

برنامه ریزی تصادفی در مدار آوردن واحدهای تولید با در نظر گرفتن نااطمینانی بار و محدودیت های امنیتی شبکه

مهدی حبیبی ابوالفضل پیرایش نقاب

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

تهران، ایران

ab_pirayesh@yahoo.com

mah.habibi@mail.sbu.ac.ir

به صورت بهینه و با کمترین هزینه بهره برداری شود؛ بنابراین باید در برنامه زمان بندی در مدار قرار دادن واحدهای تولید با در نظر گرفتن قیود امنیتی، محدودیت های فنی^۲ آن ها و ظرفیت خطوط انتقال در نظر گرفته شود [۱].

در سیستم های قدرت عوامل نامعلوم مانند منابع غیر قابل توزیع^۳ و نااطمینانی بار ممکن است موجب کمبود عرضه، نوسانات فرکانس و خاموشی های^۴ بزرگ شود [۲]. تکنیک های مختلفی برای پیش بینی بار مبتنی بر فیزیک و ابزارهای آماری، نظیر شبکه های عصبی و رگرسیون توسعه یافته اند. یک چهارچوب محاسباتی جدید در [۳] برای ایجاد مدل پیش بینی در فرمول بندی UC تصادفی^۵، برای لحاظ کردن نااطمینانی ارائه شده است. با وجود اینکه توان بار به میزان محدود قابل پیش بینی است اما نمی توان آن را به طور قطعی برای اهداف پخش بار پیش بینی نمود. یک روش برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت لحاظ کردن نوسانات بار در سناریوهای مختلف است. در چنین مدلی نااطمینانی بار توسط تعدادی سناریو برای توان بار لحاظ می شود و هر سناریو یک تحقق امکان پذیر از توان بار ارائه می نماید. یکی از روش های تعدیل تغییرات بار در نظر گرفتن رزرو و استفاده از واحدهای ذخیره ساز انرژی است [۴-۶]. یک روش برای سناریوسازی روش مونت کارلو^۶ است که تحقق همه عدم قطعیت های ممکن را شبیه سازی می کند. تعداد سناریوهای لازم برای تضمین یک راه حل معقول گاهی زیاد است و موجب همگرایی کند می شود. مسئله SCUC یک مسئله غیر محدب، غیر قطعی و

چکیده — این مقاله یک الگوریتم برای در مدار قرار دادن واحدهای تولید با در نظر گرفتن قیود امنیتی سیستم و نااطمینانی بار ارائه می نماید. مسئله در مدار قرار دادن واحدها در مسئله اصلی با در نظر گرفتن سناریوهای وقوع بار برای تحقق نااطمینانی حل می شود. سپس پخش بار شبکه با مقادیر به دست آمده از مسئله اصلی برای توان تولیدی واحدها در زیر مسئله ها به صورت ساعتی بررسی می گردد. اگر پخش بار مجدد حذف باری در هر یک از شین های شبکه را نشان دهد، برش های بندرز مربوطه ایجاد شده و به مسئله اصلی اضافه می شود تا میزان تولید واحدها اصلاح گردد. فرآیند تکرار شونده فوق بین مسئله اصلی و زیر مسئله بررسی شدنی بودن پخش بار تا جایی تکرار می شود که به ازای سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای نااطمینانی بار، حذف باری در شبکه نداشته باشیم. نتایج عددی حاصل از شبیه سازی نشان دهنده اثر بخشی الگوریتم پیشنهادی فوق برای مقابله با نااطمینانی بار است.

واژه های کلیدی — الگوریتم بندرز؛ برنامه ریزی تصادفی؛ در مدار قرار

دادن واحدها؛ رزرو؛ قیود امنیتی؛ نااطمینانی بار

۱. مقدمه

با تبدیل شدن صنعت برق به یک بازار رقابتی و تجدید ساختار^۱ در سیستم های قدرت این موضوع اهمیت یافته است که از واحدهای سیستم

4 Black out
5 Stochastic unit commitment
6 Monte Carlo sampling (MCS)

1 Restructure
2 Security constrained unit commitment (SCUC)
3 Non dispatchable

۲. سناریوسازی

در این مقاله مدل نااطمینانی بار را با توزیع نرمال مدل می‌کنیم. در توزیع نرمال مقدار میانگین را برابر مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته و نااطمینانی را با انحراف معیار لحاظ می‌نماییم. روش مونت کارلو قادر است تعداد زیادی سناریو با توزیع نرمال تولید نماید. در این مقاله از روش نمونه‌برداری مکعب لاتین^۸ استفاده شده است که طبق [۵] بهتر از روش مونت کارلو توزیع نرمال را تخمین می‌زند. به هر سناریو یک عدد تصادفی با احتمالی برابر یک تقسیم بر تعداد سناریوها اختصاص می‌یابد. روش LHS برای کاهش واریانس شبیه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله تعداد ۱۰۰۰ نمونه برای شبیه سازی نااطمینانی باد تولید شده است. همچنین برای کاهش سناریو برای حذف سناریوهای با احتمال کوچک و تجمیع نمونه‌های نزدیک از روش فاصله احتمالی^۹ استفاده می‌گردد [۵، ۱۷].

