

مقاله علمی-ترویجی

برنامه‌ریـزی بهینـه تولید انـرژی الکتریکی و توزیـع اقتصادی بارهـا در حضور توربیـن بادی

محمد حسن همت پور، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، فارس- ایران، m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

چکیده

باتوجه‌به رشد چشمگیر بار در صنعت برق و همچنین نفوذ بالای توربین‌های بادی (WTs) در سیستم‌های قدرت، مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها (UC) به یک مساله حیاتی تبدیل شده است. UC مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها، زمان روشن و خاموش‌شدن واحدها و نحوه‌ی توزیع بار بین واحدهای روشن را طوری تعیین می‌کند که هزینه کمینه شود؛ از این‌رو محور اصلی این مقاله، شامل دو سناریو که بررسی برنامه‌ریزی تولید واحدها با قیود مختلف از جمله نرخ شیب و ناحیه ممنوعه تولید در حضور و عدم حضور WTs است؛ بنابراین در ابتدا برنامه‌ریزی تولید واحدها را با در نظرگیری بار ساعت‌های آتی انجام می‌شود که این کار باعث افزایش قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی و همچنین کمینه نمودن هزینه‌ها می‌شود. در قسمت دوم روشی برای برنامه‌ریزی تولید واحدها ارائه می‌شود که در این روش، کمترین زمان خاموشی واحدها نیز در تابع هدف گنجانده شده است، در واقع هزینه‌های راه‌اندازی به‌صورت ساعتی در نظر گرفته شده‌اند. این روش پیشنهادی الگوی برنامه‌ریزی تولید را طوری تغییر می‌دهد که هزینه‌ها، کاهش می‌یابند. در نهایت پیاده‌سازی مساله در دو سناریو با درنظرگرفتن توربین‌های بادی و عدم حضور توربین‌های بادی انجام می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی تولید، توربین بادی، زمان‌بندی واحدها، توزیع اقتصادی بار، نرخ شیب واحدها، قیود ناحیه ممنوعه.

Unit Commitment and Economic Load Dispatch in the Presence of Wind Turbines

Mohammad Hasan Hemmatpour, Assistant Professor Department of Electrical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran, m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

Abstract

Due to the significant growth of load in the power industry as well as the high penetration of wind turbines (WTs) in power systems, the issue of unit generation (UC) planning has become a critical issue. UC determines the problem of planning the production of units, the time when units are turned on and off, and how to distribute the load between the units that are turned on so that the cost is minimized; Therefore, the main focus of this article includes two scenarios that examine the production planning of units with different constraints, including the slope rate and the production prohibited area in the presence and absence of WTs; Therefore, at first, the production planning of the units is done by considering the load of future hours, which increases the reliability of the planning and also minimizes the costs. In the second part, a method for planning the production of units is presented, in this method, the minimum shutdown time of the units is also included in the objective function, in

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

fact, the start-up costs are considered hourly. This proposed method changes the production planning pattern so that the costs are reduced. Finally, the implementation of the problem is done in two scenarios considering wind turbines and the absence of wind turbines.

Keywords: Unit commitment, wind turbine, unit scheduling, economic dispatch, unit slope rate, prohibited zones.

۱- مقدمه

در این بخش مروری کوتاه بر روش‌های رایج در مساله گسترش برنامه‌ریزی تولید واحدها (UC) و توزیع اقتصادی بار (ED) می‌شود. UC و ED برای به‌دست آوردن اقتصادی‌ترین حالت برنامه‌ریزی تولید واحدها و همچنین توزیع توان در بین واحدهای روشن در یک افق زمانی مشخص به‌کار می‌روند، به‌طوری‌که تقاضای بار پیش‌بینی‌شده و رزرو مورد نیاز تأمین شوند و همچنین کلیه قیود واحدهای تولیدی برآورده شده باشند. آن زمان‌بندی از واحدها که منجر به کمترین هزینه کل تولید شود را جواب بهینه UC و ED می‌نامند. ازآنجایی‌که مساله UC یک مساله بسیار بزرگ، غیرخطی، غیر محدب و عدد صحیح- مرکب است، بنابراین به‌دست‌آوردن یک جواب بهینه یک چالش بزرگ را می‌طلبد. مدل‌سازی ریاضیاتی برای حل یک مساله UC شامل روش‌های متعارف همچون یکایک شماری جامع، لیست حق‌تقدم، برنامه‌ریزی پویا، رهاسازی لاگرانژ، روش‌های ترتیبی، روش از مدار خارج‌کردن واحدها، برنامه‌نویسی عدد صحیح- مرکب یا بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی است.

روش‌های زیادی برای حل مساله ED همانند مساله UC ارائه شده است. هنگامی‌که تنها بهینه‌سازی توان حقیقی به همراه تلفات و بدون قیود امنیتی مورد نظر باشد، روش‌های متعارف برای حل ED عبارتند از: تکرار لامبدا، روش گرادیان، روش نیوتن، برنامه‌ریزی پویا و شبکه عصبی. در ادامه ضمن دسته‌بندی مطالعات به برخی از مراجع در زمینه مطالعاتی UC و ED اشاره می‌شود.

در زمینه کتاب‌های موجود می‌توان به مراجع زیر اشاره کرد:

پروفسور کونجو و همکاران در فصل کتابی مبحث پخش بار اقتصادی و برنامه‌ریزی تولید را با جزئیات مورد بررسی قرار داده‌اند[۱]. همچنین نویسندگان در[۲] روش‌های مختلف حل مساله یاد شده در حضور منابع ذخیره‌سازی انرژی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

- در زمینه مقاله‌های مروری می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

در [۳] روش‌های مختلف مدل‌سازی، روش‌های حل، چالش‌ها و مشکلاتی که در آینده، صنعت برق با مساله UC مواجه است، مورد مطالعه قرار می‌دهد. در[۴] مفاهیم اساسی روش‌های برنامه‌ریزی احتمالاتی برای مساله UC مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

- در زمینه ارائه روش‌های جدید حل مساله، مقاله‌های زیر آمده است:

پروفسور نظام‌آبادی و همکاران روشی جدید در زمینه مساله برنامه‌ریزی تولید را ارائه داده‌اند. در این مقاله از الگوریتم باینری جستجوی گرانشی کوانتومی استفاده شده است[۵]. در مقاله[۶] از راه‌حل Conic relaxations بهره گرفته‌اند. در مقاله‌ای دیگر به روش باینری بهینه‌سازی گرگ خاکستری پرداخته شده است[۷]. نویسندگان در [۸] از رویکرد بهبود یافته برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی مبتنی بر کاهش تقارن، در [۹] از الگوریتم جستجوی فاخته باینری بهبود یافته و در [۱۰] از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ باینری برای حل مساله UC بهره بردند.

