

# کمینه‌سازی کاهش اجباری توان تولیدی مزارع بادی با بهره‌گیری از یک راهکار کوتاه مدت ابتکاری بر مبنای بازپخش واحدهای فسیلی

محمدامین حضوری<sup>۱</sup> علی عباسپور<sup>۲</sup> محمود فتوحی فیروزآباد<sup>۳</sup> معین معینی اقطاعی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[hozouri@ee.sharif.edu](mailto:hozouri@ee.sharif.edu)

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[abbaspour@sharif.edu](mailto:abbaspour@sharif.edu)

۳- استاد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[fotuhi@sharif.edu](mailto:fotuhi@sharif.edu)

۴- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[mmoeini@ee.sharif.edu](mailto:mmoeini@ee.sharif.edu)

**چکیده:** در سالیان اخیر، به علت نگرانی‌های زیست محیطی و افزایش قیمت منابع سوخت، استفاده از انرژی باد با هدف تولید انرژی الکتریکی رشد فزاینده‌ای داشته است. از طرف دیگر، رشد سریع ظرفیت نصب شده مزارع بادی، باعث بروز مشکلاتی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت شده است. این مشکلات عمده‌تاً ناشی از مشخصات ذاتی مزارع بادی بوده و از ویژگی‌هایی چون عدم قطعیت توان تولیدی و عدم کنترل پذیری سطح توان خروجی آنها نشأت می‌گیرند. از جمله چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، نیاز به کاهش اجباری توان خروجی مزارع بادی برای حفظ قیود فنی شبکه انتقال است. در همین راستا، این مقاله سعی دارد در ابتدا با ارائه یک روش تحلیلی مناسب، به مدل‌سازی عدم قطعیت توان خروجی مزارع بادی پرداخته و سپس با ارائه یک روش ابتکاری برای بازپخش واحدهای فسیلی، توانایی این راهکار را در کمینه‌سازی کاهش اجباری توان خروجی مزارع بادی بررسی نماید. پس از شرح ساختار و فرمولاسیون روش پیشنهادی بازپخش واحدهای تولیدی با هدف بیشینه کردن استفاده از توان مزارع بادی، آن را بر روی شبکه تست اصلاح شده ۲۴ شینه (IEEE-RTS) IEEE-Reliability Test System اعمال کرده و با ارزیابی نتایج حاصله در ضرایب نفوذ باد متفاوت، میزان اثربخشی روش پیشنهادی بررسی می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** باد، کاهش اجباری توان تولیدی مزارع بادی، گرفتگی خطوط انتقال، بازپخش واحدهای تولید.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود فتوحی فیروزآباد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- خیابان آزادی- دانشگاه صنعتی شریف- دانشکده‌ی مهندسی برق



## ۱- مقدمه

کمبود ظرفیت شبکه برای انتقال توان تولیدی آنها بیش از پیش نمایان خواهد شد که این امر می‌تواند سبب گرفتگی در برخی از خطوط انتقال گردد [۹]. از آنجایی که توان تولیدی مزارع بادی،تابع سرعت باد بوده و بهره‌بردار شبکه کمترین کنترل را بر روی میزان توان خروجی آنها دارد امکان ایجاد گرفتگی در خطوط بیشتر می‌گردد. این شرایط بخصوص برای مزارعی که بیشینه سرعت باد آنها هم‌zman با بیشینه بار شبکه باشد تشدید می‌گردد. برای کاهش گرفتگی در خطوط، راهکارهای بلند مدت و کوتاه مدت متعددی وجود دارد. توسعه و گسترش خطوط شبکه انتقال با هدف کاهش میزان گرفتگی و یا هزینه ناشی از آن، یکی از راهکارهای بلند مدت و در عین حال مؤثرترین راه حل این مشکل است. اما طراحی و ساخت خطوط انتقال علاوه بر چالش‌های زیست محیطی و مشکلات کسب مجوزهای مریبوط به ساخت، اصولاً بسیار زمان بر و پرهزینه است. در مقایسه، زمان و هزینه ساخت یک مزرعه بادی بسیار کمتر از ساخت شبکه انتقال مورد نیاز آن است. حتی اگر طرح‌های توسعه خطوط انتقال در دست اجرا باشند، تا زمان تکمیل آنها، مشکل گرفتگی خطوط اگر تشدید نشود، بهبود نخواهد یافت. پس باید به دنبال راه حلی کوتاه مدت بود که به وسیله آن، در حد امکان از ظرفیت موجود شبکه در جهت استفاده هر چه بیشتر از انرژی بادی بهره برده و تا به نتیجه رسیدن طرح‌های توسعه خطوط انتقال، میزان انرژی بادی که به ناچار و در اثر گرفتگی خطوط انتقال قطع شده است را به حداقل رساند.

در کنار اقدامات بلند مدت، راهکارهای کوتاه مدتی مانند بازپخش<sup>۱</sup> واحدهای تولیدی نیز در مطالعات بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور، بهره‌بردار شبکه به یک یا چند واحد تولیدی، دستور قطع، کاهش و یا افزایش قسمتی از توان تولیدی را می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. در قیاس با واحدهای فیزی، انجام عملیات بازپخش بر روی مزارع بادی، به علت عدم کنترل-پذیری توان تولیدی آنها، امکان پذیر نبوده و تنها راه، قطع توان خروجی مزرعه بادی اطلاق می‌گردد. این امر سبب هدر رفتان یک منبع پاک انرژی الکتریکی، سازگار با محیط زیست و با هزینه حاشیه‌ای بسیار کم می‌گردد که با اهداف و سیاست‌های کلی مبنی بر استفاده هرچه بیشتر از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در تضاد خواهد بود. به همین جهت باید به دنبال راهکاری برای کمینه‌سازی این نوع کاهش اجباری توان بادی در شبکه بود و تحقیقات گسترهای بدین منظور در ادبیات بیشینه صورت گرفته است [۱۲ و ۱۳].

امروزه به دلیل نگرانی‌های زیستمحیطی از یک سو و منابع رو به اتمام انرژی‌های فیزی از سوی دیگر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان راهکاری اجتناب ناپذیر در دستور کار سیاست‌های بخش انرژی بسیاری از کشورها قرار گرفته است. بکارگیری انرژی بادی - به عنوان یکی از اصلی‌ترین و گسترده‌ترین صورت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر - در بخش تولید سیستم‌های قدرت در سال‌های اخیر توسعه قابل توجهی داشته است [۱]. در دهه گذشته، ظرفیت نصب شده انرژی بادی در جهان به طور متوسط با رشد سالیانه ۰.۲۵٪ مواجه بوده است [۲]. از مزایای اصلی انرژی باد می‌توان به هزینه پایین بهره‌برداری آن در قیاس با دیگر انواع انرژی‌های جایگزین اشاره نمود. مزیت دیگر انرژی باد، عدم تولید آلاینده‌های زیست محیطی می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از این نوع انرژی به حفظ طولانی‌تر منابع انرژی فیزی منجر می‌گردد. این ویژگی‌های مثبت، انگیزه کافی را برای بسیاری از کشورها بهمنظور تدوین سیاست‌ها و قوانین مورد نیاز به منظور استفاده هرچه بیشتر از انرژی بادی ایجاد کرده است [۳ و ۴].

