

# یک روش تصادفی جهت حل مسأله‌ی برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید در حضور عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی با در نظر گرفتن آلودگی

حامد جواهری فرد، حمید فلقی

دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

دانشگاه بیرجند

بیرجند، ایران

hamed@birjand.ac.ir-falaghi@birjand.ac.ir

جواد نجفی

دانشکده‌ی مهندسی

دانشگاه فردوسی

مشهد، ایران

javad.najafi@stu.um.ac.ir

واژه‌های کلیدی — الگوریتم جستجوی تجمع ذرات با ضرایب شتاب متغیر با زمان، برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای نیروگاهی، عدم قطعیت، محدودیت آلودگی، محیط تجدید ساختار یافته

## ۱. مقدمه

مسأله‌ی به مدار آوردن واحدهای تولید (UC) یک مسأله‌ی پیچیده و غیر خطی بهینه‌سازی است که هدف آن تعیین وضعیت روشن و یا خاموش بودن نیروگاه‌ها در یک بازه‌ی زمانی مشخص است به گونه‌ای که هزینه‌های بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها کمینه و همچنین محدودیت‌های مربوط به سیستم قدرت و واحدهای تولیدی برآورده شود. روش‌های متعددی جهت حل مسأله‌ی UC ارائه شده است. روش لیست حق تقدم و برنامه‌ریزی پویا از روش‌های ابتدایی در این زمینه هستند [۱]. روش لاگرانژ، ابزار ریاضی دیگری است که [۲] برای حل مسأله‌ی UC استفاده کرده است. همچنین روش‌های تکاملی نیز مانند الگوریتم ژنتیک کلاسیک در [۳]، الگوریتم علف‌های هرز در [۴] و ... برای حل مسأله بکار گرفته شده است.

در ساختار جدید اقتصادی سیستم قدرت، برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولید با تغییر الگو به برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید (PBUC) تبدیل شده است که در آن برخلاف ساختار سنتی، هدف بیشینه کردن سود شرکت‌های تولید توان است [۵]. در محیط

چکیده — هدف مسأله‌ی برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید در محیط تجدیدساختار، بیشینه کردن سود شرکت‌های تولیدی است. در این مقاله، یک روش تصادفی مؤثر جهت بررسی عدم قطعیت‌های اطلاعات بار و قیمت انرژی در مسأله‌ی مورد نظر ارائه شده است. با استفاده از این روش، شرکت‌های تولیدی می‌توانند سود مورد انتظار واحدهای نیروگاهی خود را در حضور عدم قطعیت محاسبه کنند. امروزه در بحث برنامه‌ریزی عملکرد واحدهای تولید توان علاوه بر اهداف اقتصادی، ملاحظات آلودگی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش پیشنهادی به شرکت‌های تولید توان کمک می‌کند تا تصمیم بگیرند چگونه واحدهای تولیدی خود را در حضور عدم قطعیت‌ها به منظور افزایش سود و کاهش آلودگی در بازار برق رقابتی برنامه‌ریزی کنند. برای حل مسأله از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات با ضرایب شتاب متغیر با زمان (TVACPSO) استفاده شده است. جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی بر روی یک سیستم ۱۰ واحدی برای مدت ۲۴ ساعت انجام گرفته است. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی برتری روش پیشنهادی در مقایسه با سایر پژوهش‌ها است.

روی یک سیستم ۱۰ واحدی پیاده‌سازی خواهد شد و نتایج در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲. مدلسازی ریاضی مسأله PBUC

### ۲.۱. تابع هدف

هدف نهایی مسأله PBUC بیشینه کردن سود شرکت‌های تولید توان

است. مدل ریاضی توابع هدف مسأله به صورت زیر است:

$$\max PF = RV - TC \quad (1)$$

$$RV = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t} SP_i \quad (2)$$

$$TC = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (FC_i(P_{i,t})U_{i,t}) + SU_i \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۱) سود کل،  $RV$  درآمد کل و  $TC$  هزینه کل تولید است. در رابطه‌ی (۲)  $P_{i,t}$  توان تولیدی واحد  $i$  ام در زمان  $t$ ،  $SP_i$  پیش‌بینی قیمت بازار برای انرژی در زمان  $t$  ام است. در رابطه‌ی (۳)  $FC_i$  هزینه سوخت واحد  $i$  ام،  $U_{i,t}$  وضعیت روشن و یا خاموش بودن واحد  $i$  ام در زمان  $t$  ام که دارای دو حالت یک و یا صفر است،  $SU_i$  هزینه راه‌اندازی واحد  $i$  ام،  $T$  کل دوره‌ی برنامه‌ریزی و  $N$  تعداد واحدهای نیروگاهی است. هزینه راه‌اندازی در قالب ریاضی به صورت رابطه‌ی (۴) بیان می‌شود.

$$SU_i = \begin{cases} H_{start\ up, i} & \text{if } T_i^{off} \geq MDT_i + (T_{cold}) \\ C_{start\ up, i} & \text{if } T_i^{on} \leq MDT_i + (T_{cold}) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن  $H_{start\ up}$  هزینه راه‌اندازی گرم،  $C_{start\ up}$  هزینه راه‌اندازی سرد،  $T_{cold}$  میزان زمانی که مشخص‌کننده صرفه‌ی اقتصادی واحد نیروگاهی برای راه‌اندازی گرم یا سرد و همچنین  $MDT_i$  حداقل زمان مجاز فعالیت واحد  $i$  ام است.

