

## مدیریت بهینه و تصادفی ریزشبهه مبتنی بر سیستم فازی - عصبی تطبیقی توسط کنترل توان خط تبادلی به وسیله تجهیزات D-FACTS

مهدی احمدی جیردهی<sup>۱</sup>، استادیار؛ وحید سهرابی تبار<sup>۲</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رضا همتی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- گروه برق - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - m.ahmadi@kut.ac.ir

۲- گروه برق - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - v-sohrabi@kut.ac.ir

۳- گروه برق - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - r.hemmati@kut.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، بر روی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبهه مبتنی بر سیستم فازی-عصبی تطبیقی که در حضور بارهای الکتریکی و گرمایی، منابع انرژی تجدیدپذیر (باد و خورشید)، CHP، منابع انرژی مرسوم (میکروتوربین و بویلر)، سیستم‌های ذخیره انرژی (ذخایر الکتریکی و گرمایی) و تجهیزات D-FACTS است، تمرکز خواهد شد. تجهیزات D-FACTS بر روی خط ارتباطی بین ریزشبهه و خط اصلی نصب شده تا امکان تبادل توان افزایش یابد. در برنامه‌ریزی مطرح‌شده، سرعت باد، تابش خورشید و بارها به صورت تصادفی در نظر گرفته خواهند شد. مسئله مطرح‌شده به صورت خطی عدد صحیح مفید مدل شده و توابع هدف آن هزینه و آلودگی خواهد بود. نتایج نهایی نشان‌دهنده بهبود عملکرد ریزشبهه در حضور تجهیزات D-FACTS خواهد بود به طوری که هزینه به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت. همچنین، نشان داده خواهد شد که با استفاده از سیستم فازی-عصبی تطبیقی، با خطای بسیار پایین، زمان شبیه‌سازی به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت که در سیستم‌های مدیریتی با ابعاد بزرگ می‌تواند بسیار کاربردی باشد. مسئله تصادفی چندهدفه مطرح‌شده با استفاده از روش محدودیت افسیلون ارتقایافته حل شده و تمامی نتایج با استفاده از نرم‌افزار GAMS24.1.3/CPLEX12.5.1 به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** تجهیزات D-FACTS، برنامه‌ریزی چندهدفه، ریزشبهه، سیستم فازی-عصبی تطبیقی، مدیریت تصادفی.

## Stochastic Optimal Energy Management of Microgrid Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System by Transmission Line Power Control with D-FACTS Equipment

M. Ahmadi Jirdehi<sup>1</sup>, Assistant Professor; V. Sohrabi Tabar<sup>2</sup>, MSc Student; R. Hemmati<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: m.ahmadi@kut.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: v-sohrabi@kut.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: r.hemmati@kut.ac.ir

**Abstract:** This paper focus on optimal scheduling of microgrid based on adaptive neuro-fuzzy inference system including thermal and electrical loads, renewable energy sources (solar and wind), CHP, conventional energy sources (boiler and micro turbine), energy storage systems (thermal and electrical storage), and D-FACTS devices. D-FACTS are included in the line between main network and microgrid to achieve more power transfer to the upstream grid. In the proposed planning, wind speed, solar radiation, and loads are modeled as uncertain parameters based on the stochastic approach. Problem is expressed as a linear, mixed integer, constrained, and multi objective optimization aiming at minimizing cost and pollution at the same time. Operation improvement is illustrated in final results by considering D-FACTS as cost is decreased to a considerable amount. Also, will be shown that simulation time will be decreased to a noticeable amount that can be applicable in large scale management systems by using adaptive neuro-fuzzy inference system. The proposed multi objective and stochastic problem is solved using augmented Epsilon-constraint method. All results and calculations are calculated using GAMS24.1.3/CPLEX12.5.1.

**Keywords:** D-FACTS devices, multi objective programming, microgrid, adaptive neuro-fuzzy inference system, stochastic management.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۰ و ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴

نام نویسنده مسئول: مهدی احمدی جیردهی

نشانی نویسنده مسئول: کرمانشاه - بزرگراه امام خمینی - بعد از میدان شهدا - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - دانشکده انرژی - گروه برق.

## ۱- مقدمه

در این مطالعه، یک برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه مبتنی بر سیستم فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS<sup>۱</sup>) برای مدیریت انرژی ریزشبه ارائه خواهد شد. دلیل اصلی به‌کارگیری سیستم فازی-عصبی تطبیقی حذف روابط توربین بادی و سلول خورشیدی و استفاده از پیشینه سیستم به‌عنوان منبعی مناسب برای محاسبات خروجی تجهیزات تجدیدپذیر است. استفاده از این روش امکان حذف روابط ریاضیاتی و کاهش زمان شبیه‌سازی را فراهم می‌آورد که این امر در سیستم‌های مدیریتی با اجزاء زیاد مزیت بسیار مهمی است. همچنین، تجهیزات D-FACTS<sup>۲</sup> بر روی خط ارتباطی ریزشبه و شبکه اصلی نصب شده است تا تبادل توان با انعطاف بیش‌تری صورت بگیرد. سمت تولید شامل توربین بادی، PV<sup>۳</sup>، CHP<sup>۴</sup>، میکروتوربین و بویلر بوده درحالی‌که سمت تقاضا شامل بارهای الکتریکی و گرمایی است. همچنین، ذخایر گرمایی و الکتریکی نیز در نظر گرفته شده و ریزشبه دارای ویژگی تبادل توان با شبکه اصلی است. پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شده در این بخش شامل بار، سرعت باد و تابش خورشید است. مسئله مطرح‌شده دارای توابع هدف هزینه و آلودگی است که برای حل از روش محدودیت اسیلون ارتقایافته (AEC<sup>۱۱</sup>) استفاده شده است که از روش‌های قدرتمند حل مسائل چندهدفه است. نتایج نهایی تأییدکننده تأثیر سیستم فازی-عصبی تطبیقی و تجهیزات D-FACTS بر سرعت شبیه‌سازی و مدیریت ریزشبه هستند.

## ۲- مدل‌سازی شبکه

در این بخش مدل‌سازی بخش‌های مختلف شبکه انجام می‌شود.

## ۱-۲- توربین بادی و سلول خورشیدی

توان تولیدشده توسط توربین بادی به عوامل مختلفی مانند سرعت و جهت باد، وضعیت توربین، اندازه توربین، عملکرد دینامیکی ژنراتور و توزیع بار وابسته است. توان خروجی توربین بادی توسط دو پارامتر حداکثر و حداقل سرعت قطع باد محدود شده است. حداکثر سرعت قطع (cut-out speed) مربوط به سرعت‌های بیش از توان تحمل پره‌های توربین است و باید توربین خاموش گردد و حداقل سرعت قطع (cut-in speed) مربوط به زمانی است که استفاده از توربین اقتصادی نباشد. رابطه (۱) بیان‌کننده موارد مطرح شده است. از طرفی، توان تولیدشده توسط PV به دمای سلول‌ها و تابش خورشید بستگی دارد. برای محاسبه توان خروجی ابتدا دمای سلول‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده و در نهایت توان از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & \forall t : V^{cutin} \geq Vt \text{ and } V^{cutout} \leq Vt \\ 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot \eta^w \cdot \min(V_t, V^{nom})^3 & \forall t : V^{cutin} \leq Vt \leq V^{cutout} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_j(t) = T_{amp} + \frac{G_T(t)}{G_{T_{STC}}} \times (NOCT - 20) \quad (2)$$

ریزشبه به‌صورت‌های متفاوتی تعریف شده است. شاید بتوان روشن‌ترین مفهوم را شامل منابع تولیدی کوچک دانست که معمولاً در کنار بار مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. ریزشبه از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات عدم قطعیت را در برنامه خود در نظر گرفته و یک برنامه‌ریزی تصادفی را بررسی نموده‌اند [۷-۱]. سرعت باد، بار و تابش خورشید از مهم‌ترین پارامترهای تصادفی در مسئله هستند. برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های مسائل تصادفی بوده که در مرحله اول آن برنامه‌ریزی بهینه با توجه به نامعینی باد، خورشید و بار پیش‌بینی شده و در مرحله دوم پارامترهای دیگر همچون میزان ظرفیت بار باقی‌مانده، خرید شبکه و توان سایر منابع مرسوم به دست خواهد آمد [۱]. مدیریت انرژی احتمالاتی از دیگر جنبه‌های مدیریت انرژی ریزشبه بوده که بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۸-۱۰]. درواقع، نامعینی می‌تواند به‌صورت احتمال تفاوت بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی‌شده بیان شود. در برخی مطالعات برای افزایش دقت از روش PEMS<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی نامعینی استفاده شده است [۸]. مدیریت انرژی ریزشبه معمولاً به‌صورت برنامه‌ریزی‌های MILP<sup>۲</sup> و MINLP<sup>۳</sup> بیان می‌شود که می‌تواند توسط روش‌های ریاضیاتی یا با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند حل شود. به‌دلیل پیچیدگی مسائل برنامه‌ریزی، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بسیار گسترش یافته است. از جمله مهم‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده می‌توان به PSO<sup>۴</sup> [۱۱]، GA<sup>۵</sup> [۱۲] و MBFO<sup>۶</sup> [۱۳] اشاره کرد. از طرف دیگر، نرم‌افزارهای قدرتمند ریاضیاتی همچون GAMS [۱۴]، CPLEX [۱۵] و GUROB [۱۶] برای حل مسائل بهینه‌سازی به کار رفته‌اند. یکی دیگر از مباحث مهم در مدیریت انرژی ریزشبه، مشارکت بارها در برنامه‌ریزی است. در نظرگیری انواع مختلف بار شامل اقتصادی، خانگی و صنعتی در ریزشبه می‌تواند به مدیریت آن کمک کند. به‌عبارت‌دیگر، در نظرگیری نقش بارها در مدیریت ریزشبه و نامعینی آن‌ها غیرقابل‌انکار خواهد بود [۱۷-۱۹].

