

مدیریت همزمان انرژی منابع Micro-CHP و ذخیره‌سازهای انرژی در ریزشبکه‌ها با وجود بارهای پاسخگو

پویا فیروزمکان^۱، کارشناس ارشد؛ رحمت‌الله هوشمند^۲، استاد؛ امین خدابخشیان^۳، استاد؛ مصیب برناپور^۴، استادیار

۱ - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - pouyafir.eng@gmail.com

۲ - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

۳ - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - aminkh@eng.ui.ac.ir

۴ - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه یاسوج - یاسوج - ایران - mbornapour@yu.ac.ir

چکیده: پیاده‌سازی یک سیستم مدیریت انرژی مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی یک ریزشبکه با عدم قطعیت‌های موجود، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی تصادفی با هدف کاهش هزینه و افزایش قابلیت اعتماد ریزشبکه، برای روز-پیشرو، ارائه شده است. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، وظیفه تامین بار الکتریکی و حرارتی ریزشبکه را با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اعتماد برعهده دارد. در این روش از یک چهارچوب تصادفی مبتنی بر تولید سناریو جهت پوشش عدم قطعیت‌های موجود در بازار برق، بار الکتریکی و تولیدهای تجدیدپذیر، استفاده شده است. همچنین، برنامه‌های پاسخ تقاضا در قالب قراردادهای انتقال بار از سوی بهره‌بردار ریزشبکه به مصرف‌کنندگان، ارائه می‌شود. علاوه بر آن، بهره‌برداری از ریزشبکه در دو حالت اتصال به شبکه بالادست و جزیره‌ای، مدنظر قرار می‌گیرد. با تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی یک ریزشبکه با سه فیدر و هفت واحد تولیدی، قابلیت روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، تولیدهای تجدیدپذیر، Micro-CHP، پاسخ تقاضا، قابلیت اعتماد، برنامه‌ریزی تصادفی

Simultaneous Energy Management of Micro-CHP Units and Storage Systems in Microgrids Considering Responsive Loads

Pouya Firouzmakan, MSc¹; Rahmatollah Hooshmand, Professor²; Amin Khodabakhshian, Professor³; Mosayyeb Bornapour, Assistant Professor⁴

1- Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, pouyafir.eng@gmail.com

2- Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, aminkh@eng.ui.ac.ir

4- Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran, mbornapour@yu.ac.ir

Abstract: A suitable energy management system (EMS) is an essential tool for optimal operation of a Microgrid with different resources considering uncertainties. In this paper, a day-ahead stochastic EMS is proposed in order to minimize the cost operation and maximize the reliability of Microgrid. The proposed EMS should supply electrical and thermal loads of Microgrid. A stochastic framework based on scenario generation is used to response the uncertainties of electrical load, market price and renewable energy sources (RESs). Also demand response programs (DRPs) are provided based on various load shifting contracts to consumers. In addition, both islanding and grid-connected operations of Microgrid are handled. Capability of the proposed method is proved by simulation results of a 3-feeder Microgrid with 7 generation units.

Keywords: Microgrid, renewable energy sources (RESs), Micro-CHP, demand response (DR), reliability, stochastic programming

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ و ۱۳۹۶/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - خیابان هزارجریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

مسأله مدیریت انرژی ریزشبه شامل کاهش هزینه و افزایش قابلیت‌اعتماد ریزشبه می‌باشد. علاوه بر آن، قراردادهای پاسخ تقاضا در جهت کاهش هزینه در حالت اتصال به شبکه بالادست ریزشبه در کنار کاهش هزینه و افزایش قابلیت‌اعتماد با کاهش بار ازدست‌رفته در حالت جزیره‌ای ریزشبه، پیشنهاد می‌شوند. همچنین، به‌منظور حل مسأله بهینه‌سازی با یک تابع هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) و برای حل مسأله بهینه‌سازی با دو تابع هدف از بهینه‌سازی چندهدفه اجتماع ذرات (MOPSO)، استفاده می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی، توانایی الگوریتم پیشنهادی در مدیریت مطلوب انرژی در ریزشبه‌ها را نشان می‌دهد.

ادامه مقاله به‌صورت زیر سازماندهی شده‌است: مدل سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی در بخش ۲ توصیف می‌گردد. در بخش ۳ فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی و همچنین، محدودیت‌ها و شرایط مسأله ارائه می‌شود. در بخش ۴ مدل تصادفی مورد استفاده مورد بحث قرار می‌گیرد. اصل بهینه‌سازی چندهدفه و همچنین نحوه ایجاد یک تابع عضویت فازی برای تصمیم‌گیری جهت تعیین بهترین پاسخ در بخش ۵ به اختصار توصیف شده‌است. نحوه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و همچنین فلوجارت آن در بخش ۶ آورده شده‌است. در نهایت، در بخش ۷ ضمن معرفی شبکه مورد مطالعه، عملکرد مناسب روش پیشنهادی در قالب چند مطالعه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

سیستم ذخیره‌ساز انرژی نقش مهمی را در ریزشبه جهت دستیابی به عملکرد اقتصادی بهتر و همچنین، بهبود قابلیت‌اعتماد ریزشبه، ایفا می‌کند. در این مقاله، یک سیستم ذخیره‌سازی هوشمند شامل ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی استفاده شده‌است.

۲-۱- ذخیره‌ساز الکتریکی

به‌طور ویژه، باتری‌های الکترو-شیمیایی به‌عنوان یکی از مؤثرترین تکنولوژی‌های سیستم ذخیره‌سازهای الکتریکی جهت استفاده در ریزشبه، در نظر گرفته می‌شوند [۱۵]. ظرفیت، نرخ و محدودیت ذخیره/تخلیه در هر بازه زمانی، شاخص‌هایی هستند که باید در مدلسازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شوند که می‌توانند به‌صورت زیر بیان گردند [۶]:

$$W_{ESS}^t \quad (1)$$

$$\left\{ \quad (2) \right.$$

که W_{ESS}^t انرژی ذخیره‌شده ذخیره‌ساز الکتریکی در زمان t ، P_{charge} میزان مجاز شارژ توان الکتریکی در مدت‌زمان مشخص Δt ، $P_{discharge}$

امروزه نگرانی‌های زیست‌محیطی و همچنین افزایش مصرف انرژی موجب افزایش نصب تولیدهای پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی، شده‌است [۱]. همچنین با گذشت زمان منابع انرژی تجدیدپذیر سهم بیشتری را در تأمین بار شبکه قدرت را به خود اختصاص می‌دهند [۲]. منابع انرژی پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی را در تولید انرژی پاک ایفا می‌کنند. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در اینگونه منابع انرژی پراکنده، وجود سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر راه‌حل مناسبی برای دستیابی به قابلیت‌اعتماد بالاتر است [۳]. از سوی دیگر، سیستم‌های Micro-CHP به دو دلیل به‌عنوان یک عضو اصلی در آینده سیستم‌های انرژی مبتنی بر تولیدهای تجدیدپذیر شناخته می‌شود. دلیل اول، مسائل زیست‌محیطی و دلیل دوم، نیاز مبرم به یک سیستم پشتیبانی با بهره بالا جهت ایجاد تعادل بین تولید و تقاضا می‌باشد [۴].

مطالعات زیادی در خصوص مدیریت انرژی و بهینه‌سازی مصرف سوخت در کنار استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر صورت گرفته‌است. برخی مقالات با ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته، یک سیستم مدیریت انرژی جهت بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری را پیشنهاد می‌دهند [۵، ۶]. در راستای پیاده‌سازی مدیریت انرژی تصادفی، برخی مطالعات جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود مانند؛ تولیدهای تجدیدپذیر، بار و قیمت بازار، از روش مبتنی بر سناریو استفاده می‌نمایند. در این روش ابتدا با استفاده از منحنی چگالی احتمال و چرخ رولت تعدادی سناریو با هدف پوشش فضای عدم قطعیت تولید می‌شود. سپس با هدف حذف سناریوهای تکراری، کاهش تعداد سناریو صورت می‌گیرد [۷، ۸]. در برخی دیگر از مقالات از روش تخمین نقطه جهت مدل‌سازی تصادفی مسأله مدیریت انرژی استفاده شده‌است [۶]. همچنین، در راستای پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ تقاضا، برخی مقالات بخش پاسخ تقاضا شامل بارهای ثابت و پاسخگو را با اهدافی همچون کاهش هزینه یا افزایش رفاه عمومی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی قرار می‌دهند [۹، ۱۰]. دسته‌ای دیگر از مقالات، با در نظر گرفتن بارهای پاسخگو به‌عنوان یک شرکت‌کننده مستقل در بازار، که برای شرکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا قیمت‌دهی می‌کنند، به‌صورت مستقیم به مسأله مشارکت بخش تقاضا در بازار عمده‌فروشی اشاره کرده‌اند [۱۱].

از سوی دیگر، تولیدهای بادی و خورشیدی به‌دلیل طبیعت تصادفی در سرعت باد و نور خورشید، غیرقابل کنترل هستند [۱۲، ۱۳]. علاوه بر آن، عدم قطعیت و غیرمنتظره بودن تقاضا سبب ایجاد مشکلات مهمی در قابلیت‌اعتماد شبکه می‌شود. چرا که بسیاری از مصرف‌کنندگان همراه با رفتار ناپایدار در مصرف انرژی، قصد شرکت در بازار پاسخ تقاضا را دارند [۱۴].

