

بررسی عملکرد هماهنگ نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای

در بازار روز-پیش و خدمات جانبی

زهره فرقانی^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، رحمت الله هوشمند^۲ دانشیار، امین خدابخشیان^۳ دانشیار، معین پرستگاری^۴ دانشجوی دکتری

۱- eng-forghani@hotmail.com, ۲- hoosmand_r@eng.ui.ac.ir, ۳- amin.kh@eng.ui.ac.ir, ۴- parastegari_m@yahoo.com

گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان - ایران

چکیده: در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی در برنامه‌ریزی تولید و مشارکت نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای به دو صورت مستقل و هماهنگ، در بازارهای روز-پیش و خدمات جانبی ارائه می‌شود. همچنین ارزش ریسک عملکرد این دو نیروگاه تحت عملکرد مستقل و هماهنگ محاسبه و مقایسه می‌گردد. ماهیت غیرقطعی توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و قیمت بازار، این مسئله برنامه‌ریزی را به یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی تبدیل می‌کند. از طرف دیگر، نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، دارای توانایی مدیریت نامتعادلی‌های مثبت و منفی انرژی در طول زمان می‌باشد. لذا با برنامه‌ریزی همزمان نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با نیروگاه بادی، سود این مجموعه در مقایسه با عملکرد جداگانه این نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد. عدم قطعیت قیمت بازار و میزان توان بادی با استفاده از درخت سناریو مدل‌سازی می‌شود. روش پیشنهاد شده بر روی نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای سیستم استاندارد ۱۱۸ باس IEEE تست گردیده است. همچنین با بررسی ریسک عملکرد برنامه‌ریزی، سطح اعتماد مجموعه مورد ارزیابی قرار گرفته و مقدار VAR تعیین می‌گردد. بررسی نتایج سود و ریسک در شرایط عملکرد هماهنگ و مستقل، مؤید افزایش سود و ارزش ریسک در عملکرد هماهنگ نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، بازار روز-پیش، خدمات جانبی، مزرعه بادی، نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، ارزیابی ارزش ریسک.

Joint Operation of Wind Farms and Pump-storage Plants in Ancillary Services and Power Markets

Zohreh Forghani, Rahmat Allah Hooshmand, Amin Khodabakhshian, Moein Parastegari
Electrical Engineering Department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract: In this paper, a new bidding strategy in generation scheduling and commitment is proposed for uncoordinated and joint scheduling of wind farms and pump-storage power plants in the day-ahead electricity markets and ancillary services. Also, the value at risk (VaR) of joint and uncoordinated operations (JO and UO) for these two plants is calculated and evaluated. Uncertainties of wind power generation (WPG) and the market prices convert this scheduling problem to a stochastic scheduling problem. On the other hand, the pump-storage plants have the ability to manage of positive and negative energy imbalances over time. Therefore, with joint scheduling of pump-storage plants with wind units, the benefit of these plants is increased compared with UO of these plants. Uncertainty of market price and amount of WPG are modeled using scenario tree. The proposed method is tested on pump-storage and wind farm of IEEE 118-bus standard system. Also, by evaluating the scheduling operation risk, the VaR level has determined. The results of the benefit and risk for JO and UO of pump storage and wind farm verifies that these joint operations improve the benefit and risk values of the system.

Keywords: Stochastic programming, Day-ahead electricity market, Ancillary service, Wind farm, Pump-storage power plant, VaR.

تاریخ ارسال مقاله: ۸۹/۱۲/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۰/۹/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: رحمت اله هوشمند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه اصفهان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تولید توان بادی در سراسر جهان افزایش چشمگیری داشته است. نیروگاه‌های بادی از جمله منابعی هستند که امروزه به لحاظ مزایای فراوان، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته‌اند. انرژی باد تابع شرایط آب و هوا است و دارای رفتار کاملاً تصادفی است. بازه زمانی بین تسویه بازار و زمان حقیقی بیشتر از ۳۶ ساعت است [۱]؛ لذا هرگونه اختلافی بین تعهد ارائه شده در بازار و تولید واقعی، منجر به جریمه بازیگر بازار می‌شود. جرایم ناشی از عدم ارائه توان تعهد شده در بازار، پرهزینه می‌باشد که این مسئله، سود نیروگاه‌های بادی را کاهش می‌دهد.

به منظور کاهش جرایم ناشی از عدم ارائه توان تعهد شده در بازار، نیروگاه‌های بادی از دیگر واحدهای رایج به عنوان مکمل در کنار خود استفاده می‌نمایند. یکی از این واحدها، نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای است که توانایی بالایی در مدیریت نامتعادلی‌های مثبت و منفی انرژی نیروگاه‌های بادی دارد. واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با انتقال برنامه‌ریزی شده آب بین دو مخزن بالایی و پایینی، نامتعادلی‌های بهره‌برداری زمان حقیقی دیگر واحدها را به خوبی پوشش می‌دهند.

از طرف دیگر، به منظور اصلاح بهره‌برداری زمان واقعی، از ذخیره چرخان و غیرچرخان استفاده می‌گردد [۲]. توان‌های ذخیره در بازار خدمات جانبی عرضه می‌شوند. در این شرایط، تعیین استراتژی مشارکت نیروگاه‌ها و بالخصوص واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازارهای انرژی و ذخیره از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر برنامه‌ریزی مشارکت در بازارهای انرژی و ذخیره به صورت همزمان انجام پذیرد، سود شرکت کنندگان افزایش می‌یابد [۳].

در [۴] با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، یک الگوریتم تسویه بازار کوتاه مدت با وجود تولید بادی در سیستم طراحی شده است. در [۵] مدلی جهت بهره‌برداری هماهنگ مزرعه بادی و واحد برق-آبی با هدف کاهش جریمه‌ها ارائه شده است. برنامه‌ریزی تصادفی مجموعه نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و بادی در بازار توان در [۱] انجام شده است. هدف این مسئله، تعیین استراتژی بهینه شرکت در بازار روز-پیش توان به منظور ماکزیمم سازی سود می‌باشد. در [۶، ۷]، برنامه‌ریزی هماهنگ مزارع بادی، تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و واحدهای حرارتی با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای ارائه و با کمک از الگوریتم کاهش سناریو PSO حل می‌شود. در [۸] سطح بهینه ذخیره چرخان با وجود حجم بالای توان بادی با استفاده از شبیه‌سازی Monte carlo تعیین می‌شود.

مراجع [۹، ۱۰] سطح ذخیره مورد نیاز را با وجود نفوذ پرحجم توان بادی تخمین می‌زنند. نکته مهم در روش‌های بیان شده آن است که هیچ یک، برنامه‌ریزی همزمان توان و ذخیره را برای مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های باد و قیمت انجام نداده‌اند.

در این مقاله، روش جدیدی در بهره‌برداری هماهنگ مزارع بادی و واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده است. به این منظور، توان پیشنهادی مجموعه نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازارهای انرژی و خدمات جانبی به نحوی تعیین می‌گردد که این مجموعه به حداکثر سود دست پیدا کند. همچنین با بررسی ریسک عملکرد برنامه‌ریزی، سطح اعتماد مجموعه مورد ارزیابی قرار گرفته و مقدار VAR تعیین می‌گردد. به این منظور، سه پارامتر تصادفی قیمت انرژی، رزرو و تولید بادی با استفاده از درخت سناریو مدل‌سازی می‌شود. نتایج شبیه سازی ارائه شده نشان می‌دهد که با این کار، جریمه‌های ناشی از اختلاف سطح تعهدات ارائه شده در بازار و تولیدات واقعی کاهش می‌یابد.

۲- ساختار بازار توان

۱-۲- بازار توان

در یک بازار روز-پیش، دینامیک قیمت‌های بازار اساساً دینامیک تقاضا را دنبال می‌کند. این پدیده دارای یک الگوی متناوب است که می‌تواند روزانه، هفتگی و یا فصلی باشد. با وجود این الگوهای متناوب، می‌توان قیمت‌های بازار را قبل از ورود به بازار پیش‌بینی کرد.

در بازار توان روز-پیش، بازیگران در قراردادهای ساعتی، جهت ۲۴ ساعت روز بعد وارد معامله می‌شوند. تولیدکنندگان و مصرف کنندگان توان، با توجه به قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار، پیشنهادات توان خود را برای روز آینده ارائه می‌کنند. بازار روز-پیش در ساعت ۱۲:۰۰ روز قبل بسته می‌شود. سپس اپراتور بازار به تصفیه بازار می‌پردازد. طی فرآیند تسویه، تعدادی از پیشنهادات پذیرفته و بقیه پیشنهادات رد می‌شوند.

