حداقل نمودن هزینه و میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی بهره برداری شده است. مرجع [۷] به بررسی اثر پاسخگویی بار بر هزینه بهره برداری و هم چنین میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی در حضور ذخیره سازهای الکتریکی، حرارتی و برودتی پرداخته است. بهره برداری از هاب انرژی با هدف حداقل نمودن هزینه و انتشار آلاینده های زیست محیطی در حضور نیروگاه خورشیدی و خودروی الکتریکی در [۲۲] انجام شده است. بهره برداری از هاب انرژی با در نظر گرفتن پاسخگویی بار با هدف حداقل نمودن هزینه و میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر در [۲۹] انجام شده است. هاب انرژی به کار رفته در [۱۲] به مبدل توان به گاز مجهز است. هدف از بهره برداری از این هاب انرژی حداقل نمودن هزینه و انتشار آلاینده های زیست محیطی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر است. مرجع [۳۳] به بهره برداری از هاب انرژی با هدف کاهش هزینه و همچنین میزان آلاینده های زیست محیطی پرداخته است.

مرجع [۱۹] به بازآرایی شبکه توزیع در حضور هاب انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر با هدف حداقل نمودن هزینه های بهره برداری پرداخته است. بهره برداری از هاب انرژی متصل به شبکه توزیع با در نظر گرفتن پاسخگویی بار، ذخیره سازهای انرژی و خودروی الکتریکی جهت حداقل نمودن هزینه و میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی در [۳۰] انجام شده است. در [۲۴]

ادغام بهینه هاب انرژی و شبکه توزیع با هدف اولویت‌های اقتصادی، با در نظر گرفتن قیود فنی و همچنین عدم قطعیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مشارکت هاب انرژی در بازار برق و حرارت با اهداف اقتصادی در [۲۱] انجام شده است که این هاب انرژی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی و شبکه توزیع حرارت را به هم متصل می‌کند. جهت غلبه بر چالش‌های موجود در زمینه کاهش آلاینده‌های کربنی مرجع [۸] به هماهنگی سطح توزیع و انتقال انرژی الکتریکی پرداخته است.

همانگونه که در قسمت قبل بیان شد اغلب تحقیقات گذشته به بهره‌برداری هاب انرژی به صورت مجزا از شبکه توزیع پرداخته‌اند. لازمه ارتباط بین هاب با شبکه توزیع در نظر گرفتن قیود فنی این شبکه می‌باشد. تعداد کمی از مقالات ارتباط بین هاب انرژی و شبکه توزیع را در نظر گرفته و قیود مربوط را در نظر گرفته‌اند. گرچه در برخی از تحقیقات منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است اما از دیدگاه زیست محیطی و اثری که بر میزان انتشار آلاینده‌ها دارند بررسی صورت نگرفته است. ذخیره‌ساز انرژی به عنوان یکی از تجهیزات موثر در مدیریت یک سیستم انرژی در برخی از تحقیقات مورد غفلت واقع شده است. با توجه به تاثیر مهم برنامه‌های پاسخگویی بار در بهره‌برداری یک سیستم انرژی، استفاده از این برنامه‌ها امری ضروری است. عدم قطعیت میزان تقاضا و قیمت حامل‌های انرژی و همچنین عدم قطعیت میزان توان تولید شده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر مسئله برنامه‌ریزی هاب انرژی را به طرز قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. در تحقیقات گذشته عدم قطعیت فقط برای تقاضای الکتریکی در نظر گرفته شده است. در مورد عدم قطعیت حامل‌های انرژی در اکثر تحقیقات عدم قطعیت قیمت برق مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله برنامه‌ریزی هاب انرژی در شبکه توزیع هوشمند با هدف کاهش هزینه و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پاسخگویی بار و ذخیره‌سازهای انرژی از جمله اجزا شبکه هوشمند هستند که در نظر گرفته می‌شوند. همچنین با توجه به ماهیت منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده (بادی و خورشیدی)، عدم قطعیت این منابع جهت اطمینان از نتایج بدست آمده، در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی شامل برق و حرارت و عدم قطعیت میزان تقاضای الکتریکی و حرارتی مورد توجه قرار گرفته شده است. جهت حل مسئله چندهدفه مورد نظر از روش جمع وزنی استفاده شده است. با استفاده از روش جمع وزنی جواب‌های متعددی حاصل می‌شود که به عنوان جبهه پرتو بیان می‌گردد. با توجه به ماهیت متضاد توابع هدف در نظر گرفتن مصالحه بین آن‌ها جهت انتخاب بهترین حل از میان جواب‌های جبهه پرتو، ضروری است. روش رضایت‌بخش

فازی ابزاری مناسب جهت ایجاد مصالحه بین توابع هدف متضاد می‌باشد بنابراین از این روش برای انتخاب بهترین حل از بین گزینه‌های موجود در جبهه پرتو به کار رفته است. جدول ۱ خلاصه‌ای از مقالات بررسی شده و پژوهش حاضر را ارائه می‌دهد.

ضرورت تحقیق به شرح زیر است:

– بررسی اثر منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار بر هزینه بهره برداری
– بررسی اثر منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار روی میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی

– بررسی اثر عدم قطعیت پارامترهایی مانند قیمت گاز و تقاضای حرارتی هاب انرژی روی هزینه بهره برداری و میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی
در این مقاله نوآوری‌های زیر صورت گرفته است:

۱- به کارگیری روش انتقال توان برای برنامه پاسخگویی بار که مناسب بارهای خانگی و صنعتی است.

۲- در نظرگرفتن برخی عدم قطعیت‌ها که قبلاً از آن‌ها صرف نظر شده است؛ از جمله عدم قطعیت قیمت گاز که تاثیر به‌سزایی در بهره‌برداری از هاب انرژی دارد.

۳- در تحقیقات گذشته فقط توان دریافتی هاب از شبکه توزیع در توابع هدف در نظر گرفته شده است. در صورتی که در این مقاله، توابع هدف به گونه‌ای تغییر کرده است که شامل کل توان دریافتی از شبکه بالادست، شامل توان لازم جهت تامین بارهای محلی هر باس و تقاضای هاب‌های متصل به برخی از باس‌های شبکه، می‌باشد.

در ادامه روش حل مسئله چندهدفه در بخش ۲ بیان شده است. بخش ۳ به بیان مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی هاب انرژی در شبکه توزیع اختصاص داده شده است. اطلاعات سیستم مورد مطالعه و هم‌چنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش ۴ بیان و بررسی شده است. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۵ آمده است.

۲. روش حل مسئله چند هدفه

۱.۲. روش جمع وزنی. برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه که اهداف آن در تضاد با یکدیگر هستند، روش‌های مختلفی وجود دارد. به‌عنوان مثال از الگوریتم‌های تکاملی [۱۲]، روش محدودیت آپسیلون [۲۵] و روش جمع وزنی [۲۳] جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود.

جدول ۱: تحقیقات گذشته

مرجع	تابع هدف		عدم قطعیت			شبکه توزیع	منابع تجدیدپذیر	ذخیره‌ساز انرژی	پاسخگویی بار
	هزینه	آلاینده‌گی	بار	قیمت	منابع تجدیدپذیر				
[۵]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
[۶]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
[۷]	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-
[۹]	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	✓
[۱۱]	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-
[۱۳]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	-
[۱۴]	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-
[۱۵]	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓
[۱۶]	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	✓
[۱۸]	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	-
[۱۹]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	-
[۲۱]	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓
تحقیق پیش رو	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

در این مقاله، از روش جمع وزنی جهت حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. در روش مورد استفاده با تغییر وزن‌های توابع هدف متضاد حل‌های بهینه پرتو بدست می‌آید. مقادیر مختلف که از وزن‌های مختلف توابع هدف حاصل می‌شوند مجموعه پرتو بهینه را تعیین می‌کند.