- در زمینه چالش‌های جدید پیش رو در صنعت برق، می‌توان به مراجع زیر اشاره کرد:

برنامه‌ریزی واحدهای تولید با درنظرگرفتن ناحیه ممنوعه تولید، موضوع مراجع[۱۱] و[۱۲] را تشکیل می‌دهد. یک مساله برنامه‌ریزی احتمالاتی دو مرحله‌ای برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید با در نظرگرفتن هزینه متغیر گاز در[۱۳] ارائه شده است. مساله برنامه‌ریزی تولید به‌همراه توان بادی با قابلیت اشتراک‌پذیری در [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۵] از تأثیر UPFC برای افزایش قابلیت نفوذ توربین‌های بادی در شبکه و مساله برنامه‌ریزی تولید استفاده می‌شود. تأثیر منابع ذخیره‌ساز انرژی در مساله برنامه‌ریزی تولید در [۱۶] آمده است. در [۱۷] برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها در حضور هم‌زمان منابع انرژی بادی و خودروهای قابل اتصال به شبکه (PEV) مورد مطالعه قرار گرفته است. محدودیت‌ها و مشکلاتی که مساله UC در مدل‌های برنامه‌ریزی بلندمدت ایجاد می‌کند، در [۱۸] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی UC در کنار ED در ریزشبکه‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی انجام می‌شود[۱۹]. تأثیر DR و WT بر مساله برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها و حل آن به کمک روش بندرز در [۲۰-۲۱] دیده شده است.

۲- بیان ریاضی مساله

۲-۱- مدل‌سازی ریاضی مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها

تابع هدف یک مساله برنامه‌ریزی تولید واحد تابعی است که شامل هزینه‌های سوخت واحدهای تولیدی، هزینه راه‌اندازی واحدهای وارد شونده در مدار و هزینهٔ خاموش‌شدن واحدهای خارج شونده از مدار می‌شود. تابع هدف به شکل رایج، به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$Minimize\ \{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}F_{i,t}(p_{i,t})*u_{i,t}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}SUC_{i,t}*u_{i,t}*(1-u_{i,t-1})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}SDC_{i,t}*u_{i,t-1}*(1-u_{i,t})\} \quad (۱)$$

هزینه‌ی واحدهای تولیدی و قسمت‌های مؤثر در هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای حرارتی، به‌صورت یک معادله‌ی درجه دوم (۲) بیان می‌شود.

$$F_{i,t}(P_{i,t})=a_i+b_iP_{i,t}+c_i(P_{i,t})^2 \quad (۲)$$

قیود مساله بهینه‌سازی در ادامه بیان می‌شود.

- قید توازن بار

تولید در هر ساعت باید برابر با تقاضای آن ساعت به اضافه تلفات باشد. قید توازن توان را می‌توان در معادله زیر مشاهده نمود.

$$\sum_{i=1}^{N}(P_{i,t})*u_{i,t}=D_t+L_t \quad 1\le t\le T\ ,i\in N \quad (۳)$$

- قید رزرو چرخان

بیشینه ظرفیت خروجی واحدهای روشن باید بزرگ‌تر یا مساوی تقاضا به اضافه تلفات و رزرو چرخان سیستم باشد. این رزرو برای برآورده‌سازی افزایش ناگهانی تقاضا یا قطع اجباری واحدهای تولیدی، مورد نیاز است. مقدار نیاز رزرو چرخان به‌طور معمول

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

به وسیله بیشترین ظرفیت یک یا دو واحد که بیشترین امکان تولید در سیستم را دارند یا با درصدی از اوج تقاضا در کل دوره زمان‌بندی یا درصدی از تقاضا در هر ساعت مشخص می‌شود. مقدار رزرو موردنیاز در این مقاله به‌وسیله درصدی از بار در نظر گرفته می‌شود.

$$U_{i,t}=\begin{cases}1, & if \quad 1\le MU_i^{ON}<T_{i,t}^{U}\\ 0, & if \quad -1\ge MD_i^{OFF}>-T_{i,t}^{D}\\ 0\ or\ 1, & otherwise\end{cases} \qquad (۴)$$

- قیود واحدهای حرارتی

هر واحد حرارتی به تنهایی قیود مربوط به خودش را دارد که شامل محدوده کمترین و بیشترین تولید یک واحد، بیشینه نرخ افزایشی و کاهشی، کمینه زمان روشن و خاموش بودن و محدودیت حالت واحدها است. جزئیات هر قید در ادامه آمده است:

کمترین و بیشترین توان تولیدی واحدها

یک محدوده از خروجی‌های توان واحد به وسیله‌ی محدودیت خروجی ماشین یا محدوده خروجی اقتصادی تعیین می‌شود. به هرحال، محدوده‌های کمینه و بیشینه که خروجی واحدهای تولیدی را در هر واحد تولیدی و در یک ساعت خاص تعیین می‌کند، همان‌طورکه در معادله (۵) نشان داده شده است می‌تواند در محدوده‌ی توان خروجی واحد براساس قیود نرخ شیب واحد تغییر داشته باشد.

$$\sum_{i=1}^{N}P_{i,t}^{\max}*u_{i,t}\ge D_t+L_t+SRR_t \quad , \qquad 1\le t\le T, i\in N \qquad (۵)$$

- بیشترین نرخ شیب کاهشی

بیشترین نرخ شیب کاهشی، بیشترین خروجی تولید است که بر اساس آن واحد i قادر به کاهش توان تولیدی در یک ساعت است. نرخ شیب کاهشی، کمترین ظرفیت خروجی واحد i در ساعت t ($P_{i,t}^{\min}$) را براساس معادله (۷) محدود می‌کند.

$$P_{i,t-1}-P_{i,t}\le RDR_i \qquad (۶)$$

$$P_{i,t}^{\min}*u_{i,t}\le P_{i,t}^{o}*u_{i,t}\le P_{i,t}^{\max}*u_{i,t} \qquad 1\le t\le T\ ,i\in N \qquad (۷)$$