اگرچه انرژی باد می‌تواند بسیاری از مسائل و مشکلات امروزه بشر را در بخش انرژی متأثر ساخته و پنجره‌هایی جدید برای تأمین انرژی نسل‌های آینده باز نماید، اما بعضی از خصوصیات ذاتی این انرژی تجدیدپذیر، فواید آن را تحت الشاعر قرار داده است. اکثر این خصوصیات ذاتی معلوم وابستگی توان تولیدی مزارع بادی به سرعت وزش باد می‌باشد. عدم توانایی در پیش‌بینی دقیق سرعت باد و در نتیجه میزان توان تولیدی مزارع بادی، کنترل ناپذیر بودن سطح تولیدی مزارع بادی در قیاس با سایر واحدهای تولیدی و همچنین متناوب بودن توان تولیدی مزارع بادی از مهم‌ترین این خصوصیات بهشمار می‌آید [۵]. انرژی بادی ذاتاً متناوب است. نوسان مداوم باد و عدم قطعیت آن، بر لزوم پیش‌بینی دقیق و رائمه مدلی جامع از سرعت باد تاکید می‌کند. هر چه پیش‌بینی سرعت باد دقیق‌تر باشد، مشکلات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری در استفاده از انرژی بادی در شبکه قدرت کمتر خواهد بود [۷].

دیگر مشکل عده در بهره‌برداری از مزارع بادی، محدودیت‌های فیزیکی شبکه‌های انتقال است. شبکه‌های انتقال، عموماً قدیمی بوده و روند توسعه آنها در مقایسه با رشد و گسترش مزارع بادی از سرعت بسیار کمتری برخوردار است [۸]. با افزایش ظرفیت نصب شده مزارع بادی در سیستم‌های قدرت،



مقدار سرعت باد در لحظه  $t$  ( $WS_t$ )، با توجه به میانگین سرعت باد ( $\mu_t$ )، انحراف معیار آن ( $\sigma_t$ ) و مقادیر سری زمانی  $y_t$  تعیین می‌شود.

$$WS_t = \mu_t + \sigma_t y_t \quad (2)$$

سپس با استفاده از رابطه (۳)، سرعت پیش‌بینی شده باد به توان خروجی توربین بادی تبدیل می‌شود [۱۷].

$$P_t^{tur.} = \begin{cases} 0 & 0 \leq WS_t \leq V_{ci} \\ (A + B \times WS_t + C \times WS_t^2) \cdot P_r & V_{ci} \leq WS_t \leq V_r \\ P_r & V_r \leq WS_t \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq WS_t \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $V_{ci}$ ،  $V_r$  و  $P_r$  به ترتیب سرعت قطع پایین (cut-in speed)، سرعت نامی (rated speed)، سرعت قطع بالا (cut-out speed) و توان نامی توربین بادی می‌باشند. ثابت‌های  $A$  و  $B$  در [۱۷] ارائه گردیده است. پس از پیش‌بینی مقادیر توان توربین‌های بادی، با در نظر گرفتن سرعت یکسان برای توربین‌های باد در یک مزرعه بادی، سطح توان مزارع بادی نیز به دست می‌آیند.

در آخرین مرحله از مدل‌سازی مزارع بادی، برای ایجاد امکان شبیه‌سازی روش پیشنهادی مقاله بر روی شبکه تست، به دلیل حجم بالای داده‌ها و تعداد بسیار زیاد سناریوهای احتمالی، نیاز به خوشه‌بندی این سناریوها احساس می‌شود. خوشه‌بندی را می‌توان به عنوان هنر یافتن الگوهای پنهان در میان انبوه اطلاعات بدون برچسب تعبیر کرد [۱۸]. این کار، داده‌ها را مطابق شbahت‌های میان آنها به گروه‌هایی یک‌دست و مجزا تقسیم‌بندی می‌کند. انواع روش‌های خوشه‌بندی شامل روش‌های قطعی، احتمالی و فازی هستند. در این میان، روش‌های فازی به عنوان روش‌هایی عملی و دقیق شناخته می‌شوند. روش خوشه‌بندی فازی Fuzzy C-Mean (FCM) clustering داده‌های هدف ( $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ) را پس از حل مسئله مینیمم-سازی زیر به تعداد  $C$  خوشه‌فازی تقسیم‌بندی می‌نماید [۱۹].

$$J_m(U, V) = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^n U_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (4)$$

که در آن  $m$ ،  $v_i$ ،  $U_{ik}$ ،  $v_i$  و  $U$  به ترتیب پارامتر فازی-سازی، میانگین خوشه  $i$ ام، درجه تعلق  $x_k$  به  $i$ امین خوشه، بردار میانگین خوشه‌ها و ماتریس قسمت هستند. بدین ترتیب مدل چندحالتی توان خروجی مزارع بادی به همراه احتمال هر حالت حاصل می‌شود. به منظور مطالعه بیشتر، خوشنده‌های علاقه‌مند می‌توانند به [۱۹] مراجعه کنند.

را حل پیشنهاد شده در این مقاله، نوعی بازپخش اصلاح شده توان خروجی واحدهای فسیلی با هدف بیشینه کردن استفاده از مزارع بادی و کمینه‌سازی کاهش اجباری توان آن است. بدین ترتیب که با افزایش و کاهش سطح تولید واحدهای فسیلی، مقداری از ظرفیت خطوط دچار گرفتگی را آزاد کرده و از این ظرفیت در راه بهره‌برداری مؤثرتر از انرژی بادی استفاده می‌شود. در این راستا، این مقاله ابتدا با استفاده از روشی بر پایه سری زمانی، سرعت باد را پیش‌بینی کرده و با استفاده از آن، توان خروجی توربین بادی و در نهایت یک مزرعه بادی را مدل می‌نماید. پس از آن، روش بازپخش پیشنهادی را مطرح کرده و ابزار و توابع پیاده‌سازی این روش را شرح می‌دهد. در قسمت بعد با اجرا و شبیه‌سازی روش ارائه شده بر روی شبکه تست، میزان تأثیر آن در افزایش استفاده از انرژی بادی و کمینه‌سازی کاهش اجباری توان مزارع بادی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

## ۲- مدل تحلیلی توان خروجی مزارع بادی

از آنجاییکه میزان توان توربین باد، تابعی غیرخطی از سرعت باد است، خطاهای کوچک در پیش‌بینی سرعت باد نیز ممکن است منتج به ایجاد خطایی بزرگ در مدل توان خروجی مزرعه بادی گردد. پس در ابتدا باید تا حد امکان و با بکارگیری روش پیش‌بینی دقیق، خطای مربوط به پیش‌بینی سطح توان مزارع بادی را به حداقل رسانند.

اکثر قریب به اتفاق روش‌های پیش‌بینی، از اطلاعات ثبت-شده پدیده مورد مطالعه در گذشته استفاده می‌کنند [۱۴]. اطلاعات مورد استفاده در این مقاله مربوط به سرعت باد در شهر منجیل است که توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) به ثبت رسیده است [۱۵].

