

مدیریت سمت تقاضا در یک ریزشبکه هوشمند با حضور منابع تجدیدپذیر و بارهای پاسخگو

غلامرضا آقاجانی^(۱) - داور میرعباسی^(۱) - بهروز الفی^(۲) - هادی سید حاتمی^(۱)

(۱) استادیار - گروه برق قدرت، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

(۲) مربی - گروه برق قدرت، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۸

خلاصه: در این مقاله خطای حاصل از پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید به وسیله توابع چگالی احتمال مدل‌سازی شده و یک مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی به منظور بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه هوشمند در کوتاه‌مدت جهت حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود. استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار که توسط شرکت‌کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی صورت می‌گیرد، جهت پوشش عدم قطعیت توان تولیدی حاصل از منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود. جهت اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار از روش پرداخت تشویقی به صورت بسته‌های پیشنهادی قیمت و میزان انرژی که به وسیله فراهم‌کنندگان پاسخگویی بار جمع‌آوری می‌شود، پیشنهاد گردیده است. نتایج شبیه‌سازی در سه حالت مختلف برای بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با مشارکت و عدم مشارکت بارهای پاسخگو در نظر گرفته شده است. برای حل مساله پیشنهادی روش چندهدفه حرکت ازدحام ذرات پیشنهاد شده است؛ بطوریکه سیستم مرتب‌سازی غیرخطی و مکانیزم فازی برای تعیین بهترین پاسخ با توجه به مجموعه پاسخ‌های حاصل از فضای پارو توصیه می‌گردد. جهت راست‌آزمایی، مدل پیشنهادی بر روی یک ریزشبکه هوشمند نمونه بکار برده شده و نتایج عددی حاصل به‌طور واضح نشان‌دهنده تأثیر مدیریت سمت تقاضا در کاهش اثر عدم قطعیت حاصل از توان تولیدی و پیش‌بینی شده توربین بادی و سلول خورشیدی می‌باشد.

کلمات کلیدی: ریزشبکه هوشمند، منابع تجدیدپذیر، مدیریت سمت مصرف، بهره‌برداری چندهدفه

Demand Side Management in a Smart Micro-Grid in the Presence of Renewable Generation and Demand Response

Gholamreza Aghajani⁽¹⁾ - Davar Mirabasi⁽¹⁾ - Behroz Alfi⁽²⁾ - Hadi seyed Hatami⁽¹⁾

(1) Assistant Professor - Department of Power Electric, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran

aghajani_gholamreza@yahoo.com

dmirabasi@gmail.com

h.seyyedhatami@yahoo.com

(2) MSc-Department of Power Electric, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran

beh_alfi@gmail.com

In this study, a stochastic programming model is proposed to optimize the performance of a smart micro-grid in a short term to minimize operating costs and emissions with renewable sources. In order to achieve an accurate model, the use of a probability density function to predict the wind speed and solar irradiance is proposed. On the other hand, in order to resolve the power produced from the wind and the solar renewable uncertainty of sources, the use of demand response programs with the participation of residential, commercial and industrial consumers is proposed. In this paper, we recommend the use of incentive-based payments as price offer packages in order to implement demand response programs. Results of the simulation are considered in three different cases for the optimization of operational costs and emissions with/without the involvement of demand response. The multi-objective particle swarm optimization method is utilized to solve this problem. In order to validate the proposed model, it is employed on a sample smart micro-grid, and the obtained numerical results clearly indicate the impact of demand side management on reducing the effect of uncertainty induced by the predicted power generation using wind turbines and solar cells.

Index Terms: Smart micro-grid, Renewable generation, Demand side management, Demand response provider

نویسنده مسئول: غلامرضا آقاجانی، استادیار - گروه برق قدرت، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران، aghajani_gholamreza@yahoo.com

۱- مقدمه

سیستم‌های توزیع آینده با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده که به صورت نسل‌هایی از منابع تجدیدپذیر مانند منابع تولید توان بادی و خورشیدی، که دارای رفتار طبیعی متناوب هستند، روبرو خواهند شد. این امر ممکن است امنیت عملیات بهره‌برداری سیستم را به مخاطره بیندازد [۱-۲]. لذا ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی مؤثر و کارا برای منابع انرژی توزیع^۱ (DERs) جهت بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های توزیع آینده یک امر لازم و ضروری است. یکی از راه‌حل‌های پوشش عدم قطعیت حاصل از این نوع منابع، استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. جهت پیاده‌سازی برنامه‌ریزی پیشرفته منابع انرژی توزیع برای بهره‌برداری اقتصادی و امن سیستم‌های توزیع آینده، وجود زیر ساخت اندازه‌گیری پیشرفته^۲ (AMI) به عنوان یکی از ضروری‌ترین زیر ساخت‌های سیستم هوشمند، لازم و ضروری است [۳-۵]. AMI با ایجاد بستر مخابراتی دو طرفه بین مشتریان و شرکت‌های برق، قابلیت قرائت، پیکربندی، نظارت و کنترل از راه دور کنترلورها، جمع‌آوری و انتقال این اطلاعات به شرکت‌های برق، پردازش و تحلیل اطلاعات، اجرای مدیریت مصرف انرژی به منظور اطمینان از قابلیت اطمینان سیستم و تضمین ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا را دارا می‌باشد [۶-۸]. با حضور این نوع سیستم، بهره‌برداران سیستم توزیع امکان بهره‌برداری بهینه از منابع تولید پراکنده و مشارکت مشتریان جهت شرکت در انواع برنامه‌های مدیریت سیستم تقاضا را ممکن می‌سازند. استفاده از برنامه‌های مدیریت مصرف برق^۳ (DSM) یکی از روش‌های حفظ منافع مشترک شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی است. پاسخ‌گویی بار^۴ (DR) در برگیرنده روش‌هایی از برنامه‌های مدیریت مصرف برق است که به تغییر مصرف در اثر تغییر قیمت در بازار اطلاق می‌شود. لذا بارهای پاسخ‌گو به عنوان یک منبع ارزشمند برای حفظ قابلیت سیستم و بهره‌برداری اقتصادی از آن به شمار می‌رود. در مراجع [۹-۱۰] پتانسیل و مزایای پاسخ‌گویی بار به صورت کامل تشریح شده است.

در شبکه‌های هوشمند به دلیل وجود تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته امکان اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی به راحتی امکان‌پذیر است بطوریکه در این شبکه‌ها، مصرف‌کنندگان می‌توانند با تغییر شیوه مصرف خود، به تعادل میان تولید و مصرف کمک کرده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهند [۱۱]. این تغییر زمانی بوقوع می‌پیوندد که مصرف‌کنندگان گزینه‌هایی برای انتخاب داشته باشند تا انگیزه تغییر مصرف در آنها به وجود آید. برای عملیاتی کردن این انگیزه در مصرف‌کنندگان باید آنها به اطلاعاتی درباره مقدار برق مصرفی خود و نیز قیمت‌های واقعی برق که هر لحظه در حال تغییر هستند، دست یابند [۱۲].

امروزه مطالعات قابل توجهی در جهت اجرای هر چه بهتر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، چالش‌های پیش رو و نحوه مدل‌سازی نقش آنها صورت گرفته است. در مرجع [۱۳] جهت مدیریت بهره‌برداری از یک

ریزشکه در حضور منابع بادی و خورشیدی از پاسخ‌گویی بار استفاده شده و جهت حل مدل پیشنهادی، از الگوریتم^۵ PSO استفاده شده، به طوری که در مدل‌سازی مدیریت ریزشکه تابع انتشار آلاینده‌گی مد نظر قرار نگرفته است و مسئله بصورت تابع تک هدفه مورد تحلیل قرار گرفته است. برنامه‌ریزی بهره‌برداری چندهدفه در یک شبکه توزیع هوشمند که دارای منابع بادی و خورشیدی است بصورت مدل احتمالاتی جهت کاهش هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی در [۱۴] مورد ارزیابی قرار گرفته، بطوریکه از تابع چگالی احتمال ریلی و بتا به ترتیب برای مدل‌سازی تغییرات سرعت باد و تابش خورشید استفاده شده است. در این تحقیق اشاره‌ای به نحوه مدل‌سازی و در نظر گرفتن عملکرد همزمان سیستم تولید توان بادی و سیستم تولید توان خورشیدی نشده است. از طرفی در الگوریتم پیشنهادی نحوه پیدا کردن نقطه بهینه در منحنی پارتو مورد تحلیل و کنکاش قرار نگرفته است. یک مساله مشابه در مرجع [۱۵] ارائه گردیده که با استفاده از روش درخت سناریو به حل آن پرداخته شده است. مدل‌سازی و مدیریت بهینه بلادرنگ در یک ریزشکه با حضور منابع انرژی چندگانه با بهره‌گیری از روش جستجوی مستقیم مش تطبیقی در [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است؛ بطوریکه در آن عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است. در [۱۷] استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار جهت کنترل فرکانس یک ریزشکه هوشمند در حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸] استفاده از مدیریت سمت تقاضا در یک شبکه هوشمند با در نظر گرفتن توان تولید بادی (مزرعه بادی) و عدم قطعیت حاصل از آن جهت افزایش رفاه اجتماعی پیشنهاد می‌شود. استفاده از یک برنامه‌ریزی تصادفی بر اساس روش مونت کارلو جهت مدل‌سازی رفتار تصادفی باد و بار تقاضا با لحاظ کردن نقش نفوذپذیری توان بادی به عنوان ذخیره بهره‌برداری در یک بازار تسویه انرژی، در [۱۹] پیشنهاد می‌گردد.

در این مقاله با در نظر گرفتن مفهوم پاسخ‌گویی بار در شبکه‌های هوشمند و لحاظ کردن سیستم AMI جهت امکان اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در یک ریزشکه هوشمند برای پوشش عدم قطعیت حاصل از تولید توان بادی و خورشیدی با لحاظ کردن رفتار طبیعی تصادفی، بدنبال بهره‌برداری بهینه از ریزشکه هوشمند جهت حداقل کردن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی می‌باشد. از آنجایی که شرکت مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها کاملاً داوطلبانه در نظر گرفته شده است لذا در اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، روش پاسخ‌گویی بار مبتنی بر پایه پرداخت تشویقی پیشنهاد می‌شود بطوریکه این برنامه‌ها به صورت بسته پیشنهادی قیمت و مقدار ذخیره پاسخ‌گویی بار برای مصرف‌کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی در نظر گرفته شده که هر کدام از مصرف‌کنندگان بسته به شرایط خود می‌توانند یکی از این بسته‌های پیشنهادی را انتخاب و در برنامه پاسخ‌گویی بار شرکت کنند. جهت مدل‌سازی تولید توان بادی و خورشیدی به ترتیب تابع چگالی احتمال ریلی و بتا پیشنهاد می‌گردد. حل مدل چندهدفه پیشنهادی

عنوان پارامتر شکل توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی به ترتیب مطابق معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شود.

$$F_R(v_{wind}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_{wind}}{\alpha_w}\right)^2\right) \quad (1)$$

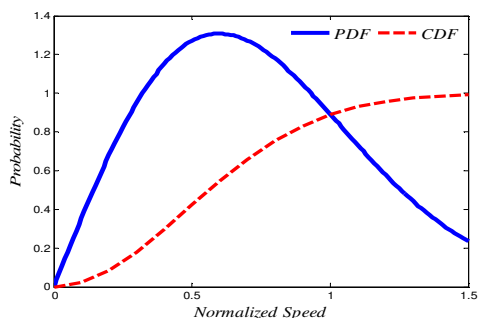
$$f_R(v_{wind}) = \frac{2}{\alpha_w^2} v_{wind} \exp\left(-\left(\frac{v_{wind}}{\alpha_w}\right)^2\right) \quad (2)$$