از سوی دیگر، مدیریت بهینه ریزشبه از جنبه‌های دیگری نیز بررسی شده است. در یک مطالعه مدیریت بهینه ریزشبه از نظر استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. مطالعه صورت‌گرفته بر روی سیستم مورد مطالعه و نتایج حاصل از آن در بازار برق محلی، مؤید آن است که روش پیشنهادی ضمن مقایسه و تجزیه و تحلیل ائتلاف‌های مختلف، به تعریف استراتژی‌های سازگار و مناسب منجر خواهد شد. همچنین مدل بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی شامل ایستگاه‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و متقاضیان انرژی واقع در ریزشبه برق ارائه شده است [۲۱].

تجهیز D-FACTS می‌تواند بسته به مقدار جریان سازی D-FACTS نصب شده از یک مقدار کمینه به یک مقدار بیشینه افزایش یابد؛ بنابراین، ظرفیت خط انتقال از یک مقدار ثابت به یک متغیر با محدوده خاصی تبدیل شده که باید بهینه شود. انتخاب مدل مناسب تجهیز به کاررفته جهت ارتقای عملکرد ریزشبهه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از این رو، از تجهیزات FACTS مورد استفاده در بخش توزیع (Distribution-FACTS) می‌توان استفاده نمود. مدل مورد نظر در شکل ۱ ارائه شده است. رابطه بین ولتاژ تزریقی توسط D-FACTS و ولتاژهای خط توسط رابطه (۱۲) ارائه شده است. زمانی که ولتاژ تزریقی توسط D-FACTS به خط (Vd) با جریان خط زاویه ۹۰ درجه بسازد، تجهیز نصب شده وارد مد کنترل توان راکتیو خواهد شد. از این رو، اگر ولتاژ تزریقی مثبت باشد، تجهیز وارد مد سلفی شده و اگر منفی باشد، مد خازنی اتفاق خواهد افتاد که این مورد توسط رابطه (۱۳) بیان شده است. از سوی دیگر، رابطه توان اکتیو انتقالی از خط و نسبت آن با راکتانس خط توسط رابطه (۱۴) بیان شده است.

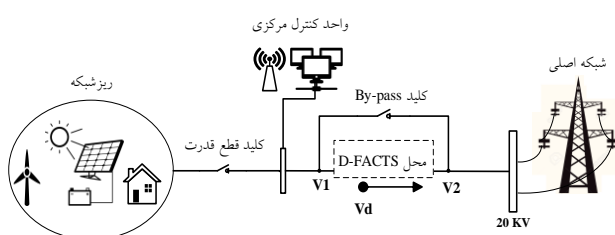
$$V_1 = V_2 + Vd \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{if } (\hat{a} = \hat{b} = 90^\circ) \\ \text{for } V_1 = V_2 \pm Vd \\ Vd > 0 \text{ inductive mode} \\ Vd < 0 \text{ capacitive mode} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{Line} = \left(\frac{V_1 \cdot V_2}{X}\right) \cdot \sin \delta \quad (14)$$

$$(P_{Buy}(t) \text{ or } P_{Sell}(t)) \leq P_{Line}^D(t) \quad (15)$$

$$P_{Line}^D(t) = P_{Line} + P_{Line}^{D-FACTS}(t) \quad (16)$$



شکل ۱: مدل ریزشبهه مورد مطالعه

همچنین، روابط (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نشان‌دهنده قید انتقال توان و توان خط پس از نصب D-FACTS است.

### ۳- سیستم فازی- عصبی تطبیقی

سیستم فازی- عصبی تطبیقی ترکیبی از منطق فازی به همراه شبکه عصبی است که امکان استفاده از ویژگی‌های هر دو مورد را در یک زمان فراهم آورده است [۲۲]. ساختار شبکه نمونه شامل دو ورودی و یک خروجی در شکل ۲ ارائه شده است. روابط سیستم فازی- عصبی

$$P_{PV}(t) = \left[ \left[ P_{PV,STC} \times \frac{G_T(t)}{G_{T,STC}} \times (1 - \gamma \times (T_j(t) - T_{j,STC})) \right] \times \left( N_{PVs} \times N_{PVp} \right) \right] \quad (3)$$

### ۲-۲- سیستم ذخیره انرژی

در این بخش، مدل سازی ذخیره‌کننده‌های گرمایی و الکتریکی انجام شده است. هماهنگی بین ذخیره‌کننده با سایر اجزاء ریزشبهه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. ذخیره‌کننده اجازه می‌دهد تا مقدار انرژی اضافی یا انرژی ضروری برای ساعات آینده ذخیره شده تا در مواقع لزوم مصرف گردد. از این رو مدل سازی این سیستم‌ها در این بخش انجام شده است. توان خروجی ذخیره‌کننده الکتریکی توسط رابطه (۴) بیان شده است.

$$P_{ES}(t) = E_S(t) - E_S(t-1) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$E_S^{\min} \leq E_S(t) \leq E_S^{\max} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_S^{\min} - E_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_{ES}(k) \leq E_S^{\max} - E_S(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{cases} \quad (6)$$

$$E_S(0) = E_S(T) \quad (7)$$

همچنین، توان خروجی ذخیره‌کننده گرمایی توسط رابطه (۸) بیان شده است.

$$P_{TS}(t) = TE_S(t) - TE_S(t-1) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

$$TE_S^{\min} \leq TE_S(t) \leq TE_S^{\max} \quad (9)$$

$$\begin{cases} TE_S^{\min} - TE_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_{TS}(k) \leq TE_S^{\max} - TE_S(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{cases} \quad (10)$$

$$TE_S(0) = TE_S(T) \quad (11)$$

انرژی موجود در ذخیره‌کننده باید مقدار مشخصی داشته باشد که این قید توسط رابطه (۵) بیان شده است. محدودیت شارژ و دشارژ در هر بازه زمانی توسط رابطه (۶) بیان شده که از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار انرژی ذخیره‌کننده در ابتدا و انتهای بازه کاری باید برابر باشد که این مورد توسط رابطه (۷) مطرح شده است. روابط (۹-۱۱) برای ذخیره‌کننده گرمایی است که کاملاً مشابه ذخیره‌کننده الکتریکی است و نیازی به تعریف مجدد نیست.

### ۳-۲- مدل سازی تجهیزات D-FACTS

در برنامه‌ریزی و مدیریت ریزشبهه، ظرفیت خط انتقال بین ریزشبهه و شبکه اصلی به‌عنوان یک قید در نظر گرفته می‌شود. با نصب یک تجهیز D-FACTS می‌توان این قید را بهبود بخشید. به عبارت دیگر، توان عبوری از خط ارتباطی یک مقدار ثابت بوده که با نصب یک

$$C_{MT}(t) = \left( \sum_{t=1}^T \left( \frac{C_{Fuel} \cdot P_{MT}(t) \cdot \theta}{\eta_{MT}} + C_{OP-MT} \cdot P_{MT}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-MT} \right) \quad (22)$$

روابط (۲۲-۱۸) به ترتیب نشان دهنده هزینه‌های CHP، بویلر، توربین بادی، PV و میکروتوربین هستند. جزء اول روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۲) نشان دهنده هزینه تولید و بخش‌های دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده هزینه عملکرد و حفاظت است. همچنین، بخش‌های اول و دوم روابط (۲۰) و (۲۱) به ترتیب نشان دهنده هزینه عملکرد و حفاظت توربین بادی و سلول خورشیدی می‌باشد.

$$C_{Buy}(t) = \sum_{t=1}^T C_{Buy} \cdot P_{Buy}(t) \cdot \theta \quad (23)$$

$$C_{Sell}(t) = \sum_{t=1}^T C_{Sell} \cdot P_{Sell}(t) \cdot \theta \quad (24)$$

$$C_{ES}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-ES} \cdot P_{ES}(t) \cdot \theta + C_{M-ES} \quad (25)$$

$$C_{TS}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-TS} \cdot P_{TS}(t) \cdot \theta + C_{M-TS} \quad (26)$$

روابط (۲۶-۲۳) به ترتیب نشان دهنده هزینه خرید، هزینه فروش، هزینه سیستم ذخیره انرژی الکتریکی و گرمایی است. بخش‌های اول و دوم روابط (۲۵) و (۲۶) به ترتیب نشان دهنده هزینه عملکرد و حفاظت سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی و گرمایی است.

