

بهینه سازی مسأله SCUC با استفاده از الگوریتم PSO باینری در نیروگاه حرارتی / خورشیدی

آلفرد باغرامیان^۱، استادیار و عضو هیئت علمی، میثم علیزاده لشکانی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گیلان- رشت- ایران

Baghramian2000@yahoo.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گیلان- رشت- ایران

Alizadeh.m1366@gmail.com

چکیده:

در این تحقیق، یک راه حل بهینه برای برنامه‌ریزی روز-پیش (Day-ahead) مسأله امنیت-مقید مشارکت واحدها یا همان SCUC (Security Constrained Unit Commitment) در سیستم قدرت فراهم شده است. چنین برنامه‌ریزی، در واقع درگیر فراهم کردن یک هماهنگی بین واحدهای تولیدی در پاسخ به تغییرات شرایط بارگزاری است تا بتواند هزینه‌های کلی سیستم قدرت را کاهش دهد. برای حل مسأله، از یک روش کاربردی و دقیق با عنوان بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا همان PSO (Particle Swarm Optimization) استفاده شده است. سیستم مورد مطالعه در این تحقیق، شامل واحدهای حرارتی و خورشیدی است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در واحدهای خورشیدی و همچنین بار سیستم، از روش مونت کارلو (Monte Carlo) استفاده شده است. تابع هدف در اینجا یک چندجمله‌ای درجه دوم است که مربوط به هزینه‌های سوخت و راه اندازی واحدها است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با استفاده از این روش، منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملکرد سیستم، در کنار ارضاء تمامی قیود غالب سیستم می‌شود که نسبت به روش‌های مرسوم و سنتی، دارای سرعت همگرایی بالاتر و دقت بیشتری است.

واژه‌های کلیدی: مشارکت واحدها، الگوریتم PSO، قیود غالب، برنامه‌ریزی روز-پیش، هوش ازدحامی (swarm intelligence)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: آلفرد باغرامیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گیلان- رشت- دانشگاه گیلان

۱- مقدمه

دسترس است. ورودی مهم دیگر این مسأله، مشخصه واحدهای نیروگاهی موجود در شبکه، شامل تابع هزینه تولید و راهاندازی و قیود موجود در شرایط تولید توان و انتقال آن است. پاسخ به این مسأله، مبین حضور و یا عدم حضور هر واحد نیروگاهی در مدار است و همچنین تعیین می کند که هر واحد چه مقدار از سهم تولید را بر عهده دارد. در ادامه به بررسی تابع هدف و قیود به کار رفته در این مقاله پرداخته می شود.

۲- تابع هدف

در مسأله مشارکت واحدها تابع هدف شامل هزینه سوخت، هزینه روشن کردن واحد و هزینه خاموش کردن آن است. درنتیجه تابع هدف در طول بازه زمانی مسئله به صورت زیر است:

$$\min CF = \quad (1)$$

$$\min \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} [F_{c,i} (P_{i,t}, I_{i,t}) + SU_{i,t}]$$

۲-۱- هزینه سوخت

به طور معمول، تابع هزینه سوخت برای تولید توان در یک نیروگاه به صورت یک تابع درجه ۲ در نظر گرفته می شود، از طرفی نرخ هزینه کل سیستم، مساوی مجموع نرخ هزینه های واحدها است. هزینه هر واحد برابر است با:

$$F_{c,i} (P_{i,t}) = a_i + b_i \cdot P_{i,t} + c_i \cdot P_{i,t}^2 \quad (2)$$

۲-۲- هزینه راه اندازی

از آنجا که درجه حرارت و فشار یک واحد حرارتی باید به آهستگی تغییر نماید، بنابراین باید میزان مشخصی انرژی صرف شود تا واحد دوباره وارد مدار شود. هزینه راهاندازی در تابع هدف مسأله در مدار قرار گرفتن واحدها، به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$SU_{it} = b_{0i} + b_{1i} [1 - e^{\left(\frac{T_{it}^{off}}{\tau_i} \right)}] \quad (3)$$

۲-۳- قیود مسأله

همان گونه که گفته شد، تأمین بار شبکه باید در کنار اراضی قیود سیستم صورت گیرد و این دو باید در کنار یکدیگر پاسخ داده شوند. در اینجا به معنی قیود به کار رفته در این تحقیق پرداخته می شود.

۲-۴- تعادل توان سیستم

توان تولید شده توسط تمام واحدهای روشن باید بار مورد نیاز به علاوه تلفات سیستم را ارضاء کند، که این قید به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sum_{i=1}^N I_i(t) P_{i,t} = D(t) + Losses \quad (4)$$

تلفات سیستم با Losses نشان داده شده است و N همان تعداد واحدها است.