معمولاً در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، توابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند. علاوه بر آن توابع هدف از لحاظ بعد نیز با یکدیگر متفاوت هستند، لذا در ابتدا باید هر کدام از توابع هدف بدون بعد (نرمالیزه) شوند. همچنین با توجه به جواب‌های متعدد حاصل از اعمال روش جمع وزنی یک ابزار مناسب برای انتخاب بهترین حل استفاده شود.

با توجه به اینکه اهداف مسئله بررسی شده در این تحقیق از نظر بعد اختلاف دارند، جهت تحلیل صحیح، هر دو هدف باید نرمالیزه (بین ۰ و ۱) شوند. علاوه بر آن از بین مقادیر بهینه موجود در جبهه پرتو نیز یک مقدار انتخاب شود. روش رضایت بخش فازی در ابتدا به نرمالیزه کردن مقادیر توابع هدف پرداخته و سپس از بین این مقادیر به انتخاب بهترین جواب (حل) مسئله می‌پردازد.

در این مقاله از روش رضایت‌بخش فازی^۱ جهت ایجاد مصالحه بین توابع هدف و انتخاب بهترین حل استفاده شده است. این روش در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

^۱Fuzzy Satisfying

۲.۲. روش رضایت بخش فازی. حل مسئله چندهدفه با روش های مختلف، به جواب های متعددی می انجامد. معیار انتخاب بهترین حل، توانایی ایجاد مصالحه بین دو تابع هدف که با یکدیگر در تضاد هستند، می باشد. از طرفی با توجه به اینکه توابع هدف در مسائل بهینه سازی چندهدفه از نظر بعد و دامنه با یکدیگر تفاوت دارند، در مرحله اول باید نرمالیزه شوند [۲۵]. فرض کنید یک مسئله دارای m تابع هدف برای کمینه کردن است. عضویت فازی هر تابع هدف، آن را در بازه بین $(0, 1)$ قرار می دهد؛ بنابراین تابع عضویت خطی k امین حل برای h امین تابع هدف به صورت رابطه زیر نشان داده می شود.

$$(1.2) \quad f_h^k = \begin{cases} 0 & f_h^k \leq f_h^{\min} \\ \frac{f_h^k - f_h^{\max}}{f_h^{\min} - f_h^{\max}} & f_h^{\min} \leq f_h^k \leq f_h^{\max} \\ 1 & f_h^k \geq f_h^{\max} \end{cases}$$

f_h^{\min} و f_h^{\max} به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه تابع هدف h در حل های بدست آمده را نشان می دهند. f_h^k در واقع k امین حل تابع هدف h را به هنگام بهینه شدن بیان می کند. توابع هدف مقاله با استفاده از روابط (۲.۲) و (۳.۲) نرمالیزه می شوند [۱۸]:

$$(2.2) \quad f_{1,pu} = \frac{Cost - Cost^{\max}}{Cost^{\min} - Cost^{\max}}$$

$$(3.2) \quad f_{2,pu} = \frac{Emi - Emi^{\max}}{Emi^{\min} - Emi^{\max}}$$

همان گونه که قبلا بیان شد مسئله دارای دو هدف است که از نظر واحد متفاوت هستند، لذا برای اینکه بتوان به مسئله تک هدفه دست یافت باید دو هدف بدون مقیاس شوند [۱۸]. برای این کار، مسئله در دو حالت حل می شود [۲۳]:

۱- در این مرحله مسئله با هدف به حداقل رساندن هزینه حل می شود. هزینه در کمترین مقدار $(Cost^{\min})$ و آلودگی در بیشترین مقدار خود قرار دارد (Emi^{\max}) .

۲- در این مرحله مسئله با هدف به حداقل رساندن آلودگی حل می شود. آلودگی در کمترین مقدار (Emi^{\min}) و هزینه در بیشترین مقدار خود قرار دارد $(Cost^{\max})$.

۳- در این مرحله با روش جمع وزنی به حل مسئله پرداخته می شود.

$$(4.2) \quad F = \max(w_1 f_{1,pu} + w_2 f_{2,pu})$$

$$(5.2) \quad w_1 + w_2 = 1$$

تابع هدف نهایی با F نشان داده شده است. w_1 و w_2 به ترتیب ضرایب وزنی تابع هزینه و تابع آلودگی هستند.

۴- با تغییر ضرایب وزنی w_1 و w_2 ، مقادیر مختلفی برای تابع هدف به دست می‌آید که در واقع نشان‌دهنده جبهه پرتو است.

۵- طبق روش رضایت بخش فازی جهت محاسبه تابع عضویت k امین حل، از رابطه (۶.۲) استفاده می‌شود [۳۴].

$$(۶.۲) \quad f^k = \min(f_1^k, \dots, f_m^k), k = 1, 2, \dots, m$$

۶- بیشینه ضعیف‌ترین تابع عضویت، بهترین حل ممکن برای مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است که طبق رابطه (۷.۲) بیان شده است:

$$(۷.۲) \quad f^k = \max(f^1, \dots, f^m)$$

۳. مدل سازی ریاضی

در این بخش به مدل‌سازی شبکه و همچنین بخش‌های مختلف هاب انرژی پرداخته می‌شود.

۱.۱.۳. تابع هزینه. رابطه (۱.۳) هزینه بهره‌برداری از هاب انرژی را نشان می‌دهد:

$$(۱.۳) \quad f_1 = \min(Cost) = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{BN} (P_{i,t}^{net,DSM} \lambda_t^{net}) + \sum_{h=1}^H (G_{h,t}^{net} \lambda^{gas}) \right)$$

که $P_{i,t}^{net,DSM}$ توان دریافتی باس i از شبکه پس از اعمال برنامه پاسخگویی بار، $G_{h,t}^{net}$ گاز مصرفی هاب h در ساعت t ، λ_t^{net} و λ^{gas} به ترتیب قیمت ساعتی برق و قیمت گاز هستند. H تعداد کل هاب‌ها، BN تعداد باس‌های شبکه مورد مطالعه و T کل دوره بهره‌برداری است.

۲.۲.۳. تابع انتشار آلاینده‌ها. میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی با رابطه (۲.۳) بیان می‌شود [۱۵]:

$$(۲.۳) \quad f_2 = \min(Emi) = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^E \left(\sum_{i=1}^{BN} (P_{i,t}^{net,DSM} \zeta_e^{net}) + \sum_{h=1}^H (G_{h,t}^{CHP} \zeta_e^{CHP} + G_{h,t}^B \zeta_e^B) \right)$$

در این رابطه، e برای نشان‌دادن نوع آلودگی (کربن‌دی‌اکسید، اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن) به کار رفته است. ζ_e^{net} ، ζ_e^{CHP} و ζ_e^B به ترتیب ضرایب آلودگی ناشی از توان

تولیدی شبکه، گاز مصرفی CHP و گاز مصرفی بویلر هستند. $G_{h,t}^{CHP}$ و $G_{h,t}^B$ گاز مصرفی بویلر و CHP را نشان می‌دهد.