برای پیش‌بینی سرعت باد، از روش آماری سری زمانی Auto-Regressive-Moving Average (ARMA) ارائه شده در [۱۶] استفاده شده است که در آن با استفاده از داده‌های تاریخی سرعت باد در سال‌های گذشته، سرعت آن در سال آینده پیش‌بینی می‌شود. صورت کلی سری زمانی مدل ARMA(n,m) در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$y_t = \sum_{i=1}^n \phi_i y_{t-i} + \alpha_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \alpha_{t-j} \quad (1)$$

که  $y_t$  مقدار سری زمانی در لحظه  $t$  و  $\phi_i$  و  $\theta_j$  پارامترهای سری زمانی ARMA هستند.  $\{\alpha_t\}$  نویز سفید نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_a^2$  است.



و راکتیو خروجی واحد فسیلی  $A_m$  می‌باشد.  $P_{W_j}^{c(\max)}$  حداکثر توانی است که زمین مزروعه بادی در سناریوی  $c$  ام با توجه به محدودیت‌های مکانیکی توربین‌ها در لحظه مورد مطالعه می‌تواند تولید نماید.  $Q_{W_j}^{c(\min)}$  و  $Q_{W_j}^{c(\max)}$  به ترتیب بیانگر حد بالا و پایین توان راکتیو خروجی زمین مزروعه بادی در سناریوی  $c$  می‌باشد.  $F_i^c$  توان انتقال یافته از طریق خط انتقال  $i$  ام در سناریوی  $c$  و  $F_i^{\max}$  حدکثر توان قابل انتقال از طریق آن خط است.  $V_b^c$  ولتاژ  $b$  امین شین در سناریوی  $c$  و  $V_b^{\min}$  و  $V_b^{\max}$  به ترتیب حد بالا و پایین مجاز اندازه ولتاژ آن شین هستند.  $L$  و  $B$  به ترتیب مجموعه خطوط انتقال و مجموعه شین‌های سیستم هستند. دومین تابع زیرهدف، نمایانگر امید هزینه افزوده شده به سیستم پس از بازپخش توان خروجی واحدهای فسیلی و کاهش قطع توان مزارع باد است که به همراه قیود آن در زیر شرح داده شده است.

$$\bar{F}_R = \sum_{c=1}^n P^c F_R^c \quad (15)$$

که  $F_S^c$  نیز چنین به دست می‌آید:

$$F_R^c = \sum_{i \in G \cup W} (C_i^{inc} \Delta P_i^{c(inc)} + C_i^{dec} \Delta P_i^{c(dec)}) \quad (16)$$

با قیود:

$$P_i^{c(new)} = P_i^c + \Delta P_i^{c(inc)} - \Delta P_i^{c(dec)} \quad (17)$$

$$\sum_{i \in G} P_{G_i}^{c(new)} + \sum_{j \in W} P_{W_j}^{c(new)} = \sum_{k \in D} P_{L_k} \quad (18)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i}^{c(new)} \leq P_{G_i}^{\max} \quad (19)$$

$$P_{W_j}^{c(new)} \leq P_{W_j}^{c(\max)} \quad (20)$$

$$|F_l^c| \leq F_l^{\max} \quad (21)$$

$$V_b^{\min} \leq |V_b^c| \leq V_b^{\max} \quad (22)$$

که  $\Delta P_i^{c(inc)}$  میزان توان تولیدی افزوده شده بر توان خروجی واحد  $A_m$  (اعم از فسیلی و بادی) و  $\Delta P_i^{c(dec)}$  مقدار توان کاسته شده از توان خروجی آن، پس از بازپخش واحدها و مربوط به سناریوی  $c$  می‌باشد. ضرایب  $C_i^{dec}$  و  $C_i^{inc}$  به ترتیب نمایانگر هزینه افزایش و کاهش یک مگاوات توان اکتیو تولیدی زمین واحد می‌باشند.  $P_i^{c(new)}$  نشان‌دهنده میزان تولید اصلاح شده واحد  $A_m$  پس از انجام بازپخش می‌باشد. مقدار  $C_i^{inc}$  در واحدهای فسیلی از روی تابع هزینه آن واحد ( $C_{G_i}$ ) به دست می‌آید و در مزارع بادی برابر صفر می‌باشد. میزان  $C_i^{dec}$  در واحدهای فسیلی برابر با صفر و در مزارع بادی عددی بزرگ فرض می‌شود. این عدد به گونه‌ای انتخاب می‌شود که طی فرایند بازپخش، توان خروجی مزارع بادی تا حد امکان دچار کاهش نشود.

### ۳- فرمولاسیون بازپخش اصلاح شده پیشنهادی

روش بازپخش واحدهای تولیدی پیشنهادی در این مقاله، راهکاری برای مدیریت گرفتگی و در نتیجه کمینه‌سازی کاهش اجراری توان مزارع بادی است. لذا، می‌توان معیارهای این مسئله را یافتن یک تطابق بهینه بین توان تولیدی واحدهای فسیلی و مزارع بادی به منظور بیشینه نمودن استفاده از توان تولیدی مزارع بادی و در عین حال حفظ قیود امنیتی شبکه بیان نمود. به منظور پوشش معیارهای بیان شده،تابع هدف بازپخش اصلاح شده، جمع وزن دار دو نوع هزینه به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$F_{obj} = \min(w_S \bar{F}_S + w_R \bar{F}_R) \quad (5)$$

که  $\bar{F}_S$  و  $\bar{F}_R$  به عنوان دو تابع زیرهدف، به ترتیب نشان دهنده «هزینه کل بهره‌برداری از شبکه پیش از بازپخش و با حفظ قیود شبکه» و «هزینه اضافه تحمیلی به شبکه در اثر بازپخش و با حفظ قیود شبکه» می‌باشند.  $w_S$  و  $w_R$  به ترتیب وزن نسبی هر یک از این دو تابع هستند.

حال به معرفی دو تابع زیرهدف می‌پردازیم. تابع اول، امید هزینه کل بهره‌برداری شبکه با حفظ قیودی است که در ادامه ارائه گردیده است:

$$\bar{F}_S = \sum_{c=1}^n P^c F_S^c \quad (6)$$

که در آن  $P^c$  احتمال رخدادن سناریوی  $c$  ام توان خروجی مزارع بادی بوده و  $F_S^c$  چنین به دست می‌آید:

$$F_S^c = \sum_{i=1}^n C_{G_i}(P_{G_i}^c) \quad (7)$$

با قیود:

$$\sum_{i \in G} P_{G_i}^c + \sum_{j \in W} P_{W_j}^c = \sum_{b \in B} P_{L_b} \quad (8)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i}^c \leq P_{G_i}^{\max} \quad (9)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i}^c \leq Q_{G_i}^{\max} \quad (10)$$

$$P_{W_j}^c \leq P_{W_j}^{c(\max)} \quad (11)$$

$$Q_{W_j}^{c(\min)} \leq Q_{W_j}^c \leq Q_{W_j}^{c(\max)} \quad (12)$$

$$|F_l^c| \leq F_l^{\max} \quad l \in L \quad (13)$$

$$V_b^{\min} \leq |V_b^c| \leq V_b^{\max} \quad b \in B \quad (14)$$

که  $C_{G_i}$  هزینه واحد فسیلی  $A_m$  و تابعی از توان خروجی آن می‌باشد (هزینه بهره‌برداری مزارع بادی ناچیز در نظر گرفته شده است).  $P_{G_i}^c$ ،  $P_{W_j}^c$ ،  $Q_{G_i}^c$  و  $Q_{W_j}^c$  به ترتیب توان تولیدی اکتیو و راکتیو زمین واحد فسیلی و زمین مزارعه بادی در سناریوی  $c$  و توان مصرفی بار در شین  $b$  می‌باشند.  $Q_{G_i}^{\max}$ ،  $P_{G_i}^{\max}$ ،  $Q_{G_i}^{\min}$  و  $P_{G_i}^{\min}$  به ترتیب نشان‌دهنده حد بالا و پایین توان اکتیو

