

برنامه‌ریزی تصادفی امنیت مقید مشارکت واحدهای حرارتی در حضور واحدهای تلمبه ذخیره‌ای و مزارع بادی با در نظر گرفتن نحوه مشارکت نیروگاه حرارتی در تامین انرژی لازم برای پمپاژ آب

هادی حیدری^۱

مجید معظمی*^۲

چکیده

در حال حاضر یک نگرانی فزاینده در مورد آلودگی‌های محیطی نیروگاه‌های حرارتی در دنیا وجود دارد. از این رو منابع انرژی تجدید پذیر مانند باد به یک بخش مهمی از تولید انرژی در بسیاری از کشورها تبدیل شده است. انرژی بادی به دلیل عدم قطعیت تولید سبب چالش‌های بزرگی در سیستم‌های قدرت می‌شود. برای مقابله با این چالش‌ها از واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای در کنار مزارع بادی استفاده می‌شود. در مطالعات گذشته از واحدهای حرارتی برای مشارکت در تامین انرژی لازم برای پمپاژ آب استفاده نشده است. در این مقاله یک روش جدید برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدهای حرارتی در حضور واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای با هدف نشان دادن تأثیر مثبت مشارکت واحدهای حرارتی جهت تأمین انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب بر هزینه و آلودگی سیستم قدرت پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی یک مدل تصادفی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) است. برای بررسی کارایی مدل ارائه شده از شبکه تست استاندارد ۶ باس IEEE استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر واحدهای حرارتی در تامین توان لازم برای پمپاژ آب شرکت کنند، هزینه بهره‌برداری کاهش و میزان آلودگی ثابت می‌ماند.

واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی امنیت- مقید مشارکت واحدها، نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، بهینه‌سازی ترکیبی آمیخته با عدد صحیح.

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

۲. استادیار، مرکز تحقیقات ریزش‌بکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

مقدمه

با افزایش قابل توجه آثار زیست‌محیطی بخش صنعت برق، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیری چون آب، باد و خورشید، به سرعت مورد توجه قرار گرفته است. در این میان واحدهای بادی به دلیل ارزان قیمت بودن و واحدهای آبی به دلیل سرعت بالا در ورود و خروج به شبکه توان در سرتاسر دنیا بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به دلیل با ارزش بودن منابع آبی و برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در تولید انرژی، از مخزن‌هایی برای ذخیره آب و استفاده از آن برای تولید توان در ساعت‌های دیگر استفاده می‌شود. از ویژگی‌های نیروگاه‌های برق-آبی مانند نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، پاک و ارزان بودن انرژی تولیدی آن، امکان تنظیم تولید آن‌ها در یک بازه وسیع و با پاسخ سریع است. بالا بودن پایداری در مقایسه با نیروگاه‌های بخاری و هزینه کم نگهداری از مزایای دیگر این نوع نیروگاه‌ها است (جوادی و همکاران، ۲۰۱۱).

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای از دو مخزن در ارتفاعات مختلف تشکیل شده است. این نیروگاه در مواقعی که قیمت برق گران است آب را از مخزن بالادست به سمت مخزن پایین دست سرازیر کرده و سبب ایجاد انرژی الکتریکی می‌شود. این نیروگاه همچنین در مواقعی که برق ارزان است آب را از مخزن پایین دست به مخزن بالادست پمپاژ^۱ کرده و برای تولید توان الکتریکی در ساعت‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌دهد (ابریو^۲، ۲۰۰۸). برای به دست آوردن بازده^۳ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای از یک نمودار تبدیل میزان آب خروجی به توان در حالت تولید و یک نمودار دیگر برای تبدیل توان به آب پمپاژی استفاده می‌شود. این دو نمودار غیرخطی رابطه توان با جریان آب را نشان می‌دهد که توابعی غیرمحدب و ناهموار و در نتیجه مشتق‌ناپذیر هستند. اختلاف بین نمودار تولید و پمپاژ نشان‌دهنده بازده عملکرد نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای است (خدایار و همکاران، ۲۰۱۳).

ورود منابع متغیر نظیر انرژی بادی به چرخه تولید به پیچیدگی‌های مربوط به برنامه‌ریزی‌های شبکه می‌افزاید. همچنین به دلیل متغیر بودن سرعت باد در مزرعه بادی، در شبکه‌هایی که تولید توان این مزارع با یک نسبت قابل توجهی

از ظرفیت تولید واحدهای حرارتی در شبکه نصب شود، باعث بروز عدم قطعیت‌های بیشتری در بهره‌برداری از شبکه قدرت می‌گردد. به طوری که منابع نیروگاهی متداول برای جبران این تغییرات دچار چالش‌های فراوانی می‌شوند. البته میزان تأثیر مزرعه بادی در شبکه قدرت بستگی به انعطاف‌پذیری شبکه قدرت دارد (ابریو، ۲۰۰۸). در پژوهشی دیگر از شبیه‌سازی مونت کارلو^۴ برای تولید سناریو جهت نمایش عدم قطعیت‌های سیستم قدرت شامل خطاهای پیش‌بینی روز پیش بار، خروج اضطراری ژنراتورها و خطوط انتقال و همچنین خطاهای پیش‌بینی سرعت باد استفاده شده است. توابع توزیع متفاوتی مانند توزیع نرمال، نرمال تکه‌ای خطی و ویبول برای نمایش عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از ساخت سناریو به دلیل پیچیده شدن مسئله می‌بایست سناریوها کاهش یابد. الگوریتم‌های کاهش سناریو عملکرد و دقت متفاوتی دارند. از این رو انتخاب یک الگوریتم به اندازه مسئله و دقت راه‌حل مورد نیاز بستگی دارد. برای درخت‌های سناریوی بزرگ روش بازگشتی سریع بهترین عملکرد را به همراه کمترین میزان خطا و همچنین زمان محاسباتی دارد (خدایار و همکاران، ۲۰۱۳). حدادیان و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی تأثیر مزارع بادی و خودروهای برقی در کنار نیروگاه‌های حرارتی بر هزینه بهره‌برداری و آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی پرداخته‌اند. بنرجی^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی تأثیر مزارع بادی و سدهای آبی در کنار نیروگاه‌های حرارتی با رویکرد کاهش هزینه بر اساس الگوریتم اجتماع ذرات (PSO^۶) پرداخته‌اند به طوری که نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان شبکه قدرت می‌باشد. گلاسرمن^۷ و همکاران (۲۰۰۳)، یک مدل برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو که طبیعت نوسانی تولیدات بادی را نشان می‌دهد، ارائه داده‌اند. هو^۸ و همکاران (۲۰۱۴)، یک روش مقاوم برای برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها با قید همبستگی عدم قطعیت بار و تولید بادی پیشنهاد کرده‌اند که علاوه بر طبیعت نوسانی باد، تغییرپذیری بار را نیز مورد بررسی قرار داده است. برای مقابله با تغییرپذیری و عدم قطعیت توان بادی، پیشنهاد شده است که تولیدکنندگان توان بادی یک استراتژی

