

ارزیابی نقش قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدهای نیروگاهی بر درآمدهای استراتژیک بنگاه‌های تولید

محمد امان کاه^۱

محمد صادق جوادی^۲

^۱ گروه برق و الکترونیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران amankah.m@gmail.com

^۲ گروه برق و الکترونیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران msjavadi@gmail.com

چکیده

یکی از مهمترین قیود استراتژیک واحدهای نیروگاهی برای مشارکت در بازار برق، قیود حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحد نیروگاهی است. این قیود به عنوان قیود مکانیکی نیروگاه‌های موجود در سیستم قدرت به شمار می‌روند و برای مشارکت واحد نیروگاهی در بازار برق به عنوان یکی از قیود ابراز شده توسط بنگاه‌های تولید تلقی می‌گردند. چابکی یک نیروگاه و تیم بهره‌بردار آن می‌تواند به عنوان یک عامل استراتژیک برای مشارکت در بازار برق به حساب آید. در این مقاله، ارزیابی نقش قیود استراتژیک یاد شده بر درآمدهای بنگاه‌های تولید مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور برنامه مشارکت واحدهای نیروگاهی که از سوی نهاد مستقل بازار مدیریت و اجرا می‌گردد به عنوان مسئله اصلی و پیشنهادهای استراتژیک بنگاه تولید مورد نظر به عنوان یک زیر مسئله در نظر گرفته شده است. در حقیقت، مسئله تعیین وضعیت مشارکت یک نیروگاه در بازار برق، در یک مدل رقابتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا تأثیر عوامل استراتژیک برای بنگاه‌های تولید در یک فرآیند ایده‌آل و رقابتی مورد سنجش قرار گیرد. به منظور شبیه‌سازی روش پیشنهادی، برنامه مشارکت واحدها در قالب یک مسئله بهینه‌سازی مختلط با عدد صحیح توسعه داده شده و روی یک مورد مطالعاتی استاندارد، مورد آزمون قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بازار برق تجدید ساختار شده، مشارکت واحدهای تولیدی از دیدگاه تولیدکنندگان، در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن قیود امنیت، بهینه‌سازی مختلط با عدد صحیح.

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت تجدیدساختار شده، بنگاه‌های تولیدی (GenCoها) به دنبال حداکثر کردن سود خود از مشارکت در بازار برق هستند [۱]. از دیگر سو، یک نهاد مستقل، بهره‌برداری از مجموعه واحدهای نیروگاهی و تجهیزات شبکه قدرت را به نحوی مدیریت می‌نماید که علاوه بر تأمین بار مشترکین خود با کمترین هزینه، امنیت در بهره‌برداری و تداوم سرویس‌رسانی به مصرف‌کنندگان نهایی را

نیز برآورده نماید [۲]. در چنین فضایی، دو دیدگاه متناقض و رقابتی بر مسئله برنامه‌ریزی تولید در افق کوتاه‌مدت سایه می‌افکند که در آن، بنگاه‌های تولید، صرفنظر از میزان تولید، به دنبال بیشینه کردن سود خود از مشارکت در بازار برق هستند و از سوی دیگر، نهاد بهره‌بردار غیر انتفاعی سیستم (ISO)، رویکردی متفاوت یعنی کمینه کردن هزینه بهره‌برداری را در دستور کار خود دارد [۳-۵]. از سوی دیگر، بنگاه‌های تولیدی نیز با یکدیگر بر سر موضوع کسب حداکثر

حرارتی واحد و همچنین جز لاینفک آن می‌باشند، نیز بایستی در مسئله گنجانده شوند.

در این مقاله حداکثر سازی سود به عنوان تابع هدف یک بنگاه تولید در نظر گرفته شده است و برای حل مسئله، بنگاه تولید مورد نظر بایستی علاوه بر پیشنهادات قیمتی استراتژیک خود به بازار، قیود فنی مربوط به حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد را نیز به بهره‌بردار مستقل سیستم ابراز نماید. به این ترتیب، چابکی تیم بهره‌بردار واحد نیروگاهی نیز به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر مشارکت واحد و سود آن مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ابتدا اطلاعات مسئله بدون تغییر در قیود حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحد در قالب مسئله UC، بررسی شده و سپس تأثیر آن در مسئله PBOC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نیروگاهی ۱۰ واحدی انجام شده، که با افزایش یا کاهش قیود مذکور به تنهایی و افزایش یا کاهش آنها با هم در حالت‌های مختلف، این مسئله را مورد بررسی قرار داده است.