#### ۴-۱-۲- آلودگی ریزشکه

تمام آلودگی‌هایی که ریزشکه تولیدکننده آن بوده یا در تولید آن نقش داشته است، توسط رابطه (۲۷) بیان شده است.

$$\begin{cases} F(Emission) = \sum_{t=1}^T (EM_{CHP}(t) + EM_{MT}(t) + \\ EM_{MG}(t) + EM_{Boiler}(t)) \end{cases} \quad (27)$$

که در این رابطه داریم:

$$EM_{CHP}(t) = \sum_{t=1}^T P_{CHP}(t) \cdot EF_{CHP} \cdot \theta \quad (28)$$

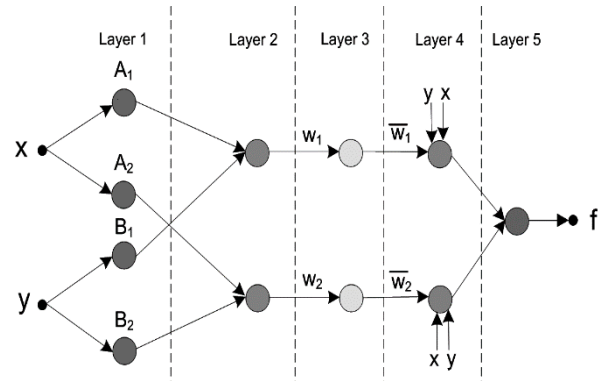
$$EM_{MT}(t) = \sum_{t=1}^T P_{MT}(t) \cdot EF_{MT} \cdot \theta \quad (29)$$

$$EM_{MG}(t) = \sum_{t=1}^T P_{Buy}(t) \cdot EF_{MG} \cdot \theta \quad (30)$$

$$EM_{Boiler}(t) = \sum_{t=1}^T P_{Boiler}(t) \cdot EF_{Boiler} \cdot \theta \quad (31)$$

روابط (۳۱-۲۸) به ترتیب نشان دهنده آلودگی تولیدشده به وسیله CHP، میکروتوربین، شبکه اصلی و بویلر است.

پیش از این به طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۳-۲۴]؛ بنابراین برای بررسی بیشتر می‌توان به منابع ذکر شده مراجعه کرد.



شکل ۲: ساختار ساده سیستم فازی-عصبی تطبیقی

#### ۴- فرمول‌بندی مسئله

تمامی روابط مربوط به مدیریت انرژی و قیود در این بخش بیان شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- توابع هدف

هدف اصلی روش ارائه شده، به دست آوردن توان‌های تمامی تولیدکننده‌ها، نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده و سایر پارامترهای مجهول است که در رابطه (۱۷) بیان شده و باید تحت قیودی به دست آیند. همان‌طور که بیان شد، دو تابع هدف مهم یعنی هزینه و آلودگی ریزشکه با استفاده از روش AEC به طور هم‌زمان بهینه خواهند شد.

#### ۴-۱-۱- هزینه کلی ریزشکه

هزینه کلی ریزشکه به صورت رابطه (۱۷) بیان شده است.

$$\begin{cases} F(Cost) = \sum_{t=1}^T (C_{CHP}(t) + C_{Wind}(t) + C_{Boiler}(t) + C_{PV}(t) \\ C_{Buy}(t) - C_{Sell}(t) + C_{ES}(t) + C_{TS}(t) + C_{MT}(t)) \end{cases} \quad (17)$$

که در این رابطه، متغیرهای زیر تعریف می‌شوند:

$$C_{CHP}(t) = \left( \sum_{t=1}^T \left( \frac{C_{Fuel} \cdot P_{CHP}(t) \cdot \theta}{\eta_{CHP}} + C_{OP-CHP} \cdot P_{CHP}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-CHP} \right) \quad (18)$$

$$C_{Boiler}(t) = \left( \sum_{t=1}^T \left( \frac{C_{Fuel} \cdot P_{Boiler}(t) \cdot \theta}{\eta_{Boiler}} + C_{OP-Boiler} \cdot P_{Boiler}(t) \cdot \theta \right) + C_{M-Boiler} \right) \quad (19)$$

$$C_{Wind}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-WT} \cdot P_{WT}(t) \cdot \theta + C_{CONS-WT} \quad (20)$$

$$C_{PV}(t) = \sum_{t=1}^T C_{OP-PV} \cdot P_{PV}(t) \cdot \theta + C_{CONS-PV} \quad (21)$$

#### ۴-۱-۳- قیود مسئله

توابع هدف مطرح شده، معمولاً مبتنی بر قیدهای مختلفی بهینه خواهند شد. این قیدها برای مسائل مختلف گوناگون بوده و جنبه‌های مختلفی را شامل می‌شوند. به‌عنوان مثال در این بخش قیدهایی همچون قید تعادل بار، قید ذخیره‌کننده انرژی و یا قیدهای دیگری بیان خواهد شد.

$$\begin{cases} E_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + \\ P_{CHP}(t) + P_{ES}(t) + P_{Buy}(t) - P_{Sell}(t)) \end{cases} \quad (32)$$

$$T_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (P_{Boiler}(t) + P_{CHP}(t) \cdot TF_{CHP}(t) + P_{TS}(t)) \quad (33)$$

$$P_{CHP} \leq P_{CHP}^{\max} \quad (34)$$

$$P_{Boiler} \leq P_{Boiler}^{\max} \quad (35)$$

$$P_{MT} \leq P_{MT}^{\max} \quad (36)$$

$$\begin{cases} P_{ES}(t) / \eta^E_D \leq P_{E-dech}^{\max} & \text{for disch } (P_{ES}(t) > 0) \\ -\eta^E_C \cdot P_{ES}(t) \leq P_{E-ch}^{\max} & \text{for ch } (P_{ES}(t) < 0) \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} P_{TS}(t) / \eta^T_D \leq P_{T-dech}^{\max} & \text{for disch } (P_{TS}(t) > 0) \\ -\eta^T_C \cdot P_{TS}(t) \leq P_{T-ch}^{\max} & \text{for ch } (P_{TS}(t) < 0) \end{cases} \quad (38)$$

$$R_m(t) = \left( \frac{Total\ capacity(t) - Peak\ load(t)}{Peak\ load(t)} \right) \times 100\% \quad (39)$$

$$R_m^{\min}(t) \leq R_m(t) \leq R_m^{\max}(t) \quad (40)$$

$$(P_{Buy}(t) \text{ or } P_{Sell}(t)) \leq P_{Line} \quad (41)$$

تمامی قیود مسئله توسط روابط فوق بیان شده است. رابطه‌های (۳۲) و (۳۳) به ترتیب نشان‌دهنده تعادل توان الکتریکی و گرمایی هستند. روابط (۳۴-۳۶) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت توان تولیدشده توسط CHP، بویلر و میکروتوربین است. روابط (۳۷) و (۳۸) نشان‌دهنده محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده‌های گرمایی و الکتریکی است. قید (۳۹) نشان‌دهنده ذخیره موجود در ریزشبهه و قید (۴۰) محدوده قید ذخیره را نشان می‌دهد. همچنین، رابطه اصلی توان عبوری از خط انتقال بدون D-FACTS توسط (۴۱) بیان شده است.