یکی از مهم ترین برنامه های اقتصادی در سیستم قدرت، چگونگی کاهش هزینه های عملکرد سیستم است. به همین منظور دستیابی به یک برنامه ریزی برای ورود و خروج واحدها، از اهمیت بالایی برخوردار است. به طور کلی، دو هدف "اطمینان از بهره برداری ایمن" و "تسهیل بهره برداری اقتصادی" از راهاندازی بازار برق، متصور است. در بهره برداری سنتی از سیستم های قدرت، مسئله ورود و خروج واحدها در مدار بر مبنای اصول امنیتی شبکه، طرح ریزی و پیاده سازی می شدند. در چنین حالی بهره برداری از شبکه، لزوماً اقتصادی ترین حالت ممکن بهره برداری به شمار نمی رفت. در محیط تجدید ساختار شده، می توان با استفاده از خدمات گوناگونی که در اختیار بازار است، اینمی را تسهیل کرد و با بهره برداری اقتصادی از بازار برق، هزینه مصرف برق را کاهش داد.^[۱,۲]

مسأله مشارکت واحدها به صورت یک مسأله بهینه سازی تعریف می شود که اهداف آن، تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و میزان بهینه تولید آنها است. در این تحقیق، یک راه حل بهینه برای برنامه ریزی روز-پیش مسأله امنیت-مقدید مشارکت واحدها در سیستم قدرت فراهم می شود. راه حل بهینه ایجاد شده باید بتواند هزینه های سیستم اعم از هزینه مصرف سوخت و تلفات را در حضور قیود غالب سیستم قدرت، کاهش دهد. برای حل مسأله برنامه ریزی SCUC در این تحقیق، از یک روش کاربردی و دقیق با عنوان الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، استفاده شده است. این روش برگرفته از رفتار اجتماعی موجودات زنده و همانگی بین آنها است و در واقع یکی از شاخه های هوش ازدحامی به حساب می آید. در این تحقیق از PSO باینری استفاده شده است که هم اکنون در حل بسیاری از مسائل بهینه سازی گسترش نهاده شده است. این روش موثر و پویایی دارد.^[۴]

افزایش قیمت سوخت های فسیلی، پایان پذیر بودن و نیز آلودگی ناشی از آنها، لزوم جایگزینی این سوخت ها را با منابع جدید و پاک انرژی روشن می سازد. انرژی خورشیدی به دلایل مختلفی مانند در دسترس بودن، پایین بودن هزینه نگهداری، نداشتن جزء متحرک، سازگار بودن با محیط زیست و عمر زیاد این سیستم ها (فتولوتائیک) یکی از مهم ترین منابع انرژی تجدید پذیر به شمار می آید. در این تحقیق، در کنار واحدهای حرارتی، از دو واحد خورشیدی با مشخصات معلوم، برای تأمین توان شبکه استفاده شده است.^[۵]

۲- برنامه ریزی ورود و خروج واحدها با در

نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم

در این مقاله، هدف اصلی یافتن ماتریس ورود و خروج واحدها است به نحوی که اولاً تمامی قیود سیستم قدرت ارضاء شوند و ثانیاً، کمترین هزینه عملکرد به سیستم تحمیل شود. فرض بر این است که نمودار بار مورد نیاز شبکه، بر اساس بار مصرفی پیشین و نحوه رشد بار، پیش بینی شده است و این نمودار به عنوان یکی از ورودی های مسأله، در

مقالات، بین ۰.۹ تا ۱.۱ پریونیت است. رابطه ریاضی این قید به صورت

$$\text{زیر بیان می شود}^{[۳]}: \\ V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad (۱۱)$$

۲-۳-۱- در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به نیروگاه خورشیدی و بار

برای اعمال عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی از روش مونت کارلو و یک سری از توابع توزیع استفاده شده است. ایده اصلی شبیه سازی مونت کارلو، ایجاد یک سری از نمونه های تجربی، توسط دنباله تصادفی از اعداد است. برای تولید اعداد تصادفی در این مقاله، از روش تبدیل معکوس استفاده شده است. بنابراین با تولید هر سناریو در روش مونت کارلو، یک مقدار هزینه تولید برای کل سیستم خواهیم داشت. اگر تمامی این هزینه های به دست آمده از تکرار حلقه مونت کارلو را به عنوان داده هایی با توزیع نرمال در نظر بگیریم، در هر بار تکرار حلقه مونت کارلو و اضافه شدن سناریوی جدید، هزینه تولید به ازای این سناریو به مجموعه هزینه سناریوهای قبلی اضافه می شود. با پیدا کردن مقادیر m و s برای توزیع نرمال متناظر با مجموعه حاصله، در هر تکرار طبق رابطه زیر، مقدار انحراف معیار یا CVX این سناریوها را به دست می آوریم:

$$CV_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x \cdot \sqrt{NS}} \quad (۱۲)$$

اگر CV_x کمتر از یک مقدار خطای ϵ باشد، نتایج به دست آمده مناسب بوده و شبیه سازی به اتمام می رسد [۶]. در این مقاله مقدار ϵ را $0/2$ در نظر گرفته ایم.

۴-۱- سیستم مورد مطالعه و مشخصات آن

سیستم مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه استاندارد IEEE است که دارای ۳۹ باس و ۹۲ خط انتقال است و در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم، به عنوان "شبکه قدرت ۱۰ ماشینه-New England" شناخته می شود. تعداد ۱۰ واحد حرارتی در این سیستم موجود است که مشخصات آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. باس ۳۱ به عنوان باس slack در نظر گرفته شده است. مشخصات واحدها از قبیل بیشترین و کمترین مقدار تولید، ضرایب a, b و c برای تابع هزینه هر واحد، حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و همچنین هزینه راه اندازی هر واحد در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۲-۲- ذخیره چرخان سیستم