۳. تعریف مسئله و راه‌حل

۳.۱. فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی تصادفی

تابع هدف مسئله اولیه در بهینه‌سازی تصادفی به صورت (۱) است که در آن ضرایب st_i ، d_i و α_{it} ، β_{it} به ترتیب هزینه‌های ثابت و متغیرهای راه اندازی و خاموش کردن ژنراتور i ام هستند. P_{it}^k به ترتیب هزینه ثابت و توان تولیدی واحد k ام از ژنراتور i ام، π^s احتمال وقوع سناریو s ام، c_i^{ru} و c_i^{rd} هزینه‌های ثابت و $r_{it}^{u,s}$ و $r_{it}^{d,s}$ متغیرهای پخش بار اصلاحی^{۱۰} (رزرو) افزایشی و کاهش‌ی برای ژنراتور i ام در زمان t ام و برای سناریو s ام می‌باشند. قیود مسئله بهینه‌سازی تصادفی در (۲)–(۱۳) آمده است.

$$\text{Min} \sum_t \sum_i (sd_i \cdot \beta_{it} + st_i \cdot \alpha_{it} + \sum_k c_i^k \cdot P_{it}^k) + \sum_s \pi^s \cdot \sum_t \sum_i (c_i^{ru} \cdot r_{it}^{u,s} + c_i^{rd} \cdot r_{it}^{d,s}) \quad (1)$$

$$\alpha_{it} - \beta_{it} = I_{it} - I_{i(t-1)} \quad \forall i, \forall t \quad (2)$$

$$\alpha_{it} + \beta_{it} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_k P_{it}^k - r_{it}^{d,s} \geq P_i^{\min} \cdot I_{it} \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (4)$$

$$\sum_k P_{it}^k + r_{it}^{u,s} \leq P_i^{\max} \cdot I_{it} \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (5)$$

چندجمله‌ای سخت^۱ است که باید برای هر سناریو حل شود. دشواری‌های حل مسائل NP-Hard با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف نااطمینانی باهم اثرات فزاینده‌ای ایجاد می‌کند که می‌تواند مشکلات ذاتی اضافی به حل مسئله SCUC تصادفی تحمیل نماید [۷]. از این رو روش‌های تجزیه مؤثری در حل مسئله بهینه‌سازی در سیستم‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند، درحالی‌که مسئله اولیه می‌تواند در این موارد بدون تجزیه، حل‌نشده^۲ باقی بماند. مرجع [۸] تعدادی از روش‌های حل مسئله UC مانند آزادسازی لاگرانژ، برنامه‌ریزی دینامیکی، الگوریتم ژنتیک و مدل‌های هیبریدی را برشمرده است.

یکی از تکنیک‌های تجزیه مفید و مرسوم در سیستم‌های قدرت، روش تجزیه بندرز است که توسط Jacobus Franciscus Benders برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح در مقیاس بزرگ معرفی گردید [۹، ۱۰]. مبانی ریاضیاتی الگوریتم بندرز و نحوه تشکیل برش‌های بندرز^۳ در کتاب [۱۱] آمده است. آقای شاهیده‌پور و همکاران در [۱۰] الگوریتم بندرز را برای حل مسئله SCUC توسعه داده‌اند. الگوریتم بندرز شتاب‌یافته با در نظر گرفتن برش‌های بندرز قوی و موازی در [۹] ارائه شده و در مقاله [۱۲] یک روش بهینه‌سازی استوار^۴ با شبیه‌سازی نااطمینانی بار و باد با مدل خطی خود همبسته میانگین متغیر^۵ با الگوریتم بندرز مورد استفاده قرار گرفته است. مرجع [۱۳] به جای جستجوی سناریو بدترین حالت، هزینه حالت پایه را حداقل می‌نماید به طوری‌که تضمین می‌نماید پاسخ UC، به صورت ایمن بازه‌های زمانی نامعین را مدیریت نماید. روش بهینه‌سازی دومرحله‌ای با قیود مبتنی بر شانس^۶ با الگوریتم تجزیه در [۱۴] و با الگوریتم تقریب میانگین نمونه^۷ با توان خروجی نامعین در مقاله [۱۵] مطرح شده است. در [۱۶] یک روش بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی واحدهای آبی-حرارتی مبتنی بر استراتژی تجزیه ترکیبی با در نظر گرفتن نااطمینانی بار و خروج واحدها با چند روش دیگر از نقطه نظر دقت، استحکام پاسخ و سرعت حل مقایسه شده است.

در این مقاله تمرکز بر نحوه رویارویی با خطاهای پیش‌بینی بار است و اطمینان از اینکه در سناریوهای مختلف حذف باری در شین‌های سیستم رخ ندهد. به منظور جبران خطاهای ناشی از پیش‌بینی بار برای واحدهای شبکه قیود مربوط به رزرو ساعتی در نظر گرفته شده است. بخش‌های بعدی مقاله به این ترتیب است. در بخش دوم نحوه سناریوسازی بار آورده شده است. بخش سوم فرمول‌بندی مسئله را شرح می‌دهد. بخش چهارم به نتایج عددی اختصاص دارد؛ و بخش پنجم مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادات می‌باشد.