در این مقاله، سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، در یک چهارچوب تصادفی مبتنی بر تولید سناریو در یک ریزشبه عمل می‌کند. اهداف

که $Q_{s,th}^t$ وضعیت ذخیره در ذخیره‌ساز حرارتی در زمان t ، $Q_{s,th,max}$ و $Q_{s,th,min}$ حداکثر و حداقل ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی، $P_{s,th}^t$ توان حرارتی ذخیره/تخلیه‌شده ذخیره‌ساز حرارتی در زمان t و $P_{s,th,ch,max}$ و $P_{s,th,ch,min}$ حداکثر و حداقل نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی را نشان می‌دهند. همچنین، میزان ذخیره/تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$P_{s,th}^t = Q_{s,th}^t - Q_{s,th}^{t-1} \quad (5)$$

مجموع ذخیره/تخلیه ذخیره‌ساز در مدت‌زمان مشخص باید در محدوده‌ای معین باشد که این محدوده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_{s,th,min} - Q_{s,th}^0 \leq \sum_{t=1}^T P_{s,th}^t \leq Q_{s,th,max} - Q_{s,th}^0 \quad (6)$$

که $Q_{s,th}^0$ میزان شارژ اولیه ذخیره‌ساز حرارتی را نشان می‌دهد. به منظور عملکرد مناسب سیستم ذخیره‌ساز حرارتی باید برنامه‌ریزی مناسبی اتخاذ گردد. مدل ریاضی این برنامه‌ریزی جهت تأمین بار حرارتی به صورت روابط (۷) الی (۹) بیان می‌شود [۱۶].

$$\text{If } P_{L,th}^t - \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t < 0 \Rightarrow \begin{cases} P_{s,th}^t = P_{L,th}^t - \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t (P_{s,th}^t > 0) \\ P_{bl}^t = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{If } 0 \leq P_{L,th}^t - \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t < Q_{s,th,max} \Rightarrow \begin{cases} P_{s,th}^t = P_{L,th}^t - \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t (P_{s,th}^t < 0) \\ P_{bl}^t = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{If } 0 \leq Q_{s,th,max} \leq P_{L,th}^t - \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t \Rightarrow \begin{cases} P_{s,th}^t = Q_{s,th}^t \\ P_{bl}^t = \sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_i}^t - P_{L,th}^t - Q_{s,th}^t (P_{s,th}^t < 0) \end{cases} \quad (9)$$

در این روابط، P_{bl}^t توان حرارتی تولیدی توسط بویلر کمکی در ساعت t می‌باشد که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{bl}^t = \eta_{bl} \cdot HHV \cdot G_{bl}^t \quad (10)$$

که η_{bl} ضریب بهره‌وری بویلر، HHV ضریب تبدیل کننده m^3 به انرژی حرارتی گاز طبیعی و G_{bl}^t میزان گاز طبیعی مصرفی در بویلر در زمان t برحسب m^3 می‌باشد. همچنین، توان خروجی توسط بویلر کمکی باید در محدوده حداقل و حداکثر خودشان باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P_{bl,min}^t \leq P_{bl}^t \leq P_{bl,max}^t \quad (11)$$

میزان مجاز دشارژ توان الکتریکی در مدت‌زمان مشخص Δt ، $P_{charge,max}$ حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، $P_{discharge,max}$ حداکثر نرخ دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، η_{charge} بیانگر ضریب بهره‌وری شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی و $\eta_{discharge}$ ضریب بهره‌وری دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل وجود η_{charge} و $\eta_{discharge}$ در فرمول‌بندی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی، میزان انرژی که در یک ساعت در سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی ذخیره می‌شود، از میزان انرژی الکتریکی تخلیه‌شده از آن کمتر می‌باشد.

۲-۲- ذخیره‌ساز حرارتی

استفاده از ذخیره‌ساز حرارتی در کنار Micro-CHP ها موجب کاهش استفاده از بویلر کمکی جهت تأمین بار حرارتی، می‌شود. ظرفیت و محدوده ذخیره/تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی نیز به صورت زیر قابل بیان می‌باشد [۱۶]:

$$Q_{s,th,min} \leq Q_{s,th}^t \leq Q_{s,th,max} \quad (3)$$

$$\left\{ \right. \quad (4)$$

همان‌طور که از رابطه (۷) ملاحظه می‌گردد، در صورت پشتیبانی توان حرارتی بازبایی شده از Micro-CHP ها از بار حرارتی، بویلر کمکی توانی تولید نمی‌کند. همچنین، توان حرارتی مازاد بازبایی شده از واحدهای Micro-CHP با توجه به محدودیت ذخیره‌ساز و میزان ظرفیت آن ذخیره می‌گردد. رابطه (۸) بیان می‌کند که در صورت عدم تأمین بار حرارتی توسط واحدهای Micro-CHP، ذخیره‌ساز حرارتی وارد حالت تخلیه می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به رابطه (۹)، در صورت عدم توانایی سیستم ذخیره‌ساز حرارتی در پشتیبانی از بار حرارتی تأمین‌نشده، ذخیره‌ساز با توجه به محدودیت تخلیه و میزان انرژی حرارتی موجود در آن تخلیه می‌شود و بویلر کمکی بار حرارتی باقیمانده را تأمین می‌کند.

بار تأمین‌نشده به بار کل در هر ساعت به‌دست آمده و سپس، مجموع آن‌ها در ۲۴ ساعت به‌عنوان تابع هدف قابلیت‌اعتماد تعریف می‌گردد. بنابراین، تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min}f_2(X) = \sum_{t=1}^T \frac{P_{L,e}^t - [\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}^t + \sum_{j=1}^{N_s} P_{sj}^t]}{P_{L,e}^t} \quad (13)$$

در این رابطه، $P_{L,e}^t$ بار الکتریکی شبکه را در زمان t نشان می‌دهد.

۳-۳- محدودیت‌های مسأله

- توازن توان الکتریکی: مجموع توان الکتریکی تولیدی توسط واحدهای تولید پراکنده (P_{gi}^t)، ذخیره/تخلیه توان الکتریکی توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی (P_{sj}^t) و همچنین خرید/فروش توان به/از شبکه بالادست (P_{Grid}^t) در هر ساعت باید برابر بار الکتریکی ($P_{L,e}^t$) ریزشبهه در آن ساعت باشد. این شرط در چهارچوب ریاضی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}^t + \sum_{j=1}^{N_s} P_{sj}^t + P_{Grid}^t = P_{L,e}^t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

قابل‌ذکر است که در این رابطه بار الکتریکی ($P_{L,e}^t$) با در نظر گرفتن تغییرات ناشی از برنامه‌های پاسخ تقاضا لحاظ می‌شود. علاوه بر آن، توان الکتریکی خروجی هر یک از واحدهای تولید پراکنده (P_{gi}^t) و انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌سازهای الکتریکی (W_{ess}^t) باید در محدوده حداقل و حداکثر خود باشند. همچنین، تبادل توان الکتریکی با شبکه بالادست نیز باید در محدودی مجاز برنامه‌ریزی گردد. در این حالت این شرایط در قالب ریاضی به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} P_{gi,min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi,max} & \text{if } u_i^t = 1 \\ 0 & \text{if } u_i^t = 0 \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_g \quad (15)$$

$$W_{ess,min} \leq W_{ess}^t \leq W_{ess,max}$$

$$P_{Grid,min} \leq P_{Grid}^t \leq P_{Grid,max}$$

- توازن توان حرارتی: مجموع توان حرارتی تولیدی توسط واحدهای Micro-CHP، توان حرارتی ذخیره/تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی و توان خروجی توسط بویلر کمکی باید برابر با بار حرارتی واحدها در هر ساعت باشد. این توازن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{CHP}} P_{CHP_r,th}^t + P_{s,th}^t + P_{bl}^t = P_{L,th}^t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

۴- توصیف مدل تصادفی

که $P_{bl,max}^t$ و $P_{bl,min}^t$ حداکثر و حداقل توان حرارتی تولیدی توسط بویلر کمکی در ساعت t می‌باشد.

۳- مسأله بهینه‌سازی پیشنهادی

در این مقاله، مسأله مدیریت انرژی پیشنهادی به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی با هدف دستیابی به تولید بهینه تولیدهای پراکنده همراه با افزایش قابلیت‌اعتماد در عملکرد جزیره‌ای، ارائه می‌شود. این مسأله می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

۳-۱- تابع هدف هزینه

تابع هدف هزینه بهره‌برداری از ریزشبهه از چهار قسمت هزینه فروش توان منابع انرژی پراکنده و روشن و خاموش شدن واحدها، هزینه تبادل توان با شبکه بالادست، هزینه خرید گاز طبیعی جهت استفاده از بویلر کمکی و هزینه پیاده‌سازی قراردادهای پاسخ تقاضا تشکیل شده است. این چهار قسمت در تابع هدف پیشنهادی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min}f_1(X) = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} u_i^t P_{gi}^t B_{gi}^t + S_{gi} [u_i^t - u_i^{t-1}] \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_s} P_{sj}^t B_{sj}^t + P_{Grid}^t B_{Grid}^t \right. \\ \left. + C_{gas}^t G_{bl}^t \right\} \\ \left. + \left\{ \sum_{l=1}^k r_l P_l c_l + C_{l,0} \right\} \right. \quad (12) \end{aligned}$$

که u_i^t وضعیت واحد تولیدکننده توان الکتریکی نام در ساعت t ، P_{gi}^t میزان تولید واحد نام در ساعت t ، و در نهایت B_{gi}^t هزینه تولید توان الکتریکی توسط واحد نام در ساعت t می‌باشد. S_{gi} هزینه روشن و خاموش شدن واحد نام را نشان می‌دهد. همچنین، P_{sj}^t میزان تولید واحد نام در ساعت t ، B_{sj}^t هزینه تولید توان الکتریکی توسط واحد ذخیره‌ساز توان الکتریکی نام در ساعت t می‌باشد. P_{Grid}^t و B_{Grid}^t میزان توان تبادل‌شده با شبکه بالادست و قیمت انرژی خریداری‌شده در ساعت t ام می‌باشد. G_{bl}^t و C_{gas}^t ، میزان مصرف گاز توسط بویلر کمکی و قیمت گاز در ساعت t را نشان می‌دهند. علاوه بر آن، درصد r_l بار شرکت‌کننده پاسخ تقاضا، P_l درصد انتقال بار و هزینه انتقال بار را در قرارداد نام، بیان می‌کند. همچنین، $C_{l,0}$ بیانگر هزینه اولیه انتقال بار در قرارداد نام می‌باشد.