- بیشترین نرخ شیب افزایشی

بیشترین نرخ شیب افزایشی، بیشترین خروجی تولید است که واحد براساس آن قادر به افزایش توان تولیدی در یک ساعت است. نرخ شیب افزایشی، بیشینه ظرفیت خروجی واحد i در ساعت t ($P_{i,t}^{\max}$) را بر طبق معادله (۹) تعیین می‌کند.

$$P_{i,t}-P_{i,t-1}\le RUR_i \qquad (۸)$$

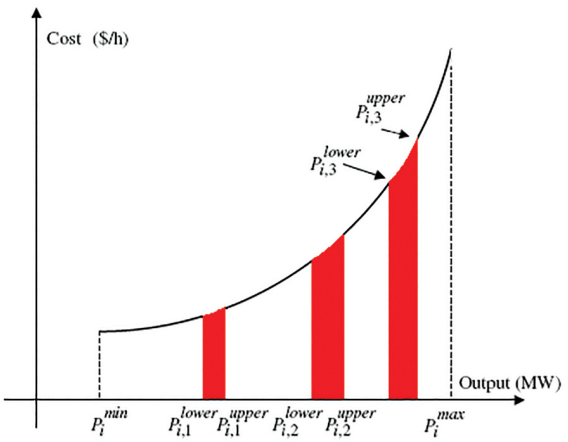
$$P_{i,t}^{\max}=\min(P_i^{\max},P_{i,t-1}+RUR_i) \qquad (۹)$$

کمترین زمان روشن و خاموش بودن واحد کمترین زمان روشن بودن واحد، کمترین ساعاتی است که واحد باید پس از روشن شدن به‌طور پیوسته روشن بماند. کمترین زمان خاموش بودن واحد، کمترین ساعاتی است که واحد باید پس از خاموش شدن، به طور پیوسته خاموش بماند.

$$U_{i,t}=\begin{cases}1, & if \quad 1\le MU_i^{ON}<T_{i,t}^{U}\\ 0, & if \quad -1\ge MD_i^{OFF}>-T_{i,t}^{D}\\ 0\ or\ 1, & otherwise\end{cases} \qquad (۱۰)$$

- قیود ناحیه ممنوعه

در برخی از موارد به‌دلیل محدودیت‌های فیزیکی، نیروگاه در تمامی بازه بین بیشینه و کمینه تولید خود نمی‌تواند تولید توان داشته باشد. به نواحی که در آن نیروگاه‌ها نمی‌توانند تولید توان داشته باشد، نواحی ممنوعه تولید گفته می‌شود. تأثیر ناحیه ممنوعه بر منحنی هزینه تولید یک نیروگاه نمونه در شکل (۱) آمده است. در این منحنی نواحی قرمز رنگ بیانگر نواحی ممنوعه هستند که ژنراتور نباید در این مناطق تولید توان داشته باشد.



شکل ۱: تأثیر ناحیه ممنوعه بر منحنی هزینه یک نیروگاه

رابطه ناحیه ممنوعه را می‌توان به کمک رابطه زیر نمایش داد:

$$\begin{cases}\underline{P}_i\le P_i\le P_{i,1}^{Lower}\\ P_{i,j-1}^{Upper}\le P_i\le P_{i,j}^{Lower} \qquad , j=2,\dots,PZ_z\\ P_{i,PZ_i}^{Upper}\le P_i\le \overline{P}_i\end{cases} \qquad (۱۱)$$

- قیود تولید توان توربین‌های بادی

تولید توان اکتیو توربین‌های بادی براساس سرعت باد در محل این توربین از رابطه (۱۲) به دست می‌آید[۲۲]:

$$P=\begin{cases}0 & \begin{pmatrix}0<V_i<V_{ci}\\ V_i>V_{co}\end{pmatrix}\\ P_r\left(\dfrac{V_i-V_{ci}}{V_r-V_{ci}}\right) & V_{ci}\le V_i\le V_r\\ P_r & V_r\le V_i\le V_{co}\end{cases} \qquad (۱۲)$$

در اینجا فرض می‌شود، $V_r=15m/s, V_{ci}=5m/s$ و $V_{co}=20m/s$ است. در این مقاله توربین بادی با تولید توان در توان نامی و ضریب توان ۰/۹۵ پس فاز در نظر می‌گیریم.

۲-۲- مدل‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی مشارکت واحدها

هدف از برنامه‌ریزی مشارکت واحدها (UC) کسب برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با کمترین هزینه‌ی تولید بدون تأثیر سوء بر قابلیت اطمینان یک سیستم است. قابلیت اطمینان یک سیستم به‌صورت برآورده‌کردن دو تابع کفایت و امنیت تفسیر می‌شود. مقدار کافی از ظرفیت منابع برای تأمین تقاضای بیشینه باید موجود باشد (کفایت) و سیستم باید بتواند تغییرات و پیشامدها را بر مبنای روزانه و ساعتی تحمل کند (امنیت).

UC را می‌توان به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی که در آن هزینه‌های بهره‌برداری بر اساس هزینه‌های افزایشی حاصل از واحدهای تولید، کمینه می‌شود، بیان کرد. تابع هدف این مساله

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

همانند مساله UC است و تنها تفاوت این مساله با مساله UC در تعداد قیودی است که مورد بررسی قرار می‌گیرند. قیود و شرایط مورد بررسی در مشارکت امنیت- مقید واحدها عبارتند از: توازن بار، نیاز رزرو چرخان، نیاز ذخیره بهره‌برداری سیستم، شرایط آغازین، قیود کمینه و بیشینه توان تولیدی واحدها، قیود بیشینه نرخ شیب کاهشی و بیشینه نرخ شیب افزایشی، قیود کمینه زمان روشن و خاموش بودن واحدها، قید محدودیت حالت واحدها، حد انتقال توان از یک شین به شین دیگر، نیاز ذخیره بهره‌برداری توان راکتیو، حدود توان راکتیو تولیدی و تعادل شین بار، حدود ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها. در ادامه آن قیودی که در مدل‌سازی برنامه‌ریزی تولید واحدها بررسی نشده‌اند را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

- نیاز رزرو بهره‌برداری سیستم

بارهای قابل قطع به‌طور معمول به ظرفیت بهره‌برداری واحدها (طرف چپ رابطه ۱۴) اضافه می‌شوند و نیاز بهره‌برداری، به‌صورت یک مقدار پایه به‌علاوه سهمی از نیاز بار و سهمی از حد بالای بهره‌برداری مربوط به بزرگ‌ترین واحد در مدار، تعریف می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{N_g} r_{i,t}^{o} U_{i,t} \geq ORR_t \qquad t = 1,...,T \qquad (۱۳)$$

$$r_o(i,t) = \begin{cases} q(i) , & if \ \ unit\ i\ is off \\ r_s(i,t) , & if \ \ unit\ i\ is\ on \end{cases} \qquad (۱۴)$$