### ۲.۲. محدودیت‌های مسأله

تقاضای بار: در مسأله PBUC محدودیت بار و تولید نسبت به مسأله UC متفاوت است. در محیط تجدید ساختار مجموع توان تولیدی واحدهای نیروگاهی معمولاً کمتر یا مساوی بار پیش‌بینی شده‌ی سیستم است.

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} U_{i,t} \leq P_{D,t} \quad \text{for } t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

تجدید ساختار یافته با ایجاد یک فضای رقابتی، مشتریان می‌توانند انرژی مصرفی خود را با توجه به قیمت‌های پیشنهادی شرکت‌های تولیدی تأمین نمایند [۷]. مانند مسأله UC روش‌های مختلفی نیز برای حل مسأله PBUC تاکنون ارائه شده است که می‌توان به این موارد اشاره کرد: روش برنامه‌ریزی آمیخته با اعداد صحیح در [۷]، الگوریتم ژنتیک در [۸]، الگوریتم تجمع ذرات در [۹] و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در [۱۰].

یکی از مهمترین عوامل آلودگی هوا، نیروگاه‌ها هستند. نیروگاه‌ها با مصرف سوخت‌های فسیلی، گازهای گلخانه‌ای تولید می‌کنند. گازهای گلخانه‌ای موجب آلوده کردن هوا و تغییر شرایط اکوسیستمی محیط می‌شوند. از مهمترین اقدامات جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای، می‌توان به پیمان بین‌المللی کیوتو بین کشورهای صنعتی اشاره کرد. به همین علت در برنامه‌ریزی مشارکت مبتنی بر سود نیروگاه‌ها علاوه بر اهداف اقتصادی، مسائل زیست محیطی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چگونگی کنترل محدودیت آلودگی نیروگاه‌ها در مسأله PBUC متفاوت است. در برخی از پژوهش‌ها مانند [۱۱] آلودگی به صورت قید مدلسازی می‌شود که در آن آلودگی نیروگاه‌ها باید از حد مشخصی کمتر باشند. در پژوهش مزبور مسأله PBUC همراه با قید آلودگی توسط الگوریتم جهش قورباغه حل شده است. اما در برخی از پژوهش‌های دیگر مانند [۱۲] آلودگی به صورت تابع هدف در نظر گرفته شده است و در نتیجه توابع هدف مسأله شامل بیشینه کردن سود شرکت‌های تولیدی و کمینه کردن آلودگی است.

بیشتر پژوهش‌ها، مسأله PBUC را در محیط قطعی بررسی کرده‌اند. در محیط قطعی بار و قیمت انرژی از قبل پیش‌بینی می‌شود. اما در واقعیت تمام پیش‌بینی‌ها دارای خطا هستند. چگونگی مدلسازی عدم قطعیت قیمت انرژی متفاوت است. مرجع [۱۳] قیمت انرژی را به صورت تابع فازی در نظر گرفته و با قواعد فازی تأثیر عدم قطعیت قیمت انرژی بر سود شرکت‌ها را بررسی کرده است. مرجع [۱۴] برای پیش‌بینی قیمت انرژی، عدم قطعیت قیمت انرژی را با منحنی نرمال لگاریتمی مدلسازی کرده است.

در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای نیروگاهی همراه با قید آلودگی و عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی بررسی خواهد شد. با استفاده از روش پیشنهادی، شرکت‌های تولیدی می‌توانند با رعایت مسائل زیست محیطی سود مورد انتظار واحدهای نیروگاهی خود را در حضور عدم قطعیت‌ها محاسبه کنند. جهت حل مسأله از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات با ضرایب شتاب متغیر با زمان (TVACPSO) به عنوان ابزار بهینه‌سازی کمک گرفته شده است. سپس روش پیشنهادی بر

در رابطه بالا  $P_{D,t}$  بیانگر میزان بار تقاضا در ساعت  $t$  ام است.

حداقل زمان روشن / خاموش بودن نیروگاه‌ها: میزان زمان روشن بودن و خاموشی کار می‌کند، باید از حداقل زمان روشن شدن  $MUT_i$  بیشتر و میزان خاموشی در واحدها از زمانیکه متوقف می‌شود، باید از حداقل زمان خاموشی بودن  $MDT_i$  بیشتر باشد.