۲- برنامه

برنامه به مدار آمدن واحدهای نیروگاهی در سیستم‌های قدرت مدرن، شباهت بسیار زیادی به برنامه UC بر مبنای هزینه در حالت سنتی دارد. در حالت سنتی، بهره‌برداری مبتنی بر هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی که هزینه سوخت و بهره‌برداری عامل تعیین کننده در تابع هزینه به شمار می‌رفت، انجام می‌شد. در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده مبتنی بر پیشنهاد تولیدکنندگان، استراتژی‌های قیمت‌دهی در تابع هزینه پیشنهادی خود را نشان می‌دهند. در چنین حالتی بهره‌برداری از سیستم قدرت با هدف کمینه‌سازی قیمت تمام شده تولید انرژی الکتریکی و هزینه‌های روشن و خاموش شدن واحدهای تولید نیرو در افق برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد. مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به صورت زیر معرفی می‌گردد [۲۲]:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} [F_{ci}(P_{it}) * I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] \quad (1)$$

که در آن:

$F_{ci}(P_{it})$: تابع پیشنهاد قیمت واحد تولیدی

SU_{it} : هزینه راه‌اندازی واحد

SD_{it} : هزینه خاموش شدن واحد

I_{it} : وضعیت واحد i ام در ساعت t ام که ۱ به منزله روشن

بودن واحد و ۰ به منزله خاموش بودن واحد

سود از مشارکت در بازار به رقابت می‌پردازند [۵]. رقابت بازیگران عرصه تولید با یکدیگر در بازار برق خود بر برنامه‌ریزی مشارکت واحدها که از سوی ISO مدیریت و اجرا می‌گردد تأثیرگذار خواهد بود.

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای تولیدی (Unit Commitment) یک مسئله پیچیده و غیرخطی در حیطه مطالعات سیستم قدرت در افق کوتاه مدت می‌باشد، که هدف آن تعیین حالت روشن یا خاموش بودن واحدهای تولیدی توان، در یک محدوده زمانی مشخص (معمولاً ۲۴ ساعت) می‌باشد به صورتی که هزینه بهره‌برداری از این واحدها حداقل شود و همچنین محدودیت‌های خاص مربوط به سیستم قدرت و واحدهای تولیدی را برآورده نمایند [۶]. روش‌های متفاوتی برای حل این مسئله وجود دارد. روش برنامه ریزی پویا و روش لیست حق تقدم، از روش‌های اولیه در این زمینه هستند [۷] و [۸]. روش لاگرانژ، نیز یکی دیگر از روش‌های ارائه شده جهت حل مساله UC به شمار می‌رود [۹-۱۱]. همچنین روش‌های تکاملی نیز مانند ژنتیک با کد صحیح [۹]، ژنتیک کلاسیک [۱۰]، سرد شدن تدریجی فلزات [۱۱] و روش‌های متنوع دیگر برای حل مساله وجود دارند [۱۱-۱۶].

در ساختار نوین، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها (UC) با تغییر الگو، به برنامه ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدهای تولیدی (Profit Based Unit Commitment) تبدیل گردیده است که در آن، حداکثر سازی سود شرکت‌های تولیدی توان، هدف اصلی می‌باشد [۲]. روش‌های مختلفی جهت حل مساله PBOC مطرح گردیده است. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الگوریتم ژنتیک در [۱۷]، الگوریتم کلونی زنبور عسل در [۱۸]، الگوریتم کلونی مورچگان در [۱۹]، روش برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح در [۲۰] و الگوریتم تجمع ذرات در [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. موضوع دیگری که در این مقاله بررسی می‌شود، تأثیر حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحدها در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی و همچنین تأثیر آنها بر سود واحدهای نیروگاهی می‌باشد.

