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

آلفرد باغرامیان [1]، استادیار و عضو هیئت علمی، میثم علیزاده لشکانی [2]، 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 راه‌حل بهینه برای برنامه‌ریزی روز-پیش(Day-ahed) 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 راه‌اندازی واحدها است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با استفاده از این روش، منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملکرد سیستم، درکنار ارضاء تمامی قیود غالب سیستم می‌شود که نسبت به روش‌های مرسوم و سنتی، دارای سرعت همگرایی بالاتر و دقت بیشتری است.**

واژه های 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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین برنامه‌های اقتصادی در سیستم قدرت، چگونگی کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم است. به همین منظور دست‌یابی به یک برنامه‌ریزی برای ورود و خروج واحدها، از اهمیت بالایی برخوردار است. به طور کلی، دو هدف "اطمینان از بهره‌برداری ایمن" و "تسهیل بهره‌برداری اقتصادی" از راه‌اندازی بازار برق، متصور است. در بهره-برداری سنتی ازسیستم‌های قدرت، مسئله ورود و خروج واحدها در مدار بر مبنای اصول امنیتی شبکه، طرح‌ریزی و پیاده‌سازی می‌شدند. درچنین حالتی بهره‌برداری از شبکه، لزوماً اقتصادی‌ترین حالت ممکن بهره‌برداری به شمار نمی‌رفت. در محیط تجدیدساختارشده، می‌توان با استفاده از خدمات گوناگونی که در اختیار بازار است، ایمنی را تسهیل کرد و با بهره‌برداری اقتصادی از بازار برق، هزینه مصرف برق را کاهش داد[۱,۲].

مسأله مشارکت واحدها به صورت یک مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که اهداف آن، تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و میزان بهینه تولید آنها است. در این تحقیق، یک راه‌حل بهینه برای برنامه‌ریزی روز-پیش مسأله امنیت-مقید مشارکت واحدها در سیستم قدرت فراهم می‌شود. راه‌حل بهینه ایجادشده باید بتواند هزینه‌های سیستم اعم از هزینه مصرف سوخت و تلفات را در حضور قیود غالب سیستم قدرت، کاهش دهد. برای حل مسأله برنامه‌ریزی 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 هماهنگی بین آن‌ها است و در واقع یکی از شاخه‌های هوش ازدحامی به حساب می‌آید. در این تحقیق از PSO باینری استفاده شده است که هم‌اکنون در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی گسسته، نقش موثر و پویایی دارد[۴].

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، پایان‌پذیر بودن و نیز آلودگی ناشی از آن‌ها، لزوم جایگزینی این سوخت‌ها را با منابع جدید و پاک انرژی روشن می‌سازد. 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 سیستم‌ها (فتوولتائیک) یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌آید. در این تحقیق، در کنار واحدهای حرارتی، از دو واحد خورشیدی با مشخصات معلوم، برای تأمین توان شبکه استفاده شده است[۵].

۲- برنامه‌ریزی ورود و خروج واحدها با در نظرگرفتن قیود امنیتی سیستم

در این مقاله، هدف اصلی یافتن ماتریس ورود و خروج واحدها است به نحوی که اولاً تمامی قیود سیستم قدرت ارضا 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 ورودی‌های مسأله، در 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 درمدار است و همچنین تعیین می‌کند 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 می‌شود.

۲-۱- تابع هدف

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

$$\min CF = \min \sum_{i=1}^{NG} \sum_{t=1}^{NT} [F_{c,i}.(P_{i,t}, I_{i,t}) + SU_{i,t}] \quad (۱)$$

۲-۱-۱- هزینه سوخت

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

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

۲-۱-۲- 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 هدفِ مسأله در مدار قرار گرفتن واحدها، به صورت زیر در نظرگرفته می‌شود:

$$SU_{it} = b_{0i} + b_{1i}[1 - e^{\left(-\frac{T_{it}^{off}}{\tau_i}\right)}] \quad (۳)$$