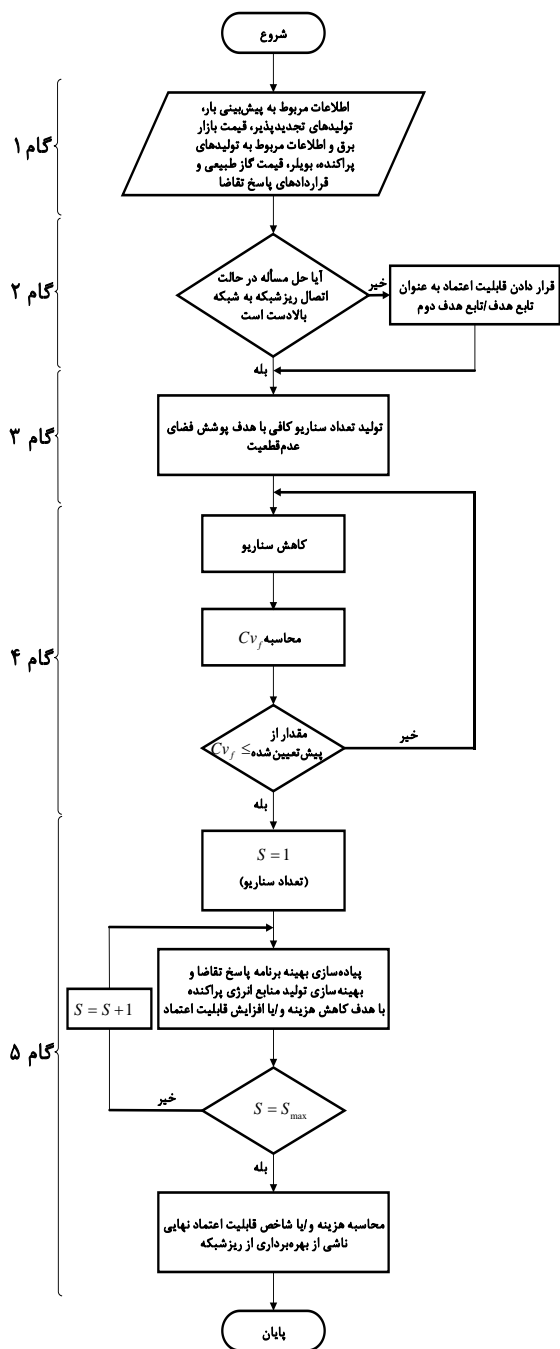
۳-۲- تابع هدف قابلیت‌اعتماد

تابع هدف قابلیت‌اعتماد ریزشبهه براساس توانایی ریزشبهه در پشتیبانی بار الکتریکی ریزشبهه در حالت جزیره‌ای با استفاده از پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشد. بدین منظور، ابتدا نسبت

ازسوی دیگر، در تمامی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، به‌دست‌آوردن یک نقطه از جبهه پرتو به‌عنوان بهترین جواب با در نظر گرفتن اهمیت هر یک از توابع هدف، حیاتی می‌باشد [۲۱]. روش اتخاذ شده برای تعیین یک نقطه از میان جبهه پرتو در ضمیمه (۱) آورده شده است.

۶- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. مراحل پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در حالت تصادفی

در این مقاله از روش مدل‌سازی تصادفی مبتنی بر تولید و کاهش سناریو، جهت پوشش عدم قطعیت‌های موجود در مسأله تصادفی، استفاده شده است. بر این اساس در مدل پیشنهادی، بار الکتریکی، قیمت بازار برق، توان الکتریکی تولیدی توسط سلول خورشیدی و توربین بادی به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله، با توجه به اطلاعات تاریخی و اطلاعات پیش‌بینی شده، منحنی‌های چگالی احتمال برای هر متغیر تصادفی انتخاب می‌شوند. بر این اساس، منحنی چگالی احتمال نرمال جهت مدل‌سازی حالت تصادفی بار الکتریکی، قیمت بازار برق و توان الکتریکی تولیدی توسط سلول خورشیدی به‌کار گرفته می‌شود. همچنین، منحنی چگالی احتمال وایبل برای مدل‌سازی توان تولیدی توسط توربین بادی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰-۱۷].

۵- مسأله بهینه‌سازی چند هدفه

در این مقاله به علت غیرخطی بودن تابع هدف هزینه با توجه به متغیر باینری مربوط به خاموش و روشن بودن واحدهای Micro-CHP و غیرخطی بودن تابع هدف قابلیت اعتماد با توجه به پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ تقاضا از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO جهت حل مسأله بهینه‌سازی غیرخطی با بیش از یک تابع هدف، استفاده شده است. از آنجاکه هیچ نقطه‌ای از فضای حل، همه توابع هدف یک مسأله بهینه‌سازی را به‌طور کامل ارضا نمی‌کند، به‌جای در نظر گرفتن یک نقطه بهینه برای تمامی توابع هدف، یک مجموعه از نقاط در نظر گرفته می‌شود که با عنوان جبهه پرتو معرفی می‌گردد. به‌طور عمومی، یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)] \quad (17)$$

Subject to:

$$\begin{cases} g_i(X) \leq 0 & i = 1, \dots, m \\ h_j(X) = 0 & j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (18)$$

که $F(X)$ مجموعه توابع هدف و $g_i(X)$ و $h_j(X)$ نیز قيود مسأله بهینه‌سازی می‌باشند. همچنین، زمانی یک نقطه در جبهه پرتو قرار می‌گیرد که بتواند بر نقاطی غیر از جبهه پرتو غالب شود. اگر X_1 و X_2 دو جواب بهینه از مسأله بهینه‌سازی چندهدفه باشد و X_1 بر X_2 غالب شود، آنگاه از دید ریاضی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_l(X_1) \leq f_l(X_2) \quad \forall l = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

و

$$\exists l_0 \quad f_{l_0}(X_1) < f_{l_0}(X_2) \quad (20)$$

در طول مسأله بهینه‌سازی، نقاطی که توسط نقاط دیگر غالب نشوند در یک مخزن ذخیره می‌شوند که به‌عنوان نقاط جبهه پرتو خواهند بود.

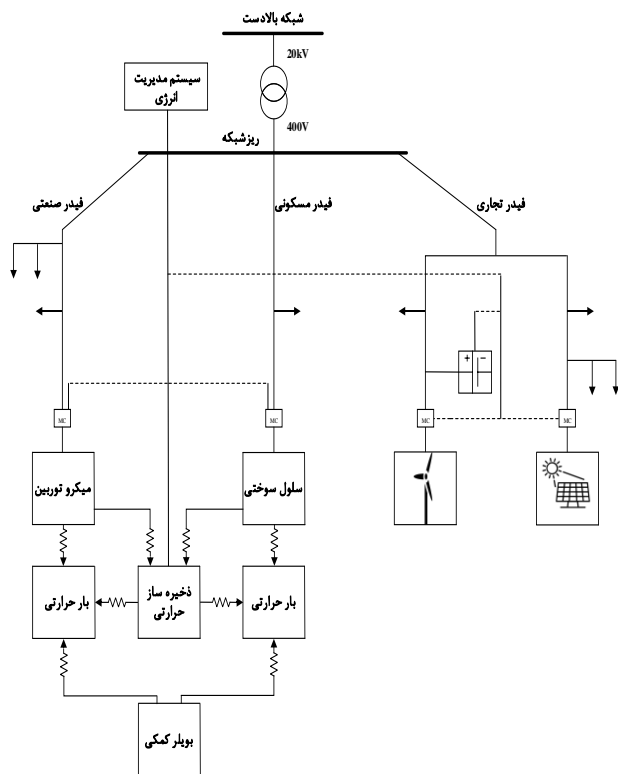
بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO با تعداد تکرار بالا و ضریب اینرسی متغیر به کار گرفته می‌شود. همچنین، در صورت چندهدفه بودن مسأله بهینه‌سازی، الگوریتم MOPSO استفاده می‌شود.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی حاصل شده از حل مسأله بهینه‌سازی شبکه مورد مطالعه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج در قالب حل مسأله قطعی و تصادفی ارائه شده‌اند.