اگر v_m متوسط سرعت باد برای یک منطقه‌ی معین در نظر گرفته شود پارامتر مقیاس می‌تواند مطابق معادله (۳) محاسبه شود:

$$v_m = \alpha_w \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \alpha_w \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \alpha_w \quad (3)$$

$$\alpha_w = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_m$$

لذا در صورت جایگذاری مقدار α_w در توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی مدل ریلی برای سیستم WECS به صورت تابعی از متوسط سرعت باد مطابق معادلات (۴) و (۵) به دست خواهد آمد. شکل (۱) سیستم نمونه توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل توزیع سرعت باد
Fig. (1): Wind speed distribution model

$$f_R(v_{wind}) = \frac{\pi}{2} \frac{v_{wind}}{v_m^2} \exp\left(-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v_{wind}}{v_m}\right)^2\right) \quad (4)$$

$$F_R(v_{wind}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v_{wind}}{v_m}\right)^2\right) \quad (5)$$

برای یک سیستم WECS معین، مشخصه توان خروجی مطابق معادله (۶) قابل محاسبه است [۲۱].

$$P_w(v_{wind}) = \begin{cases} 0 & v_{wind} < v_{ci} \\ P_R \frac{(v_{wind} - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v_{wind} < v_r \\ P_R & v_r \leq v_{wind} < v_{co} \\ 0 & v_{wind} \geq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن v_{ci} ، v_r ، v_{co} و v_{wind} به ترتیب سرعت وصل، سرعت نامی، سرعت قطع و سرعت واقعی توربین بادی و P_R توان نامی توربین می‌باشد. توربین بادی استفاده شده در این مطالعه از نوع AIR403 [۲۲] بوده که در آن $v_{ci}=3.5\text{m/s}$ ؛ $v_{co}=18\text{m/s}$ ؛ $P_R=15\text{kW}$ ؛ $v_r=17.5\text{m/s}$ می‌باشد.

که یک مساله برنامه‌ریزی غیر خطی با قيود مساوی و نامساوی پیچیده می‌باشد بر اساس روش MOPSO با در نظر گرفتن معیار پارتو با مرتب‌سازی غیرخطی و بر اساس تکنیک فازی صورت گرفته است.

به طور خلاصه، پیشنهادات اصلی این مقاله به شرح زیر است:

- استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار جهت پوشش عدم قطعیت حاصل از تولید توان بادی و خورشیدی در یک ریزشبه هوشمند
- پیشنهاد استفاده از بسته پیشنهادی قیمت-مقدار جهت اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
- مدل‌سازی احتمالاتی توان بادی، توان خورشیدی و توان بادی-خورشیدی
- در نظر گرفتن یک مدل احتمالاتی چندهدفه و استفاده از روش MOPSO با در نظر گرفتن معیار پارتو و مرتب‌سازی بر اساس مکانیزم فازی برای حل مساله مورد نظر.

بقیه مقاله در بخش‌های زیر سازمان‌دهی شده است: بعد از بخش مقدمه، در بخش دوم این مقاله بیان مساله به صورت کامل تشریح می‌شود. در بخش سوم به معرفی ریزشبه هوشمند مورد مطالعه پرداخته شده است. در بخش چهارم الگوریتم پیشنهادی بر اساس معیار پارتو معرفی می‌گردد. در بخش پنجم شبیه‌سازی و تحلیل نتایج عددی مورد مطالعه بحث شده و نهایتاً بخش آخر به نتیجه‌گیری‌های مهم حاصل از کار ارائه شده، می‌پردازد.

۲- بیان مساله

در این مقاله یک مدل احتمالاتی برای مدیریت انرژی در کوتاه مدت جهت رسیدن به حداقل هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در یک ریزشبه هوشمند ارائه می‌شود. با توجه به رفتار تصادفی انرژی بادی و خورشیدی، پیش‌بینی دقیق توان بادی و خورشیدی امکان‌پذیر نبوده و همواره با خطای عدم قطعیت در برنامه‌ریزی روز آینده همراه است. لذا برای مطابقت بیشتر برنامه‌ریزی‌ها با واقعیت، از یک تابع چگالی احتمال جهت مدل کردن رفتار سیستم بادی، خورشیدی و سیستم ترکیبی بادی-خورشیدی استفاده می‌شود تا نتیجه‌ای بهینه حاصل شود. برای پوشش عدم قطعیت حاصل از این منابع، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر پرداخت تشویقی پیشنهاد می‌شود. ادامه این بخش به مدل‌سازی و معرفی تابع هدف می‌پردازد.

۲-۱- مدل سیستم تبدیل انرژی بادی

توان خروجی توربین بادی به پارامترهایی از قبیل دسترس‌پذیری بادی، منحنی توان توربین بادی، سرعت باد، شکل و اندازه توربین بستگی دارد. مدل‌های احتمالاتی بر مبنای اطلاعات تاریخی موجود ساخته می‌شوند. لذا از آنجایی که سرعت باد یک متغیر تصادفی است، داده‌های هواشناسی برای برآورد پتانسیل انرژی بادی یک منطقه می‌تواند مناسب باشد. با توجه به رفتار سرعت باد، برای مدل‌سازی آن از توزیع ریلی که صورت خاصی از توزیع وایبال است پیشنهاد می‌شود [۲۰]. لذا با فرض α_w به عنوان پارامتر مقیاس و $\beta_w = 2$ به

$$\beta = (1 - \mu) \left(\frac{\mu(1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (11)$$

حال می‌توان با استفاده از معادله (۱۲) میزان تابش خورشید را به توان خورشیدی تبدیل کرد [۲۵].

$$P_{PV}(s) = A_c \cdot \eta \cdot s \quad (12)$$

که در آن بیانگر میزان توان خروجی PV بر حسب (kW) برای میزان تابش s ، A_c سطح آرایه‌ها (m^2) و η بازده سیستم PV است. در صورت استفاده از معادله (۸) تابع چگالی احتمال $f_B(P_{PV})$ برای توان خروجی P_{PV} مطابق معادله (۱۳) خواهد بود.

$$f_B(P_{PV}) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (A_c \eta s)^{\alpha-1} (1 - A_c \eta s)^{\beta-1} & \text{if } P_{PV} \in [0, P_{PV}(s)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

۲-۳- مدل سیستم ترکیبی انرژی بادی - خورشیدی

توان تولیدی به وسیله سیستم ترکیبی (P_h) برابر مجموع توان خروجی سیستم WECS و توان خروجی سیستم PVS است.

$$P_h = P_w + P_{PV} \quad (14)$$

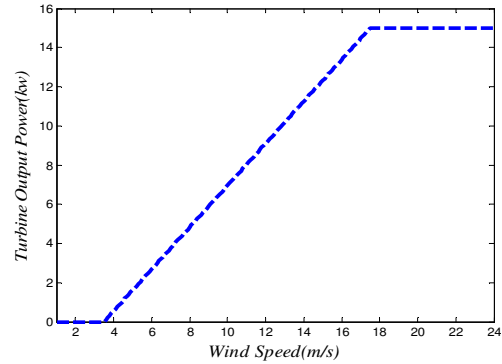
با فرض اینکه P_w و P_{PV} به صورت مستقل از هم عمل می‌کنند تابع چگالی برای متغیر تصادفی P_h به صورت کانولوشن بین تابع چگالی P_w و P_{PV} مطابق معادله (۱۵) تعریف می‌شود [۲۶].

$$F_h(P_h) = f_R(P_w) * f_B(P_{PV}) \quad (15)$$

از آنجایی که وارد کردن تابع چگالی احتمال پیوسته در قالب ریاضی مشکل به نظر می‌رسد بنابراین در چنین مواردی از شبیه‌سازی مونت-کارلو برای دست‌یابی به سناریوهای مختلف استفاده می‌شود؛ اما تولید سناریوهای مختلف نیز بر پیچیدگی‌های ریاضی مساله می‌افزاید. راهکار مناسب برای پیشگیری از پیچیدگی‌های ریاضیاتی، گسسته‌سازی تابع توزیع احتمال پیوسته با تقسیم آن به بازه‌های مختلف است. در این صورت سطح محصور در هر بازه بیانگر احتمال رخداد میانه آن بازه است. بنابراین در این مقاله در مدل احتمالاتی پیشنهاد شده برای سیستم بادی و خورشیدی، تابع توزیع احتمال به هفت بازه تقسیم می‌شود. از آنجایی که این دو سیستم مستقل از هم فرض می‌شوند لذا احتمال وقوع هر سناریو حاصل ضرب احتمال وقوع این دو مشخصه در هر سناریو خواهد بود.

۲-۴- مدل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

پاسخ‌گویی بار را می‌توان بر اساس نحوه و چگونگی مشارکت مصرف‌کنندگان در تغییر الگوی مصرف برق به دو دسته برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر مبنای قیمت و بر مبنای پرداخت‌های تشویقی در نظر گرفت [۱۱-۱۰]. در این مقاله مصرف‌کنندگان الکتریکی به صورت مصرف‌کننده خانگی، تجاری و صنعتی در نظر گرفته می‌شوند که معادلات زیر به ترتیب نحوه مدل کردن رفتار این مصرف‌کنندگان را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منحنی توان توربین بادی مدل AIR403 [۲۲]

Fig. (2): Wind turbine power curve model AIR403[22]

تابع چگالی احتمال $f_R(P_w)$ برای توان خروجی WECS در صورت استفاده از معادلات (۴) و (۵) مطابق معادله (۷) خواهد بود.

$$f_{P_w}(P_w) = \begin{cases} 1 - [F_v(v_{co}) - F_v(v_{ci})] & P_w = 0 \\ \left(\frac{v_r - v_{ci}}{P_R} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{2V_m^2} \right) \times (v_{ci} + (v_r - v_{ci}) \cdot \frac{P_w}{P_R}) & 0 < P_w < P_R \\ \exp \left[- \left(\frac{v_{ci} + (v_r - v_{ci}) \cdot \frac{P_w}{P_R}}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} V_m} \right)^2 \right] & 0 < P_w < P_R \\ F_v(v_{co}) - F_v(v_r) & P_w = P_R \end{cases} \quad (7)$$

۲-۲- مدل سیستم فتوولتائیک

مولدهای فتوولتائیک سیستم‌هایی هستند که نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند به طوری که خروجی سیستم خورشیدی کاملاً وابسته به میزان تابش است. با در نظر گرفتن رفتار تابش خورشید برای مدل‌سازی آن مطابق معادله (۸) از تابع توزیع احتمالی بتا استفاده می‌شود [۲۴-۲۳].