⁵ Banerjee⁶ Particle Swarm Optimization⁷ Glasserman⁸ Hu¹ Puming² Abreu³ Efficiency⁴ Monte Carlo

شده است. هدف از این مقاله بررسی تأثیر حضور نیروگاه حرارتی جهت تامین انرژی لازم برای پمپاژ آب در کنار واحدهای بادی، بر هزینه بهره‌برداری و آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی است. از این‌رو یک روش جدید برنامه‌ریزی تصادفی امنیت مقید مشارکت واحدهای حرارتی برای تأمین انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب و تأثیر آن بر هزینه عملکرد و آلودگی کلی سیستم قدرت ارائه می‌شود. اگر توان هماهنگی واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای مثبت در نظر گرفته شود (تزیق توان هماهنگی واحد بادی و تلمبه ذخیره‌ای به شبکه)، واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای برای پمپاژ آب نمی‌توانند از توان نیروگاه‌های حرارتی استفاده کنند و اگر این توان هماهنگی متغیر در علامت در نظر گرفته شود واحدهای تلمبه ذخیره‌ای می‌توانند برای پمپاژ آب از توان نیروگاه حرارتی استفاده کنند. نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با مدل نیروگاه حرارتی-بادی و بدون حضور نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای برای بررسی میزان تأثیر هر کدام از مدل‌ها بر هزینه عملکرد سیستم و همچنین زمان‌های پر و خالی شدن حجم مخزن به همراه شیفت زمانی ورود و خروج آب به مخزن نیروگاه بررسی می‌شود. مدل ارائه‌شده در این مقاله یک مدل غیرخطی، غیرمحدب و مشتق-ناپذیر است که حل آن از روشهای ریاضی بسیار مشکل و نیازمند زمان و محاسبات پیچیده زیادی است. از آنجا که در مسائل بهره‌برداری، سرعت عملکرد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، از این‌رو مدل پیشنهادی به وسیله روش‌های خطی‌سازی، به یک مدل MILP^۶ قابل انعطاف تبدیل و سپس با استفاده از نرم‌افزار GAMS^۷ حل شده است.

مدل‌سازی عدم قطعیت بار و باد

مدل‌سازی بار و مزارع بادی

برای شبیه‌سازی سرعت باد و همچنین ساخت سناریوهای بادی از توزیع‌های احتمالاتی استفاده می‌کنیم. دو نمونه مهم در این زمینه توزیع رایلی^۸ و توزیع ویبول^۹ است. توزیع رایلی بر اساس میانگین سرعت باد و توزیع ویبول بر اساس دو پارامتر

فروش (ارائه قیمت) را با هدف مینیمم کردن هزینه عدم تعادل انتخاب کنند. این هدف با فرمول‌بندی یک مسئله بهینه‌سازی که تعداد زیادی از سناریوهای تولید بادی و هزینه عدم تعادل را بررسی می‌کند به دست آورده می‌شود. انرژی الکتریکی می‌تواند از مزارع بادی گرفته و به اشکال متفاوت انرژی مانند تأسیسات تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده شده که می‌تواند در مواقع لزوم مورد استفاده قرار گیرد، تبدیل شود. هنگامی که اطلاعات کاملی در مورد قیمت بازار و تولید بادی وجود داشته باشد، امکان فرمول‌بندی یک مسئله بهینه‌سازی قطعی برای یافتن جواب بهینه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و مزرعه بادی وجود دارد (گارسیا^۱ و همکاران، ۲۰۰۸). رامیرز^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی هماهنگی واحدهای حرارتی-بادی-آبی-تلمبه ذخیره‌ای در شبکه‌های هوشمند پرداخته‌اند به گونه‌ای که جریان آب و همچنین توان بادی به صورت تصادفی مدل شده‌اند. در این مرجع قیود امنیتی در نظر گرفته نشده است. کیران^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، مشارکت واحدهای تلمبه ذخیره‌ای و پاسخ تقاضا را به عنوان رزرو خدمات جانبی برای کاهش مسائل مربوط به ورود مزارع بادی به شبکه قدرت بررسی کرده‌اند. نویسندگان این پژوهش برنامه‌ریزی هماهنگی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و پاسخ تقاضا در بازار انرژی و خدمات جانبی از طریق روش‌های احتمالاتی مشارکت واحدها و همچنین با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ^۴ را بررسی کرده‌اند. شاهیده‌پور و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی هماهنگی واحدهای حرارتی و تلمبه‌ذخیره‌ای در کنار مزارع بادی در برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها (SCUC^۵) در بازار روز پیش پرداخته است. خدایار و همکاران (۲۰۱۳)، این SCUC را با قیود خروج اضطراری ژنراتورها و خطوط انتقال به صورت مثبت در نظر گرفته‌اند.

در سایر مقالات SCUC در حضور نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، استفاده از نیروگاه‌های حرارتی برای پمپاژ آب استفاده نشده است. در این مقاله استفاده از واحدهای حرارتی در کنار واحدهای بادی برای پمپاژ آب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ارائه

⁷ General Algebraic Modeling System

⁸ Rayleigh Distribution

⁹ Weibull Distribution

¹ Garcia

² Ramirez

³ Kiran

⁴ Lagrangian Relaxation

⁵ Security Constraint Unit Commitment

⁶ Mix Integer Linear Programming

$I_{h,t,mm}$ وضعیت عملکرد حالت mm (تولید، پمپاژ، بیکاری) در ساعت t و $I_{h,t+1,mm}$ وضعیت عملکرد حالت mm (تولید، پمپاژ، بیکاری) در ساعت $t+1$ تعریف می‌شود. به‌عنوان مثال شروع فرآیند پمپاژ آب به‌عنوان یک تغییر وضعیت از حالت بیکاری به حالت پمپاژ و قطع فرآیند تولید به‌عنوان یک تغییر وضعیت از حالت تولید به حالت بیکاری است. هنگامی که mm حالت تولید را نشان می‌دهد، $I_{h,t,p} = 0$ ، $I_{h,t,g} = 1$ و $I_{h,t,i} = 0$ و هنگامی که حالت پمپاژ را نشان می‌دهد، $I_{h,t,p} = 1$ ، $I_{h,t,g} = 0$ و $I_{h,t,i} = 0$ و هنگامی که حالت بیکار (خاموشی واحد) را نشان می‌دهد، $I_{h,t,p} = I_{h,t,g} = 0$ و $I_{h,t,i} = 1$ است (ابریو، ۲۰۰۸).