۷-۱- اطلاعات ورودی

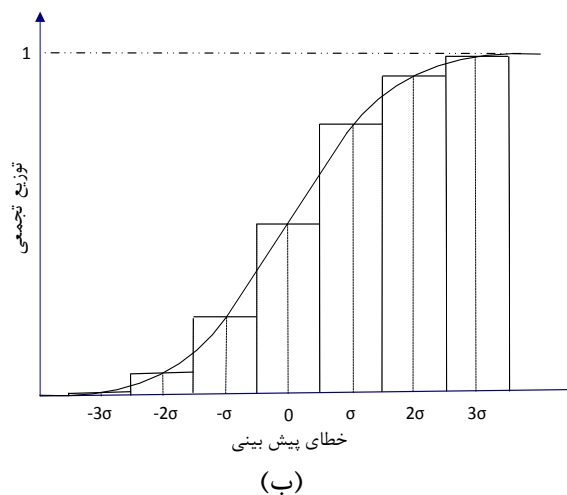
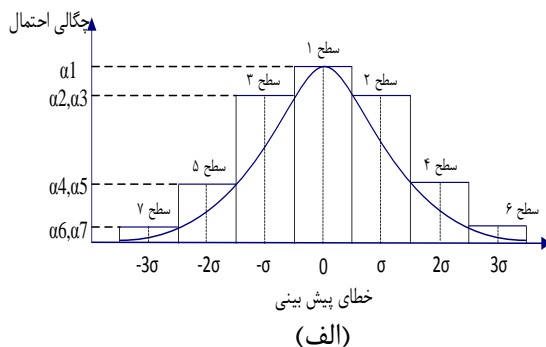
شبکه مورد مطالعه یک ریزشبکه شامل یک فیدر برای منطقه مسکونی، یک فیدر صنعتی برای تغذیه چند کارگاه کوچک و یک فیدر برای مصارف تجاری، می‌باشد که در شکل ۳ دیده می‌شود [۱۷]. در این ریزشبکه، ۵ واحد تولیدی شامل؛ یک توربین بادی، یک سلول خورشیدی، یک میکروتوربین و یک سلول سوختی در کنار یک ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی برای تأمین بار الکتریکی وجود دارد. همچنین ریزشبکه مورد مطالعه با شبکه بالادست خود قابلیت تبادل توان الکتریکی داشته که شامل خرید و فروش توان می‌باشد. جهت تأمین بار حرارتی ریزشبکه، یک بویلر کمکی و ذخیره‌ساز توان حرارتی در کنار Micro-CHPها تعبیه شده‌است. به منظور مشخص بودن عملکرد مناسب ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی در سیستم مدیریت انرژی، روز پیش‌رو به‌عنوان یک بازه زمانی یک‌روزه در نظر گرفته شده‌است.



گام ۱: دریافت اطلاعات مربوط به پیش‌بینی بار، قیمت بازار برق، قیمت گاز طبیعی، هزینه واحدها و قراردادهای پاسخ تقاضا.

گام ۲: تعیین تابع/توابع هدف براساس عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه بالادست و یا عملکرد جزیره‌ای.

گام ۳: تولید سناریوها با استفاده از الگوریتم چرخ رولت: روند تولید سناریو براساس انتخاب تصادفی یکی از قسمت‌ها منحنی چگالی احتمال است که به صورت قسمت‌هایی با سطح احتمال‌های مختلف مانند شکل ۲-الف تقسیم‌بندی می‌شوند. در الگوریتم چرخ رولت ابتدا یک عدد به صورت تصادفی بین [۰،۱] ایجاد می‌شود. سپس با توجه به قرارگیری این عدد در یکی از بخش‌های تابع توزیع تجمعی نشان داده شده در شکل ۲-ب، مقدار احتمال و مقدار آن سناریو با استفاده از شکل ۲-الف تعیین می‌شود.



شکل ۲: الف) نمونه‌ای از تقسیم‌بندی تابع چگالی احتمال ب) نمونه‌ای از تقسیم‌بندی تابع توزیع تجمعی

گام ۴: کاهش تعداد سناریوها. روش استفاده شده جهت کاهش تعداد سناریوها از روش پس‌رو می‌باشد که در ضمیمه (۲) آورده شده‌است [۷].

گام ۵: حل مسأله بهینه‌سازی با پیاده‌سازی بهینه برنامه پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی تولید منابع انرژی پراکنده با هدف حداقل‌سازی هزینه و افزایش شاخص قابلیت اعتماد. در صورت تک‌هدفه بودن مسأله

شکل ۳: دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه [۱۶]

مدیریت انرژی ریزشبه مسئولیت اجرای آن‌ها را برعهده دارد [۲۳]. در این حالت مدیریت شبکه به بارها اعلام می‌کند که قسمتی از بار آن‌ها در ساعاتی از شبانه‌روز کاهش داده می‌شود و می‌توانند در ساعاتی دیگر از آن‌ها استفاده کنند. از سوی دیگر با توجه به اینکه هدف اصلی از استفاده از این برنامه‌ها افزایش قابلیت اعتماد در تأمین بار است، در این مقاله، بدترین حالت در نظر گرفته شده است. به صورتی که فرض شده است مصرف‌کنندگان از حداکثر فرصت برای بازسازی توان انتقال داده شده از ساعات دیگر استفاده نمایند.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به قراردادهای انتقال بار

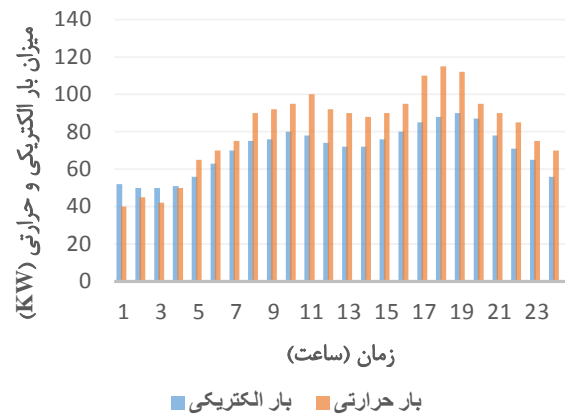
شناسه قرارداد		۱	۲
مقدار (kW)	۲۱	۱۲/۳۲	۲
قیمت انتقال بار (\$/kWh)	۰/۰۲۸	۰/۰۵۰	
هزینه اولیه انتقال بار (\$)	۰	۰	
ساعات کاهش بار	۱۷-۲۰	۹-۱۲	
ساعات افزایش بار	۲۲-۲۴	۶-۸	
نوع مشترک	صنعتی	خانگی-تجاری	

۲-۷- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با دیگر روش‌ها

در این بخش، جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، نتیجه کسب شده از روش‌های ارائه شده با مراجع [۵] و [۶] در حالت برنامه‌ریزی قطعی، مقایسه می‌شود. بدین منظور، از داده‌های این مقالات برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین، به منظور تطابق، میزان شارژ اولیه ذخیره‌ساز الکتریکی بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل شده از بهینه‌سازی تولید واحدها و تبادل توان با شبکه بالادست، در جدول ۲ آورده شده است.

در این جدول، هزینه بهره‌برداری از ریزشبه با استفاده از روش پیشنهادی برابر با $267/06 \text{ €ct}$ می‌باشد که برابر با هزینه بهره‌برداری به دست آمده در مرجع [۶] است. این در حالی است که هزینه بهره‌برداری نسبت به مرجع [۵]، به میزان $2/6742 \text{ €ct}$ کاهش یافته است. این نتایج قابلیت روش پیشنهادی را نسبت به مراجع مربوطه نشان می‌دهد. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که، در این مقالات، در کنار شارژ اولیه بی‌نهایت، میزان حداکثر شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در هر ساعت برابر و ظرفیت کل ذخیره‌ساز نامشخص است. حال در روش پیشنهادی در این مقاله، با اعمال محدودیت‌های مربوط به شارژ و دشارژ، شامل ظرفیت محدود ذخیره‌ساز الکتریکی و برابری میزان شارژ و دشارژ حداکثر در هر ساعت با توجه به ضریب بهره‌وری عنوان شده در رابطه (۱) و همچنین صفر در نظر گرفتن ذخیره اولیه ذخیره‌ساز الکتریکی، نتایج حاصل به صورت جدول ۳ به دست می‌آید. لذا می‌توان گفت که با اعمال محدودیت‌های مربوط به

مجموع بار الکتریکی و حرارتی ریزشبه در روز پیش‌رو به ترتیب برابر با 1695 kW و 1971 kW می‌باشد که در شکل ۴ به تفکیک ۲۴ ساعت نشان داده شده است [۱۶]. علاوه بر آن، اطلاعات مربوط به منابع انرژی پراکنده، هزینه تولید بر کیلووات ساعت آن‌ها و همچنین قیمت بازار برق و گاز طبیعی در ضمیمه (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که، ذخیره‌ساز الکتریکی مورد استفاده در این مقاله از نوع NiMH است که دارای ضریب ذخیره/تخلیه برابر با $0/66$ می‌باشد. ظرفیت این ذخیره‌ساز برابر با 150 kW می‌باشد و ذخیره اولیه آن صفر است. در ارتباط با منابع انرژی حرارتی، ذخیره‌ساز حرارتی دارای ظرفیت 180 kW می‌باشد که در هر ساعت توانایی حداکثر ذخیره/تخلیه 40 kW را دارد. همچنین، بویلر کمکی دارای ضریب بهره $0/85$ بوده و توان خروجی حداکثر 60 kW را در هر ساعت تولید می‌کند. همچنین در برنامه‌ریزی تصادفی، واریانس منحنی چگالی احتمال نرمال به میزان 5% مقادیر قطعی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: بار الکتریکی و حرارتی ریزشبه در روز پیش‌رو به تفکیک ۲۴ ساعت [۱۶، ۱]