اغلب پژوهش‌ها به جهت سادگی محاسبات، مساله PBOC را بدون در نظر گرفتن قیود حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحدهای نیروگاهی، مورد تجزیه و تحلیل قرار داده اند. در حالی که بایستی این قیود که جزو مشخصه‌های

قیود در نظر گرفته شده در حل برنامه UC به شکل زیر است:

الف) قید تامین بار:

یکی از اصلی ترین وظایف ISO در برنامه ریزی کوتاه مدت و لحظه ای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی در هر ساعت است. بهره بردار مستقل سیستم با توجه به میزان بار پیش بینی شده آرایش تولید واحدهای در مدار را به نحوی انجام می دهد که مجموع تولید در هر ساعت با تقاضای بار و تلفات شبکه برابر باشد.

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{it} * I_{it} = P_{D,t} + P_{L,t} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (2)$$

که در آن:

$P_{D,t}$: تقاضای ساعتی بار

$P_{L,t}$: تلفات شبکه در هر ساعت

ب) قیود رزرو مورد نیاز سیستم:

برای بهره برداری ایمن از شبکه، یک سطح مشخص از رزرو توسط ISO تعیین می گردد. رزرو مورد نیاز در هر سطح بار مشخص می شود و برای تامین آن برنامه ریزی می گردد. در سیستم های قدرت سنتی بهره بردار با توجه به اختیاراتی که داشت نسبت به تخصیص میزان رزرو به هر یک از واحدها اقدام می نمود. اما در سیستم قدرت مدرن مکانیزم هایی برای پرداخت ذخیره به واحدهای تولیدی با توجه به توانایی آنها در پوشش حوادث شبکه و همچنین تعادل لحظه ای بین تولید و مصرف در نظر گرفته شده است. در این حالت دو نوع رزرو چرخان و بهره برداری در نظر گرفته شده است. در برنامه ریزی لحظه ای از رزرو رگولاسیون برای ایجاد تعادل لحظه ای بین تولید و مصرف بهره گرفته می شود که در این مطالعه مورد نظر نیست.

$$\sum_{i=1}^{NG} R_{S,it} * I_{it} \geq R_{S,t} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} R_{O,it} * I_{it} \geq R_{O,t} \quad (t = 1, \dots, NT) \quad (4)$$

ج) قیود نرخ افزایش و کاهش سطح تولید

از آنجا که نیروگاه، یک واحد مکانیکی است لذا نرخ تغییرات توان تولیدی یک واحد نمی تواند از حد معینی فراتر رود. این محدودیت ها شامل حداکثر نرخ تغییرات افزایشی و حداکثر نرخ تغییرات کاهشی است. تغییر سطح تولید نسبت به ساعت قبل به صورت زیر تعریف می شود:

در صورتی که واحد روشن بوده باشد حداکثر تغییر در ساعت بعد با UR برای افزایش و DR برای کاهش سطح تولید لحاظ می گردد. در صورتی که واحد در ساعت قبل خاموش بوده باشد، با روشن شدن در کمترین میزان تولید خود وارد مدار می شود. این موضوع با حاصلضرب متغیرهای باینری به صورت $I_{it}(1-I_{i(t-1)})$ مشخص می گردد. در این حالت در صورت خاموش بودن واحد حاصل $[1-I_{it}(1-I_{i(t-1)})]$ برابر صفر خواهد شد و $P_{it} - P_{i(t-1)}$ که در آن $P_{i(t-1)} = 0$ ، سطح تولید در ساعت t ام یعنی P_{it} با برابری با $P_{i,\min}$ ارضا می گردد.

در مورد نرخ کاهش تولید نیز وضعیتی مشابه با این حالت وجود دارد با این تفاوت که در صورتی که واحد قصد خاموش شدن داشته باشد، بایستی ابتدا به حداقل میزان تولید برسد و سپس از مدار خارج گردد. خروج واحد در سطح تولید بالا ضررهای جبران ناپذیری را در بر خواهد داشت که برای جلوگیری از این آسیب ها قید به این صورت در نظر گرفته شده است [۲۳].