۳.۳. قیود شبکه. این بخش به بیان قیود شبکه از جمله قید تعادل توان اکتیو و راکتیو شبکه و قید ولتاژ باس‌ها اختصاص دارد [۲۴].

$$P_{i,t}^{net,DSM} - P_{i,t}^{load} - P_{i,t} + P_{h,t}^{net} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} = \sum_{j=1}^{BN} V_{i,t} V_{j,t} Y_{i,j} \cos(\theta_{i,j} - \delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (۳.۳)$$

$$Q_{i,t}^{net} - Q_{i,t}^{load} = \sum_{j=1}^{BN} V_{i,t} V_{j,t} Y_{i,j} \sin(\theta_{i,j} - \delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (۴.۳)$$

$$V_{i,t}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \quad (۵.۳)$$

در روابط (۳.۳) تا (۵.۳)، $P_{i,t}^{net,DSM}$ توان اکتیو مصرفی باس i پس از اعمال برنامه پاسخگویی بار و $Q_{i,t}^{net}$ توان راکتیو دریافتی از شبکه در ساعت t ، $P_{i,t}^{load}$ و $Q_{i,t}^{load}$ بار اکتیو و راکتیو باس i در ساعت t ، $V_{i,t}$ ولتاژ باس i در ساعت t ، $V_{j,t}$ ولتاژ باس j در ساعت t ، $\delta_{i,t}$ زاویه ولتاژ باس i در ساعت t ، $\delta_{j,t}$ زاویه ولتاژ باس j در ساعت t ، $\theta_{i,j}$ زاویه ادمیتانس بین باس i و باس j را نشان می‌دهد. $P_{i,t}^{PV}$ و $P_{i,t}^{WT}$ به ترتیب توان نیروگاه خورشیدی و توربین بادی متصل به باس i در ساعت t هستند. طبق رابطه (۵.۳) مقادیر حداکثر و حداقل ولتاژ مجاز باس‌ها به ترتیب با V_i^{\min} و V_i^{\max} نشان داده شده است.

۴.۳. مدل‌سازی واحد CHP. روابط (۶.۳) و (۷.۳) ارتباط بین گاز مصرفی و میزان برق و حرارت تولیدی توسط CHP را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$P_{h,t}^{CH} = G_{h,t}^{CH} \eta_{ge}^{CH} \quad (۶.۳)$$

$$H_{h,t}^{CH} = G_{h,t}^{CH} \eta_{gh}^{CH} \quad (۷.۳)$$

در روابط (۶.۳) و (۷.۳)، $P_{h,t}^{CH}$ و $H_{h,t}^{CH}$ به ترتیب توان الکتریکی و حرارتی تولیدی و گاز مصرفی CHP است. η_{ge}^{CH} و η_{gh}^{CH} به ترتیب بازده الکتریکی و حرارتی CHP هستند. رابطه (۸.۳) قید ظرفیت مربوط به CHP را نشان می‌دهد که P_{\max}^{CH} نشان دهنده حداکثر توان الکتریکی تولیدی توسط CHP است [۲۶].

$$0 \leq P_{h,t}^{CH} \leq P_{\max}^{CH} \quad (۸.۳)$$

روابط (۹.۳) و (۱۰.۳) کل توان الکتریکی و حرارتی تولیدی توسط واحدهای CHP موجود در هر هاب را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$(۹.۳) \quad P_{h,t}^{CHP} = N_h^{CHP} P_{h,t}^{CH}$$

$$(۱۰.۳) \quad H_{h,t}^{CHP} = N_h^{CHP} H_{h,t}^{CH}$$

تعداد CHP در هر هاب با N_h^{CHP} نشان داده شده است. کل توان الکتریکی و حرارتی تولیدی توسط واحدهای CHP در هر هاب $P_{h,t}^{CHP}$ و $H_{h,t}^{CHP}$ هستند.

۵.۳. مدل‌سازی واحد بویلر. ورودی بویلر گاز طبیعی می‌باشد که پس از ضرب مقدار بازده بویلر می‌توان حرارت تولیدی آن را محاسبه نمود. در رابطه (۱۱.۳) ارتباط بین ورودی و خروجی بویلر نشان داده شده است [۲۶]:

$$(۱۱.۳) \quad H_{h,t}^{BO} = G_{h,t}^{BO} \eta_{gh}^B$$

$H_{h,t}^{BO}$ ، $G_{h,t}^{BO}$ و η_{gh}^B به ترتیب حرارت تولیدی، گاز مصرفی و بازده حرارتی بویلر هستند. حرارت تولیدی توسط بویلر مقدار محدودی است که رابطه (۱۲.۳) این محدودیت را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$(۱۲.۳) \quad 0 \leq H_{h,t}^{BO} \leq H_{\max}^{BO}$$

در این رابطه H_{\max}^{BO} نشان دهنده حداکثر حرارت تولیدی توسط بویلر است. مجموع حرارت تولیدی توسط بویلرهای موجود در هر هاب از رابطه (۱۳.۳) بدست می‌آید [۲۹]:

$$(۱۳.۳) \quad H_{h,t}^{BO} = N_h^{BO} H_{h,t}^{BO}$$

N_h^{BO} تعداد بویلرها و $H_{h,t}^{BO}$ کل حرارت تولیدی توسط بویلرهای موجود در هاب h است.

۶.۳. مدل‌سازی واحد تهویه مرکزی. واحد تهویه مرکزی انرژی الکتریکی را دریافت و آن را به حرارت تبدیل می‌کند. رابطه (۱۴.۳) ارتباط بین برق مصرفی و حرارت تولیدی واحد تهویه مرکزی را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$(۱۴.۳) \quad H_{h,t}^{CA} = P_{h,t}^{CA} \eta_{eh}^{CAC}$$

$H_{h,t}^{CA}$ و $P_{h,t}^{CA}$ به ترتیب برق مصرفی و حرارت تولیدی تهویه مرکزی موجود در هاب h در ساعت tt است. η_{eh}^{CAC} بازده حرارتی مربوط به این واحد می‌باشد. رابطه (۱۵.۳) مربوط به

قید ظرفیت واحد تهویه مرکزی است. H_{\max}^{CAC} حداکثر حرارت تولیدی تهویه مرکزی را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$(۱۵.۳) \quad 0 \leq H_{h,t}^{CA} \leq H_{\max}^{CA}$$

$$(۱۶.۳) \quad H_{h,t}^{CAC} = N_h^{CA} H_{h,t}^{CA}$$

در رابطه (۱۶.۳)، N_h^{CA} نشان دهنده تعداد واحدهای تهویه مرکزی در هاب h و $H_{h,t}^{CAC}$ کل حرارت تولیدی توسط آن‌ها است.

۷.۳. مدل‌سازی ذخیره‌ساز انرژی (باتری). در این بخش مدل‌سازی باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. روابط (۱۷.۳) تا (۱۹.۳) مدل باتری را نشان می‌دهد [۲]:

$$(۱۷.۳) \quad E_{h,t}^S = E_{h,t-1}^S + P_{h,t}^{chs} \eta_{chs} - \frac{1}{\eta_{dis}} P_{h,t}^{dis}$$

$$(۱۸.۳) \quad \underline{P}^{chs} \leq P_{h,t}^{chs} \leq \bar{P}^{chs}$$

$$(۱۹.۳) \quad \underline{P}^{dis} \leq P_{h,t}^{dis} \leq \bar{P}^{dis}$$

در روابط (۱۷.۳) تا (۱۹.۳)، بازده شارژ و دشارژ باتری با η_{chs} و η_{dis} نشان داده شده است. $E_{h,t}^S$ انرژی ذخیره شده در باتری است. \underline{P}^{chs} ، \underline{P}^{dis} ، \bar{P}^{chs} و \bar{P}^{dis} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر مقدار شارژ و دشارژ را نشان می‌دهد.