6 Chance constrained

7 Sample average approximation (SAA)

8 Latin hypercube sampling (LHS)

9 Probability distance

10 Corrective dispatch

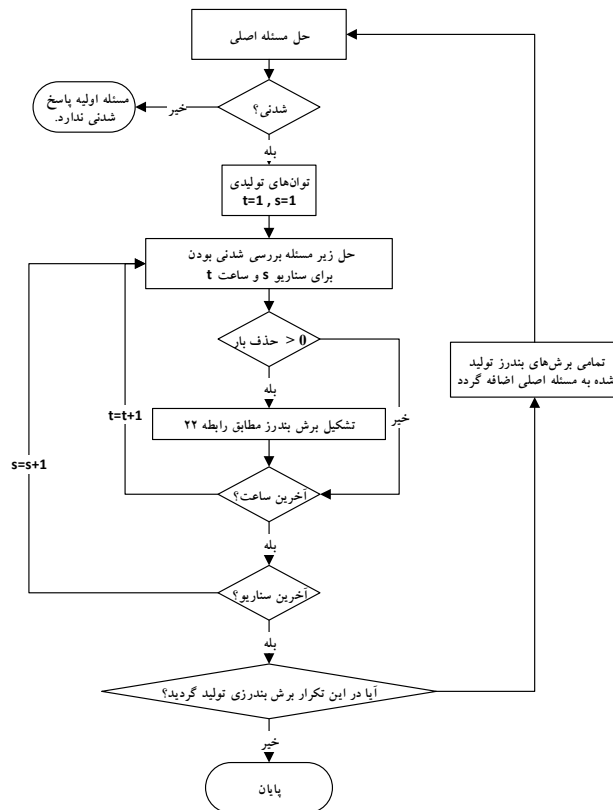
1 Non deterministic polynomial time hard (NP-Hard)

2 Intractable

3 Benders cuts

4 Robust optimisation

5 Autoregressive moving average (ARMA)



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم بندرز برای حل مسئله بهینه‌سازی تصادفی

۳.۲. مسئله بهینه‌سازی تصادفی با الگوریتم بندرز

مسئله ارائه شده در بخش قبل یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی مخلوط با عدد صحیح است. حجم این مسئله با وجود سناریوهای مختلف وقوع بار افزایش می‌یابد. الگوریتم بندرز یک روش تجزیه مناسب برای کاهش نیازمندی‌های محاسباتی است و برای جلوگیری از بدون حل ماندن مسئله اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلوچارت الگوریتم مورد نظر در شکل ۱ آورده شده است. فرمول‌بندی مسئله با الگوریتم فوق به‌صورت زیر است.

۳.۲.۱. مسئله اصلی

تابع هدف مسئله اصلی^۲ الگوریتم بندرز برای برنامه‌ریزی در مدار قرار دادن واحدها رابطه (۱) است، قیود این مسئله شامل (۲) تا (۱۲)، با این تفاوت که قیود تعادل توان به‌صورت مجموع توان تولیدی و مصرفی طبق (۱۷) و (۱۸) در نظر گرفته می‌شوند، سایر قیود مسئله اصلی به‌صورت برش‌های بندرز ایجاد شده در زیرمسئله بررسی شدنی بودن در هر تکرار به مسئله اصلی اضافه می‌گردند.

$$0 \leq p_{it}^k \leq p_{i,k}^{max} \cdot I_{it} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (6)$$

$$[X_{i(t-1)}^{on} - T_i^{on}] \cdot [I_{it} - I_{i(t-1)}] \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (7)$$

$$[X_{i(t-1)}^{off} - T_i^{off}] \cdot [I_{it} - I_{i(t-1)}] \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (8)$$

$$(r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} + \sum_k p_{it}^k) - (r_{i(t-1)}^{u,s} - r_{i(t-1)}^{d,s} + \sum_k p_{i(t-1)}^k) \leq UR_i \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (9)$$

$$(r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} + \sum_k p_{it}^k) - (r_{i(t-1)}^{u,s} - r_{i(t-1)}^{d,s} + \sum_k p_{i(t-1)}^k) \geq DR_i \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (10)$$

$$r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} \leq R_i^{up} \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (11)$$

$$r_{it}^{d,s} - r_{it}^{u,s} \leq R_i^{dn} \quad \forall i, \forall t, \forall s \quad (12)$$

$$-\pi \leq \theta_{bt} \leq +\pi \quad \forall b, \forall t \quad (13)$$

$$P_{lt} = (\theta_{mt} - \theta_{nt}) / x_{mn} ; \theta_{ref,t} = 0 \quad \forall i, \forall l \quad (14)$$

$$\sum_{i \in U(b)} \sum_k p_{it}^k - \sum_{l \in L(b)} P_{lt} = P_{D,t}^{f,b} \quad \forall i, \forall b, \forall t \quad (15)$$

$$\sum_{i \in U(b)} (r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} + \sum_k p_{it}^k) - \sum_{l \in L(b)} P_{lt} = P_{D,t}^{s,b} ; \forall b, t, s \quad (16)$$