توان خروجی واحدهای Micro-CHP به صورت ضرب توان الکتریکی تولیدی در یک ضریب به دست می‌آید که این ضرایب برای میکروتوربین برابر $1/8$ و برای سلول سوختی برابر با 1 می‌باشد [۲۲]. قابل ذکر است که در شبکه مورد نظر، فیدر خانگی برابر 15% در صد، فیدر تجاری برابر 25% در صد و فیدر صنعتی برابر 60% در صد از بار الکتریکی کل شبکه را شامل می‌شوند. بر این اساس قراردادهای پاسخ تقاضا ارائه شده در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس این جدول، در هر یک از قراردادهای با توجه به بار پیش‌بینی شده ریزشبه، 10% از بار الکتریکی مشترکین شرکت کننده در برنامه‌های پاسخ تقاضا در ساعات مربوطه به ساعات دیگر انتقال داده می‌شود. لازم به ذکر است که قراردادهای انتقال بار ارائه شده از نوع کنترل مستقیم بار بوده و سیستم

۲۱	۳۰	۳۰	۰	۱/۳۰۰۵	۳۰	-۱۳/۳۰۰۵
۲۲	۳۰	۳۰	۰	۱/۳۰۰۵	۳۰	-۲۰/۳۰۰۵
۲۳	۰	۳۰	۰	۰/۹۱۵۰	۴/۰۸۵۰	۳۰
۲۴	۰	۳۰	۰	۰/۶۱۵۰	-۴/۶۱۵۰	۳۰

جدول ۳: مشارکت واحدها در تأمین بار الکتریکی با اعمال محدودیت‌های ذخیره‌ساز الکتریکی با استفاده از اطلاعات مراجع [۵] و [۶]

میزان تولید واحدها (kW)						
ساعت	MT	FC	PV	WT	ESS	UPN
۱	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۵/۷۸۵۰	۳۰
۲	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۷/۷۸۵۰	۳۰
۳	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۷/۷۸۵۰	۳۰
۴	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۶/۷۸۵۰	۳۰
۵	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۰/۷۸۵۰	۳۰
۶	۶	۳۰	۰	۰/۹۱۵۰	-۳/۹۱۵۰	۳۰
۷	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۲/۲۱۵۰	۳۰
۸	۶	۳۰	۰/۲۰۰۰	۱/۳۰۵۰	۸/۴۹۵۰	۳۰
۹	۳۰	۳۰	۳/۷۵۰۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	-۱۹/۵۳۵۰
۱۰	۳۰	۳۰	۷/۵۲۵۰	۳/۰۹۰	۳۰	-۲۰/۶۱۵۰
۱۱	۳۰	۳۰	۱۰/۴۵۰۰	۸/۷۷۵۰	۱۲/۱۳۰۰	-۱۳/۳۵۵۰
۱۲	۳۰	۳۰	۱۱/۹۵۰۰	۱۰/۴۱۰	۰	-۹/۳۶۰۰
۱۳	۳۰	۳۰	۲۳/۹۰۰۰	۳/۹۱۵۰	۰	-۱۵/۸۱۵۰
۱۴	۳۰	۳۰	۲۱/۰۵۰۰	۲/۳۷۰۰	۰	-۱۱/۴۲۰۰
۱۵	۳۰	۳۰	۷/۸۷۵۰	۱/۷۸۵۰	۰	۶/۳۴۰۰
۱۶	۳۰	۳۰	۴/۲۲۵۰	۱/۳۰۵۰	۰	۱۴/۴۷۰۰
۱۷	۳۰	۳۰	۰/۵۵۰۰	۱/۷۸۵۰	۰	۲۲/۶۶۵۰
۱۸	۲۶/۲۱۵۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۰	۳۰
۱۹	۲۸/۶۹۸۰	۳۰	۰	۱/۳۰۲۰	۰	۳۰
۲۰	۲۵/۲۱۵۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۰	۳۰
۲۱	۳۰	۳۰	۰	۱/۳۰۰۵	۰	۱۶/۶۹۹۵
۲۲	۳۰	۳۰	۰	۱/۳۰۰۵	۰	۸/۶۹۹۵
۲۳	۶	۳۰	۰	۰/۹۱۵۰	-۱/۹۱۵۰	۳۰
۲۴	۰	۳۰	۰	۰/۶۱۵۰	-۴/۶۱۵۰	۳۰

ذخیره‌ساز الکتریکی، عملکرد آن‌ها به واقعیت موجود در شبکه‌ها بسیار نزدیک خواهد بود.

براساس واقعیت‌های در نظر گرفته‌شده و مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳، هزینه بهره‌برداری از ریزشبه، با استفاده از اطلاعات بازار برق و هزینه تولید واحدهای ارائه‌شده در مراجع [۵] و [۶]، افزایش یافته و به مقدار ۶۲۳/۹۶۸۳€ت رسیده است. علت این افزایش قیمت، عملکرد متفاوت سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی است؛ چرا که در این حالت، با توجه

جدول ۴: مشارکت واحدها در تأمین بار الکتریکی با استفاده از اطلاعات مراجع [۵] و [۶]

میزان تولید واحدها (kW)						
ساعت	MT	FC	PV	WT	ESS	UPN
۱	۰	۳۰	۰	۱۱/۷۸۵۰	-۹/۷۸۵۰	۳۰
۲	۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۱/۷۸۵۰	۳۰
۳	۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۱/۷۸۵۰	۳۰
۴	۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۱۰/۷۸۵۰	۳۰
۵	۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	-۵/۷۸۵۰	۳۰
۶	۰	۳۰	۰	۰/۹۱۵۰	۲/۰۸۵۰	۳۰
۷	۰	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۸/۲۱۵۰	۳۰
۸	۰	۳۰	۰/۲۰۰۰	۱/۳۰۵۰	۱۳/۴۹۵۰	۳۰
۹	۳۰	۳۰	۳/۷۵۰۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	-۱۹/۵۳۵۰
۱۰	۳۰	۳۰	۷/۵۲۵۰	۳/۰۹۰	۳۰	-۲۰/۶۱۵۰
۱۱	۲۸/۷۷۵۰	۳۰	۱۰/۴۵۰۰	۸/۷۷۵۰	۳۰	-۳۰
۱۲	۲۱/۶۴۰۰	۳۰	۱۱/۹۵۰۰	۱۰/۴۱۰	۳۰	-۳۰
۱۳	۱۴/۱۸۵۰	۳۰	۲۳/۹۰۰۰	۳/۹۱۵۰	۳۰	-۳۰
۱۴	۱۸/۵۸۰۰	۳۰	۲۱/۰۵۰۰	۲/۳۷۰۰	۳۰	-۳۰
۱۵	۳۰	۳۰	۷/۸۷۵۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	-۲۳/۶۶۰۰
۱۶	۳۰	۳۰	۴/۲۲۵۰	۱/۳۰۵۰	۳۰	-۱۵/۵۳۰۰
۱۷	۳۰	۳۰	۰/۵۵۰۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	-۷/۳۳۵۰
۱۸	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	۲۰/۲۱۵۰
۱۹	۶	۳۰	۰	۱/۳۰۲۰	۲۲/۶۹۸۰	۳۰
۲۰	۶	۳۰	۰	۱/۷۸۵۰	۳۰	۱۹/۲۱۵۰

به اطلاعات جدول ۳، سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در ساعات ابتدایی روز با توجه به قیمت پایین بازار برق شارژ می‌شود و در ساعات بعد، دشارژ می‌گردد. اما به‌دلیل قیمت بازار برق و همچنین هزینه تولید توان توسط واحدها، در برخی از ساعات روز، اجازه شارژ مجدد را نخواهد داشت.

۳-۷- نتایج تکمیلی روش پیشنهادی

در ادامه نتایج شبیه‌سازی در روش پیشنهادی، سه مطالعه دیگر ارائه می‌شود. شایان‌ذکر است که با توجه به اطلاعات ورودی مسأله مدیریت

انرژی، در این مطالعات ظرفیت کل ذخیره‌ساز الکتریکی محدود و شارژ اولیه آن صفر می‌باشد.

مطالعه اول: در این مطالعه، ضمن بررسی عملکرد ریزشبه در تأمین بار الکتریکی، پشتیبانی از بار حرارتی نیز مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین، برنامه‌های پاسخ تقاضا با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبه، اعمال می‌گردند. شکل ۵ تغییرات بهینه بار ناشی از برنامه‌های پاسخ تقاضا را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از این مطالعه در جداول ۴ و ۵ آورده شده‌است.