۲-۲- قیود مسأله

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

۲-۲-۱- تعادل توان سیستم

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

$$\sum_{i=1}^{N} I_i(t) P_{i,t} = D(t) + Losses \quad (۴)$$

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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

۲-۲-۲- ذخیره چرخان سیستم

ذخیره چرخان واژه‌ای است که به تفاوت میان کل ظرفیت فعال سیستم و مجموع بار اطلاق می‌شود. ذخیره چرخان(۱۱) 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 می‌شود:

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

۲-۲-۳- محدودیت تولید توان واحدها

به منظورکارکرد با بازده بالا در بلندمدت، مقدار تولید واحدهای نیروگاهی باید بین حداقل تولید و حداکثر آن قرار گیرد. از این رو برای عملکرد بهینه و مداوم واحدهای نیروگاهی، باید مقدار تولید هر واحد به صورت کنترل‌شده باشد.

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

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 مداوم در مدار باقی بماند و همین طور زمانی که از مدار خارج می‌شود نیز باید زمان مشخصی در وضعیت خاموش باقی بماند. رابطه زیر به صورت ریاضی، فرمول‌بندی این قید را نشان می‌دهد:

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

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 نمی‌تواند از حد معینی فراتر رود. این محدودیتها شامل حداکثر نرخ تغییرات افزایشی و حداکثر نرخ تغییرات کاهشی است. به فرم فرمولی:

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

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

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:

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

۲-۲-۷- حدودولتاژترانسفورماتورها

این قید نیز به مانند قید توان‌های انتقالی، مربوط به قیود امنیت شبکه قدرت است. محدوده تعیین‌شده برای ولتاژ ترانسفورماتورها در اغلب مقالات، بین ۰.۹ تا ۱.۱ پریونیت است. رابطه ریاضی این قید به صورت زیر بیان می‌شود[۳]:

$$V^{min} \leq V \leq V^{max} \qquad (۱۱)$$

۲-۳- در نظرگرفتن عدم قطعیت مربوط به نیروگاه خورشیدی و بار

برای اعمال عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی از روش مونت‌کارلو و یک سری از توابع توزیع استفاده شده است. ایده اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو، ایجاد یک سری از نمونه‌های 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 مونت‌کارلو، یک مقدار هزینه تولید برای کل سیستم خواهیم داشت. اگر تمامی این هزینه‌های به دست آمده از تکرار حلقه مونت‌کارلو را به عنوان داده‌هایی با توزیع نرمال در نظر بگیریم، در هر بار تکرار حلقه مونت‌کارلو و اضافه شدن سناریوی جدید، هزینه تولید به ازای این سناریو به مجموعه هزینه سناریوهای قبلی اضافه می‌شود. با پیدا کردن مقادیر μ و σ برای توزیع نرمال متناظر با مجموعه حاصله، در هر تکرار طبق رابطه زیر، مقدار انحراف معیار یا CVX این سناریوها را به‌دست می‌آوریم:

$$cv_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x . \sqrt{NS}} \qquad (۱۲)$$

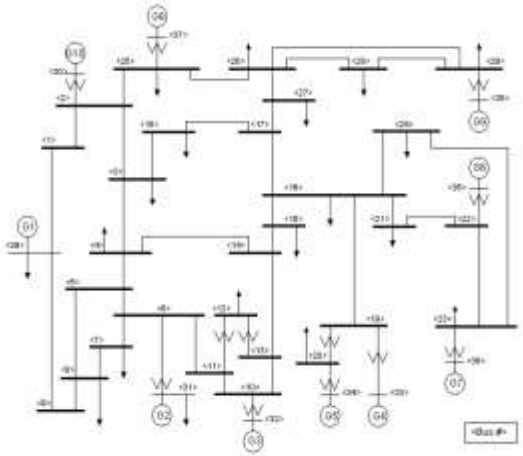
اگر cv_x کمتر از یک مقدار خطای ε باشد، نتایج به دست آمده مناسب بوده و شبیه‌سازی به اتمام می‌رسد[۶]. در این مقاله مقدار ε را ۰/۲ در نظر گرفته‌ایم.