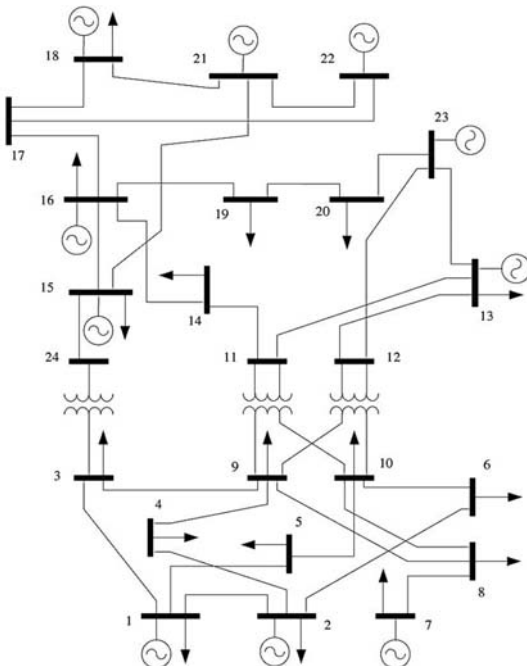
معادله‌های (۲) و (۳) این واقعیت را تضمین می‌کند که یک واحد خاموش را نمی‌توان خاموش و یک واحد روشن را نمی‌توان روشن نمود. متغیر I_{it} بیانگر وضعیت خاموش یا روشن بودن ژنراتور i ام است. در (۴)، (۵) و (۶) پارامترهای $p_{i,k}^{min}$ ، $p_{i,k}^{max}$ و $p_{i,k}^{max}$ به ترتیب مقادیر حداقل، حداکثر تولید ژنراتور i ام و حداکثر واحد k ام است. در (۷) و (۸) متغیرهای $X_{i(t-1)}^{on}$ و $X_{i(t-1)}^{off}$ به ترتیب مدت‌زمان روشن و خاموش بودن ژنراتور i ام در زمان $t-1$ ام و T_i^{on} و T_i^{off} محدودیت حداقل زمان روشن و خاموش بودن ژنراتورهای سیستم می‌باشند. در (۹) و (۱۰) محدودیت شیب در افزایش و کاهش توان آورده شده که در آن UR_i و DR_i به ترتیب حد بالا و پایین نرخ شیب^۱ واحدها هستند. همچنین مقادیر R_i^{up} و R_i^{dn} حد بالا و پایین پخش بار اصلاحی (رزرو) را در (۱۱) و (۱۲) برای سناریوهای مختلف تعیین می‌نماید. معادله (۱۴) توان عبوری از خطوط شبکه را محاسبه می‌کند که در آن m باس فرستنده و n باس دریافت‌کننده توان و x_{mn} اندوکتانس خط و θ_{mt} زاویه باس m ام می‌باشد. معادله (۱۵) تعادل توان برای حالت پایه می‌باشد که در آن $U(b)$ و $L(b)$ به ترتیب مجموعه ژنراتورها و خطوط متصل به باس b ام، P_{lt} توان عبوری خطوط و $P_{D,t}^{f,b}$ توان بار حالت پایه (بار پیش‌بینی شده) می‌باشند. معادله (۱۶) قید تعادل توان برای سناریوهای مختلف بار می‌باشد که در آن مقادیر متغیرهای پخش بار اصلاحی تعیین می‌گردد و متغیر $P_{D,t}^{s,b}$ توان بار هر سناریو می‌باشد [۲، ۵، ۱۴، ۱۷].

2 Master problem

1 Ramp rate

۴. نتایج عددی

در این مقاله از شبکه تست ۲۴ باسه IEEE (شکل ۲) مطابق [۱۹] استفاده شده است. مدل اصلاح شده شبکه برای حل مسئله UC شامل اطلاعات ژنراتورها، خطوط، بار پیش‌بینی شده ساعتی و غیره در [۱۸] ارائه شده است. برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که گفته شد ۱۰۰۰ سناریو برای مدل کردن نااطمینانی بار ساعتی با توزیع نرمال با روش LHS با میانگین مقدار پیش‌بینی شده و انحراف معیار ده درصد تولید گردید. در شکل ۳ منحنی بار پیش‌بینی شده و منحنی ده سناریو کاهش یافته آورده شده است. احتمال مربوط به ده سناریو کاهش یافته در جدول ۱ آمده است که در مسئله برنامه‌ریزی تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲: شبکه تست ۲۴ باسه IEEE

جدول ۱: احتمال سناریوهای بار ساعتی

احتمال	ردیف	احتمال	ردیف
۰,۱۵	سناریو ۶	۰,۰۲	سناریو ۱
۰,۰۸۵	سناریو ۷	۰,۱۶	سناریو ۲
۰,۰۰۲	سناریو ۸	۰,۱۰۷	سناریو ۳
۰,۱۲۵	سناریو ۹	۰,۲۴۲	سناریو ۴
۰,۰۰۲	سناریو ۱۰	۰,۱۰۷	سناریو ۵

$$\sum_i \sum_k P_{it}^k = \sum_b P_{D,t}^{f,b} \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_t (r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} + \sum_k P_{it}^k) = \sum_b P_{D,t}^{s,b} \quad \forall t, \forall s \quad (18)$$