#### ۵- روش حل مسئله

برای حل مسائل با بیش از یک تابع هدف روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به وجود دو تابع هزینه و آلودگی و اهمیت بهینه‌سازی هم‌زمان این دو تابع از روش AEC استفاده شده که از روش‌های قدرتمند بهینه‌سازی توابع چندهدفه است [۲۵]. در این روش، یکی از توابع به‌عنوان یک قید برای تابع دیگر در نظر گرفته شده تا امر

بهینه‌سازی در مرحله اول صورت گیرد؛ سپس تابع بهینه‌شده به‌عنوان یک قید برای تابع دیگر در نظر گرفته می‌شود. این امر تا رسیدن به یک درصد خاصی از خطا در بهینه‌سازی ادامه می‌یابد [۲۶]. (۴۲) و (۴۳) روابط نهایی این روش را پس از ساده‌سازی ریاضیاتی نشان می‌دهند. از سوی دیگر، با توجه به تصادفی بودن مسئله و تولید سناریوهای بسیار زیاد، تنها از بخشی از سناریوها با بیش‌ترین احتمال و خطر برای عملکرد ریزشبهه استفاده شده است.

$$\max(f_1(x) + \delta \times (s_1 + \dots + s_p))$$

subject to

$$f_2(x) - s_2 = e_2$$

$$f_3(x) - s_3 = e_3 \quad (42)$$

...

$$f_p(x) - s_p = e_p$$

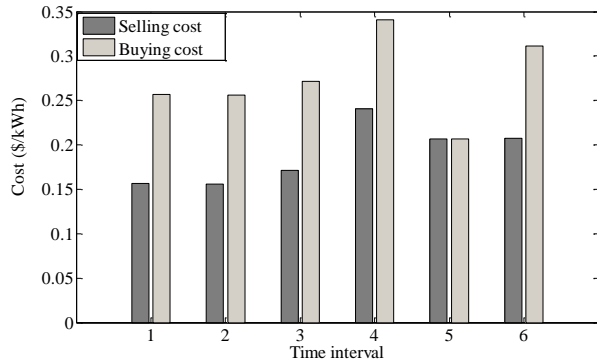
$$x \in s \text{ and } s_i \in R^+$$

$$\max(f_1(x) + eps \times (s_2 / r_2 + \dots + s_p / r_p)) \quad (43)$$

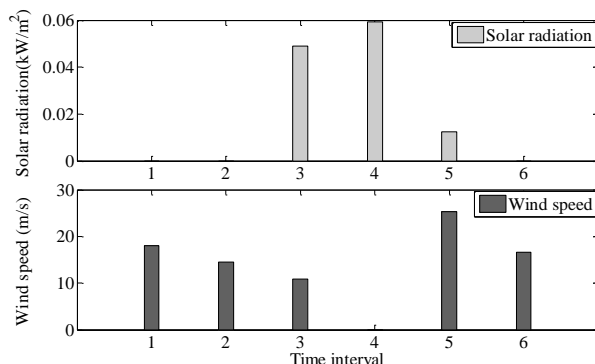
که در این روابط  $\delta$  یک مقدار بسیار کوچک (۰/۰۰۱) تا (۰/۰۰۰۰۰۱) است. بردار متغیرهای تصمیم، توابع هدف، ناحیه ممکن و بازه  $i$  امین تابع هدف به ترتیب توسط  $x$ ،  $f_p(x)$ ،  $r_i$  نمایش داده شده است. رابطه (۴۳) فرمول نهایی مورد استفاده در این روش خواهد بود.

#### ۶- سیستم تحت مطالعه

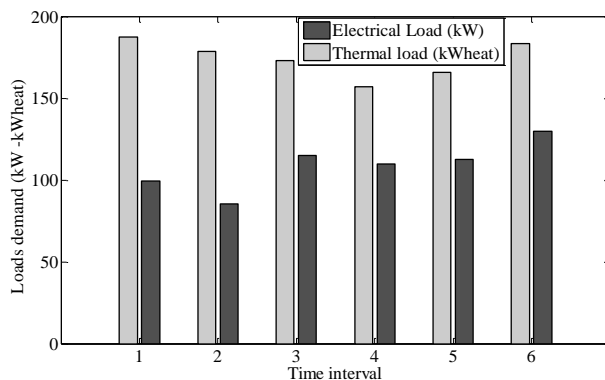
ریزشبهه مورد مطالعه به صورت گره (بدون خط ارتباطی) و شامل بار الکتریکی و گرمایی، سلول خورشیدی، CHP، میکروتوربین، ذخیره‌کننده گرمایی و الکتریکی است. همچنین، یک D-FACTS بر روی خط اصلی بین ریزشبهه و شبکه اصلی نصب شده است تا تبادل توان با انعطاف بیش‌تری صورت بگیرد. مدیریت انرژی برای ۲۴ ساعت آینده که به ۶ بازه ۴ ساعته تقسیم شده، انجام خواهد شد. پارامترهای تصادفی سرعت باد، تابش خورشید و بارهای الکتریکی و گرمایی خواهند بود که دارای ۳۰٪ انحراف از مقدار قطعی برای تولید سناریو هستند. به دلیل تولید سناریو بسیار زیاد، تنها ۵۰ سناریو با احتمال بالا و بیش‌ترین خطر برای عملکرد ریزشبهه انتخاب شده است؛ که این امر سبب افزایش مقاومت ریزشبهه در مقابل نوسانات خواهد شد. همچنین، میزان ذخیره ۱۰٪ تا ۲۰٪ حداکثر بار، هزینه سوخت تجهیزات ۰/۰۲۷ واحد به ازای هر کیلووات ساعت و ضریب تبدیل CHP، ۱/۳ خواهد بود. فلوچارت کلی حل مسئله در شکل ۳ ارائه شده است که در ادامه روند حل مسئله توسط آن بیان خواهد شد. سایر مقادیر اولیه در شکل‌های ۴-۶ و جدول‌های ۷-۱ دسته‌بندی شده‌اند. با توجه به فلوچارت، روند حل مسئله شامل چهار بخش کلی است:



شکل ۴: هزینه خرید و فروش [۲۷]



شکل ۵: سرعت باد و تابش خورشید



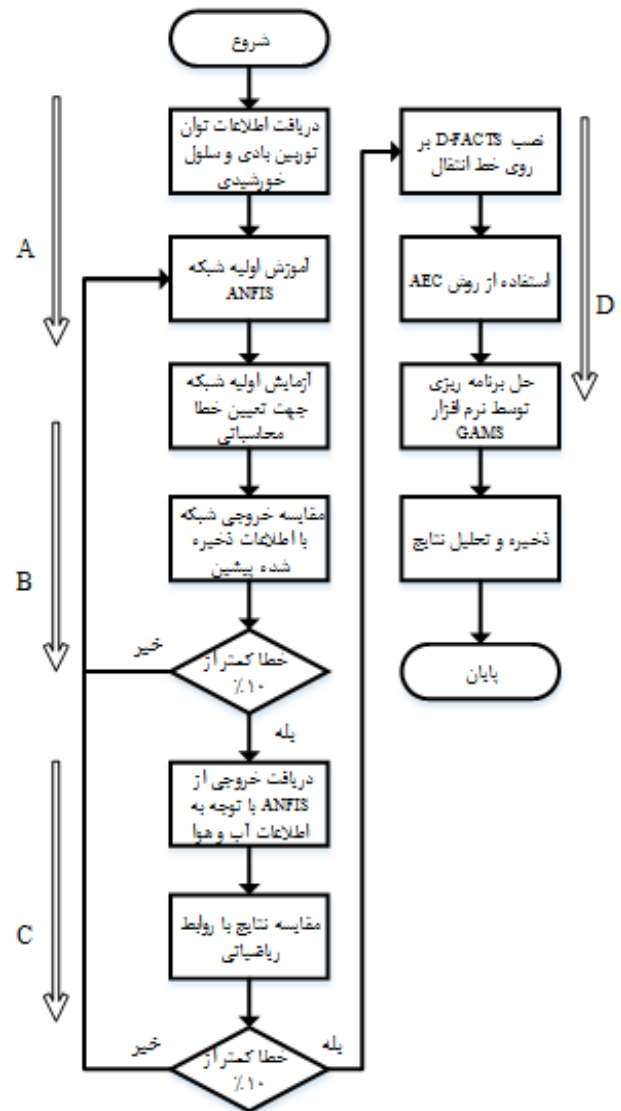
شکل ۶: بار الکتریکی، گرمایی [۱۳]

جدول ۱: ضرایب آلودگی

نوع آلودگی	ضرایب آلودگی (kg/Mwh)			
	MT	Boiler	CHP	Grid
CO <sub>2</sub>	۷۲۴	۸۴۵	۸۲۲	۹۲۲
SO <sub>2</sub>	۰/۰۰۳۶	۲/۵۴۵	۰/۰۰۸۵	۳/۵۸۳
NO <sub>x</sub>	۰/۲	۱/۸۱۲	۰/۳	۲/۲۹۵

جدول ۲: مشخصات D-FACTS و خط انتقال

نوع پارامتر	ظرفیت (kW)	
	حداقل	حداکثر
P <sub>Line</sub>	۰	۲۰
P <sub>Line</sub> <sup>FACTS(t)</sup>	۰	۲۰



شکل ۳: فلوجارت حل مسئله

A: اطلاعات اولیه شامل توان‌های خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی به‌ازای شرایط آب و هوایی جمع‌آوری شده و دسته‌بندی خواهد شد.

B: توسط اطلاعات به‌دست‌آمده، شبکه ANFIS آموزش اولیه را فراگرفته تا آماده استفاده به‌جای روابط ریاضی توربین بادی و سلول خورشیدی شود. میزان خطای شبکه نیز در این بخش بررسی می‌شود.

C: در این قسمت با توجه به شرایط آب و هوایی خروجی توربین بادی و سلول خورشیدی از شبکه ANFIS اخذ خواهد شد و این اطلاعات با مقادیر به‌دست‌آمده از فرمول‌های ریاضیاتی مقایسه شده تا در صورت وجود خطا بیش‌ازحد مجاز اصلاحات شبکه انجام شود و محاسبات تکرار شود.