در این حالت، نیروگاه‌ها جهت دستیابی به سود بیشتر از PBUC استفاده می‌نمایند. هدف از PBUC دستیابی تولیدکنندگان توان به حداکثر سود می‌باشد در این شرایط تابع هدف به صورت زیر تغییر می‌کند.

هرگونه اختلافی بین تعهد ارائه شده در بازار و تولید زمان واقعی منجر به جریمه بازیگر بازار می‌شود. با وجود این که هزینه نهایی تولید توان بادی قابل چشم پوشی است، ولی حجم انرژی تولیدی باد به صورت دقیق قابل پیش‌بینی نیست و در صورت پیش‌بینی هم قابل اطمینان نمی‌باشد؛ لذا جریمه‌های پرداختی در بازار برای واحد بادی بسیار پرهزینه است. به علاوه با افزایش دوره پیش‌بینی، خطای پیش‌بینی نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش خطای پیش‌بینی ۳۶ یا ۳۸ ساعت آینده، تولیدکنندگان بادی ملزم به پرداخت هزینه‌های نامتعادلی بالایی می‌باشند [۱].

هنگام معامله توان بادی در بازار کوتاه مدت، بازیگران مسئول متعادل سازی، باید تحت یکی از دو شرایط زیر با مالک توان بادی وارد بازی شود:

۱ باید فرض کرد که پیش‌بینی توان بادی، قطعی است و آن را به بازار پیشنهاد کرد.

۲ مقداری از توان بادی را به بازار پیشنهاد کرد که با توجه به سناریوهای ممکن تولید توان بادی و جریمه بازار، هزینه انتظار رفته ناشی از نامتعادلی‌ها در مینیمم مقدار قرار گیرد [۵]. در این مقاله استراتژی (۲) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سناریوهای توان بادی بر اساس پیش‌بینی روز-پیش سرعت باد، تولید شده است.

توان متغیر تولیدی نیروگاه بادی تابع سرعت باد است که سرعت باد نیز تابع شرایط آب و هوایی است؛ لذا با پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی، می‌توان توان تولیدی نیروگاه بادی را پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی آب و هوا دارای عدم قطعیت است. این خطا در پیش‌بینی توان مزارع بادی با افزایش دوره پیش‌بینی نیز افزایش می‌یابد.

توان تولیدی نیروگاه‌های بادی چالش‌های جدیدی در سیستم قدرت ایجاد می‌کند. این چالش‌ها عبارتند از:

۱- ممکن است تولید توان بادی در یک بازه زمانی در بازه وسیعی تغییر کند. به عبارت دیگر ممکن است در ابتدای یک ساعت مشخص، توان تولیدی در سطح بالایی قرار داشته باشد و در انتهای ساعت به شدت افت کند و یا بالعکس.

۲- ممکن است همبستگی بین تولید توان بادی و بار منفی باشد. این مسئله به ویژه موقعی پدیدار می‌شود که تولید توان بادی بیشتر از سطح بار سیستم باشد.

در دهه‌های اخیر، تکنیک‌های بسیاری جهت پیش‌بینی دقیق انرژی باد معرفی شده است. با این وجود، لازم است هنگام

$$Max \quad PF = RV - TC \quad (1)$$

که PF ، RV و TC به ترتیب، میزان سود خالص، درآمد نیروگاه و مجموع هزینه‌های برق شرکت‌های تولید کننده برق در طول زمان مورد بررسی می‌باشد.

مقدار RV ناشی از فروش توان نیروگاه‌ها به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$RV = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} [P_{l,t} \times \pi_l^e] \quad (2)$$

هرگونه اختلافی بین تعهد ارائه شده در بازار و تولید زمان واقعی منجر به جریمه بازیگر بازار می‌شود. در این صورت میزان دریافتی نیروگاه به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$RV = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} [P_{l,t} \times \pi_{l,s}^e - |P_{l,t} - \mu_{l,t}| \times \pi_l^e \times \omega_l^e] \quad (3)$$

۲-۲- بازار رزرو

خدمات رزرو (ذخیره) برای مدیریت کردن کمبودهای بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی توان طراحی شده‌اند و در بازار خدمات جانبی معامله می‌شوند. این خدمت شامل دو نوع رزرو چرخان و رزرو غیرچرخان می‌باشد. رزرو چرخان مربوط به نیروگاه‌های سنکرون با شبکه می‌باشد. مقدار ذخیره چرخان برابر است با مقداری از توان که نیروگاه می‌تواند در مدت ۱۰ دقیقه به تولید خود اضافه کند. ذخیره غیرچرخان مربوط به نیروگاه‌هایی است که می‌توانند در مدتی کمتر از یک ساعت در مدار قرار گرفته و تولید توان داشته باشند.

بازار خدمات جانبی همراه با بازار توان تسویه می‌شود. قابل ذکر است که قیمت خدمات جانبی تحت تأثیر قیمت انرژی است. در این شرایط، نیروگاه‌ها فقط مقدار رزرو درخواستی را در اختیار بار قرار داده و تمام ظرفیت تولید خود را به عنوان رزرو استفاده نمی‌کنند. به همین دلیل مصرف کننده نیز تنها برای مقدار رزرو و مورد نیاز خود بها پرداخت می‌نمایند. در این شرایط نیروگاه‌ها می‌توانند بخشی ذخیره چرخان خود را به جای بازار ذخیره چرخان در بازار ذخیره چرخان پیشنهاد بدهند، زیرا در مدتی کمتر از ده دقیقه می‌توانند این مقدار را تولید کنند. این در شرایطی است که عکس این مسئله امکان پذیر نیست. در این حالت، مقدار درآمد مجموعه نیروگاه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$RV = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \left[P_{l,t} \times \pi_{l,s}^e - |P_{l,t} - \mu_{l,t}| \times \pi_l^e \times \omega_l^e \right] + SR_{l,t} \times \pi_t^{Sr} + N.SR_{l,t} \times \pi_{t,s}^{N,sr} \quad (4)$$

۲-۳- نحوه مشارکت نیروگاه‌های بادی در بازار

یک عامل متغیر در عملکرد بازار وجود داشته باشد سطح اعتماد ۰/۹۵ از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\rho = \rho_0 \quad s.t : F(\rho_0) = \int_{\rho_0}^{\infty} f(RV).dRV = 0.95 \quad (۶)$$

که $f(x)$ تابع توزیع احتمال متغیر x می‌باشد. در این شرایط، مقدار سود به ازای وقوع $\rho = \rho_0$ تعیین کننده مقدار VaR می‌باشد. در حالت کلی در صورتی که m عامل با عدم قطعیت در سیستم وجود داشته باشد سطح اعتماد ۰/۹۵ به ازای تمام نقاطی که در رابطه زیر صدق کنند رخ خواهد داد:

$$\rho = [\rho_{0,1} \quad \rho_{0,2} \quad \dots \quad \rho_{0,m}]$$

$$s.t :$$

$$F([\rho_{0,1} \quad \rho_{0,2} \quad \dots \quad \rho_{0,m}]) \quad (۷)$$

$$= \int_{RV_0}^{\infty} f(RV(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)).dRV = 0.95$$

حال در صورتی که مقادیر قیمت توان، ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان و توان تولیدی نیروگاه بادی متغیر باشد، مسئله فوق چهار بعدی می‌شود.

$$\rho = [W_{i,t,0} \quad \pi_{t,o}^e \quad \pi_{t,0}^{SR} \quad \pi_{t,0}^{N.SR}]$$

$$s.t :$$

$$F([W_{i,t,0} \quad \pi_{t,o}^e \quad \pi_{t,0}^{SR} \quad \pi_{t,0}^{N.SR}]) \quad (۸)$$

$$= \int_{RV_0}^{\infty} f(RV(W_{i,t}, \pi_{t,o}^e, \pi_{t,0}^{SR}, \pi_{t,0}^{N.SR})).dRV = 0.95$$

۴- برنامه‌ریزی نیروگاه‌ها در بازار

۴-۱- برنامه‌ریزی نیروگاه بادی [۱]

در سال‌های اخیر، تولید توان بادی در سراسر جهان افزایش چشمگیری داشته است. نیروگاه‌های بادی از جمله منابعی هستند که امروزه به لحاظ مزایای فراوان، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته‌اند.

در ابتدا و با هدف حمایت از تولید این نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های بادی توان خود را بدون شرکت در بازار به صورت تضمینی به فروش می‌رسانند. در این شرایط با توجه به پایین بودن میزان تولیدی این نیروگاه‌ها تولید این واحدها تأثیری بر عملکرد بازار برق نداشت. با افزایش تعداد این نیروگاه‌ها و نتیجتاً توان تولیدی آن‌ها، این نیروگاه‌ها نیز ملزم به شرکت در بازار برق و ارائه پیشنهادات خود به بازار شدند. این مسئله در بازارهای اسپانیا، تگزاس، انگلستان و ولز اجرا شده است. نتیجتاً در بازار رقابت کامل ایجاد گردید [۱۱].