## ۴- نتایج عددی

### ۱-۴- سیستم تحت مطالعه

شبکه‌ای که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، شبکه IEEE-Reliability Test System (IEEE-RTS) ۲۴ شیوه (IEEE-RTS) اصلاح شده در شکل است. نمودار تک خطی شبکه IEEE-RTS اصلاح شده در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم دارای ظرفیت تولیدی برابر ۳۴۰۵ مگاوات و بار ۲۸۵۰ مگاوات است. سایر اطلاعات و داده‌های این شبکه در [۲۰] شرح داده شده‌اند. این شبکه از سیستم انتقال نسبتاً قوی بهره می‌برد. به منظور سنجش میزان تأثیرگذاری روش پیشنهادی مقاله، اصلاحاتی به شرح زیر در این شبکه اعمال شده است:

ظرفیت همه خطوط متصل کننده شین‌های ۱۶ به ۱۷، ۱۶ به ۱۹، ۱۷ به ۱۷، ۱۸ به ۱۸، ۲۱ به ۲۱، ۲۲ به ۲۰، ۲۰ به ۲۳ و ۲۱ به ۲۲ به ۲۱ به ۴۰٪ مقادیر اولیه کاهش یافت. ظرفیت خط متصل بین شین‌های شماره ۶ و ۱۰ تغییری نکرده است. ظرفیت مابقی خطوط، همگی به ۸۰٪ ظرفیت نامی خود کاهش داده شد.

### ۲-۴- انواع ضریب نفوذ‌های مزارع بادی تحت مطالعه

روش پیشنهادی مقاله بر روی شبکه IEEE-RTS اصلاح شده و در ضرایب نفوذ باد ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ مطالعه گردید. در ضریب نفوذ ۱۰٪ یک مزرعه بادی با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات متصل به شین شماره ۱ اضافه گردید. در ضریب نفوذ ۲۰٪، علاوه بر مزرعه بادی قبل، دو مزرعه بادی هر یک با ظرفیتی برابر ۳۰۰ مگاوات متصل به شین‌های شماره ۲ و ۶ فرض شده‌اند. در نهایت برای مطالعه سیستم با ضریب نفوذ ۳۰٪، علاوه بر سه مزرعه بادی مذکور، یک مزرعه بادی با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات به شین شماره ۲۲ شبکه RTS متصل شد. شکل (۱) شبکه IEEE-RTS متص‌ل شده را به همراه مزارع بادی افزوده شده به آن نمایش می‌دهد.

با استفاده از روش شرح داده شده بر مبنای سری زمانی ARMA و داده‌های تاریخی ۴ ساله‌ی سرعت باد منطقه منجیل (۲۰۰۶-۲۰۰۹)، سرعت یک سال باد پیش‌بینی شد. برای مدل کردن مزرعه بادی از توربین‌های ۲ مگاواتی مدل V90 ساخت شرکت "Vestas Wind Systems" استفاده شد که در آن به ترتیب برابر ۴، ۱۲ و ۲۵ متر بر ثانیه است. دیگر پارامترهای این نوع توربین بادی در [۲۱] قابل دسترس می‌باشند.

چنانچه در مقدمه اشاره شد، کمبود ظرفیت خطوط انتقال و گرفتگی آنها، نقشی اساسی در کاهش اجباری توان باد دارد. در کنار ظرفیت خطوط انتقال هستند، در یک شبکه قدرت با ضریب نفوذ باد بالا، محل اتصال مزارع بادی به شبکه را می‌توان به عنوان دیگر فاکتور تاثیرگذار در این امر بر شمرد. شناسایی نقاط ضعف و قوت شبکه انتقال، راهکارهای اجرایی بهره‌بردار شبکه برای کاهش گرفتگی را اثربخش‌تر کرده و به برنامه‌ریز شبکه توأمی بیشتری برای تجهیز هرچه اقتصادی‌تر شبکه در آینده را می‌دهد. یکی از شاخص‌هایی که با توجه به آن می‌توان شناخت دقیق‌تری از شبکه انتقال به دست آورد، احتمال گرفتگی هر خط در شبکه است. احتمال گرفتگی هر خط را در ضریب نفوذ بادی مشخص (که آن ضریب را با  $pen$  نمایش می‌دهیم)  $P_i^{pen}$  می‌نامیم. این احتمال از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P_i^{pen} = \sum_{n \in S} (P_n^{pen} \times X_l) \quad (23)$$

که  $S$  مجموعه سناریوهای مربوط به ضریب نفوذ  $pen$  و احتمال رخدان سناریوی  $n$  از مجموعه  $S$  است. مقدار  $X_l$  از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$X_l = \begin{cases} 1 & \text{if line } l \text{ is congested} \\ 0 & \text{if line } l \text{ is not congested} \end{cases} \quad (24)$$

عوامل بسیاری در کاهش اجباری توان مزارع بادی نقش دارند. علاوه بر گرفتگی خطوط و محدودیت آنها در انتقال توان الکتریکی که به نوعی مهم‌ترین عامل در این امر است؛ ضریب نفوذ باد، میانگین سرعت باد و محل اتصال مزارع بادی به شبکه از دیگر عوامل مؤثر در این زمینه هستند. شناخت مزارع بادی که بیشتر در معرض قطع توان قرار دارند و اطلاع از مقدار متوسط توان قطع شده آنها، به بهره‌بردار سیستم انتقال در اولویت‌بندی واحدهای تولید توان بادی برای انجام اقدامات کاهش دهنده قطع توان کمک می‌کند.

این مقادیر همچنین می‌توانند بخش خصوصی را در چگونگی سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی بادی در آینده راهنمایی کنند. احتمال رخدان هرگونه کاهش اجباری در توان خروجی مزرعه  $W_i$  (بدون در نظر گرفتن میزان توان قطع شده) را می‌نامیم. این احتمال چنین به دست می‌آید:

$$P_{W_i}^{cur} = \sum_{n \in S} (P_n^{pen} \times Y_i) \quad (25)$$

که مقدار  $Y_i$  در آن از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$Y_i = \begin{cases} 1 & P_{W_i} < P_{W_i}^{\max} \\ 0 & P_{W_i} = P_{W_i}^{\max} \end{cases} \quad (26)$$


گرفتگی خطوط، بهویژه آنهایی که دارای ظرفیت کم بوده و یا به شین مزارع بادی اتصال دارند بالا می‌رود. اما افزایش ضریب نفوذ باد را نمی‌توان همواره به عنوان عامل تشیدکننده گرفتگی خطوط انتقال برشموده. به عنوان مثال در ضریب نفوذ ۳۰٪، توان تزریقی مزروعه بادی شین ۲۲، برخلاف دیگر مزارع بادی، از شمال شبکه به جنوب آن جریان دارد و این امر باعث کاهش احتمال گرفتگی در خطوط ۱-۵ و ۶-۱۰ در ضریب نفوذ ۳۰٪ نسبت به ۲۰٪ شده است.

