

## مدیریت بهره برداری در یک ریز شبکه با در نظر گرفتن پاسخگویی بار و عدم قطعیت منابع تجدید پذیر با استفاده از الگوریتم MOPSO

محمد عالی محمودی<sup>۱</sup>، سیده نرجس موسوی<sup>۲</sup>، امیرحسین صباغان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، m.aalimahmoudi@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، Narjes.mousavi92@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، amirsa200@yahoo.com

### 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 ریز شبکه هوشمند در کوتاه مدت جهت حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود. بطوریکه در آن استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که توسط شرکت کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی صورت می‌گیرد، جهت پوشش عدم قطعیت توان تولیدی حاصل از منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود. برای اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار برنامه پرداخت تشویقی به صورت بسته‌های پیشنهادی قیمت و میزان انرژی که به وسیله فراهم‌کنندگان پاسخ‌گویی بار جمع‌آوری می‌شود، پیشنهاد گردیده است. نتایج پیاده‌سازی 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 (MOPSO)<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است بطوریکه سیستم مرتب‌سازی غیرخطی و مکانیزم فازی برای تعیین بهترین پاسخ با توجه به مجموعه پاسخ‌های حاصل از فضای پارتو توصیه می‌گردد. مدل پیشنهادی بر روی یک ریز شبکه هوشمند نمونه بکار برده شده و نتایج عددی به دست آمده به‌طور واضح نشان دهنده تأثیر مدیریت سمت تقاضا در کاهش اثر عدم قطعیت حاصل از توان تولیدی و پیش‌بینی شده توربین بادی و سلول خورشیدی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ریز شبکه هوشمند، منابع تجدیدپذیر، مدیریت سمت مصرف، فراهم‌کنندگان برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

### ۱. مقدمه

سیستم‌های توزیع آینده با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده که بصورت نسل‌هایی از منابع تجدیدپذیر مانند منابع تولید توان بادی و خورشیدی، که دارای رفتار طبیعی متناوب هستند، روبرو خواهند شد. بطوریکه این امر ممکن است امنیت عملیات بهره‌برداری سیستم را به مخاطره بیندازد [۱ و ۲]. لذا ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی موثر و کارا برای منابع انرژی توزیع (DERs) جهت بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های توزیع آینده یک امر لازم و ضروری است، که یکی از راه کارهای 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 زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)<sup>۳</sup> به عنوان یکی از ضروری‌ترین زیرساخت‌های سیستم

<sup>1</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup> Distributed Energy Resources

<sup>3</sup> Advanced Metering Infrastructure

هوشمند، لازم و ضروری است [۳]. AMI با ایجاد بستر مخابراتی دو طرفه بین مشتریان و شرکت‌های برق، قابلیت قرائت، پیکربندی، نظارت و کنترل از راه دور کتورها، 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 [۸]. بطوری که 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 (DSM) یکی از روش‌های حفظ منافع مشترک شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی است. پاسخ‌گویی بار (DR) در برگرنده 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 بشمار می‌رود. 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 [۹]. 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.

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 می‌باشیم. 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 محور داوطلبانه 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 مدل کردن تولید توان بادی و خورشیدی به ترتیب تابع چگالی احتمال ریلی و تابع چگالی احتمالی بتا پیشنهاد می‌گردد. حل مدل چندهدفه پیشنهادی 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.

بطور 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 ریزشکه هوشمند
- استفاده از بسته پیشنهادی قیمت - مقدار جهت اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار
- مدل‌سازی احتمالاتی توان بادی، توان خورشیدی و توان بادی - خورشیدی جهت دستیابی به مدل ریاضی دقیق
- 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

## ۲. تحلیل عملکرد مساله

در این مقاله یک مدل احتمالاتی برای مدیریت انرژی در کوتاه مدت جهت رسیدن به حداقل هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در یک ریزشکه 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

<sup>1</sup> Advanced Metering Infrastructure

<sup>2</sup> Demand Response

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 با وجود این عدم قطعیت‌ها نتیجه‌ای بهینه حاصل شود. برای پوشش عدم قطعیت حاصل از این منابع، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر پرداخت‌های تشویقی محور داوطلبانه پیشنهاد می‌شود. از طرفی فرض می‌شود برنامه‌ریزی منابع تولید و بارهای مصرفی در ریزشبه هوشمند توسط بهره‌بردار سیستم توزیع صورت می‌گیرد که در آن بهره‌بردار سیستم توزیع با بهره‌گیری از سیستم‌های مدیریت توزیع و زیر ساخت اندازه‌گیری پیشرفته امکان مدیریت و کنترل شبکه مورد نظر را دارد.

## ۱.۲. مدل سیستم تبدیل انرژی بادی<sup>۱</sup> (WECS)

توربین بادی، انرژی بادی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند بطوریکه توان خروجی توربین بادی به پارامترهایی از قبیل دسترسی پذیری 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. لذا با فرض  $\alpha_w$  به عنوان پارامتر مقیاس و  $\beta_w=2$  به عنوان پارامتر شکل، توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی به ترتیب مطابق معادلات (۱) و (۲) می‌باشد.

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

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

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

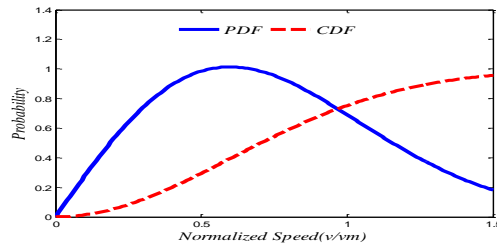
$$v_m = \alpha_w \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \alpha_w \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \alpha_w \quad (3)$$

لذا در صورت جایگذاری مقدار  $\alpha_w = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_m$  در توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی مدل ریلی برای سیستم WECS بصورت تابعی از متوسط سرعت باد مطابق معادلات (۴) و (۵) بدست خواهد آمد. شکل ۱، سیستم نمونه توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی را نشان می‌دهد.

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

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

<sup>1</sup> Wind Energy Conversion System



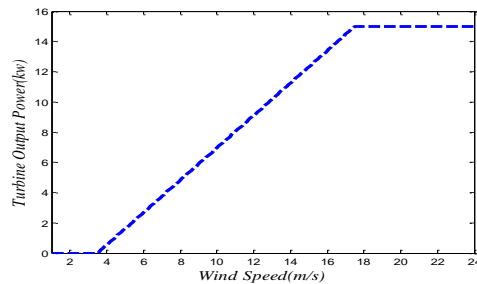
شکل ۱- مدل توزیع سرعت باد

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

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

که در آن  $v_{wind}$  و  $v_{co}$ ،  $v_r$ ،  $v_{ci}$  به ترتیب سرعت وصل، سرعت نامی، سرعت قطع و سرعت واقعی توربین بادی  $P_R$  توان نامی توربین می باشد. توربین بادی استفاده شده در این مطالعه از نوع AIR40 بوده که در آن  $P_R=15kW$ ؛  $v_{ci}=3.5m/s$ ؛  $v_{co}=18m/s$ ؛  $v_r=17.5m/s$  می باشد، شکل ۲، منحنی توان این توربین بادی را نشان می دهد [۱۶].