ذخیره چرخان واحدهای است که به تفاوت میان کل ظرفیت فعال سیستم و مجموع بار اطلاق می شود. ذخیره چرخان $I_i(t)$ باید در سیستم موجود باشد تا در صورت از دست رفتن یک یا چند واحد، افت شدیدی در فرکانس سیستم ایجاد نشود. این مقدار از توان ذخیره شده باید بتواند بر کمبودهای ناشی از افزایش ناگهانی بار و خرابی واحدهای تولیدی فایق آید. شکل ریاضی این قید به صورت زیر بیان می شود:

$$\sum_{i=1}^N I_i(t) P_{i,t}^{\max} \geq D(t) + \text{Losses} + R(t) \quad (۵)$$

۲-۲-۳- محدودیت تولید توان واحدها

به منظور کار کرد با بازده بالا در بلندمدت، مقدار تولید واحدهای نیروگاهی باید بین حداقل تولید و حداکثر آن قرار گیرد. از این رو برای عملکرد بپینه و مدام و واحدهای نیروگاهی، باید مقدار تولید هر واحد به صورت کنترل شده باشد.

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (۶)$$

۲-۲-۴- حداقل زمان روشن / خاموش بودن واحدها

زمانی که واحدی وارد مدار شد، به دلیل ملاحظات فنی باید برای مدت زمان مشخص، به طور مدام در مدار باقی بماند و همین طور زمانی که از مدار خارج می شود نیز باید زمان مشخصی در وضعیت خاموش باقی بماند. رابطه زیر به صورت ریاضی، فرمول بندی این قید را نشان می دهد:

$$\begin{cases} (1 - I_i(t+1))MU_i \leq X_i^{on}(t), & \text{if } I_i(t) = 1 \\ I_i(t+1)MD_i \leq X_i^{off}(t), & \text{if } I_i(t) = 0 \end{cases} \quad (۷)$$

۲-۲-۵- قیود افزایشی و کاهشی توان تولیدی واحدها

از آنجایی که نیروگاه، یک واحد مکانیکی است لذا نرخ تغییرات توان تولیدی یک واحد نمی تواند از حد معینی فراتر رود. این محدودیتها شامل حداکثر نرخ تغییرات افزایشی و حداکثر نرخ تغییرات کاهشی است. به فرم فرمولی:

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i \quad (۸)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq DR_i \quad (۹)$$

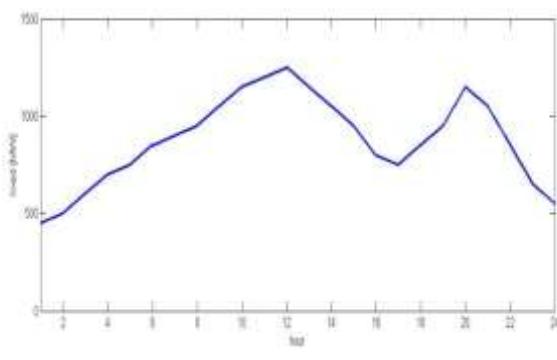
۲-۲-۶- حداکثر توان انتقالی مجاز خطوط

هر یک از خطوط انتقال در سیستم قدرت دارای یک ظرفیت مجاز برای انتقال توان در شبکه قدرت هستند که رعایت این قید برای حفظ قابلیت اطمینان سیستم بسیار حیاتی است. به شکل ریاضی:

$$-P_{km}^{\max} \leq P_{km}(t) \leq P_{km}^{\max} \quad (۱۰)$$

۲-۲-۷- حدود ولتاژ ترانسفورماتورها

این قید نیز به مانند قید توانهای انتقالی، مربوط به قیود امنیت شبکه قدرت است. محدوده تعیین شده برای ولتاژ ترانسفورماتورها در اغلب



شکل (۲): نمودار تغییرات ساعتی بار در یک روز [۹]

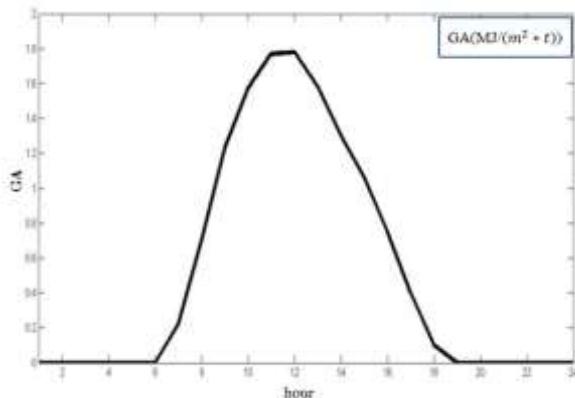
جدول (۳): متوسط بار مصرفی روزانه و انحراف معیار^[۷] (در انتهای مقاله)

اگر منحنی متوسط تابش خورشید در ساعت مختلف یک شبانه روز را مانند شکل (۳) فرض کنیم، با این وجود باز هم مقادیر واقعی تابش در هر ساعت با مقدار متوسط تابش در آن ساعت (که در شکل (۳) مشخص است)، مطابقت ندارد و این مقدار متوسط دارای اختلافی آن هم به صورت تصادفی است. بنابراین تابش خورشید به سطح یک واحد پنل خورشیدی را می‌توان به عنوان یک متغیر تصادفی آن هم با یکتابع توزیع احتمال مدل کرد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که یکی از نزدیکترین تقریب‌ها برای مدل تصادفی تابش خورشید را می‌توان از مجموع دو تابع توزیع بتا بدست آورد. سپس با استفاده از روش مونت‌کارلو می‌توان مانند بار، مقادیر تابش خورشید در ساعت مختلف شبانه روز را به دست آورد [۸].

