

## بهربرداری بهینه از نیروگاه‌های بادی با استفاده از نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای به منظور کاهش عدم قطعیت در عملکرد آنان در بازار برق

امیرحسین زارع نیستانک<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، رحمت الله هوشمند<sup>۲</sup>، دانشیار، معین پرستگاری<sup>۳</sup>، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - amir.zare66@gmail.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - Hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - parastegari@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** وجود نامعینی (عدم قطعیت) در تولید نیروگاه‌های بادی، موجب افزایش هزینه عدم تعادل و ریسک نیروگاه‌های بادی در بازار برق می‌شود. در صورت استفاده هماهنگ از این نیروگاه‌ها به همراه نیروگاه‌های دیگر می‌توان هزینه عدم تعادل توان را کاهش داد. با توجه به این مسئله، در این مقاله مسئله تعیین استراتژی بهینه‌ی مشارکت مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای در بازار برق با در نظر گرفتن مدل واقعی‌تر سناریوهای بادی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این برنامه‌ریزی، افزایش سود و کاهش ریسک مجموعه نیروگاهی می‌باشد. به این منظور نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای به صورت هماهنگ با نیروگاه بادی در بازارهای انرژی و رزرو مشارکت کرده و موجب کاهش ریسک مجموعه می‌شوند. در این مقاله جهت پیش بینی تولید نیروگاه‌های بادی از روش مدل‌سازی ARMA استفاده شده است و سناریوهای تولید نیروگاه بادی با استفاده از توزیع Weibull (ویبال) تعیین شده است. در این صورت سناریوهای مدل پیشنهادی به شرایط واقعی نزدیکتر می‌شود. استراتژی پیشنهاد شده بر روی نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای سیستم استاندارد ۱۱۸ باس IEEE تست گردیده است. بررسی نتایج سود در شرایط عملکرد هماهنگ و مستقل، مؤید افزایش سود مجموعه نیروگاهی در شرایط عملکرد هماهنگ و در نظر گرفتن مدل واقعی‌تر سناریوهای بادی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مزرعه بادی، نیروگاه تلمبه‌ای - ذخیره‌ای، برنامه‌ریزی تصادفی، مدل ARMA، مدیریت ریسک، بازار انرژی

## Optimal Scheduling and Risk Minimization of Wind Farms Using Pump-Storage Plants

A.H. Zare R. Hooshmand M. Parastegari  
Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**Abstract:** Stochastic nature of wind farms generation, increases imbalance cost and risk of these plants in the power market. If these units are scheduled with other units coordinately, imbalance cost and risk of these plants decreases. Therefore, in this paper, a new optimal bidding strategy is proposed for joint operation (JO) of wind farms and pump-storage power plants. The goal of this program is maximizing the benefit and minimizing the risk of these units in the day-ahead energy and ancillary service markets. In this paper, in order to construct more reliable wind scenarios, the value of the wind generation is forecasted by ARMA method. Furthermore, Weibull distribution is used to approximate wind scenarios. The performance of the proposed bidding strategy is tested and evaluated on pump-storages and wind farms of IEEE 118-bus standard system. The results verify that the joint operations of pump-storage and wind farm (risk and benefit), improve the benefit and the decreases the risk values of the system related to uncoordinated operation (UO) of pump-storage and wind farm.

**Keywords:** wind farm, pump-storage plant, stochastic programming, risk management, power market.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۰/۷/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۱/۷/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: رحمت الله هوشمند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اصفهان - میدان آزادی - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی

## نمادگذاری

$P_C$  : مقدار کل توان تعهدشده توسط مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

$P_{CPS}$ ،  $P_{CW}$ : مقدار توان تعهدشده توسط نیروگاه بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

$\tilde{P}_D$ : مقدار توان تحویلی

$\tilde{P}_{Dwind}$ ،  $\tilde{P}_{Dpomp}$ : مقدار توان تحویلی توسط نیروگاه بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

$epr(s, t)$ ،  $srpr(s, t)$  و  $nsrpr(s, t)$ : قیمت لحظه‌ای انرژی، رزرو چرخشی و رزرو غیر چرخشی برای سناریو S در لحظه  $t$

$\tilde{C}_{imb}$ : ضریب هزینه عدم تعادل

$D_{CR}$  و  $S_{CR}$ : ضریب هزینه عدم تعادل مثبت و منفی

$\beta$  : ضریب تصمیم‌گیری در مورد ریسک‌پذیری

$P(l, t)$ : توان، رزرو چرخشی و رزرو غیر چرخشی تولید شده توسط نیروگاه تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام در لحظه  $t$

$R_p(l, t)$  و  $R_g(l, t)$ : مقدار رزرو چرخشی در حالت تولید و پمپاژ واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام در لحظه  $t$

$N_u(l, t)$  و  $N_d(l, t)$ : مقدار رزرو غیرچرخشی در زمان روشن و خاموش بودن واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام در لحظه  $t$

$P_W(ss, t)$ : مقدار توان تولیدی توسط واحد بادی برای سناریو SS در لحظه  $t$

$R_{SPS}$ ،  $R_{SW}$ : درآمد کل حاصله توسط واحدهای بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

$Cost_{st}$ ،  $Cost_{imbalance}$ : هزینه راه‌اندازی و عدم تعادل

$v(l, ini)$ ،  $v(l, end)$  و  $v(l, t)$ : مقدار متغیر حجم، حجم اولیه و حجم نهایی آب مخزن واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام در لحظه  $t$

$V_{l, min}$  و  $V_{l, max}$ : مینیمم و ماکزیمم حجم مخزن واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام

$qp(l, t)$  و  $qg(l, t)$ : مقدار مجاز تخلیه و پمپاژ واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام در لحظه  $t$

$qpl, min$  و  $qpl, max$ : حداقل و حداکثر مقدار مجاز پمپاژ واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام

$qgl, min$  و  $qgl, max$ : حداقل و حداکثر مقدار مجاز تخلیه واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای  $l$  ام

$I_p(l, t)$  و  $I_g(l, t)$ : نشانگر حالت تولید و پمپاژ نیروگاه تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

$t$ : اندیس زمان

$l$ : اندیس واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

S: اندیس سناریوی قیمت انرژی

SS: اندیس سناریوی توان تولیدی توسط نیروگاه بادی

NT: تعداد دوره زمانی

$NW$ : تعداد واحدهای بادی

$NPS$ : تعداد واحدهای تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

## ۱- مقدمه

افزایش قیمت سوخت، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، و افزایش آلودگی محیط زیست موجب افزایش استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر همانند واحدهای بادی شده است. توان تولیدی این واحدها نامعین می‌باشد، لذا وجود نامعینی در تولید این واحدها موجب افزایش هزینه عدم تعادل و نتیجتاً افزایش ریسک در استفاده از این واحدها می‌شود [۱].