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



شکل ۲- منحنی توان توربین بادی مدل AIR403

$$f_{P_W}(P_W) = \begin{cases} 1 - [F_V(v_{CO}) - F_V(v_{CI})] & P_W = 0 \\ \left( \frac{v_r - v_{ci}}{P_R} \right) \cdot \left( \frac{\pi}{2v_m^2} \right) \times (v_{ci} + (v_r - v_{ci}) \cdot \frac{P_W}{P_R}) & 0 < P_W < P_R \\ \exp \left[ - \left( \frac{v_{ci} + (v_r - v_{ci}) \cdot \frac{P_W}{P_R}}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} v_m} \right)^2 \right] & 0 < P_W < P_R \\ F_V(v_{CO}) - F_V(v_r) & P_W = P_R \end{cases} \quad (7)$$

## ۲.۲. مدل سیستم فتوولتائیک (PVs)

مولدهای فتوولتائیک سیستمی هستند نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می کنند بطوری که خروجی سیستم خورشیدی کاملاً وابسته به میزان تابش است. با در نظر گرفتن رفتار تابش خورشید برای مدل سازی آن مطابق معادله (۸) از تابع توزیع احتمالی بتا استفاده می شود [۱۲].

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

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

که در آن s نمایانگر میزان تابش خورشید (kW/m<sup>2</sup>)، α و β پارامترهای توابع چگالی احتمال و توزیع تجمعی بتا است که مطابق معادلات زیر می تواند از میانگین و انحراف معیار داده های تابش خورشیدی محاسبه شوند.

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

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

حال می توان با استفاده از معادله (۱۲) میزان تابش خورشید را به توان خورشیدی تبدیل کرد [۱۱].

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

که در آن P<sub>PV</sub>(s) بیانگر میزان توان خروجی PV بر حسب (kW) برای میزان تابش s، A<sub>c</sub> سطح آرایه ها (m<sup>2</sup>) و η بازده سیستم PV است.

در صورت استفاده از معادله (۸) تابع چگالی احتمال f<sub>B</sub>(P<sub>PV</sub>) برای توان خروجی PVs مطابق معادله (۱۳) خواهد بود.

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

### ۳.۲. مدل سیستم ترکیبی انرژی بادی-خورشیدی<sup>۱</sup> (HSWPS)

تولید توان به وسیله سیستم ترکیبی  $P_h$  برابر مجموع توان خروجی سیستم WECS و توان خروجی سیستم  $P_{Vs}$  است.

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

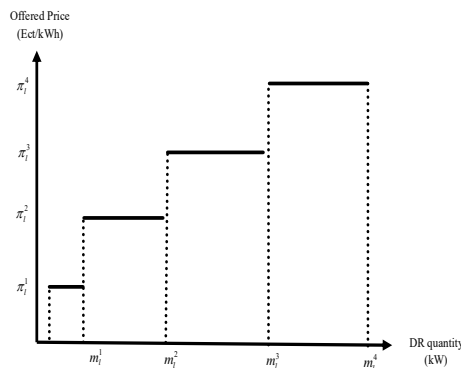
با فرض اینکه  $P_w$  و  $P_{PV}$  بصورت مستقل از هم عمل می کنند تابع چگالی برای متغیر تصادفی  $P_h$  بصورت کانولوشن بین تابع چگالی  $P_w$  و  $P_{PV}$  مطابق معادله (۱۵) تعریف می شود.

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

از آنجایی که وارد کردن تابع چگالی احتمال پیوسته در قالب ریاضی مشکل به نظر می رسد بنابراین در چنین مواردی از شبیه سازی مونت کارلو برای دست یابی به سناریوهای مختلف استفاده می شود اما تولید سناریوهای مختلف نیز بر پیچیدگی های ریاضی مساله می افزاید. راهکار مناسب برای پیشگیری از پیچیدگی های ریاضیاتی، گسسته سازی تابع توزیع احتمال پیوسته با تقسیم آن به بازه های مختلف است. در این صورت سطح محصور در هر بازه بیانگر احتمال رخداد میانه آن بازه است. بنابراین در این تحقیق مدل احتمالاتی پیشنهاد شده برای سیستم بادی و خورشیدی، تابع توزیع احتمال به هفت بازه تقسیم می شود. از آنجایی که این دو سیستم مستقل از هم فرض می شوند بنابراین احتمال وقوع هر سناریو حاصل ضرب احتمال وقوع این دو مشخصه در هر سناریو خواهد بود.

### ۳. مدل سازی پاسخ گویی بار

در یک ریزشکه انواع مختلفی از مصرف کنندگان الکتریکی با الگوی مصرفی متفاوت می توان در نظر گرفت. جهت بررسی کامل مصرف کننده ها و کسب اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۶] رجوع شود. در این مقاله نحوه مدل کردن برنامه پاسخگویی بار که بر پایه پرداخت تشویقی محور داوطلبانه می باشد بر اساس بسته های پیشنهادی قیمت با توجه به مقدار کاهش بار، مطابق شکل ۳، می باشد.

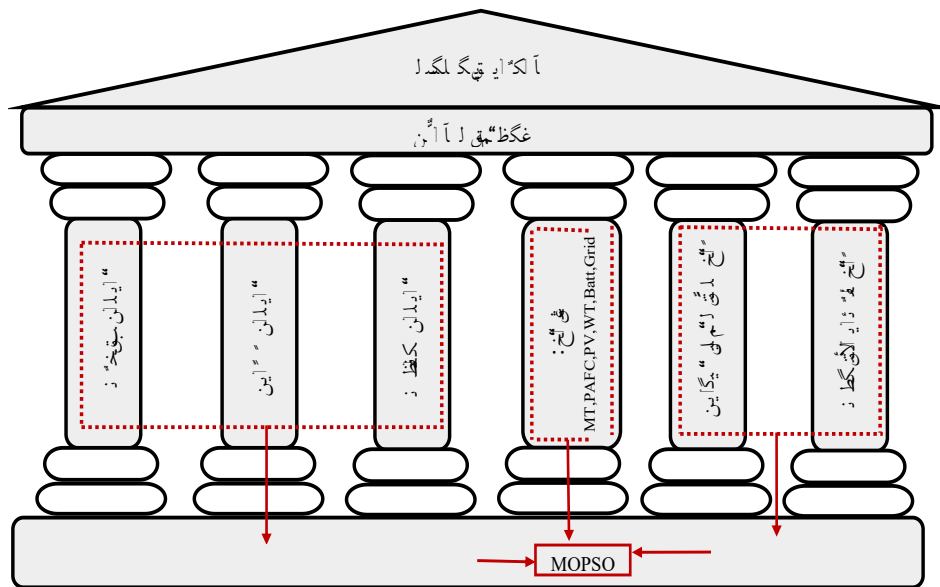


شکل ۳- بسته پیشنهادی پاسخگویی بار

<sup>1</sup> Hybrid Solar-Wind Power System

#### ۴. 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، که دارای رفتار طبیعی تصادفی بوده و نحوه پوشش این توان تولیدی تصادفی توسط بارهای پاسخ‌گو بصورت 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 نامساوی جهت پوشش عدم قطعیت ناشی از تولید توان بادی و خورشیدی که با استفاده از توابع چگالی احتمال مدل‌سازی شده‌اند، می‌باشد. شکل ۴، تصویر واضحی از مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۴- ساختار مدل بهینه‌سازی

#### ۱.۴. تابع هزینه بهره‌برداری

در این مقاله تابع بهره‌برداری به دو قسمت تقسیم می‌شود: هزینه‌های بهره‌برداری معین که شامل هزینه‌های ثابت راه‌اندازی و روشن شدن منابع تولید پراکنده، هزینه‌های رزرو تامین شده بوسیله منابع تولید پراکنده، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و هزینه‌های توان مبادله‌ای با شبکه بالادستی و هزینه‌های بهره‌برداری نامعین با لحاظ کردن و تحقق احتمال سناریو  $P_{TS}$  در طول دوره  $t$  ام و سناریو  $s$  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 می‌باشد.