مدل‌سازی هماهنگی مزرعه بادی و نیروگاه تلمبه

ذخیره‌ای

هدف هماهنگی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و مزرعه بادی استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای به‌گونه‌ای است که توان بادی متغیر را ذخیره و در مواقعی که مورد نیاز باشد آن را توزیع می‌کند. با این ادغام می‌توان عدم تعادل توان بادی را جبران و از انقطاع‌های^۴ توان بادی جلوگیری کرد. این هماهنگی در مدت زمان پیک مصرف باعث کاهش هزینه‌های تولید و همچنین کاهش تراکم جریان خطوط انتقال می‌شود. اگر خروجی دو نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و نیروگاه بادی مانند شکل (۲) هماهنگ شده باشند، قیود هماهنگی به فرمول‌بندی اضافه می‌شود (ابریو، ۲۰۰۸).

هنگامی که میان نیروگاه تلمبه ذخیره و نیروگاه بادی هماهنگی ایجاد می‌شود، توان خروجی این دو نیروگاه به‌عنوان توان هماهنگی p_c به سیستم قدرت تحویل داده می‌شود. اگر p_c تحویلی به شبکه مثبت در نظر گرفته شود آنگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در مواقعی که توان بادی صفر است اجازه استفاده از توان نیروگاه‌های بخاری را برای پمپاژ آب نخواهد داشت.

c (ضریب مقیاس^۱) و k (ضریب شکل^۲) عمل می‌کند. تابع چگالی و توزیع تجمیعی ویبول در رابطه (۱) و (۲) آورده شده است. در این روابط $p(v)$ تابع چگالی احتمال و $F(v)$ تابع توزیع تجمیعی ویبول و v میانگین سرعت باد است.

$$p(v) = (k/c)(v/c)^{(k-1)}e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp[1 - (v/c)^k] \quad (2)$$

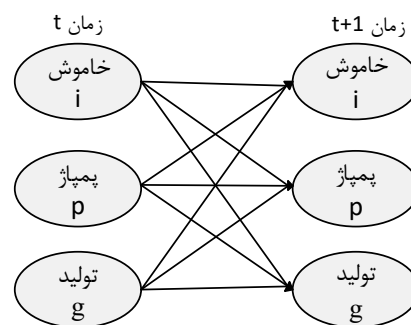
برای نشان دادن خطاهای پیش‌بینی بار روز پیش از توابع توزیع احتمالاتی متفاوتی می‌توان استفاده کرد. مهم‌ترین این توابع، تابع توزیع نرمال است که بر اساس میانگین μ و انحراف استاندارد σ بار عمل می‌کند. تابع چگالی و توزیع تجمیعی در رابطه (۳) و (۴) آورده شده است. در این روابط $p(x)$ تابع چگالی احتمال نرمال، $F(x)$ تابع توزیع تجمیعی نرمال و x طیفی از داده‌های نرمال است.

$$p(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2} \cdot dx \quad (3)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad (4)$$

مدل‌سازی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سه حالت عملکردی تولید، پمپاژ و حالت بیکاری^۳ دارد. هر حالت به‌عنوان یک‌شبه واحد که دارای چند محدودیت است در نظر گرفته می‌شود. با این حال شبه‌واحدهای مربوط به یک واحد تلمبه ذخیره‌ای منحصر به فرد هستند به‌گونه‌ای که در هر ساعت فقط یک شبه واحد انتخاب می‌شود. جابه‌جایی بین شبه واحدها برای یک نیروگاه هزینه‌بر خواهد بود. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ناشی از ساییدگی و ترک خوردگی توربین‌های آبی می‌شود. در شکل (۱) جابه‌جایی شبه واحدها یا همان تغییر وضعیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در بین حالات mm و mn نشان داده شده است.



شکل (۱): حالت‌های عملکرد نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

³ Idle
⁴ Curtailment

¹ Scale Factor
² Shape Factor

از حالت پایه به سناریوهای دیگر را بیان می‌کند. همچنین قسمت سوم هزینه‌هایی را که نیروگاه‌های حرارتی و تلمبه‌ذخیره‌ای در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از پیش‌بینی بار و تولید بادی متحمل می‌شوند، بیان می‌کند.

$F_{c,i}$ تابع هزینه نیروگاه حرارتی است که به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود. در این رابطه a_{ci} و b_{ci} و c_{ci} ضرایب تابع هزینه هستند.

$$F_{c,i}(p_{i,t}) = a_{ci} + b_{ci} \cdot P_{it} + c_{ci} \cdot p_{i,t}^2 \quad (6)$$

این تابع غیرخطی را می‌توان به صورت یک تابع تکه‌ای خطی تبدیل کرد و از پیچیدگی مسئله به شدت کاست و آن را از روش MLIP حل کرد. رابطه (۷) محدودیت عمل اصلاحی ژنراتورها را بیان می‌کند.

$$\begin{aligned} -\Delta_{i,t}^s &\leq P_{i,t}^s - P_{i,t} \leq \Delta_{i,t}^s \\ \Delta_{i,t}^{max} &= \text{MAX}(\Delta_{i,t}^1 + \Delta_{i,t}^2 + \Delta_{i,t}^3 \dots, \Delta_{i,t}^s) \\ \forall_s \in [1,2,3, \dots, NS] \end{aligned} \quad (7)$$

رابطه (۸) قید تعادل توان در هر شین را نشان می‌دهد. این رابطه نشان می‌دهد که میزان توان تولید شده بر روی هر شین باید با بار موجود بر روی آن شین و اختلاف توان ورودی و خروجی به آن شین برابر باشد.