تاکنون در زمینه برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌های تجدید پذیر، تحقیقات وسیعی انجام شده است. در [۲] مسئله برنامه‌ریزی واحدهای بادی بررسی شده است. در این راستا روشی جهت افزایش سود و کاهش ریسک متناظر با این واحدها پیشنهاد شده است. در [۳] الگوریتم تسویه بازار کوتاه مدت با وجود تولید بادی طراحی شده است. وجود خطا در پیش‌بینی تولید نیروگاه‌های بادی موجب اعمال جریمه (هزینه عدم تعادل) در بازار می‌شود. وجود این هزینه موجب می‌شود که اگر نیروگاهی در تعهدات خود کوتاهی کند، بیشتر از قیمت لحظه‌ای برق جریمه بپردازد و اگر بیش از تعهدات خود تولید کند به مقداری کمتر از قیمت لحظه‌ای برق پاداش داده می‌شود. به منظور کاهش این ریسک، می‌توان از منابع انرژی دیگر در کنار این نیروگاه‌ها استفاده نمود.

در [۴] مدل‌سازی روابط حاکم بر نیروگاه‌های بادی و آبی جهت بهره‌برداری بهینه در بازار روز پیش انجام پذیرفته شده است. در [۵] مدلی جهت بهره‌برداری هماهنگ از مزرعه بادی و واحد برق-آبی با هدف کاهش جریمه‌ها ارائه شده است. برنامه‌ریزی تولید با استفاده از برنامه ریزی تصادفی مجموعه نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای و بادی در بازار توان در [۶] انجام شده است. در [۷-۸]، برنامه‌ریزی هماهنگ تولید مزارع بادی، واحدهای تلمبه‌ای ذخیره‌ای و واحدهای حرارتی با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای ارائه و با استفاده از الگوریتم کاهش سناریو و الگوریتم PSO حل می‌شود. در [۹-۱۲] بر روی ارزیابی توجیه اقتصادی پروژه‌های تولید توان بادی و خورشیدی بحث شده است. در [۱۳-۱۵] سطح ذخیره مورد نیاز را با وجود نفوذ پرحجم توان بادی تخمین می‌زنند. در [۱۶] یک PBUC با در نظر گرفتن ریسک را مورد بررسی قرار داده است. هدف اصلی در این مقالات تعیین استراتژی بهینه شرکت در بازار توان به منظور ماکزیمم سازی سود می‌باشد.

در هیچ یک از روش‌های مطرح شده فوق، برنامه‌ریزی هم‌زمان توان و ذخیره را برای مجموعه نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای با در نظر گرفتن ریسک انجام نشده است. علاوه بر این در تمام این مطالعات فرض شده است سناریوهای بادی دارای توزیع نرمال هستند.

$$\tilde{C}_{imb} = \begin{cases} D_{CR} & \text{if } P_C > \tilde{P}_D \\ S_{CR} & \text{if } P_C < \tilde{P}_D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

همان گونه که در معادله (۳) نشان داده شده است، در این روش هزینه عدم تعادل برای افزایش و کاهش تولید واقعی (نسبت به توان تعهد شده) متفاوت است. مقدار  $S_{CR}$  و  $D_{CR}$  به گونه‌ای تعیین می‌شود که اگر مقدار  $\tilde{P}_D$  از مقدار  $P_C$  (توان پیش بینی شده جهت تولید) کوچکتر باشد، جریمه ای بیش از هزینه تامین توان از درآمد نیروگاه کسر شود  $\tilde{C}_{imb} \cdot (P_C - \tilde{P}_D)$ . علاوه بر این، اگر مقدار  $\tilde{P}_D$  از مقدار  $P_C$  بزرگتر باشد درآمد واحد بابت تولید توان اضافی از درآمد حاصل از فروش توان در بازار کمتر می‌شود.

### ب) روش دوم تعیین هزینه عدم تعادل

در روش دوم مقدار هزینه عدم تعادل رابطه درجه دو با تفاوت توان تولیدی و پیشنهادی دارد. در این شرایط، تابع درآمد نیروگاه از قرار زیر خواهد بود.

$$R_T = P_C \cdot epr - (P_C - \tilde{P}_D) \cdot (S_{CR} + D_{CR} \cdot (\frac{P_C}{\tilde{P}_D})^2) \quad (۴)$$

در معادله (۳) و (۴)،  $S_{CR}$  و  $D_{CR}$  ضرایب هزینه عدم تعادل می‌باشند. برای تعیین این ضرایب می‌توان نرخ هزینه عدم تعادل را به صورت ضریبی از قیمت لحظه‌ای انرژی در نظر گرفت. در این مقاله، نرخ‌های هزینه عدم تعادل به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\tilde{C}_{imb} = \begin{cases} D_{CR} = (1 + \beta) \cdot epr & \text{if } P_C > \tilde{P}_D \\ S_{CR} = (1 - \beta) \cdot epr & \text{if } P_C < \tilde{P}_D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

که  $\beta$  عددی ما بین صفر تا یک می‌باشد. به ازای مقادیر بزرگتر  $\beta$ ، مقدار  $S_{CR}$  کاهش (و نتیجتاً مبلغ دریافتی بابت تولید توان بیش از مقدار پذیرفته شده در بازار کاهش) می‌یابد. علاوه بر این در این شرایط  $D_{CR}$  (و نتیجتاً جریمه پرداختی بابت تولید کمتر توان نسبت به توان پذیرفته شده در بازار) افزایش می‌یابد. این مسئله باعث افزایش ریسک در شرایط تولید کمتر از توان پیشنهادی به بازار و کاهش سود در شرایط تولید بیشتر از توان پیشنهادی به بازار نیروگاه می‌شود. در صورتی که  $\beta$  عددی کوچک باشد،  $S_{CR}$  افزایش (و نتیجتاً مبلغ دریافتی بابت تولید توان بیش از مقدار پذیرفته شده در بازار افزایش) می‌یابد. در این شرایط  $D_{CR}$  (و نتیجتاً جریمه پرداختی بابت تولید کمتر توان نسبت به توان پذیرفته شده در بازار) کاهش می‌یابد. در این شرایط ریسک نیروگاه (میزان جریمه های عدم تولید توان) کاهش می‌یابد اما در مقابل درآمد حاصله در شرایط تولید توان بیش از مقدار پذیرفته شده در بازار نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط توان پیشنهادی هر نیروگاه با توجه به ریسک پذیری مالک آن نیروگاه تعیین می‌شود.