جدول (۱): سناریوهای به دست آمده برای هر مزرعه بادی

احتمال	توان خروجی (MW)	شماره مزرعه بادی (ظرفیت)
۰/۱۳۸	۳۲۰/۰۶	
۰/۱۹۲	۲۳۱/۲۳	۲۲ و ۱ (۴۰۰ MW)
۰/۲۷۵	۱۵۳/۵۰	
۰/۲۹۵	۶۷/۲۳	
۰/۰۴۴	۲۴۰/۰۳	
۰/۱۷۵	۱۷۳/۱۱	۶ و ۲ (۳۰۰ MW)
۰/۳۵۴	۱۱۵/۲۳	
۰/۰۲۷	۵۰/۱۸	

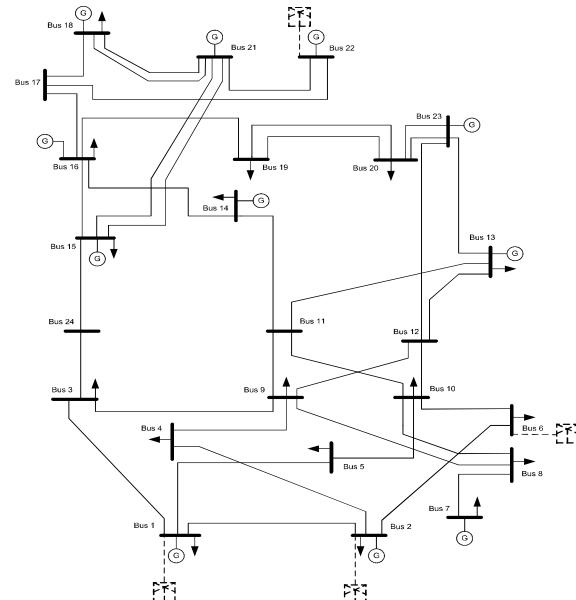
در جدول (۴) احتمال پیشامد قطع توان مزارع بادی در ضرایب نفوذ باد متفاوت با توجه به رابطه (۲۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با افزایش ضریب نفوذ باد در شبکه، احتمال رخ دادن کاهش اجباری توان در هر مزرعه بادی افزایش می‌یابد؛ هرچند باید توجه داشت که ضریب نفوذ باد، تنها عامل مؤثر در این احتمال نیست. به عنوان مثال، با افزایش ضریب نفوذ باد از ۲۰٪ به ۳۰٪ در اثر اضافه شدن مزرعه بادی به شین ۲۲ در ناحیه شمالی شبکه، احتمال رخ دادن قطع توان در مزرعه بادی شماره ۱ تنها ۱/۹٪ افزایش یافته است. چنانچه مزرعه بادی شماره ۲۲ به شینی در نواحی جنوبی شبکه متصل می‌شد، احتمال رخ دادن کاهش اجباری توان در مزرعه بادی ۱ بیش از مقدار کنونی می‌بود.

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب توان خروجی مزارع بادی را در شبکه مورد مطالعه با ضریب نفوذ بادی ۲۰٪ و ۳۰٪ قبل و پس از پیاده‌سازی بازپیخش نمایش می‌دهند. در ضریب نفوذ ۲۰٪ دو مزرعه بادی ۱ و ۲ در مجاورت یکدیگر بوده و به علت اینکه توان هر دو واحد از یک محدوده به شبکه تزریق می‌شود خطوط در آن ناحیه، بیشتر دچار گرفتگی شده و این دو مزرعه بادی، خصوصاً مزرعه بادی شماره ۱ با قطعی توان نسبتاً زیادی مواجه هستند. این قطعی توان که در شکل (۲) قابل مشاهده است با انجام بازپیخش و تحمیل هزینه اضافه به هزینه‌های بهره‌برداری شبکه، تا مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با اعمال سرعت یک سال به رابطه (۳)، سطوح توان خروجی توربین باد و سپس مزارع بادی حاصل شد. در مرحله بعد با استفاده از روش خوشه‌بندی شرح داده شده، سطوح توان خوشه‌بندی شده و احتمال آنها به دست آمد. در نهایت ۴ سناریو برای توان خروجی هر یک از مزارع بادی حاصل شد که جدول (۱) این سناریوها را به همراه احتمال آنها نمایش می‌دهد.

### ۴-۳-۴- تحلیل نتایج

با اعمال سناریوهای مذکور به شبکه ۲۴ شینه IEEE-RTS اصلاح شده، بسته به میزان نفوذ باد در شبکه، نتایج حاصله نیز متفاوت خواهد بود. جدول (۲) مقدار مورد انتظار هزینه کل بهره‌برداری از شبکه، میزان هزینه بازپیخش به ازای کاهش هر مگاوات توان بادی قطع شده و سهم بازپیخش در هزینه کل بهره‌برداری را در هر یک از ضرایب نفوذ باد نشان می‌دهد. افزایش ضریب نفوذ باد، از طرفی ممکن است گرفتگی شبکه انتقال را تشید کرده و هزینه بهره‌برداری شبکه را افزایش دهد؛ اما از طرف دیگر هزینه‌های تولید توان مورد نیاز سیستم را کاهش می‌دهد. این کاهش که ناشی از هزینه ناچیز تولید انرژی مزارع بادی است بسیار بیش از افزایش هزینه مذکور بوده و در نهایت به کاهش هزینه کل می‌انجامد.

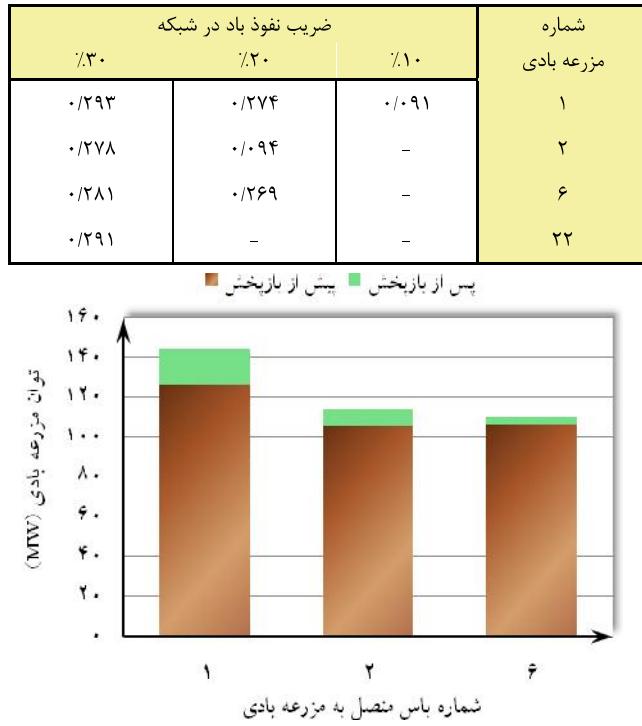


شکل (۱): نمودار تک خطی شبکه RTS اصلاح شده

جدول (۳) احتمال گرفتگی هر یک از خطوط انتقال را در ضرایب نفوذ با مختلف نمایش می‌دهد. مقادیر این جدول با استفاده از رابطه (۲۳) به دست آمده‌اند. توابع لوزی شبکه و شین اتصال واحدها به شبکه، نقشی اساسی در پرشدگی خطوط انتقال دارند. به طور کلی با افزایش ضریب نفوذ باد در سیستم، احتمال

