

## هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله‌ی برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار

جمشید آقایی<sup>۱\*</sup>، امین رحیمی رضایی<sup>۲</sup> و محمدرضا کریمی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸	مسئله‌ی برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها، یکی از وظایف حساس در عملیات سیستم قدرت می‌باشد که با افزایش چشمگیر تولید انرژی الکتریکی از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و برنامه‌های بارهای پاسخگو، با مشکلاتی همچون عدم قطعیت‌های تولید و بار روبرو می‌باشد. در این مقاله برای مقابله با این مشکل، برای مسئله‌ی برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها یک مدل بهینه‌سازی استوار دومرحله‌ای با عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه‌های بادی ارائه شده است. علاوه بر اینکه از مدل استوار برای حل مشکل عدم قطعیت توان تولیدی باد استفاده شده، دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز برای مدیریت بیشتر این مسئله در نظر گرفته شده است. در مقایسه با برنامه‌ریزی تصادفی متداول، مدل بهینه‌سازی استوار عملی‌تر می‌باشد زیرا تنها نیاز به یک بازه برای پارامتر دارای عدم قطعیت دارد درحالی‌که در برنامه‌ریزی تصادفی به دست آوردن تابع توزیع احتمال پارامتر دارای عدم قطعیت بسیار مشکل است. برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار که بسیار پیچیده و دشوار می‌باشد، از تجزیه بندر استفاده شده است که مسئله را به مسئله‌های کوچک‌تر تبدیل کرده که این امر باعث کاسته شدن پیچیدگی مسئله می‌شود، در نتیجه حل آن را ساده‌تر می‌کند.
<b>واژگان کلیدی:</b> برنامه‌ریزی امنیت-مقید، مشارکت واحدها، بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت، دستگاه‌های ذخیره‌ساز، سیستم قدرت، نیروگاه بادی، تجزیه بندر.	

### ۱-مقدمه

سریع و یا قطع بار برای حفظ امنیت سیستم انجام می‌دهند. برای مقابله با گرم شدن کره زمین و مسائل زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، صنعت تمرکز خود را به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر تغییر داده است. گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر که در طبیعت نوسان دارند مانند انرژی خورشیدی و نیروی باد عدم اطمینان بیشتری را به سیستم معرفی می‌کند و چالش‌های جدیدی به مدیریت شبکه و برنامه‌ریزی تولید اضافه می‌کند. در چنین شرایطی، نیاز فوق‌العاده‌ای به یک فرآیند مشارکت واحد است که عدم قطعیت در سیستم را مدیریت کند. در عمل در حال حاضر صنعت تولید برق برای مقابله با عدم

امروزه بیشتر، بهره‌بردار مستقل سیستم<sup>۱</sup> (ISO) مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها<sup>۲</sup> (UC) را ۲۴ ساعت قبل از بازار زمان واقعی<sup>۳</sup>، اجرا می‌کنند. هدف از اجرای مسئله UC، تعیین واحدهای روشن و پخش بار اقتصادی برای تامین بار در حداقل هزینه است. به خاطر عدم قطعیت‌های مرتبط با خطای پیش‌بینی بار، خروج غیرمنتظره ژنراتورها و قطع خطوط انتقال در طول عملیات زمان واقعی، بهره‌بردارها مجبور به انحراف از تصمیم‌گیری‌های تعیین‌شده توسط برنامه‌های UC شده و اقدامات اصلاحی هزینه‌بر مانند به مدار آوردن ژنراتورهای

<sup>1</sup> Independent System Operators

<sup>2</sup> Unit Commitment

<sup>3</sup> Real Time Market

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aghaei@sutech.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

یکی دیگر از ویژگی‌های بسیار مطلوب بهینه‌سازی استوار این است که می‌تواند مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را تولید کند که در برابر تحقق هر حالت از متغیر دارای عدم قطعیت استوار باشد. این به این معنی است که می‌تواند بدترین حالت سناریوها را پیش‌بینی کرده و اقدامات پیشگیرانه در برابر چنین سناریوهایی را به کار گیرد. چنین ویژگی در مسائل UC بسیار مهم است زیرا هرگونه راه‌حل نشدنی که ممکن است به یک خاموشی منجر گردد، در جامعه کنونی ما غیرقابل قبول است.

دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی<sup>۴</sup> به صورت بالقوه می‌توانند راه حل مناسبی برای یکپارچه سازی انرژی باد به عنوان جایگزینی برای ژنراتور معمولی فراهم کنند. این امر به دلیل مزایای فنی و اجتماعی مربوط به ذخیره‌سازهای سیستم قدرت در مقایسه با واحد‌های متعارف پاسخ سریع می‌باشد. دستگاه‌های ذخیره‌ساز باعث افزایش بازده استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌گردند. مزایای اجتماعی مربوط به ذخیره‌سازی شامل کاهش گازهای گلخانه‌ای، یکپارچه سازی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش بهره‌وری خطوط انتقال می‌باشد [۸]. در این خصوص در مرجع [۹]، از واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای آبی برای کنترل عدم قطعیت واحدهای بادی مبتنی بر بهینه‌سازی استوار در مساله برنا-مهریزی مشارکت واحدها استفاده شده است.

در این مقاله از یک دستگاه ذخیره‌ساز انرژی عمومی استفاده می‌شود که به هر دستگاه با قابلیت ذخیره و انتقال انرژی اطلاق می‌شود. از طرفی برای یک دستگاه ذخیره‌ساز ایده آل چند فرض ساده‌کننده در عملکرد فنی و اقتصادی آن در نظر گرفته شده است [۱۰].

در مقایسه با مرجع [۹]، در این مقاله مسئله‌ی برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها<sup>۵</sup> در حضور نیروگاه‌های بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت با عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه بادی، با استفاده از بهینه‌سازی استوار حل شده است. میزان بار شبکه و توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به عنوان عدم قطعیت‌های این مسئله در نظر گرفته شده‌اند. هدف روش پیشنهادی ما ارائه‌ی یک برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای استوار برای بازار روز-پیش می‌باشد که هزینه کل را تحت وقوع بدترین حالات عدم قطعیت در زمان واقعی به

قطعیت از محدودیت‌های ذخیره<sup>۱</sup> برای مسئله UC استفاده می‌کند [۱]. تحقیقات بر روی تحلیل اثرات سطوح مختلف ذخیره متمرکز شده‌اند [۲ و ۳]. این روش مزایای کمی دارد. الزامات مورد نیاز برای ذخیره معمولاً بسیار محافظه‌کارانه بوده که آن را از لحاظ اقتصادی ناکارآمد می‌کند. بعلاوه استانداردهای تعیین سطوح ذخیره بر پایه تقاضای مورد انتظار تعیین می‌شوند. این به این معنی است که حل به‌دست‌آمده برای مسئله UC با محدودیت‌های ذخیره ممکن است هنوز نتواند به تقاضا در زمان واقعی با توجه به انحراف مهمی از تقاضای پیش‌بینی شده پاسخ دهد. یکی دیگر از روش‌های بسیار محبوب برای مقابله با عدم قطعیت در سیستم قدرت برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۲</sup> است. در [۴ و ۵] نویسندگان مزایای ترکیب چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی با محدودیت ذخیره را جستجو کرده‌اند. برنامه‌ریزی تصادفی ثابت شده است که قادر به بهبود راه‌حل در مقایسه با راه‌حل با مقدار مورد انتظار [۶] می‌باشد اگرچه در این چارچوب چند عیب وجود دارد. در یک برنامه‌ریزی تصادفی معمولی، تأکید زیادی بر تولید سناریو می‌شود. سناریوهای متعددی برای تقریب تابع توزیع احتمال واقعی تولید می‌شوند. بعلاوه برای افزایش قابلیت اطمینان روش برنامه‌ریزی تصادفی، باید تعداد زیادی سناریو تولید شوند که برای حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای مقیاس بزرگ آن را با چالش محاسباتی همراه می‌کند. اگرچه روش‌های کاهش سناریو می‌تواند به کاهش حجم مسئله کمک کند اما عملکرد نتایج به‌دست‌آمده را دیگر نمی‌توان تضمین کرد.

به‌عنوان یک روش مدل‌سازی جایگزین در برخورد با پارامترهای دارای عدم قطعیت در بهینه‌سازی، بهینه‌سازی استوار<sup>۳</sup> در طول سال‌ها در حال کسب محبوبیت بیشتر است. این چارچوب از مجموعه پارامتری استفاده می‌کند تا عدم قطعیت را توصیف کند [۷]. چنین مجموعه‌های عدم قطعیت را می‌توان به‌سادگی با استفاده از اطلاعاتی مانند میانگین و واریانس متغیر تصادفی به دست آورد که بسیار ساده‌تر از به دست آوردن تابع توزیع احتمال می‌باشد. با تغییر مجموعه عدم قطعیت، بهینه‌سازی استوار می‌تواند مصالحه‌ای میان محافظه‌کاری و استواری مسئله ایجاد کند.