با توجه به موارد فوق در این مقاله، مسئله‌ی بهره‌برداری هماهنگ مزارع بادی و واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای با برنامه‌ریزی تصادفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. 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. در این مسئله، سه پارامتر تصادفی قیمت انرژی، رزرو، توان تولیدی مزرعه بادی با استفاده از درخت سناریو مدل‌سازی شده است. با این کار، جریمه‌های ناشی از اختلاف سطح تعهدات ارائه شده به بازار و تولیدات واقعی کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده بر روی نیروگاه‌های تجدید پذیر شبکه استاندارد ۱۱۸ باس IEEE بیانگر توانایی الگوریتم در افزایش سود و کاهش ریسک برنامه‌ریزی است.

## ۲- بررسی سود شرکت کنندگان در بازار برق

### ۱-۲- تعیین درآمد حاصل از شرکت در بازار

در بازار توان روز پیش، تولیدکنندگان و مصرف کنندگان توان، با توجه به قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار، پیشنهادات خود را برای روز آینده ارائه می‌کنند. برای محاسبه بهترین سطح تولید لازم است شرکت کنندگان تمامی متغیرهای مسئله را در نظر بگیرند. این متغیرها عبارتند از مقدار توان تحویلی، قیمت انرژی و میزان هزینه عدم تعادل. در این شرایط درآمد هر نیروگاه با توجه به قیمت انرژی، هزینه عدم تعادل انرژی پیشنهادی و تحویلی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$R_T = P_C \cdot epr - \tilde{C}_{imb} \cdot (P_C - \tilde{P}_D) \quad (۱)$$

که ترم اول بیانگر درآمد حاصل از فروش انرژی به مقدار  $P_C$  با قیمت  $epr$  می‌باشد و ترم دوم نیز بیانگر هزینه عدم تعادل می‌باشد. هزینه عدم تعادل، تابعی از مابه‌التفاوت انرژی فروخته شده و انرژی تحویل داده شده  $P_C - \tilde{P}_D$  می‌باشد.

در معادله (۱) سه متغیر  $\tilde{C}_{imb}$ ،  $\tilde{P}_D$  و  $epr$  وجود دارد که تا زمان تحویل انرژی نامعلوم می‌باشند. این سه متغیر عامل ایجاد عدم قطعیت و در نتیجه ریسک برای شرکت کننده در بازار می‌باشند [۱]. می‌توان تغییرپذیری پارامتر  $epr$  با تولید سناریوهای مختلف در نظر گرفت. نحوه تعیین دو متغیر دیگر در ادامه بیان خواهد شد.

### ۲-۲- تعیین هزینه عدم تعادل

به منظور وارد نمودن هزینه عدم تعادل دو روش موجود می‌باشد.

#### الف) روش اول تعیین هزینه عدم تعادل

در برخی از بازارهای برق از یک رابطه خطی جهت تعیین هزینه عدم تعادل استفاده می‌شود معادله (۲) تابع درآمد نیروگاه از بازار برق با جریمه خطی انحراف از تولید توان تعهد شده را نمایش می‌دهد.

$$R_T = P_C \cdot epr - \tilde{C}_{imb} \cdot (P_C - \tilde{P}_D) \quad (۲)$$

که مقدار نرخ هزینه عدم تعادل ( $\tilde{C}_{imb}$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

### ۳- مدل‌سازی روابط نیروگاه‌های تجدیدپذیر

#### ۳-۱- مدل نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای

درآمد نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای برابر با مقدار درآمد حاصل از فروش انرژی و رزرو چرخشی و غیرچرخشی منهای هزینه‌های این واحد می‌باشد. در این مدل تنها هزینه مربوط به راه‌اندازی و خرید توان جهت پمپاژ آب در نظر گرفته شده است. با توجه به این که هدف این نیروگاه از شرکت در بازار برق دستیابی به حداکثر سود است، بهره بردار از این نیروگاه با حل مسئله بهینه‌سازی زیر میزان توان تولیدی این واحدها را تعیین می‌کند.

$$R_{SPS} = \sum_{l=1}^{NPS} \sum_{t=1}^{NT} (epr(s, t) \cdot P_{CPS}(l, t) + srpr(s, t) \cdot R(l, t) + nsrpr(s, t) \cdot N(l, t) - \tilde{C}_{imb} \cdot (P_{CPS}(l, t) - \tilde{P}_{DPS}(l, t)) - Cost(s, t)) \quad (6)$$

Subject to:

$$v(l, t) = v(l, t - 1) - qg(l, t - 1) + qp(l, t - 1) \quad (7)$$

$$v(l, t = 1) = v(l, ini) \quad (8)$$

$$v(l, t = T) = v_{l, end} \quad (9)$$

$$v_{l, min} \leq v(l, t) \leq v_{l, max} \quad (10)$$

$$qg_{l, min} \cdot I_g(l, t) \leq qg(l, t) \leq qg_{l, max} \cdot I_g(l, t) \quad (11)$$

$$qp_{l, min} \cdot I_p(l, t) \leq qp(l, t) \leq qp_{l, max} \cdot I_p(l, t) \quad (12)$$

$$P(l, t) = P_g(l, t) - P_p(l, t) \quad (13)$$

$$P(l, t) + R_g(l, t) + N_u(l, t) \leq P_{gmax}(l, t) \cdot I_g(l, t) \quad (14)$$