داشته است که به دلیل افزایش سهم هزینه بازپخش ( $F_R$ ) در هزینه کل ( $F_{obj}$ ) است. همچنین همانطور که در بخش بعد خواهد آمد، سیاست‌های هر کشور در هدف‌گذاری برای حمایت و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر که در مقادیر  $w_R$  و  $w_s$  معکوس می‌شوند، نقشی حیاتی در این امر دارند.

جدول (۴): احتمال پیشامد کاهش اجباری توان هر مزرعه بادی انتقال شبکه در ضرایب نفوذ باد متفاوت



شکل (۲): امید ریاضی توان خروجی مزارع بادی در نفوذ باد %۲۰.

#### ۴-۴- تحلیل حساسیت بر روی $w_s$ و $w_R$

همانطور که در بخش ۳ بحث شد، به منظور وارد نمودن اثر هزینه‌های بازپخش در مطالعات بهره‌برداری از دو ضریب  $w_s$  و  $w_R$  استفاده گردید. تعیین مقادیر این دو وزن می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در جواب مسأله بهینه‌سازی، میزان تابع هدف، مقدار بازپخش واحدها و انحراف از حالت اولیه سیستم داشته باشد. در این بخش تعیین مقادیر بهینه برای این وزن‌ها و مفاهیم عملی آنها را مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد.

بهره‌بردار سیستم می‌باشد با توجه به مواردی از قبیل هزینه بهره‌برداری سیستم، نوع بازار انرژی و قوانین حمایتی وضع شده در آن کشور یا منطقه برای پشتیبانی از تولید انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر، ضرایب  $w_s$  و  $w_R$  را تعیین نماید.

جدول (۲): هزینه‌های بهره‌برداری سیستم در ضرایب نفوذ باد متفاوت

هزینه بهره‌برداری کل سیستم (\$/h)	ضریب نفوذ باد در شبکه
۵۴۹۱۷/۷۶	%۳۰      %۲۰      %۱۰
۵۷۳۷۹/۶۱	۱۱/۸۱      ۹/۴۹      ۴/۲۶
۶۵۵۹۴/۲۴	۷۳۳/۴۸      ۵۳۶/۴۷      ۷/۴۱

جدول (۳): احتمال گرفتگی خطوط شبکه در ضرایب نفوذ باد متفاوت

خطوط دچار گرفتگی	ضریب نفوذ باد در شبکه
۱-۲	%۳۰      %۲۰      %۱۰
۱-۵	۰/۰۰۳      ۰/۰۰۳      ۰/۰۹۱
۶-۱۰	۰/۴۴۵      ۰/۴۵۶      ۰
۱۶-۲۲	۰/۲۵۸      ۰/۲۷۴      ۰
۲۱-۲۲	۰/۹۹۸      ۰/۸۱۷      ۰/۹۹۲

با افزایش ضریب نفوذ باد از %۲۰ به %۳۰ و اضافه شدن مزرعه بادی به شین ۲۲ در ناحیه شمالی شبکه IEEE-RTS، همانطور که اخیراً بحث شد، از گرفتگی خطوط جنوبی کاسته می‌شود. بدین ترتیب چنانچه در شکل (۳) قابل مشاهده است، توان خروجی مزرعه بادی شماره ۱ پیش از بازپخش، نسبت به مقدار متناظر در ضریب نفوذ باد %۲۰ (شکل (۲)) افزایش قابل توجهی داشته است. پس به هزینه کمتری برای انجام بازپخش و کاهش توان قطع شده این مزرعه بادی نیاز است.

شکل‌های (۴) و (۵) میانگین توان در دسترس مزارع بادی که دچار کاهش اجباری شده و از آن در شبکه استفاده نشده است را در دو حالت بهره‌برداری پیش از اعمال روش بازپخش پیشنهادی و پس از آن، نشان می‌دهند. شکل (۴) مربوط به ضریب نفوذ بادی %۲۰ در شبکه و شکل (۵) مربوط به ضریب نفوذ %۳۰ است. این دو شکل، میزان تأثیر روش بازپخش پیشنهادی را از منظری دیگر نمایش می‌دهند. در ضریب نفوذ %۲۰ (شکل (۴)) میزان توان قطع شده مزرعه بادی شماره ۲ پس از انجام بازپخش به صفر رسیده و میزان قطع توان در دو مزرعه بادی دیگر به خصوص شماره ۱ کاهش مناسبی داشته است. با افزایش ضریب نفوذ باد به %۳۰ (شکل (۵)) تأثیر بازپخش در کاهش میزان توان قطع شده مزارع بادی ۱، ۲ و ۶ کمی کاهش

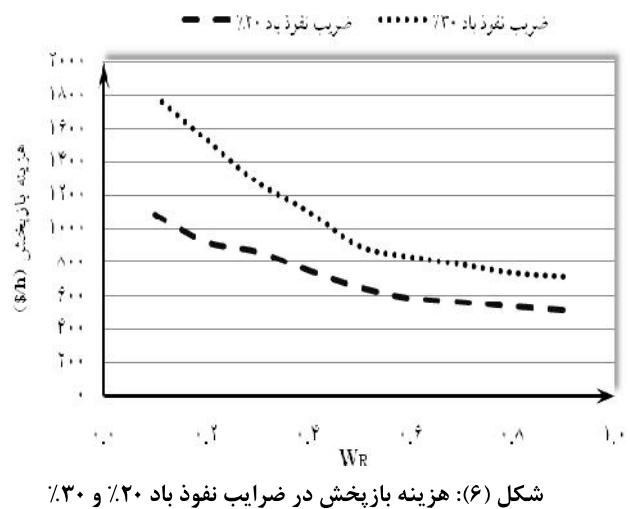
شبکه افزایش خواهد یافت که این امر ناشی از افزایش گرفتگی خطوط انتقال است.

نکته دیگری که از شکل (۶) استخراج می‌شود این مفهوم است که با افزایش  $w_R$ ، میزان تغییرات توان تولیدی واحدها و در نتیجه هزینه بازپخش کاهش می‌یابد.