- حد انتقال توان از شین k به شین m

مقدار توان انتقالی از خطوط و یا به عبارت دیگر از هر شین به شین دیگر بر اساس فیزیک سیستم و به تولید واحد و کنترل تغییردهنده فاز، بستگی دارد.

$$-P_{km}^{\max} \leq P_{km,t} \leq P_{km}^{\max} \qquad (۱۵)$$

نیاز ذخیره بهره‌برداری توان راکتیو

$$\sum_{i=1}^{N} Q_{g\max}(i) U_{i,t} \geq Q_D(t) \qquad (۱۶)$$

حدود توان راکتیو تولیدی و تعادل شین بار

$$Q_G^{\min} U_t \leq Q_G(t) = F_1(V) \leq Q_G^{\max} U_t \qquad (۱۷)$$

$$Q_L(t) = F_2(V) \qquad (۱۸)$$

حدود ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$$
$$T^{\min} \leq T \leq T^{\max} \qquad (۱۹)$$

۳- پیاده‌سازی

در این مقاله دو سناریو مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. برنامه‌ریزی تولید واحدها با ملاحظه قیود مسئله در حضور توربین‌های بادی و عدم حضور آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این قسمت به ارائه روشی در زمان‌بندی واحدها پرداخته شده است. به‌طور معمول برای انتخاب زمان‌بندی واحدها تابع هدف به صورت معادله (۱) در نظر گرفته می‌شود و در برخی از مطالعات این تابع به صورت ساده‌تر، یعنی بدون درنظرگرفتن هزینه راه‌اندازی و خاموشی واحدها در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت از یک تابع هدف جدید استفاده می‌شود که در واقع در این تابع هدف هزینه راه‌اندازی به‌صورت ساعتی در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف جدید به‌صورت معادله (۲۰) هست.

در این تابع هدف همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه‌های راه‌اندازی هر واحد بر کمترین زمان خاموشی آن واحد تقسیم می‌شود و به این ترتیب هزینه راه‌اندازی به‌صورت ساعتی در نظر گرفته می‌شود.

$$Minimize \{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} F_{i,t}(p_{i,t}) * u_{i,t} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} \frac{CSC_{i,t}}{T_i^D} * u_{i,t} * (1-u_{i,t-1}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} \frac{HSC_{i,t}}{T_i^D} * u_{i,t-1} * (1-u_{i,t})\} \qquad (۲۰)$$

روش پیشنهادی شامل پنج زیر مساله است که در شکل (۲) نشان داده شده است. در هر زیر مساله برخی از قیود مورد بررسی قرار می‌گیرند و سرانجام تابع هدف با تمام قیود و به وسیله الگوریتم PSO به کمترین مقدار خود نزدیک می‌شود[۲۳].

این زیر مساله‌ها به طور مفصل در زیر شرح داده شده‌اند:

- زیر مساله‌ی بررسی نرخ شیب و رزرو چرخان

این زیر مساله دو قید مهم از جمله نیاز رزرو چرخان و قید نرخ شیب را مورد بررسی قرار می‌دهد. در ابتدا یک جمعیت اولیه به‌منظور رسیدن به یک جواب بهینه، مورد نیاز است. این جمعیت اولیه چنان تولید می‌شود که قید رزرو چرخان برآورده شود و هر جمعیتی که بتواند این قید را (به‌عنوان یک تابع هدف) برآورده سازد، انتخاب می‌شود. پس از برآورده شدن قید رزرو چرخان قید نرخ شیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم قید نرخ شیب، کران بالا یا پایین توان تولیدی هر واحد را براساس توان خروجی ساعت قبل مشخص می‌کند که این کران‌ها براساس معادلات (۷) و (۹) برآورده می‌شوند. در پایان این مرحله می‌توان مطمئن بود که نیاز رزرو چرخان و قید نرخ شیب برآورده شده‌اند.

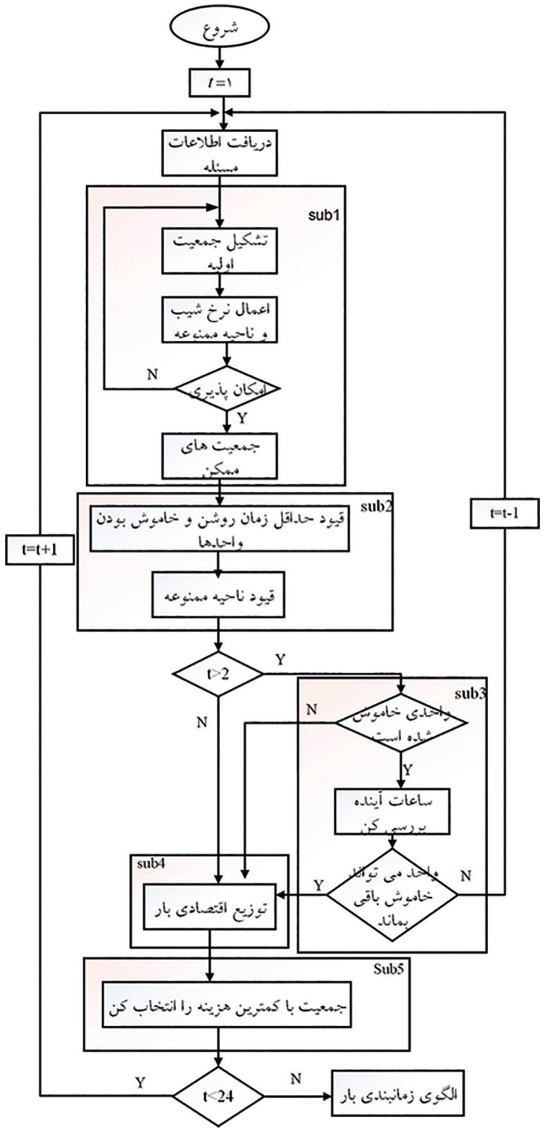
- زیر مساله‌ی بررسی کمترین زمان روشن و خاموش بودن واحدها و قید ناحیه ممنوعه