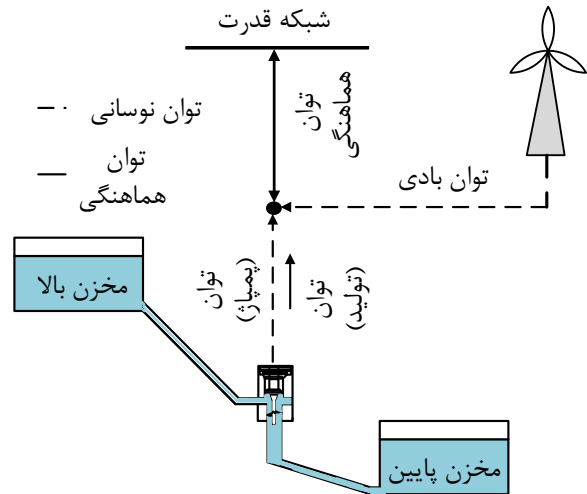
$$\begin{aligned} \sum_{i \in B_b^G} P_{i,t} + \sum_{h \in B_b^{NH}} P_{h,t} + \sum_{w \in B_b^{NW}} P_{w,t} = \sum_{d \in B_b^D} P_{d,t}^d + \\ \sum_{l \in L_{f,b}} PL_{l,t} - \sum_{l \in L_{t,b}} PL_{l,t} \end{aligned} \quad (8)$$

رابطه (۹) محدودیت پخش بار DC را نشان می‌دهد. این محدودیت بیان می‌کند که پخش بار بر روی خطوط انتقال به اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها و امپدانس هر کدام از این خطوط بستگی دارد.

$$\begin{aligned} PL_{l,t} = \frac{\theta_{j,t} - \theta_{o,t}}{X_{j,o}} \\ |PL_{l,t}| \leq PL_l^{max} \end{aligned} \quad (9)$$

رابطه (۱۰) محدودیت انقطاع توان بادی را بیان می‌کند. انقطاع توان بادی زمانی اتفاق می‌افتد که شیب کاهشی واحدهای حرارتی ناکافی باشد و یا برای انتقال توان بادی موجود، تراکم وجود داشته باشد (خدایار و همکاران، ۲۰۱۳).

$$P_{w,t} + P_{d,w,t} = P_{f,w,t} \quad (10)$$



شکل (۲): همه‌انگهی نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره‌ای

بنابراین توان همه‌انگهی p_c تحویلی به شبکه در این ساعات برابر صفر خواهد بود (خدایار و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی هنگامی که p_c تحویلی به شبکه در علامت مثبت و یا منفی، متغیر در نظر گرفته شود به گونه‌ای که p_c هم بتواند مثبت و هم بتواند منفی شود، آنگاه نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در زمان‌هایی که توان بادی صفر می‌شود قادر خواهد بود تا از توان نیروگاه‌های بخاری برای پمپاژ آب استفاده کند (شاهیده‌پور و همکاران، ۲۰۱۲).

فرمول‌بندی پیشنهادی مسئله SCUC واحدهای حرارتی، بادی و تلمبه ذخیره‌ای

تابع هدف

هدف از رابطه (۵)، حداقل کردن هزینه عملکرد کل سیستم است.

$$\begin{aligned} \text{Min} [&\sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} (F_{c,i}(P_{i,t}) + SU_{i,t} + SD_{i,t}) + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{h=1}^{NH} C_{h,t}] + \\ &[\sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} F_{c,i}^r(\Delta_{i,t}^{max}) + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{h=1}^{NH} C_{h,t}^r] + \\ &[\sum_{s=1}^{NS} P^s (\sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} F_{c,i}(P_{i,t}^s) + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{h=1}^{NH} C_{h,t}^s)] \end{aligned} \quad (5)$$

قسمت اول در رابطه (۵) هزینه عملکرد حالت پایه به همراه پیش‌بینی ساعتی بار و تولید بادی روز پیش مربوط به نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را بیان می‌کند. قسمت دوم در تابع هزینه، هزینه عمل اصلاحی شامل هزینه در دسترس بودن واحد حرارتی برای تهیه رزروهای چرخان و همچنین هزینه تغییر وضعیت مشارکت واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای

محدودیت‌های مربوط به نیروگاه حرارتی

رابطه (۱۱) محدودیت توان تولیدی واحدهای حرارتی را بیان می‌کند.

$$P_{i,min} \cdot I_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{i,max} \cdot I_{i,t} \quad (11)$$

رابطه (۱۲) محدودیت میزان رزرو ساعتی واحدهای حرارتی را بیان می‌کند. در این رابطه $\Delta_{i,t}^{max}$ ظرفیت رزرو چرخان است.

$$\sum_i (p_{i,t}^{max} \cdot I_{i,t} - D_t) \geq \Delta_{i,t}^{max} \quad (12)$$

رابطه (۱۳) محدودیت حداقل زمان روشن بودن و رابطه (۱۴) محدودیت حداقل زمان خاموش بودن واحدهای حرارتی را بیان می‌کند.

$$[X_{i,(t-1)}^{on} - T_i^{on}] \cdot [I_{i,(t-1)} - I_{i,t}] \geq 0 \quad (13)$$

$$[X_{i,(t-1)}^{off} - T_i^{off}] \cdot [I_{i,t} - I_{i,(t-1)}] \geq 0 \quad (14)$$

روابط (۱۵) و (۱۶) محدودیت شیب افزایشی و کاهشی واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد.

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR_I \cdot I_{i(t-1)} + P_i^{min} \cdot (I_{it} - I_{i(t-1)}) + P_i^{max} \cdot (1 - I_{it}) \quad (15)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR_I \cdot I_{it} + P_i^{min} \cdot (I_{i(t-1)} - I_{it}) + P_i^{max} \cdot (1 - I_{i(t-1)}) \quad (16)$$

رابطه (۱۷) محدودیت آلودگی واحدهای حرارتی را مدل می‌کند. در این رابطه $F_{e,i}^{ET}$ تابع آلودگی واحدهای حرارتی است. این تابع برای جلوگیری از غیرخطی شدن مدل همانند تابع هزینه نیروگاه به صورت تکه‌ای خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{NG} (F_{e,i}^{ET}(P_{i,t}) + SU_{e,i}^{ET} + SD_{e,i}^{ET}) \leq EMS_{max}^{ET} \quad \forall i, ET = \{CO_2\} \quad (17)$$

محدودیت‌های مربوط به تلمبه‌ذخیره‌ای

رابطه (۱۸) محدودیت توان خالص خروجی واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای را بیان می‌کند.

$$P_{h,t} = P_{g,h,t} - P_{p,h,t} \quad (18)$$

روابط (۱۹) و (۲۰) محدودیت دبی واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای و روابط (۲۱) و (۲۲) محدودیت تولید و پمپاژ واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای را نشان می‌دهد.