۲-۴- 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 ۱۰ماشینه New-England" شناخته می‌شود. 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 راه‌اندازی هر واحد در جدول (۱) آورده شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]



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

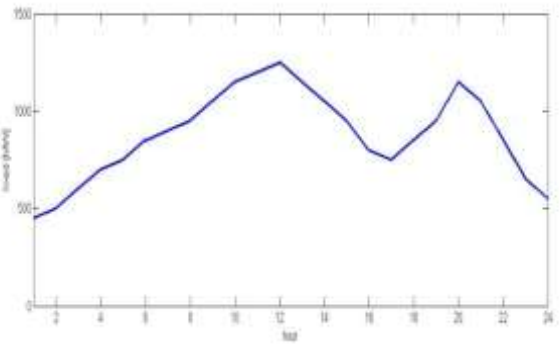
همان طور که گفته شد، در این تحقیق از دو واحد خورشیدی نیز در کنار واحدهای حرارتی استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آمده است. این جدول شامل مساحت سلول‌های فتوولتائیک برای هر واحد و همچنین بازده تبدیل انرژی هرکدام از آنهاست. به عنوان مثال واحد اول، ۱۶ درصد از کل انرژی تابشی خورشید را که توسط سلولهای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

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

جدول (۲): مشخصات واحدهای خورشیدی

بازده	مساحت کل پنل‌ها(m^2)	مشخصات واحدها
۰/۱۶	۱۵۰۰۰۰	واحد خورشیدی اول
۰/۱۵	۱۷۰۰۰۰	واحد خورشیدی دوم

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 کرده‌ایم. از آن‌جایی که مقادیر موجود در نمودار بار مصرفی، مقادیر میانگین توزیع نرمال در هر ساعتِ 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 متناظر با رفتار تصادفی بار در هر ساعت را تخمین زد[۷].



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

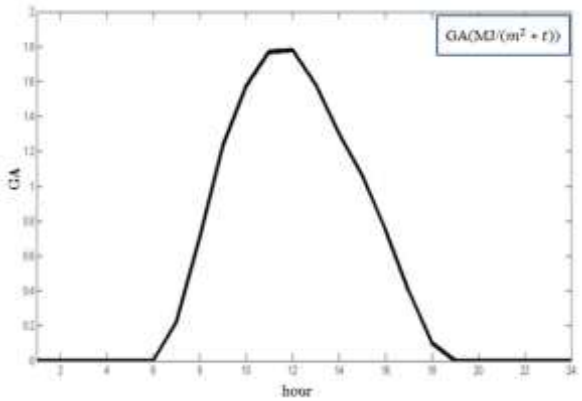
جدول (۳): متوسط بار مصرفی روزانه و انحراف معیار[۷] (در انتهای مقاله)

اگر منحنی متوسط تابش خورشید در ساعات 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 می توان به عنوان یک متغیر تصادفی آن هم با یک تابع توزیع احتمال مدل کرد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که یکی از نزدیک‌ترین تقریب ها برای مدل تصادفی تابش خورشید را می توان از مجموع دو تابع توزیع بتا بدست آورد. سپس با استفاده از روش مونت‌کارلو می‌توان مانند بار، مقادیر تابش خورشید در ساعات مختلف شبانه‌روز را به دست آورد[۸].

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

$$P=\eta.S.Ga \qquad (۱۳)$$

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



شکل (۳): منحنی متوسط تابش خورشید بر حسب $MJ/(m^2 * t)$ در ساعات مختلف یک شبانه‌روز[۸]

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور مقایسه بهتر، نتایج شبیه‌سازی برای ۳ سناریوی مختلف مربوط به مسأله 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.