(۱۱)

$$T_{i,t}^{on} \geq MUT_i, T_{i,t}^{off} \geq MDT_i \quad \text{for } i=1, \dots, N \text{ and } t=1, \dots, T$$

در رابطه‌ی (۱۱) مدت زمان روشن بودن واحد  $i$  ام و  $T_{i,t}^{on}$  مدت زمان خاموش بودن واحد  $i$  ام را نشان می‌دهد.

### ۲.۳. مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی

در واقعیت تمام پیش‌بینی‌ها دارای خطا هستند. با توجه به وجود خطا در نمونه‌برداری و یا اندازه‌گیری، تمامی اطلاعات و متغیرها دارای عدم قطعیت هستند. بنابراین سیستم قدرت باید در فضای عدم قطعیت‌ها بررسی شود. این فضای جدید نیازمند یک ابزار قدرتمند جهت انتقال متغیرها از یک محیط قطعی به یک محیط تصادفی است. در محیط تجدید ساختار یافته، دو متغیر مهم بار و قیمت انرژی نیز دارای عدم قطعیت است. در این مقاله عدم قطعیت‌های مرتبط با بار و قیمت انرژی به صورت تابع توزیع نرمال با هفت سطح احتمال مطابق شکل (۱) مدل‌سازی می‌شود. تفاوت بین هر دو سطح مختلف برابر با انحراف معیار آن متغیر است. برای مدل‌سازی هر یک از سطوح احتمالی متغیرهای تصادفی از چرخ گردان استفاده می‌کنیم. چرخ گردان دارای هفت قطاع (هفت سطح تابع توزیع نرمال با احتمال وقوع مشخص) است. بدین ترتیب که ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌کنیم سپس عدد تولید شده در یکی از هفت سطح چرخ گردان قرار می‌گیرد و مقدار متغیر دارای عدم قطعیت باید از آن سطح انتخاب شود [۱۵]. هر سناریو که شامل متغیرهای دارای عدم قطعیت است به صورت رابطه‌ی (۱۲) است.

$$[P_{load,t}^s, Price_t^s] \quad \text{for } t=1, 2, \dots, T, s=1, 2, \dots, N_s \quad (۱۲)$$

که در آن  $Price_t^s, P_{load,t}^s$  به ترتیب مقدار بار و قیمت انرژی در ساعت  $t$  ام در سناریوی  $s$  ام و  $N_s$  تعداد کل سناریوها است.

ذخیره‌ی چرخان: رعایت قید ذخیره‌ی چرخان در مسأله‌ی PBUC با مسأله‌ی UC متفاوت است. در اینجا شرکت‌های تولیدی بر اساس سودشان می‌توانند ذخیره‌ی چرخان کمتری نسبت به مقدار تعیین شده تولید کنند.

$$\sum_{i=1}^N SR_{i,t} U_{i,t} \leq SR_{i,t}^{max} \quad \text{for } t=1, 2, \dots, T \quad (۶)$$

که در آن  $SR_{i,t}$  میزان ذخیره‌ی چرخان واحد  $i$  ام در ساعت  $t$  ام است.

قید آلودگی: امروزه نگرانی‌ها در مورد افزایش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی زیست محیطی افزایش یافته است. در این مقاله آلودگی ناشی از نیروگاه‌ها به صورت قید در نظر گرفته شده است. تابع آلودگی نیروگاه‌ها به صورت رابطه‌ی (۷) بیان می‌شود.

(۷)

$$E_i(P_{i,t}) = \gamma(P_{i,t})^2 + \beta P_{i,t} + \alpha \quad \text{for } i=1, \dots, N \text{ and } t=1, \dots, T$$

$\alpha, \beta$  و  $\gamma$  ضرایب آلودگی هستند. این محدودیت بیان می‌کند که میزان آلودگی تولید شده‌ی واحدها در هر ساعت باید کمتر از مقدار  $E_{max}$  و همچنین مجموع آلودگی کل در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی نیز از مقدار  $E_{total max}$  کمتر باشد.

$$\sum_{i=1}^N E_{i,t}(P_{i,t}) < E_{max} \quad \text{for } t=1, 2, \dots, T \quad (۸)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N E_{i,t}(P_{i,t}) < E_{total max}$$

حد تولید واحدهای نیروگاهی: هر واحد نیروگاهی تنها مجاز به تولید توان در محدوده‌ی مشخصی است.

$$P_{i min} \leq P_{i,t} U_{i,t} \leq P_{i max} \quad \text{for } i=1, \dots, N \text{ and } t=1, \dots, T \quad (۹)$$

در رابطه‌ی (۹)،  $P_{i min}$  و  $P_{i max}$  به ترتیب حد بیشینه و کمینه‌ی تولید واحدهای نیروگاهی است.