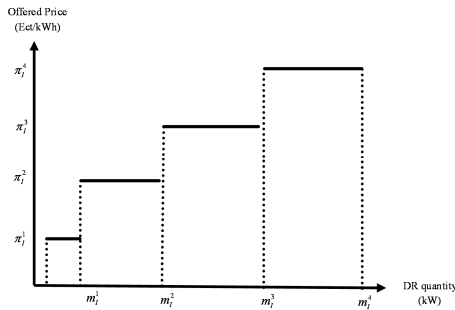
$$f_B(s) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} s^{\alpha-1} (1-s)^{\beta-1} & 0 \leq s \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$F_B(s) = \int_0^s \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} s^{\alpha-1} (1-s)^{\beta-1} ds \quad (9)$$

که در آن s نمایانگر میزان تابش خورشید (kW/m^2)، α و β پارامترهای توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی بتا است که مطابق معادلات زیر می‌تواند از میانگین و انحراف معیار داده‌های تابش خورشیدی محاسبه شوند.

$$\alpha = \mu \left(\frac{\mu(1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (10)$$

نامساوی جهت پوشش عدم قطعیت ناشی از تولید توان بادی و خورشیدی می‌باشد. شکل (۴) تصویر واضحی از مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل (۳): بسته پیشنهادی پاسخ‌گویی بار
Fig. (3): DRP's offer package

۲-۵-۱- تابع هزینه بهره‌برداری

در این مقاله تابع بهره‌برداری به صورت یک تابع دو قسمتی مطابق معادله (۱۹) در نظر گرفته می‌شود: هزینه‌های بهره‌برداری معین که شامل هزینه‌های ثابت راه‌اندازی، هزینه‌های روشن شدن منابع تولید پراکنده، هزینه‌های رزرو تامین شده به وسیله منابع تولید پراکنده، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و هزینه‌های توان مبادله‌ای با شبکه بالا دستی و هزینه‌های بهره‌برداری نامعین با لحاظ کردن و تحقق احتمال سناریو Pr_s در طول دوره t ام و سناریو ω ام که متاثر از مقادیر احتمالی پارامترهای بادی و خورشیدی در هر سناریو است، می‌باشد. این قسمت از تابع هزینه بهره‌برداری شامل هزینه راه‌اندازی واحدهای تولید پراکنده، هزینه ناشی از کاهش بار حاصل از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و هزینه ناشی از حذف بار تحمیلی است.

$$RP(r, t) = RC(r, t) \cdot \zeta_{r,t}, RC(r, t) \leq RC_t^{\max} \quad (16)$$

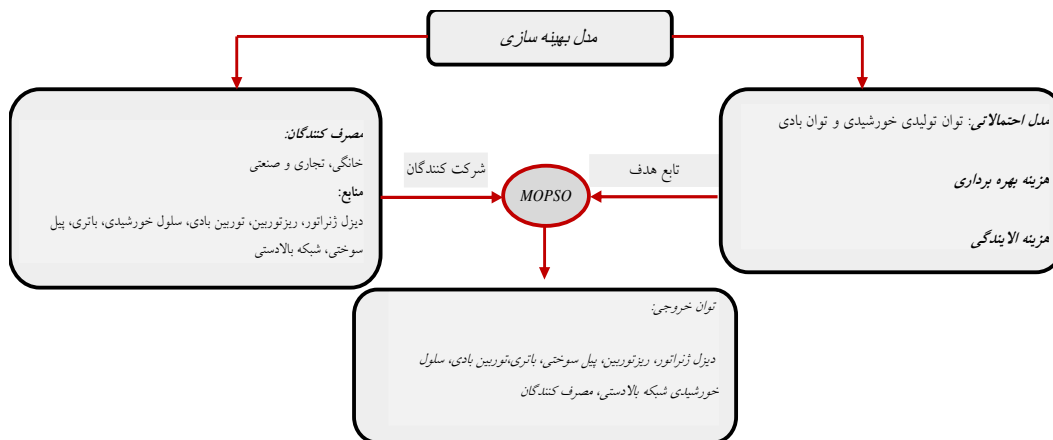
$$CP(c, t) = CC(c, t) \cdot \zeta_{c,t}, CC(c, t) \leq CC_t^{\max} \quad (17)$$

$$IP(i, t) = IC(i, t) \cdot \zeta_{i,t}, IC(i, t) \leq IC_t^{\max} \quad (18)$$

که در آن c, r, i به ترتیب نشان دهنده تعداد مصرف کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی، $RC(r, t)$ ، $CC(c, t)$ و $IC(i, t)$ به ترتیب میزان کاهش بار برنامه‌ریزی شده توسط هر یک از مصرف کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی در دوره t ام و RC_t^{\max} ، CC_t^{\max} و IC_t^{\max} بیانگر حداکثر مقدار کاهش بار پیشنهادی به وسیله هر یک از مصرف کنندگان در دوره t ام، $\zeta_{r,t}$ ، $\zeta_{c,t}$ و $\zeta_{i,t}$ مقدار پرداخت تشویقی به هر یک از مصرف کنندگان در دوره t ام، $CP(c, t)$ ، $RP(r, t)$ و $IP(i, t)$ به ترتیب بیانگر هزینه پرداختی به مصرف کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی در دوره t ام بابت کاهش بار پیشنهادی می‌باشد. در این مقاله فرض می‌شود که شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بصورت داوطلبانه (عدم در نظر گرفتن جریمه برای بارهایی که مصرف خود را کاهش نداده یا جابجایی در بار مصرفی انجام نمی‌دهند) بوده و نحوه مدل کردن برنامه پاسخ‌گویی بار، که به صورت پایه پرداخت تشویقی می‌باشد، بر اساس بسته‌های پیشنهادی قیمت با توجه به مقدار کاهش بار، مطابق شکل (۳)، در نظر گرفته می‌شود. لذا با در نظر گرفتن حالت داوطلبانه برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، از اعمال ضریب جریمه برای بارهای که به تعهدات خود عمل نمی‌کند صرف نظر می‌شود.

۲-۵- توابع هدف

در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی چندهدفه بصورت هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر مانند توربین بادی و سلول خورشیدی و نحوه پوشش این توان تولیدی تصادفی توسط بارهای پاسخ‌گو در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته در نظر گرفته می‌شود. که در آن هدف حداقل کردن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی با مشارکت و عدم مشارکت بارهای خانگی، تجاری و صنعتی پاسخ‌گو، با در نظر گرفتن قیود مساوی و



شکل (۴): ساختار مدل بهینه‌سازی
Fig. (4): Optimization model structure

پاسخگویی بار (DRPs) ^۹ زام در دوره t ام در سناریو s ام، $ENS_{n,s}(t)$ و $Voll(t)$ به ترتیب انرژی مورد انتظار تامین نشده و ارزش بار تامین نشده را نشان می‌دهد. در معادله (۱۹) $X^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ به عنوان بردار متغیرهای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی احتمالاتی که شامل میزان توان مبادله شده با شبکه بالادستی، توان خروجی و میزان ظرفیت رزرو حاصل از منابع تولید پراکنده، مقدار کاهش بار و رزرو حاصل از DRPs در افق برنامه‌ریزی شده برای روز بعد می‌باشد.

۲-۵-۲- تابع انتشار آلاینده‌گی

تابع انتشار آلاینده‌گی شامل توابع میزان آلاینده‌گی ناشی از واحدهای تولید پراکنده و میزان آلودگی ناشی از شبکه هنگام خرید از آن می‌باشد. آلاینده‌های در نظر گرفته شده شامل CO_2 ، SO_2 و NO_x است که مدل ریاضی تابع انتشار آلاینده‌گی مطابق معادله (۲۲) قابل گسترش است.

$$\text{Min} f_2(X) = \sum_{t=1}^T F^{\text{EMI}}(t) = \sum_{t=1}^T [EMI_{DG}(t) + EMI_{\text{Grid}}(t)] \quad (22)$$

متوسط آلودگی ناشی از واحدهای تولید پراکنده تجدیدناپذیر مطابق معادله (۲۳) قابل محاسبه است.

$$EMI_{DG}(t) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} (E_{CO_2}^{DG}(i) + E_{SO_2}^{DG}(i) + E_{NO_x}^{DG}(i)) \times P_i^{DG}(t) \quad (23)$$

که در آن $E_{CO_2}^{DG}(i)$ ، $E_{SO_2}^{DG}(i)$ و $E_{NO_x}^{DG}(i)$ به ترتیب میزان آلودگی CO_2 ، SO_2 و NO_x ناشی از منابع تولید پراکنده t ام را نشان می‌دهد. به همین صورت آلودگی ناشی از شبکه هنگام خرید انرژی از آن مطابق معادله (۲۴) خواهد بود.

$$EMI_{\text{Grid}}(t) = (E_{CO_2}^{\text{Grid}} + E_{SO_2}^{\text{Grid}} + E_{NO_x}^{\text{Grid}}) \times P_{\text{Grid}}(t) \quad (24)$$

$$\text{Min} f_1(x) = \sum_{t=1}^T F^{\text{OPR}}(t) = \sum_{t=1}^T CC(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S Pr_s SC_s(t) \quad (19)$$

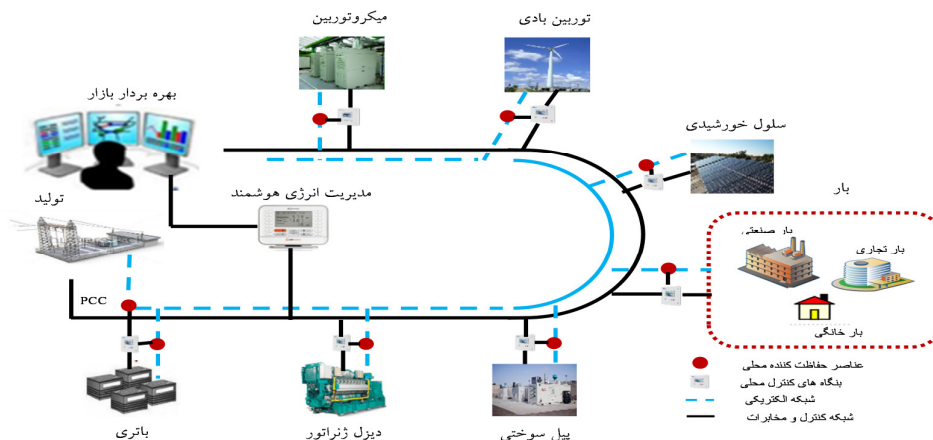
که در آن Pr_s احتمال وقوع سناریو s می‌باشد. تابع هزینه بهره‌برداری معین و نامعین بصورت معادلات (۲۰) و (۲۱) تعریف می‌شود.

$$(20)$$

$$CC(t) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} [P_i(t)\pi_i(t)I_i(t) + SU_i(t)|I_i(t) - I_i(t-1)| + RC_i^{DG} - \sum_{j=1}^J RC_j^{DR}(t) + I_{\text{Buy}}(t)P_{\text{Grid-Buy}}(t)\pi_{\text{Grid-Buy}}(t) - I_{\text{Sell}}(t)P_{\text{Grid-Sell}}(t)\pi_{\text{Grid-Sell}}(t) \quad (21)$$

$$SC_s(t) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} C_{i,s}^{DG}(t) + \sum_{j=1}^J C_{j,s}^{DR}(t) + \sum_{n=1}^N ENS_{n,s}(t).VOLL(t)$$

که در آن $P_i(t)$ و $\pi_i(t)$ به ترتیب میزان توان خروجی و قیمت پیشنهادی واحد t ام در دوره t ام، $I_i(t)$ دودویی نشانگر وضعیت روشن و خاموش بودن منبع تولید پراکنده t ام در دوره t ام، $SU_i(t)$ هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحد t ام در دوره t ام، $RC_i^{DG}(t)$ و $RC_j^{DR}(t)$ هزینه‌های رزرو تولید پراکنده t ام و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار t ام در دوره t ام، $P_{\text{Grid-Buy}}(t)$ و $P_{\text{Grid-Sell}}(t)$ میزان توان مبادله‌ای با شبکه بالادستی در دوره t ام، $\pi_{\text{Grid-Buy}}(t)$ و $\pi_{\text{Grid-Sell}}(t)$ قیمت پیشنهادی برای توان مبادله‌ای با شبکه بالادستی در بازار آزاد در دوره t ام (که این قیمت مطابق شکل (۸) موقع خرید و فروش انرژی توسط شبکه بالادستی تعیین می‌شود)، $C_{j,s}^{DR}(t)$ و $C_{i,s}^{DG}(t)$ به ترتیب هزینه راه‌اندازی واحد تولید پراکنده t ام و هزینه ناشی از کاهش بار ایجاد شده به وسیله برنامه‌های



شکل (۵): سیستم ریزشبکه هوشمند نمونه
Fig. (5): Typical smart micro-grid system

۲-۶-۲- قیود

ریزشبکه هوشمند نمونه تحت قیود فنی زیر بهره‌برداری می‌شود.

