

## تعیین میزان ذخیره چرخان مورد نیاز برای سیستم‌های قدرت دارای واحدهای بادی بزرگ (مطالعه موردی: شرکت برق منطقه‌ای خراسان)

تکتم شریفیان عطار<sup>۱</sup> و محمد حسین جاویدی دشت بیاض<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس استاندارد تجهیزات، شرکت برق منطقه‌ای خراسان، toktam\_sharifian@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، hossein\_javidi@yahoo.com

چکیده - تولید برق توسط نیروی باد به دلیل تغییر دائم و سختی پیش‌بینی باد، عدم قطعیت‌های زیادی را در بهره‌برداری از سیستم قدرت وارد می‌نماید. با توجه به ماهیت متغیر نیروی باد و عدم پیش‌بینی دقیق آن، سیستم‌های دارای واحدهای بادی بزرگ نیازمند میزان ذخیره قابل توجهی می‌باشند که باید معمولاً در شرایط نیاز، از سایر منابع به غیر از نیروی باد تأمین گردد. در این مقاله هدف آن است که با توجه به خطای پیش‌بینی نیروی باد و نیاز مصرف، میزان رزرو مورد نیاز سیستم با تعریف تابع هدفی شامل: نرخ خروج اضطراری ژنراتورها، خطای پیش‌بینی بار سیستم، خطای پیش‌بینی نیروی باد و بزرگی مزرعه بادی تعیین گردد. کلید واژه - خطای پیش‌بینی نیروی باد و بار، ذخیره چرخان، سیستم قدرت دارای واحدهای بادی بزرگ.

واحدهای بادی بزرگ پرداخته شده و سپس با توجه به موارد فوق، میزان رزرو مورد نیاز برای شبکه خراسان با در نظرگیری یک مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی محاسبه گردیده است.

### ۱- مقدمه

امروزه، محدودیت منابع انرژی از طرفی و رشد مصرف انرژی از سوی دیگر سبب توجه بیشتر به انرژی‌های نو گردیده است [۱]. در این رابطه، استفاده از باد به عنوان یکی از انواع انرژی‌های جایگاه خاصی پیدا کرده است. با این حال، پیچیدگی‌های استفاده از انرژی باد از یکسو و توسعه سریع تکنولوژی استفاده از آن از سوی دیگر، سبب طرح مسائل جدیدی گردیده است [۲]. از جمله این مسائل، می‌توان به مشارکت این واحدها در برنامه‌ریزی کل سیستم قدرت، جبران‌سازی توان راکتیو، حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها با در نظر گرفتن نیروگاه‌های بادی و میزان رزرو مورد نیاز برای واحدهای بادی اشاره نمود [۳].

### ۲- بررسی ادبیات موضوع

تولید برق توسط نیروی باد به دلیل تغییر دائم و سختی پیش‌بینی باد، عدم قطعیت‌های زیادی را در بهره‌برداری از سیستم قدرت وارد می‌نماید. با توجه به این عدم قطعیت‌ها، سیستم‌های دارای واحدهای بادی بزرگ نیازمند میزان ذخیره قابل توجهی می‌باشند که باید معمولاً در شرایط نیاز، از سایر منابع به غیر از نیروی باد تأمین گردد [۳].

در سال ۲۰۰۱ در اروپا، حدود ۱۵ گیگاوات برق مصرفی توسط نیروی باد تأمین می‌شده است. با توجه به نوسانات نیروی باد و محدودیت پیش‌بینی دقیق باد، این حجم تولید نیازمند میزان زیادی رزرو در سیستم قدرت می‌باشد. با توجه به گسترش استفاده از نیروی باد برای تولید برق، آقای Dany در [۴]، میزان رزرو گرم، رزرو سرد و رزرو بلند مدت مورد نیاز سیستم را محاسبه نموده است. پروفیسور O'Malley و همکاران، در سال ۲۰۰۳، عوامل تأثیرگذار در تعیین میزان ذخیره مورد نیاز سیستم‌های قدرت دارای واحدهای بادی را معرفی کردند [۵]. محاسبات اقتصادی بودن قراردادهای تأمین برق کافی در مقایسه با احداث نیروگاه‌های جدید برای تولید مقدار رزرو در شرایط وجود نیروگاه‌های بادی توسط گروه تحقیقاتی خانم Orths در [۶] آورده شده است. در سال ۲۰۰۹، آقای Yong و همکاران کاربرد پخش بار بهینه تصادفی را در تعیین ذخیره بهره‌برداری