۸.۳. تعادل توان در هاب انرژی. در این بخش به بیان قیود تعادل توان الکتریکی و حرارتی هاب انرژی پرداخته شده است. رابطه (۲۰.۳) قید تعادل توان الکتریکی هاب را نشان می‌دهد [۲۴]:

$$(۲۰.۳) \quad P_{h,t}^{load,DSM} + P_{h,t}^{chs} + P_{h,t}^{CAC} = P_{h,t}^{net} + P_{h,t}^{CHP} + P_{h,t}^{dis}$$

که $P_{h,t}^{load,DSM}$ بار الکتریکی هاب h در ساعت t پس از اعمال برنامه پاسخگویی بار، $P_{h,t}^{CHP}$ کل توان الکتریکی تولیدی توسط واحدهای CHP موجود در هاب h در ساعت t ، $P_{h,t}^{chs}$ و $P_{h,t}^{dis}$ به ترتیب مقدار شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی هاب h در ساعت t است. برق مصرفی واحد تهویه مرکزی هاب h در ساعت t با $P_{h,t}^{CAC}$ نشان داده شده است. قید تعادل توان حرارتی هاب در رابطه (۲۱.۳) آمده است [۲۴]:

$$(۲۱.۳) \quad H_{h,t}^{load} = H_{h,t}^{CHP} + H_{h,t}^B + H_{h,t}^{CAC}$$

در رابطه (۲۱.۳) بار حرارتی هاب h ، حرارت تولیدی CHP ، بویلر و تهویه مرکزی در ساعت t به ترتیب با $H_{h,t}^{load}$ ، $H_{h,t}^{CHP}$ ، $H_{h,t}^B$ و $H_{h,t}^{CAC}$ نشان داده شده است.

۹.۳. گاز مصرفی هاب انرژی. رابطه (۲۲.۳) میزان گاز مصرفی هاب انرژی را نشان می‌دهد [۲۴]:

$$(22.3) \quad G_{h,t}^{net} = N_h^{CH} G_{h,t}^{CH} + N_h^{BO} G_{h,t}^{BO}$$

۱۰.۳. مدل پاسخگویی بار. پیشرفت فناوری مورد استفاده در سیستم قدرت، امکان مشارکت اپراتورهای سیستم در برنامه‌های پاسخگویی بار را فراهم آورده است. در این مقاله، از روش انتقال بار به عنوان یک مدل قیمت‌محور برای مدل‌سازی پاسخگویی بار الکتریکی هاب‌های انرژی استفاده شده است. در این روش، بار از ساعاتی که برق گران است به ساعاتی که برق قیمت پایین‌تری دارد، انتقال می‌یابد [۱]. هدف از این انتقال بار کاهش هزینه‌های بهره‌برداری است.

مقدار بار پس از اعمال مدل پاسخگویی به صورت زیر است [۱]:

$$(23.3) \quad P_{h,t}^{load,DSM} = (1 - DR_{h,t}) P_{h,t}^{load} + ldr_{h,t}$$

که بار هاب h در ساعت t قبل از اعمال پاسخگویی بار با $P_{h,t}^{load}$ نشان داده می‌شود. مقدار بار هاب h که در ساعت t قابلیت انتقال دارد با $DR_{h,t}$ نشان داده شده است. $ldr_{h,t}$ بار انتقال‌یافته از طریق برنامه پاسخگویی بار را نشان می‌دهد. همچنین مقدار افزایش بار در هر ساعت نیز با محدودیت روبرو است [۱]:

$$(24.3) \quad P_{h,t}^{inc} \leq inc_{h,t} P_{h,t}^{load}$$

در رابطه (۲۴.۳) $P_{h,t}^{inc}$ مقدار بار افزایش‌یافته و $inc_{h,t}$ درصد افزایش بار هاب h در ساعت t است [۱].

$$(25.3) \quad inc_{h,t} \leq inc^{\max}$$

$$(26.3) \quad DR_{h,t} \leq DR^{\max}$$

که DR^{\max} و inc^{\max} حداکثر میزان انتقال و افزایش بار را نشان می‌دهد که برابر با ۲۰ درصد فرض شده است [۳۵]. بار قابل انتقال در هر ساعت اندازه متغیری دارد [۱]:

$$(27.3) \quad \sum_{t=1}^T ldr_{h,t} = \sum_{t=1}^T DR_{h,t} P_{h,t}^{load}$$

۱۱.۳. توان تولیدی نیروگاه خورشیدی. پارامترهای مختلفی توان الکتریکی تولید شده توسط نیروگاه خورشیدی را تحت تاثیر قرار می‌دهند از جمله منطقه زمانی، ساعت محلی، درجه حرارت محیط، طول و عرض جغرافیایی. توان تولیدی نیروگاه خورشیدی در هر ساعت از مساله برنامه‌ریزی بر اساس میزان تابش خورشید و با استفاده از رابطه ریاضی زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$(۲۸.۳) \quad P^{PV}(t) = \eta^{PV} A_{panel} R_s(t)$$

در رابطه (۲۸.۳)، $P^{PV}(t)$ ، η^{PV} و A_{panel} به ترتیب توان تولیدی و راندمان لحظه‌ای سیستم PV و سطح پنل‌ها را نشان می‌دهد. تابش خورشید با $R_s(t)$ نشان داده شده است. رابطه (۲۹.۳) بیانگر بازده لحظه‌ای سیستم PV است [۱۵]:

$$(۲۹.۳) \quad \eta^{PV} = \eta_{ref}^{PV} \eta^{MPPT} \{1 - \tau(T_{panel} - T_{panel}^{ref})\}$$

در رابطه فوق بازده مرجع، بازده دستگاه ردیابی، درجه حرارت صفحات و درجه حرارت مرجع صفحات خورشیدی به ترتیب با η_{ref}^{PV} ، η^{MPPT} ، T_{panel} و T_{panel}^{ref} نشان داده شده است. τ ضریب کارایی دما است که برای صفحات معمولاً از ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۶ به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه این مقدار برابر با ۰/۰۰۴۸ فرض می‌شود. دمای صفحات از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$(۳۰.۳) \quad T_{panel} = T^{ct} + R_s(t) \left\{ \frac{(NOPT - ۲۰)}{۸۰۰} \right\}$$

در رابطه فوق T^{ct} و $NOPT$ به ترتیب نشان‌دهنده میزان درجه حرارت محیط و دمای طبیعی بهره‌برداری از صفحات می‌باشد که در این تحقیق به ترتیب برابر با ۲۵ [۲۰] و ۴۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده‌اند.

۱۲.۳. توان تولیدی توربین بادی. توان تولید شده یک توربین باد به طور عمده به سرعت باد بستگی دارد. سرعت باد توربین باد معمولاً به عنوان تابع چگالی احتمال ویبول مدل‌سازی می‌شود. رابطه زیر تابع چگالی سرعت باد را نشان می‌دهد [۳۶]:

$$(۳۱.۳) \quad PDF(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

در اینجا K و C به ترتیب فاکتور شکل و فاکتور مقیاس تابع ویبول را نشان می‌دهند. توان تولید شده توربین باد تابعی از سرعت باد است که با رابطه زیر مشخص می‌شود [۱۱]:

$$(32.3) \quad P^{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{in}^c \\ \frac{v-v_{in}^c}{v_{rated}^c-v_{in}^c} P_r, & v_{in}^c \leq v \leq v_{rated}^c \\ P_r, & v_{rated}^c \leq v < v_{out}^c \\ 0, & v \geq v_{out}^c \end{cases}$$

در اینجا P^{WT} توان تولیدی توربین بادی، v_{in}^c و v_{out}^c به ترتیب سرعت برش و سرعت قطع توربین بادی و بر حسب متر بر ثانیه می‌باشند. v_{rated}^c سرعت نامی توربین بر حسب متر بر ثانیه و توان نامی توربین بادی می‌باشند.