نرخ افزایشی و کاهش‌ی تولید واحدهای نیروگاهی: واحدهای نیروگاهی تنها مجازند به اندازه‌ی نرخ افزایشی یا کاهش‌ی توان تولیدی خود را افزایش یا کاهش دهند.

(۱۰)

$$P_{i,t-1} - DR_i \leq P_{i,t} \leq P_{i,t-1} + UR_i \quad \text{for } i=1, \dots, N \text{ and } t=1, \dots, T$$

در رابطه‌ی (۱۰)  $UR_i$  و  $DR_i$  به ترتیب حد نرخ شیب کاهش‌ی و افزایش‌ی واحد  $i$  ام است.

و گروهی،  $rand$  عددی تصادفی بین صفر و یک است. با تعیین سرعت بعدی هر ذره موقعیت بعدی آن از رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

$$X_{i,j} = X_{i,j} + V_{i,j} \quad (17)$$

### ۳.۲. الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات با ضرایب شتاب

#### متغیر با زمان

اگرچه الگوریتم PSO با ضرایب یونیفرسیمتغیر با زمان، با سرعت بالایی می‌تواند به جواب‌های خوبی دست یابد ولی توانایی آنالگوریتم در تنظیم جواب‌های بهینه ضعیف است که معمولاً به دلیل نداشتن تنوع در طبیعت جستجو است. به همین دلیل در این مقاله هم‌دلیاز الگوریتم PSO به کار گرفته شده است که در آن ضرایب شتاب با زمان تغییر می‌کند.

در الگوریتم پیشنهادی ضرایب شتاب به صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$C_{1i} = \frac{(C_{1f} - C_{1i}) * iter}{iter \max} + C_{1i} \quad (18)$$

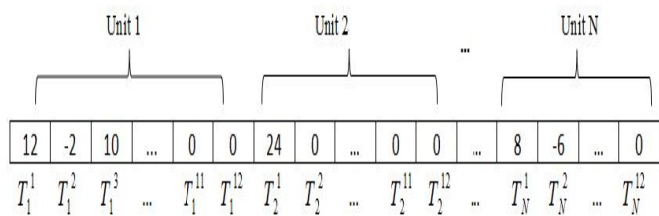
$$C_{2i} = \frac{(C_{2f} - C_{2i}) * iter}{iter \max} + C_{2i} \quad (19)$$

در این رابطه  $C_{1i}$ ،  $C_{1f}$ ،  $C_{2i}$  و  $C_{2f}$  مقادیر اولیه و نهایی ضرایب شتاب متغیر هستند.

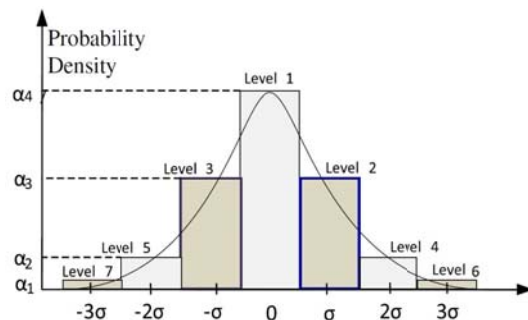
### ۴. کاربرد الگوریتم جستجوی گرانشی در حل

#### مسأله‌ی PBUC

ایجاد جمعیت اولیه: جمعیت اولیه یا همان ذرات به صورت اعداد صحیح تولید می‌شوند. برای نشان دادن میزان ساعت روشن یا خاموش به ترتیب از اعداد صحیح مثبت و منفی استفاده شده است، همچنین عدد صفر به منزله‌ی تمام شدن دوره فعالیت واحد در ۲۴ ساعت است. شکل (۲) یک نمونه جواب از جمعیت اولیه را نشان می‌دهد که نمایانگر وضعیت تمام واحدهای نیروگاهی در مدت ۲۴ ساعت است. تعداد سیکل‌های هر واحد برابر با ۱۲ در نظر گرفته شده است،



شکل (۲): یک نمونه از جمعیت اولیه



شکل (۱): تابع چگالی بار و قیمت انرژی

### ۳. الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

#### ۳.۱. الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که برای اولین بار توسط Kennedy و Eberhart در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شد. این الگوریتم از حرکت و رفتار گروهی پرندگان در جستجوی غذا الهام گرفته است. در PSO هر یک از ذرات به عنوان کاندیدا حل برای جواب بهینه در فضای چند بعدی مسأله می‌باشد [۱۶].