۲-۶-۲-۱- قید تعادل توان

مجموع توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده خریداری شده از شبکه و کاهش بار حاصل از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در هر بازه و سناریو باید برابر مجموع بار تقاضا باشد.

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG,i,s}(t) + P_{Grid,s}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} P_{Demand,i,s}(t) - P_{DR,s}(t) \quad (25)$$

که در آن $P_{Demand,i,s}$ میزان بار مصرفی در دوره t ام و سناریو s می‌باشد. در معادله (۲۵) مقدار $P_{DR,s}(t)$ می‌تواند اکتیو شرکت‌کننده در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مطابق معادله (۲۶) تعریف می‌شود.

$$P_{DR,s}(t) = \sum_r RC(r, t, s) + \sum_c CC(c, t, s) + \sum_i IC(i, t, s) \quad (26)$$

۲-۶-۲-۲- محدودیت رزرو و توان منابع تولید پراکنده

ماکزیمم و مینیمم توان تولید شده توسط هر واحد مطابق معادلات (۲۷) و (۲۸) محدود می‌شود.

$$P_{DG,i}^{\min} \cdot I(i, t) \leq P_{DG}(i, t, s) \leq P_{DG,i}^{\max} \cdot I(i, t) \quad \forall i, t, s \quad (27)$$

$$R_{DG}(i, t) \geq P_{DG}(i, t, s) - P_{DG}(i, t, 0) \quad \forall i, t, s \quad (28)$$

۲-۶-۳- محدودیت‌های باتری

$$W_{ess}(t) = W_{ess}(t-1) - \frac{1}{\eta_{discharge}} I_{discharge}(t) P_{discharge}(t) + \eta_{charge}(t) I_{charge}(t) P_{charge}(t) \quad (29)$$

$$I_{discharge}(t) + I_{charge}(t) \leq 1$$

$$W_{ess,min} \leq W_{ess}(t) \leq W_{ess,max}$$

$$P_{charge}(t) \leq P_{charge,max}$$

$$P_{discharge}(t) \leq P_{discharge,max}$$

معادله اول نشان‌دهنده ظرفیت باتری می‌باشد که بسته به میزان انرژی شارژ و دشارژ در هر ساعت برای ساعت بعدی می‌تواند تغییر کند و

معادله دوم نشان‌دهنده این است که در هر ساعت باتری تنها می‌تواند شارژ یا دشارژ شود، و لذا امکان رخ دادن همزمان آن‌ها بی‌معنی است. $W_{ess}(t)$ و $W_{ess}(t-1)$ به ترتیب بیانگر میزان انرژی ذخیره شده در داخل باتری در زمان فعلی و قبلی، $\eta_{discharge}$ و η_{charge} به ترتیب بازده مبدل در زمان شارژ و دشارژ می‌باشد.

۲-۷- سیستم ریزشبکه هوشمند نمونه

ریزشبکه معمولاً شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره‌کننده انرژی و بارها می‌باشد که می‌تواند به صورت یک شبکه توزیع فعال در دو حالت اتصال به شبکه و عملکرد جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۲۷]. توسعه ریزشبکه‌ها بخشی از مفهوم شبکه هوشمند می‌باشد به طوری که با توجه به مزایای ریزشبکه‌ها همانند کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود قابلیت اطمینان و امنیت سیستم، واضح است که اهداف بین ریزشبکه‌ها و شبکه هوشمند مشترک می‌باشند [۲۸]. همچنین مزایایی از قبیل توسعه تکنولوژی‌های سبز و استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه‌ها وابسته به استفاده از تکنولوژی‌های شبکه هوشمند می‌باشد.

همانطوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ریزشبکه هوشمند مورد بررسی در این مقاله دارای سه نوع مصرف‌کننده خانگی، تجاری و صنعتی در کنار منابع تولیدی شامل میکروتوربین، توربین بادی، سلول خورشیدی، پیل سوختی، باتری و دیزل ژنراتور می‌باشد. به طوری که این شبکه قابلیت تبادل انرژی با شبکه بالا دستی را دارا است. مشخصات نصب شده آن‌ها در جدول (۱) که شامل پیشنهادات قیمت تولیدات پراکنده، هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولیدات پراکنده (شامل میکروتوربین، پیل سوختی، باتری و دیزل ژنراتور) و شبکه بالا دستی، حداقل و حداکثر توان تولیدی، آورده شده است [۲۹].

جدول (۱): پیشنهادات و ضرایب آلودگی منابع تولید پراکنده

Table (1): Bids and emissions coefficient of the DG sources

واحد	نوع	پیشنهادات (€/kWh)	هزینه روشن / خاموش Cost(€/t)	CO ₂ (kg/MWh)	SO ₂ (kg/MWh)	NO _x (kg/MWh)	حداقل توان (kW)	حداکثر توان (kW)
۱	Diesel	۰/۵۸۶	۰/۱۵	۸۹۰	۰/۰۰۵۴	۰/۲۳	۳۰	۳۰۰
۲	MT	۰/۴۵۷	۰/۹۶	۷۲۰	۰/۰۰۳۶	۰/۱	۶	۳۰
۳	FC	۰/۲۹۴	۱/۶۵	۴۶۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵۷	۳	۳۰
۴	PV	۲/۵۸۴	.	.	.	.	.	۲۵
۵	WT	۱/۰۷۳	.	.	.	.	.	۱۵
۶	Bat	۰/۳۸	.	۱۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱	-۳۰	۳۰
۷	Grid	-	.	۹۵۰	۰/۵	۲/۱	-۳۰	۳۰

۳- الگوریتم MOPSO

مدیریت انرژی و بهره‌برداری بهینه از ریزشبه هوشمند یک مساله پیچیده است که باید توسط روش‌های ابتکاری هوشمند قوی حل شود. لذا با توجه به ویژگی‌های منحصربفرد الگوریتم PSO در حل مسائل پیوسته، این الگوریتم برای حل مساله مورد نظر پیشنهاد می‌شود. الگوریتم PSO یک الگوریتم هوش جمعی است که بر اساس حرکت گروهی از ذرات در فضای جستجو بدنبال کمینه کردن تابع هدف می‌باشد جزئیات بیشتر را می‌توان در [۳۰] پیدا کرد. در این مطالعه با اعمال مفاهیم بهینه‌سازی پارتو با اصول اساسی الگوریتم PSO (ایجاد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) [۳۱]) حداقل‌سازی همزمان تابع هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور منابع تجدیدپذیر، تولید پراکنده و بارهای پاسخ‌گو صورت می‌گیرد به طوری که نحوه اعمال الگوریتم بر مساله مورد مطالعه در گام‌های زیر قابل پیگیری هست:

گام ۱: تعریف داده‌های ورودی

این داده‌ها شامل داده‌های ریزشبه هوشمند، هزینه‌های خرید و فروش انرژی از شبکه بالادستی، هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌گی منابع تولید پراکنده مقادیر میانگین و واریانس سرعت باد و تابش خورشید در روز بعد و منحنی بار روزانه می‌باشد.

گام ۲: مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از توان بادی و خورشیدی با استفاده از معادله (۱۵)

گام ۳: ایجاد جمعیت اولیه به صورت $X^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$

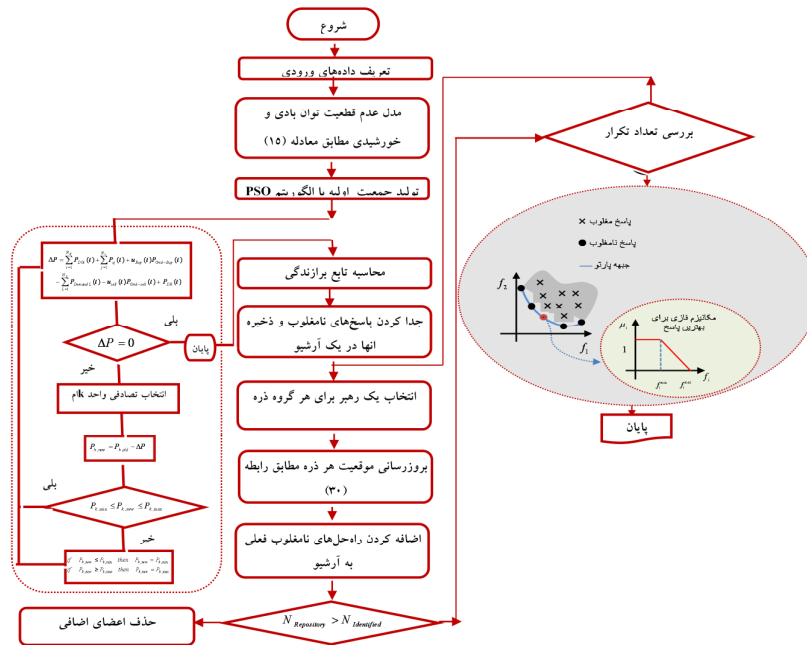
گام ۴: اعمال الگوریتم پخش بار بر جمعیت تولید شده و محاسبه تابع برازندگی بر اساس معادلات (۱۹) یا (۲۲)

گام ۵: مشخص کردن راه‌حل‌های نامغلوب
 گام ۶: جدا کردن راه‌حل‌های نامغلوب و ذخیره کردن آن‌ها در یک آرشیو
 گام ۷: انتخاب بهترین ذره از آرشیو پاسخ‌های نامغلوب به‌عنوان رهبر.
 فرآیند انتخاب رهبر بدین صورت است که فضای جستجو به قسمت‌های مساوی تقسیم شده و به هر قسمت از فضای جستجو یک توزیع احتمالی را اختصاص می‌دهیم و نهایتاً با استفاده از روش چرخ رولت، بهترین ذره به عنوان رهبر انتخاب می‌شود.
 گام ۸: بروز رسانی سرعت و موقعیت جدید هر ذره
 گام ۹: بروز رسانی بهترین موقعیت برای هر ذره
 برای بروز رسانی بهترین موقعیت، موقعیت جدید ذره با موقعیت قبلی آن مقایسه می‌شود.

$$P_{best,i}(t+1) = \begin{cases} P_{best,i}(t) & P_{best,i}(t) < X_i(t+1) \\ X_i(t+1) & X_i(t+1) < P_{best,i}(t) \\ \text{select randomly} & \\ (P_{best,i}(t) \text{ or } X_i(t+1)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

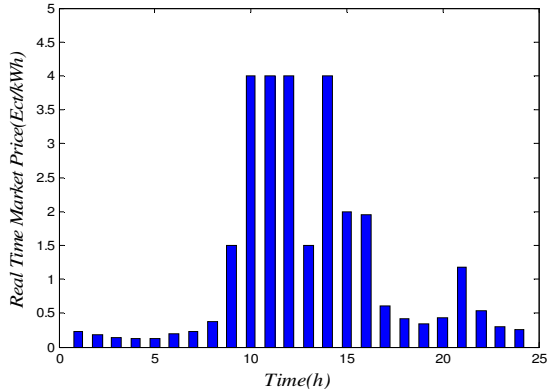
گام ۱۰: اضافه کردن راه‌حل‌های نامغلوب فعلی به آرشیو
 گام ۱۱: حذف اعضای مغلوب از آرشیو
 گام ۱۲: اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد اعضای اضافی حذف می‌شود.