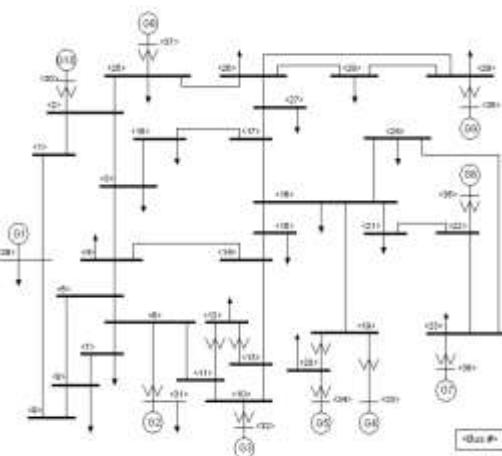
رابطه‌ی میان تابش خورشید به سطح یک سلول خورشیدی و توان تولیدی آن به صورت زیر است:

P=η.S.Ga (13)

که در آن Ga تابش خورشیدی بر حسب $(m^2 * t) / MJ$ بازده سلول خورشیدی و S مساحت سطح سلول است.



شکل (۳): منحنی متوسط تابش خورشید بر حسب (m^2/t) در ساعات مختلف یک شبانه، و [۸]



شکل (۱): شبکه ۱۰ ماشینه‌ی "New-England"

همان طور که گفته شد، در این تحقیق از دو واحد خورشیدی نیز در کنار واحدهای حرارتی استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آمده است. این جدول شامل مساحت سلول‌های فتوولتائیک برای هر واحد و همچنین بازده تبدیل انرژی هر کدام از آنهاست. به عنوان مثال واحد اول، ۱۶ درصد از کل انرژی تابشی خورشید را که توسط سلولهای فتوولتائیک دریافت می‌کند، به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و به شکل تجزیه می‌کند.

جدول (۱): مشخصات واحدهای حرارتی، [۷] (در انتهای مقاله)

جدول (۲): مشخصات واحدهای خورشیدی

مُتخصّصات	مساحت كل بيت (m ²)	نسبة
واحدها		
واحد خورشیدي أول	١٥****	٠١٦
واحد خورشيدی دوم	١٧****	٠١٥

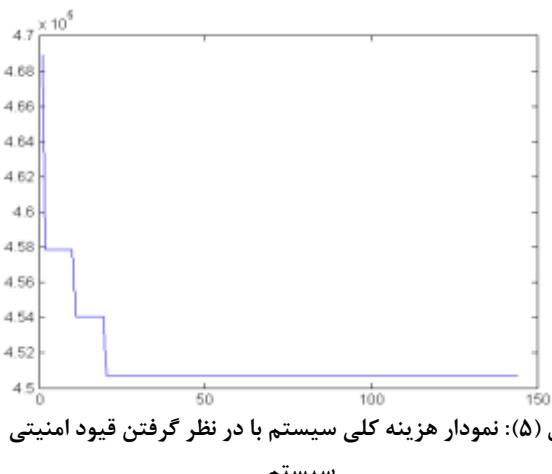
نمودار بار مصرفی را همانند شکل (۲) در نظر می‌گیریم. به دلیل عدم قطعیت موجود در بار و به منظور مدل‌سازی بار مصرفی به عنوان یک متغیر تصادفی از توزیع نرمال استفاده کردایم. از آن جایی که مقادیر موجود در نمودار بار مصرفی، مقادیر میانگین توزیع نرمال در هر ساعت مشخص است، لذا برای نزدیک شدن این نمودار به مقادیر واقعی در طول یک دوره مشخص، از یک سری ضرایب به عنوان انحراف معیار بار مصرفی استفاده نموده‌ایم که مقادیر آن‌ها به نسبت بار مصرفی هر ساعت در جدول (۳) آورده شده است. بنابراین با در اختیار داشتن مقادیر میانگین و انحراف معیار بار مصرفی می‌توان توزیع نرمال منتظر با رفتار تصادفی، بار در هر ساعت را تخمین زد [۷].

۲-۵-۲- حالت دوم: با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و مونت کارلو

در این حالت با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و عدم قطعیت موجود در رفتار بار و اوندهای خورشیدی، به حل مسأله پرداخته شده است. جدول (۶) نشان دهنده‌ی وضعیت به مدار آمدن واحدها در طول ساعت و جدول (۷) نیز میزان تولید بهینه واحدها در این حالت را نشان می‌دهد. شکل (۵) نشان دهنده‌ی هزینه عملکرد سیستم در این حالت است.