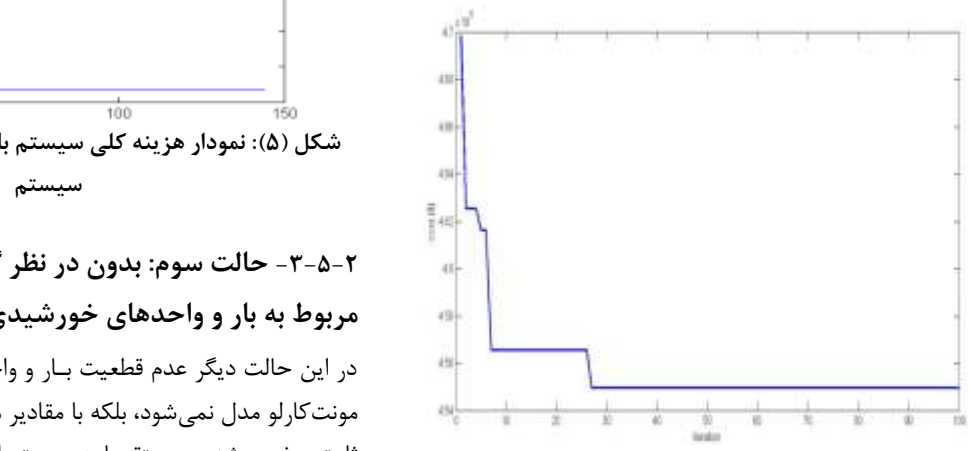
۲-۵-۱- حالت اول: بدون در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و با در نظرگرفتن مونت‌کارلو

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 (۴): حالت به مدار آمدن واحدها بدون در نظرگرفتن قیود امنیتی

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
واحد۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول (۵): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ساعت بدون در نظرگرفتن قیود امنیتی (در انتهای مقاله)

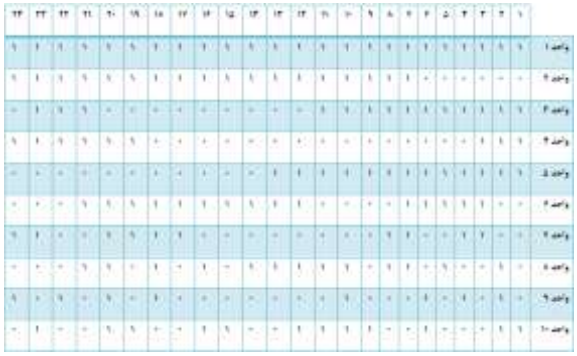


شکل (۴): نمودار هزینه کلی سیستم بدون در نظرگرفتن قیود امنیتی

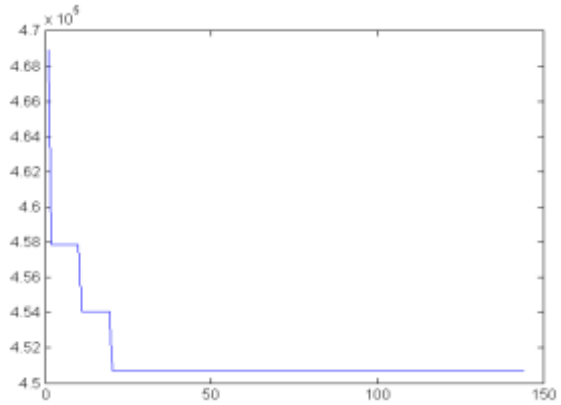
۲-۵-۲- حالت دوم: با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و مونت کارلو

در این حالت با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و عدم قطعیت موجود در رفتار بار و واحدهای خورشیدی، به حل مسأله پرداخته شده است. جدول (۶) نشان‌دهنده‌ی وضعیت به مدار آمدن واحدها در طول ۲۴ 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 (۷): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ساعت با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم (در انتهای مقاله)



شکل (۵): نمودار هزینه کلی سیستم با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم

۲-۵-۳- حالت سوم: بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به بار و واحدهای خورشیدی