$$Min f_1(X) = \sum_{t=1}^T F^{OPR}(t) = \sum_{t=1}^T CC(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S Pr_s SC_s(t) \quad (16)$$

که در آن  $P_{TS}$  احتمال وقوع سناریو  $s$  می‌باشد. تابع هزینه بهره‌برداری معین و نامعین بصورت معادلات (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شود.

$$CC(t) = \sum_{i=1}^N DG [P_i(t)\pi_i(t)I_i(t) + SU_i(t)|I_i(t) - I_i(t-1)| + RC_i^{DG}(t)] + \sum_{j=1}^J RC_j^{DR}(t) \quad (17)$$

$$I_{Buy}(t)P_{Grid-Buy}(t)\pi_{Grid-Buy}(t) - I_{Sell}(t)P_{Grid-Sell}(t)\pi_{Grid-Sell}(t)$$

$$SC_s(t) = \sum_{i=1}^N DG C_{i,s}^{DG}(t) + \sum_{j=1}^J C_{j,s}^{DR}(t) + \sum_{n=1}^N ENS_{n,s}(t)VOLL(t) \quad (18)$$

که در آن  $P_i(t)$  و  $\pi_i(t)$  به ترتیب میزان توان خروجی و قیمت پیشنهادی واحد  $i$ ام در دوره  $t$ ام،  $I_i(t)$  دودویی نشانگر وضعیت روشن و خاموش بودن منبع تولید پراکنده  $i$ ام در دوره  $t$ ام،  $SU_i(t)$  هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحد  $i$ ام در دوره  $t$ ام،  $RC_i^{DG}(t)$  و  $RC_j^{DR}(t)$  هزینه‌های رزرو چرخان تولید پراکنده  $i$ ام و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار  $j$ ام در دوره  $t$ ام،  $P_{Grid-Buy}(t)$  و  $P_{Grid-Sell}(t)$  میزان توان مبادله‌ای با شبکه بالادستی در دوره  $t$ ام،  $\pi_{Grid-Buy}(t)$  و  $\pi_{Grid-Sell}(t)$  قیمت پیشنهادی برای توان مبادله‌ای با شبکه بالادستی در بازار آزاد در دوره  $t$ ام،  $C_{i,s}^{DG}(t)$  و  $C_{j,s}^{DR}(t)$  به ترتیب هزینه توان تولیدی منابع تجدیدپذیر  $i$ ام و هزینه ناشی از کاهش بار ایجاد شده بوسیله DRPs  $j$ ام در دوره  $t$ ام در سناریو  $s$ ام،  $VOLL(t)$  و  $ENS_{n,s}(t)$  ترتیب انرژی مورد انتظار تامین نشده و ارزش بار تامین نشده را نشان می‌دهد. در معادله (۱۶)  $X^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  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. در مدل پیشنهادی برای هزینه بهره‌برداری فرض می‌شود که  $DRG$ ها در کنار بارهای پاسخ‌گو به عنوان تامین کننده رزرو چرخان جهت جبران عدم قطعیت حاصل از منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی می‌باشند، لذا منبع تولید پراکنده‌ای که در حالت پایه در حالت خاموشی در نظر گرفته شده است جهت تامین توان رزرو روشن می‌شود بدین صورت هزینه‌های ثابت و روشن شدن منابع تولید پراکنده با احتمال یک در قسمت اول تابع هزینه بهره‌برداری قرار داده می‌شود بعبارت دیگر در وقوع سناریو در زمان واقعی حالت‌های روشن/خاموش، منبع تولید پراکنده در طی برنامه‌ریزی ثابت بوده و تنها توان خروجی مطابق مقادیر برنامه‌ریزی شده در روز بعد انجام می‌گیرد. بنابراین در وقوع هر سناریو در زمان واقعی، پرداختی رزرو تغییر نخواهد کرد و در نتیجه هزینه رزرو با احتمال یک در قسمت اول تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

## ۲.۴. 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 (۱۹) قابل گسترش است.

$$Min f_2(X) = \sum_{t=1}^T FEMI(t) = \sum_{t=1}^T [EMI_{DG}(t) + EMI_{Grid}(t)] \quad (19)$$

متوسط آلودگی ناشی از واحدهای تولید پراکنده تجدیدناپذیر مطابق معادله (۲۰) قابل محاسبه است.

$$EMI_{DG}(t) = \sum_{i=1}^N DG (E_{CO_2}^{DG}(i) + E_{SO_2}^{DG}(i) + E_{NO_x}^{DG}(t)) \times P_i^{DG}(t) \quad (20)$$

که در آن  $E_{NO_x}^{DG}(i)$ ،  $E_{SO_2}^{DG}(i)$ ،  $E_{CO_2}^{DG}(i)$  به ترتیب میزان آلودگی  $CO_2$ ،  $SO_2$  و  $NO_x$  ناشی از منبع تولید پراکنده  $i$ ام را نشان می‌دهد. به همین صورت آلودگی ناشی از شبکه هنگام خرید انرژی از آن مطابق معادله (۲۱) خواهد بود.

$$EMI_{Grid}(t) = (E_{CO_2}^{Grid} + E_{SO_2}^{Grid} + E_{NO_x}^{Grid}) \times P_{Grid}(t) \quad (21)$$

### ۵. الگوریتم چندمنظوره اجتماع ذرات (MOPSO)

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه همانند رابطه زیر شامل چندین تابع هدف ناسازگار، قیود تساوی و ناتساوی بوده که به‌طور همزمان باید بهینه شوند.

$$\min F(\bar{X}) = [f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_N(\bar{X})]^T$$

subject to :

$$g_i(\bar{X}) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_{ueq}$$

$$h_i(\bar{X}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_{eq}$$

فضایی که تابع هدف در آن تعریف می‌شود فضای هدف نامیده می‌شود. در بهینه‌سازی چندهدفه هر دو حل نسبت به همدیگر می‌توانند دو حالت داشته باشند یکی بر دیگری چیره شود و اینکه هیچ یک نتوانند بر دیگری چیره شود که رابطه (۲۳) نمایانگر این مساله است.

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}, f_j(\bar{X}1) \leq f_j(\bar{X}2) \quad (23)$$

$$\exists k \in \{1, 2, \dots, n\}, f_k(\bar{X}2) < f_k(\bar{X}1)$$

با اعمال مفاهیم بهینه‌سازی پارتو با اصول اساسی الگوریتم PSO می‌توان از این الگوریتم برای حل مسائل چندهدفه استفاده کرد که به آن الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) اطلاق می‌گردد. در الگوریتم MOPSO برای ذخیره کردن جواب‌ها از یک آرشیو استفاده می‌شود، منظور از آرشیو یک حافظه خارجی بوده که در آن راه حل‌های چیره شده ذخیره می‌شود، این الگوریتم ابتدا با استفاده از یک سری ذرات تصادفی شروع به کار می‌کند و در طول یک پروسه تکراری کلیه ذرات جمعیت با یکدیگر مقایسه شده و مکان (موقعیت) ذرات چیره شده در آرشیو ذخیره می‌شوند. سرعت و موقعیت جدید ذره نام در بعد  $d$ م و تکرار  $t+1$  با استفاده از رابطه زیر بروز می‌شوند برای جزئیات بیشتر به مرجع [۷] رجوع شود.