جدول (۶): حالت به مدار آمدن واحدها با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم

جدول (٧) : مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم (در انتهای مقاله)



۲-۵-۳- حالت سوم: بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مبین به یا، واحدهای، خو، شدی،

در این حالت دیگر عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی با روش مونت کارلو مدل نمی‌شود، بلکه با مقادیر میانگین آنها به عنوان مقادیر ثابت برخورد شده و مستقیماً به سیستم اعمال می‌شود. جدول (۸) میانگر وضعیت به مدار آمدن واحدها در این حالت و جدول (۹) نیز میزان تولید بهینه واحدها در این حالت را نشان می‌دهد. شکل (۶)

۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

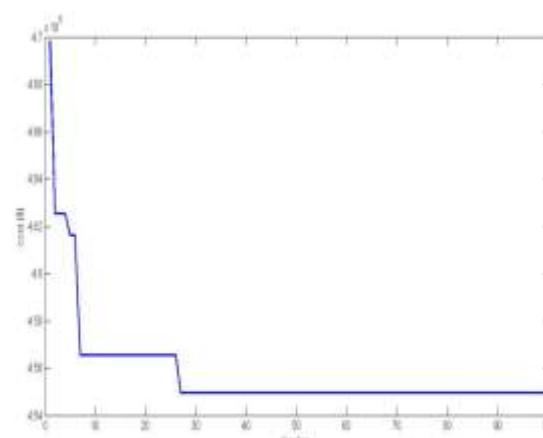
به منظور مقایسه بهتر، نتایج شبیه‌سازی برای ۳ سناریوی مختلف مربوط به مسئله SCUC موجود در این تحقیق، آورده شده است. در ابتدا وضعیت واحدها و هزینه نهایی برای هر حالت نشان داده شده است و در پایان، مقادیر آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

۲-۱-۵-۱- حالت اول: بدون در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و یا در نظر گرفتن مونت کارلو

در این حالت، از قیود امنیتی شامل قیود ولتاژ و حداکثر توان انتقالی از خطوط صرف نظر شده است. اما عدم قطعیت مربوط به بار و واحدهای خورشیدی، لحاظ شده است. با استفاده از الگوریتم PSO و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب، نتایج زیر حاصل شد. جدول (۴) نشان دهنده‌ی وضعیت واحدها و جدول (۵)، میزان تولید بهینه واحدها در این حالت را نشان می‌دهد. شکل (۴) نیز بیانگر هزینه‌های عملکرد سیستم در این حالت است.

جدول (٤): حالت به مدار آمدن واحدها بدون در نظر گرفتن قیود امنیتی

جدول (٥): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت بدون در نظر گرفتن قبود امنیتی (در انتهای مقاله)



شکل (۴): نمودار هزینه کلی سیستم بدون در نظر گرفتن قیود امنیتی

همچنین در شکل‌های (۷) و (۸)، میزان بهینه‌ی تولید واحدهای ۱ و ۲ به صورت نمودارهای آورده شده است. همان‌گونه که از جدول مشخصات واحدها (جدول (۱)) نمایان است، این دو واحد، بیشترین سهم تولید در نیروگاه حرارتی را بر عهده دارند. در شکل (۷)، تولید بهینه‌ی این واحدها برای حالتی که عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی در نظر گرفته می‌شود، آورده شده است. اما در شکل (۸)، تولید بهینه‌ی همین واحدها برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته نمی‌شود، نشان داده شده است.

شکل (۷): تولید بهینه‌ی واحدهای او ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته شده (در انتهای مقاله)

شکل (۸): تولید بهینه‌ی واحدهای او ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته نشده (در انتهای مقاله)

همان طور که مشخص است، در حالت اول که از مونت‌کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در بار و واحدهای خورشیدی استفاده شده است، توزیع توان مناسب‌تری صورت گرفته است و برای ساعت‌های مختلف، متناسب با نیاز شبکه، میزان تولید واحدها نیز افزایش و کاهش پیدا کرده است. این موضوع باعث می‌شود که در هزینه‌های نهایی سیستم که ناشی از عملکرد هر کدام از واحدها است، صرفه‌جویی اقتصادی صورت گیرد و همچنین عمر واحدها نیز افزایش یابد. اما در حالت دوم که از عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی صرف نظر شده است، واحدهای ۱ و ۲، به صورت غیراقتصادی در مدار هستند. این موضوع در شکل (۸) کاملاً مشخص است. واحد ۱، اکثرًا در حالت تولید مأکریم خود قرار دارد و واحد ۲ نیز همانگی مشخصی برای تولید توان ندارد و یک روند تکراری را دنبال می‌کند. شاید میزان ذخیره چرخان در این حالت قابل توجه باشد، اما این روند تولید باعث می‌شود تا هزینه‌های بیهوده به سیستم تحمیل شود و همچنین عمر مفید این واحدها نیز کاهش یابد.

۳- نتیجه‌گیری

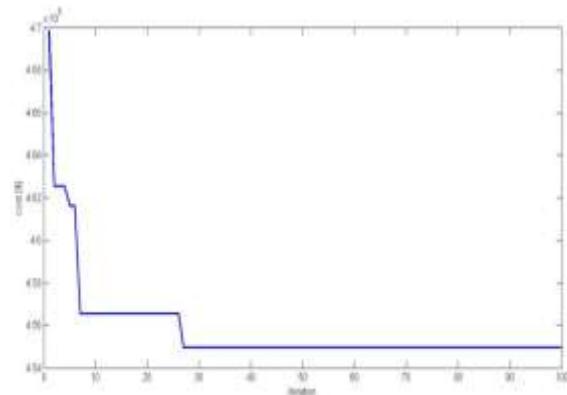
به طور کلی، با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، مسئله امنیت- مقید مشارکت واحدها به گونه‌ای حل شد که هزینه‌های کلی سیستم کاهش چشمگیری داشت و این موضوع به آن دلیل است که الگوریتم، در طی فرایند بهینه‌سازی، همواره واحدهایی را برای تولید توان بر می‌گزیند که از نظر اقتصادی برای سیستم قدرت به صرفه باشند. مگر اینکه سیستم ناچارا و برای اراضی قید کفايت، مجبر به استفاده از این واحدها شود. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به بار و واحدهای خورشیدی باعث شد تا توزیع مناسب‌تری در مقدار بهینه تولید واحدها صورت گیرد و به طبع آن هزینه نهایی سیستم کاهش یابد.