هر ذره در فضای  $N$  بعدی مسأله دارای یک موقعیت فعلی ذره  $X_i(t)$  و سرعت فعلی ذره  $V_i(t)$  می‌باشد.

$$X_i(t) = (X_{i1}(t), X_{i2}(t), \dots, X_{in}(t)) \quad (13)$$

$$V_i(t) = (V_{i1}(t), V_{i2}(t), \dots, V_{in}(t))$$

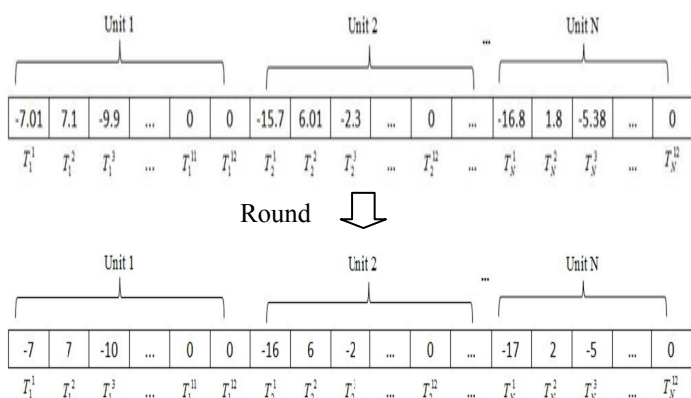
موقعیت بعدی هر ذره توسط چهار عامل اصلی سرعت فعلی ذره، موقعیت فعلی ذره، بهترین موقعیت قبلی ذره  $P_{best}$  و بهترین موقعیت در میان ذرات گروه  $G_{best}$  تعیین می‌گردد. با توجه به تعاریف ذکر شده سرعت بعدی هر ذره از طریق رابطه (۱۴) بیان می‌شود.

$$V_{i,j} = \omega * V_{i,j} + C_1 * rand * (P_{besti,j} - X_{i,j}) + C_2 * rand * (G_{bestj} - X_{i,j}) \quad (14)$$

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) * iter / iter_{\max} \quad (15)$$

در رابطه (۱۴)  $P_{besti,j}$  بعد  $j$  بهترین موقعیت ذره  $i$  و  $G_{bestj}$  بعد  $j$  از بهترین موقعیت در میان ذرات گروه می‌باشد. همچنین در رابطه (۱۵)،  $\omega$  ضریب اینرسی ذره برای حرکت با سرعت قبلی،  $\omega_{\max}$  مقدار نهایی ضریب اینرسی،  $\omega_{\min}$  مقدار اولیه ضریب اینرسی،  $iter$  تکرار فعلی،  $iter_{\max}$  حداکثر تعداد تکرار الگوریتم،  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب شتاب فردی

۲۴ می‌شود. در نتیجه پاسخ  $f$  یا همان پاسخ مسأله‌ی PBUC همراه با عدم قطعیت‌ها بدست می‌آید.



شکل (۳): پاسخ نهایی مسأله‌ی PBUC همراه با عدم قطعیت‌ها

با ارزیابی پاسخ نهایی (وضعیت واحدهای نیروگاهی در حضور عدم قطعیت‌ها) می‌توان سود نهایی مورد انتظار واحدهای نیروگاهی در حضور عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی را محاسبه کرد.

### ۶. مطالعات عددی و نتایج

در این آزمایش، مسأله‌ی PBUC با لحاظ قید آلودگی بار در محیط قطعی و بار دیگر همراه با عدم قطعیت‌ها حل شده است. نتایج حاصل در محیط قطعی در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مقایسه نتایج به دست آمده با سایر پژوهش‌ها در آزمایش (۱)

روش حل	هزینه تولید (دلار)	درآمد (دلار)	سود (دلار)	آلودگی (تن)
UC [۱۱]	۵۷۰۰۱۴/۳۵	۶۵۱۳۸۰	۸۱۳۶۵/۶۵	۲۸۲۴۴/۱۵
PBUC using SFLA [۱۱]	۵۲۶۹۹۲/۸	۶۳۰۲۵۵/۳	۱۰۳۲۶۲/۵	۲۶۶۱۷/۵۶
PBUC using ICA [۱]	۵۲۱۴۹۹/۳۸	۶۲۵۸۲۸/۳	۱۰۴۳۲۸/۹۲	۲۶۰۵۵/۸۱
روش پیشنهادی مقاله (بیشینه آلودگی تولیدی برابر با آلودگی تولیدی [۱۸] است)	۵۱۹۸۲۲/۸۷	۶۲۴۴۴۶/۸	۱۰۴۶۲۳/۹۳	۲۶۰۴۷/۳۱
روش پیشنهادی مقاله	۴۹۶۰۰۲/۰۹	۶۰۲۹۴۵/۴	۱۰۶۹۴۳/۳۱	۲۶۵۷۷/۸۳

در محیط دارای عدم قطعیت، ابتدا ۲۰۰۰ سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار و قیمت انرژی تولید شده است. سپس ۲۰ سناریو با احتمال

تشکیل لیست حق تقدم برای ورود نیروگاه‌ها به مدار بدون در نظر گرفتن قید آلودگی، لیست حق تقدم تنها بر اساس قیمت توان تولیدی واحدها (ارزان بودن واحدها) تشکیل می‌شود. اما با در نظر گرفتن قید آلودگی، این لیست بر اساس دوفاکتور هزینه توان و آلودگی بر اساس رابطه‌ی (۲۰) است.

$$h_i = \frac{FC(P_{i\max})}{E(P_{i\max})} \quad (20)$$

مراحل تشکیل لیست حق تقدم برای ورود نیروگاه‌ها به مدار به صورت زیر است.