از آن جایی که در برنامه پنجم توسعه، نصب و راه‌اندازی ۵۰۰۰ مگاوات انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور در دستورکار قرار گرفته است و با توجه به این که خراسان دارای پتانسیل بادی مناسبی می‌باشد و از طرفی تاکنون در ایران مطالعه جدی بر روی میزان رزرو مورد نیاز برای سیستم قدرت دارای واحدهای بادی بزرگ صورت نپذیرفته است لذا، با در نظرگیری این شرایط، در این مقاله هدف آن است که با توجه به خطای پیش‌بینی نیروی باد و نیاز مصرف، میزان رزرو مورد نیاز سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی با تعریف تابع هدفی شامل: نرخ خروج اضطراری ژنراتورها، خطای پیش‌بینی بار سیستم، خطای پیش‌بینی نیروی باد و بزرگی مزرعه بادی تعیین گردد.

در این مقاله، ابتدا به بررسی اجمالی کارهای صورت پذیرفته در ارتباط با تعیین میزان رزرو سیستم‌های قدرت دارای

سیستم‌های دارای واحدهای بادی بزرگ نشان می‌دهند. در این مقاله، تولید توسط نیروی باد به عنوان یک توان تریقی متغیر در مسئله پخش بار بهینه تصادفی در نظر گرفته شده است [۱۷].

### ۳- تعیین میزان ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم قدرت دارای واحدهای بادی بزرگ

از آن جایی که در تعیین میزان ذخیره چرخان سیستم‌های قدرت، مسائل فنی شبکه نیز باید مورد توجه قرار گیرد، ابتدا باید میزان رزرو مورد نیاز سیستم با توجه به قیود قابلیت اطمینان و مسائل فنی شبکه مورد نظر تخمین زده شود. بنا به تعریف، ذخیره چرخان به میزان ظرفیتی اطلاق می‌گردد که، به منظور جبران عدم تکمیل ظرفیت تولید که با شبکه هماهنگ بوده، در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند بلافاصله برای تصحیح عدم تعادل تولید- بار که در نتیجه خروج واحد تولیدی یا سیستم انتقال به وجود آمده وارد عمل شود [۸-۹].

برای یک نهاد متولی سیستم قدرت اولین وظیفه، توانایی تأمین تقاضای انرژی مشتریان با برخی معیارهای قابلیت اطمینان می‌باشد. این نهاد باید ذخیره‌ای برای ظرفیت تولیدی نصب شده خود در نظر گیرد. مهمترین مشکل در این زمینه، تعریف صحیح یا بهینه ظرفیت تولیدی نصب شده که به عنوان ذخیره، بهره‌برداری می‌شود، می‌باشد. هر خطایی در عدم داشتن ذخیره کافی منجر به عدم تأمین انرژی در سیستم و در نتیجه نارضایتی مشتریان و کاهش درآمد شرکت به صورت مستقیم و غیر مستقیم می‌گردد. از سوی دیگر داشتن ظرفیت تولیدی اضافه به معنای داشتن هزینه‌های اضافی است [۱۰]. مقدار نیاز به ذخیره بهره‌برداری از سیستم قدرتی به سیستم قدرت دیگر متغیر است ولی به طور کلی میزان این نیاز با توجه به موارد زیر تعریف می‌گردد [۱۱]:

- تعداد و سبب واحدهای تولیدی موجود در کل سیستم
- احتمال خروج اضطراری برای هر یک از واحدهای سیستم
- تعمیرات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شده در تمام واحدها
- میزان تقاضای کل بار مشتریان در سیستم و تغییرات آن
- مقدار توان اضافه در دسترس که از اتصال به سایر نقاط شبکه سراسری قابل دسترسی است
- ماکزیمم ریسک مجاز بار تأمین نشده کل سیستم

### ۳-۱- مدل‌های قابلیت اطمینان

در شرایط استفاده گسترده از واحدهای بادی به منظور تأمین امنیت و کفایت سیستم وجود واحدهای متعارف بیشتری در سیستم مورد نیاز می‌باشد [۱۲]. علاوه بر آن، قابلیت اطمینان

سیستم‌های قدرت دارای واحدهای بادی بزرگ توسط میزان تقاضای بار کل سیستم، پراکندگی جغرافیایی واحدهای بادی، ظرفیت انتقال در دسترس و انعطاف‌پذیری کل سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است تمام موارد فوق باید در تحلیل قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شوند.