$$q_{g,h}^{min} \cdot I_{g,h,t} \leq q_{g,h,t} \leq q_{g,h}^{max} \cdot I_{g,h,t} \quad (19)$$

$$q_{p,h}^{min} \cdot I_{p,h,t} \leq q_{p,h,t} \leq q_{p,h}^{max} \cdot I_{p,h,t} \quad (20)$$

$$P_{g,h}^{min} \cdot I_{g,h,t} \leq P_{g,h,t} \leq P_{g,h}^{max} \cdot I_{g,h,t} \quad (21)$$

$$P_{p,h}^{min} \cdot I_{p,h,t} \leq P_{p,h,t} \leq P_{p,h}^{max} \cdot I_{p,h,t} \quad (22)$$

رابطه (۲۳) محدودیت دبی خالص و روابط (۲۴) و (۲۵) محدودیت حجم آب نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را مدل می‌کند. رابطه (۲۶) بیان می‌کند که حجم اولیه و نهایی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای باید یکسان باشد.

$$q_{h,t} = q_{g,h,t} - q_{p,h,t} \quad (23)$$

$$VO_{h,t} = VO_{h,(t-1)} - q_{h,t} \quad (24)$$

$$VO_{h,t}^{min} \leq VO_{h,t} \leq VO_{h,t}^{max} \quad (25)$$

$$VO_{h,0} = VO_{h,NT} \quad (26)$$

رابطه (۲۷) محدودیت توان خالص خروجی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را بیان می‌کند.

$$P_{h,t} \leq P_{g,h}^{max} \cdot I_{g,h,t} - P_{p,h}^{min} \cdot I_{p,h,t}$$

$$P_{h,t} \geq P_{g,h}^{min} \cdot I_{g,h,t} - P_{p,h}^{max} \cdot I_{p,h,t} \quad (27)$$

رابطه (۲۸) محدودیت هزینه جابه‌جایی بین وضعیت‌های نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. این محدودیت برای حالت بدون سناریو در نظر گرفته می‌شود. تنها هزینه نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای هزینه‌های مربوط به تغییر وضعیت بین حالت‌های تولید، پمپاژ و بیکاری است. هزینه تغییر وضعیت از حالت پمپاژ و یا تولید به حالت بیکاری را برابر با ۱۰ درصد هزینه‌های تغییر وضعیت بین حالات دیگر در نظر می‌گیریم (گارسیا و همکاران، ۲۰۰۸). در این رابطه $C_{h,t}$ کل هزینه جابه‌جایی از حالت mm به حالت mn برای واحد h در زمان t است.

$$Ct_{mm-mn,h,t} + TR_{mm-mn,h} [1 - I_{mm,h,t} - I_{mn,h,t+1}] \geq 0$$

$$Ct_{mm-mn,h,t} \geq 0$$

$$C_{h,t} = \sum_{mm} \sum_{mn} Ct_{mm-mn,h,t} \quad (28)$$

رابطه (۲۹) محدودیت هزینه جابه‌جایی بین وضعیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را بین حالت بدون سناریو و حالت سناریو بیان می‌کند.

$$Ct_{mm-mn,h,t}^r + TR_{mm-mn,h} [1 - I_{mm,h,t} - I_{mn,h,t+1}^s] \geq 0$$

$$Ct_{mm-mn,h,t}^r \geq 0$$

$$C_{h,t}^r = \sum_{mm} \sum_{mn} Ct_{mm-mn,h,t}^r \quad (29)$$

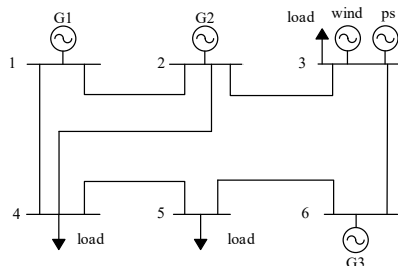
رابطه (۳۰) محدودیت هزینه جابه‌جایی بین وضعیت‌های نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را در سناریوهای مختلف بیان می‌کند.

$$Ct_{mm-mn,h,t}^s + TR_{mm-mn,h} [1 - I_{mm,h,t} - I_{mn,h,t+1}^s] \geq 0$$

$$Ct_{mm-mn,h,t}^s \geq 0$$

$$C_{h,t}^s = \sum_{mm} \sum_{mn} Ct_{mm-mn,h,t}^s \quad (30)$$

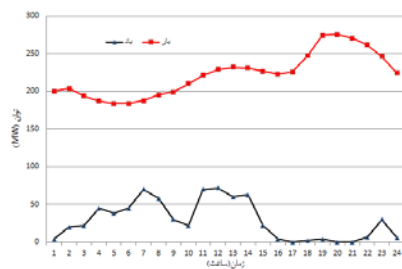
(۲۰۱۳)، خطوط انتقال در جدول (۱)، ضرایب تابع آلودگی ژنراتورها در جدول (۲) و اطلاعات مربوط به نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در جدول (۳) آورده شده است. در این شبیه‌سازی تمامی متغیرهای تولیدی توان برحسب مگاوات و تمامی هزینه‌ها بر حسب دلار است.



شکل (۳): سیستم قدرت ۶ باس مورد بررسی

در این مقاله جهت بررسی روش پیشنهادی ۳۰۰۰ سناریو ساخته شده و سپس با استفاده از روش کاهش سناریو در نرم-افزار GAMS (الگوریتم Scenred) تعداد سناریوها بر اساس بیشترین احتمال وقوع و بهترین وضعیت نشان دادن جبران عدم قطعیت توان بادی توسط نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به تعداد ۱۲ سناریو کاهش پیدا کرده است. در ادامه برای نشان دادن رفع مشکل عدم قطعیت توان بادی، توان هماهنگی میان واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای در یکی از این سناریوها بررسی می‌شود.