<sup>4</sup> Energy Storage Device

<sup>5</sup> Security Constraint Unit Commitment

<sup>1</sup> reserve

<sup>2</sup> Stochastic Programming

<sup>3</sup> Robust Optimization

$$Y_{rT} = Y_r^{\text{Last}} \quad (۹)$$

$$Y_r^{\min} \leq Y_r \leq Y_r^{\max} \quad (۱۰)$$

قیود روابط منطقی میان روشن و خاموش بودن واحدها با روشن و خاموش شدن آنها

$$x_i^{t-1} - x_i^t + u_i^t \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in N_g \quad (۱۱)$$

$$x_i^t - x_i^{t-1} + v_i^t \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in N_g \quad (۱۲)$$

قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها

$$\forall T \in [t+1, \min\{t + \text{MinUp}_i - 1, T\}] \quad t \in [2, T]$$

$$x_i^t - x_i^{t-1} \leq x_i^T \quad (۱۳)$$

$$x_i^{t-1} - x_i^t \leq 1 - x_i^T \quad (۱۴)$$

$$\forall T \in [t+1, \min\{t + \text{MinDw}_i - 1, T\}] \quad t \in [2, T]$$

قید شیب افزایش و کاهش توان تولیدی واحدها

$$-RD_i^t \leq p_i^t - p_i^{t-1} \leq RU_i^t \quad (۱۵)$$

قیود ظرفیت خطوط انتقال

$$-PL_l^{\max} \leq \sum_{n=1}^N SF_{l,n} \left( \begin{array}{c} \sum_{i \in U(n)} p_i^t + \sum_{w \in W(n)} \bar{p}_w^t + \\ \sum_{r \in R(n)} (S_n^p - S_n^s) - \sum_{j \in J(n)} \bar{d}_j^t \end{array} \right) \leq PL_l^{\max} \quad (۱۶)$$

۲-۲- فرمول بندی استوار مسئله SCUC

مقادیر پیش‌بینی شده برای بار مورد تقاضا و توان

تولیدی نیروگاه بادی برای مدل قطعی مسئله

SCUC می‌تواند نادرست باشد. در این مقاله

بازه های عدم قطعیت  $[\bar{d}_j^t - \hat{d}_j^t, \bar{d}_j^t + \hat{d}_j^t]$  و

برای نشان دادن تغییرات  $[\bar{P}_w^t - \hat{P}_w^t, \bar{P}_w^t + \hat{P}_w^t]$

آنها در هر ساعت استفاده شده است.  $P_w^t$  و  $d_j^t$

مجموعه‌ی بارها و توان تولیدی نیروگاهی که

امکان تحقق دارد را نشان می‌دهد و ممکن است

هر مقداری در بازه عدم قطعیت خود بگیرند.

$$d_j^t \in [\bar{d}_j^t - \hat{d}_j^t, \bar{d}_j^t + \hat{d}_j^t]$$

حداقل می‌رساند. البته پارامتری به نام بودجه عدم قطعیت نیز تعریف شده است تا مصالحه‌ای میان استواری و بهینگی مسئله ایجاد کند.

در ادامه مقاله، مدل استوار مسئله برنامه ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها در حضور نیروگاه‌های بادی و ذخیره‌سازهای سیستم قدرت و روش حل آن به ترتیب در بخش‌های دوم و سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج عددی موارد مطالعاتی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پنجم نتایج به‌دست‌آمده مورد ارزیابی واقع می‌شود.

## ۲- مدل مسئله

### ۲-۱- مدل قطعی

مدل قطعی مسئله SCUC به‌صورت گسترده در [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف که هزینه‌ی کل بهره‌برداری را حداقل می‌کند شامل هزینه تولید انرژی، هزینه روشن و خاموش شدن، هزینه شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز سیستم قدرت می‌باشد.

$$\min_{u,v,p,S^s,S^p} \left[ \sum_{t=1}^T \left( \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t + C_i^t \times p_i^t) + \sum_r (C_r^s \times S_n^s + C_r^p \times S_n^p) \right) \right] \quad (۱)$$

قیدهای مسئله SCUC شامل تعادل بار سیستم

$$\sum_i (p_i^t) + \sum_r (S_n^p - S_n^s) + \sum_w (\bar{p}_w^t) = \sum_j (\bar{d}_j^t) \quad (۲)$$

قیود حداقل و حداکثر توان تولیدی هر واحد

$$p_i^{\min} x_i^t \leq p_i^t \leq p_i^{\max} x_i^t \quad (۳)$$

قیود ظرفیت نیروگاه بادی

$$p_w^{\min} \leq \bar{p}_w^t \leq p_w^{\max} \quad (۴)$$

قیود حداقل و حداکثر توان شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز

$$S_{r \min}^s \leq S_n^s \leq S_{r \max}^s \quad (۵)$$

$$S_{r \min}^p \leq S_n^p \leq S_{r \max}^p \quad (۶)$$

قیود ظرفیت دستگاه ذخیره‌ساز در هر ساعت

$$Y_{r,t} = Y_{r,t-1} + \eta_s S_n^s - \frac{1}{\eta_p} S_n^p \quad (۷)$$

$$Y_{r0} = Y_r^{\text{Begin}} \quad (۸)$$

روابط (۲) الی (۱۸) (۲۰)

در رابطه (۱۵) به علت وجود Max-Min از قضیه دوگان<sup>۱</sup> استفاده می‌شود تا با تبدیل Min به Max مسئله به Max-Max تبدیل شود. سپس  $\max_{d, p_w} \max_{\lambda, \pi, \phi, \delta, \mu, \Omega, \psi, \sigma}$  به تبدیل می‌گردد.

بنابراین مدل استوار مسئله SCUC در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت به شکل زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \min_{x, u, v} & \left\{ \sum_{t=1}^T \left[ \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t) \right] \right. \\ & + \max_{\lambda, \pi, \phi, \delta, \mu, \Omega, \psi, \sigma, d, p_w} \lambda_i \times \sum_j d_j^t \\ & + \sum_{i=1}^{N_g} (\pi_{1, it} \times p_i^{\min} \times x_i^t - \pi_{2, it} \times p_i^{\max} \times x_i^t) \\ & + \sum_l \left[ (\phi_{1, lt} - \phi_{2, lt}) \times \sum_n SF_{ln} \times \left( \sum_{j \in J(n)} d_j^t - \sum_{w \in W(n)} p_w^t \right) \right. \\ & \left. - \sum_l (\phi_{1, lt} + \phi_{2, lt}) \times PL_l^{\max} \right] \\ & - \sum_{t=2}^T \left[ \sum_i (RD_i^t \times \delta_{1, it} + RU_i^t \times \delta_{2, it}) \right] \\ & + \sum_{t=1}^T \left[ \sum_r \mu_{1, rt} \times S_{r \min}^p - \sum_r \mu_{2, rt} \times S_{r \max}^p \right. \\ & + \sum_r \Omega_{1, rt} \times S_{r \min}^s - \sum_r \Omega_{2, rt} \times S_{r \max}^s \\ & \left. + \sum_r \sigma_{1, rt} y_r^{\min} - \sum_r \sigma_{2, rt} y_r^{\max} \right] \\ & \left. + \sum_r (\psi_{rT} \times Y_r^{\text{Last}} - \psi_{r0} \times Y_r^{\text{Begin}}) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

به شرطی که:

$$\forall i \in N_g, \quad t=1 \quad \left( \lambda_i + \pi_{1, it} - \pi_{2, it} + \delta_{1, i(t+1)} + \delta_{2, i(t+1)} \right) \leq C_i \quad (22)$$

$$\left( + \sum_l (\phi_{1, lt} - \phi_{2, lt}) SF_{ln} \right)$$

$$\forall i \in N_g, \quad t > 1, t < T \quad \left( \lambda_i + \pi_{1, it} - \pi_{2, it} + \sum_l (\phi_{1, lt} - \phi_{2, lt}) SF_{ln} \right) \leq C_i \quad (23)$$

$$\left( + \delta_{1, it} - \delta_{1, i(t+1)} - \delta_{2, it} + \delta_{2, i(t+1)} \right)$$

$$p_w^t \in [\bar{P}_w^t - \hat{P}_w^t, \bar{P}_w^t + \hat{P}_w^t]$$

یک مجموعه از محدودیت‌ها در این مقاله برای کنترل محافظه‌کاری مدل بهینه‌سازی استوار معرفی شده است.