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq [1 - I_{it}(1 - I_{i(t-1)})]UR_i + I_{it}(1 - I_{i(t-1)})P_{i,\min} \quad (i = 1, \dots, NG), (t = 1, \dots, NT) \quad (5)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq [1 - I_{i(t-1)}(1 - I_{it})]DR_i + I_{i(t-1)}(1 - I_{it})P_{i,\min} \quad (i = 1, \dots, NG), (t = 1, \dots, NT) \quad (6)$$

که در آن:

UR_i : حداکثر نرخ افزایشی تولید (MW/hr)

DR_i : حداکثر نرخ کاهشی تولید (MW/hr)

د) قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد

زمانی که واحد تولیدی وارد مدار شد، به دلیل ملاحظات فنی باید برای مدت زمان مشخصی بطور مداوم در مدار باقی بماند و همین طور زمانی که از مدار خارج می شود نیز بایستی زمان مشخصی در وضعیت خاموش باقی بماند.

$$[x_{i(t-1)}^{on} - T_i^{on}] * [I_{i(t-1)} - I_{it}] \geq 0 \quad (i = 1, \dots, NG), (t = 1, \dots, NT) \quad (7)$$

$$[x_{i(t-1)}^{off} - T_i^{off}] * [I_{it} - I_{i(t-1)}] \geq 0 \quad (i = 1, \dots, NG), (t = 1, \dots, NT) \quad (8)$$

که در آن:

$x_{i(t-1)}^{on}$: مدت زمان روشن بودن واحد i تا دوره $(t-1)$

$x_{i(t-1)}^{off}$: مدت زمان خاموش بودن واحد i تا دوره $(t-1)$

T_i^{on} : حداقل زمان روشن بودن واحد i

T_i^{off} : حداقل زمان خاموش بودن واحد i

$P_D(t)$: مجموع تقاضای انرژی سیستم در ساعت t ام (MW)

C_i : تابع هزینه واحد i ام

$P_{(i,t)}$: تولید واحد i ام در ساعت t (MW)

ST_i : هزینه راه اندازی واحد i ام (\$/h)

$I_{(i,t)}$: وضعیت مشارکت واحد i ام، در ساعت t ام

هزینه راه اندازی بصورت زیر تعریف می شود:

$$ST_{(i,t)} = \begin{cases} CSC(i), & \text{if } X_{(i,t)}^{off} \leq CST(i) + T_{(i)}^{off} \\ HSC(i), & \text{if } X_{(i,t)}^{off} \geq CST(i) + T_{(i)}^{off} \end{cases} \quad (13)$$

که در آن:

$ST_{(i,t)}$: هزینه راه اندازی واحد i ام در ساعت t ام (\$/h)

$CSC(i)$: هزینه راه اندازی واحد i ام در حالت سرد

$HSC(i)$: هزینه راه اندازی واحد i ام در حالت گرم

$X_{(i,t)}^{off}$: مدت زمانی که واحد i در زمان t خاموش بوده

است (h)

CST : ساعات راه اندازی سرد واحد i ام (h)

$T_{(i)}^{off}$: حداقل زمان خاموش شدن واحد i ام (h)

تابع هزینه سوخت واحد i در زمان t به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_i(p(i,t)) = a_i(p(i,t)^2) + b_i(p(i,t)) + c_i \quad (14)$$

که در آن:

C_i : تابع هزینه واحد i ام

a_i : ضریب مصرف سوخت واحد i ام (\$/h)

b_i : ضریب مصرف سوخت واحد i ام (\$/MWh)

c_i : ضریب مصرف سوخت واحد i ام (\$/MW²h)

با توجه به تابع هدف تعریف شده و همچنین با در نظر گرفتن قیود مسئله UC که در بخش ۲ تعریف گردیده اند (الف، ب، ج، د)، مسئله PBUC جهت حداکثر سازی سود نیروگاهها، حل می گردد.