۱-  $h_i$  همه واحدها محاسبه می‌شود.

۲-  $h_i$  ها برای تمامی واحدها به صورت صعودی مرتب می‌شوند.

واحدهای تولیدی با  $h_i$  کوچکتر برای ورود به مدار مقدم‌اند.

### ۵. چگونگی حل مسأله‌ی PBUC با در نظر گرفتن

#### عدم قطعیت‌ها

نحوه‌ی مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بار و قیمت انرژی قبلاً بیان شد. برای حل مسأله‌ی PBUC همراه با عدم قطعیت‌ها ابتدا ۲۰۰۰ سناریو برای عدم قطعیت بار و قیمت انرژی تولید می‌شود. پس از محاسبه احتمال وقوع تمام سناریوها، تعداد مشخصی سناریو با احتمال وقوع بیشتر انتخاب شده و حال برای سناریوهای انتخابی، احتمالات وقوع آنها نرمالایز می‌شود به طوری که مجموع احتمالات وقوع سناریوهای انتخابی برابر یک شوند. سپس مسأله‌ی PBUC برای سناریوهای انتخاب شده حل می‌گردد و پاسخ نهایی هر یک از سناریوهای انتخاب شده که شامل وضعیت واحدهای نیروگاهی است در مجموعه‌ای به نام answer ذخیره می‌شوند. آنگاه طبق رابطه‌ی (۲۱)، جواب مسأله‌ی PBUC همراه با عدم قطعیت‌ها بدست می‌آید.

$$f = \sum_{s=1}^{n_s} \pi_s^{nom} \times answer_s \quad (21)$$

که در آن  $N_s$  تعداد سناریوهای انتخاب شده،  $\pi_s^{nom}$  احتمال نرمالایز شده‌ی سناریوی  $s$  و  $f$  جواب نهایی مسأله‌ی PBUC است که شامل ساعات برنامه‌ریزی واحدهای نیروگاهی است.  $f$  از طریق نوعی میانگین‌گیری محاسبه شده و امکان صحیح نبودن و اعشاری بودن اعداد وجود دارد. به همین دلیل مانند شکل (۳) اعداد صحیح شده و مجموع قدرمطلق آنها برای هر واحد نیروگاهی برابر با دوره‌ی مورد مطالعه یا همان

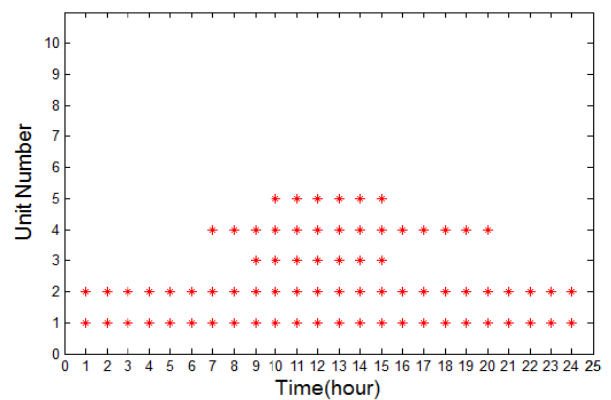
## جدول (۳): نتایج مسأله‌ی PBUC و پاسخ پیشنهادی برای سناریوهای متفاوت