۱۳.۳. قید توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر. از آنجایی که تولید توان توسط نیروگاه‌های خورشیدی و بادی دارای عدم قطعیت است، می‌تواند به تجهیزات شبکه آسیب برساند. جهت جلوگیری از این امر، انرژی تولید شده توسط این واحدها حد مشخصی دارد. طبق آنچه در رابطه (۳۳.۳) مشاهده می‌شود، حداکثر توان تولید شده توسط این منابع در هر زمان نباید از ۳۰ درصد مجموع تقاضای آن زمان تجاوز نماید [۶].

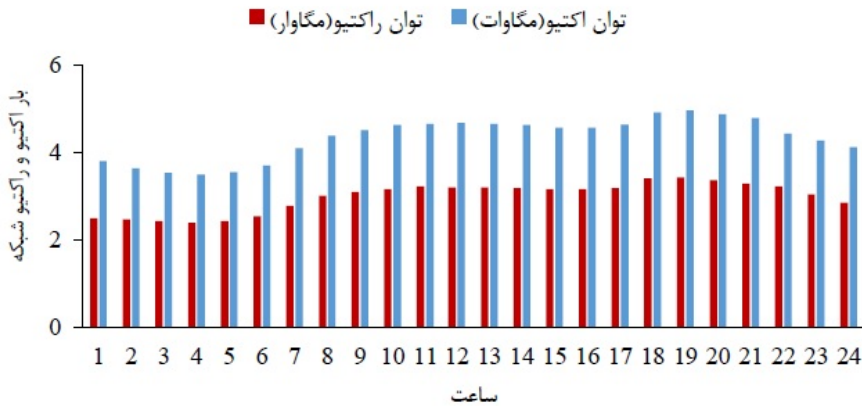
$$(33.3) \quad P^{PV} + P^{WT} \leq 0.3 P_{max}^{TD}$$

در این رابطه P^{PV} ، P^{WT} و P_{max}^{TD} به ترتیب توان تولیدی توسط نیروگاه خورشیدی، توان تولیدی نیروگاه بادی و حداکثر مجموع تقاضای اکتیو شبکه (شامل بار اکتیو شبکه و بار الکتریکی هاب‌های متصل به آن) هستند.

۴. نتایج شبیه سازی

۱.۴. داده‌های ورودی. این قسمت به اطلاعات مربوط به قیمت برق و گاز، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و واحدهای موجود در هاب انرژی (CHP، بویلر و سیستم تهویه مرکزی) که از مراجع [۲، ۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۲۹، ۳۵] استخراج شده است، اختصاص یافته است. همان گونه که قبلاً اشاره شد در این تحقیق از شبکه استاندارد ۳۳ باس IEEE به‌عنوان شبکه تست استفاده شده است. توان و ولتاژ مبنا به ترتیب برابر با ۱ مگاوات و ۱۲/۶۶ کیلوولت و محدودیت ولتاژ بین ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت فرض می‌شود. اطلاعات مربوط به شبکه ۳۳ باس IEEE در مرجع [۵] موجود است

میزان مشارکت باس‌ها در [۱۷] آمده است. شکل ۱ بار کل شبکه در ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد: پارامترهای مربوط به تابع ویبول و توربین بادی در [۳۶] آمده است. اطلاعات مربوط



شکل ۱: بار شبکه

به میزان تابش ساعتی خورشید در [۲۸] موجود است. مجموع ظرفیت تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی ۱/۵ مگاوات در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت برق، قیمت گاز، عدم قطعیت توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین عدم قطعیت تقاضاهای الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شده‌اند.

عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت برق و گاز و همچنین بار الکتریکی و حرارتی و توان تولیدی نیروگاه خورشیدی با استفاده از توزیع نرمال با انحراف معیار ۱۰ درصد مدل شده است. تابع ویبول جهت مدل سازی عدم قطعیت سرعت باد به کار گرفته شده است.

ابتدا با استفاده از تابع rand نرم‌افزار متلب^۱ برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت ۱۰۰۰ سناریو تولید می‌شود. جعبه ابزار SCENRED نرم‌افزار گمز جهت کاهش این سناریوها به کار می‌رود. خروجی این برنامه ۱۰ سناریو است که جدول ۲ احتمال این سناریوها را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۲ مسئله در ۱۰ سناریوی مختلف بررسی می‌شود. سپس نتایج حاصل از

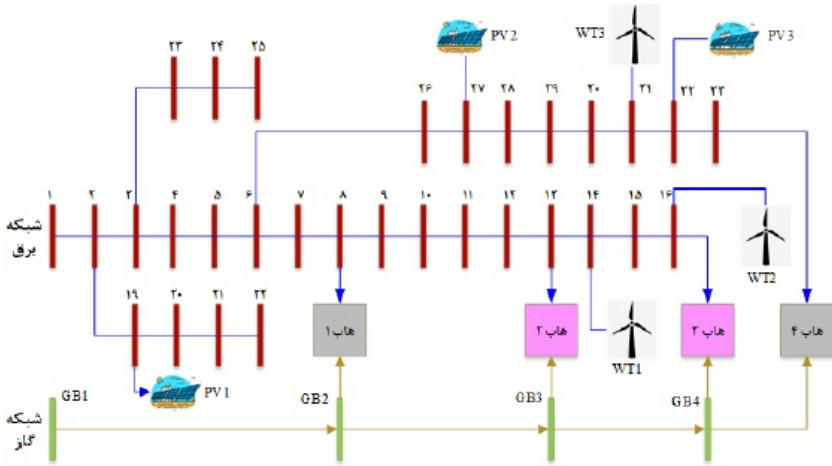
^۱MATLAB

جدول ۲: احتمال سناریوها

شماره سناریو	احتمال	شماره سناریو	احتمال
S_1	۰/۱۱۴	S_6	۰/۰۹۵
S_2	۰/۱۰۲	S_7	۰/۰۸۴
S_3	۰/۱۳۱	S_8	۰/۰۸۶
S_4	۰/۰۹۹	S_9	۰/۱۰۸
S_5	۰/۰۸۴	S_{10}	۰/۰۹۷