۴- شبیه سازی و نتایج آن

در این قسمت برای نشان دادن تاثیر قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد در این مقاله، از یک سیستم ۱۰ واحدی

۳- فرمولاسیون مسئله برنامه ریزی مبتنی

بر سود مشارکت واحدها

در سیستم‌های قدرت مدرن، با توجه به موضوع رقابت بین تولیدکنندگان، هر یک از بنگاه‌های تولید به دنبال کسب سود بیشتر از بازار هستند. از اینرو برنامه‌ریزی ورود و خروج واحدهایشان را بر مبنای کسب بیشترین میزان سود انجام می‌دهند. در این مدل UC، قیمت‌دهی با کسب سود بیشینه شاخص اصلی به حساب می‌آید. برنامه به مدار آمدن واحدهای نیروگاهی مبتنی بر قیمت (یا سود) به این موضوع اشاره دارد مسئله برنامه ریزی مبتنی بر سود مشارکت واحدها (PBUC)، یکی از مسائل بهینه سازی غیر خطی در بهره برداری سیستم های قدرت در فضای تجدید ساختار شده است که هدف آن مشارکت واحدهای تولیدی می باشد به گونه ای که سود شرکت های تولید توان (GENCO) به حداکثر برسد. این مسئله بر اساس قیمت و تقاضای توان پیش بینی شده حل می شود.

هدف نهایی که همان تابع هدف می باشد، ماکزیمم سازی سود شرکتهای تولید توان است. به لحاظ ریاضی، تابع هدف مسئله (PBUC) به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\text{Maximize PF} = \text{RV} - \text{TC} \quad (9)$$

$$\text{RV} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\rho_{gm}(t) \cdot P_D(t)] \quad (10)$$

$$\text{TC} = \sum_{t=1}^T \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N [C_i(P(i,t)) + ST_i \cdot I_{(i,t)} \cdot [1 - I_{(i,t-1)}]]$$

$$I_{(i,t)} = \begin{cases} 0, & \text{if unit } i \text{ is off} \\ 1, & \text{if unit } i \text{ is on} \end{cases} \quad (12)$$

که در آن:

PF: سود کل (\$)

RV: درآمد کل (\$)

TC: هزینه کل (\$)

$\rho_{gm}(t)$: پیش بینی قیمت بازار برای انرژی در زمان t

(\$/MWh)

استفاده شده است. تقاضای مورد نیاز شبکه در طول ۲۴ ساعت و اطلاعات مورد نیاز برای این سیستم به ترتیب در جدول (۱) و (۲)، آمده است:

جدول ۱ - اطلاعات تقاضای بار سیستم در یک شبانه روز

Hour	Demand (mw)	Hour	Demand (mw)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

در ابتدا مسئله آرایش در مدار قرار گیری واحدها (UC)، با هدف حداقل کردن هزینه ها، انجام گرفته است که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. سپس با استفاده از اطلاعات جدول (۳)، سود هر واحد در هر ساعت که تفاضل بین درآمد و

هزینه واحد می باشد، محاسبه گردیده است و نتایج آن در جدول (۴) ارائه گردیده است.

جهت بررسی نقش تغییرات حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد، از یک واحد بصورت نمونه استفاده شده است که در آن تغییرات حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد، بر روی تولید توان واحد مربوطه، محسوس باشد. پس از بررسی های لازم، واحد ۶ بعنوان واحد نمونه انتخاب گردید و سپس با افزایش و یا کاهش یک ساعته حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحد نسبت به اطلاعات واحد ۶ که در جدول (۲) ارائه گردیده است، سود این واحد در حالات مختلف شبیه سازی گردید که نتایج آن در شکل (۲) بصورت نمودار میله ای، قابل مشاهده می باشد. همانگونه که در نمودار مشهود است، بیشترین سود در حالت کاهش حداقل زمان خاموش بودن واحد، بدست آمده است که بیانگر این نکته است که با کاهش حداقل زمان خاموش بودن واحد، در حقیقت واحد نیروگاهی زمان کمتری را در خاموشی سپری می نماید و در صورت نیاز به در مدار قرار گیری، آمادگی حضور در بازار برق را دارد. با توجه به این موضوع، اگر بهره بردار سیستم بگونه ای عمل نماید که بتواند زمان خاموش بودن واحد را با در نظر گرفتن مشخصه های حرارتی به حداقل ممکن برساند، در حقیقت سود واحد نیروگاهی را افزایش داده است.