۳,۲,۲. زیر مسئله بررسی شدنی بودن

تابع هدف زیرمسئله شدنی بودن به صورت (۱۹) می‌باشد. قیود این مسئله شامل (۱۳) و (۱۴) و نیز (۲۰) و (۲۱) می‌باشد. در این زیرمسئله حالت پایه را نیز به عنوان یکی از سناریوها در نظر می‌گیریم. طبق الگوریتم پیشنهادی پس از حل مسئله اصلی زیرمسئله فوق در تمامی ساعت‌ها و برای تک‌تک سناریوها، به ازای توان‌های تولیدی و متغیرهای اصلاحی (رزرو) به دست آمده از مسئله اصلی، حل شده و در صورت وجود حذف بار، برش‌های بندرز مربوطه مطابق (۲۲) تشکیل شده و در پایان به مسئله اصلی منتقل می‌گردد [۵].

۹, ۱۸.

$$\text{Min Load}_{\text{Curt}} = \text{Curt}^s + \text{Curt}^f \quad (19)$$

$$\sum_{i \in U(b)} (\hat{r}_{it}^{u,s} - \hat{r}_{it}^{d,s} + \sum_k \hat{P}_{it}^k) - \sum_{l \in L(b)} P_{lt}^s \geq P_{D,t}^{s,b} - \text{Curt}^s \quad \lambda_{s,bt}^1; \forall b \quad (20)$$

$$- \sum_{i \in U(b)} (\hat{r}_{it}^{u,s} - \hat{r}_{it}^{d,s} + \sum_k \hat{P}_{it}^k) + \sum_{l \in L(b)} P_{lt}^s \geq -P_{D,t}^{s,b} - \text{Curt}^s \quad \lambda_{s,bt}^2; \forall b \quad (21)$$

در روابط فوق متغیر Curt^s حذف بار در هر سناریو می‌باشد. در صورتی که در حل زیرمسئله برای هر یک از سناریوها در هر ساعت مقدار تابع هدف بزرگ‌تر از صفر بود، برش بندرز مربوطه مطابق (۲۲) برای هر یک از سناریوها ایجاد می‌شود.

$$(\lambda_{s,bt}^1 - \lambda_{s,bt}^2) \cdot [(r_{it}^{u,s} - r_{it}^{d,s} + \sum_k P_{it}^k) - (\hat{r}_{it}^{u,s} - \hat{r}_{it}^{d,s} + \sum_k \hat{P}_{it}^k)] + \text{Curt}^s \leq 0 \quad (22)$$

۳,۳. تخصیص رزرو

میزان رزرو ساعتی مورد نیاز هر واحد با استفاده از مقادیر به دست آمده از $\hat{r}_{it}^{u,s}$ و $\hat{r}_{it}^{d,s}$ از (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شود که Res_{it}^{up} و Res_{it}^{dn} به ترتیب آمادگی افزایش و کاهش تولید، جهت اصلاح پخش بار ساعتی می‌باشند.

$$\text{Res}_{it}^{up} = \max(\hat{r}_{it}^{u,s}) \quad \forall s \quad (23)$$

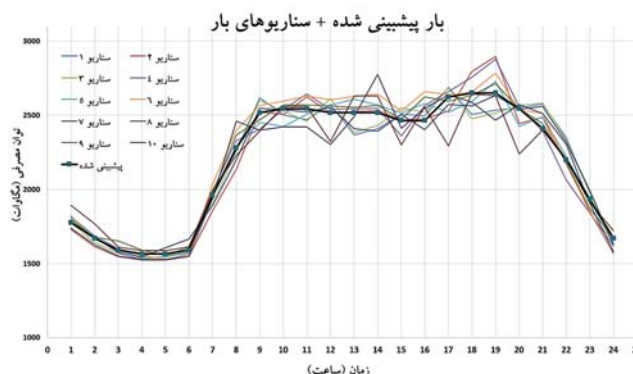
$$\text{Res}_{it}^{dn} = -\max(\hat{r}_{it}^{d,s}) \quad \forall s \quad (24)$$

شبکه مورد نظر دارای ۱۲ ژنراتور و هر ژنراتور دارای ۴ واحد می‌باشد که واحد شماره ۱۰ واحد آبی است و بقیه ژنراتورها از نوع حرارتی می‌باشند. به‌طور خاص واحد ۸ و ۹ از نوع نیروگاه هسته‌ای هستند و می‌بایست همواره در مدار باشند [۱۸]. اطلاعات حداقل و حداکثر توان خروجی ژنراتورها به همراه ظرفیت هر واحد آن در جدول ۲ آمده است. همچنین جدول ۳ قیمت چهار واحد هر ژنراتور را برحسب دلار نشان می‌دهد. در جدول ۴ نیز مقادیر حداکثر رزرو مجاز و هزینه آن (افزایشی و کاهشی برابر)، همچنین حداقل زمان روشن و خاموش بودن و هزینه روشن و خاموش کردن ژنراتورهای شبکه آورده شده است. شبکه مورد نظر شامل ۱۷ نقطه بار و ۳۴ خط انتقال می‌باشد که اطلاعات مربوطه در [۱۸] موجود است.