در این زیر مساله قیود کمینه زمان روشن بودن (MUT) و کمینه زمان خاموش بودن (MDT) و قیود ناحیه ممنوعه مورد بررسی قرار می‌گیرند. تنها حالت آن واحدهایی که قیود MUT/ MDT و ناحیه ممنوعه را برآورده می‌سازند می‌تواند تغییر کند، درحالی‌که حالت بقیه واحدها ثابت می‌ماند؛ بنابراین زمانی که واحدی بر اساس کمینه زمان روشن بودن باید روشن بماند، ولی در جمعیت موجود این واحد خاموش در نظر گرفته شده است، این واحد را روشن نموده و هیچ مشکلی برای امکان‌پذیری این جمعیت به وجود نمی‌آید. زیرا با این کار مقدار ظرفیت تولید را اضافه کرده‌ایم. اما زمانی که واحدی بر اساس کمینه زمان خاموش بودن واحد باید خاموش بماند، ولی در جمعیت موجود این واحد روشن در نظر گرفته شده است، به سادگی نمی‌توان این واحد را خاموش نمود، زیرا ممکن است این جمعیت اصلاح‌شده به یک جمعیت غیرممکن تبدیل شود که در این صورت یک جمعیت جدید جایگزین این جمعیت می‌نماییم.که این شرط را برآورده سازد. همچنین در تشکیل جمعیت، قیود ناحیه ممنوعه بررسی می‌شود.

- زیر مساله‌ی بررسی T_i^p ساعت آتی

پس از برآورده شدن برخی از قیود همچون SR و RR و حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحد، اگر واحدی (واحد i ام) نیاز به خاموش شدن داشته باشد، تقاضای T_i^D ساعات آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که یک واحد خاموش می‌شود، حالتش نمی‌تواند به اندازه‌ی T_i^D ساعت تغییر کند. بنابراین امکان

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

برآورده شدن بارهای T_i^D ساعت آتی، بدون در نظرگیری این واحد بررسی می‌شود. اگر شرایط برآورده نشوند، زمان برنامه‌ریزی یک ساعت به قبل بازگشته و برنامه‌ریزی برای این ساعت با روشن در نظر گرفتن این واحد انجام می‌پذیرد. این فرآیند زمان‌بندی برنامه‌ریزی تولید واحدها را در کل ساعات افق برنامه‌ریزی تضمین می‌کند.

- زیر مساله‌ی توزیع اقتصادی بار

برنامه‌ریزی تولید واحدها و توزیع اقتصادی بار، هنگامی که باهم ترکیب می‌شوند، یک ابزار مفید برای یافتن اقتصادی‌ترین زمان‌بندی است. توزیع اقتصادی بار خروجی همه‌ی واحدهای روشن را، با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل بهره‌برداری در یک ساعت مشخص طوری تعیین می‌کند که قید توازن بار و قید حدود خروجی واحدها برآورده شود. روش تکرار لامبدا در این مورد مطالعاتی برای توزیع اقتصادی بار مورد استفاده قرار گرفته است.

- زیر مساله‌ی یافتن کمترین هزینه

در مراحل قبل تمامی قیود برآورده شده‌اند و در این مرحله از بین جمعیت‌های موجود باید آن جمعیتی که کمترین هزینه را دارد انتخاب کنیم؛ بنابراین در مسائل زمان‌بندی، یک تابع هدف نیاز است که در روش پیشنهادی تابع هدف به‌صورت معادله (۲۳) تعریف شود.

تمام زیر مساله‌های زیر در مدت‌زمان برنامه‌ریزی تکرار می‌شوند. پس از مشخص نمودن حالت‌های همه واحدهای تولیدی، قیمت بهره‌برداری واقعی محاسبه خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی مطالعات موردی و تجزیه‌وتحلیل نتایج

۴-۱- سناریو نخست

در این سناریو روش پیشنهادی به سیستم تست رایج ۱۰ واحد استاندارد اعمال می‌شود. تغییرات بار و داده‌های واحدها به همراه ناحیه ممنوعه آنها برای سیستم ۱۰ واحد در جدول (الف-۱) در ادامه آمده است. نتایج حالت واحدها و زمان‌بندی تولید سیستم ۱۰ واحد در جدول (۱) نشان‌داده شده است. برای همه سیستم‌ها رزرو چرخان ۱۰ درصد تقاضای بار در هر ساعت است.

در این حالت هزینه شبیه‌سازی ۵۶۴۸۵۵ دلار است. در مرجع [۱۱] هزینه این مدل‌سازی ۵۶۵۴۶۵/۵ به‌دست آمده که در مقایسه با جواب بهینه شبیه‌سازی مقاله ۶۱۰/۵ دلار بهبود داشته است.

با درنظرگرفتن محدودیت ناحیه ممنوعه بر اساس جدول (الف-۱)، نتایج به‌صورت جدول (۲) به‌دست می‌آید. این در حالی است که تولید واحد (۱) و (۸) به ترتیب در ساعت ۱ و ۱۲ وارد ناحیه ممنوعه می‌شود که توسط الگوریتم این مساله به کمک افزایش تولید واحد ۲ و ۹ در ساعت‌های بیان شده برطرف می‌شود. در این حالت هزینه به ۵۶۴۷۱۴ دلار می‌رسد که نسبت به حالت بدون درنظرگرفتن ناحیه ممنوعه ۱۱ دلار افزایش می‌یابد. در مرجع [۱۱] هزینه این مدل‌سازی ۵۶۵۴۷۲/۷ به‌دست آمده که در مقایسه با جواب بهینه شبیه‌سازی مقاله ۷۵۸/۷ دلار بهبود داشته است.

۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو، سناریو نخست با درنظرگرفتن توربین‌های بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فرضیات و محدودیت‌های حل مساله در این قسمت عبارت است از:

یک مزرعه بادی با ظرفیت ۱۰ MW متشکل از ۴ توربین بادی ۲/۵ مگاوات با تابع احتمالاتی تولید توان ویبل فرض می‌شود [۲۴]. تابع تولید توان احتمالاتی هر توربین بادی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$f(v,k,c)=\left(k/c\right)\left(v/c\right)^{k-1}\exp\left(-\left(v/c\right)^{k}\right) \quad (۲۱)$$

$$F(v,k,c)=1-\exp\left(-\left(v/c\right)^{k}\right) \quad (۲۲)$$

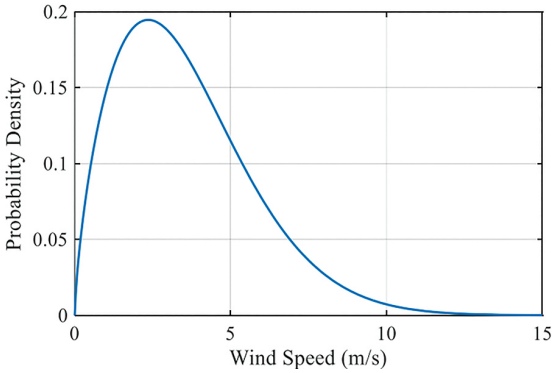
که در آن ضریب k و c به ترتیب ۱/۶۹ و ۴ است [۲۴] که در شکل (۳) منحنی تابع توزیع احتمالاتی آن نشان داده شده است.

میزان توان تولیدی در ۲۴ ساعت بر اساس منحنی شکل (۳) در چهار توربین بادی در شکل (۴) آمده است.

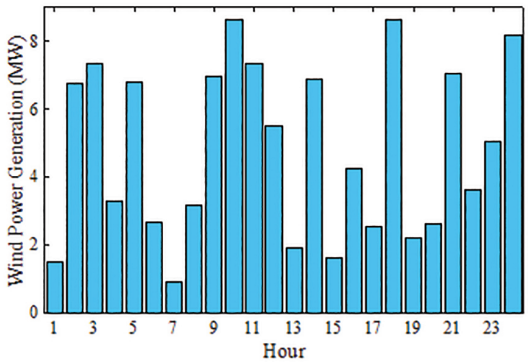
نتایج حاصل از UC در حضور WT در جدول (۳) آمده است. هزینه عملکردی در یک دوره ۲۴ ساعته در این سناریو برابر ۵۸۰۵۲۱ دلار است. با مقایسه نتایج سناریو نخست و دوم حدود ۱۵۶۶۶ دلار صرفه‌جویی اقتصادی در ۲۴ ساعت داشته‌ایم که رقم قابل‌توجهی است.

شکل (۵) بیانگر میزان رزروی است که در حضور توربین‌های بادی نسبت به عدم حضور آن در شبکه بیشتر است. آنچه واضح است، در حضور WT سطح رزرو بالاتری داریم که خود بیانگر قابلیت

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]



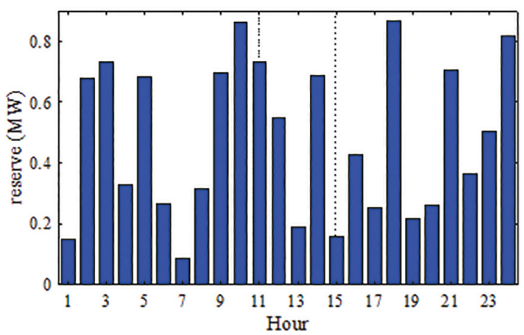
شکل ۳: تابع توزیع تولید توان در توربین بادی



شکل ۴: توان تولیدی توسط توربین بادی

اطمینـان بالاتـر در ایـن شـبکه‌ها اسـت. از طرفـی واحد شـماره (۱۰) کـه تنهـا در سـاعت ۱۲ در عدم حضور WT تولید تـوان دارد، با حضور WT ایـن واحد دیگـر وارد مدار نمی‌شـود.

بنابرایـن توربیـن بـادی عـلاوه بـر صرفه‌جویـی اقتصـادی، شـبکه بـا قابلیـت اطمینـان بالاتـری را فراهـم می‌آورنـد. از طرفـی هزینه نصب توربین‌هـای بـادی از رابطـه $A_p + B_P P_{rated}$ به‌دسـت می‌آیـد کـه در آن $A_p = -0.173$ و $B_p = +0.9966$ اسـت[۲۴]. P_{rate} ظرفیـت نامـی توربیـن بـادی برحسـب کیلـووات اسـت و هزینـه محاسـبه شـده برحسـب کیلـو دلار اسـت. بنابرایـن هزینه چهـار توربیـن بادی ۲,۵MW در مجمـوع برابـر ۹۹۶۵۰۰۰ دلار اسـت. بـا توجـه بـه اینکه در ۲۴ سـاعت حـدود ۱۵۶۶۶ دلار صرفه‌جویـی اقتصـادی داشـتیم؛ از این‌رو در ۶۳۶ روز بازگشـت سـرمایه داریم که کمتر از ۲ سـال اسـت.



شکل۵: تفاضل رزرو سناریو اول و دوم

بنابرایـن نصـب ۱۰MW توربیـن بادی که حـدود ۲ درصـد کمینه بار ۲۴ سـاعته (۷۰۰MW) اسـت، توجیـه اقتصـادی و فنـی دارد.

جدول ۱: زمان‌بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد (مگاوات)

ساعت	تقاضا	واحد								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۷۰۰	۴۵۵	۲۴۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۷۵۰	۴۵۵	۲۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۸۵۰	۴۵۵	۳۷۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۴	۹۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۰۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۷۰	۲۰	۰	۰	۰
۶	۱۱۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۱۳۰	۴۰	۲۰	۰	۰	۰
۷	۱۱۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۱۳۰	۹۰	۲۰	۰	۰	۰
۸	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۴۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۲۰	۰	۰	۰
۹	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۱۰	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۱۱	۱۴۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۷۳	۲۵	۱۰	۱۰
۱۲	۱۵۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۲۵	۴۳	۱۰
۱۳	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۱۴	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۱۵	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۱۰۵۰	۴۵۵	۳۱۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۰۰۰	۴۵۵	۲۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۸	۱۱۰۰	۴۵۵	۳۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۹	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
۲۰	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۲۱	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۲۲	۱۱۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۱۴۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۲۳	۹۰۰	۴۵۵	۴۲۵	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰
۲۴	۸۰۰	۴۵۵	۳۴۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

جدول۲: زمان‌بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد(مگاوات) با در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه

ساعت	واحد									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۴۴۷,۹۹۹۹	۲۵۲,۰۰۰۱	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲	۴۵۵,۰	۲۹۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۳	۴۵۵,۰	۲۶۵,۰	۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۴	۴۵۵,۰	۲۳۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۵	۴۵۵,۰	۲۸۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۶	۴۵۵,۰	۳۵۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۷	۴۵۵,۰	۴۱۰,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۸	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۹	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۰	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۱	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۷۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۱۰,۰	۰,۰
۱۲	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۸۰,۰	۲۵,۰	۳۹,۹۹۹۹	۱۲,۹۰۱	۱۰,۰
۱۳	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۴	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۵	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۶	۴۵۵,۰	۳۰۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۷	۴۵۵,۰	۲۶۰,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۸	۴۵۵,۰	۳۵۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۹	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۰	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۱	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۲	۴۵۵,۰	۳۴۰,۱	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۳	۴۵۵,۰	۳۱۵,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۴	۴۵۵,۰	۳۴۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰

جدول ۳: زمان‌بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد(مگاوات) با در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه و توربین بادی

ساعت	واحد										تقاضا
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
۱	۴۵۵	۲۴۵,۵۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰۰,۰
۲	۴۵۵	۲۹۳,۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۵۰,۰
۳	۴۵۵	۳۶۵,۴۹	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۵۰,۰
۴	۴۵۵	۴۳۰	۰	۰	۵۸,۵۲	۰	۰	۰	۰	۰	۹۵۰,۰
۵	۴۵۵	۳۸۵,۲۸	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰,۰
۶	۴۵۵	۳۵۵,۱۶	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۷	۴۵۵	۳۸۵,۱	۱۳۰	۱۳۰	۲۴,۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۵۰,۰
۸	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۲,۴۷	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۹	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۱,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۱۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۷	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۱۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۲۵	۱۰,۸	۰	۰	۱۴۵۰,۰
۱۲	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۷۰,۱	۵۵	۵۵	۰	۱۵۰۰,۰
۱۳	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۱	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۱۴	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۷۹,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۱۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۳,۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۱۶	۴۵۵	۳۰۶,۳۱	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۵۰,۰
۱۷	۴۵۵	۳۸۳,۱۷	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰,۰
۱۸	۴۵۵	۳۵۶,۲۹	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۱۹	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۱,۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۲۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۶۵	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۲۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۷۹,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۲۲	۴۵۵	۳۵۴,۹۳	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۲۳	۴۵۵	۴۱۷,۶۴	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۹۰۰,۰
۲۴	۴۵۵	۳۲۰,۲۳	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۰۰,۰

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

جدول الف-۱: داده‌های مربوط به سیستم ۱۰ واحدی

واحد	Pmin	Pmax	a	b	c	T^U	T^D	HSC	CSC	CST	Init hour	POZ
۱	۱۵۰	۴۵۵	۱۰۰۰	۱۶,۱۹	۰,۰۰۰۴۸	۸	۸	۴۵۰۰	۹۰۰۰	۵	۸	[۱۶۵ ۱۵۰], [۴۵۳ ۴۴۸]
۲	۱۵۰	۴۵۵	۹۷۰	۱۷,۲۶	۰,۰۰۳۱	۸	۸	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵	۸	[۱۱۰ ۹۰], [۲۵۰ ۲۴۰]
۳	۲۰	۱۳۰	۷۰۰	۱۶,۶	۰,۰۰۲	۵	۵	۵۵۰	۱۱۰۰	۴	-۵	-
۴	۲۰	۱۳۰	۶۸۰	۱۶,۵	۰,۰۰۲۱۱	۵	۵	۵۶۰	۱۱۲۰	۴	-۵	-
۵	۲۵	۱۶۲	۴۵۰	۱۹,۷	۰,۰۰۳۹۸	۶	۶	۹۰۰	۱۸۰۰	۴	-۶	-
۶	۲۰	۸۰	۳۷۰	۲۲,۲۶	۰,۰۰۷۱۲	۳	۳	۱۷۰	۳۴۰	۲	-۳	-
۷	۲۵	۸۵	۴۸۰	۲۷,۷۴	۰,۰۰۷۹	۳	۳	۲۶۰	۵۲۰	۲	-۳	-
۸	۱۰	۵۵	۶۶۰	۲۵,۹۲	۰,۰۰۴۱۳	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	[۳۰ ۲۰], [۴۵ ۴۰]
۹	۱۰	۵۵	۶۶۵	۲۷,۲۷	۰,۰۰۲۲۲	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	-
۱۰	۱۰	۵۵	۶۷۰	۲۷,۷۹	۰,۰۰۱۷۳	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	[۱۷ ۱۲], [۴۵ ۳۵]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برنامه‌ریزی تولید واحدها با بررسی بار ساعت‌های آتی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در ادامه مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن قیود ناحیه ممنوعه و توربین بادی مورد مطالعه قرار گرفت. با درنظرگرفتن این قید ناحیه ممنوعه، هزینه مساله زمان‌بندی تولید، درصد ناچیزی افزایش می‌یابد؛ ولی باعث جلوگیری از آسیب‌های جدی به محور توربو ژنراتور می‌گردد. با درنظرگرفتن توربین بادی علاوه بر کاهش هزینه، قابلیت اطمینان UC به‌دلیل افزایش رزرو افزایش می‌یابد.

۶- علائم و اختصارات

$P^o_{i,t}$	توان خروجی واحد i ام در زمان t
$u_{i,t}$	حالت خاموش یا روشن بودن واحدها
a_i, b_i, c_i	ضرایب هزینه سوخت واحد i ام
$SUC_{i,t}$	هزینه راه‌اندازی واحد i ام در زمان t
$SDC_{i,t}$	هزینه خاموش‌کردن واحد i ام در زمان t
HSC_i	هزینه راه‌اندازی گرم واحد i ام
CSC_i	هزینه راه‌اندازی سرد واحد i ام
$T^U_{i,t}$	کمینه زمان روشن بودن واحد i در زمان t
$T^D_{i,t}$	کمینه زمان خاموش بودن واحد i در زمان t
MD^{ON}_i	دوره زمانی که درآن‌واحد i ام به طور متوالی روشن بوده است.
D_t	تقاضا در ساعت t
SRR_t	مقدار رزرو چرخان موردنیاز در زمان t
ORR_t	مقدار رزرو بهره‌برداری موردنیاز در زمان t
RUR_i	حد نرخ شیب افزایشی واحد i ام
RDR_i	حد نرخ شیب کاهشی واحد i ام
M	ضریب هزینه بهره‌برداری و نگهداری واحد i ام در زمان t
FT	نوع سوخت مصرفی
$F^{max}(FT)$	بیشترین مصرف سوخت برای سوخت نوع
Fmin(FT)	کمترین مصرف سوخت برای سوخت نوع
$S^f_{i,t}$	مقدار سوخت راه‌اندازی واحد i ام در زمان t
MD^{OFF}_i	دوره زمانی که در آن واحد i ام به طور متوالی خاموش بوده است.
CST_i	مدت‌زمان راه‌اندازی سرد
N	تعداد واحدها
T	افق زمانی برنامه‌ریزی تولید واحدها
τ_i	ثابت زمانی در تابع‌نمایی مربوط به هزینه راه‌اندازی
υ_i, ξ_i	ضرایب تابع هزینه راه‌اندازی
P_r	توان نامی توربین بادی
V_i	سرعت باد در محل توربین i ام
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$	ضرایب مربوط به آلودگی
M	ضریب هزینه بهره‌برداری و نگهداری
ORR_t	نیاز رزرو بهره‌برداری
Z_i	تعداد ناحیه ممنوعه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