شکل (۴) نمودار بار و تولید بادی روزانه سیستم قدرت مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل (۴): پروفیل بار و باد پیش‌بینی شده برای ۲۴ ساعت

جدول (۱): اطلاعات خطوط انتقال

خط	از باس	به باس	امپدانس (P.u)	ظرفیت خط (MW)
۱	۱	۲	۰/۱۷۰	۹۷
۲	۱	۴	۰/۲۵۸	۷۰۰
۳	۲	۴	۰/۱۹۷	۱۱۳
۴	۵	۶	۰/۱۴۰	۸۱
۵	۳	۶	۰/۰۱۸	۱۲۱
۶	۲	۳	۰/۰۳۷	۱۱۱
۷	۴	۵	۰/۰۳۷	۱۰۳

رابطه (۳۱) و (۳۲) محدودیت هماهنگی میان نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای و مزارع بادی را بیان می‌کند.

$$\begin{cases} \sum_t P_{h,t} + \sum_t P_{w,t} = E_{C,w,h} \forall W \in S_{C,h} \\ \sum_t P_{h,t}^S + \sum_t P_{w,t}^S = E_{C,w,h}^S \forall W \in S_{C,h} \end{cases} \quad (31)$$

در این رابطه $E_{C,w,h}$ انرژی ارائه شده به وسیله هماهنگی واحد بادی w و نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای h است.

$$\begin{cases} P_{h,t} + P_{w,t} = P_{C,w,h} \forall W \in S_{C,h} \\ P_{h,t}^S + P_{w,t}^S = P_{C,w,h}^S \forall W \in S_{C,h} \end{cases} \quad (32)$$

در این رابطه $P_{C,w,h}$ توان تولید شده به وسیله هماهنگی واحد بادی w و نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای h توان تولید شده به وسیله هماهنگی واحد بادی w و نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای h در سناریو s است. در این مقاله یک بار $E_{C,w,h}$ و $P_{C,w,h}$ مثبت و یک بار متغیر در علامت در نظر گرفته می‌شود.

در حالت سناریو، قیود سیستمی و واحدی هرکدام از منابع تولیدی مشابه قیود (۲۷)-(۸) است. با این تفاوت که متغیرهای حالت پایه جای خود را به متغیرهای متناظر در حالت سناریو می‌دهند. با اضافه شدن این اندیس‌ها، روابط مربوط به حالت پایه به روابط مربوط به سناریوها تبدیل می‌شوند.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا سیستم تحت مطالعه ارائه می‌گردد و در ادامه نتایج شبیه‌سازی حاصل از روش پیشنهادی بر روی این سیستم مورد بحث قرار می‌گیرد.

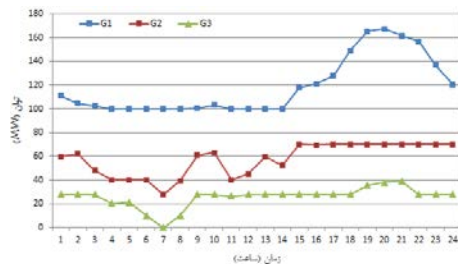
سیستم تحت مطالعه

برای بررسی کارایی مدل‌های ارائه شده از یک سیستم قدرت ۶ باس استاندارد IEEE مطابق با شکل (۳) استفاده شده است. این سیستم شامل ژنراتورهای $G1$ و $G2$ و $G3$ ، یک مزرعه بادی w و یک واحد تلمبه‌ذخیره‌ای ps است. ژنراتورها به ترتیب بر روی باس‌های ۱ و ۲ و ۶ قرار گرفته‌اند. همچنین مزرعه بادی w و واحد تلمبه‌ذخیره‌ای ps به باس شماره ۵ متصل شده‌اند. اگر واحد تلمبه‌ذخیره‌ای و واحد بادی بر روی باس‌هایی دور از همدیگر قرار گرفته باشند ممکن است که هماهنگی تولید به دلیل تراکم شبکه به خوبی انجام نگیرد خدایار و همکاران (۲۰۱۳). میزان توزیع بار به ترتیب ۳۵٪ بر روی باس ۳، ۳۵٪ بر روی باس ۴ و ۳۰ درصد بر روی باس ۵ است. مزرعه بادی مورد نظر دارای ظرفیت ۷۵ MW است. اطلاعات مربوط به ژنراتورها در پژوهش خدایار و همکاران

میزان تولید هر کدام از واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد. علت خاموش شدن واحد شماره ۳، کم بودن حداقل زمان لازم (۱ ساعت) برای خاموشی این واحد است.

جدول (۴): وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی در حالت ۱

واحد	۱	ساعت (۱-۱۲)										۱۲	
G1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G2	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G3	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
واحد	۱۳	ساعت (۱۳-۲۴)										۲۴	
G1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G2	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G3	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱



شکل (۵): تولیدات واحدهای حرارتی در حالت ۱

حالت ۲: در این حالت از هماهنگی، واحد تلمبه‌ذخیره‌ای به‌صورت هماهنگ با واحد بادی به واحدهای حرارتی اضافه و توان هماهنگی واحدهای حرارتی و مزرعه بادی مثبت در نظر گرفته می‌شود. هزینه بهره‌برداری شبکه مورد نظر برابر ۱۱۴۴۴۸/۸۷ دلار و میزان آلودگی واحدهای حرارتی برابر 33832 kgCO_2 می‌شود. جدول (۵) وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که واحد شماره ۱، ۱۱، واحد شماره ۲، ۱۵ و واحد شماره ۳، ۵ ساعت در برنامه روزانه شرکت داده شده‌اند. شکل (۶) میزان تولید واحدهای حرارتی را در حالت ۲ نشان می‌دهند. شکل (۷) توان هماهنگی واحد تلمبه‌ذخیره‌ای و مزارع بادی را در سناریو ۱۲ و برای ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. این نمودار به‌خوبی هماهنگی واحد تلمبه‌ذخیره‌ای و مزرعه بادی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال توان پیش‌بینی شده بادی در ساعت ۱۹، ۴ مگاوات است که به دلیل عدم قطعیت، این توان قابل استحصال نیست.

هزینه تغییر وضعیت نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای برابر ۱۰۰ دلار و هزینه خاموشی این نیروگاه ۱۰ درصد هزینه روشنی آن در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲): ضرایب آلودگی واحدهای حرارتی

واحد	A	b	C
	(KgCO_2/h)	$(\text{KgCO}_2/\text{mwh})$	$(\text{KgCO}_2/\text{mw}^2\text{h})$
G1	۰	۰/۰۰۰۳۰۴	۱۹/۹۴۵
G2	۰	۰/۰۰۰۳۱۲	۱۸/۹۳۳
G3	۰	۰/۰۰۳۰۰۰	۱۷/۷۳۴

جدول (۳): اطلاعات واحد تلمبه‌ذخیره‌ای

واحد تلمبه ذخیره‌ای ps				
q_p^{min}	p_g^{max}	p_g^{min}	p_p^{max}	p_p^{min}
Hm^3/h	Hm^3/h	Hm^3/h	Hm^3/h	Hm^3/h
۱/۰	۱۸۰	۱۶	۲۴۰	۲۰
q_p^{max}	VO^{max}	VO^{min}	q_g^{max}	q_g^{min}
Hm^3/h	Hm^3	Hm^3	Hm^3/h	Hm^3/h
۱	۱۰	۵/۱	۱	۱/۰

در این مقاله برنامه‌ریزی SCUC در سه حالت پیشنهاد شده است.