۳۰	-۱۲/۳۶۴۵	۹/۳۶۴۵	۰	۳۰	۳۰	۲۰
۲۸/۱۵۲۰	-۱۹/۸	۹/۶۴۸۰	۰	۳۰	۳۰	۲۱
۳۰	-۱۹/۸	۱۰/۸۲۴۰	۰	۱۹/۹۷۶۰	۳۰	۲۲
۳۰	-۱۹/۸	۱۲/۰۰۰۰	۰	۱۷/۳۳۰۲	۳۰	۲۳
۳۰	-۲/۶۵۱۷	۱۲/۱۲۱۵	۰	۳	۳۰	۲۴

جدول ۵: برنامه مشارکت واحدها در تولید توان حرارتی (مطالعه اول)

میزان تولید واحدها (kW)				ساعت
AB	TSS	FC	MT	
۰	-۱۴	۰	۵۴	۱
۰	-۹	۰	۵۴	۲
۰	-۱۲	۰	۵۴	۳
۰	-۹/۷۱۲۰	۵/۷۱۲۰	۵۴	۴
۰	-۰/۵۰۲۵	۱۱/۵۰۲۵	۵۴	۵
۰	-۹/۷۲۰۱	۲۵/۷۲۰۱	۵۴	۶
۰	-۸/۴۹۰۴	۲۹/۴۹۰۴	۵۴	۷
۰	۷/۴۴۲۵	۲۸/۵۵۷۶	۵۴	۸
۰	۸	۳۰	۵۴	۹
۰	۱۱	۳۰	۵۴	۱۰
۰	۱۶	۳۰	۵۴	۱۱
۰	۸	۳۰	۵۴	۱۲
۰	۶	۳۰	۵۴	۱۳
۰	۴	۳۰	۵۴	۱۴
۳/۰۱۷۵	۲/۹۸۲۵	۳۰	۵۴	۱۵
۱۱	۰	۳۰	۵۴	۱۶
۲۶	۰	۳۰	۵۴	۱۷
۳۳/۵۶۹۸	۰	۲۷/۴۳۰۲	۵۴	۱۸
۲۸	۰	۳۰	۵۴	۱۹
۱۱	۰	۳۰	۵۴	۲۰
۶	۰	۳۰	۵۴	۲۱
۱۱/۰۲۴۰	۰	۱۹/۹۷۶۰	۵۴	۲۲
۳/۶۶۹۸	۰	۱۷/۳۳۰۲	۵۴	۲۳
۱۳	۰	۳	۵۴	۲۴



شکل ۵: تغییرات بار الکتریکی ناشی از برنامه پاسخ تقاضا (مطالعه اول)

جدول ۴: برنامه مشارکت واحدها در تولید توان الکتریکی (مطالعه اول)

میزان تولید واحدها (kW)						
UPN	ESS	WT	PV	FC	MT	ساعت
۳۰	-۱۱/۱۴۲۵	۳/۱۴۲۵	۰	۰	۳۰	۱
۳۰	-۱۳/۵۶۷۰	۳/۵۶۷۰	۰	۰	۳۰	۲
۳۰	-۱۴/۹۶۶۵	۴/۹۶۶۵	۰	۰	۳۰	۳
۳۰	-۱۹/۸	۵/۰۸۸۰	۰	۵/۷۱۲۰	۳۰	۴
۳۰	-۱۹/۸	۴/۲۹۷۵	۰	۱۱/۵۰۲۵	۳۰	۵
۳۰	-۱۹/۸	۴/۶۰۲۰	۰	۲۵/۷۲۰۱	۳۰	۶
۳۰	-۱۹/۸	۵/۱۰۷۵	۰	۲۹/۴۹۰۴	۳۰	۷
۳۰	-۱۹/۸	۶/۱۴۲۵	۰/۱۰۰	۲۸/۵۵۷۶	۳۰	۸
۰/۴۷۶۷	۷/۴۷۳۸	۷/۴۵۹۵	۰/۵۹۰۰	۳۰	۳۰	۹
-۲۷/۷۸۹۹	۳۰	۶/۹۷۳۶	۱/۹۸۰۰	۳۰	۳۰	۱۰
-۲۷/۶۳۱۶	۳۰	۴/۳۹۸۰	۷/۷۵۰۰	۳۰	۳۰	۱۱
-۳۰	۲۸/۵۶۴۵	۵/۶۳۵۵	۹/۸۰۰۰	۳۰	۳۰	۱۲
۱۴/۸۲۶۰	-۱۹/۸	۶/۳۲۴۰	۱۰/۶۵۰۰	۳۰	۳۰	۱۳
-۳۰	۲۶/۴۰۲۰	۵/۸۹۸۰	۹/۷۰۰۰	۳۰	۳۰	۱۴
-۲۸/۱۶۰۵	۳۰	۶/۰۴۰۵	۸/۱۲۰۰	۳۰	۳۰	۱۵
۳/۰۵۴۸	۶/۰۳۵۷	۵/۹۵۹۵	۴/۹۵۰۰	۳۰	۳۰	۱۶
۳۰	-۱۳/۰۵۲۵	۶/۹۵۲۵	۱/۱۰۰۰	۳۰	۳۰	۱۷
۳۰	-۱۹/۸	۶/۷۹۰۵	۰/۱۰۰۰	۲۷/۴۳۰۲	۳۰	۱۸
۳۰	-۱۵/۳۶۵۷	۷/۸۴۵۰	۰	۳۰	۳۰	۱۹

مطالعه سوم: در این مطالعه شبکه در حالت جزیره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شرایط، بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن دو تابع هدف شامل هزینه و شاخص قابلیت‌اعتماد، پیاده‌سازی می‌گردد. پس از ایجاد جبهه پرتو، با استفاده از ایجاد تابع عضویت، تصمیم‌گیری برای پیدا کردن بهترین جواب انجام می‌شود. شکل ۷ جبهه پرتو حاصل شده

مطالعه دوم: در این مطالعه با در نظر گرفتن شرایط مطالعه اول، شبکه در حالت جزیره‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این شرایط، تابع هدف بهینه‌سازی متناسب با قابلیت‌اعتماد شبکه بوده و هدف آن حداقل نمودن بارهای از دست‌رفته می‌باشد. بنابراین، در این مطالعه همواره تمامی واحدهای استفاده‌شده در مد کاری بوده و روشن می‌باشند. شکل ۶ تغییرات بهینه بار ناشی از برنامه‌های پاسخ تقاضا را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، از آنجایی که برنامه‌های پاسخ تقاضا با هدف کاهش هزینه انجام شده‌است، الزاماً بار ساعتی که در پیک بار حضور دارند، منتقل نمی‌شود. در واقع با توجه به تابع هدف هزینه، در جهت پیاده‌سازی بهینه برنامه‌های پاسخ تقاضا، بار با توجه به قیمت بازار برق و هزینه تولید توان دیگر واحدها انتقال داده شده‌است.

در مطالعه دوم، همان‌طور که از شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، جهت حداکثر پشتیبانی از بار الکتریکی ریزش‌بکه، برنامه پاسخ تقاضا به گونه‌ای اعمال گردیده‌است که ساعت ۱۹ که پیک بار الکتریکی می‌باشد، کاهش بار زیادی داشته باشد. همچنین به دلیل کارکرد ریزش‌بکه در مد جزیره‌ای هیچگونه توانی با شبکه بالادست تبادل نمی‌شود و در نتیجه، واحدهای Micro-CHP با حداکثر توان خود سعی در تأمین بار الکتریکی ریزش‌بکه را دارند. در این حالت ذخیره‌ساز الکتریکی عملکرد مطلوبی داشته و سعی در پشتیبانی واحدهای تولید توان الکتریکی در تأمین بار را دارد. همچنین از آنجاکه واحدهای Micro-CHP باید در حداکثر تولید خود کار کنند، تأمین بار حرارتی به خوبی توسط این واحدها و ذخیره‌ساز حرارتی صورت گرفته‌است؛ به طوری که بویلر کمکی هیچگونه توان حرارتی تولید نمی‌کند.

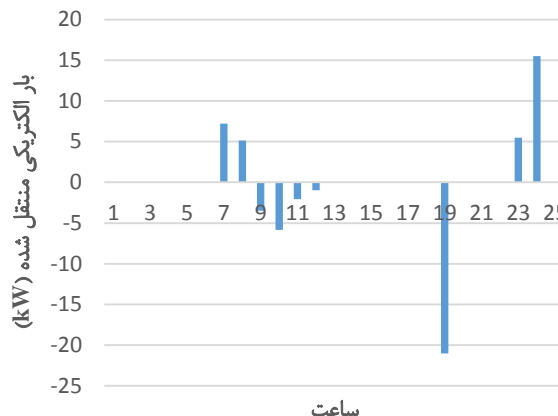
در مطالعه سوم، همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، با استفاده از روش بیان‌شده در بخش ۵ برای حل مسأله بهینه‌سازی چندهدفه، یک نقطه از جبهه پرتو به‌عنوان بهترین جواب جهت ارضای هر دو تابع هدف با ضرایب وزنی برابر، انتخاب شده‌است.

هزینه و شاخص قابلیت‌اعتماد به‌دست‌آمده از سه مطالعه در جدول ۶ آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مطالعه اول، هزینه بهره‌برداری از ریزش‌بکه در برنامه‌ریزی تصادفی به‌علت نزدیک‌به‌واقعیت‌بودن، از برنامه‌ریزی قطعی بیشتر شده‌است. این موضوع در شاخص قابلیت‌اعتماد به‌دست‌آمده از مطالعه دوم نیز دیده می‌شود. در مطالعه سوم که یک مسأله مدیریت انرژی با بهینه‌سازی دوهدفه مورد بررسی قرار گرفته شده‌است، ملاحظه می‌شود که با توجه به عملکرد ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای، هزینه بهره‌برداری از ریزش‌بکه نسبت به مطالعه اول افزایش زیادی داشته‌است. همچنین، همانند حالت‌های قبل، در برنامه‌ریزی تصادفی، هزینه بهره‌برداری افزایش یافته و چون توابع هدف مورد مطالعه حالت عکس نسبت به هم دارند، شاخص قابلیت‌اعتماد کاهش یافته‌است. علاوه بر آن، به‌علت دوهدفه‌بودن این مطالعه، شاخص قابلیت‌اعتماد نیز نسبت به مطالعه دوم بیشتر شده است.