$$N_d(l, t) \leq QSC(1 - I_g(l, t) - I_p(l, t)) \quad (15)$$

$$R_p(l, t) = P_p(l, t) \cdot I_p(l, t) \quad (16)$$

$$R(l, t) = R_g(l, t) + R_p(l, t) \quad (17)$$

$$N(l, t) = N_u(l, t) + N_d(l, t) \quad (18)$$

در این روابط معادله (۶) تابع هدف مسئله بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد. رابطه (۷) قید حجم آب مخزن نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در هر لحظه را بیان می‌نماید. قیود (۸) و (۹)، میزان حجم آب مخزن در لحظه ابتدایی و انتهایی را بیان می‌کند. در رابطه (۱۰)، محدودیت حجم آب مخزن بالایی نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در طول دوره پیشنهادی بیان شده است. مقادیر حداکثر و حداقل نرخ پمپاژ و تخلیه آب از مخازن توسط روابط (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است. در رابطه (۱۳) توان خالص تولید شده توسط نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای تعیین شده است. در رابطه (۱۴) قید حداکثر توان قابل عرضه به بازارهای انرژی و ذخیره نمایش داده شده است. همانگونه که در این رابطه مشخص شده است، لازم است مجموع توان‌های عرضه شده به

بازارهای انرژی و ذخیره از حداکثر توان قابل تولید نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای کمتر باشد. در رابطه (۱۵) حداکثر توان ذخیره واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای در حالت خاموش (حالتی که واحد در حالت پمپاژ و یا ژنراتوری نباشد) نمایش داده شده است. رابطه (۱۶) توان ذخیره قابل تولید واحد در شرایط پمپاژ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این رابطه نمایش داده شده است، در این حالت واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای توانی که جهت پمپاژ آب از بازار خریداری کرده است را به عنوان ذخیره بهره‌برداری در حالت پمپاژ عرضه می‌نماید. رابطه (۱۷) مقدار ذخیره واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد. این مقدار ذخیره برابر مجموع ذخیره در حالت ژنراتوری و پمپی می‌باشد. رابطه (۱۸) مقدار ذخیره غیرچرخشی واحد تلمبه‌ای ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد. مقدار ذخیره غیرچرخشی برابر مجموع ذخیره غیرچرخشی در حالت روشن و خاموش واحد می‌باشد.

#### ۳-۲- مدل نیروگاه‌های بادی

##### ۳-۲-۱- تابع هدف

هدف از برنامه ریزی این نیروگاه دستیابی به حداکثر سود می‌باشد. تابع هدف مسئله برنامه ریزی تولید این نیروگاه در رابطه (۱۹) نمایش داده شده است.

$$R_{SW} = \sum_{ss=1}^m \sum_{t=1}^{NT} \sum_{w=1}^{NW} (epr(ss, t) \cdot P_{CW}(ss, t) - \tilde{C}_{imb} \cdot (P_{CW}(ss, t) - \tilde{P}_{DW}(ss, t))) \quad (19)$$

در این رابطه از هزینه‌های مربوط به نیروگاه بادی صرف نظر شده است.

##### ۳-۲-۲- پیش‌بینی تولید واحدهای بادی

به دلیل تغییرات آهسته سرعت باد و وابستگی زمانی توان تولیدی به ساعت‌های ماقبل خود، می‌توان از مدل ARMA جهت تولید سناریوهای بادی استفاده نمود [۱۷]. رابطه اساسی این روش به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$z_t = \sum_{j=1}^p \varphi_j + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (20)$$

$\varepsilon_t$  خطاها و  $\varphi_j$  و  $\theta_j$  ضرایب مربوط به ARMA و  $z_t$  یک سری زمانی می‌باشد که توسط تابع انتقال زیر با استفاده از داده‌های پیشین که همان توان تولیدی توسط نیروگاه بادی در لحظه  $t$  می‌باشد، بدست می‌آید.

$$z_t = \varphi [F_y(y_t)] \quad (21)$$

لازم به ذکر است که با استفاده از روش ARMA تولید واحد بادی در ۲۴ ساعت آینده پیش‌بینی می‌گردد.

##### ۳-۲-۳- استفاده از توزیع ویبال جهت تعیین احتمال وقوع سناریوها

به دلیل اینکه توزیع احتمالی توان بادی به توزیع ویبال نزدیکتر می‌باشد، لذا در این مطالعه از توزیع ویبال جهت تولید سناریوهای تولید نیروگاه بادی استفاده می‌شود. به این منظور پیش‌بینی توان تولیدی

۹- تکرار مراحل ۵ تا ۸ تا زمانی که تعداد سناریوهای مورد نظر تولید شوند.

#### ۴- روش پیشنهادی جهت مشارکت هماهنگ واحدها

##### ۴-۱- تعیین مقدار توان تحویلی

در این مقاله مسئله بهره برداری هماهنگ از واحدهای بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای در بازارهای انرژی و ذخیره مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مقدار توان تحویلی در شرایط بهره برداری هماهنگ از واحدها با مجموع توان تولیدی توسط نیروگاه بادی و تلمبه‌ای - ذخیره‌ای است که از معادله (۲۵) بدست می‌آید.

$$\bar{P}_D = P_{Dpomp} + \bar{P}_{Dwind} \quad (25)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر شد نیروگاه تلمبه‌ای - ذخیره‌ای دارای ریسک بسیار محدود می‌باشد که می‌توان از آن صرف نظر نمود و تولید آن را فاقد عدم قطعیت دانست. بنابراین عدم قطعیت مقدار توان تحویلی تنها به دلیل عدم قطعیت موجود در تولید نیروگاه بادی می‌باشد.