بیانگر نمودار هزینه‌های کل سیستم در این حالت است.

جدول (۸): حالت به مدار آمدن واحدها بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت

واحد	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰	واحد ۱۱
واحد ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد ۱۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۹): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت(در انتهای مقاله)



شکل (۶): نمودار هزینه کلی سیستم بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی

۲- ارزیابی نتایج

همان‌گونه که ملاحظه شد، روش پیشنهادی برای ۳ حالت مختلف از وضعیت به مدار آمدن واحدها به کار رفته است. در هر کدام از حالت‌ها بعد از تعداد تکرار مشخص، الگوریتم به مقدار نهایی خود رسیده است. به منظور نشان دادن یک مقایسه معنادار بین تعداد تکرارها و مقدار بهینه‌ی نهایی، از جدول (۱۰) استفاده خواهیم نمود. این جدول به خوبی نشان می‌دهد، زمانی که از قیود امنیتی صرف نظر می‌شود، هزینه‌های سیستم بیشترین کاهش را پیدا می‌کند و بعد از تعداد تکرار کمتری الگوریتم به مقدار نهایی خود می‌رسد. این مسئله برای سیستم قدرت امتیازی بزرگ به حساب می‌آید، زیرا هم در زمان و هم در هزینه‌ها صرف‌جویی به عمل آمده است. اما همان‌طور که می‌دانیم قید امنیت، قیدی سخت و اجرایی است و نمایش مقدار هزینه نهایی در این حالت، تنها به منظور نشان دادن تأثیر این قید در مقدار هزینه کلی سیستم است.

جدول (۱۰): مقایسه بین هزینه‌ها و تعداد تکرارها در سناریوهای مختلف (در انتهای مقاله)

ضمایم:

فهرست علائم و اختصارات:

حداقل توان تولیدی واحد i	P_i^{min}	هزینه مجتمع کارگاهی راهاندازی و هزینه تعمیرات	b_{0i}
حداکثر توان تولیدی واحد i	P_i^{max}	و نگهداری تجهیزات	
توان انتقالی از شین k به شین m در زمان t	$P_{km}(t)$	هزینه راهاندازی واحد از شرایط سرد	b_{1i}
حداکثر توان مجاز انتقالی از شین k به شین m	P_{km}^{min}	هزینه سوت کل سیستم	CF
ذخیره چرخان کلی سیستم در زمان t	$R(t)$	بار مورد نیاز شبکه	$D(t)$
هزینه راهاندازی واحد از زمان t (\$)	$SU_{i,t}$	حداکثر نرخ کاهشی تولید (MW/hr)	DR_i
مدت زمان خاموش بودن واحد آم قبلاً ساعت t (ام)	T_{it}^{off}	تابع هزینه سوت واحد i	$F_{c,i}$
حداکثر نرخ افزایشی تولید (MW/hr)	UR_i	حالت مشارکت واحد i در زمان	$I(t)$
ولتاژ ترانسفورماتورها	V	حداقل زمان روشن بودن واحد i (hr)	MU_i
حد پایین ولتاژ سیستم	V^{min}	حداقل زمان خاموش بودن واحد i (hr)	MD_i
حد بالایی ولتاژ سیستم	V^{max}	تعداد ژنراتورها	NG
مدت زمانی که واحد i تا ساعت t روشن بوده (hr)	$X_i^{on}(t)$	تعداد دوره‌های زمانی (hr)	NT
مدت زمانی که واحد i تا ساعت t خاموش بوده (hr)	$X_i^{off}(t)$	تعداد ستاریوها	NS
ثابت زمانی سردشدن واحد i	τ_i	تولید توان واحد i در زمان t	$P_{i,t}$
انحراف معیار مقادیر	σ_x		
میانگین مقادیر	μ_x		
مقدار خطا	ϵ		

سایر شکل‌ها و جداول که در متن آورده نشده:

جدول (۱): مشخصات واحدهای حرارتی [۷]