برنامه‌ریزی تولید و ارائه پیشنهاد به بازار، خطای پیش‌بینی را نیز مدنظر قرار داد.

۳- ریسک شرکت در بازار

۳-۱- تابع هدف برنامه‌ریزی با وجود عدم قطعیت

در بازار برق رقابتی، میزان سود و درآمد نیروگاه‌ها متأثر از پارامترهای مختلفی می‌باشد. در این شرایط، دو عامل اصلی بر قیمت توان نیروگاه‌ها تأثیر می‌گذارند. عامل اول، تقاضای سیستم، شرایط آب و هوایی و قیود شبکه انتقال است. عامل دوم نیز تأثیر عوامل روانی و ذهنی می‌باشد. این عوامل، باعث ایجاد عدم قطعیت در پیش‌بینی قیمت بازار توان، ذخیره و ذخیره غیر چرخان می‌شوند؛ لذا سود نیروگاه‌ها خود متأثر از سناریوهای قیمت به وقوع پیوسته می‌باشد. در این شرایط، واحدهای تولیدی سعی می‌کنند درآمد (یا سود) خود را به ازای سناریوهای مختلف قیمت بازار، حداکثر نمایند. بنابراین، تابع هدف مورد استفاده در برنامه‌ریزی تولید آن‌ها باید به گونه‌ای باشد که حاصل ضرب درآمد سناریوهای قیمت در احتمال وقوع آن سناریو حداکثر گردد؛ لذا خواهیم داشت :

objective function :

$$\sum_{s \in S} \rho_s \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} [(P_{l,t}) \times \pi_{t,s}^e + SR_{l,t} \times \pi_{t,s}^{sr}] \quad (۵)$$

$$+ N.SR_{l,t} \times \pi_{t,s}^{N.sr} - \omega_{t,s} \times |P_{l,t} - P_{l,t}^*|$$

۳-۲- مفهوم VAR و استفاده از آن جهت ارزیابی

در یک بازار رقابتی برق، ریسک نقش عمده‌ای را در ارزیابی واحدهای تولیدی ایفا می‌کند. اندازه‌گیری ریسک، نیازمند شاخص‌های قوی است تا عوامل مهم را در بر بگیرد. یک معیار مهم در تحلیل ریسک، VaR می‌باشد. معیار VaR تخمینی از مقدار ارزش دارایی است که می‌تواند در اثر نوسانات بازار در یک بازه زمانی خاص، با یک احتمال وقوع مفروض از دست برود. این احتمال مفروض، سطح اعتماد نامیده می‌شود که میزان قطعیت VaR را بیان می‌کند که معمولاً ۰/۹۵ یا (۰/۹۵) انتخاب می‌شود. این مقدار بدین معنی است که در ۰/۹۵ مواقع، زیان‌های شرکت‌کنندگان کمتر از VaR است و در ۰/۰۵ مواقع، زیان‌ها بیش از VaR خواهد بود. به زبان ریاضی، VaR متناظر با توزیع درصدی سود و زیان دارایی است که می‌تواند به صورت افت بالقوه در ارزش فعلی دارایی و یا به عنوان زیان نسبت به مقدار امید ریاضی در آن بازه زمانی تعبیر شود. این معیار، بسیاری از عوامل را به صورت ترکیبی در نظر می‌گیرد و عدد واحدی را به عنوان ارزیابی اثر ریسک ارائه می‌دهد. در صورتی که

با افزایش تعداد شاخه‌های درخت سناریو، دقت برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. در این تحقیق احتمال وقوع هر یک از سناریوها ثابت در نظر گرفته شده است.

۴-۲- برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای [۳،۱]

واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با انتقال آب بین دو مخزن بالایی و پایینی به ذخیره سازی و آزادسازی انرژی می‌پردازد. یک واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در یک زمان، تنها می‌تواند در یکی از سه مد پمپاژ، ژنراتور و خاموش فعالیت کند. مالک واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای می‌تواند در بازارهای چندگانه از جمله بازار توان و خدمات جانبی شرکت کند و با خرید و فروش انرژی، سود خود را افزایش دهد. به این، منظور مالکان این نیروگاه‌ها در بازارهای روز-پیش و لحظه‌ای یا قراردادهای دوجانبه شرکت می‌کنند.

آنچه که بسیار پراهمیت است، برنامه‌ریزی حجم مخازن و نرخ تخلیه و پمپاژ آب با توجه به قیود مربوط به مخازن است؛ به گونه‌ای که سود نیروگاه حداکثر گردد؛ لذا تابع هدف مسئله بهینه سازی، حداکثر شدن مجموع درآمد این نیروگاه در بازار است. درآمد بازار، درآمد حاصل از فروش انرژی در بازار انرژی و ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان در بازار خدمات جانبی با کسر هزینه‌ها است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های راه اندازی واحدهای پمپاژ و ژنراتور و جریمه‌های ناشی از عدم تولید توان متعهد شده در بازار است. رابطه (۱۱) تابع هدف مورد نظر جهت شرکت در بازارهای مختلف را نشان می‌دهد.

objective function :

$$\sum_{s \in S} \rho_s \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} [P_{l,t,s} \times \pi_{t,s}^e + SR_{l,t,s} \times \pi_{t,s}^{sr} - \omega_{t,s} \times |P_{l,t,s} - \mu_t| \times \pi_{t,s}^e + N \cdot SR_{l,t,s} \times \pi_{t,s}^{N,SR} - g \cdot st_{l,t,s} - p \cdot st_{l,t,s}] \quad (11)$$

Subject to:

$$v_{l,t} = v_{l,t-1} - qg_{l,t-1} + qp_{l,t-1} \quad (12)$$

$$v_{l,t=1} = v_{l,ini} \quad (13)$$

$$v_{l,t=T} = v_{l,fin} \quad (14)$$

$$qg_{l,min} \leq qg_{l,t} \leq qg_{l,max} \quad (15)$$

$$qp_{l,min} \leq qp_{l,t} \leq qp_{l,max} \quad (16)$$

$$P_{l,t} = P_{l,min}^g + P_{l,t}^g - P_{l,t}^p \quad (17)$$

$$P_{l,t}^g + SR_{l,t}^g + N \cdot SR_{l,t} \leq p_{l,max}^g \quad (18)$$

$$P_{l,t}^p + SR_{l,t}^p + N \cdot SR_{l,t} \geq -p_{l,max}^p \quad (19)$$

در این شرایط، ماهیت نامعین تولید نیروگاه های بادی موجب افزایش هزینه عدم تعادل این واحدها می‌گردد، به منظور کاهش این تأثیر به آن‌ها اجازه داده بودند دو ساعت قبل از شروع زمان تولید پیشنهاد خود را اصلاح نمایند.

با افزایش حجم تولید این واحدها ماهیت نامعین تولید نیروگاه های بادی تأثیر منفی بر روی امنیت و ذخیره سیستم قدرت گذاشت. در این شرایط بهره برداران تگزاس و اسپانیا برای کاهش نامعینی سیستم تصمیم گرفتند که شرایط حضور این واحدها در بازار برق را مشابه با واحدهای دیگر اعلام کردند [۱۱]. در این شرایط لازم بود این واحدها جهت کاهش جریمه عدم تعادل خود پیش بینی دقیقی از تولید خود داشته باشند [۱۱]. در این شرایط تابع هدف مسئله برنامه ریزی نیروگاه بادی، شامل درآمد حاصل از فروش توان در بازار توان با کسر جریمه‌های ناشی از عدم تولید توان تعهد شده در بازار است. رابطه (۹) این تابع هدف را نشان می‌دهد.

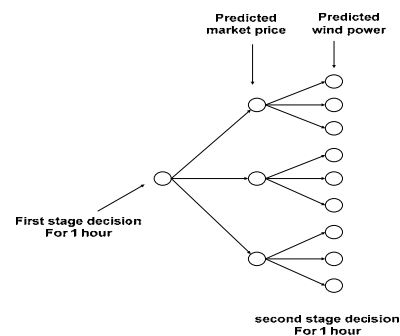
objective function :

$$\sum_{s \in S} \rho_s \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} [W_{i,t,s} \times \pi_{t,s}^e - \omega_{t,s} \times |W_{i,t,s} - \mu_t| \times \pi_{t,s}^e] \quad (9)$$

subject to:

$$W_{i,min} \leq \mu_t \leq W_{i,max} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) محدوده ارائه پیشنهاد به بازار را نشان می‌دهد. تولید پیشنهادی به بازار باید از حداکثر توان تولید نیروگاه کوچکتر باشد. از طرف دیگر، قیمت بازار، پارامتر دیگری است که به منظور ارائه پیشنهاد بهینه به بازار روز-پیش در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر هم دارای عدم قطعیت است. پیش‌بینی قیمت بازار در نحوه ارائه پیشنهاد به بازار مؤثر است؛ لذا دو پارامتر تصادفی توان تولیدی نیروگاه بادی و قیمت بازار، برنامه‌ریزی تولید واحدها را به یک برنامه تصادفی تبدیل می‌کند. یکی از راه های مدلسازی عدم قطعیت‌ها، استفاده از درخت سناریو می‌باشد. شکل (۱) شماتیکی از درخت سناریو برای یک ساعت از دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) : درخت سناریو برای یک ساعت از دوره برنامه‌ریزی

شده را بازیابی کرده و وارد بازار فروش می‌کنند. بدین ترتیب این واحدها، سود حاصل از فروش خود را افزایش می‌دهند.