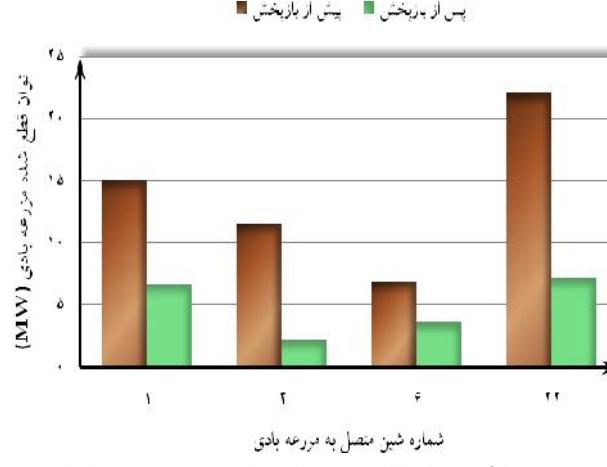
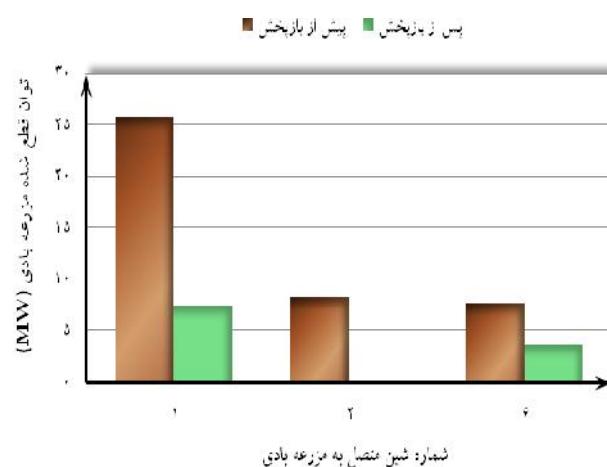
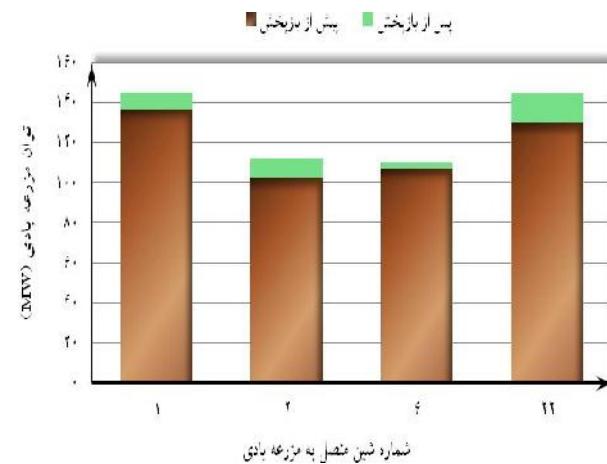
همانطور که گفته شد، علاوه بر معیارهای مربوط به امنیت و پایداری سیستم، سیاست‌های کلان و قوانین حمایتی اجرا شده در شبکه نیز از عوامل تعیین کننده در میزان استفاده از توان بادی نصب شده سیستم هستند. قوانین حمایتی از انرژی‌های تجدیدپذیر را - بدون مدنظر قرار دادن قوانین و معافیت‌های مالیاتی - می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد:

در دسته‌های اول، تولید کننده انرژی بادی همانند دیگر تولیدکنندگان در بازار شرکت کرده و همانند نیروگاه‌های فسیلی با دیگر تولیدکنندگان رقابت می‌کند. میزان تولید آنها به پیش-بینی‌ها و قیمت‌های پیشنهادی آنها و در نهایت قرارداد منعقد شده بستگی دارد. در این حالت باید با انتخاب مقادیر بزرگ  $w_R$ ، فاصله نقطه بهره‌برداری از شبکه پس از بازپخش از حالت پیش از انجام بازپخش را تا حد ممکن کاهش داد.

دسته دوم قوانین حمایتی، مربوط به قوانینی است که در آن، بهره‌بردار هر میزان توان تولیدشده مزارع بادی که در شبکه به مصرف رسیده است را با قیمتی معین به طور تضمینی خریداری می‌کند؛ اما بابت توانی که به دستور بهره‌بردار و به دلایلی چون گرفتگی خطوط انتقال قطع شده است، هیچ هزینه جبرانی به مالک مزرعه بادی پرداخت نمی‌شود.



از آنجایی که سیاست خرید تضمینی انرژی بادی نشان از اهمیت بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم دارد، باید با کاهش دادن  $w_R$  به سیستم اجزاء داد از انرژی بادی بیشتری



شکل (۶) تغییرات هزینه بازپخش را در اثر افزایش  $w_R$  (کاهش  $w_S$ ) نشان می‌دهد. مقایسه این شکل با جدول (۲) بار دیگر نشان می‌دهد که با افزایش ضریب نفوذ بادی، میزان هزینه‌های بازپخش برخلاف هزینه کل بهره‌برداری از



## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا با بر شمردن چالش‌های بهره‌برداری از شبکه قدرت با ضریب نفوذ بالای باد، گرفتگی خطوط انتقال به عنوان اصلی‌ترین عامل کاهش اجباری توان مزارع بادی معرفی شد. پس از استفاده از روش ARMA در پیش‌بینی سرعت باد و توان توربین بادی، سناریوهای توان خروجی مزارع بادی به همراه (FCM) احتمال آنها با بهره‌گیری از یک روش خوشبندی کارا (KCA) استخراج شد. سپس روشی مبتنی بر بازپخش واحدهای فسیلی به عنوان راهکاری کوتاه مدت برای کاهش اجباری توان تولیدی مزارع بادی ارائه شد. هدف از این نوع بازپخش، برقراری نوعی مصالحه میان افزایش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه از یک سو و افزایش استفاده از ظرفیت‌های نصب شده توان مزارع بادی از سویی دیگر می‌باشد. این روش بر روی شبکه ۲۴ شیله IEEE-RTS در ضرایب نفوذ باد متفاوت اجرا شده و مقدار توان مورد استفاده و توان قطع شده، پیش و پس از انجام بازپخش به دست آمدند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که میزان کاهش اجباری توان مزارع بادی، تابع عواملی چون تopolوژی شبکه، ظرفیت خطوط انتقال، سرعت باد و محل نصب و اتصال مزرعه بادی به شبکه بوده و در ازای پذیرش مقدار هزینه‌ای اضافه (در اثر بازپخش)، می‌توان از انرژی بادی پیشتری در شبکه بهره بردن. همچنین نشان داده شده که میزان تأثیرگذاری روش ارائه شده و مقدار هزینه اضافی تحمیل شده به بهره‌بردار با توجه به انتخاب دو ضریب وزنی مربوط به هزینه بهره‌برداری و هزینه بازپخش، متغیر است. با بررسی انواع ساختارهای حمایتی انرژی‌های تجدیدپذیر موجود در بازارهای انرژی، نحوه تعیین مقادیر این ضرایب وزنی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بر این مهم تأکید دارند که روش پیشنهادی این امکان را به بهره‌برداران سیستم‌های قدرت می‌دهد که با توجه به قوانین و سیاست‌های حاکم بر بازار انرژی، نحوه بهره‌برداری بهینه از مزارع بادی را تعیین نماید.