$$\mathcal{D}^t(\bar{d}^t, \hat{d}^t, \Delta^t) = \left\{ \sum_{j \in N_d} \frac{d_j^t - \bar{d}_j^t}{\hat{d}_j^t} \leq \Delta_1^t \right. \\ \left. d_j^t \in [\bar{d}_j^t - \hat{d}_j^t, \bar{d}_j^t + \hat{d}_j^t] \right\} \quad (17)$$

$$\mathcal{W}^t(\bar{P}^t, \hat{P}^t, \Delta^t) = \left\{ \sum_{w \in N_w} \frac{P_w^t - \bar{P}_w^t}{\hat{P}_w^t} \leq \Delta_2^t \right. \\ \left. P_w^t \in [\bar{P}_w^t - \hat{P}_w^t, \bar{P}_w^t + \hat{P}_w^t] \right\} \quad (18)$$

پارامترهای  $\Delta_1^t$  و  $\Delta_2^t$ ، به ترتیب بوده عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه بادی نامیده می‌شوند و مقداری بین صفر تا  $N_d$  (تعداد بارهای دارای عدم قطعیت) و  $N_w$  (تعداد واحدهای بادی دارای عدم قطعیت) به خود می‌گیرند. زمانی که  $\Delta_1^t = 0$  و  $\Delta_2^t = 0$  است متغیر بار دارای عدم قطعیت و توان تولیدی نیروگاه بادی همان مقدار قطعی را به خود می‌گیرند ( $\mathcal{D}^t = \{\bar{d}_j^t\}$  و  $\mathcal{W}^t = \{\bar{P}_w^t\}$ ). در واقع هرچه مقدار  $\Delta_1^t$  و  $\Delta_2^t$ ، افزایش می‌یابد، اندازه مجموعه عدم قطعیت‌های  $\mathcal{D}^t$  و  $\mathcal{W}^t$  بزرگ‌تر می‌شود و این به این معنی است که انحرافات بیشتری برای بار و توان تولیدی نیروگاه بادی از مقدار قطعی آن‌ها در نظر گرفته شده است که این امر باعث می‌شود نتایج بهینه‌سازی استوار بسیار محافظه‌کارانه باشد و سیستم در برابر درجه بالایی از عدم قطعیت حفاظت شود. زمانی که  $\Delta_1^t = N_d$  و  $\Delta_2^t = N_w$  آنگاه  $d_j^t$  و  $P_w^t$  بیشترین انحراف را از مقدار قطعی خود می‌گیرد. اکنون مسئله استوار دو مرحله‌ای SCUC در حضور نیروگاه بادی و دستگاه ذخیره‌ساز سیستم قدرت با عدم قطعیت‌های بار و توان تولیدی نیروگاه بادی را به صورت زیر فرموله می‌کنیم [۱۲].

$$\min_{x, u, v} \left\{ \sum_{t=1}^T \left( \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t) \right) \right. \\ \left. + \max_{d, p_w} \min_{p, S^s, S^p} \left[ \sum_i C_i^t \times p_i^t + \sum_r \left( C_r^t \times S_{rt}^s + C_r^t \times S_{rt}^p \right) \right] \right\} \quad (19)$$

به شرطی که:

<sup>1</sup> Duality

ذخیره‌ساز سیستم قدرت را به مسئله اصلی و بخش پخش بار اقتصادی آن را به زیر مسئله تبدیل می‌کنیم [۱۳].

### ۳-۱- مسئله اصلی

$$\text{Min } z_{\text{lower}} \quad (33)$$

به شرطی که:

$$z_{\text{lower}} \geq \sum_{t=1}^T \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t) \quad (34)$$

$$\text{روابط (۱۱) الی (۱۴)} \quad (35)$$

### ۳-۲- زیر مسئله

$$\begin{aligned} \max_{\lambda, \pi, \phi, \delta, \mu, \Omega, \psi, \sigma, d, p_w} & \left\{ \sum_{t=1}^T \left[ \lambda_t \times \sum_j d_j^t \right. \right. \\ & + \sum_{i=1}^{N_g} (\pi_{1,it} \times p_i^{\min} \times x_i^t - \pi_{2,it} \times p_i^{\max} \times x_i^t) \\ & + \sum_t \left[ (\phi_{1,it} - \phi_{2,it}) \times \sum_n SF_{in} \times \left( \sum_{j \in J(n)} d_j^t - \sum_{w \in W(n)} p_w^t \right) \right. \\ & \left. \left. - \sum_t (\phi_{1,it} + \phi_{2,it}) \times PL_t^{\max} \right] \right. \\ & \left. - \sum_{t=2}^T \left[ \sum_t (RD_t^t \times \delta_{1,it} + RU_t^t \times \delta_{2,it}) \right] \right. \\ & + \sum_{t=1}^T \left[ \sum_r \mu_{1,r} \times S_r^{\min} - \sum_r \mu_{2,r} \times S_r^{\max} \right. \\ & + \sum_r \Omega_{1,r} \times S_r^{\min} - \sum_r \Omega_{2,r} \times S_r^{\max} \\ & \left. + \sum_r \sigma_{1,r} y_r^{\min} - \sum_r \sigma_{2,r} y_r^{\max} \right] \\ & \left. + \sum_r (\psi_{rT} \times Y_r^{\text{Last}} - \psi_{r0} \times Y_r^{\text{Begin}}) \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

به شرطی که:

$$\text{روابط (۲۲) الی (۳۱)} \quad (37)$$

### ۳-۳- گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم تجزیه بندرز

**گام اول:** با حل مسئله اصلی، متغیر وضعیت واحدها  $x_i^t$  را به دست می‌آوریم.

**گام دوم:** با مقدار  $x_i^t$  به دست آمده، زیرمسئله را حل می‌کنیم.

**گام سوم:** اگر زیر مسئله شدنی<sup>۴</sup> و محدود<sup>۵</sup> بود، قید برش شدنی<sup>۶</sup> زیر را به مسئله اصلی اضافه می‌کنیم.

$$\forall i \in N_g, \quad t = T$$

$$\left( \lambda_t + \pi_{1,it} - \pi_{2,it} + \delta_{1,it} - \delta_{2,it} \right) + \sum_t (\phi_{1,it} - \phi_{2,it}) SF_{in} \leq C_i \quad (24)$$

$$\forall r \in N_r, \quad t \in T$$

$$\left( \lambda_t + \sum_t (\phi_{1,it} - \phi_{2,it}) SF_{in} \right) + \mu_{1,r} - \mu_{2,r} - \frac{1}{\eta_p} \times \psi_{rT} \leq C_r^p \quad (25)$$

$$\forall r \in N_r, \quad t \in T$$

$$\left( -\lambda_t - \sum_t (\phi_{1,it} - \phi_{2,it}) SF_{in} \right) + \Omega_{1,r} - \Omega_{2,r} + \eta_s \times \psi_{rT} \leq C_r^s \quad (26)$$

$$\forall r \in N_r, \quad t > 1, t < T$$

$$-\psi_{rT} + \psi_{r(t+1)} + \sigma_{1,r} - \sigma_{2,r} \leq 0 \quad (27)$$

$$-\psi_{rT} + \sigma_{1,r} - \sigma_{2,r} \leq 0 \quad \forall r \in N_r, \quad t = T \quad (28)$$

$$\pi_{1,it}, \pi_{2,it}, \phi_{1,it}, \phi_{2,it}, \delta_{1,it}, \delta_{2,it}, \Omega_{1,r}, \Omega_{2,r}, \mu_{1,r}, \mu_{2,r}, \sigma_{1,r}, \sigma_{2,r} \geq 0 \quad \lambda_t, \psi_{rT} \text{ free} \quad (29)$$

$$\left( \sum_{j \in N_d} \frac{d_j^t - \bar{d}_j^t}{\hat{d}_j^t} \leq \Delta_1^t \right) \quad \left( d_j^t \in [\bar{d}_j^t - \hat{d}_j^t, \bar{d}_j^t + \hat{d}_j^t] \right) \quad (30)$$

$$\left( \sum_{j \in N_j} \frac{p_w^t - \bar{p}_w^t}{\hat{p}_w^t} \leq \Delta_2^t \right) \quad \left( p_w^t \in [\bar{p}_w^t - \hat{p}_w^t, \bar{p}_w^t + \hat{p}_w^t] \right) \quad (31)$$

$$\text{روابط (۱۱) الی (۱۴)} \quad (32)$$

### ۳- روش حل مسئله

برای حل مسئله بالا از الگوریتم تجزیه بندرز<sup>۱</sup> استفاده می‌کنیم. از آنجاییکه الگوریتم تجزیه بندرز هر مسئله را به دو بخش مسئله اصلی<sup>۲</sup> و زیر مسئله<sup>۳</sup> تبدیل می‌کند، بخش بودن یا نبودن واحدهای مسئله مدل استوار برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها در حضور نیروگاه بادی و

<sup>4</sup> Feasible

<sup>5</sup> Bounded

<sup>6</sup> Feasibility Cut

<sup>1</sup> Benders Decomposition

<sup>2</sup> Master Problem

<sup>3</sup> Sub Problem

متغیرهای  $(\tilde{\mu}_{2,n}, \tilde{\mu}_{1,n}, \tilde{\delta}_{2,it}, \tilde{\delta}_{1,it}, \tilde{\phi}_{2,it}, \tilde{\phi}_{1,it}, \tilde{\pi}_{2,it}, \tilde{\pi}_{1,it}, \tilde{\lambda}_i)$  از حل زیر مسئله اصلاح شده<sup>۳</sup> به دست آمده‌اند.