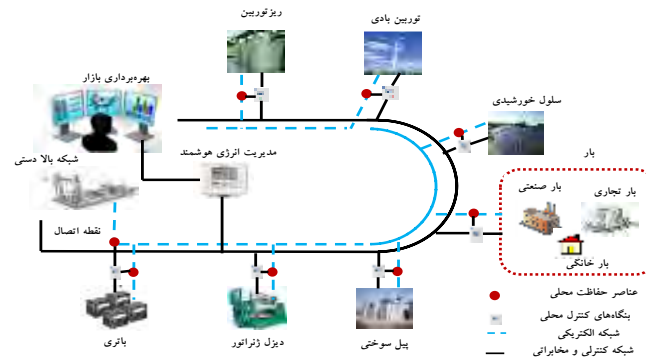
$$v_{id}^{t+1} = w \times v_{id}^t + c_1 rand_1 \times (P_{bestid}^t - x_{id}^t) + c_2 rand_2 \times (g_{bestid}^t - x_{id}^t) \quad (24)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (25)$$

### ۶. شبیه‌سازی سیستم ریزشکه نمونه

ریزشکه 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. توسعه ریزشکه‌ها بخشی از مفهوم شبکه هوشمند می‌باشد بطوریکه با توجه به مزایای ریزشکه‌ها همانند کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود قابلیت اطمینان و امنیت سیستم، واضح است که اهداف بین ریزشکه‌ها و شبکه هوشمند مشترک می‌باشند. همچنین مزایایی از قبیل توسعه تکنولوژی‌های سبز و استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در زیرشکه‌ها وابسته به استفاده از تکنولوژی‌های شبکه هوشمند می‌باشد. برای بررسی دقیق مساله، مدیریت بهره‌برداری در ریزشکه در دو حالت بدون در نظر گرفتن اثر احتمالی ( $P_{rs}=0$ ) و با در نظر گرفتن اثر مدلی احتمالاتی ( $P_{rs} \neq 0$ ) مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطوری که در شکل ۵، مشاهده می‌شود ریزشکه نمونه دوم مورد بررسی در این رساله دارای سه نوع مصرف‌کننده خانگی، تجاری و صنعتی در کنار منابع تولیدی شامل ریزتوربین، توربین بادی، سلول خورشیدی، پیل سوختی، باتری و دیزل ژنراتور می‌باشد. بطوریکه در

بهره‌برداری از این ریزشبهه اثر جمله احتمالی در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. بطوریکه این شبکه هم 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 و شبکه بالا دستی، حداقل و حداکثر توان تولیدی، آورده شده است.

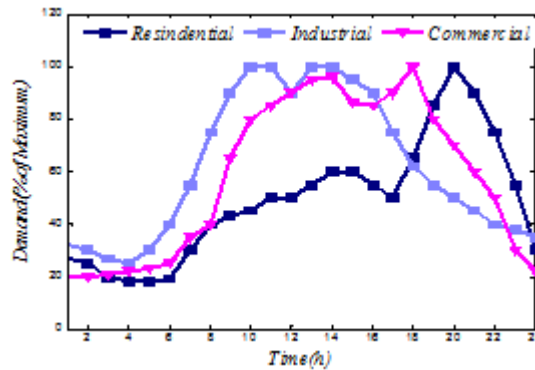


شکل ۵- سیستم ریزشبهه نمونه

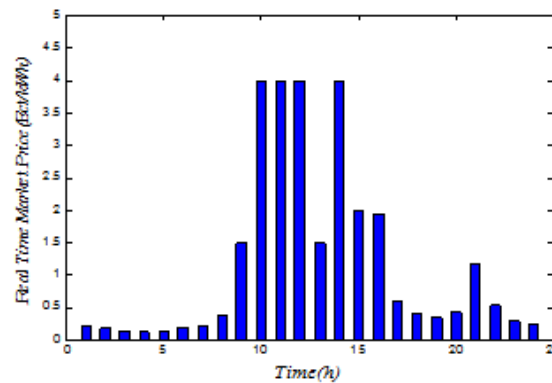
جدول ۱- مشخصات سیستم ریزشبهه نمونه

| Unit | Type    | Bid (€/kWh) | Start-up/Shut-down Cost(€/h) | CO <sub>2</sub> (kg/MWh) | SO <sub>2</sub> (kg/MWh) | NO <sub>x</sub> (kg/MWh) | P <sub>min</sub> (kW) | P <sub>max</sub> (kW) |
|------|---------|-------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1    | Diese 1 | 0.586       | 0.15                         | 890                      | 0.0045                   | 0.23                     | 30                    | 300                   |
| 2    | MT      | 0.457       | 0.96                         | 720                      | 0.0036                   | 0.1                      | 6                     | 30                    |
| 3    | FC      | 0.294       | 1.65                         | 460                      | 0.003                    | 0.0075                   | 3                     | 30                    |
| 4    | PV      | 2.584       | 0                            | 0                        | 0                        | 0                        | 0                     | 25                    |
| 5    | WT      | 1.073       | 0                            | 0                        | 0                        | 0                        | 0                     | 15                    |
| 6    | Bat     | 0.38        | 0                            | 10                       | 0.0002                   | 0.001                    | -30                   | 30                    |
| 7    | Grid    | -           | 0                            | 950                      | 0.5                      | 2.1                      | -30                   | 30                    |

میزان بار درخواستی از شبکه و منحنی بار روزانه این ریزشبهه مطابق شکل ۶، است. بطوریکه کل انرژی مصرفی در طول روز برابر با ۴۰۳۴ kWh می‌باشد. قیمت لحظه‌ای بازار APX مطابق همان شکل ۷، است.



شکل ۶- منحنی بار روزانه مصرف کنندگان مختلف در ریزشکه نمونه



شکل ۷- منحنی قیمت بازار APX (شبکه بالادستی)

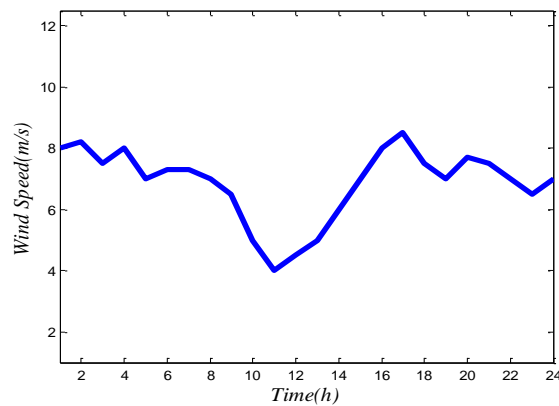
هزینه رزرو چرخان حاصل از منابع تولید پراکنده ۲۰٪ بالاترین هزینه حاشیه‌ای انرژی تولیدی لحاظ می‌شود [۱۸]. اطلاعات ساعتی سرعت باد که از وب سایت پیش‌بینی هوا Willy Online Ply Ltd گرفته شده مطابق شکل ۸ می‌باشد. سلول خورشیدی از نوع مدل SOLAREX MSX، ۲۵ کیلوواتی که متشکل از پنل‌های خورشیدی ۱۰×۲/۵ kW با  $\eta=18/6\%$  و  $S=10m^2$  در نظر گرفته شده است و شکل ۹، متوسط ساعتی تابش خورشید را نشان می‌دهد. 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 خازن‌گذاری در باس‌های مربوطه و بصورت محلی جبران می‌کنند [۱۷]. هزینه بار از دست رفته VOLL معادل ۱/۳۳ €/kWh در نظر گرفته می‌شود. در شبکه نمونه باتری با ظرفیت ۳۰ kWh، حداقل و حداکثر شارژ به ترتیب ۱۰ و ۱۰۰٪ ظرفیت باتری با بازده شارژ و دشارژ ۹۴٪ در نظر گرفته شده است. بسته‌های پیشنهادی ارائه شده برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مطابق جدول ۲، است بطوریکه در اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی فرض می‌شود که ۴۰٪ از مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها شرکت می‌کنند. جهت بررسی اثر برنامه‌ریزی میزان انرژی، رزرو و بارهای پاسخ‌گو در توابع هزینه بهره‌برداری، انتشار آلاینده‌گی و نحوه پوشش عدم قطعیت حاصل از منابع بادی و خورشیدی در سه حالت مختلف با لحاظ برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و بدون لحاظ آن در نظر گرفته شده است:

- در نظر گرفتن تابع هزینه بهره‌برداری
- در نظر گرفتن تابع آلاینده‌گی
- در نظر گرفتن همزمان تابع چندهدفه هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی

همانند ریزشبه قبل در همه مراحل فرض می شود که واحدهای تولیدی با توجه به مشخصات فنی و اقتصادی خود قابلیت شرکت در ریزشبه را داشته و در صورت وجود مازاد تولید و تقاضا، از طریق نقطه اتصال مشترک با شبکه بالادستی در حال تبادل باشد.

جدول ۲- بسته های پیشنهادی ارائه شده برای برنامه های پاسخ گویی بار در ریزشبه نمونه

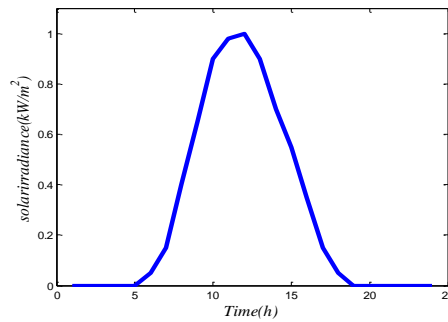
| Quantity (kW)    |      |      |       |       |
|------------------|------|------|-------|-------|
| Price (€/kWh)    |      |      |       |       |
| DRP <sub>1</sub> | 0-5  | 5-10 | 10-50 | 50-70 |
|                  | 0.06 | 0.13 | 0.26  | 0.36  |
| DRP <sub>2</sub> | 0-5  | 5-20 | 20-30 | 30-60 |
|                  | 0.04 | 0.07 | 0.28  | 0.43  |



شکل ۸- مقدار میانگین سرعت باد

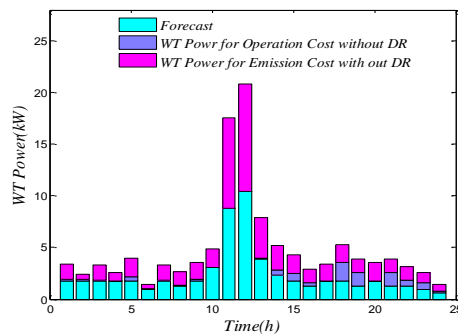
### مرحله اول : توابع هزینه بهره برداری و آلایندگی بدون حضور بارهای پاسخ گو

در این مرحله نحوه کمینه سازی هزینه بهره برداری و آلایندگی به طور جداگانه، بدون حضور بارهای پاسخ گو در نظر گرفته شده اند، نحوه تخصیص توان بهینه تولیدی واحدها برای کمینه سازی هزینه بهره برداری و آلایندگی 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 ریزشبه هوشمند است که در آن میزان توان مصرفی با اولویت قیمت پیشنهادی توسط منابع تولید پراکنده تأمین می شود.

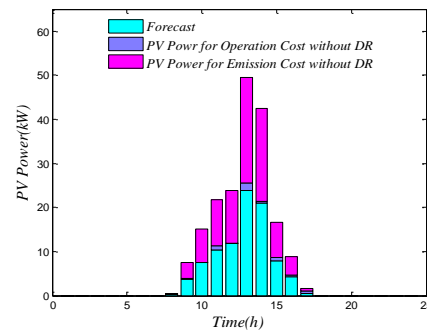


شکل ۹- مقدار میانگین تابش خورشید

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 ریزشبکه هوشمند می‌باشد نتایج حاصل از شکل ۱۰، 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.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- توان تولیدی (الف) سلول خورشیدی (ب) توربین بادی با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی بدون حضور بارهای

#### پاسخ گو

اما از آنجایی که قیمت پیشنهادی این منابع در مقایسه با منابع تولیدی دیگر بیشتر است لذا این منابع در صورت مدنظر قرار دادن هزینه بهره‌برداری بهینه مورد استقبال زیادی قرار نمی‌گیرد.

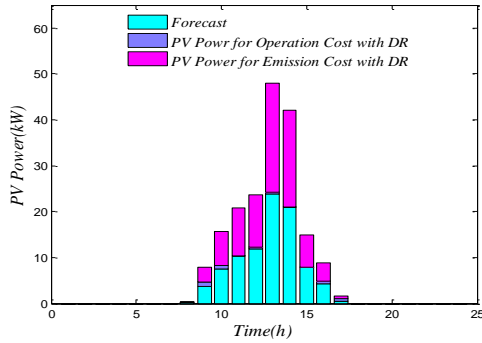
#### مرحله دوم: توابع هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور بارهای پاسخ گو

در این مرحله نحوه کمیته‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی به طور جداگانه، با مشارکت بارهای پاسخ گو در نظر گرفته شده‌اند، نحوه تخصیص توان بهینه تولیدی واحدها برای کمیته‌سازی 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.

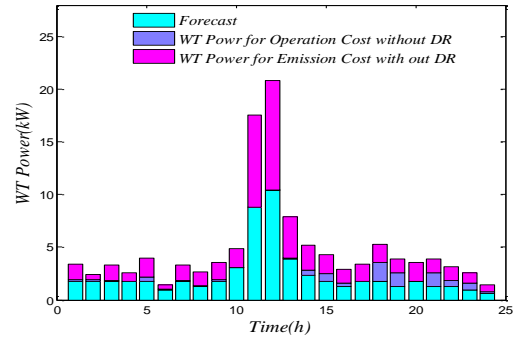
جدول ۳- منابع انرژی برنامه ریزی شده با در نظر گرفتن تابع هزینه بهره‌برداری بدون حضور بارهای پاسخگو