مزارع بادی با توجه به عدم قطعیت در پیش‌بینی میزان تولیدشان، نیاز شدیدی به حمایت سایر نیروگاه‌های رایج از جمله واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای دارد. شکل (۲) شماتیکی از همکاری این دو واحد در کنار همدیگر را نشان می‌دهد. اگر صاحب مزرعه بادی در زمان حقیقی، انرژی مازادی نسبت به توان برنامه‌ریزی شده داشته باشد، با انتقال آب به مخزن بالایی (مد پمپاژ واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای) این انرژی مازاد را ذخیره می‌کند. بالعکس اگر در زمان حقیقی، کمبود توان داشته باشد، با تخلیه آب از مخزن بالایی به مخزن پایینی و سرازیر شدن آب بر روی توربین به بازیابی انرژی ذخیره شده می‌پردازد و کمبود خود را جبران می‌کند.

به دلیل طبیعت تغییرپذیر انرژی باد و جریمه ناشی از عدم تولید پیشنهادات، سود این نیروگاه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش سود در برابر هزینه تأسیس نیروگاه قابل قبول نیست؛ لذا با حمایت این نیروگاه توسط واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، این جریمه‌ها به شدت کاهش یافته و سود حاصله افزایش می‌یابد. برنامه‌ریزی واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با وجود سه پارامتر تصادفی صورت می‌گیرد. این سه پارامتر عبارتند از عدم قطعیت توان نیروگاه بادی، قیمت توان و زرو در بازار.

در این برنامه‌ریزی پیشنهادی، تنها یک پیشنهاد توسط مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای به بازار ارائه می‌شود. این پیشنهاد می‌تواند پیشنهاد خرید یا فروش انرژی باشد؛ لذا می‌توان گفت که هدف از حل این مسئله، تعیین پیشنهاد تولید مجموعه نیروگاهی می‌باشد. در این برنامه‌ریزی، تمام قیود مربوط به واحدها (که در برنامه‌ریزی انفرادی در نظر گرفته می‌شد) باید برآورده شود. رابطه (۲۴) تابع هدف پیشنهادی این برنامه ریزی را نشان می‌دهد:

objective function :

$$\sum_{s \in S} p_s \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} [(W_{i,t,s} + P_{l,t,s}) \times \pi_{i,s}^e + SR_{l,t,s} \times \pi_{i,s}^{sr} + N.SR_{l,t,s} \times \pi_{i,s}^{N.sr} - \omega_{i,s} \times |W_{i,t,s} + P_{l,t,s} - \mu_t| \times - g.st_{l,t,s} - p.st_{l,t,s}] \quad (24)$$

Subject to:

$$w_{\min} - P^p \leq \mu_t \leq P^g + w_{\max} \quad (25)$$

and Equations (12) to (22)

همچنین قید جدید این مسئله، قید ارائه شده در رابطه (۲۵)

است. این قید متناظر با مجموع حداقل و حداکثر تولید تک تک

$$SR_{l,t}^p + N.SR.down_{l,t} \leq P_{l,t}^p \quad (20)$$

$$SR_{l,t} = SR_{l,t}^p + SR_{l,t}^g \quad (21)$$

$$N.SR_{l,t} = N.SR.on_{l,t} + N.SR.down_{l,t} \quad (22)$$

$$-P^p \leq \mu_t \leq P^g \quad (23)$$

روابط (۱۲) تا (۱۴)، قیود مربوط به حجم آب مخزن بالایی واحدها است. این روابط به ترتیب بیانگر حجم آب مخزن بالایی در ساعت t ام، در ساعت اول و در ساعت انتهایی پیود برنامه‌ریزی T ، (یعنی در ساعت ۲۴:۰۰) می‌باشد. مقادیر حداکثر و حداقل نرخ پمپاژ و تخلیه آب از مخازن در روابط (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شده است. رابطه (۱۷) میزان توان برنامه‌ریزی شده واحد l ام را تعریف می‌کند. اگر واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در مد پمپاژ باشد، توان برنامه‌ریزی شده منفی است. این بدان معنی است که به مقدار مورد نظر، توان از بازار خریداری می‌شود. اگر واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در مد ژنراتور باشد، توان برنامه‌ریزی شده شامل حداقل توان تولید به علاوه تولید در محدوده مجاز می‌باشد.

از طرف دیگر، توان تولیدی به علاوه ذخیره چرخان تولید شده توسط ژنراتور به همراه ذخیره غیرچرخان در حالت روشن بودن واحد، باید کمتر از حداکثر مقدار تولیدی ژنراتور باشد. این قید در رابطه (۱۸) ارائه شده است. در رابطه (۱۹) همین قید برای مد پمپاژ نیز بیان شده است. همچنین مجموع ذخیره چرخان در مد پمپاژ و ذخیره غیرچرخان در حالتی که واحد خاموش است باید کمتر از نرخ پمپاژ واحد باشد. این قید در رابطه (۲۰) بیان شده است. در رابطه (۲۱) مقدار ذخیره چرخان، برابر مجموع ذخیره چرخان در مد پمپاژ و ذخیره چرخان در مد ژنراتوری تعریف شده است. در رابطه (۲۲) ذخیره غیرچرخان، مجموع ذخیره غیرچرخان در حالت خاموش و ذخیره غیرچرخان در حالت روشن واحد تعریف شده است. در رابطه (۲۳) محدودیت مجاز برای ارائه پیشنهاد به بازار انرژی را تعریف می‌کند.

۵- برنامه‌ریزی پیشنهادی هماهنگ بین نیروگاه

تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و مزرعه بادی

در یک بازار برق رقابتی، شرکت کنندگان بزرگ، تمایل به همکاری با واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای دارند. این همکاری به این صورت است که واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، در لحظات غیر پیک بار که قیمت انرژی پایین است، مازاد تولید خود را ذخیره می‌کنند. همچنین در لحظات پیک بار که قیمت انرژی بالا است، انرژی ذخیره

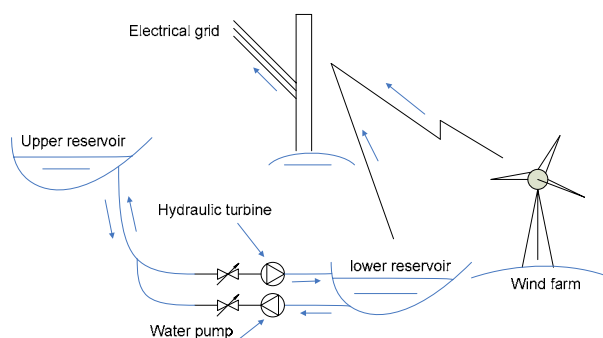
پیشنهادات ارائه شده به بازار با توجه به سناریوهایی شامل پیش‌بینی تولید توان بادی و پیش‌بینی قیمت انرژی و ذخیره هر ساعت بازار روز-پیش است. این پیشنهادها به گونه‌ای ارائه می‌شود که تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، ماکزیمم گردد.

۶-۲- داده‌های اولیه

جدول (۱) اطلاعات مربوط به سه واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای سیستم ۱۱۸ باس IEEE را نشان می‌دهد. جدول (۲) اطلاعات مربوط به مزارع بادی این سیستم را نشان می‌دهد. همچنین در این جدول، مینیمم و ماکزیمم مقدار توان تولیدی هر نیروگاه مشخص شده است.

به منظور انجام برنامه‌ریزی تصادفی، درخت سناریویی با ۴۹۵۰ شاخه طراحی شده است. تعداد ۴۹۵۰ سناریو شامل ۱۵ سناریو قیمت انرژی و ۱۵ سناریو قیمت ذخیره و ۲۲ سناریو پیش‌بینی توان باد می‌باشد. به این منظور، از روش برنامه‌ریزی اعداد صحیح جهت حل این مسئله استفاده گردید. این برنامه، توسط نرم افزار GAMS نوشته و با حلال CPLEX اجرا شده است.