جدول ۲ - اطلاعات واحدهای نیروگاهی

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Unit 7	Unit 8	Unit 9	Unit 10
Pmax (MW)	455	455	130	130	162	80	85	55	55	55
Pmin (MW)	150	150	20	20	25	20	25	10	10	10
a (\$/M(W ²)-h)	0.00048	0.00031	0.002	0.00211	0.00398	0.00712	0.00079	0.00413	0.00222	0.00173
b (\$/MWh)	16.19	17.26	16.6	16.5	19.7	22.26	27.74	25.92	27.27	27.79
c (\$/h)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
min UP (h)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
min dn (h)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
hot start cost (\$)	4500	5000	550	560	900	170	260	30	30	30
cold start cost(\$)	9000	10000	1100	1120	1800	340	520	60	60	60
cold start hrs (h)	5	5	4	4	4	2	2	0	0	0
initial status (h)	8	8	-5	-5	-6	-3	-3	-1	-1	-1

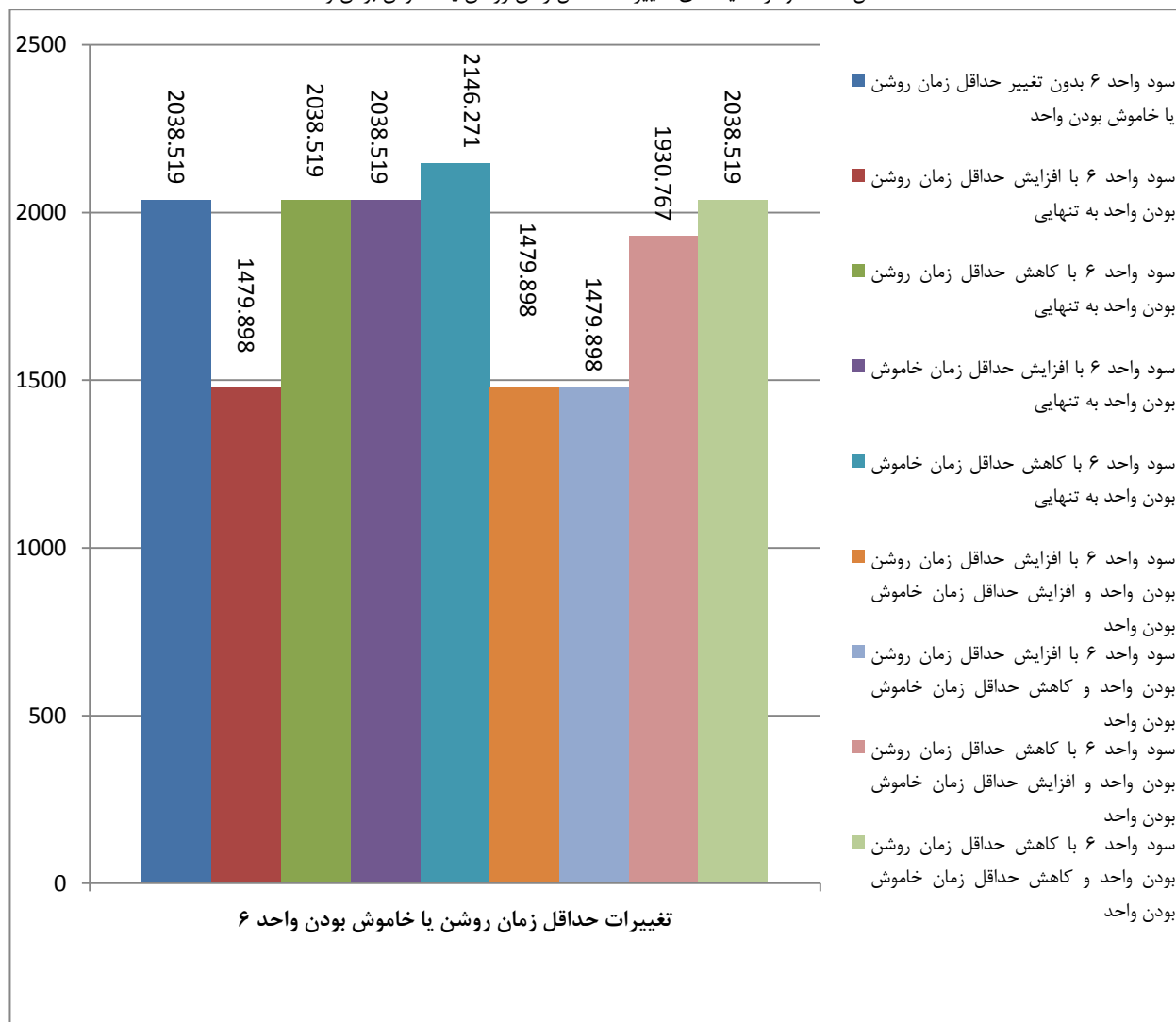
جدول ۳ - مقدار بهینه تولید و آرایش در مدار قرار گیری واحدها