**گام پنجم:** شرط همگرایی زیر بررسی می‌شود.

$$U^{BD} - L^{BD} \leq \varepsilon \quad (40)$$

در رابطه (۴۰)

$$L^{BD} = Z_{lower} \quad (41)$$

$$U^{BD} = \sum_{i=1}^T \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t) + \text{مقدار تابع هدف زیر مسئله} \quad (42)$$

اگر همگرا بود مسئله خاتمه می‌یابد و اگر در این تکرار همگرا نبود دوباره تکرار بعدی با حل مسئله اصلی جدید ایجاد شده آغاز می‌گردد تا همگرا گردد [۱۳].

#### ۴- نتایج عددی

در این بخش مدل استوار مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت به دست آمده در بخش قبل روی دو شبکه آزمایشی اعمال خواهد شد که عبارت‌اند از: شبکه آزمایشی ۶ باسه و شبکه انتقال ۲۴ باسه IEEE. سپس توانمندی‌های مدل ارائه شده، مورد بررسی واقع می‌شود.

##### ۴-۱- شبکه آزمایشی ۶ باسه

برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت را برای یک دوره ۲۴ ساعته بر روی شبکه ۶ باسه که مشخصات آن در پیوست الف و نمودار تک‌خطی آن در شکل (۱) نشان داده شده است، اجرا می‌کنیم. این شبکه دارای ۳ ژنراتور و ۷ خط و ۶ باس می‌باشد که یک شبکه کوچک برای درک بهتر مفاهیم می‌باشد. نمودار تک‌خطی این شبکه در شکل (۱) آورده شده است. بارهای موجود در باس های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۴۰ درصد از کل بار شبکه را دارا می‌باشند؛ که بار کل ۲۱۶ مگاوات می‌باشد. بار در هر ساعت از حاصل ضرب بار کل در درصد بار که در جدول ۱ آمده است به دست می‌آید.

<sup>3</sup> Modify Sub Problem

متغیرهای  $(\tilde{\mu}_{2,n}, \tilde{\mu}_{1,n}, \tilde{\delta}_{2,it}, \tilde{\delta}_{1,it}, \tilde{\phi}_{2,it}, \tilde{\phi}_{1,it}, \tilde{\pi}_{2,it}, \tilde{\pi}_{1,it}, \tilde{\lambda}_i)$  از حل زیر مسئله به دست آمده‌اند.

$$\begin{aligned} Z_{lower} \geq & \sum_{i=1}^T \sum_i (u_i^t \times S_i^t + v_i^t \times G_i^t) \\ & + \sum_{i=1}^T \left[ \tilde{\lambda}_i \times \sum_j \tilde{d}_j^t \right. \\ & + \sum_{i=1}^{N_g} (\tilde{\pi}_{1,it} \times P_i^{\min} \times x_i^t - \tilde{\pi}_{2,it} \times P_i^{\max} \times x_i^t) \\ & + \sum_i \left( (\tilde{\phi}_{1,it} - \tilde{\phi}_{2,it}) \times \sum_n SF_{ln} \left( \sum_{j \in J(n)} \tilde{d}_j^t - \sum_{w \in W(n)} \tilde{p}_w^t \right) \right) \\ & \left. - \sum_i (\tilde{\phi}_{1,it} + \tilde{\phi}_{2,it}) \times PL_i^{\max} \right] \\ & - \sum_{i=2}^T \left[ \sum_i (RD_i^t \times \tilde{\delta}_{1,it} + RU_i^t \times \tilde{\delta}_{2,it}) \right] \\ & + \sum_{i=1}^T \left[ \sum_r \tilde{\mu}_{1,n} \times S_{r \min}^p - \sum_r \tilde{\mu}_{2,n} \times S_{r \max}^p \right. \\ & + \sum_r \tilde{\Omega}_{1,n} \times S_{r \min}^s - \sum_r \tilde{\Omega}_{2,n} \times S_{r \max}^s \\ & \left. + \sum_r \tilde{\sigma}_{1,n} y_r^{\min} - \sum_r \tilde{\sigma}_{2,n} y_r^{\max} \right] \\ & + \sum_r (\psi_{rT} \times Y_r^{Last} - \psi_{r0} \times Y_r^{Begin}) \end{aligned} \quad (38)$$

متغیرهای  $(\tilde{\mu}_{2,n}, \tilde{\mu}_{1,n}, \tilde{\delta}_{2,it}, \tilde{\delta}_{1,it}, \tilde{\phi}_{2,it}, \tilde{\phi}_{1,it}, \tilde{\pi}_{2,it}, \tilde{\pi}_{1,it}, \tilde{\lambda}_i)$  از حل زیر مسئله به دست آمده‌اند.

**گام چهارم:** اگر زیر مسئله شدنی و نامحدود<sup>۱</sup> بود قید برش ناشدنی<sup>۲</sup> زیر را به بخش مسئله اصلی اضافه می‌کنیم.

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=1}^T \left[ \tilde{\lambda}_i \times \sum_j \tilde{d}_j^t \right. \\ & + \sum_{i=1}^{N_g} (\tilde{\pi}_{1,it} \times P_i^{\min} \times x_i^t - \tilde{\pi}_{2,it} \times P_i^{\max} \times x_i^t) \\ & + \sum_i \left( (\tilde{\phi}_{1,it} - \tilde{\phi}_{2,it}) \times \sum_n SF_{ln} \left( \sum_{j \in J(n)} \tilde{d}_j^t - \sum_{w \in W(n)} \tilde{p}_w^t \right) \right) \\ & \left. - \sum_i (\tilde{\phi}_{1,it} + \tilde{\phi}_{2,it}) \times PL_i^{\max} \right] \\ & - \sum_{i=2}^T \left[ \sum_i (RD_i^t \times \tilde{\delta}_{1,it} + RU_i^t \times \tilde{\delta}_{2,it}) \right] \\ & + \sum_{i=1}^T \left[ \sum_r \tilde{\mu}_{1,n} \times S_{r \min}^p - \sum_r \tilde{\mu}_{2,n} \times S_{r \max}^p \right. \\ & + \sum_r \tilde{\Omega}_{1,n} \times S_{r \min}^s - \sum_r \tilde{\Omega}_{2,n} \times S_{r \max}^s \\ & \left. + \sum_r \tilde{\sigma}_{1,n} y_r^{\min} - \sum_r \tilde{\sigma}_{2,n} y_r^{\max} \right] \\ & + \sum_r (\psi_{rT} \times Y_r^{Last} - \psi_{r0} \times Y_r^{Begin}) \leq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

<sup>1</sup> Unbounded

<sup>2</sup> Infeasibility Cut

به دست آمده در ادامه ارائه شده است.

جدول ۲: درصد تغییرات بار در هر ساعت شبکه ۶ باسه

ساعت	درصد تغییرات (%)	ساعت	درصد تغییرات (%)	ساعت	درصد تغییرات (%)
۱	۱۰	۹	۱۰	۱۷	۱۰
۲	۱۵	۱۰	۲۰	۱۸	۱۵
۳	۱۸	۱۱	۱۰	۱۹	۱۸
۴	۱۰	۱۲	۲۰	۲۰	۱۰
۵	۲۰	۱۳	۱۰	۲۱	۲۰
۶	۱۰	۱۴	۱۵	۲۲	۱۰
۷	۱۵	۱۵	۱۸	۲۳	۲۰
۸	۱۸	۱۶	۲۰	۲۴	۱۰

جدول ۳: درصد باد برای هر ساعت شبکه ۶ باسه

ساعت	درصد باد (%)	ساعت	درصد باد (%)	ساعت	درصد باد (%)	ساعت	درصد باد (%)
۱	۶۷	۷	۷۴	۱۳	۹۵	۱۹	۱۰۰
۲	۶۳	۸	۸۶	۱۴	۹۵	۲۰	۹۶
۳	۶۰	۹	۹۵	۱۵	۹۳	۲۱	۹۱
۴	۵۹	۱۰	۹۶	۱۶	۹۴	۲۲	۸۳
۵	۵۹	۱۱	۹۶	۱۷	۹۹	۲۳	۷۳
۶	۶۰	۱۲	۹۵	۱۸	۱۰۰	۲۴	۶۳

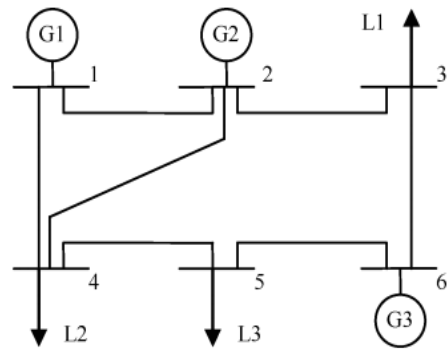
جدول ۴: اطلاعات دستگاه ذخیره ساز شبکه ۶ باسه