پارامترها	Pmax (MW)	Pmin (MW)	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MWh ²)	MinUp Time(h)	MaxUp Time(h)	Start Cost(\$)
واحد اول	۴۵۵	۱۵۰	۱۰۰۰	۱۶/۱۹	۰/۰۰۴۸	۶	۶	۴۵۰۰
واحد دوم	۴۵۵	۱۵۰	۹۷۰	۱۷/۲۶	۰/۰۰۳۱	۶	۶	۵۰۰۰
واحد سوم	۱۳۰	۲۰	۷۰۰	۱۶/۶۰	۰/۰۰۲	۳	۳	۵۵۰
واحد چهارم	۱۳۰	۲۰	۶۸۰	۱۶/۵۰	۰/۰۰۲۱۱	۳	۳	۵۶۰
واحد پنجم	۱۶۲	۲۵	۴۵۰	۱۹/۷۰	۰/۰۰۳۹۸	۴	۴	۹۰۰
واحد ششم	۸۰	۲۰	۳۷۰	۲۲/۲۶	۰/۰۰۷۱۲	۲	۲	۱۷۰
واحد هفتم	۸۵	۲۵	۴۸۰	۲۷/۷۴	۰/۰۰۷۹	۲	۲	۲۶۰
واحد هشتم	۵۵	۱۰	۶۶۰	۲۵/۹۲	۰/۰۰۴۱۳	۱	۱	۳۰
واحد نهم	۵۵	۱۰	۶۶۵	۲۷/۲۷	۰/۰۰۲۲۲	۱	۱	۳۰
واحد دهم	۵۵	۱۰	۶۷۰	۲۷/۷۹	۰/۰۰۱۷۳	۱	۱	۳۰

جدول (۳): متوسط بار مصرفی روزانه و انحراف معیار [۷]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میانگین (MW) بار	۴۵۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۰۰	۹۵۰	۱۰۵۰	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۲۵۰
انحراف معیار بار (٪)	۱/۷	۲	۲/۵	۲/۳	۲/۶	۲/۷	۳	۱/۷	۲/۳	۲/۲	۲/۶	۲/۸
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
میانگین (MW) بار	۱۱۵۰	۱۰۵۰	۹۵۰	۸۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۱۵۰	۱۰۵۰	۸۵۰	۶۵۰	۵۵۰
انحراف معیار بار (٪)	۲/۴	۲/۹	۱/۷	۱/۹	۱/۹	۲/۱	۲/۹	۲/۳	۲/۳	۲	۱/۷	۱/۵

جدول (۵): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت بدون در نظر گرفتن قیود امنیتی

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	واحد	واحد
۱	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۳	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰
۴	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۵	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳
۶	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳	۴۳۳
۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷	۴۲۲/۷
۸	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵	۴۲۴/۵
۹	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۱۰	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۱۱	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶	۴۲۱/۶
۱۲	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶	۴۰۲/۲۶
۱۳	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷	۴۳۳/۴۷
۱۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴	۳۸۷/۴
۱۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۱۶	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷	۴۳۴/۷
۱۷	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸	۴۴۶/۸
۱۸	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹	۴۴۲/۹
۱۹	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
۲۰	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳	۳۶۳
۲۱	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵	۴۳۵
۲۲	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰
۲۳	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰
۲۴	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰

جدول (۷): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم

ساعت	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰	واحد
۱	۳۷۵	۰	۲۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰
۲	۴۰۵	۰	۲۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰
۳	۴۵۳	۰	۲۰	۵۶	۲۵	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۴۵
۴	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۶۰	۵۵	۶۰	۰	۰	۰	۴۵
۵	۴۲۸	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۲۰	۰	۱۰	۰	۱۰	۰
۶	۴۴۸	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۹۰	۹۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۷	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۹۶	۹۰	۲۷	۱۲	۰	۰	۱۰
۸	۴۵۱	۰	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۲۵	۱۰	۰	۰	۱۰
۹	۳۶۸	۰	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۰	۴۳۱	۰	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۱۱	۴۴۵	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۱۲	۴۳۴	۰	۰	۰	۱۶۲	۹۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۳	۴۵۵	۰	۰	۰	۸۲	۱۳۰	۰	۰	۰	۰	۶۵
۱۴	۴۵۵	۰	۰	۰	۶۴	۰	۰	۰	۰	۰	۵۴
۱۵	۴۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۲۶۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۷	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳
۱۸	۲۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۱۹	۴۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵
۲۰	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۵
۲۱	۳۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۲۲	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۲۳	۴۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۲۴۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹

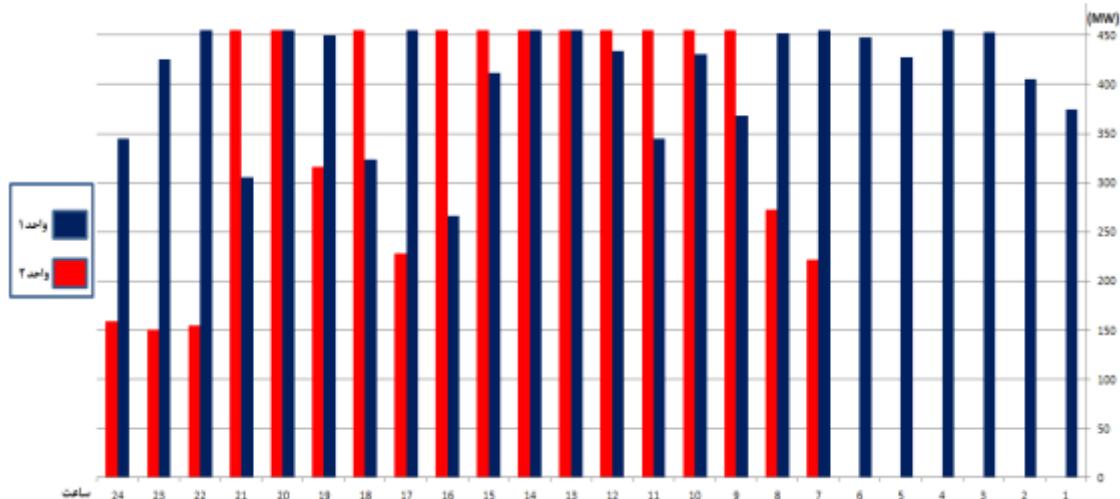
جدول (۹): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ ساعت بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت

ساعت	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰	واحد
۱	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۲	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۴	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰
۵	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۷	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۹	۴۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

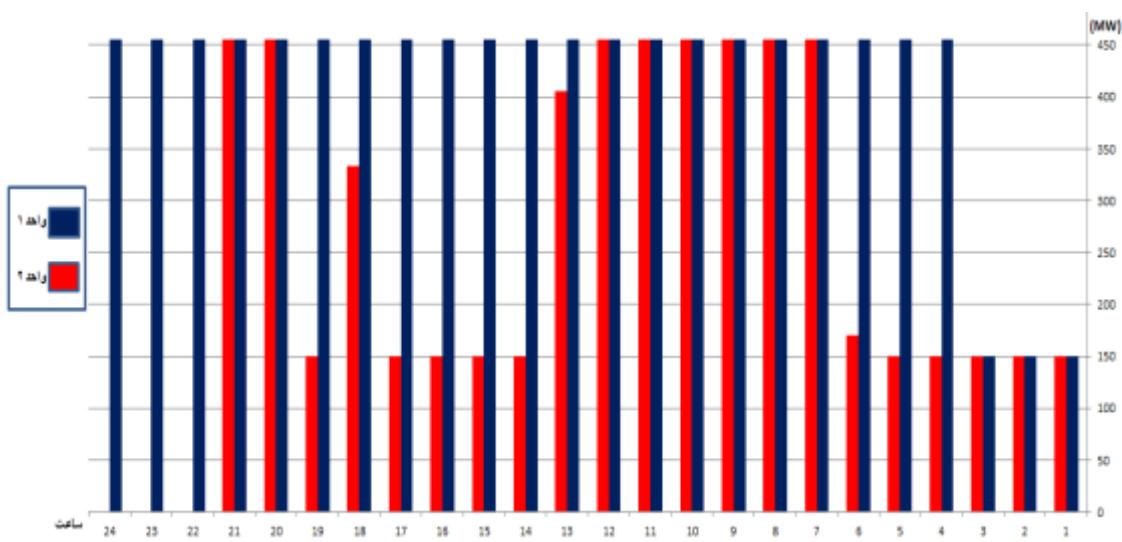
.	.	.	۲۵	.	.	۱۳۰	۱۳۰	۱۵۰	۴۵۵	۱۹
.	۱۰	.	۲۵	.	.	۱۳۰	۱۳۰	۴۵۵	۴۵۵	۲۰
۱۰	۱۰	۱۰	.	.	.	۱۳۰	۱۳۰	۴۵۵	۴۵۵	۲۱
۱۰	۱۰	۱۰	.	۲۰	۲۰	۱۶۲	.	.	۴۵۵	۲۲
.	.	.	.	۲۰	۲۵	۱۳۰	.	.	۴۵۵	۲۳
۱۰	.	.	.	۲۰	۲۵	۲۰	.	.	۴۵۵	۲۴

جدول (۱۰): مقایسه بین هزینه‌ها و تعداد تکرارها در سناریوهای مختلف

	تعداد تکرارهای الگوریتم تا زمان رسیدن به مقدار نهایی
	مقدار نهایی
حالات ۱ (بدون قیود امنیتی، با مونت کارلو)	۴۴۷۹۸۹/۵ (\$)
حالات ۲ (با قیود امنیتی و مونت کارلو)	۴۵۰۷۱۷/۴ (\$)
حالات ۳ (بدون مونت کارلو، با قیود امنیتی)	۴۵۴۹۷۵/۱ (\$)



شکل (۷): تولید بهینه‌ی واحدهای او ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته شده



شکل (۸): تولید بهینه‌ی واحدهای او ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته نشده

مراجع:

- Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 2 , pp. 735-740, April 2006.*
- [6] W. Li, *Risk assessment of power systems: models, methods, and applications*: John Wiley & Sons, 2005.
 - [7] H. Siahkali, M. Vakilian, " Stochastic unit commitment of wind farms integrated in power system", Electric Power Systems Research 80 (2010) 1006–1017, Department of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-8639, Tehran, Iran.
 - [8] F. Youcef Ettoumi, A. Mefti, A. Adane, M.Y. Bouroubi, "Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distributions", www.elsevier.nl/locate/renene, Renewable Energy 26 (2002) 47-67.
 - [9] T. O. Ting, M. V. C. Rao, and C. K. Loo, "A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 1. 2006.

- [1] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, "Market operations in electric power systems, 2002," ed: John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [2] Yong Fu, Mohammad Shahidehpour, and Zuyi Li, " Security-Constrained Unit Commitment With ACConstraints", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 20, no. 2, MAY 2005.
- [3] D. Kirschen and G. Strbac, "Fundamentals of power system economics, 2004," ed:John Wiley & Sons.
- [4] Gaing, Z.W. ;"Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment"; IEEE Power Engineering Society General Meeting, Volume 1, 13-17 July 2003.
- [5] M. Veerachary, "PSIM circuit-oriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources" IEEE