##### ۴-۲- مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی

###### ۴-۲-۱- عملکرد هماهنگ

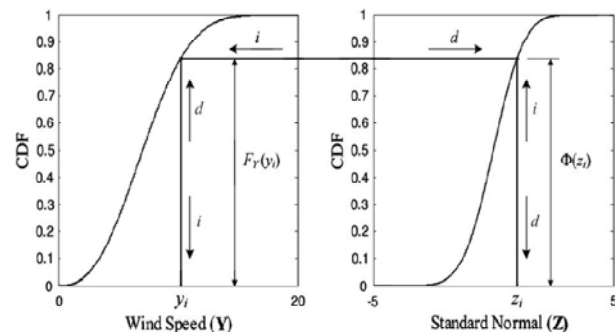
عملکرد هماهنگ نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای در [۱۸] پیشنهاد گردیده است. با بهره برداری هم‌زمان از نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای، جریمه عدم تولید توان نیروگاه بادی توسط نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای پوشش داده می‌شود. به منظور مدل‌سازی عملکرد این مجموعه نیروگاهی، لازم است هزینه‌ها و درآمدهای هر نیروگاه را به همراه قیود متناظر با آن در نظر گرفت. جزئیات بیشتر در مورد این روش بهره برداری در [۱۸] بیان شده است. لازم به ذکر است که، درآمدهای مجموعه ناشی از فروش انرژی و رزرو توسط نیروگاه‌ها می‌باشد. هزینه‌های مجموعه ناشی از هزینه‌های راه-اندازی نیروگاه‌های تلمبه‌ای ذخیره‌ای و هزینه‌ی عدم تعادل می‌باشد. با توجه به موارد فوق تابع هدف مدل پیشنهادی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \max R_T &= R_{sw} + R_{sps} \\ s. t: & eq(7) - (18) \\ & \text{and } P_{CW}(ss, t) + P_{CPH}(ss, t) \leq P_W^{max} \sum_{l=1}^{NPS} P_{gmax}(l, t) \end{aligned} \quad (26)$$

###### ۴-۲-۲- عملکرد مستقل

مسئله بهره برداری مستقل از واحدهای بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای در [۶] بیان شده است. در بهره برداری مستقل از واحدهای بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای، هر واحد به نحوی پیشنهاد تولید می‌دهد که سود خود را ماکزیم نماید [۶]. در این شرایط مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده جهت برنامه ریزی تولید این واحدها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

واحد بادی (که دارای توزیع نرمال است) به توزیع ویبال انتقال داده می‌شود. به این منظور از تابع انتقال  $\Phi$  استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است تابع انتقال  $\Phi$ ، داده‌های پیشین را از توزیع ویبال به توزیع نرمال منتقل می‌نماید.



شکل (۱): عملکرد تابع انتقال  $\Phi$  [۱۷]

##### ۴-۲-۳- مراحل تولید سناریوهای واحد بادی

مراحل تولید سناریو توسط این روش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- استفاده از داده‌های پیشین تولید بادی و تولید توزیع ویبال توان تولیدی مزرعه بادی
- ۲- تبدیل توزیع ویبال به توزیع نرمال استاندارد و انتقال داده‌های پیشین توسط معادله (۲۱) به توزیع نرمال و محاسبه  $Z_t$ .
- ۳- استفاده از مدل ARMA مطابق با معادله (۲۰) جهت پیش بینی تولید واحد بادی) و محاسبه  $\epsilon_t$  و ضرایب این مدل
- ۴- استفاده از  $\epsilon_t$  و ایجاد ماتریس  $G$  به صورت زیر

$$G_{NT \times NT} = \delta_\epsilon^2 I_{NT} \quad (22)$$

که  $NT$  دوره زمانی مورد نظر و  $\delta_\epsilon^2$  واریانس  $\epsilon_t$  می‌باشد.

۵- تولید  $NT$  نویز سفید و تشکیل ماتریس  $\xi_{NT \times 1}$  شامل این نویزها.

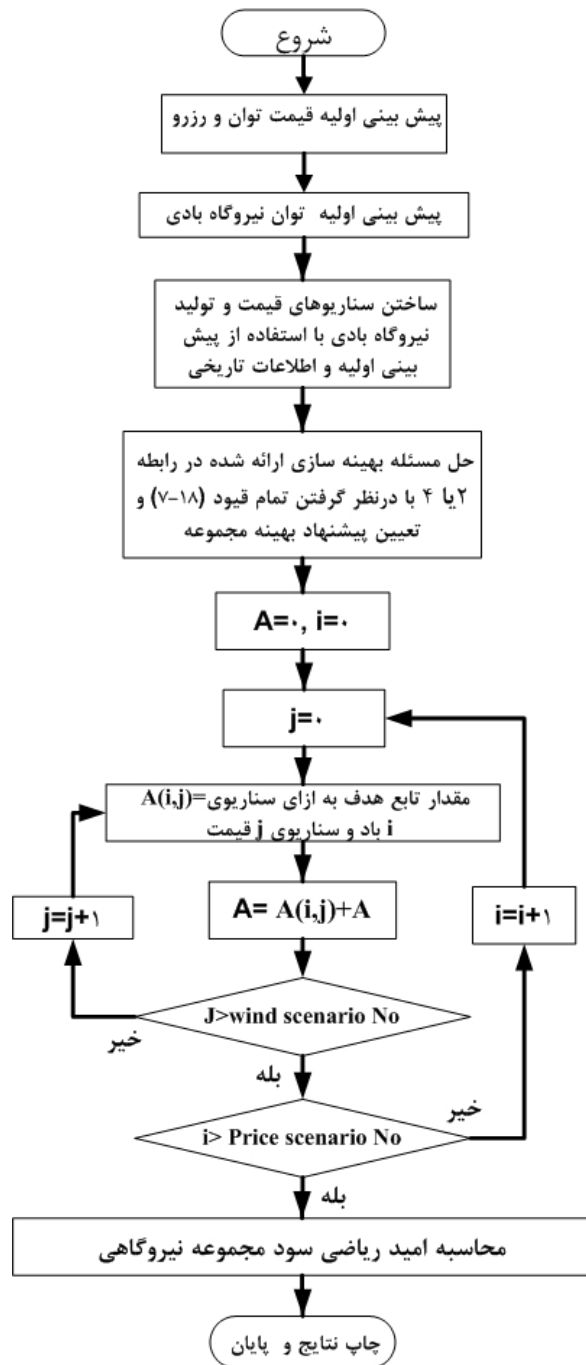
$$\xi_{NT \times 1} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_{NT} \end{bmatrix} \quad (23)$$

۶- محاسبه خطاهای جدید با استفاده از ماتریس  $\xi_{NT \times 1}$  و  $G$  توسط معادله زیر:

$$\epsilon_{tnew} = G_{NT \times NT} \cdot \xi_{NT \times 1} \quad (24)$$

۷- محاسبه  $Z_{tnew}$  با استفاده از پارامترهای به دست آمده از مراحل ۳ و ۶ می‌توان از  $\epsilon_{tnew}$  تولید شده و مدل ARMA با ضرایب موجود در مرحله ۳ استفاده نمود و به محاسبه  $Z_{tnew}$  پرداخت.