گام ۱۳: بررسی شرط خاتمه یافتن برنامه،
 اگر ماکزیمم تعداد تکرار برقرار باشد فرآیند بهینه‌سازی متوقف می‌شود در غیر این صورت جمعیت فعلی جایگزین جمعیت قبلی شده و الگوریتم به گام ۷ بر می‌گردد.



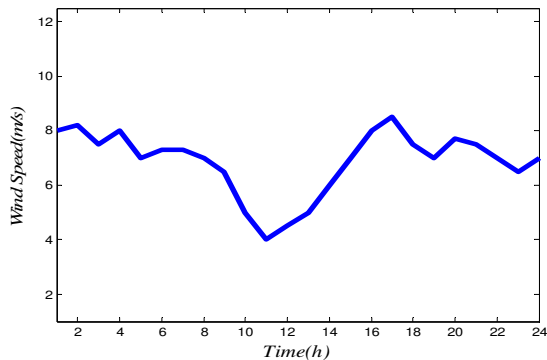
شکل (۶): فلوچارت پیاده‌سازی الگوریتم MOPSO
 Fig. (6): Flowchart of MOPSO algorithm.

هزینه رزرو چرخان حاصل از منابع تولید پراکنده ۲۰٪ بالاترین هزینه حاشیه‌ای انرژی تولیدی لحاظ می‌شود [۳۴]. اطلاعات ساعتی سرعت باد که از وبسایت پیش‌بینی هوا Willy Online Ply Ltd [۳۵] گرفته شده مطابق شکل (۹) می‌باشد.



شکل (۸): منحنی قیمت بازار APX (شبکه بالادستی) [۳۳]
Fig. (8): The real-time market prices of APX [33]

سلول خورشیدی از نوع مدل SOLAREX MSX، ۲۵ کیلوواتی که متشکل از پنل‌های خورشیدی ۱۰*۲.۵kW با $\eta = 18.6\%$ و $s=10m^2$ در نظر گرفته شده است [۳۶] و شکل (۱۰) متوسط ساعتی تابش خورشید را نشان می‌دهد [۳۷]. فرض می‌شود که توربین بادی و سیستم PV دارای ضریب قدرت یک بوده و بقیه تولیدات پراکنده و بارها توان راکتیو مورد نیاز را از طریق خازن گذاری در باس‌های مربوطه و به صورت محلی جبران می‌کنند. هزینه بار از دست رفته^۱ VOLL معادل 1.33 Ect/kWh در نظر گرفته می‌شود [۳۸].



شکل (۹): مقدار میانگین سرعت باد [۳۵]
Fig. (9): The average wind speed [35]

در شبکه نمونه باتری با ظرفیت 30kWh، حداقل و حداکثر شارژ به ترتیب ۱۰ و ۱۰۰٪ ظرفیت باتری با بازده شارژ و دشارژ ۹۴٪ در نظر گرفته شده است [۳۹-۴۰]. بسته‌های پیشنهادی ارائه شده برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مطابق جدول (۲) است به طوری که در اجرای

گام ۱۴: انتخاب بهترین راه‌حل تعاملی (تکنیک فازی) برای انتخاب یک راه‌حل بهتر از میان پاسخ‌های بهینه به دست آمده تابع تصمیم‌گیری فازی با تابع عضویتی که بتواند مقدار دقیق متغیرها در آن جایگذاری گردد، در نظر گرفته می‌شود. که در آن تابع عضویت μ_i^k نشان‌دهنده میزان بهینگی تابع هدف i در بین جواب بهینه پارتو k می‌باشد. که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

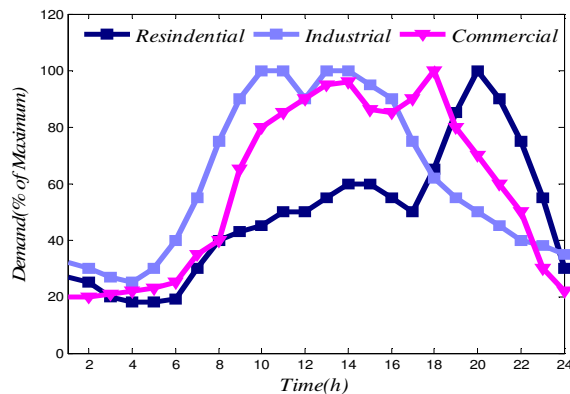
$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\max} < f_i < f_i^{\min} \\ 0 & f_i \geq f_i^{\max} \end{cases}$$

که در آن f_i^{\min} و f_i^{\max} به ترتیب حد بالایی و پایینی تابع هدف i هستند که در روش پیشنهادی این مقادیر با استفاده از نتایج بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. μ_i^k در محدوده ۰ تا ۱ قرار دارد به طوری که $\mu_i^k = 0$ نشان‌دهنده عدم سازگاری جواب با اهداف طراح و $\mu_i^k = 1$ نمایانگر سازگاری کامل می‌باشد.

شکل (۶) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج عددی

ریزشبکه هوشمند متصل به شبکه بالا دستی شکل (۵) به همراه سه نوع مصرف‌کننده خانگی، تجاری و صنعتی که میزان بار درخواستی از شبکه و منحنی بار روزانه مطابق شکل (۷) است [۳۲]، به عنوان شبکه تست در نظر گرفته شده است. بطوریکه کل انرژی مصرفی در طول روز برابر با ۴۰۳۴ kWh می‌باشد. قیمت لحظه‌ای بازار APX مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است [۳۳].



شکل (۷): منحنی بار روزانه مصرف‌کنندگان مختلف [۳۲]
Fig. (7): Daily load curves for the different consumers [32].

در این مرحله نحوه کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی به طور جداگانه، بدون حضور بارهای پاسخ‌گو در نظر گرفته شده‌اند، نحوه تخصیص توان بهینه تولیدی واحدها برای کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی به ترتیب در جداول (۳) و (۴) نشان داده شده است.

نتایج حاصل از جدول (۳) گواه بر آن است که در ساعات اولیه که قیمت انرژی در حد پایین خود قرار دارد باتری شروع به شارژ شده و از ساعت ۹-۱۶ که قیمت انرژی در حد بالایی قرار دارد شبکه بالادستی در حال خرید انرژی از ریزشکه هوشمند است که در آن میزان توان مصرفی با اولویت قیمت پیشنهادی توسط منابع تولید پراکنده تأمین می‌شود. نتایج حاصل از جدول (۴) نشان می‌دهد که در اکثر دوره‌های بهره‌برداری به دلیل اینکه شبکه بالادستی دارای آلاینده‌گی بالایی است لذا در اغلب دوره‌ها این شبکه در حال خرید توان از ریزشکه هوشمند می‌باشد. نتایج حاصل از شکل (۱۱) گواه بر آن است که به خاطر عاری بودن توان بادی و خورشیدی از هر نوع آلودگی در اکثر دوره‌ها، این منابع با در نظر داشتن تابع آلاینده‌گی، در حداکثر میزان توان تولیدی خود قرار می‌گیرند. اما از آنجایی که قیمت پیشنهادی این منابع در مقایسه با منابع تولیدی دیگر بیشتر است لذا این منابع در صورت مد نظر قرار دادن هزینه بهره‌برداری بهینه مورد استقبال زیادی قرار نمی‌گیرد. که نتایج حاصل از مرجع [۲۹] صحت آن را تایید می‌کند.

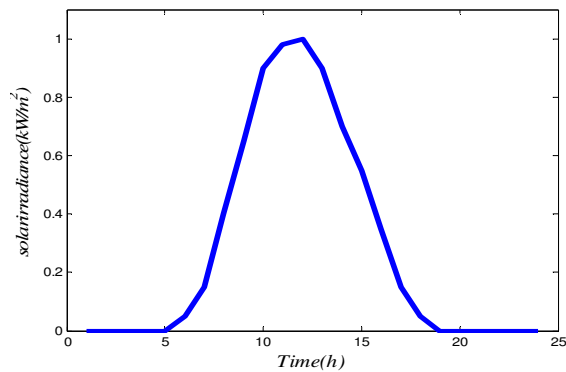
مرحله ۲: توابع هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور بارهای پاسخ‌گو در این مرحله نحوه کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی به طور جداگانه، با مشارکت بارهای پاسخ‌گو در نظر گرفته شده‌اند، نحوه تخصیص توان بهینه تولیدی واحدها برای کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی به ترتیب در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از جدول (۵) با جدول (۳) می‌توان گفت که در صورت استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار توان تولید بادی از مقدار ۸/۵۱ kW به مقدار ۷/۸۷ kW و توان تولید سلول خورشیدی از مقدار ۴/۸۲ kW به ۳/۳۴ kW تقلیل یافته است.

برنامه‌های پاسخ‌گویی فرض می‌شود که ۴۰٪ از مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها شرکت می‌کنند.

Table (2): Price-quantity offer package for DRPs
جدول (۲): پیشنهاد بسته‌های قیمت و مقدار برای DRPs

	مقدار (kW)			
	قیمت (€ct/kWh)			
DRP ₁	۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۵۰	۵۰-۷۰
	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۳۶
DRP ₂	۰-۵	۵-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۶۰
	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۴۳

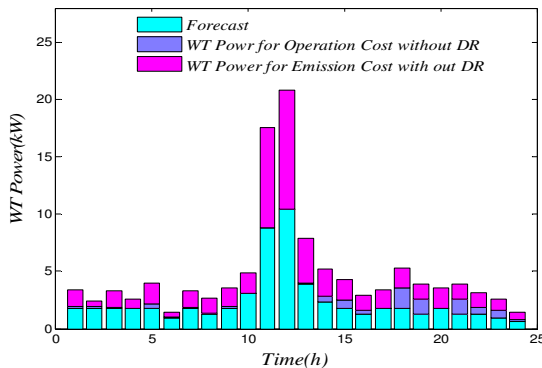
در همه مراحل فرض می‌شود که واحدهای تولیدی با توجه به مشخصات فنی و اقتصادی خود قابلیت شرکت در برنامه‌های ریزشکه را داشته و در صورت وجود مزاد تولید و تقاضا، از طریق نقطه اتصال مشترک با شبکه بالادستی در حال تبادل باشد.