واحد ساعت	مقدار بهینه تولید هر واحد									آرایش UC									هزینه ساعتی
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
t1	455	150	20	50	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	11719.86
t2	455	150	56	64	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	12557.3
t3	455	150	108	112	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	14247.38
t4	455	210	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	15971.54
t5	455	260	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	16841.82
t6	455	360	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	18587.04
t7	455	410	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	19461.98
t8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	20350.34
t9	455	455	130	130	130	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	22384.02
t10	455	455	130	130	162	68	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	24938.21
t11	455	455	130	130	162	80	0	38	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	25928.9
t12	455	455	130	130	162	80	0	55	33	1	1	1	1	1	1	0	1	1	27278.4
t13	455	455	130	130	162	68	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	24598.21
t14	455	455	130	130	130	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	22384.02
t15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	20350.34
t16	455	310	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	17713.66
t17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	16841.82
t18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	18587.04
t19	455	440	130	130	25	20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	20605.73
t20	455	455	130	130	162	68	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	24598.21
t21	455	455	130	130	110	20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	22418.96
t22	455	385	130	130	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	18529.33
t23	455	185	130	130	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	15041.99
t24	455	150	87	108	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	13327.75

جدول ۴ - سود هر واحد در هر ساعت

واحد ساعت	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t1	5178.628	1572.525	223	559.225	199.7625	0	0	0	0
t2	5178.628	1572.525	620.368	713.91744	199.7625	0	0	0	0
t3	5178.628	1572.525	1185.192	1238.0122	199.7625	0	0	0	0
t4	5178.628	2197.629	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t5	5178.628	2716.844	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t6	5178.628	3750.624	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t7	5178.628	4265.189	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t8	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	239.118	0	0	0	0
t9	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	984.438	0	0	0	0
t10	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	1206.1289	343.11712	0	0	0
t11	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	1206.1289	396.832	0	65.09628	0
t12	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	1206.1289	396.832	0	90.35675	14.74242
t13	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	1206.1289	343.11712	0	0	0
t14	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	984.438	0	0	0	0
t15	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	239.118	0	0	0	0
t16	5178.628	3234.509	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t17	5178.628	2716.844	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t18	5178.628	3750.624	1420.9	1432.041	199.7625	0	0	0	0
t19	5178.628	4573.184	1420.9	1432.041	199.7625	107.752	0	0	0
t20	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	1206.1289	343.11712	0	0	0
t21	5178.628	4726.9723	1420.9	1432.041	841.742	107.752	0	0	0
t22	5178.628	4008.1003	1420.9	1432.041	0	0	0	0	0
t23	5178.628	1937.4403	1420.9	1432.041	0	0	0	0	0
t24	5178.628	1572.525	958.392	1194.709	0	0	0	0	0

شکل ۲ - نمودار مقایسه ای تغییرات حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحد ۶



گازهای آلاینده و ترکیب آنها با قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد، مسئله PBUC را مورد بررسی قرار داد.