۸- در مراحل قبل داده‌های گذشته تولید از توزیع ویبال به توزیع نرمال انتقال یافته است تا بتوان با استفاده از روش ARMA تولید واحد بادی را پیش بینی نمود. در ادامه و پس از پیش بینی تولید واحدهای بادی لازم است مقادیر پیش بینی شده به توزیع ویبال انتقال یابند. به این منظور از عکس تابع انتقال موجود در معادله (۲۱) استفاده می‌شود و در ادامه  $y_{tnew}^A$  محاسبه می‌گردد.



شکل (۲): الگوریتم مدل پیشنهادی

### ۲-۵- داده‌های اولیه

جدول (۱) اطلاعات مربوط به مزرعه بادی سیستم ۱۱۸ باس IEEE را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر مینیمم و ماکزیمم مقدار توان تولیدی نیروگاه مشخص شده است. جداول (۲) و (۳) اطلاعات مربوط به سه واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای سیستم ۱۱۸ باس IEEE را نشان می‌دهد. حداقل زمان روشن و خاموش بودن هر یک از واحدها یک ساعت می‌باشد.

$$\max R_T(\text{Wind}) = R_{sw} \quad (27\text{-الف})$$

$$s. t: P_{CW}(ss, t) \leq P_W^{max}$$

$$\max R_T(PS) = R_{SPS} \quad (27\text{-ب})$$

$$s. t: eq(7) - (18) \text{ and } \sum_{l=1}^{NPS} P_{CPS}(l, t) \leq \sum_{l=1}^{NPS} P_{gmax}(l, t)$$

معادله (۲۷-الف) مسئله بهینه سازی مورد استفاده جهت برنامه ریزی تولید واحدهای بادی را نمایش می‌دهد. معادله (۲۷-ب) نیز مسئله بهینه سازی مورد استفاده جهت برنامه ریزی تولید واحدهای تلمبه‌ای - ذخیره‌ای را نمایش می‌دهد.

### ۳-۲-۴- فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

در شکل (۲) فلوجارت مسئله برنامه ریزی پیشنهادی نمایش داده شده است. بر اساس این فلوجارت، در ابتدا سناریوهای قیمت انرژی به دست می‌آید. در ادامه توان تولیدی نیروگاه بادی بر اساس روش بیان شده در بخش (۳-۲-۴) تعیین می‌شود و در ادامه به منظور بهره برداری هماهنگ از واحدهای بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای مسئله بهینه سازی معرفی شده در معادله (۲۶) حل می‌شود. علاوه بر این، به منظور بهره برداری مستقل از واحدهای بادی و تلمبه‌ای ذخیره‌ای مسئله بهینه سازی معرفی شده در معادله (۲۷) حل می‌شود. در هر یک از موارد فوق، می‌توان از یکی از توابع هدف پیشنهادی در رابطه (۲) یا (۴) استفاده کرد. با حل مسئله بهینه سازی، مقدار توان پیشنهادی هر یک از نیروگاه‌ها در هر یک از شرایط بهره برداری مستقل و هماهنگ و برای انواع توابع هدف معرفی شده در بخش (۲) محاسبه می‌شود.

### ۵- نتایج شبیه سازی

#### ۱-۵- سیستم تحت مطالعه

جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، عملکرد آن بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE بررسی می‌گردد. سیستم ۱۱۸ باس IEEE از سه واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای و یک مزرعه بادی تشکیل شده است. این مجموعه نیروگاهی با توجه به سناریوهای پیش‌بینی تولید توان بادی و پیش‌بینی قیمت انرژی و ذخیره در هر ساعت بازار روز پیش پیشنهاد خود را ارائه می‌دهند. این پیشنهادات به گونه‌ای ارائه می‌گردد که تابع هدف مسئله بهینه‌سازی ماکزیمم گردد.

گرفته شده است. با حل مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در رابطه (۲۶) (بهره برداری هماهنگ از نیروگاه‌ها) مقادیر توان پیشنهادی مجموعه نیروگاهی به بازار برق تعیین می‌گردد. شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) مقادیر پیشنهادی به بازار برق توسط این مجموعه را به ازای توابع هدف معادله (۲) و (۴) نمایش می‌دهد. در این شرایط با در نظر گرفتن معادله (۲) به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، مقدار درآمد نیروگاه برابر ۵۳۹۶۷/۶ دلار می‌شود. در صورتی که معادله (۴) به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شود، امید ریاضی سود برابر ۵۸۶۷۰ دلار می‌شود.

جهت ارزیابی عملکرد هماهنگ واحدها در بازار انرژی و ذخیره چرخان می‌توان میزان سود واحدها در شرایط بهره برداری مستقل و هماهنگ واحدها را با همدیگر مقایسه نمود. با حل مسئله (۲۷) مقادیر درآمد واحدها به ازای توابع هدف (۲) و (۴) محاسبه شده و در جدول (۴) نمایش داده شده است. مقادیر درآمد واحدها به ازای دو تابع هدف معرفی شده در تابع (۲) و (۴) و به ازای برنامه ریزی هماهنگ و مستقل واحدها در جدول (۵) نمایش داده شده است.

با مقایسه مقدار امید ریاضی سود به ازای استفاده از تابع هدف معادله (۲) در شرایط بهره برداری مستقل و هماهنگ مشاهده می‌گردد که در صورتی که نیروگاه‌ها به صورت مستقل در بازار انرژی شرکت نمایند امید ریاضی سود حاصله برابر با ۵۳۱۸۰/۴۳ دلار است؛ در حالی که اگر نیروگاه‌های بادی با پشتیبانی نیروگاه‌های تلمبه‌ای ذخیره‌ای در این بازار شرکت نمایند به سودی بیشتر، معادل ۵۳۹۶۷/۶۰۰ دلار می‌توان دست یافت. این نتایج را در بهینه‌سازی با تابع هدف معادله (۴) نیز می‌توان مشاهده کرد. در این حالت امید ریاضی سود حاصله در حالت کاری مستقل برابر با ۵۸۶۷۰/۲۶ دلار است؛ در صورتی که این سود در هنگام پشتیبانی نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای از نیروگاه‌های بادی به ۶۳۶۱۰/۸۶۴ دلار افزایش پیدا می‌کند.