| Hour | units    |         |         |        |        |          |              |
|------|----------|---------|---------|--------|--------|----------|--------------|
|      | DG(KW)   | MT(kW)  | FC(kW)  | WT(kW) | PV(kW) | Batt(kW) | Utility (kW) |
| 1    | 30       | 7.95142 | 7.2831  | 0.1785 | 0      | 11.5869  | 30           |
| 2    | 32.2873  | 12.9124 | 27.0103 | 0.1785 | 0      | -19.6884 | 26.2998      |
| 3    | 45.1300  | 7.1899  | 20.4335 | 0.0691 | 0      | -19.7859 | 21.9633      |
| 4    | 38.0751  | 6       | 24.5655 | 0      | 0      | -30      | 29.3592      |
| 5    | 30       | 8.8352  | 13.9579 | 0.4030 | 0      | -14.2074 | 26.0112      |
| 6    | 37.3933  | 8.0676  | 23.6104 | 0.0915 | 0      | -21.9817 | 23.8188      |
| 7    | 30       | 12.4889 | 19.2871 | 0.0168 | 0      | -0.7052  | 22.9122      |
| 8    | 33.6503  | 9.8129  | 26.9534 | 0.0638 | 0.0755 | 26.5049  | 22.9389      |
| 9    | 104.7891 | 28.7188 | 21.2015 | 0.1785 | 0.1119 | 30       | -30          |
| 10   | 234.7626 | 6       | 3.2132  | 0      | 0      | -15.9758 | -30          |
| 11   | 211.3126 | 8.2459  | 19.1458 | 0      | 0.8511 | 15.4444  | -30          |
| 12   | 283.8679 | 6       | 5.1320  | 0      | 0      | -30      | -30          |
| 13   | 272.0727 | 6       | 8.4     | 0.0545 | 1.6949 | -28.2557 | -29.9665     |
| 14   | 218.9922 | 13.7472 | 24.5299 | 0.4736 | 0.3419 | 21.7585  | -29.8435     |
| 15   | 213.8971 | 14.1237 | 28.9318 | 0.714  | 0.8587 | 27.2652  | -29.7907     |
| 16   | 226.2679 | 13.1903 | 6.8037  | 0.3003 | 0.3379 | 24.0996  | -30          |
| 17   | 114.2249 | 29.9991 | 29.9737 | 0      | 0.55   | 30       | 25.2521      |
| 18   | 95.4591  | 27.7990 | 30      | 1.7417 | 0      | 30       | 30           |
| 19   | 105.8188 | 29.9999 | 30      | 1.302  | 0      | 30       | 29.8791      |
| 20   | 122.1957 | 14.5550 | 29.0172 | 0      | 0      | 26.8762  | 27.3555      |
| 21   | 155.7278 | 28.3221 | 28.4420 | 1.3005 | 0      | 30       | -23.7925     |
| 22   | 79.6288  | 28.9465 | 26.6853 | 0.5555 | 0      | 29.8601  | 29.3235      |
| 23   | 54.6992  | 29.0972 | 25.3246 | 0.7173 | 0      | 25.1615  | 30           |
| 24   | 31.5095  | 10.5151 | 26.9457 | 0.1729 | 0      | 28.6823  | 25.1742      |

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 ۴۴/۳۹ kW و توان تولید خورشیدی از مقدار ۹۱/۳۹ kW به ۸۹/۵۰ kW می‌شود. شکل ۱۱، میزان توان تولید توربین بادی و سلول خورشیدی را با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی در حضور بارهای پاسخ‌گو نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲، 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.

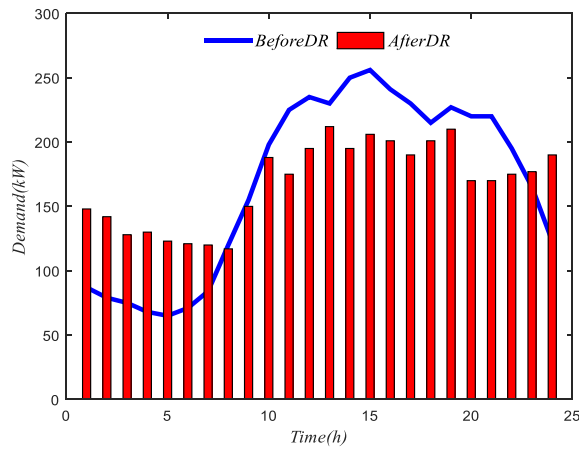


(ب)



(الف)

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



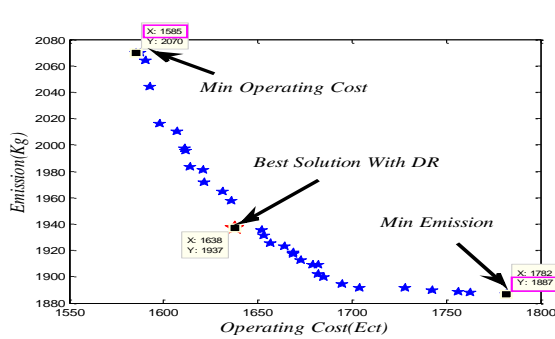
شکل ۱۲- میزان تقاضای بار الکتریکی قبل و بعد از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری در ریز شبکه نمونه

جدول ۴- منابع انرژی برنامه ریزی شده با در نظر گرفتن تابع آلاینده‌گی بدون حضور بارهای پاسخگو

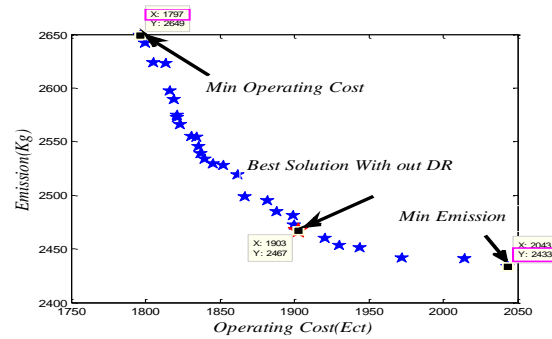
| Hour | units    |         |         |         |         |          |              |
|------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|--------------|
|      | DG(kW)   | MT(kW)  | FC(kW)  | WT(kW)  | PV(kW)  | Batt(kW) | Utility (kW) |
| 1    | 37.6544  | 17.9997 | 29.9177 | 1.428   | 0       | 30       | -30          |
| 2    | 30       | 23.8623 | 24.6786 | 0.4265  | 0       | 27.4352  | -27.4028     |
| 3    | 30       | 13.8367 | 26.9684 | 1.428   | 0       | 30       | -27.2332     |
| 4    | 30.1055  | 6.6779  | 30      | 0.8006  | 0       | 30       | -29.5842     |
| 5    | 30       | 6       | 27.3174 | 1.785   | 0       | 29.8975  | -30          |
| 6    | 30       | 8.4567  | 30      | 0.41459 | 0       | 30       | -27.8713     |
| 7    | 32.7275  | 16.2790 | 30      | 1.5012  | 0       | 30       | -26.5079     |
| 8    | 50.7172  | 30      | 29.6781 | 1.305   | 0.1968  | 29.7307  | -21.6280     |
| 9    | 59.5260  | 30      | 30      | 1.6302  | 3.7273  | 30       | 0.1163       |
| 10   | 111.6041 | 29.7258 | 28.4561 | 1.8089  | 7.5249  | 29.5072  | -10.6272     |
| 11   | 125.7750 | 30      | 30      | 8.775   | 10.4499 | 29.9999  | -20          |
| 12   | 152.6400 | 30      | 29.9999 | 10.41   | 11.95   | 29.9999  | -30          |
| 13   | 142.2106 | 30      | 29.9877 | 3.915   | 23.8999 | 29.9843  | -29.9972     |
| 14   | 164.9081 | 30      | 30      | 2.3455  | 21.05   | 30       | -28.3036     |
| 15   | 175.3672 | 30      | 30      | 1.78    | 7.875   | 30       | -19.0272     |
| 16   | 161.0970 | 29.9872 | 29.0138 | 1.2842  | 4.225   | 30       | -14.6075     |
| 17   | 158.0907 | 29.8695 | 27.9533 | 1.5926  | 0.4935  | 30       | -18          |
| 18   | 153.215  | 30      | 30      | 1.785   | 0       | 30       | -30          |
| 19   | 115.7263 | 30      | 28.8123 | 1.2746  | 0       | 30       | 21.1866      |
| 20   | 108.1157 | 29.5407 | 29.9862 | 1.785   | 0       | 29.4695  | 21.1027      |
| 21   | 98.8266  | 30      | 30      | 1.3005  | 0       | 29.8728  | 30           |
| 22   | 73.6995  | 30      | 30      | 1.3004  | 0       | 30       | 29.9999      |
| 23   | 44.5150  | 29.5734 | 29.9998 | 0.915   | 0       | 30       | 29.9966      |
| 24   | 38.2532  | 29.2275 | 30      | 0.615   | 0       | 30       | -5.0958      |

### مرحله سوم: 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 شده‌اند. از آنجایی که اهداف هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی در تقابل با یکدیگر می‌باشند، لذا با توجه به شکل ۱۳، حرکت از نقاط ابتدایی نمودارها به سمت نقاط انتهایی آن‌ها و بر مسیر پارتو به معنای تغییر الگوی بهره‌برداری از هزینه کمتر و آلودگی بیشتر به هزینه بیشتر و آلودگی پایین‌تر می‌باشد که با استفاده از مکانیزم فازی می‌توان محل بهره‌برداری بهینه را معین کرد.