جدول ۴: اطلاعات تکمیلی ژنراتورها

ژنراتور	رزرو		حداقل زمان (ساعت)		هزینه (دلار)	
	هزینه	حد بالا	روشن	خاموش	ST	SD
۱	۳,۹۹	۳۰,۴	۸	۴	۱۴۳۰,۴	۱۴۳,۰۴
۲	۳,۹۹	۳۰,۴	۸	۴	۱۴۳۰,۴	۱۴۳,۰۴
۳	۵,۶۸	۶۰	۸	۸	۱۷۲۵	۱۷۲,۵
۴	۵,۵۳	۱۰۸	۱۲	۱۰	۳۰۵۶	۳۰۵,۶
۵	۷,۶	۱۲	۴	۲	۴۳۷	۴۳,۷
۶	۲,۸۱	۳۱	۸	۸	۳۱۲	۳۱,۲
۷	۲,۸۱	۳۱	۸	۸	۳۱۲	۳۱,۲
۸	۱,۴۱	۸۰	۱	۱	۰	۰
۹	۱,۴۱	۸۰	۱	۱	۰	۰
۱۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۲,۸۱	۶۲	۸	۸	۶۲۴	۶۲,۴
۱۲	۲,۹۳	۴۸	۲۴	۲۴	۲۲۹۸	۲۲۹,۸

در حل مسئله UC تصادفی فرض می‌شود در تمامی واحدهای شبکه قابلیت رزرو وجود دارد. با حل مسئله UC تصادفی با الگوریتم بندرز پاسخ‌های بهینه ایجاد شده در مسئله اصلی یک حد پایین (بهترین جواب) برای پاسخ بهینه است به شرطی که قیود زیرمسئله بررسی امنیت سیستم تأمین گردند. مقدار به‌دست‌آمده برای حد پایین مسئله اصلی (تابع هزینه بهره‌برداری) و همچنین تعداد تکرارهای الگوریتم برای رسیدن به پاسخ بهینه برای شبکه تست ۲۴ باسه IEEE در جدول ۵ آورده شده است. نتایج خاموش و روشن بودن واحدهای شبکه در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز در نمودار شکل ۴ آورده شده است. واحدهای ۸ و ۹ و ۱۰ از نوع همیشه در مدار بوده و این موضوع در پاسخ مسئله مشخص می‌باشد. همچنین محدودیت حداقل زمان روشن و خاموش بودن ژنراتورها لحاظ شده است.



شکل ۳: سناریوهای تحقق بار ساعتی

جدول ۲: حدود توان خروجی ژنراتورها و ظرفیت هر واحد آن (مگاوات)

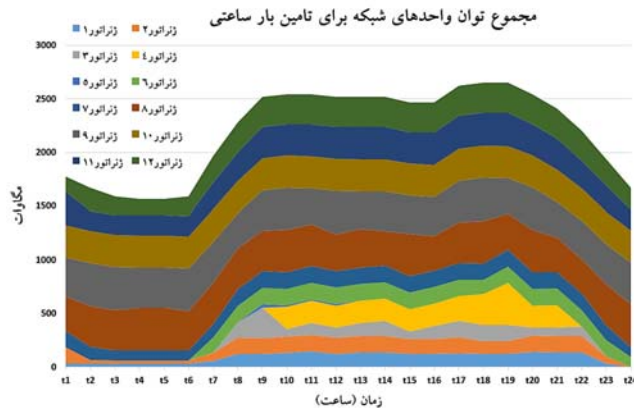
ژنراتور	واحد ۴	واحد ۳	واحد ۲	واحد ۱	حداکثر P	حداقل P
۱	۳۰,۴	۴۵,۶	۴۵,۶	۳۰,۴	۱۵۲	۳۰,۴
۲	۳۰,۴	۴۵,۶	۴۵,۶	۳۰,۴	۱۵۲	۳۰,۴
۳	۶۰	۹۰	۷۵	۷۵	۳۰۰	۷۵
۴	۱۱۸,۲	۱۱۸,۲	۱۴۷,۷۵	۲۰۶,۸۵	۵۹۱	۲۰۶,۸۵
۵	۱۲	۱۸	۱۸	۱۲	۶۰	۱۲
۶	۳۱	۳۱	۳۸,۷۵	۵۴,۲۵	۱۵۵	۵۴,۲۵
۷	۳۱	۳۱	۳۸,۷۵	۵۴,۲۵	۱۵۵	۵۴,۲۵
۸	۸۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۱۰۰
۹	۸۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۱۰۰
۱۰	۰	۰	۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۱۱	۶۲	۶۲	۷۷,۵	۱۰۸,۵	۳۱۰	۱۰۸,۵
۱۲	۷۰	۵۲,۵	۸۷,۵	۱۴۰	۳۵۰	۱۴۰