با بررسی مقادیر جدول (۵) مشاهده می‌شود که بهره برداری هماهنگ از واحدها موجب افزایش امید ریاضی سود مجموعه می‌شود. در این شرایط، با پشتیبانی نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای از بادی، در مواقعی که نیروگاه بادی توانی کمتر از توان پیشنهادی تولید نماید، نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای می‌تواند این کسر تولید را جبران می‌نماید. همچنین در صورت تولیدی بیشتر از توان پیشنهادی، این نیروگاه تولید مازاد را ذخیره می‌نماید تا در مواقع مورد نیاز مورد استفاده قرار دهد.

به منظور انجام برنامه‌ریزی تصادفی، درخت سناریویی با ۳۳۰ شاخه طراحی شده است. تعداد ۳۳۰ سناریو شامل ۱۵ سناریوی قیمت انرژی و قیمت ذخیره و ۲۲ سناریوی پیش‌بینی توان بادی می‌باشد. این تعداد سناریو تمامی حالات ممکنه را پوشش می‌دهد [۱۶]. به منظور حل این مسئله از روش برنامه‌ریزی اعداد صحیح جهت حل این مسئله استفاده گردید. این برنامه، توسط نرم افزار GAMS نوشته شده و با حل کننده CPLEX اجرا شده است.

جدول (۱): اطلاعات مزرعه بادی سیستم ۱۱۸ باس IEEE

واحد بادی	(MW) منیمم توان	(MW) ماکزیمم توان
W1	۰	۱۰۰

جدول (۲): اطلاعات مخازن بالایی سه واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای سیستم

۱۱۸ باس IEEE

واحد	مخزن بالایی				$qS_{min}$ (Hm <sup>3</sup> /h)	$qS_{max}$ (Hm <sup>3</sup> /h)
	$V_{min}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{max}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{l,ini}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{f,fin}$ (Hm <sup>3</sup> )		
7001	50	150	55	55	5	15
7002	50	150	55	55	5	15
7003	60	200	80	80	7	20
واحد	$a$ (MWh <sup>2</sup> / (Hm <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> )		$b$ (MWh/ Hm <sup>3</sup> )		$c$ (MW)	$g \cdot st_{l,t,s}$ (\\$)
7001	-0.033		2.5		0.0	75
7002	-0.033		2.5		0.0	75
7003	-0.025		2.5		0.0	150

جدول (۳): اطلاعات مخازن پایینی سه واحد تلمبه‌ای - ذخیره‌ای سیستم

۱۱۸ باس IEEE

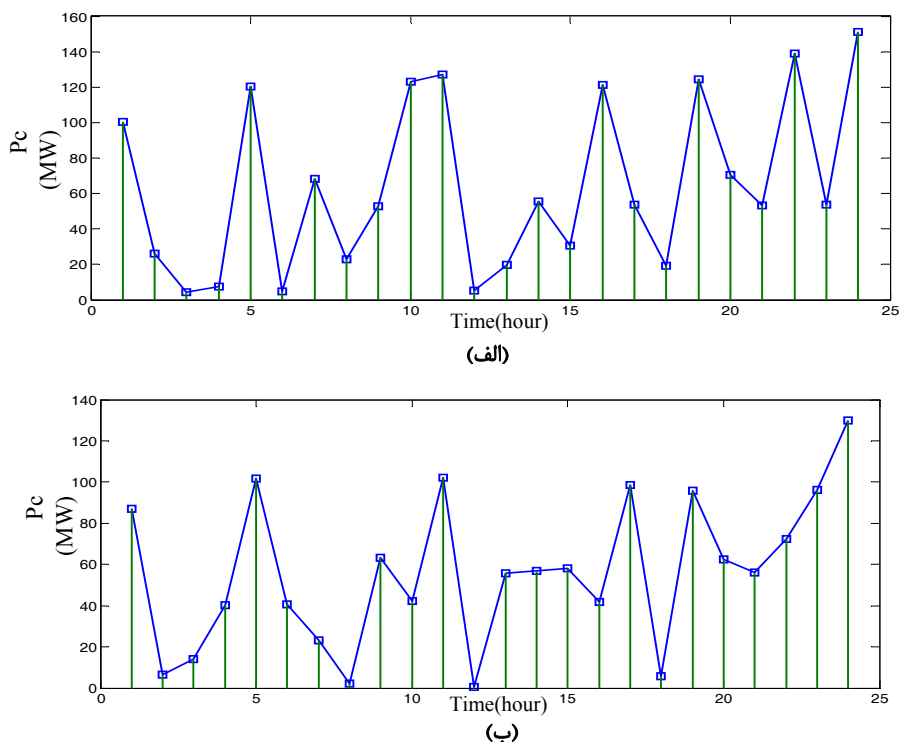
واحد	مخزن پایینی				$qp_{min}$ (Hm <sup>3</sup> /h)	$qp_{max}$ (Hm <sup>3</sup> /h)
	$V_{min}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{max}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{l,ini}$ (Hm <sup>3</sup> )	$V_{f,fin}$ (Hm <sup>3</sup> )		
7001	350	450	445	445	5	15
7002	350	450	445	445	5	15
7003	400	400	500	500	7	20
واحد	$a$ (MWh <sup>2</sup> / (Hm <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> )		$b$ (MWh/ Hm <sup>3</sup> )		$c$ (MW)	$p \cdot st_{l,t,s}$ (\\$)
7001	-0.033		2.5		0.0	100
7002	-0.033		2.5		0.0	100
7003	-0.025		2.5		0.0	400

### ۳-۵- تحلیل نتایج

#### ۳-۵-۱- مقایسه و تحلیل نتایج دو حالت کاری مستقل و

#### هماهنگ نیروگاه‌ها

در این مطالعه معادلات (۲) و (۴) به عنوان تابع هدف مسئله برنامه ریزی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مقدار  $\beta$  برابر ۰/۹ در نظر



شکل (۳): پیشنهادات ساعتی مجموعه نیروگاهی بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش (الف) بر اساس تابع هدف معادله (۲)، (ب) بر اساس تابع هدف معادله (۴)

نرمال استفاده شده است، مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه در جدول (۶) بیان شده است. با مقایسه نتایج این جدول در دو حالت برنامه ریزی مشاهده می‌شود امید ریاضی سود بدست آمده از تابع هدف معادله (۲) و (۴) برای مدل پیشنهادی به ترتیب برابر با  $53967/600$  و  $63610/864$  دلار می‌باشد در حالی که امید ریاضی سود بدست آمده برای مدلی که در آن از توزیع نرمال استفاده می‌شود به ترتیب برابر با  $52766/464$  و  $61530/207$  دلار می‌باشد. دلیل بالاتر بودن امید ریاضی سود در صورت استفاده از توزیع ویبال برای تولید سناریو بادی نزدیکتر بودن سناریوهای حاصل از توزیع ویبال به سناریوهای واقعی تولید نیروگاه بادی و کاهش عدم قطعیت‌ها می‌باشد.