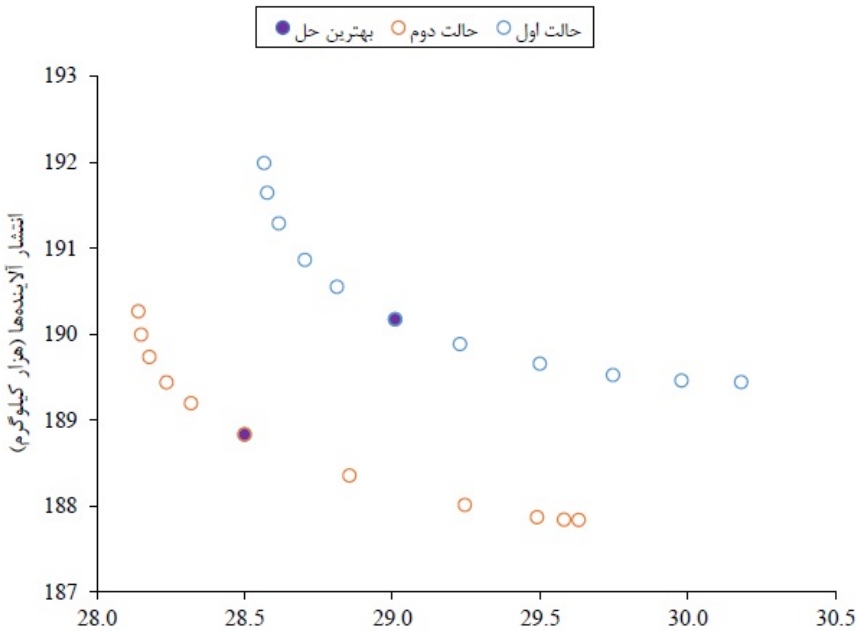
هر سناریو در احتمال متناظر ضرب می‌شوند. در نهایت این مقادیر با هم دیگر جمع شده و به عنوان مقدار نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲.۴. نتایج شبیه‌سازی. شکل ۲ ساختار سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این مقاله برنامه‌ریزی هاب انرژی متصل به شبکه توزیع در چهار حالت انجام شده است: ۱- بدون در نظر گرفتن پاسخگویی بار، منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت، بار الکتریکی و حرارتی هاب، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر، ۲- با در نظر گرفتن پاسخگویی بار و بدون در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت، بار، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر، ۳- با در نظر گرفتن پاسخگویی بار، منابع انرژی تجدیدپذیر و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت، بار، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر، ۴- با در نظر گرفتن پاسخگویی بار، منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت ناشی از تغییرات قیمت، بار، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر. جبهه بهینه پرتو حاصل برای چهار حالت ذکر شده در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است (برای مشاهده بهتر نتایج از دو نمودار استفاده شده است؛ شکل ۳ برای مقایسه حالت اول و دوم و شکل ۴ جهت مقایسه حالت سوم و چهارم). از مقایسه بهترین حل حالت دوم با بهترین حل حالت اول می‌توان مشاهده کرد که هزینه بهره‌برداری ۵۱۰ دلار و انتشارات آلاینده‌ها ۱۳۳۹ کیلوگرم کاهش یافته است. مقادیر حاصل برای بهترین حل در حالت سوم (در مقایسه با حالت اول) کاهش ۴۲۹۰ دلاری هزینه بهره‌برداری را نشان می‌دهد. هم‌چنین در این حالت انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ۲۱۷۲۱/۷ کیلوگرم کاهش یافته است. با اعمال عدم قطعیت در حالت چهارم مشاهده می‌شود هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، در مقایسه با حالت سوم، افزایش یافته است. از مقایسه بهترین حل این حالت با حالت اول چنین می‌توان گفت



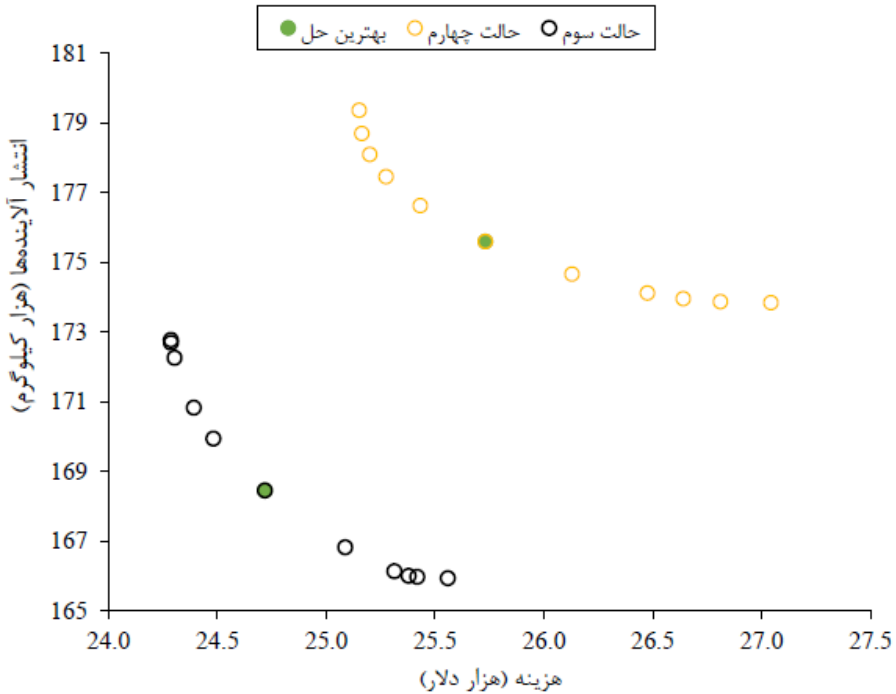
شکل ۲: ساختار سیستم مورد مطالعه

هزینه بهره‌برداری ۳۲۷۷ دلار و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ۱۴۵۷۰ کیلوگرم کاهش یافته است. شکل ۵ مقادیر هزینه و میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در چهار حالت شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. طبق این شکل مشاهده می‌شود که با اعمال برنامه پاسخگویی بار علاوه بر کاهش هزینه، انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز کاهش می‌یابد. میزان کاهش هزینه حدود ۱/۷ درصد و میزان کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ۰/۷ درصد می‌باشد. حضور منابع تجدیدپذیر در حالت سوم، موجب کاهش ۱۴/۸ درصدی هزینه و همچنین کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به میزان ۱۱/۴۲ درصد می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در مقایسه با حالت سوم، اعمال عدم قطعیت موجب افزایش هزینه و میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد. با توجه به آنچه در شکل ۵ قابل مشاهده است، میتوان گفت این افزایش به گونه ای است که مقادیر هزینه و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در مقایسه با حالت اول کاهش می‌یابد. میزان کاهش هزینه حدود ۱۱/۳۳ درصد و میزان کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی حدود ۷/۷ درصد است. توان دریافتی از شبکه بالا دست و هم چنین گاز مصرفی کل شبکه در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق این شکل با اعمال برنامه پاسخگویی بار (حالت دوم) توان دریافتی از شبکه بالادست کاهش و میزان گاز مصرفی افزایش می‌یابد. علت افزایش مصرف گاز آن است که با کاهش توان دریافتی از شبکه بالادست برای تامین تقاضای الکتریکی هاب‌ها، باید توان تولیدی واحدهای CHP افزایش یابد که نتیجه‌ی این افزایش تولید توان،



شکل ۳: جبهه بهینه پرتو برای حالت‌های اول و دوم

افزایش میزان گاز مصرفی است. به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر (حالت سوم) مقدار توان اکتیو دریافتی از شبکه بالادست و گاز مصرفی شبکه را کاهش می‌دهد. نکته حائز اهمیت آن است که گرچه در حالت چهارم اعمال عدم قطعیت موجب افزایش توان دریافتی از شبکه بالادست و هم چنین افزایش میزان مصرف گاز می‌گردد (نسبت به حالت سوم)، اما در مقایسه با حالت اول، این مقادیر کاهش یافته‌اند. شکل ۷ توان دریافتی هاب‌ها از شبکه و توان تولیدی CHP را نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً بیان شد با اعمال پاسخگویی بار توان تولیدی CHP افزایش می‌یابد. نتیجه این امر کاهش مجموع توان دریافتی هاب‌ها از شبکه است. در حالت سوم، حضور منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش میزان توان دریافتی هاب‌ها از شبکه را نشان می‌دهد که کاهش توان تولیدی CHP را در پی دارد. با اعمال عدم قطعیت (حالت چهارم)، میزان توان دریافتی هاب‌ها از شبکه کاهش و میزان توان تولیدی CHP افزایش یافته است. طبق شکل ۸، وابستگی بین حرارت تولیدی توسط CHP و توان تولیدی آن سبب می‌شود که اعمال پاسخگویی بار علاوه بر افزایش توان تولیدی CHP، میزان حرارت تولیدی توسط این