شماره سناریو	پاسخ هر سناریو (\$)	آلودگی سناریو (تن)	پاسخ روش پیشنهادی (\$)	آلودگی روش پیشنهادی (تن)
۱	۱۰۲۹۷۶/۹	۲۶۵۶۰	۱۰۲۲۸۹/۵	۲۶۳۹۵/۲
۲	۱۱۲۶۰۴/۹	۲۶۶۱۳/۶	۱۱۱۷۵۸/۹	۲۶۳۳۵/۲
۳	۱۰۴۳۸۰	۲۶۵۰۲/۹	۱۰۳۹۱۸/۴	۲۶۴۶۰/۹
۴	۱۰۴۵۱۱/۱	۲۶۵۵۸/۸	۱۰۳۸۷۵/۳	۲۶۳۹۴/۲
۵	۱۰۵۳۴۳/۴	۲۶۵۷۲/۱	۱۰۵۱۷۲/۷	۲۶۵۹۰/۵
۶	۱۰۸۹۶۳/۳	۲۶۶۱۴/۷	۱۰۸۳۳۶/۶	۲۶۵۰۰
۷	۱۰۲۴۶۸/۱	۲۶۴۶۹/۴	۱۰۲۳۷۴/۱	۲۶۳۶۳
۸	۱۱۱۴۵۶/۸	۲۶۶۱۱/۵	۱۱۱۲۹۲/۴	۲۶۶۲۸/۵
۹	۱۰۷۲۹۸/۷	۲۶۴۳۷/۶	۱۰۶۶۲۷	۲۶۴۵۶/۴
۱۰	۱۰۹۲۱۱/۱	۲۶۶۰۶/۱	۱۰۸۷۲۴/۵	۲۶۵۲۷/۵
۱۱	۱۰۶۵۰۰/۸	۲۶۵۳۴/۷	۱۰۵۸۵۰/۸	۲۶۴۲۵/۵
۱۲	۱۰۴۴۱۱/۴	۲۶۵۲۲/۵	۱۰۳۴۰۰/۵	۲۶۴۳۱/۲
۱۳	۱۰۲۳۳۱/۲	۲۶۶۰۳/۵	۱۰۲۰۵۲/۸	۲۶۵۲۰/۴
۱۴	۱۰۸۷۵۱/۹	۲۶۵۷۱/۹	۱۰۸۳۳۴/۹	۲۶۴۸۶/۸
۱۵	۱۰۵۱۵۶/۹	۲۶۶۱۵/۱	۱۰۴۷۹۶/۱	۲۶۴۴۹/۸
۱۶	۱۰۷۱۵۵/۴	۲۶۶۰۷/۱	۱۰۶۶۲۸/۴	۲۶۵۲۷/۳
۱۷	۱۰۴۰۸۳/۹	۲۶۴۲۷/۲	۱۰۳۶۳۴/۵	۲۶۳۶۲/۳
۱۸	۱۰۵۴۰۰/۶	۲۶۴۰۶/۸	۱۰۴۹۲۰/۴	۲۶۳۷۰/۱
۱۹	۱۰۶۲۸۶/۴	۲۶۴۶۶/۱	۱۰۵۹۶۲/۷	۲۶۴۴۳/۳
۲۰	۱۰۴۱۰۰/۳	۲۶۵۵۸/۴	۱۰۴۰۹۹/۲	۲۶۵۲۲/۹

وقوع بیشتر را انتخاب و مسأله‌ی PBUC برای آنها حل شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی از تابع توزیع نرمال با انحراف معیار  $\sigma$  استفاده شده و در این آزمایش انحراف معیار برابر با ۳ درصد فرض شده است. در برخی از سناریوها سود واحدهای نیروگاهی بیشتر و در برخی سناریوهای دیگر کمتر از محیط قطعی است. حال باید بتوانیم پاسخی را در محیط عدم قطعیت انتخاب کنیم تا در صورت وقوع هر سناریویی، جواب مسأله نزدیک به پاسخ بهینه باشد. چنانچه از پاسخ مسأله‌ی PBUC به صورت قطعی در محیط دارای عدم قطعیت استفاده شود به دلیل آنکه در محیط قطعی دارای بیشترین سود است پس در بعضی از سناریوها محدودیت آلودگی را نقض می‌کند پس باید به دنبال پاسخی باشیم که در تمام سناریوها علاوه بر بیشینه کردن سود در محیط دارای عدم قطعیت، آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها نیز کمتر شوند. پس برای انتخاب یک جواب مناسب در محیط دارای عدم قطعیت از روش پیشنهادی که قبلاً توضیح داده شد استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، پاسخ انتخابی طبق رابطه‌ی (۲۱) محاسبه می‌گردد. جدول (۲) نتایج حاصل از اجرای مسأله‌ی PBUC بر روی ۲۰ سناریو با احتمال وقوع بیشتر را نشان می‌دهد. طبق جدول (۳)، با استفاده از پاسخ پیشنهادی در محیط عدم قطعیت و عدم توجه به وقوع هرگونه سناریویی، پاسخ مسأله‌ی PBUC نزدیک به پاسخ بهینه همان سناریو و با رعایت محدودیت آلودگی بدست می‌آید. میزان مجاز آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها در این آزمایش در هر ساعت برابر با ۱۳۵۰ تن و در مجموع دوره‌ی برنامه‌ریزی برابر با ۲۶۶۵۰ تن است. پس چنانچه بهره‌بردار با محیطی که دارای عدم قطعیت بار و قیمت انرژی است مواجه شود بهتر است از این پاسخ آزمایش استفاده کند. مشخصات پاسخ در شکل (۴) آمده است که وضعیت واحدهای نیروگاهی طی مدت برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. طبق شکل (۴) هیچکدام از واحدهای ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ در مدت برنامه‌ریزی وارد مدار نمی‌شوند.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله‌ی PBUC در محیط تجدید ساختار با هدف پیشینه‌سازی سود شرکت‌های تولیدی با در نظر گرفتن محدودیت آلودگی و عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی مورد بررسی قرار گرفت. جهت حل مسأله‌ی مورد نظر از الگوریتم TVACPSO به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، بار و قیمت انرژی توسط تابع توزیع نرمال مدل شده و سپس با تولید سناریوهای متفاوت و شناسایی سناریوها با احتمال وقوع بیشتر، مسأله‌ی PBUC همراه با قید آلودگی برای آن‌ها حل و با بررسی پاسخ‌های بدست آمده برای سناریوهای انتخابی، پاسخ نهایی مسأله در محیط عدم قطعیت بدست آمد. جهت نمایش کارایی روش و الگوریتم پیشنهادی، یک تست سیستم استاندارد مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج بدست آمده با سایر پژوهش‌ها مقایسه و حاکی از کارایی روش و مدل پیشنهادی در تصمیم‌گیری مشارکت واحدها نیروگاهی در محیط تجدید ساختار است.