جدول (۶): امید ریاضی سود حاصله بر اساس توزیع ویبال و توزیع نرمال

	توزیع نرمال بر اساس روش پیشنهادی در [۱۸ و ۱۹]	توزیع ویبال
تابع هدف معادله (۲)	۵۲۷۶۶/۴۶۴	۵۹۳۸۲/۷۸۸
تابع هدف معادله (۴)	۶۱۵۳۰/۲۰۷	۶۳۶۱۰/۸۶۴

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور بهره‌برداری هماهنگ از مزرعه بادی و واحدهای تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازارهای توان و خدمات جانبی، مدل جدیدی ارائه گردیده است. در این مدل، تولید واحدهای بادی با روش ARMA پیش بینی شده و سناریوهای مختلف تولید واحد بادی با

جدول (۴): امید ریاضی سود نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در حالت

### کاری مستقل

تابع هدف نیروگاه	تابع هدف معادله (۲)	تابع هدف معادله (۴)
بادی	۳۷۵۲۳/۸۴۸	۴۳۰۱۳/۶۷۸
تلمبه‌ای-ذخیره‌ای	۱۵۶۵۶/۵۸۲	۱۵۶۵۶/۵۸۲
مجموع	۵۳۱۸۰/۴۳	۵۸۶۷۰/۲۶

جدول (۵): مقدار امید ریاضی سود حاصله بر اساس روش‌ها و حالت‌های مختلف

	در حالت کارکرد مستقل	در حالت کارکرد هماهنگ
تابع هدف معادله (۲)	۵۳۱۸۰/۴۳	۵۳۹۶۷/۶۰۰
تابع هدف معادله (۴)	۵۸۶۷۰/۲۶	۶۳۶۱۰/۸۶۴

### ۲-۳-۵- مقایسه و تحلیل نتایج بر اساس توزیع ویبال و توزیع نرمال

برای نمایش برتری مدل پیشنهادی که در آن از توزیع ویبال برای تولید سناریو بادی استفاده شده است، نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از روش بیان شده در مرجع [۱۸] که در آن از توزیع



- [14] 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.
- [15] R. A. Schlueter, G. L. Park, M. Lotfalian, H. Shayanfar and J. Dorsey, "Modification of power system operation for significant wind generation penetration," IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-102, No. 1, pp. 153-161, Jan. 1983.
- [16] Lei Wu, Mohammad Shahidepour, "Financial Risk Evaluation in Stochastic PBUC", IEEE Trans. on Power System, Vol. 24, No. 4, November 2009
- [17] J.M. Morales, R. Minguez A.J. Conejo, "A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios", Applied Energy 87 (2010) 843-855.
- استفاده از توزیع ویبال ساخته شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE نشان می‌دهد که عملکرد هماهنگ نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای موجب افزایش سود نسبت به عملکرد مستقل این نیروگاه‌ها می‌باشد. همچنین سود بدست آمده برای مدل پیشنهادی که در آن از توزیع ویبال برای تولید سناریو بادی استفاده شده با مدلی که در آن از توزیع نرمال استفاده شده است مقایسه شده است. نتایج مقایسه نشان دهنده برتری مدل پیشنهادی در جهت کاهش عدم قطعیت‌ها، افزایش سود و نزدیک شدن به یک مدل واقعی می‌باشد.

## ۷- مراجع

- [۱۸] ز. فرقانی، ر.ا. هوشمند، ا. خداخشیان و م. پرستگاری، "بررسی عملکرد هماهنگ نیروگاه بادی و تلمبه‌ای-ذخیره‌ای در بازار روز-پیش و خدمات جانبی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹، شماره ۲، جلد (۴۰)، ص-ص ۶۳-۷۵.
- [1] S. Galloway, G. Bell, G. Burt, J. McDonald and T. Siewierski. "Short term trading for a wind power producer," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.153, No. 1, pp.554-564, January 2006
- [2] A. Dukpa, I. Duggal, B. Venkatesh and L. Chang "Optimal participation and risk mitigation of wind generators in an electricity market," IET Renew. Power Gener., Vol. 4, No. 2, pp. 165-175, 2010
- [3] 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.
- [4] J. Marquez Angarita, J. Garcia Usaola, "Combining hydro-generation and wind energy Bidding and operation on electricity markets", Electric Power Systems Research Vol. 77, pp. 393-400, 2007.
- [5] J.M. Angarita, J.G. Usaola, Combining hydro-generation and wind energy. Bidding and operation on electricity spot markets, Electr. Power Syst. Res. Vol. 77, pp. 393-400, April 2007.
- [6] 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.
- [7] V.S. Pappala, I. Erlich, and S.N. Singh, "Unit Commitment under Wind Power and Demand Uncertainties", International Conference on POWERCON 2008.12-15. New Delhi, pp. 1-5, Oct. 2008.
- [8] 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.
- [9] Yang H,ZhouW,Lou C.Optimal, " design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system".AppliedEnergy 2009;86(2):163-9.
- [10] Borowy BS, Salameh ZM.Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. IEEE Trans Energy Conversion 1996;11(2):367-73.
- [11] Tina G, Gagliano S, Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modeling for long-term performance assessment.Solar Energy 2006;80:578-88.
- [12] Yang HX, Lu L, Zhou W. A novel optimization sizing model for hybrid solar wind power generation system. Solar Energy 2007;81(1):76-84.
- [13] 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.