واحدها می‌باشد. حداکثر مقدار پیشنهادی فروش توان معادل با مجموع حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه‌ها است. حداقل مقدار توان پیشنهادی فروش نیز برابر با توان تولیدی مزرعه بادی با کسر توان لازم برای پمپاژ آب به مخزن بالایی است. اگر این تفاضل منفی باشد، این همان پیشنهاد خرید است که به بازار عرضه شده است که برای پمپاژ آب به مخزن بالایی استفاده می‌شود.



شکل (۲): شماتیکی از همکاری نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و بادی

۶- نتایج شبیه‌سازی

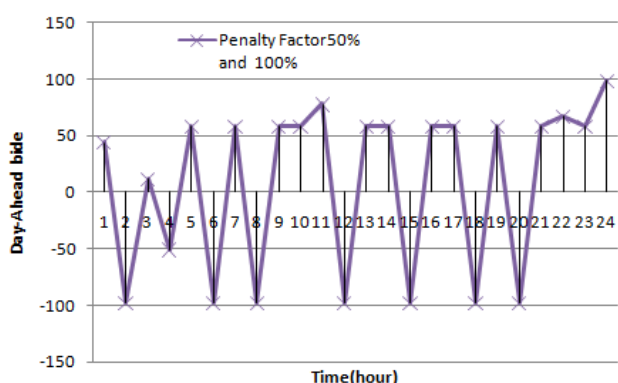
۶-۱- سیستم مورد بررسی

در این مقاله، سه واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در سیستم استاندارد ۱۱۸ باس IEEE با دو مزرعه بادی هماهنگ می‌شوند. این پنج واحد تنها یک پیشنهاد انرژی برای هر ساعت روز بعد، به بازار روز-پیش ارائه می‌دهند. این واحدها در بازار خدمات جانبی نیز شرکت می‌کنند و مقدار پیشنهادی ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان خود را در بازار خدمات جانبی ارائه می‌کنند. قابل ذکر است که بازار انرژی و خدمات جانبی به صورت همزمان تسویه می‌شود.

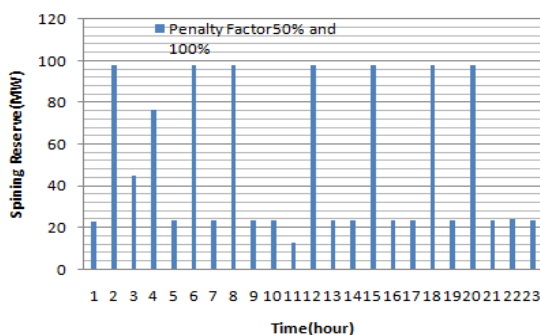
جدول (۱) : اطلاعات سه واحد تلمبه‌ای-ذخیره‌ای سیستم ۱۱۸ باس IEEE

واحد	مخزن بالایی				مخزن پایینی				محدوده پایین تخلیه آب (Hm3/h)	محدوده بالا تخلیه آب (Hm3/h)
	حداقل آب مخزن (Hm3)	حداکثر آب مخزن (Hm3)	حجم اولیه (Hm3)	حجم نهایی (Hm3)	محدوده پایین آب مخزن (Hm3)	محدوده بالا آب مخزن (Hm3)	حجم اولیه (Hm3)	حجم نهایی (Hm3)		
۲۰۰۱	۵۰	۱۵۰	۵۵	۵۵	۳۵۰	۴۵۰	۴۴۵	۴۴۵	۵	۱۵
۲۰۰۲	۵۰	۱۵۰	۵۵	۵۵	۳۵۰	۴۵۰	۴۴۵	۴۴۵	۵	۱۵
۲۰۰۳	۶۰	۲۰۰	۸۰	۸۰	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۷	۲۰
واحد	a_f (MWh ² /Hm ³²)		B_f (MWh/Hm ³)	C_f (MW)	حداقل زمان روشن بودن (hour)	حداقل زمان خاموش بودن (hour)	هزینه راه اندازی ژنراتور (\$)		هزینه راه اندازی پمپاژ (\$)	
۲۰۰۱	-۰/۰۳۳		۲/۵	۰/۰	۱	۱	۷۵		۱۰۰	
۲۰۰۲	-۰/۰۳۳		۲/۵	۰/۰	۱	۱	۷۵		۱۰۰	
۲۰۰۳	-۰/۰۲۵		۲/۵	۰/۰	۱	۱	۱۵۰		۴۰۰	

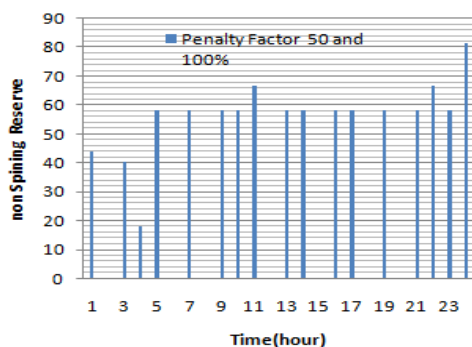
نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، بر اساس قیود نرخ تخلیه و پمپاژ آب و حجم آب موجود در مخازن اجرا می‌شود، لذا با تغییر ضریب جریمه، برنامه‌ریزی این واحدها تغییر نمی‌یابد. شکل (۴) منحنی پیشنهادات ساعتی نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای را جهت ارائه در بازار روز-پیش نشان می‌دهد. اعداد منفی، مبین توانی است که برای پمپاژ آب به مخزن بالایی استفاده می‌شود. این مقدار توان در بازار انرژی خریداری می‌شود. اعداد مثبت، مبین توان تولید شده (سرازیر شدن آب از مخزن بالایی بر روی توربین) است. این مقدار توان در بازار انرژی فروخته می‌شود. شکل (۵) مقادیر فروش ذخیره چرخان و غیرچرخان نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای را در بازار خدمات جانبی نمایش می‌دهد.



شکل (۴): پیشنهادات ساعتی نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش



(الف)



(ب)

شکل (۵): فروش توان در نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار خدمات جانبی (الف) فروش ذخیره چرخان (ب) فروش ذخیره غیرچرخان

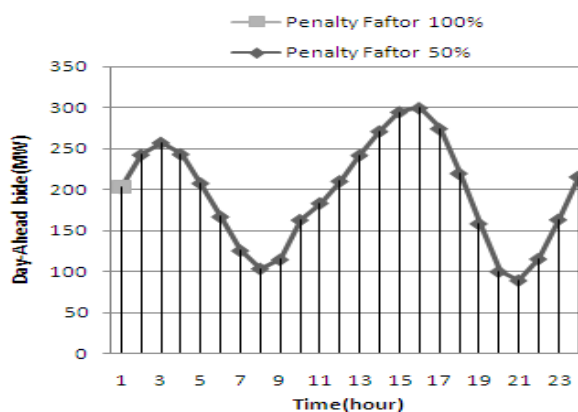
جدول (۲): اطلاعات مزارع بادی سیستم ۱۱۸ باس IEEE

واحد بادی	ماکزیمم توان (MW)	مینیمم توان (MW)
W1	۳۰۰	۱۰
W2	۲۰۰	۲۵

۳-۶- حل مسئله برنامه‌ریزی پیشنهادی

۱-۳-۶- مزارع بادی

شکل (۳) منحنی پیشنهادات ساعتی نیروگاه بادی جهت ارائه در بازار روز-پیش را نشان می‌دهد. به این منظور، سود نیروگاه بادی در بازار روز-پیش با دو ضریب جریمه ۵۰٪ و ۱۰۰٪، در جدول (۳) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد، سود نیروگاه بادی در بازار با ضریب جریمه ۵۰٪، بیشتر از حالت ۱۰۰٪ است. این موضوع به آن علت است که با افزایش ضریب جریمه، هزینه ناشی از عدم تولید توان متعهد شده در بازار، افزایش یافته و سود حاصله نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۳): منحنی پیشنهادات ساعتی نیروگاه بادی در بازار روز-پیش

جدول (۳): سود نیروگاه‌ها در شرایط عملکرد مستقل

ضریب جریمه نوع نیروگاه	۵۰٪	۱۰۰٪
سود نیروگاه بادی (دلار)	۱۴۷۷۷۵.۳۹۵	۱۴۴۶۰۵/۲۳۸
سود نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای (دلار)	۱۵۸۴۸/۸۳۱	۱۵۸۴۸/۸۳۱
جمع	۱۶۳۶۲۴/۲۲۶	۱۶۰۴۵۴/۰۶۹