بازده شارژ ذخیره ساز	۰/۹
بازده دشارژ ذخیره ساز	۰/۹
حداقل توان شارژ (MW)	۰
حداکثر توان شارژ (MW)	۳۵
حداقل توان دشارژ (MW)	۰
حداکثر توان دشارژ (MW)	۳۵

#### ۴-۲- نتایج مدل استوار SCUC بدون حضور نیروگاه

##### بادی و ذخیره ساز سیستم قدرت

ابتدا مسئله برنامه ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها را بدون حضور نیروگاه بادی و ذخیره ساز با استفاده از بهینه سازی استوار برای بودجه عدم قطعیت بار برابر با  $\Delta_1^t = 1$  (حالت قطعی) و  $\Delta_1^t = 2$ ،  $\Delta_1^t = 3$  حل



شکل ۱: شبکه آزمایشی ۶ باسه استاندارد IEEE

جدول ۱: درصد بار برای هر ساعت شبکه ۶ باسه

ساعت	درصد بار (%)	ساعت	درصد بار (%)	ساعت	درصد بار (%)
۱	۵۸/۳	۹	۶۲/۲	۱۷	۸۵/۳
۲	۵۵	۱۰	۶۸/۹	۱۸	۸۲/۲
۳	۵۲/۸	۱۱	۷۶/۲	۱۹	۸۱/۹
۴	۵۱/۵	۱۲	۷۸/۲	۲۰	۷۹/۱
۵	۵۱/۶	۱۳	۸۰/۷	۲۱	۷۹/۱
۶	۵۳/۴	۱۴	۸۱/۲	۲۲	۷۷/۵
۷	۵۷/۷	۱۵	۸۲/۹	۲۳	۶۵/۳
۸	۵۹/۲	۱۶	۸۵/۲	۲۴	۶۵/۲

با توجه به عدم قطعیت موجود در بار، درصد تغییرات درج شده در جدول ۲ را برای بار این شبکه آزمایشی در نظر گرفتیم.

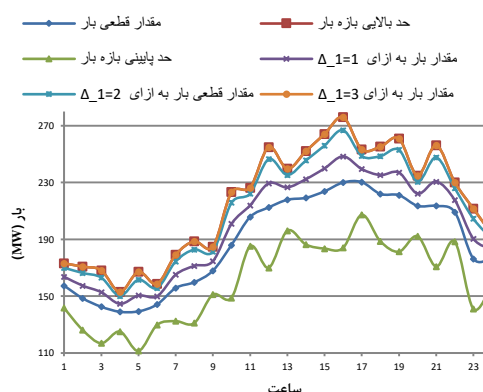
به شبکه مورد بررسی در باس ۴ یک نیروگاه بادی ۲۰ MW اضافه می کنیم. میزان توان تولیدی باد در هر ساعت از حاصل ضرب ۲۰ MW در درصد باد که در جدول ۳ آمده است به دست می آید؛ اما از آنجایی که خروجی توربین بادی دارای تغییرات می باشد، همان درصد تغییرات بار را برای تغییرات توان قطعی باد در هر ساعت در نظر می گیریم.

همچنین در باس ۵ یک دستگاه ذخیره ساز سیستم قدرت قرار می دهیم. اطلاعات سیستم ذخیره ساز در جدول ۴ آمده است.

در هر ساعت ظرفیت دستگاه ذخیره ساز حداکثر MWh ۹۰ و حداقل صفر می باشد و هزینه هر MWh شارژ دستگاه ذخیره ساز، ۰/۵ \$ و هزینه هر MWh دشارژ دستگاه ذخیره ساز ۰/۱ \$ می باشد. در این مقاله، مدل ارائه شده در بخش قبل توسط نرم افزار GAMS, 23.2 حل شده و نتایج

می‌کنیم. شکل (۲) بازه تغییرات بار، مقدار قطعی بار و مقدار بار به ازای مقادیر مختلف پارامتر بودجه عدم قطعیت را نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز هزینه بهره‌برداری به ازای مقادیر مختلف پارامتر بودجه عدم قطعیت آورده شده است. همان‌طور که شکل (۲) نشان می‌دهد با افزایش  $\Delta_1^t$  انحراف بیشتری از مقدار پیش‌بینی‌شده‌ی بار صورت می‌گیرد؛ بنابراین حل استوار مسئله SCUC، نتایج محافظه‌کارانه‌تری را در پی خواهد داشت؛ و سیستم در مقابل تغییرات بیشتر عدم قطعیت بار محافظت می‌شود. در  $\Delta_1^t = 3$  مسئله SCUC به ازای بدترین شرایط عدم قطعیت بار (بیشترین مقدار باری که در زمان واقعی احتمال وقوع دارد) برنامه‌ریزی شده است. با افزایش  $\Delta_1^t$  ضمن افزایش قابلیت اطمینان سیستم، به علت نیاز به واحدهای بیشتر برای پوشش طیف وسیع‌تری از عدم قطعیت، همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد هزینه بهره‌برداری نیز افزایش می‌یابد.

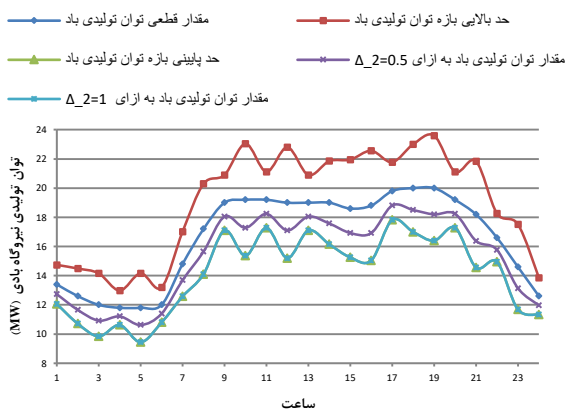
برای بدترین شرایط عدم قطعیت بار ( $\Delta_1^t = 3$ ) و پارامتر عدم قطعیت باد برابر با  $\Delta_2^t = 0$  (حالت قطعی) و  $\Delta_2^t = 0.5$  ،  $\Delta_2^t = 1$  حل می‌کنیم. شکل (۳) بازه تغییرات ، مدار قطعی و مقدار توان تولیدی نیروگاه بادی به ازای مقادیر مختلف پارامتر بودجه عدم قطعیت باد را نشان می‌دهد. در جدول ۶ نیز هزینه بهره‌برداری به ازای مقادیر مختلف پارامتر بودجه عدم قطعیت باد آورده شده است. با افزایش بودجه عدم قطعیت باد از ۰ به ۰/۵ در نتیجه کاهش تولید توان نیروگاه بادی، هزینه کل از ۹۸۵۰۲/۶۴۴ به ۹۹۲۵۸/۹۰۳ افزایش یافته است. با ۱ قرار دادن بودجه عدم قطعیت باد تولید توان نیروگاه بادی به کمترین مقدار ممکن خود رسیده است (طبق شکل (۳) بر حد پایینی بازه عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه بادی منطبق شده است). بنابراین با افزایش  $\Delta_2^t$  ضمن افزایش هزینه بهره‌برداری، به برنامه‌ریزی استوارتری دست پیدا می‌کنیم؛ بنابراین استفاده از مدل استوار مشکلات قابلیت اطمینان شبکه به هنگام استفاده از نیروگاه‌های بادی را کاهش می‌دهد. برای قابلیت اطمینان بیشتر شبکه و کیفیت توان بهتر برای مصرف‌کنندگان به هنگام استفاده از نیروگاه بادی علاوه بر استفاده از مدل استوار از دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت نیز استفاده می‌کنیم.



شکل ۲: بازه تغییرات عدم قطعیت بار و مقدار آن به ازای  $\Delta_1^t$  های مختلف

جدول ۵: هزینه بهره‌برداری به ازای  $\Delta_1^t$  های مختلف

$\Delta_1^t$	هزینه بهره‌برداری (\$) (۹۱۳۹۳/۸۸۱)
۰	۹۱۳۹۳/۸۸۱
۱	۹۸۴۶۴/۴۳۲
۲	۱۰۵۹۸۲/۱۶۱
۳	۱۱۰۳۰۹/۵۷۳



شکل ۳: بازه تغییرات عدم قطعیت توان تولیدی باد و مقدار آن به ازای  $\Delta_2^t$  های مختلف

جدول ۶: هزینه بهره‌برداری به ازای  $\Delta_1^t$  و  $\Delta_2^t$  های مختلف

$\Delta_1^t$	$\Delta_2^t$	هزینه بهره‌برداری (\$) (۹۸۵۰۲/۶۴۴)
۳	۰	۹۸۵۰۲/۶۴۴
۳	۰/۵	۹۹۲۵۸/۹۰۳
۳	۱	۱۰۰۱۱۱/۷۳۱

۳-۴- نتایج مدل استوار SCUC در حضور نیروگاه بادی و بدون ذخیره‌ساز سیستم قدرت

در این حالت فرض می‌کنیم نیروگاه بادی بدون ذخیره‌ساز سیستم قدرت در شبکه وجود دارد. با توجه به عدم قطعیت موجود در توان تولیدی نیروگاه بادی، مسئله SCUC را



برای این شبکه همانند درصد تغییرات بار شبکه ۶ باسه می‌باشد.