روش‌های متعارفی برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان وجود دارد [۱۳]. رایج‌ترین روش محاسبه قابلیت اطمینان، احتمال بار از دست رفته است [۱۴]. با توجه به طول زمان، ارزیابی احتمالی قابلیت اطمینان می‌تواند به اندازه‌گیری انرژی تبدیل شود. با داشتن مقدار ساعتی احتمال بار از دست رفته و بار کل سیستم، میزان انرژی تأمین نشده نیز قابل محاسبه می‌باشد، که به بیان ساده مجموع کمبود ظرفیت واحدهای تولیدی در طول یک دوره است. باید توجه داشت برای اکثر مطالعات قابلیت اطمینان در نظرگیری بازه زمانی بیش از یک سال مناسب نیست.

در این جا مدل قابلیت اطمینان بر اساس روش مقاله [۱۵] و همچنین استراتژی شرکت برق منطقه‌ای خراسان، حداکثر میزان خاموشی مجاز شبکه به ازای هر مشترک و قضیه وقوع تنها یک حادثه در سیستم، در نظر گرفته شده که فرمول‌بندی آن در بخش ۳-۴ آورده شده است.

### ۳-۲- نقش پیش‌بینی و عوامل خطا در پیش‌بینی

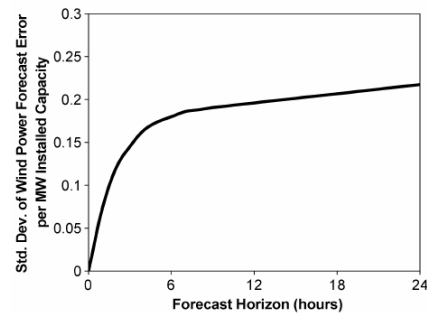
با توجه به این که تعیین میزان رزرو مورد نیاز سیستم قدرت دارای واحدهای بادی به میزان بار سیستم و همچنین مقدار توان تولیدی توسط واحدهای بادی وابسته است، پیش‌بینی این مقادیر الزامی می‌باشد. از آن جایی که هر پیش‌بینی‌ای دقیقاً مطابق با واقعیت نیست و دارای خطا می‌باشد، بررسی عوامل خطا در میزان پیش‌بینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نوسانات در توان خروجی واحدهای بادی مستقیماً به تغییرات سرعت باد نسبت داده می‌شود. این تغییرات بسته به شرایط آب و هوایی، متغیر می‌باشد و منجر به داشتن یک منبع تولیدی بسیار متغیر و نوسانی می‌شود. به طور کلی تغییرات روزانه و موسمی باد می‌تواند برقراری تولید و مصرف کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد [۱۶].

جدول ۱: دسته‌بندی تغییرات باد [۱۷]

دسته‌بندی تغییرات	قابلیت پیش‌بینی	تأثیر بر روی سیستم قدرت
سالانه	غیرقابل پیش‌بینی ولی اندک	قابلیت اطمینان / کفایت
فصلی	تقریباً قابل پیش‌بینی	قابلیت اطمینان
موسمی	قابل پیش‌بینی چند روز جلوتر	مشارکت واحدها / رزرو
روزانه	تقریباً قابل پیش‌بینی	رزرو
نوسانات	غیرقابل پیش‌بینی	کیفیت توان

در حال حاضر، تکنیک‌های پیش‌بینی نیروی باد موضوع تحقیقات زیادی است [۱۸]. پیش‌بینی نیروی باد می‌تواند هزینه‌های ناشی از قطع بار را کاهش دهد. معمولاً فرض می‌شود خطای پیش‌بینی نیروی باد از یک توزیع نرمال پیروی می‌نماید [۱ و ۱۹]. انحراف معیار نرمالیزه شده‌ی خطای پیش‌بینی باد برای یک مزرعه بادی خاص با افزایش افق پیش‌بینی، افزایش می‌یابد [۲۰]. با توجه به آن که میزان رزرو مورد نیاز سیستم را می‌توان چند ساعت قبل از بهره‌برداری سیستم تعیین نمود، خطای پیش‌بینی نیروی باد را می‌توان به صورت یک توزیع نرمال با انحراف معیار نرمالیزه شده به صورت شکل ۱ در نظر گرفت.