۲-۳-۶- واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای

با حل مسئله بهینه‌سازی (۱۰)، با در نظر گرفتن قیود (۱۲) تا (۲۳)، سود نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش به دست می‌آید. این نتایج در جدول (۳) نمایش داده شده است. سود این نیروگاه ۱۵۸۴۸/۸۳۱ دلار در هر دو ضریب جریمه ۵۰٪ و ۱۰۰٪ می‌باشد. این موضوع بدان علت است که برنامه‌ریزی تولید و پمپاژ

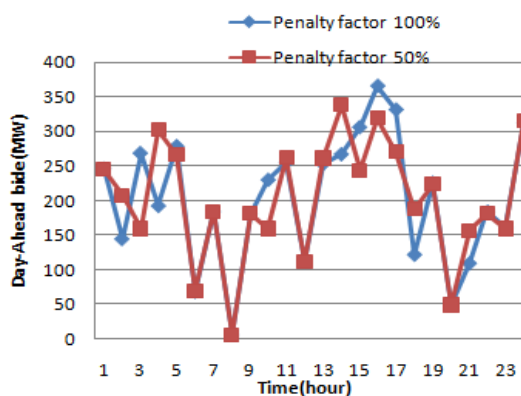
۳-۳-۶- هماهنگی مزارع بادی با واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای

جهت تعیین پیشنهادات مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، تابع هدف (۲۴) با وجود قیود (۲۵) تا (۳۶) بهینه می‌شود. شکل (۶) منحنی پیشنهادات ساعتی مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای را جهت ارائه در بازار روز-پیش نشان می‌دهد. در جدول (۴) سود مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش با دو ضریب جریمه ۵۰ و ۱۰۰٪ ارائه شده است.

سود بدست آمده برای این مجموعه نیروگاهی، در بازار انرژی و خدمات جانبی با ضریب جریمه ۱۰۰٪، ۴۴۹۷۰۷/۰۶۲ دلار است. این در حالی است که بر اساس جدول (۳) اگر واحدهای بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای به صورت مستقل، در بازار شرکت کنند، سود بدست آمده برای هر کدام، به ترتیب ۱۴۴۶۰۵/۲۳۸ و ۱۵۸۴۸/۸۳۱ دلار است؛ لذا مجموع سود مزارع بادی و واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در مقایسه با سود حاصل از مشارکت آن‌ها با یکدیگر، بسیار کمتر است.

از آنجایی که ضریب جریمه بازار عدد بزرگی است (۱۰۰٪) قیمت بازار انرژی، جریمه ناشی از عدم تولید توان متعهد شده در بازار برای واحدهای بادی بسیار هزینه بر است. با حمایت آن‌ها توسط واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای، این هزینه کاهش یافته و سود حاصله افزایش می‌یابد. شکل (۷) مقادیر فروش ذخیره چرخان و غیرچرخان مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای را در بازار خدمات جانبی نمایش می‌دهد.

در جدول (۵)، درآمد مجموعه نیروگاهی در بازار خدمات جانبی و مقدار جریمه ناشی از عدم تولید توان متعهد شده، مشخص شده است. با افزایش ضریب جریمه، هزینه ناشی از جریمه، افزایش یافته است و این خود دلیلی بر کاهش سود می‌باشد.



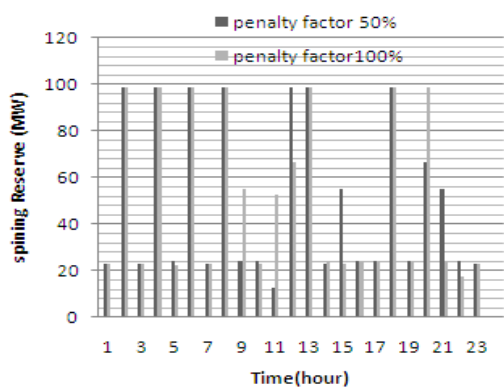
شکل (۶): پیشنهادات ساعتی مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش

جدول (۴): سود مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار

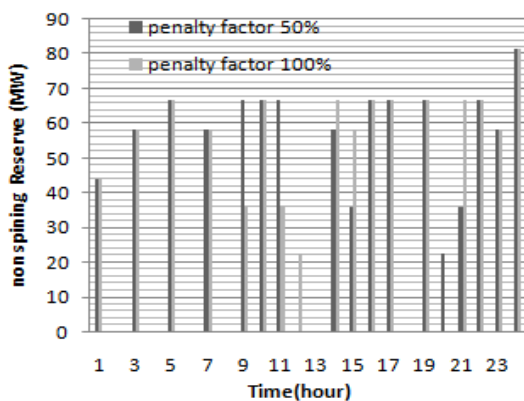
ضریب جریمه	روز-پیش	
	٪۵۰	٪۱۰۰
سود مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای (دلار)	۴۵۸۹۹۳/۴۳۲	۴۴۹۷۰۷/۰۶۲

جدول (۵): جریمه و درآمد مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار خدمات جانبی

ضریب جریمه درآمد	روز-پیش	
	٪۵۰	٪۱۰۰
درآمد حاصل از ذخیره چرخان (دلار)	۳۷۴۵/۲۷۶	۳۷۴۵/۲۶۷
درآمد حاصل از ذخیره غیرچرخان (دلار)	۲۵۶۳/۹۳۵	۲۵۵۲/۳۵۰
جریمه (دلار)	-۹۵۱۰/۴۷۰	-۱۹۰۲۰/۹۴۱



(الف)



(ب)

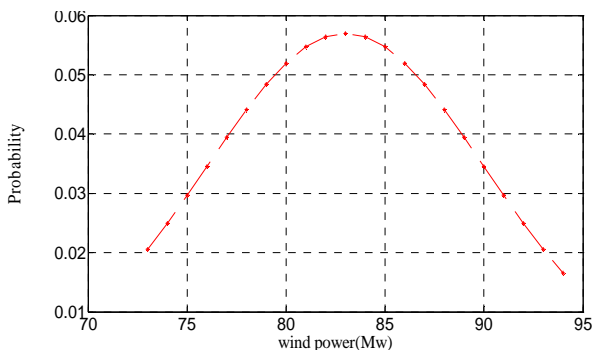
شکل (۷): فروش توان در مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار خدمات جانبی (الف) فروش ذخیره چرخان (ب) فروش ذخیره غیرچرخان

۴-۶- بررسی ریسک عملکرد مجموعه نیروگاهی

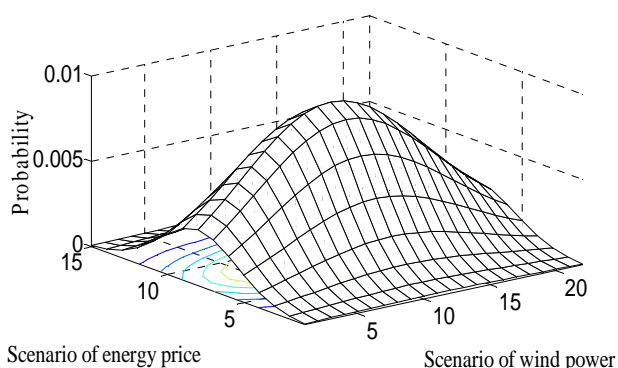
ارزش دارایی‌های تولید در بهره‌برداری روزانه در خلال پیشنهادات قیمت در یک بازار، تحقق می‌یابد. فرض کنید که قیمت

۳۳۰ حالت در درخت سناریو وجود دارد. شکل (۱۱) احتمال وقوع این ۳۳۰ حالت را نشان می‌دهد.

در بهره‌برداری هماهنگ نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و واحدهای بادی، ابتدا میزان تأثیر سناریوهای قیمت ذخیره را در برنامه‌ریزی سیستم بررسی نموده و سپس تأثیر سناریوهای تولید توان بادی را بررسی می‌کنیم. با وجود ۱۵ سناریو برای قیمت انرژی و ۱۵ سناریو برای قیمت ذخیره چرخان، ۲۲۵ نقطه برای برنامه‌ریزی وجود دارد. شکل (۱۲) توزیع سود را در این ۲۲۵ نقطه موجود نشان می‌دهد. سود بدست آمده برابر مقدار تابع هدف با وجود همان سناریو قیمت انرژی و ذخیره است. از میان ۲۲۵ سناریوی موجود، محتمل‌ترین سناریو شامل سناریو هشتم قیمت انرژی و سناریو هشتم قیمت ذخیره است. که دارای سودی برابر ۴۳۳۸۰۰ دلار است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، با افزایش قیمت انرژی از سناریو ۱ تا ۱۵، روندی صعودی بر روی محور Z داریم. این در حالی است که با افزایش قیمت ذخیره با حرکت از سناریو ۱ تا ۱۵ بر روی محور X، تغییرات محسوسی در میزان سود مشاهده نمی‌کنیم.