(ب)



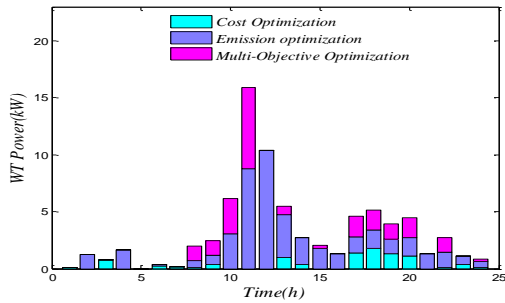
(الف)

شکل ۱۳- نحوه توزیع معیار پارتو هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی (الف) بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار (ب) با در نظر گرفتن برنامه

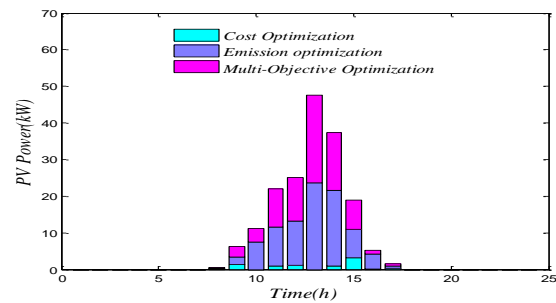
پاسخ‌گویی بار

جدول ۵- منابع انرژی برنامه‌ریزی شده با در نظر گرفتن تابع هزینه بهره‌برداری با حضور بارهای پاسخگو

| Hour | units | DG(kW)   | MT(kW)  | FC(kW)  | WT(kW) | PV(kW) | Batt(kW) | Utility (kW) |
|------|-------|----------|---------|---------|--------|--------|----------|--------------|
| 1    |       | 37.6940  | 12.2022 | 8.3590  | 0.2426 | 0      | 0.4729   | 23.0291      |
| 2    |       | 36.7910  | 12.3184 | 13.0773 | 0      | 0      | -16.6769 | 23.4901      |
| 3    |       | 32.1293  | 15.1733 | 13.2389 | 0.2827 | 0      | -19.4862 | 23.6618      |
| 4    |       | 31.2516  | 9.9910  | 21.0584 | 0.1785 | 0      | -29.4796 | 30           |
| 5    |       | 30.1784  | 7.7112  | 3.3042  | 0      | 0      | -29.9976 | 3.8036       |
| 6    |       | 32.5884  | 6       | 7.8978  | 0.0461 | 0      | -3.3910  | 17.8584      |
| 7    |       | 36.3204  | 7.4265  | 25.8223 | 0.4593 | 0      | -20.7646 | 29.7359      |
| 8    |       | 37.8110  | 13.3543 | 29.0654 | 0.0300 | 0.0033 | 26.8251  | 7.9106       |
| 9    |       | 82.3841  | 10.8869 | 22.6882 | 0.1785 | 0.9311 | 27.9311  | -30          |
| 10   |       | 163.8713 | 22.7075 | 17.4088 | 0      | 0.6718 | 18.3404  | -30          |
| 11   |       | 239.3048 | 6.4747  | 5.7230  | 0      | 0      | -1.5026  | -30          |
| 12   |       | 205.7040 | 8.0939  | 15.0436 | 0.0485 | 0.3774 | -4.2679  | -29.9997     |
| 13   |       | 223.5434 | 6       | 27.2485 | 0.0055 | 0.2789 | -7.2018  | -29.8746     |
| 14   |       | 267.0514 | 6       | 5.7     | 0      | 0      | -3.7514  | -30          |
| 15   |       | 217.1441 | 25.3070 | 27.2303 | 0      | 0      | 11.2508  | -29.9324     |
| 16   |       | 175.0021 | 12.7943 | 26.7003 | 0.1305 | 0.5306 | 5.8234   | -29.9814     |
| 17   |       | 128.7412 | 27.8604 | 29.8310 | 1.785  | 0.55   | 29.0659  | 7.1663       |
| 18   |       | 47.5883  | 30      | 29.8542 | 0      | 0      | 27.8038  | 29.7535      |
| 19   |       | 55.7261  | 29.9813 | 30      | 1.302  | 0      | 29.9905  | 30           |
| 20   |       | 91.6207  | 29.2529 | 28.8880 | 1.7471 | 0      | 28.8171  | 29.6740      |
| 21   |       | 131.6159 | 25.9494 | 24.7368 | 0.7690 | 0      | 26.6085  | -29.6798     |
| 22   |       | 101.8896 | 16.9465 | 19.4880 | 0.2379 | 0      | 25.3488  | 26.0889      |
| 23   |       | 30       | 14.1630 | 27.5433 | 0.183  | 0      | 23.2486  | 29.8619      |
| 24   |       | 31.7194  | 15.3372 | 30      | 0.246  | 0      | -22.6675 | 28.3648      |



(ب)



(الف)

شکل ۱۴- توان تولیدی (الف) توربین بادی (ب) سلول خورشیدی

جدول ۶- منابع انرژی برنامه‌ریزی شده با در نظر گرفتن تابع آلاینده‌گی با حضور بارهای پاسخگو