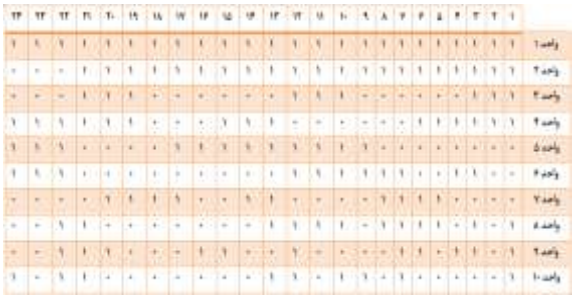
در این حالت دیگر عدم قطعیت بار و واحدهای خورشیدی با روش مونت‌کارلو مدل نمی‌شود، بلکه با مقادیر میانگین آنها به عنوان مقادیر ثابت برخورد شده و مستقیما به سیستم اعمال می‌شود. جدول (۸) بیانگر وضعیت به مدار آمدن واحدها در این حالت و جدول (۹) نیز میزان تولید بهینه واحدها در این حالت را نشان می‌دهد. شکل (۶)

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

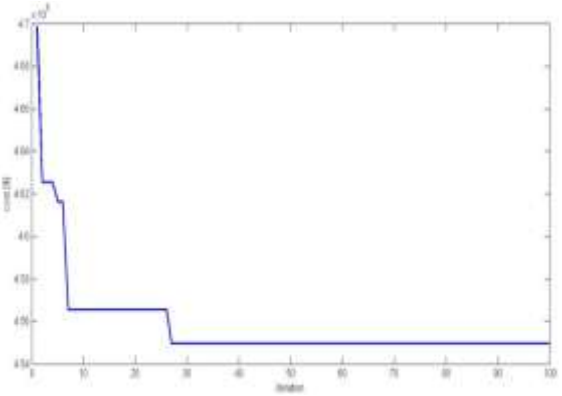
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

بیانگر نمودار هزینه‌های کل سیستم در این حالت است.

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



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



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

۲-۶- ارزیابی نتایج

همان‌گونه که ملاحضه 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 صرف‌نظر می‌شود، هزینه‌های سیستم بیشترین کاهش را پیدا می‌کند و بعد از تعداد تکرار کمتری الگوریتم به مقدار نهایی خود می‌رسد. این مسأله 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 اجباری است و نمایش مقدار هزینه نهایی در این حالت، تنها به منظور نشان‌دادن تأثیر این قید در مقدار هزینه کلی سیستم است.

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

همچنین در شکل‌های (۷) و (۸)، میزان بهینه‌ی تولید واحدهای ۱ و ۲ به صورت نمودارهایی آورده شده است. همان گونه 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 ۱و ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته شده (در انتهای مقاله)

شکل (۸): تولید بهینه‌ی واحدهای ۱و ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته نشده (در انهای 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 هرکدام 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 ۱و۲، به صورت غیراقتصادی در مدار هستند. این موضوع در شکل (۸) کاملاً مشخص است. واحد ۱، اکثراً در حالت تولید ماکزیمم خود قرار دارد و واحد ۲ نیز هماهنگی مشخصی برای تولید توان ندارد و یک روند تکراری را دنبال می‌کند. شاید میزان ذخیره چرخان در این حالت قابل توجه باشد، اما این روندِ 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، مسأله 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 برمی‌گزیند که از نظر اقتصادی برای سیستم قدرت به صرفه باشند. مگر اینکه سیستم ناچارا و برای ارضای قید کفایت، مجبور 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.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

ضمایم:

فهرست علائم و اختصارات:

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

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 ($/MW$h^2$)	MinUp Time(h)	MaxUp Time(h)	Start Cost($)
واحد اول	۴۵۵	۱۵۰	۱۰۰۰	۱۶/۱۹	۰/۰۰۰۴۸	6	6	۴۵۰۰
واحد دوم	۴۵۵	۱۵۰	۹۷۰	۱۷/۲۶	۰/۰۰۰۳۱	6	6	۵۰۰۰
واحد سوم	۱۳۰	۲۰	۷۰۰	۱۶/۶۰	۰/۰۰۲	3	3	۵۵۰
واحد چهارم	۱۳۰	۲۰	۶۸۰	۱۶/۵۰	۰/۰۰۲۱۱	3	3	۵۶۰
واحد پنجم	۱۶۲	۲۵	۴۵۰	۱۹/۷۰	۰/۰۰۳۹۸	4	4	۹۰۰
واحد ششم	۸۰	۲۰	۳۷۰	۲۲/۲۶	۰/۰۰۷۱۲	2	2	۱۷۰
واحد هفتم	۸۵	۲۵	۴۸۰	۲۷/۷۴	۰/۰۰۷۹	2	2	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

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

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

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میانگین بار(MW)	۴۵۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۰۰	۹۵۰	۱۰۵۰	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۲۵۰
انحراف معیار بار مصرفی(٪)	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 بار(MW)	۱۱۵۰	۱۰۵۰	۹۵۰	۸۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۱۵۰	۱۰۵۰	۸۵۰	۶۵۰	۵۵۰
انحراف معیار بار مصرفی(٪)	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 ۲۴ساعت بدون در نظرگرفتن قیود امنیتی

ساعت	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
۱	۴۰۰	۰	۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۰	۱۰	۰
۲	۴۵۵	۰	۰	۲۵	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۳	۴۵۰	۰	۰	۱۳۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۰
۴	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۰	۹۰	۰	۱۵	۰	۱۵
۵	۳۹۳	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۰
۶	۴۳۳	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۹۰	۲۵	۰	۰	۱۰
۷	۴۳۲/۷	۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۴۳/۵	۲۰	۲۵	۱۰	۰	۰
۸	۴۳۴/۵	۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۵۷	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
۹	۴۵۵	۲۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۸۵	۰	۵۵	۰
۱۰	۴۵۵	۳۴۸/۸	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۸۵	۶۵	۰	۰
۱۱	۴۳۱/۶	۴۰۶/۱	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۲۵	۰	۱۰	۱۰
۱۲	۴۰۲/۲۶	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۰	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
۱۳	۴۳۳/۴۷	۴۵۵	۰	۱۳۰	۲۵	۲۰	۲۵	۰	۱۰	۰
۱۴	۳۸۷/۴	۴۵۵	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۱۰	۰	۰
۱۵	۴۵۵	۳۰۵	۰	۱۳۰	۱۶۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۴۳۴/۷	۱۵۰	۲۰	۱۲۴/۷	۲۵	۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۱۷	۴۴۶/۸	۱۵۰	۲۰	۹۳/۶	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸	۴۴۲/۹	۱۵۰	۴۲/۷	۱۳۰	۲۵	۲۰	۲۵	۰	۰	۱۰
۱۹	۴۵۵	۲۹۵	۱۳۰	۰	۱۶۲	۲۸	۳۳	۰	۰	۰
۲۰	۳۶۳	۴۵۵	۱۳۰	۰	۱۶۲	۲۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۲۱	۴۳۵	۴۵۵	۱۳۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۱۰
۲۲	۴۲۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۰
۲۳	۴۲۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۰
۲۴	۳۳۰	۳۳۰	۱۳۰	۹۰	۰	۹۰	۰	۰	۵۵	۰