جدول ۳: قیمت هر واحد از ژنراتورها برحسب دلار بر مگاوات

ژنراتور	واحد ۴	واحد ۳	واحد ۲	واحد ۱
۱	۱۵,۹۷	۱۳,۸۹	۱۱,۹۶	۱۱,۴۶
۲	۱۵,۹۷	۱۳,۸۹	۱۱,۹۶	۱۱,۴۶
۳	۲۲,۷۲	۲۱,۶۷	۲۰,۰۳	۱۸,۶
۴	۲۲,۱۳	۲۱,۲۲	۲۰,۳۲	۱۹,۲
۵	۳۰,۴	۲۶,۸۴	۲۳,۷۸	۲۳,۴۱
۶	۱۱,۲۶	۱۰,۶۸	۱۰,۲۵	۹,۹۲
۷	۱۱,۲۶	۱۰,۶۸	۱۰,۲۵	۹,۹۲
۸	۵,۶۶	۵,۵۳	۵,۳۸	۵,۳۱
۹	۵,۶۶	۵,۵۳	۵,۳۸	۵,۳۱
۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۱۱,۲۶	۱۰,۶۸	۱۰,۲۵	۹,۹۲
۱۲	۱۱,۷۲	۱۱,۰۹	۱۰,۶۶	۱۰,۰۸

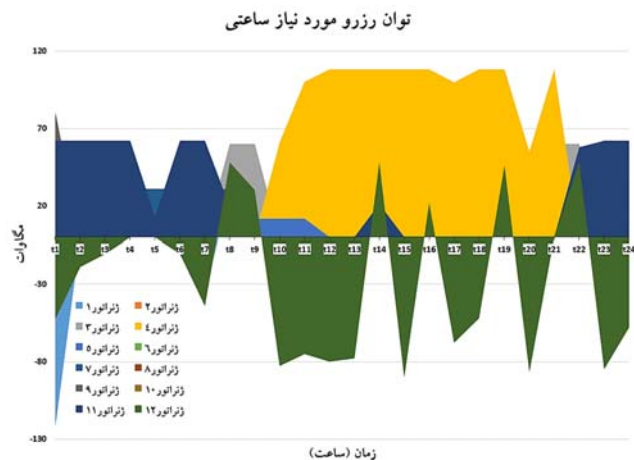
جدول ۵: مقدار تابع هزینه

تکرار الگوریتم	تابع هدف مسئله بهینه‌سازی تصادفی (دلار)	مقدار
۵	۴۵۹۵۶۰,۶۹۹	



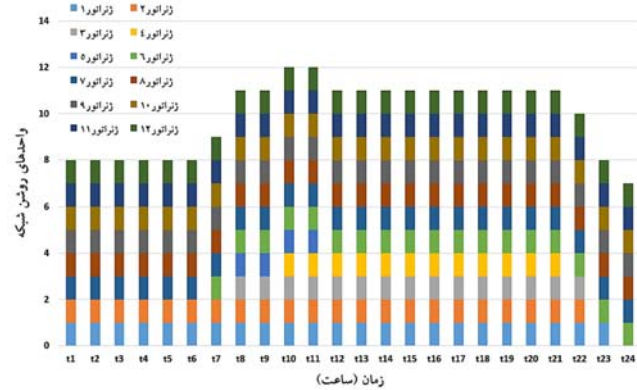
شکل ۶: مجموع توان‌های تولیدی ژنراتورها برای هر ساعت

در فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی تصادفی متغیر رزرو واحدها تعدیل‌کننده نااطمینانی بار می‌باشد؛ بنابراین بخش اصلی توان در بازار روز قبل خریداری شده و بقیه توان به‌صورت آنلاین از محل رزرو پیش‌بینی شده در الگوریتم پیشنهادی تأمین می‌گردد. مقادیر به‌دست‌آمده پیش‌بینی رزرو برای واحدهای شبکه در نمودار شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین ساعات ۹ تا ۲۱ که میزان نااطمینانی بار مدل شده بیشتر است مقادیر رزرو پیش‌بینی شده بیشتر بوده و همچنین در بین ساعات ۲ تا ۹ و ۲۱ تا ۲۴ که میزان نااطمینانی مدل شده کمتر است میزان رزرو تخصیص داده شده نیز کمتر می‌باشد. میزان رزرو تخصیص داده شده برای هر ساعت برابر بیشینه رزرو در بین ۱۰ مقدار رزرو تعیین شده به ازای سناریوهای مختلف وقوع بار است که در واقع سناریو وقوع بدترین حالت^۲ برای تأمین حداکثری و جلوگیری از حذف بار ناخواسته می‌باشد.



شکل ۷: رزرو مورد نیاز برای جبران نااطمینانی بار

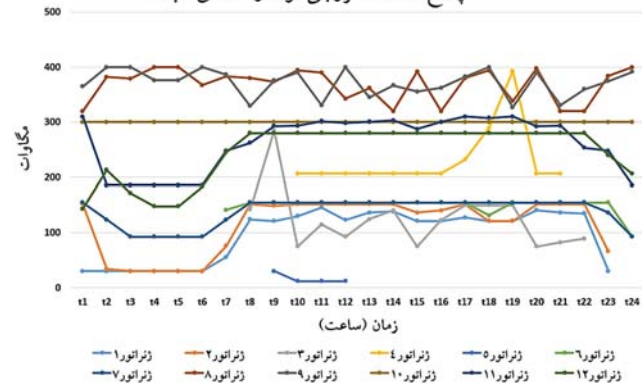
واحدهای روشن مدار برای تأمین بار ساعتی



شکل ۴: واحدهای تأمین‌کننده بار ساعتی (پاسخ UC)

مقادیر توان تولیدی خریداری شده از ژنراتورها (پاسخ مسئله در مدار آوردن واحدها) برای بهره‌برداری بهینه در بازار روز قبل^۱ در شکل ۵ مشاهده می‌شود. محدودیت نرخ شیب واحدها مطابق منبع [۱۸] لحاظ گردیده است. نمودار شکل ۶ مجموع توان ساعتی ژنراتورهای شبکه برای تأمین بار است و همان‌طور که مشاهده می‌گردد با بار پیش‌بینی شده ساعتی مطابقت دارد.