جدول ۷: درصد بار برای هر ساعت و مقدار بار در هر باس شبکه ۲۴ باسه

ساعت و بخش	مقدار بار (MW)	درصد بار	ساعت و بخش	مقدار بار (MW)	درصد بار
۱	۱۰۰	۳۷	۱۳	۲۶۰	۶۵
۲	۶۰	۳۳	۱۴	۱۸۰	۶۵
۳	۱۴۰	۳۰	۱۵	۳۱۰	۶۳
۴	۵۰	۲۹	۱۶	۹۰	۶۴
۵	۴۱	۲۹	۱۷	۰	۶۹
۶	۷۰	۳۰	۱۸	۳۲۳	۷۰
۷	۱۰۰	۴۴	۱۹	۱۸۱	۷۰
۸	۱۵۵	۵۶	۲۰	۱۱۸	۶۶
۹	۱۶۰	۶۵	۲۱	۰	۶۱
۱۰	۱۳۵	۶۶	۲۲	۰	۵۳
۱۱	۰	۶۶	۲۳	۰	۴۳
۱۲	۰	۶۵	۲۴	۰	۳۳

#### ۴-۶- نتایج مدل استوار SCUC بدون حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت

همانطور که شکل (۵) نشان می‌دهد با افزایش  $\Delta_1^t$ ، مقدار بیشتری از بازه عدم قطعیت بار پوشش داده شده است تا در  $\Delta_1^t = 17$  بدترین حالت عدم قطعیت بار را در نظر گرفته است در نتیجه، شبکه در مقابل عدم قطعیت بار استوار شده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش یافته است (به عبارتی احتمال عدم تأمین بار در زمان واقعی بسیار کم شده است). اما این افزایش قابلیت اطمینان سیستم همان طور که جدول (۸) نشان می‌دهد، با افزایش هزینه روبرو بوده است. به عبارتی از بهینگی مسئله کاسته شده است. که می‌توان  $\Delta_1^t$  را به گونه‌ای انتخاب کرد تا به میزان قابلیت اطمینان و بهینگی مدنظر شبکه، دست یافت.

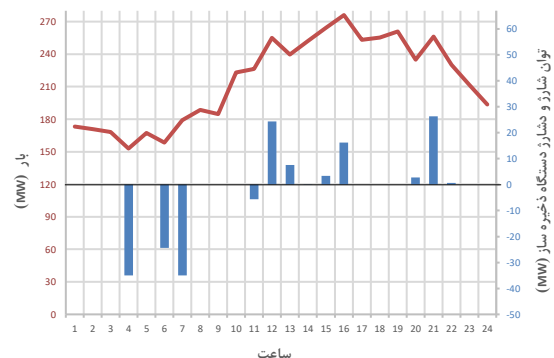
جدول ۸: هزینه بهره‌برداری به ازای  $\Delta_1^t$  های مختلف

$\Delta_1^t$	هزینه بهره‌برداری (\$)
۰	۲۰۲۶۴۲/۲۳۶
۱۰	۲۸۰۶۱۵/۸۱۵
۱۷	۲۹۵۶۶۹/۹۰۶

#### ۴-۴- نتایج مدل استوار SCUC در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت

مسئله SCUC در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت با عدم قطعیت‌های بار و توان تولیدی نیروگاه بادی را با استفاده از مدل استوار برای حالتی که بدترین شرایط عدم قطعیت را در نظر گرفتیم ( $\Delta_1^t = 3$  و  $\Delta_2^t = 1$ ) حل می‌کنیم. بار و توان تولیدی نیروگاه بادی همانند شکل‌های (۲) و (۳) خواهد بود. هزینه بهره‌برداری شبکه بدون ذخیره‌ساز  $100111/731$  \$ در حالی که در حضور ذخیره‌ساز به  $99115/939$  \$ کاهش یافته است.

همان طور که از شکل (۴) پیداست علت کاهش هزینه به هنگام استفاده از ذخیره‌ساز سیستم قدرت، شارژ شدن ذخیره‌ساز از نیروگاه‌های ارزان در حالت کم باری شبکه و دشارژ شدن آن در حالت پر باری شبکه می‌باشد. بنابراین استفاده از ذخیره‌ساز سیستم قدرت ضمن کاهش هزینه بهره‌برداری باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و بهبود کیفیت توان می‌گردد که مسئله مهمی می‌باشد.



شکل ۴: توان شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز و بار شبکه در حالت ( $\Delta_1^t = 3$  و  $\Delta_2^t = 1$ )

#### ۴-۵- شبکه آزمایشی ۲۴ باسه

در این بخش، مدل ارائه‌شده در بخش ۲ بر روی شبکه بزرگ‌تر اعمال می‌شود. برای این منظور در این مقاله شبکه ۲۴ باسه IEEE انتخاب شده است که هزینه مربوط به واحدها و نمودار تک خطی آن در مرجع [۱۴] و در مرجع [۱۵] هزینه راه‌اندازی مربوط به واحدها آورده شده است. در حالت قطعی، بار برای هر ساعت در هر باس نیز از حاصل ضرب بار در درصد بار در هر ساعت به دست می‌آید که بار و درصد بار در جدول ۷ داده شده است. با توجه به عدم قطعیت در نظر گرفته‌شده برای بار، درصد تغییرات آن

بادی در زمان واقعی بسیار کم شده است). اما این افزایش قابلیت اطمینان سیستم همان‌طور که جدول ۱۱ نشان می‌دهد، با افزایش هزینه روبرو بوده است. زیرا افزایش  $\Delta_2^t$  ، با کاهش توان تولیدی نیروگاه بادی همراه بوده در نتیجه تأمین توان از طریق نیروگاه‌های حرارتی که گران‌تر هستند صورت گرفته است. به عبارتی از بهیمنگی مسئله کاسته شده است. که می‌توان  $\Delta_2^t$  را به گونه‌ای انتخاب کرد تا به میزان قابلیت اطمینان و بهیمنگی مدنظر شبکه، دست یافت.

جدول ۹: اطلاعات نیروگاه‌های بادی شبکه ۲۴ باسه

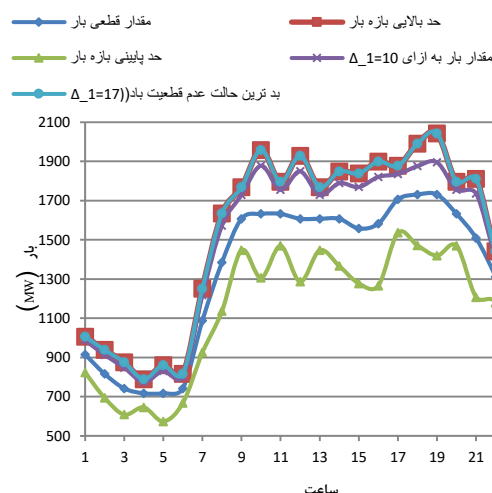
توان تولیدی (MW)	شماره باس	شماره نیروگاه
۱۰	۲	۱
۲۰	۴	۲
۳۰	۸	۳
۶۰	۱۲	۴
۱۵	۱۸	۵

جدول ۱۰: درصد باد برای هر ساعت شبکه ۲۴ باسه

درصد باد (%)	ساعت	درصد باد (%)	ساعت	درصد باد (%)	ساعت
۹۹	۱۷	۹۵	۹	۶۷	۱
۱۰۰	۱۸	۹۶	۱۰	۶۳	۲
۱۰۰	۱۹	۹۶	۱۱	۶۰	۳
۹۶	۲۰	۹۵	۱۲	۵۹	۴
۹۱	۲۱	۹۵	۱۳	۵۹	۵
۸۳	۲۲	۹۵	۱۴	۶۰	۶
۷۳	۲۳	۹۳	۱۵	۷۴	۷
۶۳	۲۴	۹۴	۱۶	۸۶	۸

جدول ۱۱: هزینه بهره‌برداری به ازای  $\Delta_1^t$  و  $\Delta_2^t$  های مختلف

$\Delta_1^t$	$\Delta_2^t$	هزینه بهره‌برداری (\$)
۱۷	۰	۲۵۲۱۰۷/۴۷۷
۱۷	۱	۲۵۴۴۸۴/۲۱۰
۱۷	۳	۲۵۶۹۷۲/۲۲۲
۱۷	۵	۲۵۷۸۲۹/۵۸۳