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

جدول (۷): مقادیر توان تولیدی هر واحد در طول ۲۴ساعت 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
۱	۳۷۵	۰	۲۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۰
۲	۴۰۵	۰	۲۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۴۵۳	۰	۲۰	۵۶	۲۵	۲۰	۲۵	۰	۰	۰
۴	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۶۰	۵۵	۶۰	۰	۴۵	۰
۵	۴۲۸	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۲۰	۰	۱۰	۰	۰
۶	۴۴۸	۰	۱۳۰	۰	۱۶۲	۹۰	۰	۰	۱۰	۱۰
۷	۴۵۵	۲۲۱	۱۳۰	۰	۹۶	۹۰	۲۷	۱۲	۰	۰
۸	۴۵۱	۲۷۲	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۲۵	۱۰	۰	۰
۹	۳۶۸	۴۵۵	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۰	۴۳۱	۴۵۵	۱۳۰	۰	۲۵	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱۱	۳۴۵	۴۵۵	۱۳۰	۰	۱۶۲	۰	۰	۱۰	۰	۱۰
۱۲	۴۳۴	۴۵۵	۰	۰	۱۶۲	۹۰	۰	۱۰	۰	۱۰
۱۳	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۱۳۰	۸۲	۰	۶۵	۰	۰
۱۴	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۰	۶۴	۰	۵۴	۰	۰
۱۵	۴۱۱	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۶	۲۶۶	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۰	۰	۱۰	۰	۱۰
۱۷	۴۵۵	۲۲۸	۰	۰	۰	۹۰	۳۳	۰	۰	۰
۱۸	۳۲۳	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۰
۱۹	۴۵۰	۳۱۵	۰	۱۳۰	۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۱۰
۲۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۵۵	۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
۲۱	۳۰۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۰	۲۰	۰	۱۰	۰	۰
۲۲	۴۵۵	۱۵۴	۱۰۵	۱۳۰	۰	۰	۰	۰	۱۵	۰
۲۳	۴۲۵	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۱۰
۲۴	۳۴۵	۱۵۹	۰	۲۹	۰	۰	۳۴	۰	۱۹	۰

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

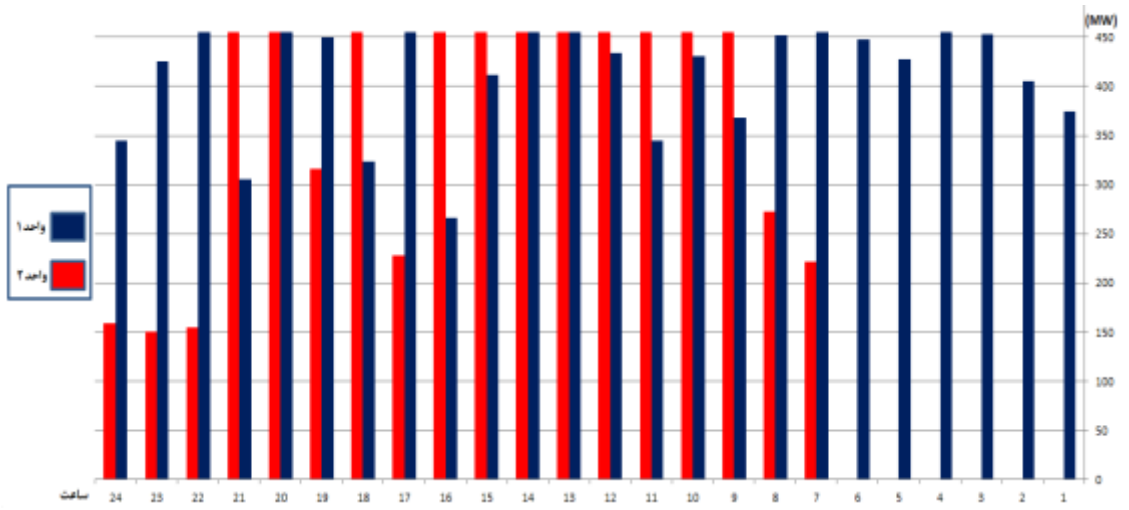
ساعت	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
۱	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۰
۴	۴۵۵	۱۵۰	۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۰	۱۰	۰
۵	۴۵۵	۱۵۰	۰	۲۰	۰	۰	۲۵	۱۰	۰	۰
۶	۴۵۵	۱۷۰/۳۷	۰	۱۳۰	۰	۰	۲۵	۱۰	۱۰	۰
۷	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
۸	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۰	۲۰	۲۵	۱۰	۰	۰
۹	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۲۵	۲۰	۰	۰	۰	۱۰
۱۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۰	۲۵	۲۰	۰	۱۰	۰	۱۰
۱۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۰	۲۵	۲۰	۰	۱۰	۰	۰
۱۲	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۰	۲۵	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱۳	۴۵۵	۴۰۵/۸	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۲۵	۱۰	۰	۱۰
۱۴	۴۵۵	۱۵۰	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۲۵	۰	۰	۰
۱۵	۴۵۵	۱۵۰	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۰	۰
۱۶	۴۵۵	۱۵۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۰	۰
۱۷	۴۵۵	۱۵۰	۰	۰	۲۵	۰	۲۵	۰	۰	۰
۱۸	۴۵۵	۳۳۳	۰	۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