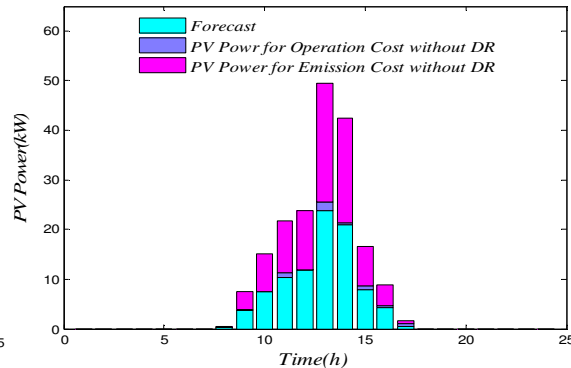
شکل (۱۰): مقدار میانگین تابش خورشید [۳۷]

Fig. (10): The average solar irradiance [37]

مرحله ۱: توابع هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی بدون حضور بارهای پاسخ‌گو



(ب)



(الف)

شکل (۱۱): توان تولیدی (الف) توربین بادی (ب) سلول خورشیدی با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی بدون حضور بارهای پاسخ‌گو

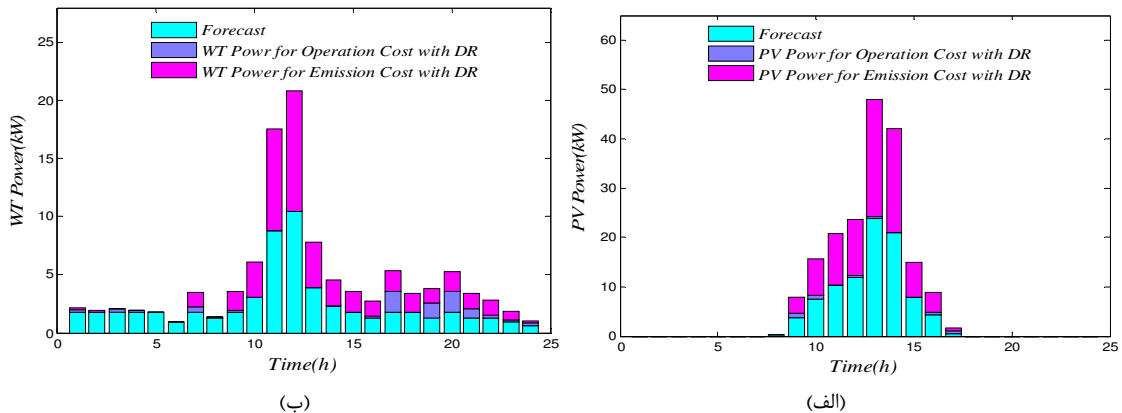
Fig. (11): Output power (a) wind turbine (b) solar cell with considering operating cost and emission without DR

Table (3): Energy resources scheduling for operation cost objective function without DR
 DRجدول (۳): تخصیص توان‌های بهینه با در نظر گرفتن تابع هزینه بهره‌برداری بدون

ساعت	واحدها						
	DG(KW)	MT(kW)	FC(kW)	WT(kW)	PV(kW)	Batt(kW)	Utility (kW)
۱	۳۰	۷/۹۵۱	۷/۲۸	-۰/۱۷	۰	۱۱/۵۸	۳۰
۲	۳۲/۲۸	۱۲/۹۱	۲۷/۰۱	-۰/۱۷	۰	-۱۹/۶۸	۲۶/۲۹
۳	۴۵/۱۳	۷/۱۸	۲۰/۴۳	-۰/۰۶	۰	-۱۹/۷۸	۲۱/۹۶
۴	۳۸/۰۷	۶	۲۴/۵۶	۰	۰	-۳۰	۲۹/۳۵
۵	۳۰	۸/۸۳	۱۳/۹۵	-۰/۴۰	۰	-۱۴/۲۰	۲۶/۰۱
۶	۳۷/۳۹	۸/۰۶	۲۳/۶۱	-۰/۰۹	۰	-۲۱/۹۸	۲۳/۸۱
۷	۳۰	۱۲/۲۸	۱۹/۲۸	-۰/۰۱	۰	-۰/۷۰	۲۲/۹۱
۸	۳۳/۶۵	۹/۸۱	۲۶/۹۵	-۰/۰۶	-۰/۰۷	۲۶/۵۰	۲۲/۹۳
۹	۱۰۴/۷۸	۲۸/۷۱	۲۱/۲۰	-۰/۱۷	-۰/۱۱	۳۰	-۳۰
۱۰	۲۳۴/۷۶	۶	۳/۲۱	۰	۰	-۱۵/۹۷	-۳۰
۱۱	۲۱۱/۳۱	۸/۲۴	۱۹/۱۴	۰	-۰/۸۵	۱۵/۴۴	-۳۰
۱۲	۲۳۸/۸۶	۶	۵/۱۳	۰	۰	-۳۰	-۳۰
۱۳	۲۷۲/۰۷	۶	۸/۴	-۰/۰۵	۱/۶۹	-۲۸/۲۵	-۲۹/۹۶
۱۴	۲۱۸/۹۹	۱۳/۷۴	۲۴/۵۲	-۰/۴۷	-۰/۳۴	۲۱/۷۵	-۲۹/۸۴
۱۵	۲۱۳/۸۹	۱۴/۱۲	۲۸/۹۳	-۰/۷۱	-۰/۸۵	۲۷/۲۶	-۲۹/۷۹
۱۶	۲۲۶/۲۶	۱۳/۱۹	۶/۸۰	-۰/۳۰	-۰/۳۳	۲۴/۰۹	-۳۰
۱۷	۱۱۴/۲۲	۲۹/۹۹	۲۹/۹۷	۰	-۰/۵۵	۳۰	۲۵/۲۵
۱۸	۹۵/۴۵	۲۷/۷۹	۳۰	۱/۷۴	۰	۳۰	۳۰
۱۹	۱۰۵/۸۱	۲۹/۹۹	۳۰	۱/۳۰	۰	۳۰	۲۹/۸۷
۲۰	۱۲۲/۱۹	۱۴/۵۵	۲۹/۰۱	۰	۰	۲۶/۸۷	۲۷/۳۵
۲۱	۱۵۵/۷۲	۲۸/۳۲	۲۸/۴۴	۱/۳۰	۰	۳۰	-۲۳/۷۹
۲۲	۷۹/۶۲	۲۸/۹۴	۲۶/۶۸	-۰/۵۵	۰	۲۹/۸۶	۲۹/۳۲
۲۳	۵۴/۶۹	۲۹/۰۹	۲۵/۳۲	-۰/۷۱	۰	۲۵/۱۶	۳۰
۲۴	۳۱/۵۰	۱۰/۵۱	۲۶/۹۴	-۰/۱۷	۰	۲۸/۶۸	۲۵/۱۷

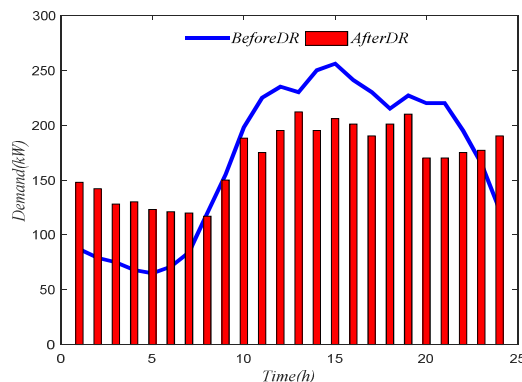
بارهای پاسخ‌گو نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۳) گواه بر آن است که با در نظر داشتن تابع هزینه بهره‌برداری برنامه‌های پاسخ‌گویی بار علاوه بر تأثیر در کاهش توان تولید توربین بادی و سلول خورشیدی منجر به عمل پیک‌سایی در منحنی بار روزانه می‌شود.

از طرفی مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع آلاینده‌گی در عدم حضور / حضور بارهای پاسخ‌گو نشان می‌دهد که استفاده از این برنامه‌ها باعث کاهش میزان توان تولید بادی از مقدار ۵۱/۶۱ kW به ۴۴/۳۹kW و توان تولید خورشیدی از مقدار ۹۱/۳۹ kW به ۸۹/۵۰ kW می‌شود. شکل (۱۲) میزان توان تولید توربین بادی و سلول خورشیدی را با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور



شکل (۱۲): توان تولیدی (الف) توربین بادی (ب) سلول خورشیدی با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور بارهای پاسخ‌گو
 Fig. (12): Output power (a) Wind turbine (b) Solar cell with considering operating cost and emission with DR

شده‌اند. نتایج حاصل از شکل (۱۴) گواه بر آن است که در صورت استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌توان محل بهره‌برداری بهینه را بهبود بخشید، طوری که هزینه بهره‌برداری به میزان ۲۱٪ و انتشار آلاینده‌گی به مقدار ۱۴٪ تقلیل یابد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم MOPSO پیشنهادی نتایج با الگوریتم ژنتیک چند هدفه^{۱۱} NSGA-II مقایسه می‌شود. مطابق اشکال (۱۴) و (۱۵) می‌توان گفت که الگوریتم MOPSO کارایی بهتری را در پیدا کردن نقاط مصالحه بهینه بین توابع هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در دو حالت بدون در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و با لحاظ کردن آنها در مقایسه با الگوریتم NSGA-II دارد. برای بهتر واضح شدن موضوع نتایج مقایسه‌ای که در جدول (۷) آورده شده است. شکل (۱۶) میزان توان تولید بادی و خورشیدی را با در نظر گرفتن کمینه‌سازی تابع هزینه بهره‌برداری، آلاینده‌گی و مینیمم‌سازی همزمان این دو تابع با اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شکل (۱۶) نشان می‌دهد که بیشترین توان تولید بادی و خورشیدی مربوط به حالت در نظر داشتن انتشار آلاینده‌گی می‌باشد و لذا با انتخاب حالت بهینه‌سازی همزمان می‌توان یک موازنه بین آنها ایجاد کرد.



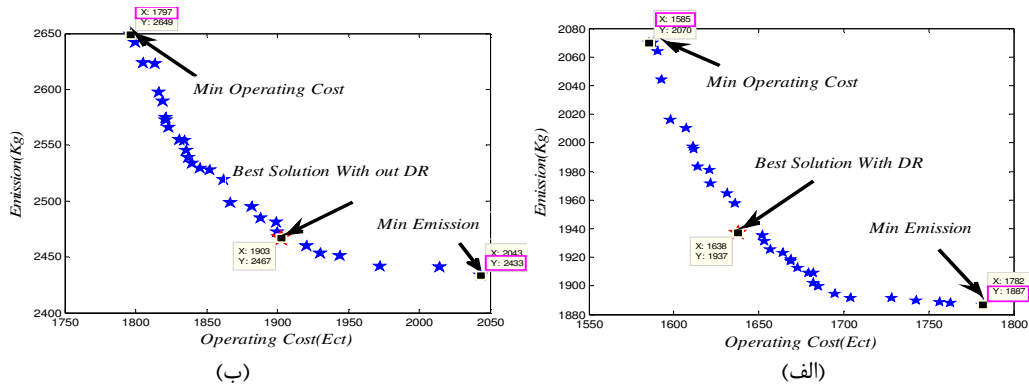
شکل (۱۳): میزان تقاضای بار الکتریکی قبل و بعد از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری

Fig. (13): The load demand before and after DR implement with considering operating cost

مرحله ۳: در نظر گرفتن همزمان تابع چندهدفه هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی
در مرحله ۳ نحوه تخصیص توان تولید بهینه واحدها برای کمینه‌سازی همزمان هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی، به صورت دو تابع ناسازگار، در دو حالت بدون مشارکت و با مشارکت بارهای پاسخ‌گو در نظر گرفته

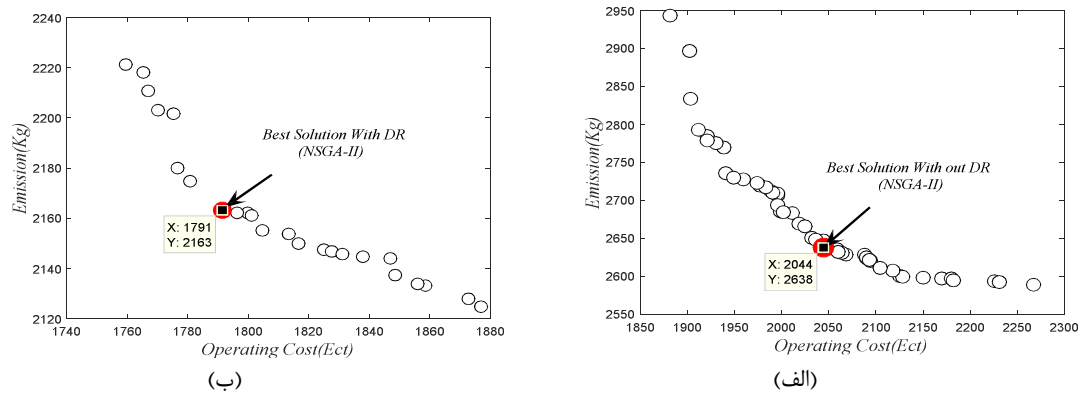
Table (4): Energy resources scheduling for emission objective function without DR
جدول (۴): تخصیص توان‌های بهینه با در نظر گرفتن تابع آلاینده‌گی بدون DR