۶- مراجع

- [1] T. Shiina and J. Watanabe, "Lagrangian relaxation method for price-based unit commitment problem," *Engineering Optimization*, vol. 36, no. 6, pp. 705-719, 2004/12/01 2004.
- [2] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [3] W. W. Hogan, "On An 'Energy Only' Electricity Market Design For Resource Adequacy," in *Center for Business and Government: John F. Kennedy School of Government, Harvard University*, Sept. 2005.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، حالات مختلف تغییرات حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد و تاثیر گذاری آنها بر روی مشارکت واحد از دیدگاه تولیدکنندگان، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج شبیه سازی، سرمایه گذاران واحدهای تولیدی توان، بایستی نیروگاههایی را که دارای کمترین حداقل زمان خاموش بودن نسبت به دیگر نیروگاهها را دارا می باشند، جهت سرمایه گذاری انتخاب نمایند تا سود خود را در بازار رقابتی به حداکثر ممکن برسانند. همچنین شرکت های تولیدی بایستی بهره برداری از سیستم را به گونه ای برنامه ریزی نمایند که حداقل زمان خاموش بودن واحد به حداقل ممکن خود برسد و واحد تولیدی، زمان کمتری را در خاموشی سپری نماید. در مطالعات بعدی، می توان با اضافه نمودن قیودی همچون محدودیتهای خط انتقال و محدودیت انتشار

- [16] M. Reza Norouzi, A. Ahmadi, A. Esmaeel Nezhad, and A. Ghaedi, "Mixed integer programming of multi-objective security-constrained hydro/thermal unit commitment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 911-923, 2014.
- [17] J. Solanki, S. Khushalani, and A. Srivastava, "A Genetic Algorithm Approach to Price-Based Unit Commitment," in *Power Symposium, 2006. NAPS 2006. 38th North American*, 2006, pp. 425-429.
- [18] C. Christopher Columbus and S. P. Simon, "Profit based unit commitment: A parallel ABC approach using a workstation cluster," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 724-745, 2012.
- [19] C. C. Columbus, K. Chandrasekaran, and S. P. Simon, "Nodal ant colony optimization for solving profit based unit commitment problem for GENCOs," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 145-160, 2012.
- [20] T. Li and M. Shahidehpour, "Price-based unit commitment: A case of lagrangian relaxation versus mixed integer programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, pp. 2015-2025, 2005.
- [21] X. Yuan, Y. Yuan, C. Wang, and X. Zhang, "An Improved PSO Approach for Profit-based Unit Commitment in Electricity Market," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, 2005, pp. 1-4.
- [22] Y. Fu, M. Shahidehpour, and L. Zuyi, "Security-Constrained Unit Commitment With AC Constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, pp. 1538-1550, 2005.
- [23] S. Wang and M. Shahidehpour, "Ramp-rate limits in unit commitment and economic dispatch incorporating rotor fatigue effect," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1539-1545, Aug. 1994.
- [4] F. Denny and D. Dismukes, *Power system operations and electricity markets*: CRC Press, 2002.
- [5] F. Oliveira, "The value of information in electricity investment games," *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2364-2357, Jul. 2008.
- [6] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [7] E. Delarue, D. Cattrysse, and W. D'haeseleer, "Enhanced priority list unit commitment method for power systems with a high share of renewables," *Electric Power Systems Research*, vol. 105, pp. 115-123, 2013.
- [8] 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.
- [9] I. G. Damousis, A. G. Bakirtzis, and P. S. Dokopoulos, "A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, pp. 1165-1172, 2004.
- [10] K. S. Swarup and S. Yamashiro, "Unit commitment solution methodology using genetic algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 1, pp. 87-91, 2002.
- [11] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 1, pp. 68-76, 2006.
- [12] G. B. Sheble, W. Charles, and J. Richter, "A Profit-Based Unit Commitment GA for the Competitive environment," in *IEEE/PES, 96WM* New York, 2006, pp. 190-199.
- [13] M. S. Javadi, A. Meskarbashi, R. Azami, G. Hematipour, and A. Javadinasab, "Emission Controlled Security Constrained Unit Commitment Considering Hydro-Thermal Generation Units " *International Review of Modeling and Simulation IREMOS*, vol. 4, no. 6, pp. 3243-3250, 2011.
- [14] J. Ruiwei, W. Jianhui, and G. Yongpei, "Robust Unit Commitment With Wind Power and Pumped Storage Hydro," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 800-810, 2012.
- [15] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, Z. Jinye, and Z. Tongxin, "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 52-63, 2013.