D: در قسمت آخر شبیه‌سازی تمامی مقادیر به‌دست‌آمده در حضور تجهیز D-FACTS به نرم‌افزار داده خواهد شد تا برنامه‌ریزی نهایی انجام شود و تحلیل نتایج نهایی صورت گیرد.

جدول ۷: ظرفیت و تعداد تولیدکننده

نوع تولیدکننده	محدوده توان (kW- kW <sub>heat</sub> )		تعداد n
	حداقل	حداکثر	
CHP	۰	۹۰	۱
Boiler	۰	۲۵۰	۱
MT	۰	۳۰	۱
WT	۰	۸۰	۱
PV	۰	۲۵	۴

جدول ۳: پارامترهای توربین بادی و سلول خورشیدی [۲۸]

T <sub>amp</sub> (°C)	۲۰	V <sup>cut-out</sup> (m/s)	۲۵
T <sub>jsc</sub> (°C)	۲۵	N <sub>PVs</sub>	۷۰
GT <sub>SCR</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	۱	N <sub>PVp</sub>	۳۰
NOCT (°C)	۴۵/۵	γ	٪۰/۰۴۳
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	۱/۲۳	A (m <sup>2</sup> )	۱۰۰
V <sup>nom</sup> (m/s)	۱۲	P <sub>Pv, STC</sub> (kW)	۰/۱۶۵
V <sup>cut-in</sup> (m/s)	۵	GT <sub>NOCT</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	۰/۸

### ۷- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی‌های این بخش در چند قسمت بیان شده است تا نتایج به‌طور کامل تحلیل گردد.

#### ۷-۱- تأثیر تصادفی و قطعی بودن مسئله

برای نشان دادن تأثیر عدم قطعیت و مزیت‌های برنامه‌ریزی تصادفی، نتایج نهایی مربوط به تصادفی و قطعی بودن مسئله به‌ترتیب در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. با مقایسه نتایج نهایی دیده می‌شود که در حالت تصادفی هزینه و آلودگی به‌ترتیب دارای ۱۱۷٪ و ۱۰۹٪ افزایش بوده است. همچنین، در حالت قطعی میکروتوربین در طول چهار بازه اول در مدار نبوده است. درحالی‌که در حالت تصادفی با در مدار قرار گرفتن میکروتوربین آلودگی افزایش یافته است. این مورد که تولیدات میکروتوربین و CHP در بازه زمانی پنجم و در حالت قطعی بیش‌تر از حالت تصادفی است، حائز اهمیت است. مسئله مطرح‌شده به‌دلیل افزایش تولید توربین بادی در حالت تصادفی می‌باشد.

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی در حالت تصادفی

پارامترها	بازه زمانی					
	۰-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۶	۱۶-۲۰	۲۰-۲۴
P <sub>CHP</sub> (kW)	۶۹/۳۱	۶۴/۴۴	۵۲/۴۷	۷۰/۶۴	۸۵/۰۶	۸۵/۷۰
P <sub>MT</sub> (kW)	۰/۹۸	۲/۷۴	۳/۴۵	۵/۱۶	۱۰/۲	۸/۲۵
P <sub>Boiler</sub> (kW <sub>heat</sub> )	۱۲۸/۰۴	۱۱۸/۶۸	۱۴۰/۹۹	۹۸/۰۱۱	۸۸/۲۱۵	۱۰۹/۶۵
P <sub>WT</sub> (kW)	۶۲/۷	۵۵/۹۶۵	۳۷/۸۴۷	۰	۱۷/۲۴۳	۶۱/۱۲۵
P <sub>Pv</sub> (kW)	۰	۰	۶۲/۵۳۳	۷۴/۵۶۲	۱۵/۹۲۷	۰
P <sub>ES</sub> (kW)	۵	-۱/۶۵	۰/۶۲۸	-۰/۴۷۸	۳/۳۷۴	-۱/۸۷۴
P <sub>TS</sub> (kW)	۵	۱۰/۲	-۳	-۳	-۱/۵۳۷	-۲/۲۶۶
P <sub>Sell</sub> (kW)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۰	۰
P <sub>Buy</sub> (kW)	۰	۰	۰	۰	۲/۲۵	۱/۲۳۶

۲۱۰/۲۵ : هزینه کلی (\$) )

۴۰۴۶/۱ : آلودگی (kg)

۱۴/۱۲ : زمان شبیه‌سازی (s)

برای نشان دادن مقاومت و پاسخ‌گویی مناسب روش تصادفی نسبت به روش قطعی ۱۰٪ از تولید توربین بادی و CHP کاهش داده‌شده تا تأثیر آن در بار الکتریکی و گرمایی نشان داده شود. نتایج این نوسانات در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، در حالت تصادفی قید مربوط به ذخیره (۴۰) در هیچ

جدول ۴: ضرایب باتری و ضرایب مؤثر

η <sub>CHP</sub>	۰/۳۵	η <sup>w</sup>	۰/۵۹
η <sub>Boiler</sub>	۰/۸	η <sup>ED</sup>	۰/۹۵
η <sub>MT</sub>	۰/۳	η <sup>TC</sup>	۰/۹۸
η <sup>EC</sup>	۰/۹۵	η <sup>TD</sup>	۰/۹۸
E <sub>S</sub> <sup>max</sup> (kWh)	۴۰	P <sub>E-dech</sub> <sup>max</sup> (kW)	۲۰
E <sub>S</sub> <sup>min</sup> (kWh)	۲	P <sub>E-ch</sub> <sup>max</sup> (kW)	۲۰
TE <sub>S</sub> <sup>max</sup> (kWh)	۴۰	P <sub>T-dech</sub> <sup>max</sup> (kW)	۲۰
TE <sub>S</sub> <sup>min</sup> (kWh)	۲	P <sub>T-ch</sub> <sup>max</sup> (kW)	۲۰

جدول ۵: مشخصات ANFIS

پارامترها	توربین بادی	سلول خورشیدی
نوع	Sugeno	Sugeno
ورودی/خروجی	۱/۱	۱/۱
تعداد توابع عضویت برای هر ورودی	۳	۳
تعداد توابع عضویت برای هر خروجی	۳	۳
نوع تابع عضویت	Grid partition	Grid partition
میزان خطا	۰/۱	۰/۱
روش بهینه‌سازی	Hybrid	Hybrid
تعداد گره	۱۶	۱۶
تعداد پارامترهای خطی	۳	۳
تعداد پارامترهای غیرخطی	۹	۹
تعداد کل پارامترها	۱۲	۱۲
تعداد جفت اطلاعات آموزشی	۶۰	۶۰
تعداد قواعد فازی	۳	۳
تعداد تکرار	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۶: هزینه اجزاء ریزشبکه

نوع المان	هزینه (\$)	
	نگهداری و ثابت (\$)	عملکرد (\$)
CHP	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
Boiler	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
MT	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴
WT	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
PV	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
ES	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴
TS	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴

**۷-۲- تأثیر به کارگیری تجهیزات D-FACTS**

با اضافه کردن تجهیزات D-FACTS به خط ارتباطی، قید توان عبوری از خط (۴۱) به (۱۵) و (۱۶) تغییر می کند. به عبارت دیگر، ظرفیتی که باید توسط تجهیزات D-FACTS به خط اصلی اضافه شود به دست خواهد آمد. نتایج نهایی مربوط به حضور D-FACTS در جدول ۱۰ و شکل ۹ ارائه شده است. با مقایسه جدول ۱۰ و ۸، هزینه در حالت عدم حضور D-FACTS از مقدار ۱۷۰/۹۹۷ واحد به ۲۱۰/۲۵ واحد افزایش یافته است که دلیل اصلی آن کاهش فروش به شبکه اصلی است. از سوی دیگر، آلودگی تولیدشده توسط ریزشکه برخلاف انتظار از مقدار ۴۰۰۷/۷۱ کیلوگرم به ۴۰۴۶/۱ کیلوگرم افزایش یافته است. دلیل اصلی این مورد این است که با کاهش توان تولیدی CHP، بارهای گرمایی بیش تری باید توسط بویلر تأمین گردد؛ بنابراین آلودگی افزایش خواهد داشت. همان طور که در جدول ۱۰ دیده می شود، به دلیل هزینه و بار کم در بازه زمانی اول (۰-۴)، بیش تر توان مورد نیاز توسط CHP، توربین بادی و بویلر تأمین می شود. همچنین، ۴۰ کیلووات برای افزایش سود به شبکه اصلی فروخته شده است. از طرف دیگر، ذخیره کننده های انرژی در این بازه دارای شارژ اولیه بوده اند. در طول بازه زمانی دوم (۴-۸)، بارهای الکتریکی و گرمایی کاهش داشته اند و توان تولیدی توربین بادی از ۶۲/۷ کیلووات به ۵۵/۹۶ کیلووات کاهش یافته است. در نتیجه، توان تولیدی CHP، بویلر و میکروتوربین کاهش یافته است. از سوی دیگر، توان گرمایی تولیدی مازاد ذخیره شده است. در طول بازه زمانی سوم (۸-۱۲)، بار الکتریکی افزایش یافته اما بار گرمایی برخلاف آن کاهش یافته است. همچنین، توان تولیدی توسط سلول خورشیدی از صفر به مقدار ۶۲/۵۳۳ کیلووات افزایش یافته است. از این رو، توان تولیدشده به وسیله CHP کاهش یافته و توان میکروتوربین مقداری افزایش یافته تا توان آلودگی کمتری تولید شود. از آنجایی که بخشی از توان گرمایی توسط CHP تأمین می گردد، با کاهش توان تولیدی آن، توان تولیدشده توسط بویلر از مقدار ۹۷/۹۴۷ کیلووات گرمایی به ۱۲۱/۲۵۱ کیلووات گرمایی افزایش یافته است. به دلیل کاهش توان تولیدی توربین بادی از ۳۷/۸۴۷ کیلووات به صفر در بازه زمانی چهارم، این بازه از اهمیت زیادی برای ریزشکه برخوردار است. در این بازه، توان تولیدی تجهیزات افزایش یافته است و تنها توان بویلر کاهش یافته است که دلیل آن افزایش توان CHP بوده است. با افزایش توان الکتریکی و کاهش توان بویلر، به ترتیب ذخیره کننده الکتریکی شارژ و ذخیره کننده گرمایی دشارژ شده است. در بازه زمانی بعدی (۱۶-۲۰)، بار الکتریکی و گرمایی افزایش یافته است. همچنین، توان تولیدی توسط سلول خورشیدی به دلیل شرایط جوی کاهش یافته که در نتیجه، توان تولیدی توسط تجهیزات افزایش یافته و درصدی از توان مورد نیاز توسط شبکه اصلی تأمین شده است. در آخرین بازه (۲۰-۲۴)، توان توربین بادی افزایش یافته که دلیل آن بهبود سرعت باد بوده است. در این بازه بارهای الکتریکی و گرمایی افزایش یافته اند که باعث افزایش

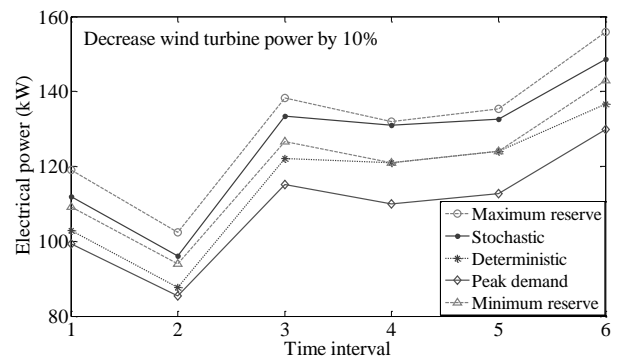
بازهای نقض نشده است. در حالی که در حالت قطعی این قید همواره نقض شده است. علاوه بر این، حتی در حالت تصادفی امکان مقاومت در مقابل نوسانات بیش تر وجود نیز وجود دارد؛ بنابراین، این افزایش هزینه و آلودگی در حالت تصادفی توجیه پذیر بوده و برنامه ریزی تصادفی ملاک اصلی مقایسات قرار خواهد گرفت.

**جدول ۹: نتایج شبیه سازی در حالت قطعی**

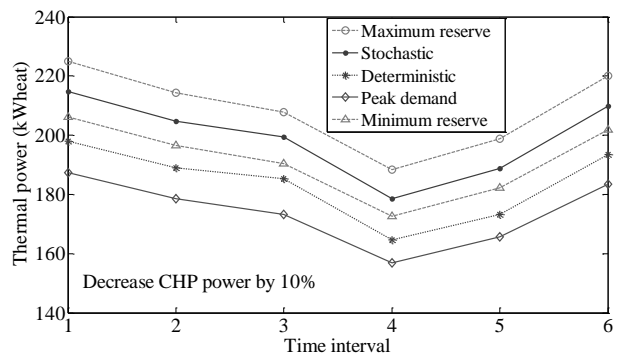
پارامترها	بازه زمانی					
	۰-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۶	۱۶-۲۰	۲۰-۲۴
$P_{CHP}$ (kW)	۶۱/۴۷۵	۵۴/۲۰۷	۳۲/۳۵۲	۵۸/۷۸۴	۹۰	۸۳/۱۹
$P_{MT}$ (kW)	۰	۰	۰	۰	۱۰/۶۷۷	۰
$P_{Boiler}$ (kW <sub>heat</sub> )	۱۲۱/۲۳	۱۱۴/۰۱	۱۵۱/۴۴	۹۹/۱۹۳	۶۸/۲۲۶	۹۶/۶۱۶
$P_{WT}$ (kW)	۶۲/۷	۶۲/۷	۴۶/۱۹۳	۰	۰	۶۲/۷
$P_{PV}$ (kW)	۰	۰	۶۸/۱۵۲	۸۲/۱۶۱	۱۷/۳۵۹	۰
$P_{ES}$ (kW)	۵	-۳	۰	۰	۶	-۳
$P_{TS}$ (kW)	۵	۱۲	-۳	-۳	-۳	-۳
$P_{Sell}$ (kW)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۰	۰
$P_{Buy}$ (kW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰

(\$) هزینه کلی: ۱۷۸/۶۸

(kg) آلودگی: ۳۶۹۶



**شکل ۷: نتایج شبیه سازی مقاومت شبکه برای بار الکتریکی در حالت کاهش ۱۰ درصدی تولید توربین بادی**



**شکل ۸: نتایج شبیه سازی مقاومت شبکه برای بار گرمایی در حالت کاهش ۱۰ درصدی تولید CHP**



کمتر خواهد شد؛ بنابراین، نتایج نهایی که شامل مدیریت انرژی با استفاده از سیستم فازی-عصبی تطبیقی است به همراه زمان شبیه سازی در جدول ۱۱ ارائه شده است. با مقایسه جدول ۱۱ و ۸ دیده می شود که میزان هزینه و آلودگی در این روش و در مقایسه با روش ریاضیاتی به ترتیب دارای ۰/۱۸٪ و ۳/۲٪ خطا بود اما زمان شبیه سازی با استفاده از روش فازی-عصبی ۱۹٪ کاهش داشته است. همچنین، برای کاهش میزان خطا می توان از اطلاعات بیش تری برای ورودی سیستم فازی-عصبی استفاده کرد. از این رو، با توجه به کاهش زمان شبیه سازی و میزان خطای کم نسبت به روش ریاضیاتی و امکان کاهش این خطا، این روش می تواند برای سیستم های مدیریتی بزرگ با زمان اجرای بسیار بالا مناسب و کاربردی باشد.

جدول ۱۱: نتایج شبیه سازی تصادفی با استفاده از سیستم فازی-عصبی تطبیقی

پارامترها	بازه زمانی					
	۰-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۶	۱۶-۲۰	۲۰-۲۴
$P_{CHP}$ (kW)	۶۸/۷۶۸	۶۴/۲۹۷	۵۱/۷۳۹	۷۰/۱۸۹	۸۵/۰۶۱	۸۵/۳۵۸
$P_{MT}$ (kW)	۰/۹۸	۲/۷۴	۳/۴۵	۵/۱۶	۱۰/۲	۸/۲۵
$P_{Boiler}$ (kW <sub>heat</sub> )	۱۲۸/۵	۱۱۸/۸۷	۱۴۱/۹۵	۹۸/۶۰۵	۸۸/۲۱۵	۱۱۰/۱
$P_{WT}$ (kW)	۶۳/۰۱۴	۵۶/۲۷۸	۳۸/۰۷۸	۰	۱۷/۲۴۳	۶۱/۴۳۸
$P_{PV}$ (kW)	۰	۰	۶۲/۸۷۴	۷۴/۹۷۲	۱۶/۰۱۴	۰
$P_{ES}$ (kW)	۵	-۱/۸۱۸	۰/۷۹۶۸	-۰/۴۷۸	۳/۳۸۳	-۱/۸۸۳
$P_{TS}$ (kW)	۵	۱۰/۲	-۳	-۳	-۱/۵۳۷	-۲/۲۶۶
$P_{Sell}$ (kW)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۰	۰
$P_{Buy}$ (kW)	۰	۰	۰	۰	۲/۲۵	۱/۲۷۸

هزینه کلی: ۲۱۰/۰۷ (\$)   
 آلودگی: ۴۰۴۹/۳ (kg)   
 زمان شبیه سازی: ۱۱/۵۶ (s)