ساعت	واحدها						
	DG(kW)	MT(kW)	FC(kW)	WT(kW)	PV(kW)	Batt(kW)	Utility (kW)
۱	۳۷/۶۵	۱۷/۹۹	۳۹/۹۱	۱/۴۲	۰	۳۰	-۳۰
۲	۳۰	۲۳/۸۶	۲۴/۶۷	-/۴۲	۰	۲۷/۴۳	-۲۷/۴۰
۳	۳۰	۱۳/۸۳	۲۶/۹۶	۱/۴۲	۰	۳۰	-۲۷/۲۳
۴	۳۰/۱۰	۶/۶۷	۳۰	-/۸۰	۰	۳۰	-۲۹/۵۸
۵	۳۰	۶	۲۷/۳۱	۱/۷۸	۰	۲۹/۸۹	-۳۰
۶	۳۰	۸/۴۵	۳۰	-/۴۱	۰	۳۰	-۲۷/۸۷
۷	۳۲/۷۲	۱۶/۲۷	۳۰	۱/۵۰	۰	۳۰	-۲۶/۵۰
۸	۵۰/۷۱	۳۰	۲۹/۶۷	۱/۳۰	-/۱۹	۲۹/۷۳	-۲۱/۶۲
۹	۵۹/۵۲	۳۰	۳۰	۱/۶۳	۳/۷۲	۳۰	۰/۱۱
۱۰	۱۱۱/۶۰	۲۹/۷۲	۲۸/۴۵	۱/۸۰	۷/۵۲	۲۹/۵۰	-۱۰/۶۲
۱۱	۱۲۵/۷۷	۳۰	۳۰	۸/۷۷	۱۰/۴۴	۲۹/۹۹	-۲۰
۱۲	۱۵۲/۶۴	۳۰	۲۹/۹۹	۱۰/۴۱	۱۱/۹۵	۲۹/۹۹	-۳۰
۱۳	۱۴۲/۳۱	۳۰	۲۹/۹۸	۳/۹۱	۲۳/۸۹	۲۹/۹۸	-۲۹/۹۹
۱۴	۱۶۴/۹۰	۳۰	۳۰	۲/۳۴	۲۱/۰۵	۳۰	-۲۸/۳۰
۱۵	۱۵۷/۳۶	۳۰	۳۰	۱/۷۸	۷/۸۷	۳۰	-۱۹/۰۲
۱۶	۱۶۱/۰۹	۲۹/۹۸	۲۹/۰۱	۱/۲۸	۴/۲۲	۳۰	-۱۴/۶۰
۱۷	۱۵۸/۰۹	۲۹/۸۶	۲۷/۹۵	۱/۵۹	-/۴۹	۳۰	-۱۸
۱۸	۱۵۳/۲۱	۳۰	۳۰	۱/۷۸	۰	۳۰	-۳۰
۱۹	۱۱۵/۷۲	۳۰	۲۸/۸۱	۱/۲۷	۰	۳۰	۲۱/۱۸
۲۰	۱۰۸/۱۱	۲۹/۵۴	۲۹/۹۸	۱/۷۸	۰	۲۹/۴۶	۲۱/۱۰
۲۱	۹۸/۸۲	۳۰	۳۰	۱/۳۰	۰	۲۹/۸۷	۳۰
۲۲	۷۳/۶۹	۳۰	۳۰	۱/۳۰	۰	۳۰	۲۹/۹۹
۲۳	۴۴/۵۱	۲۹/۵۷	۲۹/۹۹	-/۹۱	۰	۳۰	۲۹/۹۹
۲۴	۳۸/۲۵	۲۹/۲۲	۳۰	-/۶۱	۰	۳۰	-۵/۰۹



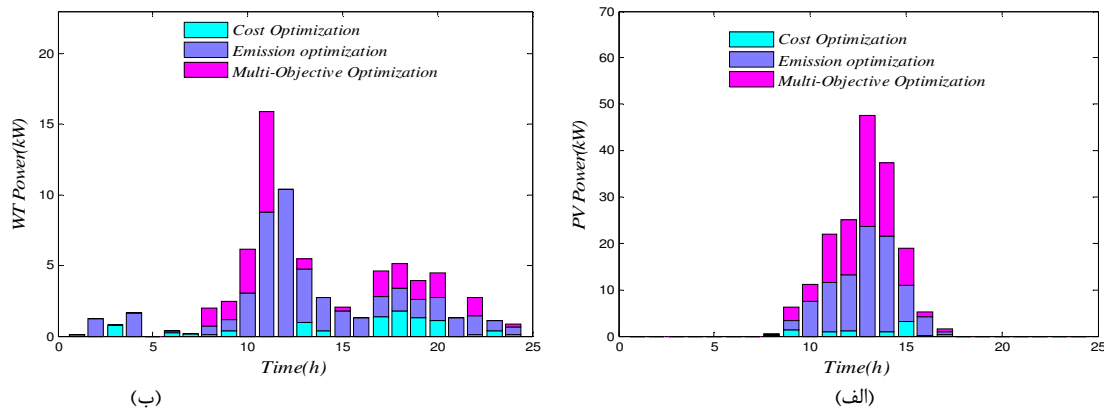
شکل (۱۴): نحوه توزیع معیار پارتو هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با الگوریتم MOPSO (الف) بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار (ب) با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار

Fig. (14): Pareto criterion for operating costs and pollution with MOPSO algorithm (a) without DR (b) with DR



شکل (۱۵): نحوه توزیع معیار پارتو هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با الگوریتم NSGA-II (الف) بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار (ب) با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار

Fig. (15): Pareto criterion for operating costs and pollution with NSGA-II algorithm (a) without DR (b) with DR



شکل (۱۶): توان تولیدی (الف) توربین بادی (ب) سلول خورشیدی

Fig. (16): Power generation (a) Wind turbine (b) Solar cell

Table (5): Energy resources scheduling for operation cost objective function with DR
جدول (۵): تخصیص توان‌های بهینه با در نظر گرفتن تابع هزینه بهره‌برداری با DR

ساعت	واحدها						
	DG(kW)	MT(kW)	FC(kW)	WT(kW)	PV(kW)	Batt(kW)	Utility (kW)
۱	۳۷/۶۹	۱۲/۲۰	۸/۳۵	۰/۲۴	.	-۰/۴۷	۲۳/۰۲
۲	۳۶/۷۹	۱۲/۳۱	۱۳/۰۷	.	.	-۱۶/۶۷	۲۳/۴۹
۳	۳۲/۱۲	۱۵/۱۷	۱۳/۲۳	۰/۲۸	.	-۱۹/۴۸	۲۳/۶۶
۴	۳۱/۲۵	۹/۹۹	۲۱/۰۵	۰/۱۷	.	-۲۹/۴۷	۳۰
۵	۳۰/۱۷	۷/۷۱	۳/۳۰	.	.	-۲۹/۹۹	۳/۸۰
۶	۳۲/۵۸	۶	۷/۸۹	۰/۰۴	.	-۳/۳۹	۱۷/۸۵
۷	۳۶/۳۲	۷/۴۲	۲۵/۸۲	۰/۴۵	.	-۲۰/۷۶	۲۹/۷۳
۸	۳۷/۸۱	۱۳/۳۵	۲۹/۰۶	۰/۰۳	.	۲۶/۸۲	۷/۹۱
۹	۸۲/۳۸	۱۰/۸۸	۲۲/۶۸	۰/۱۷	-۰/۹۳	۲۷/۹۳	-۳۰
۱۰	۱۶۳/۸۷	۲۲/۷۰	۱۷/۴۰	.	-۰/۶۷	۱۸/۳۴	-۳۰
۱۱	۲۳۹/۳۰	۶/۴۷	۵/۷۲	.	.	-۱/۵۰	-۳۰
۱۲	۲۰۵/۷۰	۸/۰۹	۱۵/۰۴	۰/۰۴	-۰/۳۷	-۴/۲۶	-۲۹/۹۹
۱۳	۲۲۳/۵۴	۶	۲۷/۲۴	.	-۰/۲۷	-۷/۲۰	-۲۹/۸۷
۱۴	۲۶۷/۰۵	۶	۵/۷	.	.	-۳/۷۵	-۳۰
۱۵	۲۱۷/۱۴	۲۵/۳۰	۲۷/۲۳	.	.	۱۱/۲۵	-۲۹/۹۳
۱۶	۱۷۵	۱۲/۷۹	۲۶/۷۰	۰/۱۳	-۰/۵۳	۵/۸۲	-۲۹/۹۸
۱۷	۱۲۸/۷۴	۲۷/۸۶	۲۹/۸۳	۱/۷۸	-۰/۵۵	۲۹/۰۶	۷/۱۶
۱۸	۴۷/۵۸	۳۰	۲۹/۸۵	.	.	۲۷/۸۰	۲۹/۷۵
۱۹	۵۵/۷۲	۲۹/۹۸	۳۰	۱/۳۰	.	۲۹/۹۹	۳۰
۲۰	۹۱/۶۲	۲۹/۲۵	۲۸/۸۸	۱/۷۴	.	۲۸/۸۱	-۲۹/۶۷
۲۱	۱۳۱/۶۱	۲۵/۹۴	۲۴/۷۳	۰/۷۶	.	۲۶/۶۰	-۲۹/۹۷
۲۲	۱۰۱/۸۸	۱۶/۹۴	۱۹/۴۸	۰/۲۳	.	۲۵/۳۴	۲۶/۰۸
۲۳	۳۰	۱۴/۱۶	۲۷/۵۴	۰/۱۸	.	۲۳/۲۴	۲۹/۸۶
۲۴	۳۱/۷۱	۱۵/۳۳	۳۰	۰/۲۴	.	-۲۲/۶۶	۲۸/۳۶

Table (6): Energy resources scheduling for emission objective function with DR
جدول (۶): تخصیص توان‌های بهینه با در نظر گرفتن تابع الایندهی با DR