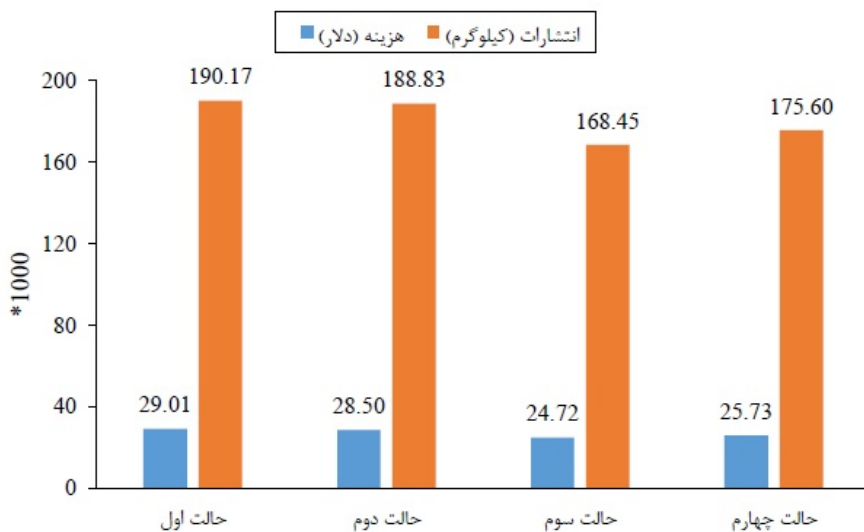


شکل ۴: جبهه بهینه پرتو برای حالت‌های سوم و چهارم

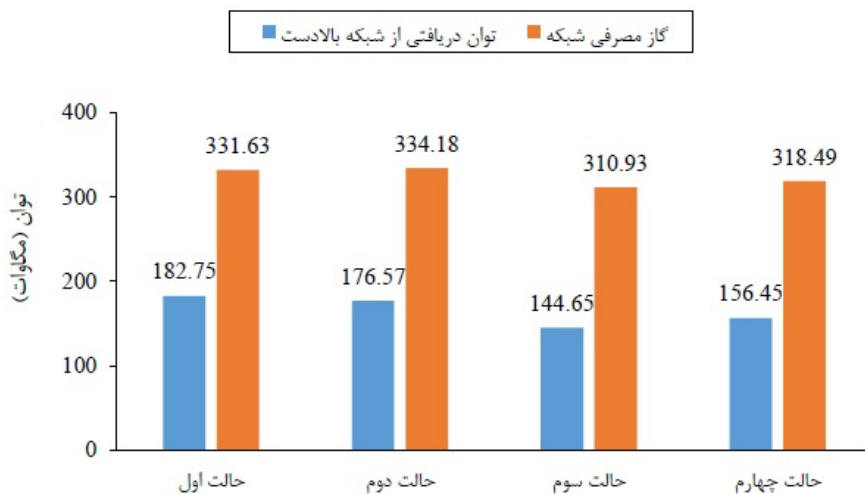
مبدل را افزایش دهد. افزایش تولید حرارت توسط CHP موجب می‌شود که بویلر و تهویه مرکزی با تولید حرارت کمتر توانایی تامین تقاضای حرارتی را داشته باشند. در حالت سوم، در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر توان تولیدی CHP و هم چنین حرارت تولیدی آن کاهش یافته است. بنابراین جهت تامین تقاضای حرارتی، بویلر و تهویه مرکزی باید حرارت بیشتری تولید کنند. اعمال عدم قطعیت موجب افزایش میزان توان و حرارت تولیدی CHP می‌گردد، بنابراین بویلر و تهویه مرکزی با تولید حرارت کمتری قادر به تامین تقاضای حرارتی هستند.

۵. نتیجه گیری

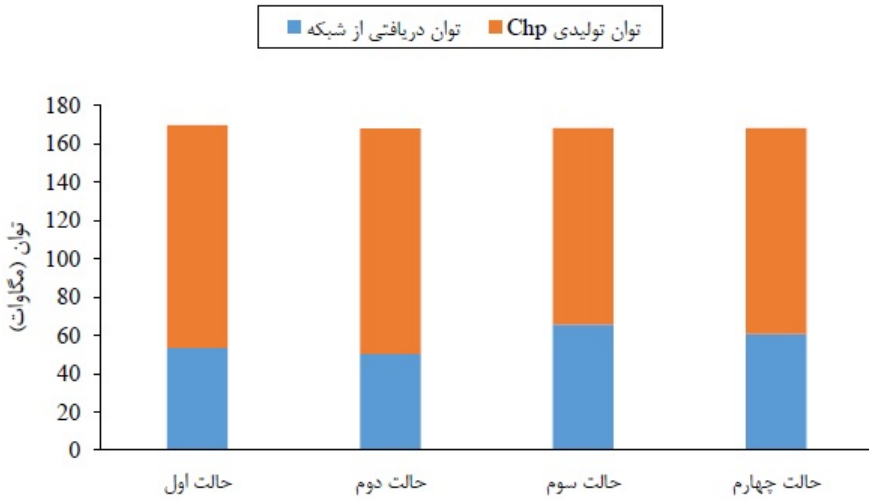
در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی هاب انرژی متصل به شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه‌ها و هم چنین کاهش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. روش جمع وزنی جهت حل مسئله بهینه‌سازی دوهدفه مذکور استفاده شده است. استفاده از این



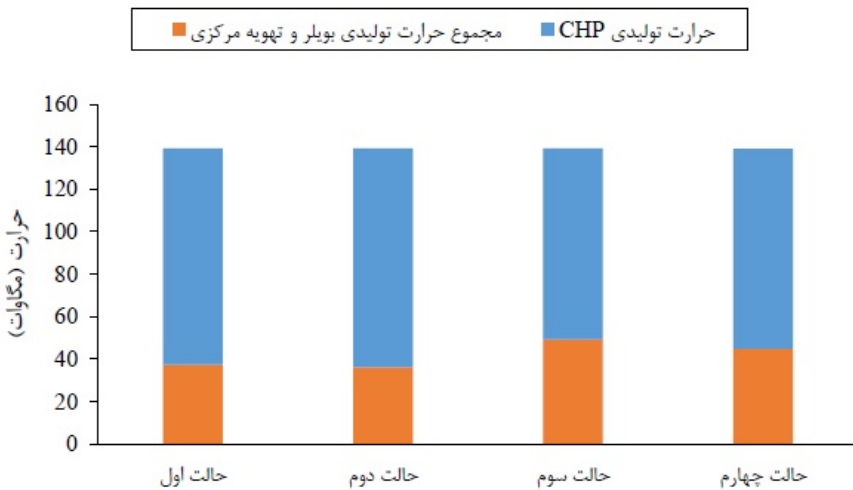
شکل ۵: هزینه و انتشارات در حالت‌های مختلف



شکل ۶: توان دریافتی از شبکه بالادست و گاز مصرفی شبکه



شکل ۷: توان دریافتی هاب‌ها از شبکه و توان تولیدی CHP



شکل ۸: حرارت تولیدی CHP و مجموع حرارت تولیدی بویلر و تهویه مرکزی

روش موجب ایجاد جواب‌های متعدد می‌شود که جبهه پرتو را تشکیل می‌دهد. برای انتخاب بهترین حل از بین جواب‌های موجود از روش رضایت‌بخش فازی استفاده شده است. برنامه

پاسخگویی بار قیمت محور بوده و نیروگاه خورشیدی و توربین بادی به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل سازی عدم قطعیت از یک روش احتمالاتی مبتنی بر سناریو استفاده شده است. شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE به عنوان شبکه تست به کار رفته و نرم افزار گمز جهت پیاده سازی و حل مسئله غیرخطی مورد نظر بکار گرفته شده است. نتایج مطالعات عددی که در چهار حالت انجام شده نشان می‌دهد که اعمال برنامه پاسخگویی بار موجب کاهش هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها می‌گردد. حضور منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابعی که تولید توان در آن‌ها بدون انتشار آلودگی صورت می‌گیرد، علاوه بر کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها، هزینه بهره‌برداری از هاب را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. گرچه اعمال تاثیر عدم قطعیت‌ها به مسئله، موجب افزایش هزینه بهره‌برداری و هم چنین افزایش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد اما نتایج نشان دهنده کاهش این مقادیر در مقایسه با حالت اول می‌باشد.