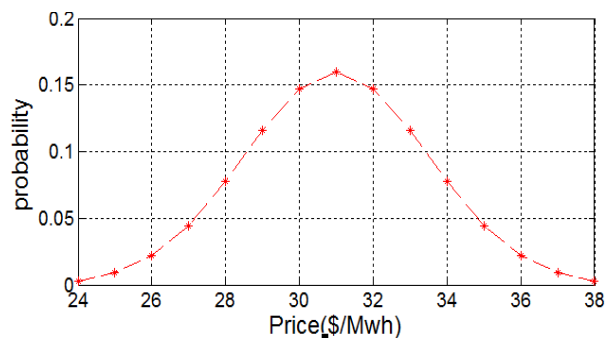
شکل (۱۰): توزیع نرمال برای تولید توان بادی پیش بینی شده برای ساعت ۱۰:۰۰ روز آینده



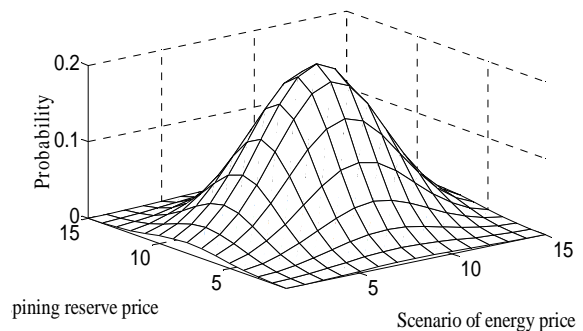
شکل (۱۱): توزیع قیمت پیش بینی شده برای بازار انرژی و تولید توان بادی

لحظه‌ای بازار انرژی و خدمات جانبی از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند. شکل (۸) توزیع قیمت پیش‌بینی شده انرژی را طی ۱۵ سناریو برای یک ساعت مشخص (مثلاً ساعت ۱۰) نشان می‌دهد. متوسط قیمت در سناریوی هشتم وارد شده است که دارای بالاترین احتمال رخداد می‌باشد. روند قیمت‌ها با حرکت از اولین سناریو تا آخرین سناریو خطی می‌باشد و قیمت در هر سناریو یک واحد بیش از سناریو قبل است. مشابه همین توزیع نرمال، برای قیمت ذخیره چرخان و غیرچرخان نیز در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۹) توزیع احتمالی قیمت‌های انرژی و ذخیره چرخان (قیمت ذخیره غیرچرخان تابعی از قیمت ذخیره چرخان است) را به صورت همزمان نشان داده است. احتمال کل وقوع سناریو ۸ام انرژی و سناریو ۸ام ذخیره، با حاصل ضرب احتمال وقوع هر دو سناریو برابر می‌باشد. به این صورت، ارزش ریسک عملکرد واحدها را در هر دو بازار با وجود سطح اعتماد تعریف شده، می‌توان تعیین کرد.



شکل (۸): توزیع نرمال برای قیمت‌های پیش بینی شده برای ساعت ۱۰ بازار روز-پیش



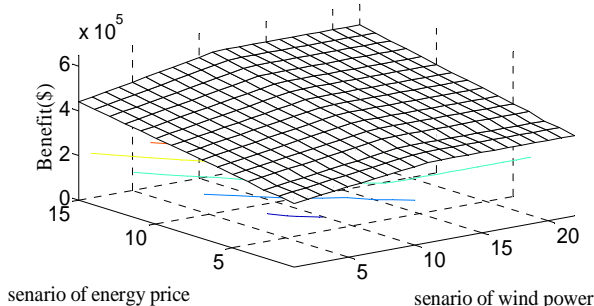
شکل (۹): توزیع قیمت پیش بینی شده برای بازار انرژی و بازار ذخیره

پیش‌بینی تولید توان بادی طی ۲۲ سناریو ارائه شده است. با فرض این که تولید توان بادی دارای یک توزیع نرمال است. شکل (۱۰) توزیع نرمال توان پیش‌بینی شده بادی را برای ساعت ۱۰:۰۰ روز بعد نشان می‌دهد. با وجود ۱۵ سناریو برای قیمت انرژی در بازار،

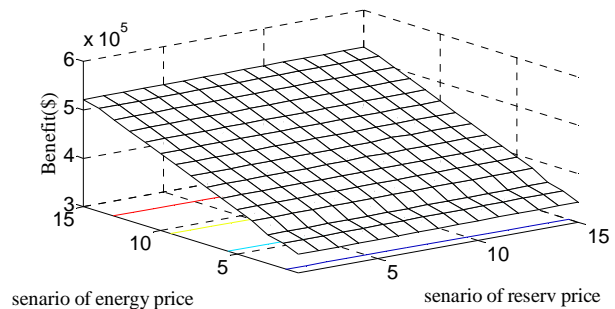
قیمت ذخیره در تمام سناریوها ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۱۴) توزیع سود در ۳۳۰ نقطه موجود را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۴) و توجه به مقدار سود در ۳۳۰ نقطه، متوجه میزان تأثیر سناریوهای پیش‌بینی شده بر میزان سود برنامه‌ریزی شده می‌شویم. با افزایش قیمت انرژی از سناریو ۱ تا ۱۵، روندی صعودی بر روی محور Z (سود) داریم. این در حالی است که با افزایش تولید توان بادی با حرکت از سناریو ۱ تا ۲۲ بر روی محور X، تغییرات محسوسی در میزان سود مشاهده می‌کنیم. از میان ۳۳۰ سناریو موجود، محتمل‌ترین سناریو شامل سناریو هشتم قیمت انرژی و سناریو یازدهم توان باد است. سود حاصل از این سناریو برابر ۴۵۵۶۶۰ دلار است.

شکل (۱۵-الف) تمام نقاطی از درخت سناریو قیمت (انرژی و تولید توان بادی)، که تابع احتمال تجمعی آن‌ها ۰/۰۵ یا ۵٪ است را نشان می‌دهد. از میان ۳۳۰ نقطه موجود، تنها ۱۲ نقطه دارای احتمال تجمعی ۰/۰۵ هستند. شکل (۱۵-ب) توزیع سود ۱۲ نقطه با احتمال تجمعی ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.

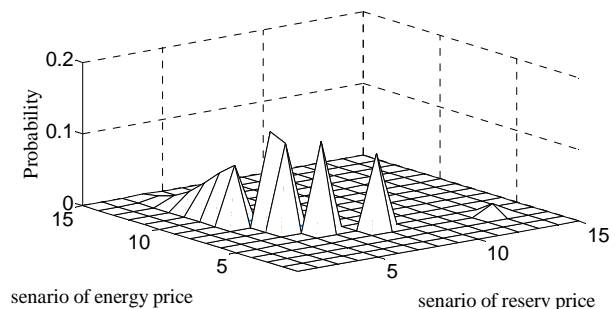


شکل (۱۴): توزیع سود در ۳۳۰ نقطه موجود

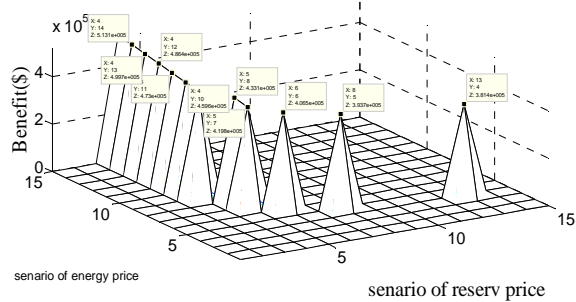


شکل (۱۲): توزیع سود در ۲۲۵ نقطه موجود

شکل (۱۳-الف) تمام نقاطی از درخت سناریو قیمت (انرژی و ذخیره)، که تابع احتمال تجمعی آن‌ها ۰/۰۵ یا ۵٪ است را نشان می‌دهد. از میان ۲۲۵ نقطه موجود تنها ۱۲ نقطه دارای احتمال تجمعی ۰/۰۵ هستند. شکل (۱۳-ب) توزیع سود ۱۲ نقطه با احتمال تجمعی ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.