حالت ۱: بهره‌برداری از نیروگاه‌های بخاری و بادی با در نظر گرفتن اثرات آلودگی.

حالت ۲: بهره‌برداری از نیروگاه‌های بخاری و بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن اثرات آلودگی و مثبت بودن توان هماهنگی P_c .

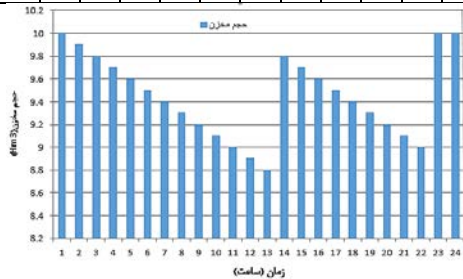
حالت ۳: بهره‌برداری از نیروگاه‌های بخاری و بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن اثرات آلودگی و اینکه توان هماهنگی P_c می‌تواند مثبت و یا منفی باشد (روش پیشنهادی).

بررسی نتایج

حالت ۱: در این حالت، هماهنگی میان سه واحد بخاری به همراه یک واحد بادی بررسی می‌شود. هزینه بهره‌برداری مزرعه بادی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. در این حالت هزینه بهره‌برداری شبکه مورد نظر $197058/15$ دلار و میزان آلودگی واحدهای حرارتی برابر 94142 kgCO_2 می‌شود. جدول (۴) وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که مشارکت واحدهای ۱ و ۲، ۲۴ ساعت و واحد شماره ۳، ۲۳ ساعت است. شکل (۵)

جدول (۶): وضعیت مشارکت واحد ps در حالت ۲

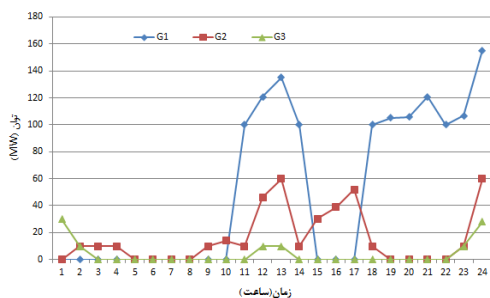
واحد ↓	۱	ساعت (۱-۱۲)										۱۲	
PS	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
واحد ↓	۱۳	ساعت (۱۳-۲۴)										۲۴	
PS	g	p	g	g	g	g	g	g	g	g	p	g	i



شکل (۸): حجم مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حالت ۲

حالت ۳: در این حالت از هماهنگی، واحد تلمبه‌ذخیره‌ای به‌صورت هماهنگ با واحد بادی به واحدهای حرارتی اضافه می‌شود. با این تفاوت که توان هماهنگی P_c می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. هزینه بهره‌برداری از شبکه در این حالت برای یک دوره ۲۴ ساعت برابر $10006/99$ دلار و میزان آلودگی ناشی از تولیدات واحدهای حرارتی برابر 33931 kgCO_2 می‌شود. با توجه به جدول (۷) واحد شماره ۱، ۱۱، واحد شماره ۲، ۱۵ و واحد شماره ۳، ۶ ساعت در برنامه‌ریزی روز پیش شرکت داده شده‌اند. شکل (۹) میزان تولید واحدهای حرارتی را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهند.

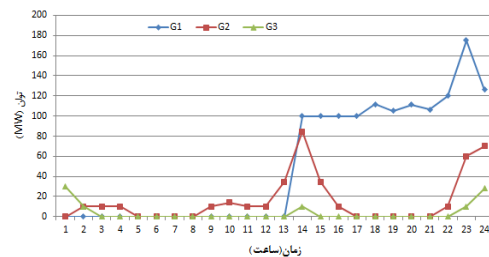
شکل (۱۰) توان هماهنگی واحد تلمبه‌ذخیره‌ای و مزارع بادی را در سناریو ۱۲ و برای ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در این حالت نمودار نشان می‌دهد که P_c در ۲۴ ساعت مقداری منفی است. منفی بودن توان هماهنگی به معنای عدم توانایی مزرعه بادی برای ارائه توان مورد نیاز نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای برای پمپاژ آب است. در این حالت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای برای پمپاژ آب می‌تواند از توان نیروگاه‌های حرارتی نیز استفاده کند (مانند زمان ۲۴ و به مقدار $18/74$ مگاوات).



شکل (۹): تولیدات واحدهای حرارتی در حالت ۳

جدول (۵): وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی در حالت ۲

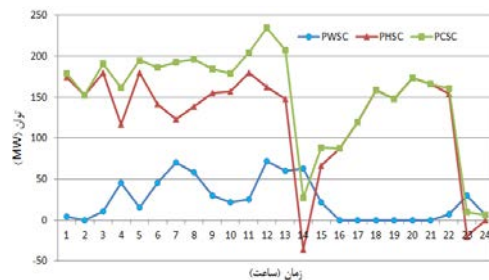
واحد ↓	۱	ساعت (۱-۱۲)										۱۲	
G1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
G2	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
G3	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
واحد ↓	۱۳	ساعت (۱۳-۲۴)										۲۴	
G1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
G2	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G3	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱



شکل (۶): تولیدات واحدهای حرارتی در حالت ۲

در این ساعت نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با تولید توانی معادل $147/57$ مگاوات علاوه بر جبران عدم قطعیت به کاهش هزینه بهره‌برداری نیز کمک می‌کند. در این حالت از بهره‌برداری اگر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نیاز به پمپاژ آب داشته باشد و توان بادی صفر باشد (مانند ساعت ۲۴)، به دلیل مجاز نبودن استفاده از توان نیروگاه حرارتی، توان هماهنگی P_c برابر صفر می‌شود.

جدول (۶) وضعیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت ۲ را در افق ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در این جدول g ، p و i به ترتیب حالت‌های تولید، پمپاژ و بیکاری هستند. همچنین تغییرات حجم مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در افق ۲۴ ساعت در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۷): هماهنگی واحد بادی و ps در سناریو ۱۲ در حالت ۲

این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که روش پیشنهادی قادر است ضمن مدیریت عدم قطعیت بار و باد و کاهش قابل توجه میزان آلودگی نسبت به حالت پایه، هزینه بهره‌برداری را کاهش دهد.