شکل ۵: بازه تغییرات عدم قطعیت بار و مقدار آن به ازای  $\Delta_1^t$  های مختلف

#### ۴-۷- نتایج مدل استوار SCUC در حضور نیروگاه بادی و بدون ذخیره‌ساز سیستم قدرت

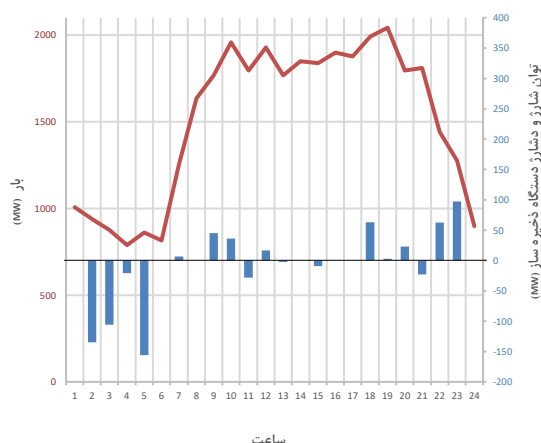
در این حالت فرض می‌کنیم در بدترین شرایط عدم قطعیت بار ( $\Delta_1^t=17$ )، فقط نیروگاه بادی به شبکه اضافه شده است. جدول ۹ اطلاعات مربوط به نیروگاه‌های بادی واقع‌شده در شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE را نشان می‌دهد. با توجه به ۲۴ ساعته بودن زمان برنامه‌ریزی، یک ضریب با عنوان درصد باد در جدول ۱۰ داده شده است که توان الکتریکی تولیدی هر نیروگاه در هر ساعت از حاصل ضرب توان اسمی نیروگاه در درصد باد به دست می‌آید. همچنین با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت برای توان الکتریکی تولیدی نیروگاه‌های بادی درصد تغییرات توان الکتریکی تولیدی همانند در صد تغییرات بار در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش  $\Delta_2^t$  ، مقدار به دست آمده برای توان تولیدی نیروگاه‌های بادی در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها، به حد پایینی بازه پیش‌بینی توان تولیدی نیروگاه بادی نزدیک‌تر می‌شود. تا در  $\Delta_2^t=5$  (بیشترین مقدار  $\Delta_2^t$  که برابر است با تعداد نیروگاه‌ها بادی که خروجی آن‌ها دارای عدم قطعیت بوده است)، بدترین حالت عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه بادی را در نظر می‌گیرد. در نتیجه، شبکه در مقابل عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه بادی استوار شده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش یافته است (به عبارتی احتمال کمبود تأمین توان از طریق نیروگاه‌های

پیداست، شارژ شدن دستگاه ذخیره‌ساز در ساعات غیر پیک و تخلیه شدن آن در ساعات پیک می‌باشد. همچنین دستگاه‌های ذخیره‌ساز باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و بهبود کیفیت توان نیز می‌گردند که مسئله مهمی می‌باشد.

جدول ۱۲: اطلاعات دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت شبکه ۲۴ باسه

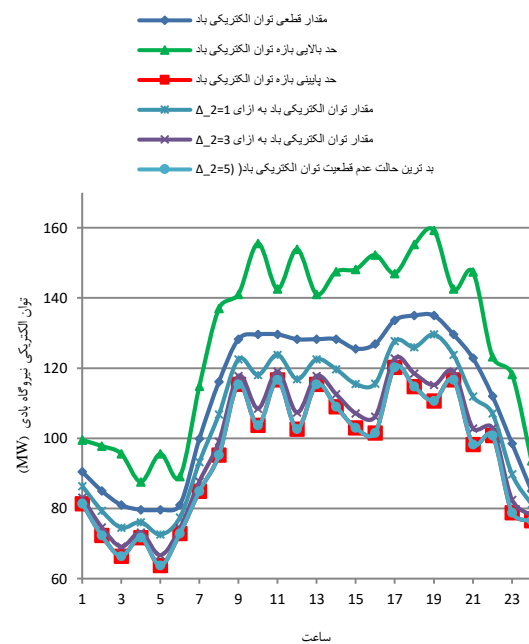
شماره ذخیره‌ساز	۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره باس	۴	۸	۱۲	۱۶	۱۸	۲۲
بازده شارژ ذخیره‌ساز	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
بازده دشارژ ذخیره‌ساز	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
حداقل توان شارژ (MW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر توان شارژ (MW)	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
حداقل توان دشارژ (MW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر توان دشارژ (MW)	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵



شکل ۷: توان شارژ و دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز و بار شبکه در حالت  $\Delta_1^t = 3$  و  $\Delta_2^t = 1$

#### ۴-۸- نتایج مدل استوار SCUC در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت

در این حالت برای مشاهده تأثیر ذخیره‌سازهای سیستم قدرت، دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت را برای این شبکه در نظر می‌گیریم که اطلاعات آن‌ها در جدول ۱۲ آورده شده است. همچنین در هر ساعت ظرفیت دستگاه ذخیره‌ساز حداکثر ۱۰۰ MWh و حداقل صفر می‌باشد و هزینه هر MWh شارژ دستگاه ذخیره‌ساز،  $0/5$  \$ و هزینه هر MWh دشارژ دستگاه ذخیره‌ساز  $0/1$  \$ می‌باشد. و میزان انرژی اولیه و نهایی دستگاه‌های ذخیره‌ساز صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: بازه تغییرات عدم قطعیت توان تولیدی باد و مقدار آن به ازای  $\Delta_2^t$  های مختلف

جدول ۱۳ میزان شارژ و شارژ دستگاه‌های ذخیره‌ساز در هر ساعت را به ازای بدترین حالت عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه بادی، نشان می‌دهد. در این جدول اعداد منفی نشان‌دهنده شارژ (مصرف) و اعداد مثبت نشان‌دهنده دشارژ (تولید) دستگاه ذخیره‌ساز می‌باشد.

استفاده از ذخیره‌ساز سیستم قدرت باعث گردیده تا هزینه از  $250776/750$  \$ به  $257829/583$  \$ شرایط عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه بادی کاهش یابد. علت کاهش هزینه همان‌طور که در شکل (۷)

جدول ۱۳: میزان توان تولیدی (دشارژ) و توان مصرفی (شارژ) دستگاه‌های ذخیره‌ساز برای شبکه ۲۴ باسه

شماره واحد	شماره واحد‌های ذخیره‌ساز برای (۱۷Δ <sup>t</sup> و =۵Δ <sup>t</sup> )						شماره واحد	شماره واحد‌های ذخیره‌ساز برای (۱۷Δ <sup>t</sup> و =۵Δ <sup>t</sup> )					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶		۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳	۰	-۴۵	۴۲/۵۷	۰	۰	۰
۲	-۴۵	-۴۵	-۴۵	۰	۰	۰	۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	-۲۱/۱۱	-۴۵	۰	۰	-۳۹/۹۰	۱۵	۱۱/۹۲	۰	۰	-۲۱/۱۱	۰	۰
۴	-۲۱/۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	-۴۵	-۴۵	-۲۱/۱۱	۰	۰	-۴۵	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸	۱۷/۹۹	۴۵	۰	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۶/۴۲	۱۹	۴۵	۴۵	-۳۶/۹۷	-۴۵	۰	۰
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	-۱/۶۹	۲۴/۶۰	۰	۰	۰
۹	۰	۰	۴۵	۰	۰	۰	۲۱	۱۵/۰۸	۱/۳۶	۵/۳۴	-۴۵	۰	۰
۱۰	۰	۴۵	۰	۰	-۸/۹۲	۰	۲۲	۰	۰	۰	۴۵	۰	۱۷/۳۴
۱۱	۰	-۳۰/۷۵	۲/۴۲	۰	۰	۰	۲۳	۰	۰	۰	۴۵	۷/۲۲	۴۵
۱۲	۰	۱۶/۳۶	۰	۰	۰	۰	۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله حل استوار مسئله برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها در حضور نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز سیستم قدرت با عدم قطعیت‌های بار و توان تولیدی نیروگاه بادی ارائه شد. همان‌طور که مشاهده شد با استفاده از مدل استوار برای عدم قطعیت بار در برنامه‌ریزی روز-پیش یک بازه در نظر گرفته شده است و هزینه بهره‌برداری شبکه به ازای بدترین حالت عدم قطعیت بار به حداقل رسیده است. لذا در زمان واقعی برای بدترین رخداد ممکن مقدار بار برنامه‌ریزی شده است؛ که این موضوع منجر به قابلیت اطمینان بالای شبکه ضمن افزایش هزینه می‌گردد. با تعریف پارامتر بودجه عدم قطعیت مصالحه‌ای میان استواری مسئله و هزینه ایجاد شده است. استفاده از مدل استوار برای مدل کردن عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه بادی منجر به در نظر گرفتن کمترین مقدار بازه توان تولیدی که برای این نیروگاه‌ها در نظر گرفته شده است می‌گردد، لذا سیستم در برابر این عدم قطعیت نیز مقاوم می‌شود. البته تعریف پارامتر بودجه عدم قطعیت باد مصالحه‌ای میان استواری مسئله و جنبه‌های اقتصادی آن برقرار کرده است. بدین ترتیب استفاده از مدل استوار تا حدود زیادی مشکلات استفاده از منبع انرژی پاک و ارزان را مرتفع کرده است. همچنین دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در نظر گرفته‌شده برای شبکه‌های موردبررسی، علاوه بر بهبود

کیفیت توان و افزایش قابلیت اطمینان که موجب حل شدن پاره‌ای دیگر از مشکلات استفاده از نیروگاه‌های بادی می‌گردد، کاهش پیک و هزینه را نیز سبب می‌شود. همچنین با استفاده از روش بندرز، مسئله به دو مسئله کوچکتر تبدیل گردیده و به راحتی حل شده است.