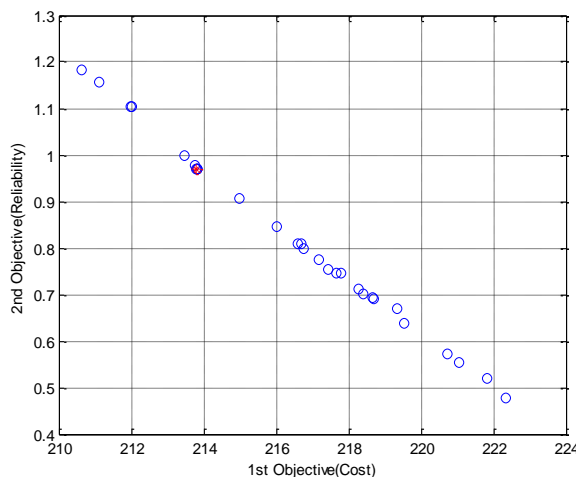
جدول ۶: هزینه و شاخص قابلیت‌اعتماد به‌دست‌آمده از

مطالعات اول، دوم و سوم

نوع بهینه‌سازی			
تصادفی		قطعی	
شاخص	هزینه (\$)	شاخص	هزینه (\$)
قابلیت‌اعتماد		قابلیت‌اعتماد	



شکل ۶: تغییرات بار الکتریکی ناشی از برنامه پاسخ تقاضا (مطالعه دوم)



شکل ۷: جبهه پرتو حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه (مطالعه سوم)

از بهینه‌سازی دوهدفه را نشان می‌دهد. ضرایب وزنی برای هزینه بهره‌برداری از ریزش‌بکه و شاخص قابلیت‌اعتماد، به‌منظور دستیابی به بهترین پاسخ از میان اعضای جبهه پرتو، به‌صورت برابر در نظر گرفته شده‌اند.

تحلیل نتایج: در مطالعه اول، با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌گردد که با توجه به قیمت پایین انرژی در بازار برق در ساعات ابتدایی روز، ذخیره‌ساز الکتریکی در این ساعات انرژی الکتریکی ذخیره می‌کند و در ساعات دیگر، با توجه به قیمت تولید توان توسط واحدها و بازار برق، این میزان را به شبکه تزریق می‌کند. همچنین سلول سوختی با توجه به قیمت تولید توان الکتریکی بیشتر نسبت به میکروتوربین، تولید کمتری در طول روز دارد و در برخی ساعات از روز خاموش می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، با توجه به رابطه مستقیم بین تولید توان الکتریکی و توان حرارتی توسط واحدهای Micro-CHP، ذخیره‌ساز حرارتی در ساعات ابتدایی انرژی حرارتی کافی برای پشتیبانی از بار حرارتی در ساعات دیگر روز ذخیره نکرده و لذا، بویلر کمکی بار حرارتی تأمین‌نشده را پشتیبانی می‌کند.

ضمیمه (۲)

این روش کاهش سناریو، در حفظ دقت رفتار تصادفی سیستم بسیار انعطاف‌پذیر و کاربردی می‌باشد. با در نظر گرفتن $\xi_s (s = 1, 2, \dots, N)$ که در آن N به‌عنوان تعداد سناریو می‌باشد، احتمال هر سناریو و $DT_{s,s'}$ فاصله بین هر جفت سناریو (s, s') ، پیاده‌سازی روش پسر و جهت کاش سناریو به‌صورت زیر خواهد بود:

I. با تعریف S به‌عنوان مجموعه‌ای شامل سناریوهای تولید شده و DS به‌عنوان مجموعه‌ای از سناریوهای حذف شده که در ابتدا خالی می‌باشد، فاصله بین هر جفت از سناریوها به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DT_{s,s'} = DT(\xi_s, \xi_{s'}) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i^s - x_i^{s'})^2} \quad s, s' \in S \quad (23)$$

II. تعریف، $DT_{k,r} = \min_{s' \in S, s' \neq k} DT_{k,s'}$ برای هر سناریو k که در آن r نشان‌دهنده سناریو با کمترین فاصله با سناریو k است.

III. محاسبه $PD_{k,r} = \rho(k)DT_{k,r} \quad k \in S$ و انتخاب d که به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$PD_d = \min_{k \in S} PD_k \quad (24)$$

IV. به‌روزرسانی مجموعه‌های S و DS به‌صورت $S = S - \{d\}$ و $DS = DS + \{d\}$ و $\rho(r) = \rho(r) + \rho(d)$

V. تکرار گام‌های ۲ تا ۴ برای دستیابی به تعداد مطلوب سناریو. در این مقاله، یک معیار مناسب جهت تعیین دقت کافی برای توقف کاهش سناریو، استفاده شده‌است. این معیار مبتنی بر مفهوم ضریب تغییر Cv_f است که به با در نظر گرفتن σ_f و μ_f به‌عنوان انحراف از میانگین و مقدار متوسط، متغیر تصادفی f به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Cv_f = \frac{\sigma_f}{\mu_f \sqrt{N_s}} \quad (25)$$

ضمیمه (۳)

اطلاعات مربوط به واحدها و شبکه بالادست، قیمت بازار برق و گاز طبیعی و هزینه پیشنهادی واحدها در جداول ۷ الی ۹ آورده شده‌است.

جدول ۷: قیمت بازار برق و گاز طبیعی در طول ۲۴ ساعت [۱۶، ۱]

ساعت	قیمت بازار برق (\$/kWh)	قیمت گاز طبیعی (\$/m ³)
۱	۰/۰۳۳	۰/۰۹۸
۲	۰/۰۲۷	۰/۱۰۰
۳	۰/۰۲۰	۰/۱۰۵
۴	۰/۰۱۷	۰/۱۰۸
۵	۰/۰۱۷	۰/۱۱۰
۶	۰/۰۲۹	۰/۱۱۲
۷	۰/۰۳۳	۰/۱۰۹
۸	۰/۰۵۴	۰/۱۱۵

اول	۱۲۸/۲۵۴۴	----	۱۲۹/۴۴۴۷	----
دوم	----	۰/۴۷۸۰۴	----	۰/۶۷۹۲
سوم	۲۱۳/۸۰۰۳	۰/۹۷۰۴	۲۱۷/۰۰۲۱	۰/۷۸۰۹

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند جهت بهینه‌سازی عملکرد منابع انرژی پراکنده در دو حالت برنامه‌ریزی قطعی و تصادفی، پیشنهاد شده‌است. منابع انرژی پراکنده شامل؛ تولیدهای تجدیدپذیر و Micro-CHP و سیستم ذخیره‌ساز انرژی شامل سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی در کنار یک بویلر کمکی، می‌باشند. توابع هدف بهینه‌سازی شامل؛ حداقل کردن هزینه و شاخص قابلیت‌اعتماد مرتبط با حداکثر تأمین بار ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای، می‌باشد. همچنین، برنامه‌های پاسخ تقاضا با اهداف بیان شده توسط سیستم مدیریت انرژی به مشترکان ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که، سیستم‌های Micro-CHP باعث کاهش مصرف گاز طبیعی توسط بویلر جهت تأمین بار حرارتی ریزش‌بکه شده‌اند. این سیستم‌ها در حالت عملکرد ریزش‌بکه در مد جزیره‌ای باعث شده‌اند که ریزش‌بکه هیچگونه مصرف گاز طبیعی نداشته باشد. بنابراین، سیستم مدیریت انرژی عملکرد مناسبی در کاهش هزینه‌های ناشی از تأمین توان الکتریکی و حرارتی در ریزش‌بکه داشته‌است. علاوه بر آن، مدیریت سمت تقاضا باعث کاهش بیشتر هزینه‌ها، در حالت اتصال ریزش‌بکه به شبکه بالادست، شده‌است. همچنین، مدیریت سمت تقاضا از طریق جابه‌جایی بهینه بخشی از بار در ساعات شبانه‌روز، باعث افزایش قابلیت‌اعتماد ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای ریزش‌بکه می‌شود.

ضمایم

ضمیمه (۱)

در جهت دستیابی به یک نقطه بهینه از میان جبهه پرتو، یک تابع عضویت فازی برای تعیین سازگاری این توابع، انتخاب می‌شود. در این راستا، برای تمامی نقاط مخزن یک تابع عضویت $\mu_{f_i}(X)$ برای هر یک از توابع هدف $f_i(X)$ به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\mu_{f_i}(X) = \begin{cases} 0 & f_i(X) \geq f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(X) \leq f_i^{max} \\ 1 & f_i(X) \leq f_i^{min} \end{cases} \quad (21)$$

که f_i^{min} و f_i^{max} حداکثر و حداقل میزان تابع هدف f_i را بیان می‌کنند. مقادیر عضویت نرمالیزه شده نقاط مخزن به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$N_{\mu}(X_i) = \frac{\sum_{k=1}^h w_k \times \mu_{f_k}(X_i)}{\sum_{k=1}^d \sum_{k=1}^h w_k \times \mu_{f_k}(X_i)} \quad (22)$$

که w_k ضریب وزنی تابع هدف f_k می‌باشد. بیشترین مقدار N_{μ} به‌عنوان بهترین جواب در نظر گرفته می‌شود.