$P_{i,j}^{upper}$	حد بالای ناحیه j ام منطقه ممنوعه i ام
$P_{i,j}^{lower}$	حد پایین ناحیه j ام منطقه ممنوعه i ام
V_{ci}	حداقل سرعت باد که در آن توربین بادی تولید توان دارد.
V_{co}	حداکثر سرعت باد که در آن توربین بادی تولید توان دارد.

۷- مراجع

[1] A. J. Conejo and L. Baringo, "Unit Commitment and Economic Dispatch," in Power System Operations, ed: Springer, 2018, pp. 197-232.

[2] S. Chondrogiannis, M. Poncela-Blanco, A. Marinopoulos, I. Marneris, A. Ntomaris, P. Biskas, et al., "Power system flexibility: A methodological analytical framework based on unit commitment and economic dispatch modelling," in Mathematical Modelling of Contemporary Electricity Markets, ed: Elsevier, 2021, pp. 127-156.

[3] H. Abdi, "Profit-based unit commitment problem: A review of models, methods, challenges, and future directions," Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 110504, 2020.

[4] M. Håberg, "Fundamentals and recent developments in stochastic unit commitment," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 109, pp. 38-48, 2019.

[5] F. Barani, M. Mirhosseini, H. Nezamabadi-pour, and M. M. Farsangi, "Unit commitment by an improved binary quantum GSA," Applied Soft Computing, vol. 60, pp. 180-189, 2017/11/01/ 2017.

[6] S. Fattahi, M. Ashraphijuo, J. Lavaei, and A. Atamtürk, "Conic relaxations of the unit commitment problem," Energy, vol. 134, pp. 1079-1095, 2017/09/01/ 2017.

[7] L. K. Panwar, S. Reddy K, A. Verma, B. K. Panigrahi, and R. Kumar, "Binary Grey Wolf Optimizer for large scale unit commitment problem," Swarm and Evolutionary Computation, vol. 38, pp. 251-266, 2018/02/01/ 2018.

[8] B. Fu, C. Ouyang, C. Li, J. Wang, and E. Gul, "An Improved Mixed Integer Linear Programming Approach Based on Symmetry Diminishing for Unit Commitment of Hybrid Power System," Energies, vol. 12, p. 833, 2019.

[9] J. Zhao, S. Liu, M. Zhou, X. Guo, and L. Qi, "An improved binary cuckoo search algorithm for solving unit commitment problems: Methodological description," IEEE Access, vol. 6, pp. 43535-43545, 2018.

[10] V. Kumar and D. Kumar, "Binary whale optimization algorithm and its application to unit commitment problem," Neural Computing and Applications, vol. 32, pp. 2095-2123, 2020.

[11] N. Kumar, B. K. Panigrahi, and B. Singh, "A solution to the ramp rate and prohibited operating zone constrained unit commitment by GHS-JGT evolutionary algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 81, pp. 193-203, 2016/10/01/ 2016.

[12] S. Pan, J. Jian, and L. Yang, "Solution to dynamic economic dispatch with prohibited operating zones via MILP," arXiv preprint arXiv:1704.01801, 2017.

[13] B. Zhao, A. J. Conejo, and R. Sioshansi, "Unit Commitment Under Gas-Supply Uncertainty and Gas-Price Variability," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, pp. 2394-2405, 2017.

[14] G. Morales-España, Á. Lorca, and M. M. de Weerdt, "Robust unit commitment with dispatchable wind power," Electric Power Systems Research, vol. 155, pp. 58-66, 2018/02/01/ 2018.

[15] J. Li, F. Liu, Z. Li, S. Mei, and G. He, "Impacts and benefits of UPFC to wind power integration in unit commitment," Renewable Energy, vol. 116, pp. 570-583, 2018/02/01/ 2018.

[16] C. Salvini and S. Monacchia, "A Memetic Computing Approach for Unit Commitment with Energy Storage Systems," Energy Procedia, vol. 107, pp. 377-382, 2017/02/01/ 2017.

[17] M. J. Abdollahi and M. Moazzami, "Day-Ahead Coordination of Vehicle-to-Grid Operation and Wind Power in Security Constraints Unit Commitment (SCUC)," Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 6, pp. 49-56, 2015.

[18] K. Poncelet, E. Delarue, and W. D'haeseleer, "Unit commitment constraints in long-term planning models: Relevance, pitfalls and the role of assumptions on flexibility," Applied Energy, vol. 258, p. 113843, 2020.

[19] M. Nemati, M. Braun, and S. Tenbohlen, "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming," Applied energy, vol. 210, pp. 944-963, 2018.

[20] E. Zarei, M. H. Hemmatpour, and M. Mohammadian, "The effects of demand response on security-constrained unit commitment," Scientia Iranica, vol. 26, pp. 1627-1636, 2019.

[21] M. H. Hemmatpour, E. Zarei, and M. Mohammadian, "Incorporating wind power generation and demand response into security-constrained unit commitment," AUT Journal of Electrical Engineering, vol. 50, pp. 141-148, 2018.

[22] M. H. Hemmatpour, "Optimum interconnected islanded microgrids operation with high levels of renewable energy," Smart Science, vol. 7, pp. 47-58, 2019.

[23] M. Tajdinian, M. Z. Jahromi, M. H. Hemmatpour, P. Dehghanian, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Enhancing Transient Stability of Distribution Networks With Massive Proliferation of Converter-Interfaced Distributed Generators," IEEE Systems Journal, pp. 1-12, 2020.

[24] M. H. Hemmatpour and M. H. R. Koochi, "Efficient Wind Turbine Generation Planning for Decreasing Distribution System Company Payments in Real Applications," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]