پاسخ مسئله: خروجی توان واحدهای شبکه



شکل ۵: توان خروجی واحدهای شبکه در ۲۴ ساعت

- [11] A. J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, and R. Garcia-Bertrand, "Decomposition techniques in mathematical programming: engineering and science applications," *Springer Science & Business Media*, 2006.
- [12] B. Hu, L. Wu, and M. Marwali, "On the robust solution to SCUC with load and wind uncertainty correlations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 2952-2964, 2014.
- [13] B. Hu and L. Wu, "Robust SCUC with load and wind uncertain intervals," in *2014 IEEE PES General Meeting/ Conference & Exposition*, 2014, pp. 1-5.
- [14] H. Wu, M. Shahidehpour, Z. Li, and W. Tian, "Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 1583-1591, 2014.
- [15] Q. Wang, Y. Guan, and J. Wang, "A chance-constrained two-stage stochastic program for unit commitment with uncertain wind power output," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 206-215, 2012.
- [16] M. R. Ansari, N. Amjadi, and B. Vatan, "Stochastic security-constrained hydrothermal unit commitment considering uncertainty of load forecast, inflows to reservoirs and unavailability of units by a new hybrid decomposition strategy," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 1900-1915, 2014.
- [17] L. Wu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Comparison of scenario-based and interval optimization approaches to stochastic SCUC," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 913-921, 2012.
- [18] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, "Decision making under uncertainty in electricity markets," vol. 1: *Springer*, 2010.
- [19] R. T. Force, "The IEEE reliability test system-1996," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 14, pp. 1010-1020, 1999.

بنابراین روش تجزیه ارائه شده برای مسئله بهینه‌سازی تصادفی با قرار دادن میزان تولید ساعتی ژنراتورها در بهترین نقطه (عمل پیشگیرانه) و در نظر گرفتن رزرو ساعتی کافی (اعمال اصلاحی) برای کنترل نااطمینانی بار، خطر حذف بار و هزینه بهره‌برداری سیستم را در بازار روز قبل به حداقل می‌رساند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی برای حل مسئله در مدار قرار دادن واحدهای تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی شبکه و باوجود عدم قطعیت در بار پیش‌بینی شده ارائه گردید. پاسخ نهایی با الگوریتم بندرز از تکرار بین حل مسئله اصلی و زیرمسئله بررسی قیود امنیتی در سناریوهای مختلف به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه تست ۲۴ باسه IEEE نشان داد با این روش ژنراتورهای شبکه با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف وقوع بار قادر خواهند بود با پیش‌بینی مناسب مقدار رزرو، بار ساعتی را باوجود عدم قطعیت در پیش‌بینی با در نظر گرفتن سناریو بدترین حالت به‌طور مؤثر تأمین نمایند. الگوریتم پیشنهادی همچنین قادر خواهد بود با در نظر گرفتن عدم قطعیت از واحدهای غیرقابل پیش‌بینی نظیر منابع بادی و خورشیدی با تخصیص رزرو مناسب به‌طور مؤثر بهره‌برداری نماید.

منابع

- [1] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with AC constraints," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1001-1013, 2005.
- [2] B. Hu and L. Wu, "Robust SCUC considering continuous/discrete uncertainties and quick-start units: A two-stage robust optimization with mixed-integer recourse," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 1407-1419, 2016.
- [3] E. M. Constantinescu, V. M. Zavala, M. Rocklin, S. Lee, and M. Anitescu, "A computational framework for uncertainty quantification and stochastic optimization in unit commitment with wind power generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 431-441, 2011.
- [4] R. Jiang, J. Wang, and Y. Guan, "Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 800-810, 2012.
- [5] J. Wang, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 1319-1327, 2008.
- [6] H. Daneshi and A. K. Srivastava, "Security-constrained unit commitment with wind generation and compressed air energy storage," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 6, pp. 167-175, 2012.
- [7] H. Wu and M. Shahidehpour, "Stochastic SCUC solution with variable wind energy using constrained ordinal optimization," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 379-388, 2014.
- [8] N. P. Padhy, "Unit commitment-a bibliographical survey," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1196-1205, 2004.
- [9] L. Wu and M. Shahidehpour, "Accelerating the Benders decomposition for network-constrained unit commitment problems," *Energy Systems*, vol. 1, pp. 339-376, 2010.
- [10] M. Shahidehpour and Y. Fu, "Benders decomposition in restructured power systems," *IEEE Techtorial*, Apr, 2005.