## مراجع

- [1] Maisonneuve N., Gross G., "A production simulation tool for systems with integrated wind energy resources," Power Systems, IEEE Trans. on, vol. 26, no. 4, pp. 2285-2292, 2011.
- [2] Karki R., Hu P., and Billinton R., "Adequacy criteria and methods for wind power transmission planning," Power & Energy Society General Meeting, PES'09, IEEE, pp. 1-7, 2009.

پس از بازپخش استفاده کند. هرچند باید دقت داشت این کار علاوه بر هزینه بازپخش، هزینه خرید تضمینی توان افزوده شده بادی را نیز به سیستم تحمیل می‌کند که هزینه نسبتاً بالای است.

در دسته سوم قوانین حمایتی، بهره‌بردار موظف است علاوه بر خرید تضمینی انرژی تولیدی مزارع بادی، میزان درآمد از دست رفته آنها به خاطر کاهش اجباری توان بادی را نیز جبران نماید. هرچند ممکن است میزان قیمت پرداختی در مقابل توان قطع شده، پایین‌تر از نرخ خرید تضمینی انرژی استفاده شده باشد؛ اما همچنان هزینه بسیاری را در قیاس با دسته دوم قوانین حمایتی بر بهره‌بردار تحمیل می‌کند.

پس در این حالت بهتر است با کاهش  $w_s$  و افزایش  $w_r$  تا جای ممکن و پذیرفتن میزان هزینه بازپخش بیشتر (که در برابر هزینه‌های ناشی از خرید تضمینی انرژی بادی و جبران قطع توان بادی ناچیز خواهد بود)، از میزان انرژی بادی بیشتری در شبکه بهره بردن. باید توجه داشت که کاهش  $w_r$  تا جایی صورت می‌گیرد که باعث اختلال در پایداری و امنیت کارکرد شبکه نشود.

جدول (۵): مقادیر مناسب  $w_s$  و  $w_r$  در ساختارهای متفاوت حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر

$w_s$	$w_r$	بدون قوانین حمایتی
۰/۱ تا ۰/۳	۰/۷ تا ۰/۹	خرید تضمینی انرژی بادی، بدون جبران قطع توان
۰/۳ تا ۰/۷	۰/۳ تا ۰/۷	خرید تضمینی انرژی بادی، جبران قطع توان
۰/۷ تا ۰/۹	۰/۱ تا ۰/۳	قطع توان

به دلیل گستردگی و پراکندگی انواع سیاست‌های حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر و رویکردهای مختلف بازارهای انرژی به این امر، نتایج ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن بازار آزاد که در دسته اول معرفی کردید، به دست آمده‌اند. در مراحل بعد، روش بهره‌برداری ارائه شده در چارچوب قوانین حمایتی دسته‌های دوم و سوم و با تغییر مقادیر  $w_s$  و  $w_r$  نیز شبیه‌سازی و اجرا گردید و مقادیر مناسب این دو وزن حاصل شد. جدول (۵) مقادیر پیشنهادی  $w_s$  و  $w_r$  را در سیستمهای دارای هر یک از سه دسته ساختارهای حمایتی یادشده نشان می‌دهد.



- [16] Wangdee W., and Billinton R., "Considering load-carrying capability and wind speed correlation of WECS in generation adequacy assessment," *Energy Conversion, IEEE Trans. on*, vol. 21, no. 3, pp. 734-741, 2006.
- [١٧] احمد صالحی دوبخشی، محمود فتوحی فیروزآباد، "برنامه-ریزی توسعه واحدهای تولیدی در حضور نیروگاههای بادی از نقطه نظر قابلیت اطمینان،" *مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران*, سال پنجم، شماره اول، صفحه ۴۹-۴۲، بهار و تابستان ۱۳۸۷
- [١٨] حسین علیزاده، رسول حسینزاده، اسلام ناظمی، "تشخیص اجتماعات ترکیبی در شبکه‌های اجتماعی،" *مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران*, سال یازدهم، شماره دوم، صفحه ۶۰-۴۹، پاییز و زمستان ۱۳۹۳
- [19] Cannon R. L., Jitendra V. D., and Bezdek J. C., "Efficient Implementation of the Fuzzy c-Means Clustering Algorithms," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 2, pp. 248-255, March 1986.
- [20] Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee, "IEEE reliability test system," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2047-2054, 1974.
- [21] [Online]. Available: [http://www.vestas.com/files%2Ffiler%2Fen%2Fbrochures%2F090721\\_product-brochure\\_v90\\_1.8\\_2.0mw-en.pdf](http://www.vestas.com/files%2Ffiler%2Fen%2Fbrochures%2F090721_product-brochure_v90_1.8_2.0mw-en.pdf)

## زیرنویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Redispatch  
<sup>2</sup> Curtailment

- [3] Aparicio N., MacGill I., Rivier Abbad J., Beltran H., "Comparison of Wind Energy Support Policy and Electricity Market Design in Europe, the United States, and Australia," *Sustainable Energy, IEEE Trans. on*, vol. 3, no. 4, pp. 809-818, 2012.
- [4] MacGill I., "Electricity market design for facilitating the integration of wind energy: Experience and prospects with the Australian National Electricity Market," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 3180-3191, 2010.
- [5] Kabouris J., and Kanellos F. D., "Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems," *Sustainable Energy, IEEE Trans. On*, vol. 1, no. 2, pp. 107-114, 2010.
- [6] Ghassem Zadeh S., Hosseini S. H., and Gharehpetian G. B., "Modeling of Wind Energy Conversion System Including DFIG for Distributed Generation Studies," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 7, no. 2, pp. 51-64, Fall and Winter 2010.
- [7] Foley A. M., Leahy P. G., Marvuglia A., and McKeogh E. J., "Current methods and advances in forecasting of wind power generation," *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [8] Huang S. H., Maggio D., McIntyre K., Betanabhatla V., Dumas J., and Adams J., "Impact of wind generation on system operations in the deregulated environment: ERCOT experience," In *Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, pp. 1-8, 2009.
- [9] Moeini-Aghaie M., Abbaspour A., and Fotuhi-Firuzabad M., "Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—Part I: Theory and algorithm," *Power Systems, IEEE Trans. On*, vol. 27, no. 3, pp. 1585-1593, 2012.
- [10] Fink S., Mudd C., Porter K., and Morgenstern B., "Wind energy curtailment case studies," NREL subcontract report, NREL/SR-550-46716, 2009.
- [11] Waniek D., Hager U., Rehtanz C., and Handschin E., "Influences of wind energy on the operation of transmission systems," In *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, pp. 1-8, 2008.
- [12] Burke D. J., and O'Malley M. J., "Maximizing firm wind connection to security constrained transmission networks," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 25, no. 2, pp. 749-759, 2010.
- [13] Burke D. J., and O'Malley M. J., "Factors influencing wind energy curtailment," *Sustainable Energy, IEEE Trans. On*, vol. 2, no. 2, pp. 185-193, 2011.
- [14] Soman S. S., Zareipour H., Malik O., and Mandal P., "A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons," *North American Power Symposium (NAPS)*, vol. 4, 2010.
- [15] The Wind speed historical statistics in IRAN. [Online]. Available: <http://www.suna.org.ir/>.