مراجع

- [1] Aalami, H. A. , Nojavan, S. (2016) Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation. IET Generation, Transmission Distribution, 10(1), p. 107-114.
- [2] Alipour, M., Mohammadi-Ivatloo, B. , Zare, K. (2015) Stochastic Scheduling of Renewable and CHP-Based Microgrids. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 11(5), p. 1049-1058.
- [3] Alipour, M., Zare, K. , Abapour, M. (2017) MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(1), p. 79-88.
- [4] Bahrami, S., Toulabi, M., Ranjbar, S., Moeini-Aghtaie, M. , Ranjbar, A. M. (2017) A decentralized energy management framework for energy hubs in dynamic pricing markets. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(6), p. 6780-6792.
- [5] Baran, M. E. , Wu, F. F. (1989) Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. IEEE Power Engineering Review, 9(4), p. 101-102.
- [6] Brini, S., Abdallah, H. H. , Ouali, A. (2009) Economic dispatch for power system included wind and solar thermal energy. Leonardo Journal of Sciences, 14(2009), p. 204-220.
- [7] Cao, Y., Wang, Q., Du, J., Nojavan, S., Jermsittiparsert, K. , Ghadimi, N. (2019) Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods. Sustainable Energy, Grids and Networks, 20, p. 100274.

- [8] Cheng, Y., Zhang, N., Zhang, B., Kang, C., Xi, W., Feng, M. (2019) Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2), p. 1307-1318.
- [9] Comodi, G., Bartolini, A., Carducci, F., Nagarajan, B., Romagnoli, A. (2019) Achieving low carbon local energy communities in hot climates by exploiting networks synergies in multi energy systems. *Applied Energy*, 256, p. 113901.
- [10] Dolatabadi, A., Jadidbonab, M., Mohammadi-ivatloo, B. (2018) Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: a hybrid stochastic/IGDT approach. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1), p. 438-448.
- [11] Dolatabadi, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Abapour, M., Tohidi, S. (2017) Optimal stochastic design of wind integrated energy hub. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), p. 2379-2388.
- [12] Eladl, A. A., El-Afifi, M. I., Saeed, M. A., El-Saadawi, M. M. (2020) Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO2 emissions. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 117, p. 105719.
- [13] Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G., Frohlich, K. (2006) Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 5(1), p. 24-30.
- [14] Ha, T., Zhang, Y., Thang, V. V., Huang, J. (2017) Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(3), p. 389-399.
- [15] Habib, M. A., Said, S. A. M., El-Hadidy, M. A., Al-Zaharna, I. (1999) Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system. *Energy*, 24(11), p. 919-929.
- [16] Huang, W., Zhang, N., Yang, J., Wang, Y., Kang, C. (2017) Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), p. 1452-1464.
- [17] Jahani, M. A. T. G., Nazarian, P., Safari, A., Haghifam, M. R. (2019) Multi-objective optimization model for optimal reconfiguration of distribution networks with demand response services. *Sustainable Cities and Society*, 47, p. 101514.
- [18] Jakob, W., Blume, C. (2014) Pareto optimization or cascaded weighted sum: A comparison of concepts. *Algorithms*, 7(1), p. 166-185.
- [19] Jin, X., Mu, Y., Jia, H., Wu, J., Xu, X., Yu, X. (2016) Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems. *Applied Energy*, 180, p. 1-13.
- [20] Khojasteh, M., Jadid, S. (2015) Decision-making framework for supplying electricity from distributed generation-owning retailers to price-sensitive customers. *Utilities Policy*, 37, p. 1-12.

- [21] Li, R., Wei, W., Mei, S., Hu, Q., Wu, Q. (2018) Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: An MPEC approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), p. 3641-3653.
- [22] Luo, Y., Zhang, X., Yang, D., Sun, Q. (2020) Emission Trading Based Optimal Scheduling Strategy of Energy Hub with Energy Storage and Integrated Electric Vehicles. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(2), p. 267-275.
- [23] Majidi, M., Nojavan, S., Nourani Esfetanaj, N., Najafi-Ghalelou, A., Zare, K. (2017) A multi-objective model for optimal operation of a battery/PV/fuel cell/grid hybrid energy system using weighted sum technique and fuzzy satisfying approach considering responsible load management. *Solar Energy*, 144, p. 79-89.
- [24] Majidi, M., Zare, K. (2018) Integration of smart energy hubs in distribution networks under uncertainties and demand response concept. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(1), p. 566-574.
- [25] Mavrotas, G. (2009) Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), p. 455-465.
- [26] Mirzapour-Kamanaj, A., Majidi, M., Zare, K., Kazemzadeh, R. (2020) Optimal strategic coordination of distribution networks and interconnected energy hubs: A linear multi-follower bi-level optimization model. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 119, p. 105925.
- [27] Moazeni, S., Miragha, A. H., Defourmy, B. (2018) A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy hub optimal dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), p. 2169-2178.
- [28] Moghaddas-Tafreshi, S. M., Jafari, M., Mohseni, S., Kelly, S. (2019) Optimal operation of an energy hub considering the uncertainty associated with the power consumption of plug-in hybrid electric vehicles using information gap decision theory. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 112, p. 92-108.
- [29] Nojavan, S., Majidi, M., Zare, K. (2018) Optimal scheduling of heating and power hubs under economic and environment issues in the presence of peak load management. *Energy Conversion and Management*, 156, p. 34-44.
- [30] Nosratabadi, S. M., Jahandide, M., Nejad, R. K. (2020) Simultaneous planning of energy carriers by employing efficient storages within main and auxiliary energy hubs via a comprehensive MILP modeling in distribution network. *Journal of Energy Storage*, 30, p. 101585.
- [31] Olsen, D. J., Zhang, N., Kang, C., Ortega-Vazquez, M. A., Kirschen, D. S. (2018) Planning low-carbon campus energy hubs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), p. 1895-1907.
- [32] Ruiming, F. (2019) Multi-objective optimized operation of integrated energy system with hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(56), p. 29409-29417.

- [33] Salehemaleh, M., Akbarimajd, A., Valipour, K., Dejamkhooy, A. (2018) Generalized modeling and optimal management of energy hub based electricity, heat and cooling demands. *Energy*, 159, p. 669-685.
- [34] Soroudi, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Rabiee, A. (2014) Energy hub management with intermittent wind power, *Large scale renewable power generation*, Springer, pp. 413-438.
- [35] Vahid-Pakdel, M. J., Nojavan, S., Mohammadi-Ivatloo, B., Zare, K. (2017) Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response. *energy Conversion and Management*, 145, p. 117-128.
- [36] Wen, S., Lan, H., Fu, Q., David, C. Y., Zhang, L. (2014) Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution. *IEEE Transactions on power Systems*, 30(2), p. 644-652.
- [37] Xu, D., Zhou, B., Chan, K. W., Li, C., Wu, Q., Chen, B., Xia, S. (2018) Distributed multienergy coordination of multimicrogrids with biogas-solar-wind renewables. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(6), p. 3254-3266.
- [38] Yuan, Z., He, S., Alizadeh, A. a., Nojavan, S., Jernsittiparsert, K. (2020) Probabilistic scheduling of power-to-gas storage system in renewable energy hub integrated with demand response program. *Journal of Energy Storage*, 29, p. 101393.