ساعت	واحدها						
	DG(kW)	MT(kW)	FC(kW)	WT(kW)	PV(kW)	Batt(kW)	Utility (kW)
۱	۳۰	۶	۱۱/۹۶	۰/۱۷	.	۲۸/۸۵	-۳۰
۲	۳۰/۷۰	۱۰/۳۷	۲۵/۱۸	۰/۱۰	.	۲۹/۰۵	-۲۶/۴۲
۳	۳۰	۱۱/۴۰	۲۷/۷۴	.	.	۳۰	-۲۹/۱۴
۴	۳۰	۶	۳	.	.	۱۹	-۳۰
۵	۳۰	۶	۳	.	.	۶	-۳۰
۶	۳۰/۰۱	۶/۰۱	۳/۰۵	.	.	۲۱/۸۶	-۲۹/۹۴
۷	۳۲/۱۱	۹/۸۴	۲۹/۷۹	۱/۲۰	.	۳۰	-۲۸/۹۵
۸	۳۰	۱۰/۴۴	۲۳/۹۶	.	-۰/۱۶	۳۰	-۲۴/۵۷
۹	۲۵/۰۷	۳۰	۲۹/۶۹	۱/۶۰	۳/۲۴	۳۰	۱۵/۳۷
۱۰	۳۹/۳۹	۲۹/۷۱	۲۸/۶۰	۳/۰۳	۷/۵۲	۲۹/۸۷	۱۹/۸۳
۱۱	۸۰/۷۷	۳۰	۳۰	۸/۷۷	۱۰/۴۵	۳۰	۳۰
۱۲	۱۰۶/۹۷	۲۹/۹۹	۲۹/۷۹	۱۰/۴۰	۱۱/۳۳	۲۹/۹۹	۱۱/۴۹
۱۳	۴۲/۲۱	۳۰	۲۹/۸۹	۳/۹۱	۲۳/۹۰	۲۹/۹۹	۲۹/۹۸
۱۴	۱۲۹/۹۱	۲۹/۹۹	۳۰	۲/۱۹	۲/۰۵	۲۹/۹۶	۱/۸۶
۱۵	۱۲۶/۹۳	۲۹/۹۱	۳۰	۱/۷۸	۷/۱۲	۲۹/۹۹	۲۰/۲۴
۱۶	۷۱/۹۴	۳۰	۳۰	۱/۳۷	۴/۱۵	۲۸/۹۹	۲۴/۶۳
۱۷	۵۷/۶۶	۳۰	۲۹/۹۹	۱/۷۸	-۰/۵۵	۲۹/۹۹	۳۰
۱۸	۶۷/۶۶	۳۰	۳۰	۱/۶۴	.	۳۰	۵/۶۸
۱۹	۱۰۲/۵۹	۳۰	۳۰	۱/۲۲	.	۳۰	۲۳/۱۸
۲۰	۹۶/۸۰	۳۰	۲۹/۹۹	۱/۷۷	.	۲۹/۵۸	-۱۸/۱۶
۲۱	۵۸/۷۳	۲۹/۹۹	۳۰	۱/۲۹	.	۳۰	۲۹/۹۷
۲۲	۳۶/۳۰	۳۰	۳۰	۱/۳۰	.	۳۰	۱۷/۳۹
۲۳	۵۱/۲۳	۲۹/۹۹	۲۹/۹۹	۰/۷۵	.	۳۰	۱۸/۰۱
۲۴	۳۳/۶۳	۳۰	۳۰	۰/۱۲	.	۲۹/۵۷	-۱۰/۳۴

بارهای پاسخگو با کاهش ۲۱٪ هزینه بهره‌برداری و ۱۴٪ میزان انتشار آلاینده‌گی بهترین نتایج را بدنبال دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی گواه بر آن است که مدنظر قرار دادن تابع آلودگی به عنوان هدف اصلی، افزایش هزینه بهره‌برداری را به دنبال دارد، بطوریکه استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در این حالت در مقایسه با حالت بهره‌برداری در بیشترین مقدار خود قرار دارد. از دیگر نتایج مهم این مقاله می‌توان به ارائه مدلی با ساختار ساده که در رسیدن به جواب بهینه از قدرت بالایی برخوردار است، اشاره کرد، به طوری که مشارکت مصرف‌کنندگان در پاسخ‌گویی بار علاوه بر پوشش کمبود تولید ناشی از عدم قطعیت حاصل از توان بادی و خورشیدی، سبب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی کل سیستم می‌گردد، چرا که استفاده از پاسخ‌گویی بار موجب استفاده از واحدهای تولیدی (شامل منابع تولید پراکنده، منابع تجدیدپذیر و شبکه بالادستی) گران‌قیمت که برخی از آن‌ها موجب افزایش آلودگی محیط هم خواهد شد، می‌شود. برای نشان دادن کارایی الگوریتم MOPSO این الگوریتم با الگوریتم NSGA-II مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصل برتری الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

پی‌نوشت:

1. Distributed Energy Resources
2. Advanced Metering Infrastructure
3. Demand System Management
4. Demand Response
5. Particle Swarm Optimization
6. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
7. Wind Energy Conversion System
8. Photovoltaic System
9. Demand Response Programs
10. Value of Lost Load
11. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

Table (7): Comparison of best compromise solution

جدول (۷): مقایسه بهترین راه حل تعاملی		MOPSO	NSGA-II
روش			
بدون در نظر گرفتن DR	هزینه بهره‌برداری (€ct)	۱۹۰۳	۲۰۴۴
	آلاینده‌گی (kg)	۲۴۶۷	۲۶۳۸
با در نظر گرفتن DR	هزینه بهره‌برداری (€ct)	۱۶۳۸	۱۷۹۱
	آلاینده‌گی (kg)	۱۹۳۷	۲۱۶۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک برنامه‌ریزی احتمالاتی برای ریزشیکه هوشمند نمونه با در نظر گرفتن بارهای پاسخ‌گو به عنوان پوشش‌دهنده عدم قطعیت ناشی از توان تولید بادی و خورشیدی به صورت تابع بهینه‌سازی با دو هدف ناسازگار پیاده‌سازی شد که در آن هزینه کل بهره‌برداری از ریزشیکه و آلودگی ناشی از آلاینده‌ها در ۳ حالت مختلف مدنظر قرار گرفت؛ به طوری که در آن از یک روش برنامه‌ریزی احتمالاتی برای مدل کردن رفتار تصادفی توان تولید بادی و سلول خورشیدی استفاده شد. برای عملکرد بهتر ریزشیکه هوشمند فرض شد امکان تبادل انرژی با شبکه بالادستی وجود دارد. ضمن آنکه طرف مصرف می‌تواند در مدیریت تولید و مصرف انرژی مشارکت فعال داشته باشد که برای انجام این مدیریت مصرف، فرض شد که مصرف‌کنندگان می‌توانند در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر مبنای پرداخت تشویقی به صورت بسته پیشنهادی قیمت و مقدار انرژی، مشارکت داشته باشند. جهت رسیدن به پاسخ بهینه از روش MOPSO بر اساس تکنیک فازی استفاده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مشارکت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده امکان کاهش هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی را بدنبال دارد، بطوریکه در بین حالت‌های بررسی شده در نظر گرفتن همزمان هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور

References

- [1] Q. Sun, X. Ge, L. Liu, X. Xu, Y. Zhang, R. Niu, Y. Zeng, "Review of smart grid comprehensive assessment systems", *Energy Procedia*, Vol. 12, pp. 219-29, 2011.
- [2] K. Mazlumi, "Presenting a new method based on branch placement for optimal placement of phasor measurement units", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 113-120, 2014.
- [3] Z. Li, F. Yang, S. Mohagheghi, Z. Wang, J. Tournier, Y. Wang, "Toward smart distribution management by integrating advanced metering infrastructure", *Electric Power Systems Research*, Vol. 105, pp. 51-56, 2013.
- [4] G. López, J. Moreno, H. Amarís, F. Salazar, "Paving the road toward smart grids through large-scale advanced metering infrastructures", *Electric Power Systems Research*, Vol. 120, pp. 194-205, 2015.
- [5] R.R. Mohassel, A.S. Fung, F. Mohammadi, K. Raahemifar, "A survey on advanced metering infrastructure and its application in smart grids", *Proceeding of the IEEE/CCECE*, pp. 1-8, Toronto, ON, Canada, May 2014.
- [6] F. Bouhaf, M. Mackay, M. Merabti. "Communication challenges and solutions in the smart grid", Springer, 2014.
- [7] P.K. Verma, H. Sharma, "Application of cloud computing in smart grid: A review", *Proceeding of the ICAR*, pp. 404-409, 2015.
- [8] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami, A.M. Ranjbar, S. Sattari, "A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 64, pp. 1007-1016, 2015.
- [9] M.H. Albadi, E. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets", *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 11, pp. 1989-1996, Nov. 2008.
- [10] A.A. Khan, S. Razaq, A. Khan, F. Khursheed, "HEMSs and enabled demand response in electricity market: An overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 773-785, Feb. 2015.

- [11] D.G. Hart, "Using AMI to realize the smart grid", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-2, Pittsburgh, PA, USA, July 2008.
- [12] T. Broeer, J. Fuller, F. Tuffner, D. Chassin, N. Djilali, "Modeling framework and validation of a smart grid and demand response system for wind power integration", *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 199-207, Jan. 2014.
- [13] S.A. Alavi, A. Ahmadian, M. Aliakbar-Golkar, "Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method", *Energy Conversion and Management*, Vol. 95, pp. 314-325, May 2015.
- [14] A. Zakariazadeh, S. Jadid, P. Siano, "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs", *Electric Power Systems Research*, Vol. 111, pp. 156-168, June 2014.
- [15] A. Zakariazadeh, S. Jadid, P. Siano P. "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach", *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 151-64, Feb. 2014.
- [16] F.A. Mohamed, H.N. Koivo, "System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 5, pp. 398-407, June 2010.
- [17] N. Rezaei, M. Kalantar, "Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework", *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 287-301, March 2015.
- [18] N. Cicek, H. Delic, "Demand Response Management for smart grids with wind power", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 625-634, April 2015.
- [19] K. Afshar, A.S. Gazafroudi, "Application of stochastic programming to determine operating reserves with considering wind and load uncertainties", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 96-109, Nov. 2013.
- [20] G. Boyle, *Renewable energy: OXFORD university press*; 2004.
- [21] B. Gen, *Reliability and cost/worth evaluation of generating systems utilizing wind and solar energy*. 2005.
- [22] Owner's manual of the AIR403 wind turbine made by Southwest Wind power Inc. <www.nooutage.com/pdf/swwp_air403_landman.pdf>.
- [23] Y. Atwa, E. El-Saadany, M. Salama, R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization", *IEEE Trans. on, Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 360-370, Feb. 2010.
- [24] F.Y. Ettoumi, A. Mefti, A. Adane, M. Bouroubi, "Statistical analysis of solar measurements in algeria using beta distributions", *Renewable Energy*, Vol. 26, No. 1, pp. 47-67, 2002.
- [25] M. Deshmukh, S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 1, pp. 235-249, 2008.
- [26] G. Tina, S. Gagliano, S. Raiti, "Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment", *Solar Energy*, Vol. 80, No. 5, pp. 578-88, 2006.
- [27] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*, The Institution of Engineering and Technology; 2009.
- [28] H. Kanchev, D. Lu, F. Colas, V. Lazarov, B. Francois, "Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4583-92, Oct. 2011.
- [29] A.A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, M.R.A. Pahlavani, "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source", *Energy*, Vol. 36, No. 11, pp. 6490-6507, Nov. 2011.
- [30] J. Kennedy, "Particle swarm optimization", *Encyclopedia of Machine Learning*, Springer, pp. 760-766, 2011.
- [31] C.A. Coello Coello, M.S. Lechuga, "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization", *Proceeding of the IEEE/CEC*, Honolulu, HI, USA, USA, May 2002.
- [32] S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou, K. Strunz, "A benchmark low voltage microgrid network", *Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation*, Jan. 2005.
- [33] Apx power spot exchange. Accessed at, <https://www.apxgroup.com/trading-clearing/apx-power-uk/>.
- [34] F. Bouffard, F.D. Galiana, A.J. Conejo, "Market-clearing with stochastic security-part I: Formulation", *IEEE Trans. on, Power Systems*, Vol. 20, No. 4, pp.1818-1826, 2005.
- [35] Willy Weather. Available online; <http://wind.willyweather.com.au>.
- [36] The Solar Power Group Company. Accessed at, <http://thesolarpowergroup.com.au>.
- [37] Reconstruction and Short-term Forecast of the Solar Irradiance. Accessed at, <http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/soteria/>.
- [38] A.S. Bouhouras, D.P. Labridis, A.G. Bakirtzis, "Cost/worth assessment of reliability improvement in distribution networks by means of artificial intelligence", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.32, No.5, pp.530-538, 2010.
- [39] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation", *IET Renewable Power Generation*, Vol.5, No.3, pp.258-67, 2011.
- [40] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid", *IEEE Trans. on, Power Systems*, Vol.25, No.1, pp.371-380, 2010.