(الف)

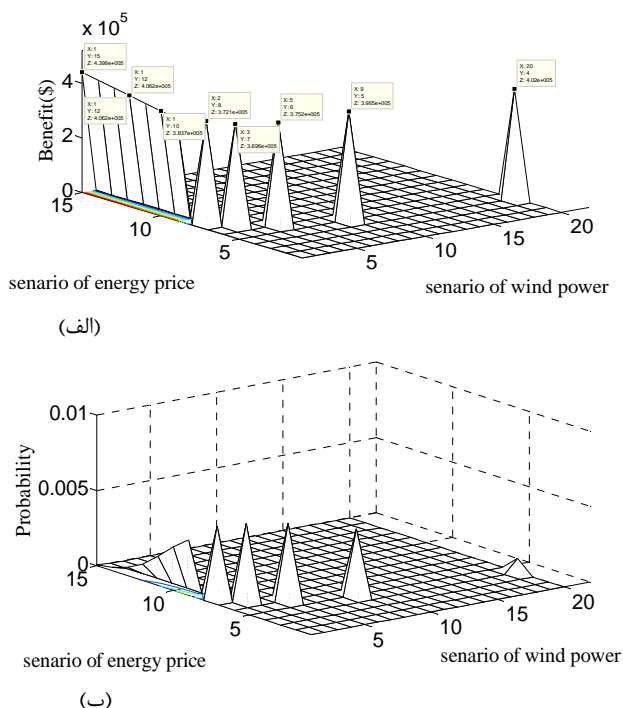


(ب)

شکل (۱۳): الف توزیع احتمال، ب توزیع سود ۱۲ نقطه با احتمال تجمعی ۰/۰۵

با توجه به تأثیر بسیار کم و نامحسوس سناریوهای پیش‌بینی قیمت ذخیره بر سود پیش‌بینی شده، میزان تأثیر سناریوهای پیش‌بینی توان بادی را بررسی کردیم. در این شبیه‌سازی، برای تولید توان بادی ۲۲ سناریو در نظر گرفته شده است. با وجود ۱۵ سناریو برای قیمت انرژی در بازار، ۳۳۰ حالت در درخت سناریو وجود دارد.

جدول (۶) مقادیر VAR را در بهره‌برداری‌های مستقل بادی و هماهنگ بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای مقایسه می‌کند. قابل ملاحظه است که این مقادیر در بهره‌برداری هماهنگ بیش از بهره‌برداری مستقل است. ارزش ریسک (مینیمم مقدار سود) در هر دو بهره‌برداری، در سناریوی سوم بادی و هفتم قیمت انرژی تعیین می‌شود. مینیمم مقدار سود، به عبارت دیگر ارزش ریسک برنامه‌ریزی هماهنگ بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در مقایسه با واحد مستقل بادی، بسیار افزایش یافته است. ارزش ریسک بهره‌برداری مستقل بادی ۱۲۰۴۰۰ دلار است، این در حالی است که ارزش ریسک بهره‌برداری هماهنگ، ۳۶۹۶۰۰ دلار است.



شکل (۱۵): (الف) توزیع احتمال (ب) توزیع سود ۱۲ نقطه با احتمال تجمعی ۰/۰۵

جدول (۶): مقایسه VAR در بهره‌برداری مستقل بادی و هماهنگ بادی-تلمبه‌ای-ذخیره‌ای (x 10^۵)

سناریو قیمت انرژی	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
سناریو تولید توان بادی	۲۰	۹	۵	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
VAR بهره‌برداری مستقل بادی (\$)	۱/۳۱۴۱	۱/۲۹۴۸	۱/۲۲۳۰	۱/۲۰۳۶	۱/۲۱۱۳	۱/۲۱۸۰	۱/۲۵۴۷	۱/۲۹۱۵	۱/۳۲۸۲	۱/۳۶۵۰	۱/۴۰۱۸	۱/۴۳۸۵
VAR بهره‌برداری هماهنگ بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای (\$)	۴/۰۲۰۴	۳/۹۶۵۴	۳/۷۵۲۱	۳/۶۹۷۵	۳/۷۲۰۷	۳/۷۲۵۳	۳/۸۳۷۴	۳/۹۴۹۵	۴/۰۶۱۷	۴/۱۷۳۸	۴/۲۸۶۰	۴/۳۹۸۱

۷- نتیجه گیری

نمادها

S : مجموعه سناریوها
 L : مجموعه واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای
 T : پریود زمانی ۲۴ ساعته
 ρ_s : احتمال وقوع سناریو s
 I : مجموعه واحدهای بادی
 $W_{i,t,s}$: تولید پیش‌بینی شده واحد بادی i در ساعت t سناریو s
 $W_{i,max}$: ماکزیمم توان تولیدی واحد i نیروگاه بادی
 $\pi_{t,s}^e$, $\pi_{t,s}^{N,SR}$ و $\pi_{t,s}^{SR}$: قیمت انرژی، ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان در ساعت t و سناریو s

در این مقاله، مدل جدیدی برای بهره‌برداری هماهنگ مزارع بادی و واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازارهای روز-پیش و خدمات جانبی، ارائه گردید. در این راستا، با وجود عدم قطعیت تولید نیروگاه بادی و قیمت انرژی و خدمات جانبی، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شد نتایج شبیه‌سازی بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE بیان گردید. همچنین تأثیر ضریب جریمه بر بازار و هزینه‌های ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سود بهره‌برداری هماهنگ نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در مقایسه با مجموع سود حاصل از بهره‌برداری ناهماهنگ آن‌ها بسیار افزایش یافته است. این مسئله خود دلیلی برای افزایش نفوذ مزارع بادی در سیستم‌های قدرت می‌باشد.

- Penetration”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 124–114, Feb. 2009.
- [3] T. Li, and Mohammad Shahidehpour, “Price-Based Unit Commitment: A Case of Lagrangian Relaxation Versus Mixed Integer Programming”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 4, pp. 2015–2025, November 2005.
- [4] T. Ackermann, “Impact of high wind penetration on balancing and frequency control in europe”, IEEE Power & Energy Mag., vol. 5, No. 6, pp. 91–103, Dec. 2007.
- [5] J.M. Angarita, J.G. Usoala, "Combining hydro-generation and wind energy Bidding and operation on electricity spot markets", Electric Power Systems Research, vol. 77, pp. 393–400, April 2007.
- [6] V.S. Pappala, I. Erlich, and S.N. Singh, “Unit Commitment under Wind Power and Demand Uncertainties”, International Conference on Power Con. 2008 New Delh, PP. 1-5, Oct. 2008.
- [7] A. Tuohy, P. Meibom, E. Denny, and M. O’Malley, ”Unit Commitment for Systems With Significant Wind Penetration”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 592–601, May 2009.
- [8] R. Doherty, and M. O’Malley, “A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems With Significant Installed Wind Capacity”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 587–595, May 2005.
- [9] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, “Economic Valuation of Reserves in Power Systems With High Penetration of Wind Power”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 900–910, May 2009.
- [10] L. Söder, “Reserve margin planning in a wind-hydro thermal power system”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, No. 2, pp. 564–571, May 1993.
- [11] J. Liang, S. Grijalva, R.G. Harley, “Increased Wind Revenue and System Security by Trading Wind Power in Energy and Regulation Reserve Markets”, IEEE Trans. Sustainable Energy., vol.2, No.3, pp. 340 - 347, July 2011.
- $SR_{l,t,s}$ و $N.SR_{l,t,s}$: ذخیره چرخان و غیرچرخان واحد l در ساعت t و سناریو s
- $P_{l,t,s}$: توان تولیدی واحد l در ساعت t و سناریو s
- $g.St_{l,t,s}$ و $p.St_{l,t,s}$: هزینه راه اندازی و پمپاژ ژنراتور واحد l در ساعت t و سناریو s
- μ_t : پیشنهاد انرژی در بازار انرژی در ساعت t
- $\omega_{t,s}$: ضریب جریمه در ساعت t و سناریو s
- $V_{l,t}$: حجم آب مخزن بالایی واحد l در ساعت t
- $V_{l,ini}$ $V_{l,fin}$: حجم اولیه و نهایی آب مخزن بالایی واحد l
- $qp_{l,t}$, $qg_{l,t}$: نرخ تخلیه و پمپاژ آب واحد l در ساعت t
- $qg_{l,max}$, $qg_{l,min}$: ماکزیمم و مینیمم نرخ تخلیه آب مخزن بالایی واحد l
- $qp_{l,max}$, $qp_{l,min}$: مینیمم و ماکزیمم نرخ پمپاژ آب واحد l
- $P_{l,t}^g$ و $P_{l,t}^p$: توان پمپاژ و تولیدی واحد l در ساعت t
- $P_{l,max}^g$ و $P_{l,min}^g$: حداقل و حداکثر توان تولیدی واحد l
- $P_{l,max}^p$: ماکزیمم توان خریداری شده مد پمپاژ واحد l
- $N.SR.on_{l,t}$ و $N.SR.down_{l,t}$: ذخیره غیرچرخان واحد l در ساعت t در حالت روشن و خاموش بودن
- $SR_{l,t}^p$, $SR_{l,t}^g$: ذخیره چرخان واحد l در ساعت t در مد ژنراتوری و پمپاژ

مراجع

- [1] J. García-González, R. Moraga Ruiz de la Muela, L. Matres Santos and A. Mateo González, “Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 460-468, May. 2008.
- [2] M. A. Ortega-Vazquez, and D. S. Kirschen, “Estimating the Spinning Reserve Requirements in Systems With Significant Wind Power Generation