شکل (۴): وضعیت واحدهای نیروگاهی در محیط عدم قطعیت در آزمایش (۲)

## ۸. منابع

- [5] Shahidehpour, M., Yamin, H., and Li, Z., (2002) Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management. John Wiley & Sons.
- [6] Yamin, H.Y., El-Dwairi, Q., and Shahidehpour, S.M., "A new approach for GENCOs profit based unit commitment in day-ahead competitive electricity markets considering reserve uncertainty," International Journal of Electrical Power & Energy systems., vol. 29, no. 8, pp. 609-616, 2007.
- [7] Li, T., and Shahidehpour, M., "Price-Based unit commitment: a case of Lagrangian Relaxation versus Mixed Integer Programming," IEEE Trans on Power Syst, vol. 20, no. 4, pp. 2015-2025, 2005.
- [8] Solanki, J., Khushalani, S., and Srivastava, A., (2006) "A genetic algorithm approach to Price-based unit commitment," Proc. IEEE NAPS.Meet.PP. 425- 429.
- [9] Y. Xiaohui, Y. Yanbin, W. Cheng and Z. Xiaopan, "An Improved PSO Approach for Profit-based Unit Commitment in Electricity Market", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005.
- [10] Roy, P.K., "Solution of unit commitment problem using gravitational search algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy systems., Vol. 53, pp. 85-94, 2013.
- [11] Venkatesan, T., and Sanavullah, M.Y., "SFLA approach to solve PBUC problem with emission limitation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems., Vol. 46, No. 1, pp.1-9, 2013.
- [12] Catalão, J.P.S., Mariano, S.J.P.S., Mendes, V.M.F., and Ferreira, L.A.F.M., (2007) "Profit-based unit commitment with emission limitations :A multiobjective approach," Proc. IEEE Power Tech. pp. 1417-1422.
- [13] Khorramramnia, R., and Khorrami, S.K., "Price based unit commitment considering fuzzy uncertainty," American Journal of Electrical and Electronic Engineering., Vol. 1, No. 1, pp. 10-14, 2013.
- [14] Li, T., and Shahidehpour, M., "Price-Based unit commitment: a case of Lagrangian Relaxation versus Mixed Integer Programming," IEEE Trans on Power Syst, vol. 20, no. 4, pp. 2015-2025, 2005.
- [15] Mohammadi, S., Soleymani, S., and Mozafari, B., "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, no. 52, pp. 525-535, 2014.
- [16] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization" IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [17] J. Ebrahimi, S.H. Hosseinian, and G.B. Gharehpetian, "Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 573-581, 2011.
- [18] ایاتامی کرین، آباغرامیان، ج. نیکوکار، "برنامه‌ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولید توان با استفاده از الگوریتم ICA با در نظر گرفتن قیود آلودگی و هزینه‌راه‌اندازی"، کنفرانس بین المللی برق PSC2013.
- [1] H.Y. Yamin, "Review on methods of generation scheduling in electric power systems," Electric Power Systems Research, vol. 69, no. 2-3, pp.227-248, 2004.
- [2] Gooi, H.B., Mendes, D.P., Bell, K.R.W. and Kirschen, D.S., "Optimal scheduling of spinning reserve," IEEE Trans on Power Syst, vol. 14, no. 4, pp. 1485-1492, 1999.
- [3] K. S. Swarup, and S. Yamashiro, "Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no.1, pp. 87-91, 2002.
- [4] Saravanan, B., Vasudevan, E.R., and Kothari, D.P., "Unit commitment problem solution using invasive weed optimization algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy systems., vol. 55, pp. 21-28, 2014.