| Hour | units    | DG(kW)   | MT(kW)  | FC(kW)  | WT(kW)   | PV(kW)  | Batt(kW) | Utility (kW) |
|------|----------|----------|---------|---------|----------|---------|----------|--------------|
| 1    | 30       | 30       | 6       | 11.9625 | 0.1785   | 0       | 28.8589  | -30          |
| 2    | 30.7039  | 30.7039  | 10.3702 | 25.1881 | 0.1067   | 0       | 29.0559  | -26.4251     |
| 3    | 30       | 30       | 11.4006 | 27.7426 | 0        | 0       | 30       | -29.1433     |
| 4    | 30       | 30       | 6       | 3       | 0        | 0       | 19       | -30          |
| 5    | 30       | 30       | 6       | 3       | 8.58E-19 | 0       | 6        | -30          |
| 6    | 30.0127  | 30.0127  | 6.0101  | 3.0510  | 0.0052   | 0       | 21.8617  | -29.9410     |
| 7    | 32.1186  | 32.1186  | 9.8402  | 29.7918 | 1.2053   | 0       | 30       | -28.9561     |
| 8    | 30       | 30       | 10.4416 | 23.9673 | 0        | 0.1610  | 30       | -24.5701     |
| 9    | 35.0743  | 35.0743  | 30      | 29.6916 | 1.6065   | 3.2494  | 30       | 15.3780      |
| 10   | 39.3941  | 39.3941  | 29.7195 | 28.6099 | 3.0375   | 7.525   | 29.8781  | 19.8356      |
| 11   | 80.775   | 80.775   | 30      | 30      | 8.775    | 10.45   | 30       | 30           |
| 12   | 106.9761 | 106.9761 | 29.9999 | 29.7912 | 10.4099  | 11.3353 | 29.9940  | 11.4932      |
| 13   | 42.2137  | 42.2137  | 30      | 29.9864 | 3.915    | 23.9    | 29.9998  | 29.9849      |
| 14   | 129.9149 | 129.9149 | 29.9973 | 30      | 2.1998   | 21.05   | 29.9695  | 1.8683       |
| 15   | 126.9382 | 126.9382 | 29.9183 | 30      | 1.7813   | 7.1274  | 29.9915  | 20.2430      |
| 16   | 71.9428  | 71.9428  | 30      | 30      | 1.2758   | 4.1583  | 28.9903  | 24.6326      |
| 17   | 57.6651  | 57.6651  | 30      | 29.9998 | 1.7849   | 0.55    | 29.9999  | 30           |
| 18   | 67.6607  | 67.6607  | 30      | 30      | 1.6493   | 0       | 30       | 5.6899       |
| 19   | 102.5900 | 102.5900 | 30      | 30      | 1.2215   | 0       | 30       | 23.1883      |
| 20   | 96.8089  | 96.8089  | 30      | 29.9998 | 1.7700   | 0       | 29.5824  | -18.1611     |
| 21   | 58.7328  | 58.7328  | 29.9986 | 30      | 1.2941   | 0       | 30       | 29.9744      |
| 22   | 36.3094  | 36.3094  | 30      | 30      | 1.3005   | 0       | 30       | 17.3900      |
| 23   | 51.2328  | 51.2328  | 29.9992 | 29.9982 | 0.7567   | 0       | 30       | 18.0129      |
| 24   | 33.6397  | 33.6397  | 30      | 30      | 0.123    | 0       | 29.5783  | -10.3410     |

نتایج حاصل از شکل ۱۳، 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. شکل ۱۴، میزان توان تولید بادی و خورشیدی را با در نظر گرفتن کمیته‌سازی تابع هزینه بهره‌برداری، آلاینده‌گی و مینیمم‌سازی همزمان این دو تابع با اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شکل ۱۴، نشان می‌دهد 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. برای مقایسه بهتر مقدار توان تولیدی بادی و خورشیدی از دیدگاه هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با/ بدون حضور بارهای پاسخگویی در ریز شبکه اول نتایج در جدول ۷، آورده شده است. بطوریکه نتایج حاصل نشان می‌دهد که از بین سناریوهای مطرح حالت در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری بهترین حالت برای پوشش عدم قطعیت حاصل از منابع بادی و خورشیدی است.

جدول ۷- مقایسه مقدار توان تولیدی بادی و خورشیدی از دیدگاه هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با/ بدون حضور بارهای پاسخگویی ریز شبکه دوم

| سناریو                                    | توان بادی (kW) | توان خورشیدی (kW) | توان بادی پیش‌بینی شده (kW) | توان خورشیدی پیش‌بینی شده (kW) | درصد پوشش توان بادی | درصد پوشش توان خورشیدی |
|---|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|
| هزینه بهره‌برداری بدون حضور بارهای پاسخگو | ۸/۵۱           | ۶/۸۲              | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          | ۷٪/۵                | ۳۰٪/۷                  |
| هزینه بهره‌برداری با حضور بارهای پاسخگو   | ۷/۸۷           | ۳/۳۴              | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          |                     |                        |
| میزان آلاینده‌گی بدون حضور بارهای پاسخگو  | ۵۰/۶۰۵         | ۹۱/۳۹             | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          | ۶٪/۳                | ۳٪/۱                   |
| میزان آلاینده‌گی با حضور بارهای پاسخگو    | ۴۷/۳۹          | ۸۹/۵۰             | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          |                     |                        |
| بهینه‌سازی همزمان بدون حضور بارهای پاسخگو | ۲۳/۱۲          | ۹۰/۲۱             | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          | ۴٪/۹                | ۱۳٪/۲                  |
| بهینه‌سازی همزمان با حضور بارهای پاسخگو   | ۲۱/۹۷          | ۷۸/۲۷             | ۵۷/۱۵                       | ۹۱/۴۷                          |                     |                        |

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک برنامه‌ریزی احتمالاتی برای ریز شبکه 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 ریز شبکه و آلودگی ناشی از آلاینده‌ها در ۳ حالت مختلف مدنظر قرار گرفت بطوریکه در آن از یک روش برنامه‌ریزی احتمالاتی برای مدل کردن رفتار تصادفی توان تولید بادی و سلول خورشیدی استفاده شد. برای عملکرد بهتر ریز شبکه هوشمند فرض شد امکان تبادل انرژی با شبکه بالادستی وجود دارد. از طرفی برای نشان دادن دقت مدل پیشنهادی حالتی را که در آن از جمله احتمالی در تابع هدف صرف نظر می‌شود در سه حالت مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آنجایی که طرف مصرف می‌تواند در مدیریت تولید و مصرف انرژی مشارکت فعال داشته باشد لذا 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 می‌دهد 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 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 ارائه مدلی با ساختار ساده که در رسیدن به جواب بهینه از قدرت بالایی برخوردار است بطوری 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) گران قیمت که برخی از آن‌ها موجب افزایش آلودگی محیط هم خواهد شد، می‌شود.

## ۸. مراجع

1. Mazlumi K. Presenting a New Method Based on Branch Placement for Optimal Placement of Phasor Measurement Units. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2014;2(1).
2. Sun Q, Review of smart grid comprehensive assessment systems. *Energy Procedia*. 2011;12:219-29.
3. Li Z, Yang F, Mohagheghi S, Wang Z, Tournier J, Wang Y. Toward smart distribution management by integrating advanced metering infrastructure. *Electric Power Systems Research*. 2013;105:51-6.
4. López G, Moreno J, Amarís H, Salazar F. Paving the road toward smart grids through large-scale advanced metering infrastructures. *Electric Power Systems Research*. 2015;120:194-205.
5. Mohassel RR, Fung AS, Mohammadi F, Raahemifar K, editors. A survey on advanced metering infrastructure and its application in Smart Grids. *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*; 2014: IEEE.
6. Bouhafis F, Mackay M, Merabti M. *Communication Challenges and Solutions in the Smart Grid*: Springer; 2014.
7. Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, Ranjbar AM, Sattari S. A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;64:1007-16.
8. Verma PK, Sharma H. *Application of Cloud Computing In Smart Grid: A Review*. 2015.
9. Hart DG, editor *Using AMI to realize the Smart Grid*. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century; 2008, IEEE.
10. Broeer T, Fuller J, Tuffner F, Chassin D, Djilali N. Modeling framework and validation of a smart grid and demand response system for wind power integration. *Applied Energy*. 2014;113:199-207.
11. Pandit M, Srivastava L, Sharma M. Environmental economic dispatch in multi-area power system employing improved differential evolution with fuzzy selection. *Applied Soft Computing*. 2015;28:498-510.
12. Gazafroudi AS, Afshar K, Bigdeli N. Assessing the operating reserves and costs with considering customer choice and wind power uncertainty in pool-based power market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;67:202-15.
13. Jiayi H, Chuanwen J, Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(9):2472-83.
14. Brown RE, editor *Impact of smart grid on distribution system design*. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
15. Hashmi M, Hänninen S, Mäki K, editors. *Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide*. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, 2011: IEEE.
16. Bertoldi P, Atanasiu B. Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged European Union. *IES-JRC European Union*. 2007.