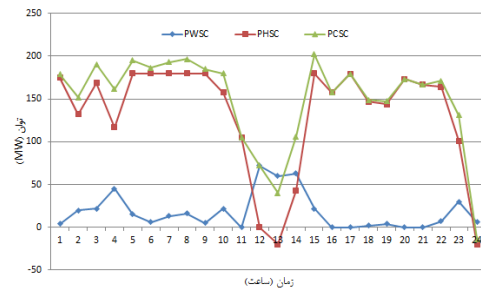
نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش برنامه‌ریزی تصادفی امنیت مقید مشارکت واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای در کنار واحدهای حرارتی ارائه شده است. مدل پیشنهادی بیان می‌کند که واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای به واحدهای حرارتی برای جبران عدم قطعیت توان تولیدی مزارع بادی در حالتی اضافه شود که علاوه بر واحدهای بادی، بتوان از واحدهای حرارتی برای تأمین توان مورد نیاز برای پمپاژ آب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای استفاده شود. نتایج مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که اگر در سیستم قدرت برای پمپاژ آب نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای از واحدهای حرارتی در کنار واحدهای بادی استفاده کنیم، علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، میزان کل آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی نیز تغییر نمی‌کند. این در حالی است که اگر برای پمپاژ آب فقط از واحدهای بادی استفاده کنیم با همین میزان آلودگی، هزینه بهره‌برداری بیشتری برای سیستم قدرت در پی خواهد داشت. از این‌رو مشارکت دادن واحدهای حرارتی باعث جابجایی ساعات تولید و پمپاژ واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای می‌شود. به همین دلیل اختلاف میان آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در دو حالت بهره‌برداری از نیروگاه‌های بخاری و بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با در نظر گرفتن اثرات آلودگی و مثبت بودن توان هماهنگی P_c و روش پیشنهادی بسیار ناچیز و قابل اغماض است. اینکه توان تولیدی واحدهای حرارتی در هر دو حالت یکسان است، اما به دلیل جابجایی زمان پمپاژ واحد تلمبه ذخیره‌ای به ساعات ارزانی برق، هزینه بهره‌برداری شبکه به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش هزینه با کاهش قابل توجه میزان آلودگی روش پیشنهادی نسبت به حالت پایه بهره‌برداری از نیروگاه‌های بخاری و بادی با در نظر گرفتن اثرات آلودگی است.

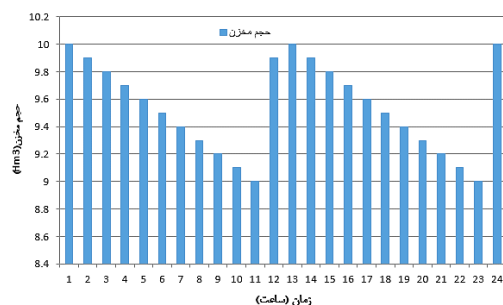
مراجع:

1- Abreu, Lisias. Wind power generation and dispatch in competitive power markets. ProQuest, 2008.

شکل (۱۱) تغییرات حجم مخزن آب، جدول (۷) وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی و جدول (۸) وضعیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای را در افق ۲۴ ساعت نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): هماهنگی واحد بادی و ps و در سناریو ۱۲ در حالت ۳



شکل (۱۱): حجم مخزن نیروگاه ps در حالت ۳

جدول (۷): وضعیت مشارکت واحدهای حرارتی در حالت ۳

واحد	ساعت (۱-۱۲)										
G1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
G2	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
G3	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
واحد	ساعت (۱۳-۲۴)										
G1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱
G2	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱
G3	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱

جدول (۸): وضعیت مشارکت واحدهای ps در حالت ۳

واحد	ساعت (۱-۱۲)										
PS	p	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
واحد	ساعت (۱۳-۲۴)										
PS	p	g	g	g	g	g	g	g	g	g	p

در جدول (۹) هزینه بهره‌برداری و میزان آلودگی در هر سه حالت به صورت خلاصه بیان شده است.

جدول (۹): هزینه بهره‌برداری و آلودگی در سه حالت مورد بررسی

واحد	هزینه بهره‌برداری دلار	میزان آلودگی $kgCO_2$
حالت ۱	۱۹۷۰۵۸/۱۵	۹۴۱۴۲
حالت ۲	۱۱۴۴۴۸/۸۷	۲۳۹۳۱
حالت ۳	۱۰۰۰۰۶/۹۹	۳۳۸۳۲

- 11- Shahidehpour, M., & Khodayar, M. (2012, July). Coordination of wind and pumped-storage hydro units for managing transmission security. In 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting.
- 12- Wang, J, Shahidehpour, M., & Li, Z. (2008). Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1319-1327.
- 2- Banerjee, S., Dasgupta, K., & Chanda, C. K. (2016). Short term hydro-wind-thermal scheduling based on particle swarm optimization technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 275-288.
- 3- Garcia-Gonzalez, J., de la Muela, R. M. R., Santos, L. M., & Gonzalez, A. M. (2008). Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 460-468.
- 4- Glasserman, P. (2003). Monte Carlo simulation method in financial engineering.
- 5- Haddadian, G., Khalili, N., Khodayar, M., & Shahidehpour, M. (2015). Security-constrained power generation scheduling with thermal generating units, variable energy resources, and electric vehicle storage for V2G deployment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 498-507.
- 6- Javadi, M. S., Meskarbashi, A., Azami, R., Hematipour, G. and Javadinasab, A. (2011). "Emission controlled security constrained unit commitment considering hydro-thermal generation units." *International Review of Modeling and Simulation*. 4(6), 3243-3250.
- 7- Khodayar, M. E., Shahidehpour, M., & Wu, L. (2013). Enhancing the dispatchability of variable wind generation by coordination with pumped-storage hydro units in stochastic power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2808-2818.
- 8- Kiran, B. D. H., & Kumari, M. S. (2016). Demand response and pumped hydro storage scheduling for balancing wind power uncertainties: A probabilistic unit commitment approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 114-122.
- 9- Li, T., & Shahidehpour, M. (2005, November). Price-based Unit Commitment: a case of Lagrangian Relaxation Versus Mixed 16-Integer Programming. *IEEE Transactions on Power Systems*. 20(4), 2015-2025.
- 10- Ramirez, M. V., Escobar, A. H., & Garces, A. (2015). Hydrothermal Coordination Considering Wind and Pumping Storage Unit in the Colombian Smart Grid.