### ۸- نتیجه گیری

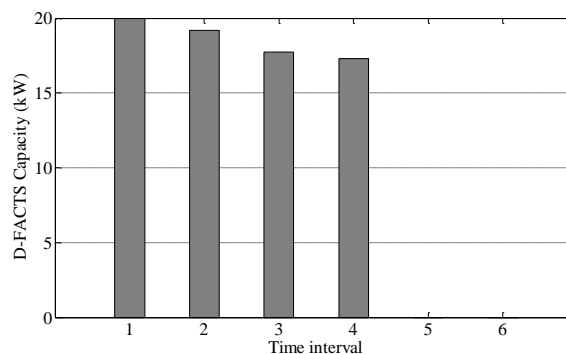
مدیریت انرژی ریزشبه از مفاهیم مهم مورد توجه در چند سال اخیر بوده است. از این رو، دو تابع آلودگی و هزینه در بهره برداری از ریزشبه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به علاوه، در نظر گیری عدم قطعیت نیز از مفاهیم بسیار مهم در مقاومت ریزشبه بوده که در نظر گیری آن مقاومت ریزشبه را بالا می برد. با توجه به اهمیت موضوع، مدیریت انرژی تصادفی چندهدفه در این مقاله ارائه شده است. به وسیله روش تولید و کاهش سناریو تنها ۵۰ سناریو با احتمال بالا در نظر گرفته شده است. برای افزایش توان عبوری از خط انتقال از تجهیزات D-FACTS بر روی خط اصلی استفاده شده است. نتایج نهایی، نشان دهنده بهبود عملکرد ریزشبه با وجود D-FACTS بوده به طوری که هزینه از مقدار ۲۱۰/۲۵ واحد به ۱۷۰/۹۹۷ واحد رسیده است. از سوی دیگر آلودگی ریزشبه برخلاف انتظار کاهش یافته که دلیل آن کاهش توان تولیدی بویلر با افزایش توان CHP بوده است. همچنین، نشان داده شد که با استفاده از سیستم فازی-عصبی

توان CHP و بویلر شده است. از سوی دیگر تمام ذخیره کننده ها دشوار شده اند تا کمبود توان جبران گردد. همچنین، مقداری توان برای تأمین بار خریداری شده است. بر اساس شکل ۹، ظرفیت D-FACTS و زمان های در مدار بودن آن مشخص شده است. با افزودن D-FACTS به خط اصلی، توان انتقال داده شده به شبکه افزایش یافته است. از سوی دیگر با این کار سود بیشتری به دست آمده است. بر اساس شکل ۹، در چهار بازه زمانی اول D-FACTS مورد نیاز بوده تا توان بیش تری به شبکه اصلی منتقل شود.

جدول ۱۰: نتایج شبیه سازی در حضور تجهیزات D-FACTS

پارامترها	بازه زمانی					
	۰-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۶	۱۶-۲۰	۲۰-۲۴
$P_{CHP}$ (kW)	۸۳/۸۱۹	۸۰/۱۵۸	۶۷/۶۶۲	۸۳/۲۹۹	۱۲۵/۸۵	۸۵/۷۰۷
$P_{MT}$ (kW)	۶/۶۶۲	۶/۴۱۹	۶/۹۷۲	۹/۰۳۵	۱۰/۲۰۷	۸/۲۵
$P_{Boiler}$ (kW <sub>heat</sub> )	۱۰۹/۱۹۳	۹۷/۹۴۷	۱۲۱/۲۵۱	۸۱/۵۶۲	۸۸/۲۱۵	۸۸/۲۱۵
$P_{WT}$ (kW)	۶۲/۷	۵۵/۹۶۵	۳۷/۸۴۷	۰	۱۷/۲۴۳	۶۱/۱۲۵
$P_{PV}$ (kW)	۰	۰	۶۲/۵۳۳	۷۴/۵۶۲	۱۵/۹۲۷	۰
$P_{ES}$ (kW)	۵	-۱/۷۰۶	-۰/۱۱۱	۰/۴۸۷۵	۲/۶۸۱	-۱/۳۵
$P_{TS}$ (kW)	۵	۱۰/۵۳۷	-۳	-۳	-۱/۵۳۷	-۳
$P_{Sell}$ (kW)	۴۰	۳۹/۱۸۱	۳۷/۷۵۳	۳۷/۲۸۵	۰	۰
$P_{Buy}$ (kW)	۰	۰	۰	۰	۳/۱۴۹	۰/۹۴۶

هزینه کلی: ۱۷۰/۹۹۷ (\$)   
 آلودگی: ۴۰۰۷/۷۱ (kg)



شکل ۹: ظرفیت D-FACTS

### ۷-۳- تأثیر سیستم عصبی-فازی تطبیقی

از جمله مهم ترین کاربردهای این روش در به کار گیری آن برای تخمین آینده یک سیستم بر اساس گذشته سیستم بوده که این کار تنها با آموزش صورت می گیرد و نیازی به هیچ رابطه خاصی نبوده. در این قسمت، از این ویژگی مهم برای تولیدات تجدید پذیر (باد و خورشید) استفاده شده است تا بدون هیچ رابطه ای و تنها با استفاده از اطلاعات گذشته و با سرعت بالاتری وضعیت سیستم تخمین زده شود. مسلماً این تخمین نسبت به روابط ریاضیاتی دارای درصدی خطا خواهد بود و هر چه اطلاعات در دسترس از گذشته بیش تر باشد، میزان این خطا

- economic operation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, pp. 258-267, 2011.
- [13] M. Motevasel and A. R. Seifi, "Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty," *Energy Conversion and Management*, vol. 83, pp. 58-72, 2014.
- [14] D. E. Olivares, C. A. Ca, x00F, izares and M. Kazerani, "A Centralized Energy Management System for Isolated Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1864-1875, 2014.
- [15] L. Igualada, C. Corchero, M. Cruz-Zambrano and F. J. Heredia, "Optimal Energy Management for a Residential Microgrid Including a Vehicle-to-Grid System," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2163-2172, 2014.
- [16] S. Mazzola, M. Astolfi and E. Macchi, "Adetailed model for the optimal management of a multigood microgrid," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 862-873, 2015.
- [17] G. R. Aghajani, H. A. Shayanfar and H. Shayeghi, "Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 308-321, 2015.
- [18] H. Safamehr and A. Rahimi-Kian, "A cost-efficient and reliable energy management of a micro-grid using intelligent demand-response program," *Energy*, vol. 91, pp. 283-293, 2015.
- [19] G. Carpinelli, F. Mottola and D. Proto, "Optimal scheduling of a microgrid with demand response resources," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 1891-1899, 2014.
- [۲۰] معصومه جوادی، موسی مرزبند و سید مازیار میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه ریزشبهه‌ها به همراه استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحه ۱۰۷-۹۵، شماره ۴، ۱۳۹۵.
- [۲۱] سهیل کعبه پهنه‌کلانی و مرتضی رحیمیان، «مدیریت انرژی نیروگاه مجازی برپایه بهینه‌سازی مقاوم با پیش‌پیشامدهای ریزشبهه: مطالعه موردی خروج تکی خط»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحه ۲۶۱-۲۴۹، شماره ۴، ۱۳۹۵.
- [22] J. S. R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, 1993.
- [23] A. Abraham, "Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning," in *Fuzzy Systems Engineering: Theory and Practice*, N. Nedjah and d. L. Macedo Mourelle, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 53-83, 2005.
- [24] P. Tahmasebi and A. Hezarkhani, "A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation," *Computers & Geosciences*, vol. 42, pp. 18-27, 2012.
- [25] Y. Y. Haimes, L. S. Lasdon and D. A. Wismer, "On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-1, pp. 296-297, 1971.
- تطبیقی، با خطای بسیار پایین، زمان شبیه‌سازی به مقدار قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت که در سیستم‌های مدیریتی بزرگ می‌تواند سودمند باشد.
- ### مراجع
- [1] V. Mohan, J. G. Singh and W. Ongsakul, "An efficient two stage stochastic optimal energy and reserve management in a microgrid," *Applied Energy*, vol. 160, pp. 28-38, 2015.
- [2] 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.
- [3] W. Su, J. Wang and J. Roh, "Stochastic Energy Scheduling in Microgrids With Intermittent Renewable Energy Resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1876-1883, 2014.
- [4] H. Li, C. Zang, P. Zeng, H. Yu and Z. Li, "A stochastic programming strategy in microgrid cyber physicalenergy system for energy optimal operation," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 2, pp. 296-303, 2015.
- [5] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, M. M. Begovic and C. Chen, "Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 45-53, 2015.
- [6] A. Zakariazadeh, S. Jadid and P. Siano, "Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 523-533, 2014.
- [7] C. Gong, X. Wang, W. Xu and A. Tajer, "Distributed Real-Time Energy Scheduling in Smart Grid: Stochastic Model and Fast Optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1476-1489, 2013.
- [8] S. A. Alavi, A. Ahmadian and M. Aliakbar-Golkar, "Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 314-325, 2015.
- [9] 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. 4, pp. 427-437, 2012.
- [10] T. Niknam and F. Golestaneh, "Probabilistic Multiobjective Operation Management of MicroGrids With Hydrogen Storage and Polymer Exchange Fuel Cell Power Plants," *Fuel Cells*, vol. 12, pp. 809-826, 2012.
- [11] S. M. Hakimi and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Optimal Planning of a Smart Microgrid Including Demand Response and Intermittent Renewable Energy Resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2889-2900, 2014.
- [12] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu and G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid

$E_{LD}(t)$	تقاضای بار الکتریکی (kW)
$E_S(t)$	انرژی ذخیره‌کننده الکتریکی (kWh)
$EM_{CHP}$	آلودگی CHP (kg)
$EM_{MT}$	آلودگی میکروتوربین (kg)
$EM_{Boiler}$	آلودگی بویلر (kg)
$EM_{MG}$	آلودگی شبکه اصلی (kg)
$EF_{CHP}$	ضریب آلودگی CHP (kg/Mwah)
$EF_{MT}$	ضریب آلودگی میکروتوربین (kg/Mwah)
$EF_{Boiler}$	ضریب آلودگی بویلر (kg/Mwah)
$EF_{MG}$	ضریب آلودگی شبکه اصلی (kg/Mwah)
$E_S^{max}$	حداکثر انرژی ذخیره‌کننده الکتریکی (kWh)
$E_S^{min}$	حداقل انرژی ذخیره‌کننده الکتریکی (kWh)
$F(Cost)$	هزینه کلی ریز شبکه (\$)
$GT(t)$	تابش خورشید بر مازول سلول خورشیدی ( $kW/m^2$ )
$GT_{NOCT}$	تابش خورشید بر روی مازول (ایده‌آل) ( $kW/m^2$ )
$GT_{SCT}$	تابش خورشید بر روی مازول (استاندارد) ( $kW/m^2$ )
$NOCT$	دمای عملکرد معمول سلول ( $^{\circ}C$ )
$N_{PVs}$	تعداد سلول‌های موازی در مازول سلول خورشیدی
$N_{PVp}$	تعداد سلول‌های سری در مازول سلول خورشیدی
$P_{MG}(t)$	توان شبکه اصلی (kW)
$P_{WT}$	توان توربین بادی (kW)
$P_{PV}(t)$	توان سیستم سلول خورشیدی (kW)
$P_{CHP}(t)$	توان CHP (kW)
$P_{MT}(t)$	توان میکروتوربین (kW)
$P_{Boiler}(t)$	توان بویلر ( $kW_{heat}$ )
$P_{Buy}(t)$	توان خریداری‌شده از شبکه (kW)
$P_{Sell}(t)$	توان فروخته‌شده به شبکه (kW)
$P_{Line}^D(t)$	محدودیت خط با D-FACTS (kW)
$P_{Line}^{D-FACTS}(t)$	توان اضافه‌شده با D-FACTS (kW)
$P_{ES}(t)$	توان ذخیره‌کننده الکتریکی (kW)
$P_{TS}(t)$	توان ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$P_{max}^{E-dech}$	حداکثر میزان دشارژ ذخیره‌کننده الکتریکی (kW)
$P_{max}^{E-ch}$	حداکثر میزان شارژ ذخیره‌کننده الکتریکی (kW)
$P_{max}^{T-dech}$	حداکثر میزان دشارژ ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$P_{max}^{T-ch}$	حداکثر میزان شارژ ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$P_{MT}^{max}$	حداکثر توان میکروتوربین (kW)
$P_{Boiler}^{max}$	حداکثر توان بویلر (kW)
$P_{CHP}^{max}$	حداکثر توان CHP (kW)
$P_{Line}$	محدودیت خط انتقال (kW)
$P_{PV\_STC}$	حداکثر توان تست (استاندارد) سلول خورشیدی (kW)
$R_m(t)$	میزان ذخیره
$R_m^{min}(t)$	حداقل ذخیره
$R_m^{max}(t)$	حداکثر ذخیره
$T_f(t)$	دمای سلول خورشیدی ( $^{\circ}C$ )
$TE_S(t)$	انرژی ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$T_{LD}(t)$	تقاضای بار گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$TE_S^{max}$	حداکثر انرژی ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$TE_S^{min}$	حداقل انرژی ذخیره‌کننده گرمایی ( $kW_{heat}$ )
$TF_{CHP}$	ضریب تبدیل توان - گرما CHP
$T_{amp}$	دمای محیط ( $^{\circ}C$ )

[26] G. Mavrotas, "Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 213, pp. 455-465, 2009.

[27] Balancing Mechanism Reporting System, <http://www.bmreports.com/>.

[28] A. D. Hawkes and M. A. Leach, "Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1253-1265, 2009.

### زیر نویس ها

- <sup>1</sup>Point Estimate Method
- <sup>2</sup>Multi Objective Integer Linear Programming
- <sup>3</sup>Multi Objective Integer non-Linear Programming
- <sup>4</sup>Partial Swarm Optimization
- <sup>5</sup>Genetic Algorithm
- <sup>6</sup>Modified Bacterial Foraging Optimization
- <sup>7</sup>Adaptive Neuro-fuzzy Inference System
- <sup>8</sup>Distribution Flexible Alternative Current Transmission System
- <sup>9</sup>Photovoltaic
- <sup>10</sup>Combined Heat to Power
- <sup>11</sup>Augmented Epsilon Constraint

### لغت نامه

A	سطح تیغه توربین بادی ( $m^2$ )
$C_{CHP}(t)$	هزینه CHP (\$)
$C_{PV}(t)$	هزینه PV (\$)
$C_{Boiler}(t)$	هزینه بویلر (\$)
$C_{MT}(t)$	هزینه میکروتوربین (\$)
$C_{Wind}(t)$	هزینه توربین بادی (\$)
$C_{ES}(t)$	هزینه ذخیره‌کننده الکتریکی (\$)
$C_{TS}(t)$	هزینه ذخیره‌کننده گرمایی (\$)
$C_{Buy}(t)$	هزینه خرید انرژی (\$)
$C_{Sell}(t)$	هزینه فروش انرژی (\$)
$C_{M-CHP}$	هزینه حفاظت از CHP (\$)
$C_{OP-CHP}$	هزینه عملکرد CHP (\$/kWh)
$C_{OP-WT}$	هزینه عملکرد توربین بادی (\$/kWh)
$C_{OP-PV}$	هزینه عملکرد سلول خورشیدی (\$/kWh)
$C_{CONS-WT}$	هزینه ثابت توربین بادی (\$)
$C_{CONS-PV}$	هزینه ثابت سلول خورشیدی (\$)
$C_{M-Boiler}$	هزینه حفاظت از بویلر (\$)
$C_{OP-Boiler}$	هزینه عملکرد بویلر (\$/kWh)
$C_{M-MT}$	هزینه حفاظت میکروتوربین (\$)
$C_{OP-MT}$	هزینه عملکرد میکروتوربین (\$/kWh)
$C_{M-ES}$	هزینه حفاظت ذخیره‌کننده الکتریکی (\$)
$C_{Sell}$	هزینه ثابت فروش (\$/kWh)
$C_{Buy}$	هزینه ثابت خرید (\$/kWh)
$C_{Fuel}$	هزینه سوخت (\$/kWh)
$C_{OP-ES}$	هزینه عملکرد ذخیره‌کننده الکتریکی (\$/kWh)
$C_{OP-TS}$	هزینه عملکرد ذخیره‌کننده گرمایی (\$/kWh)
$C_{M-TS}$	هزینه حفاظت ذخیره‌کننده گرمایی (\$)

$T_{jstc}$	دمای مرجع سلول خورشیدی ( $^{\circ}C$ )
$V_i$	سرعت باد (m/s)
$V^{nom}$	سرعت نامی باد (m/s)
$V^{cut-in}$	حداکثر سرعت باد (m/s)
$V^{cut-out}$	حداقل سرعت باد (m/s)
$V_i, V_2 \text{ and } V_d$	ولتاژ سمت ریزشبکه، شبکه و ولتاژ D-FACTS (V)
$X$	راکتانس خط (ohm)
$\eta_{CHP}$	ضریب مؤثر CHP
$\eta_{Boiler}$	ضریب مؤثر بویلر
$\eta_{MT}$	ضریب مؤثر میکروتوربین
$\eta^E_C$	ضریب مؤثر شارژ ذخیره کننده الکتریکی
$\eta^T_C$	ضریب مؤثر شارژ ذخیره کننده گرمایی
$\eta^E_D$	ضریب مؤثر دشارژ ذخیره کننده الکتریکی
$\eta^T_D$	ضریب مؤثر دشارژ ذخیره کننده گرمایی
$\eta^w$	ضریب توان ژنراتور بادی
$\rho$	چگالی هوا ( $kg/m^3$ )
$\gamma$	ضریب دما-توان
$\theta$	بازه زمانی
$\delta$	زاویه ولتاژ (rad)