۰/۱۹۰	۰/۰۲۶	۰	۰/۱۷۴	۰/۱۱۸	۱۹
۰/۱۹۰	۰/۳۰۰	۰	۰/۱۷۳	۰/۱۱۵	۲۰
۰/۱۸۶	۰/۰۴۳	۰	۰/۱۷۱	۰/۱۱۲	۲۱
۰/۱۸۰	۰/۰۱۹	۰	۰/۱۷۰	۰/۱۱۰	۲۲
۰/۱۷۵	۰/۰۲۷	۰	۰/۱۶۹	۰/۱۰۹	۲۳
۰/۱۶۵	۰/۰۲۲	۰	۰/۱۶۷	۰/۱۰۸	۲۴

مراجع

[1] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, and G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET renewable power generation*, vol. 5, pp. 258-267, 2011.

[۲] ح. شکری، س. نجفی روادق، "حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحه ۲۹-۴۲، ۱۳۹۴.

[3] S. Tamalouzt, N. Benyahia, T. Rekioua, D. Rekioua, and R. Abdessemed, "Performances analysis of WT-DFIG with PV and fuel cell hybrid power sources system associated with hydrogen storage hybrid energy system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 21006-21021, 2016.

[4] R. Napoli, M. Gandiglio, A. Lanzini, and M. Santarelli, "Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector," *Energy and Buildings*, vol. 103, pp. 131-146, 2015.

[5] A. A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, and 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, pp. 6490-6507, 2011.

[6] T. Niknam, F. Golestaneh, and A. Malekpour, "Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm," *Energy*, vol. 43, pp. 427-437, 2012.

[7] M. Parastegari, R.-A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, and Z. Forghani, "Joint operation of wind farms and pump-storage units in the electricity markets: Modeling, simulation and evaluation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 37, pp. 56-69, 2013.

[8] M. Bornapour and R.-A. Hooshmand, "An efficient scenario-based stochastic programming for optimal planning of combined heat, power, and hydrogen production of molten carbonate fuel cell power plants," *Energy*, vol. 83, pp. 734-748, 2015.

[9] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and T. Z. Shun, "Demand side management in smart grid using heuristic optimization," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, pp. 1244-1252, 2012.

[10] P. Yang, G. Tang, and A. Nehorai, "A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 884-892, 2013.

[11] M. He, S. Murugesan, and J. Zhang, "A multi-timescale scheduling approach for stochastic reliability in smart grids with wind generation and opportunistic demand," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 521-529, 2013.

[12] M. Pantoš, "Stochastic optimal charging of electric-drive vehicles with renewable energy," *Energy*, vol. 36, pp. 6567-6576, 2011.

[13] J. A. Carta and S. Velázquez, "A new probabilistic method to estimate the long-term wind speed

۰/۱۲۰	۰/۲۱۵	۹
۰/۱۲۸	۰/۵۷۲	۱۰
۰/۱۳۱	۰/۵۷۲	۱۱
۰/۱۳۵	۰/۵۷۲	۱۲
۰/۱۳۶	۰/۲۱۵	۱۳
۰/۱۳۱	۰/۵۷۲	۱۴
۰/۱۲۷	۰/۲۸۶	۱۵
۰/۱۲۲	۰/۲۷۹	۱۶
۰/۱۲۰	۰/۰۸۶	۱۷
۰/۱۱۷	۰/۰۵۹	۱۸
۰/۱۱۳	۰/۰۵۰	۱۹
۰/۱۱۰	۰/۰۶۱	۲۰
۰/۰۹۵	۰/۱۸۱	۲۱
۰/۰۹۲	۰/۰۷۷	۲۲
۰/۰۹۰	۰/۰۴۳	۲۳
۰/۰۸۹	۰/۰۳۷	۲۴

جدول ۸: اطلاعات مربوط به واحدها و شبکه بالادست [۱، ۵، ۱۶]

حداقل تولید (kW)	حداکثر تولید (kW)	هزینه روشن/خاموش شدن (\$) / ساعت	میکروتوربین
۶	۳۰	۰/۱۴	میکروتوربین
۳	۳۰	۰/۲۴	سلول سوختی
۰	۲۵	۰	فتوولتائیک
۰	۱۵	۰	توربین بادی
-۳۰	۳۰	۰	ذخیره‌ساز الکتریکی
-۳۰	۳۰	---	شبکه بالادست

جدول ۹: هزینه پیشنهادی Micro-CHP ها، تولیدهای تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز الکتریکی [۱، ۱۶]

ساعت	ESS	WT	PV	FC	MT	هزینه تولید واحد (\$/kWh)
۱	۰/۱۵۵	۰/۰۲۷	۰	۰/۱۶۶	۰/۱۰۷	۰/۱۵۵
۲	۰/۱۵۵	۰/۰۲۲	۰	۰/۱۶۶	۰/۱۰۷	۰/۱۵۵
۳	۰/۱۶۵	۰/۰۱۶	۰	۰/۱۶۷	۰/۱۰۸	۰/۱۶۵
۴	۰/۱۷۵	۰/۰۱۴	۰	۰/۱۶۷۷	۰/۱۰۸	۰/۱۷۵
۵	۰/۱۸۵	۰/۰۰۱	۰	۰/۱۶۷	۰/۱۰۹	۰/۱۸۵
۶	۰/۱۹۵	۰/۰۱۹	۰	۰/۱۶۸	۰/۱۰۹	۰/۱۹۵
۷	۰/۲۰۵	۰/۰۲۷	۰	۰/۱۶۸	۰/۱۱۰	۰/۲۰۵
۸	۰/۲۰۹	۰/۰۴۳	۰/۰۸۴	۰/۱۶۹	۰/۱۱۱	۰/۲۰۹
۹	۰/۲۱۶	۰/۰۸۱	۰/۰۸۵	۰/۱۷۰	۰/۱۱۲	۰/۲۱۶
۱۰	۰/۲۱۸	۰/۱۶۲	۰/۰۸۶	۰/۱۷۱	۰/۱۱۲	۰/۲۱۸
۱۱	۰/۲۲۵	۰/۱۹۵	۰/۰۸۷	۰/۱۷۲	۰/۱۱۶	۰/۲۲۵
۱۲	۰/۲۳۰	۰/۲۰۱	۰/۰۸۸	۰/۱۷۱	۰/۱۱۷	۰/۲۳۰
۱۳	۰/۲۳۰	۰/۱۶۲	۰/۰۸۶	۰/۱۷۰	۰/۱۱۵	۰/۲۳۰
۱۴	۰/۲۰۸	۰/۱۷۶	۰/۰۸۵	۰/۱۷۰	۰/۱۱۵	۰/۲۰۸
۱۵	۰/۲۰۰	۰/۱۴۹	۰/۰۸۴	۰/۱۷۰	۰/۱۱۵	۰/۲۰۰
۱۶	۰/۱۹۵	۰/۱۱۰	۰/۰۸۳	۰/۱۷۱	۰/۱۱۷	۰/۱۹۵
۱۷	۰/۱۹۸	۰/۰۴۶	۰/۰۸۵	۰/۱۷۳	۰/۱۱۸	۰/۱۹۸
۱۸	۰/۱۹۵	۰/۰۳۲	۰/۰۸۶	۰/۱۷۳	۰/۱۱۹	۰/۱۹۵

- [20] M. Bornapour, R.-A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, and M. Parastegari, "Optimal stochastic coordinated scheduling of proton exchange membrane fuel cell-combined heat and power, wind and photovoltaic units in micro grids considering hydrogen storage," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 308-322, 2017.
- [21] E. Farjah, M. Bornapour, T. Niknam, and B. Bahmanifirouzi, "Placement of combined heat, power and hydrogen production fuel cell power plants in a distribution network," *Energies*, vol. 5, pp. 790-814, 2012.
- [22] D. Steen, M. Stadler, G. Cardoso, M. Groissböck, N. DeForest, and C. Marnay, "Modeling of thermal storage systems in MILP distributed energy resource models," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 782-792, 2015.
- [23] H. Mortaji, S. H. Ow, M. Moghavvemi, and H. A. Almurib, "Load Shedding and Smart-Direct Load Control Using Internet of Things in Smart Grid Demand Response Management," *IEEE Transactions on Industry Applications*, on line published, pp. 1-9, 2017.
- [۲۴] د. روشن‌دوست، ر.ا. هوشمند، ا. قلی‌پور، م. نصرت‌آبادی، "طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه صنعتی مبتنی بر منابع CHP از طریق برنامه ریزی تولید و پاسخ تقاضا" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحه ۱۹۷-۲۰۹، ۱۳۹۵.
- characteristics at a potential wind energy conversion site," *Energy*, vol. 36, pp. 2671-2685, 2011.
- [14] H.-G. Kwag and J.-O. Kim, "Reliability modeling of demand response considering uncertainty of customer behavior," *Applied Energy*, vol. 122, pp. 24-33, 2014.
- [15] A. Salimbeni, M. Boi, I. Marongiu, M. Porru, and A. Damiano, "Integration of active filter and energy storage system for power quality improvement in microgrids," in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016 International Symposium on*, pp. 709-714, 2016.
- [16] M. Motevasel, A. R. Seifi, and T. Niknam, "Multi-objective energy management of CHP (combined heat and power)-based micro-grid," *Energy*, vol. 51, pp. 123-136, 2013.
- [17] L. Dong, W. Cheng, H. Bao, and Y. Yang, "Probabilistic load flow analysis for power system containing wind farms," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 1-4, 2010.
- [18] S. Mohammadi, S. Soleymani, and B. Mozafari, "Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 525-535, 2014.
- [19] A. Kavousi-Fard and T. Niknam, "Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration from the reliability point of view," *Energy*, vol. 64, pp. 342-354, 2014.