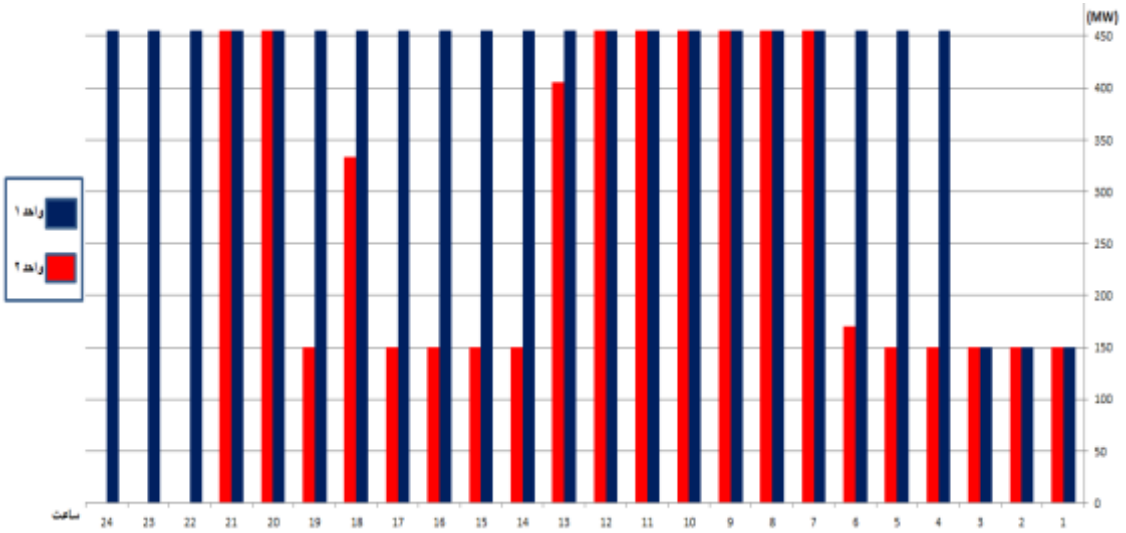
۱۹	۴۵۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰
۲۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۲۵	۰	۱۰	۰
۲۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲۲	۴۵۵	۰	۱۶۲	۰	۲۰	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲۳	۴۵۵	۰	۱۳۰	۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۲۴	۴۵۵	۰	۲۰	۰	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۰

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

	مقدار هزینه بهینه نهایی	تعداد تکرارهای الگوریتم تا زمان رسیدن به مقدار نهایی
حالت۱ (بدون قیود امنیتی, با مونت‌کارلو)	۴۴۷۹۸۹/۵ ($)	۱۲
حالت۲ (با قیود امنیتی و مونت‌کارلو)	۴۵۰۷۱۷/۴($)	۲۰
حالت۳ (بدون مونت‌کارلو, با قیود امنیتی)	۴۵۴۹۷۵/۱($)	۲۷



شکل (۷): تولید بهینه‌ی واحدهای ۱و ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته شده



شکل (۸): تولید بهینه‌ی واحدهای ۱و ۲ برای حالتی که عدم قطعیت در نظر گرفته نشده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]

مراجع:

[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 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.*

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.2.1.6]