### علائم

#### متغیرها

توان تولیدی ژنراتور $i$ در ساعت $t$	$P_i^t$
توان تولیدی نیروگاه بادی $W$ در ساعت $t$	$P_w^t$
توان تولیدی ذخیره‌ساز $r$ در ساعت $t$	$S_r^P$
توان مصرفی ذخیره‌ساز $r$ در ساعت $t$	$S_r^S$
ظرفیت دستگاه ذخیره‌ساز $r$ در ساعت $t$	$Y_{r,t}$
توان عبوری از خط $l$	$PL_l$

#### متغیر باینری

بودن یا نبودن ژنراتور $i$ در ساعت $t$	$x_i^t$
روشن شدن ژنراتور $i$ در ساعت $t$	$u_i^t$
خاموش شدن ژنراتور $i$ در ساعت $t$	$v_i^t$

#### پارامترها

هزینه راه‌اندازی	$S_i^t$
------------------	---------

نیروگاه بادی	$w$	هزینه خاموشی	$G_i^t$
ذخیره ساز سیستم قدرت	$r$	هزینه هر MWh برق تولیدی	$C_i^t$
نیروگاه غیر بادی	$i$	نیروگاه غیر بادی	$C_r^p$
خط انتقال	$l$	هزینه هر MWh دشارژر دستگاه ذخیره ساز	$C_r^s$
<b>مجموعه ها</b>			
مجموعه واحدهایی که در باس $n$ هستند	$U(n)$	هزینه هر MWh شارژر دستگاه ذخیره ساز	$MinUp_i$
مجموعه نیروگاه های بادی که در باس $n$ هستند	$W(n)$	حداقل زمان روشن بودن	$MinDW_i$
مجموعه دستگاه های ذخیره ساز سیستم قدرت که در باس $n$ هستند	$R(n)$	حداقل زمان خاموش بودن	$RD_i^t$
مجموعه بارهایی که در باس $n$ هستند	$J(n)$	نرخ شیب کاهشی	$RU_i^t$
مجموعه نیروگاه های بادی که دارای عدم قطعیت می باشند	$N(w)$	نرخ شیب افزایشی	$P_i^{\min}$
مجموعه بارهایی که دارای عدم قطعیت می باشند	$N(d)$	حداقل توان تولیدی هر نیروگاه غیر بادی	$P_i^{\max}$
		حداکثر توان تولیدی هر نیروگاه غیر بادی	$PL_i^{\max}$
		حداکثر توان عبوری از خط	$d_j^t$
		بار واقع در باس $z$ در زمان $t$	$S_{r \min}^s$
		حداقل توان شارژر (ذخیره) دستگاه ذخیره ساز سیستم قدرت	$S_{r \max}^s$
		حداکثر توان شارژر (ذخیره) دستگاه ذخیره ساز سیستم قدرت	$S_{r \min}^p$
		حداقل توان دشارژر (تولیدی) دستگاه ذخیره ساز سیستم قدرت	$S_{r \max}^p$
		حداکثر توان دشارژر (تولیدی) دستگاه ذخیره ساز سیستم قدرت	$Y_r^{\min}$
		حداکثر ظرفیت دستگاه ذخیره ساز	$Y_r^{\max}$
		حداکثر ظرفیت دستگاه ذخیره ساز	$\eta_s$
		بازده شارژر (ذخیره) دستگاه ذخیره ساز	$\eta_p$
		بازده دشارژر (تولید) دستگاه ذخیره ساز	
		سیستم قدرت سیستم قدرت	$\Delta_1^t$
		بودجه عدم قطعیت بار	$\Delta_2^t$
		بودجه عدم قطعیت توان تولیدی	
		نیروگاه بادی	$Y_r^{\text{Begin}}$
		میزان انرژی اولیه دستگاه ذخیره ساز $r$	$Y_r^{\text{Last}}$
		میزان انرژی نهایی دستگاه ذخیره ساز $r$	

## پیوست الف

مشخصات خطوط و ژنراتورهای شبکه ۶ باسه در جدول های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است.

جدول ۱۴: اطلاعات خطوط شبکه ۶ باسه

شماره خط	از باس	به باس	X(pu)	حداکثر توان عبوری از خط
۱	۱	۲	۰/۱۷۰	۲۰۰
۲	۲	۳	۰/۰۳۷	۱۰۰
۳	۱	۴	۰/۲۵۸	۱۰۰
۴	۲	۴	۰/۱۹۷	۱۰۰
۵	۴	۵	۰/۰۳۷	۱۰۰
۶	۵	۶	۰/۱۴۰	۱۰۰
۷	۳	۶	۰/۰۱۸	۱۰۰

جدول ۱۵: اطلاعات ژنراتورهای شبکه ۶ باسه

شماره واحد	۱	۲	۳
شماره باس	۱	۲	۶
هزینه هر (MWh)	۲۰	۲۸	۴۰
Pmax (MW)	۲۲۰	۱۰۰	۱۰۰
Pmin (MW)	۱۰۰	۱۰	۱۰
حداقل زمان روشن بودن	۴	۲	۱
حداقل زمان خاموش بودن	۴	۳	۱
هزینه راه اندازی (\$)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
هزینه خاموش کردن (\$)	۵	۵	۵

## اندیس ها

$t$	زمان
$n$	باس
$j$	باس بار

## مراجع

- [1] Y. Rebours, and D. A. Kirschen, "Survey of definitions and specifications of reserve services", Report, University of Manchester, October 2005, pp. 1 – 38.
- [2] M. A. Matos, and R. J. Bessa, "Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, NO. 2, May 2011, pp. 594 – 603.
- [3] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Perez-Ruiz, "Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, NO. 2, May 2009, pp. 900 – 910.
- [4] P. A. Ruiz, C. R. Philbrick, E. Zak, K. W. Cheung, and P. W. Sauer, "Uncertainty management in the unit commitment problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, NO. 2, May 2009, pp. 642 – 651.
- [5] J. Wang, A. Botterud, R. Bessa, H. Keko, L. Carvalho, D. Issicaba, J. Sumaili, and V. Miranda, "Wind power forecasting uncertainty and unit commitment", Applied Energy, Vol. 88, NO. 11, November 2011, pp. 4014 – 4023.
- [6] J. R. Birge, and F. Louveaux, Introduction to Stochastic Programming, Springer, 2011.
- [7] D. Bertsimas, and M. Sim, "The price of robustness", Operations Research, Vol. 52, NO. 1, February 2004, pp. 35 – 53.
- [8] M. Ghofrani, A. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, and M. S. Fadali, "A Stochastic Framework for Power System Operation with wind Generation and Energy Storage Integration", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, NO. 2, April 2013, pp. 434 – 442.
- [9] R. Jiang, J. Wang, and Y. Guan, "Robust Unit Commitment with Wind Power and Pumped Storage Hydro", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, NO. 2, May 2012, pp. 800 – 810.
- [10] D. Pozo, J. Contreras, and E. E. Sauma, "Unit Commitment With Ideal and Generic Energy Storage Units", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, NO. 6, November 2014, pp. 2974 – 2984.
- [11] X. Guan, P. Luh, H. Yan, and J. Amalfi, "An optimization based method for unit commitment", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 14, NO. 1, February 1999, pp. 9 – 17.
- [12] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, "Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, NO. 1, February 2013, pp. 52 – 63.
- [13] A. J. Conejo, E. Castillo, R. Mínguez, and R. García-Bertrand, Decomposition techniques in mathematical programming: engineering and science applications, Decomposition techniques in mathematical programming: engineering and science applications, 2006.
- [14] K. W. Hedman, M. C. Ferris, R. P. O'Neill, E. B. Fisher and S. S. Oren, "Optimization Of Generation Unit Commitment and Transmission Switching With N-1 Reliability", IEEE Transactions on Power System, Vol. 25, NO. 2, May 2010, pp. 1052 – 1063.
- [15] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher and S. S. Oren, "Optimal Transmission Switching With Contingency Analysis", IEEE Transactions on Power System, Vol. 24, NO. 3, August 2009, pp. 1577 – 1586.