شکل ۱: انحراف معیار نرمالیزه شده‌ی خطای پیش‌بینی باد به عنوان تابعی از افق پیش‌بینی برای یک توربین [۱۷]

پیش‌بینی بار بر حسب بازه پیش‌بینی، به سه دسته اصلی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت تقسیم می‌گردد [۲۱]. پیش‌بینی کوتاه مدت بار نقش به‌سزایی در بهره‌برداری ایمن و اقتصادی سیستم قدرت ایفا می‌کند. مهم‌ترین دلیل برای پیش‌بینی ساعتی بار الکتریکی روزانه، برقراری هماهنگی میان تولید و تقاضای مصرف می‌باشد. واضح است که پیش‌بینی بار به کمک هر روشی دارای خطا است. به طور کلی با توجه به تحقیقات انجام شده و مقایسه نتایج پیش‌بینی با بار واقعی، توزیع نرمال از مناسب‌ترین توزیع‌ها برای خطای پیش‌بینی بار کوتاه مدت است [۱ و ۲۲]. در این مقاله، نیز خطای پیش‌بینی بار به صورت یک توزیع نرمال در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳-۳-۳-۳ تعریف مسئله

همان‌طور که بیان شد تعیین میزان رزرو برای سیستم‌های دارای واحدهای بادی بزرگ در تعدادی از مقالات ارائه شده است. در برخی از آن‌ها میزان رزرو صرفاً بر اساس خطای پیش‌بینی نیروی باد و بار تعیین گردیده است. در برخی صرفاً هزینه خرید خاموشی مدنظر قرار گرفته است. دسته‌ای نیز با اتکا بر افزایش دقت پیش‌بینی نیروی باد، صرفاً خرید از بازارهای جانبی لحظه-ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله هدف تعیین میزان ذخیره چرخان سیستم قدرت در شرایط وجود واحدهای بادی

بزرگ می‌باشد. در این تحقیق، نرخ خروج اضطراری ژنراتورها، خطای پیش‌بینی بار سیستم، خطای پیش‌بینی نیروی باد و سائز مزرعه بادی به صورت همزمان لحاظ گردیده‌اند.

### ۳-۳-۱-۳-۳ قیود مسئله

در این جا قیود غالب عبارتند از: تعادل توان حقیقی سیستم، حدود تولید واحدها، حداقل زمان‌های توقف و فعالیت واحدهای حرارتی و قیود شیب.

### ۳-۳-۲-۳-۳ شبکه مورد مطالعه و فرضیات

سیستم قدرت مورد مطالعه، شبکه ۴۰۰ کیلوولت خراسان می‌باشد. این مطالعه برای یک مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی انجام گردیده است. اگر چه ظرفیت ماکزیمم نیروگاه بادی بینالود حدود ۲۰۰۰ مگاوات است، ظرفیت نصب شده این نیروگاه تاکنون فقط ۲۸/۴ مگاوات می‌باشد و تا افق ده سال آینده نیز تجهیزات نصب شده آن به ۵۰۰ مگاوات نخواهد رسید لذا، اطلاعات بار مصرفی و ظرفیت خطوط برای زمانی که ظرفیت نیروگاه بادی به ۵۰۰ مگاوات برسد در دسترس نیست. برای واقعی بودن اطلاعات بارهای شبکه مورد مطالعه و ظرفیت خطوط در این پژوهش نیروگاه فردوسی به عنوان یک نیروگاه بادی ۵۰۰ مگاواتی در شبکه در نظر گرفته شده است. واضح است به دلیل عدم در نظرگیری تلفات شبکه در تعیین میزان رزرو کل سیستم، سطح ولتاژی که نیروگاه بر روی آن نصب شده تأثیری در به دست آوردن این میزان نخواهد داشت. بنابراین، نتایج این تحقیق برای حالتی که واحدهای بادی به سطح ولتاژ پایین‌تری نیز متصل شده باشند قابل استفاده خواهد بود.

در سیستم قدرت شبکه مورد مطالعه (شبکه خراسان) میزان رزرو، به مقدار بزرگترین واحد تولیدی یا ۶٪ بار کل سیستم (هر کدام که بیشتر باشد) در نظر گرفته می‌شود، که این مقدار ممکن است با وجود مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی از لحاظ فنی قیود قابلیت اطمینان شبکه را تأمین ننماید.

### ۳-۳-۲-۳-۳ سناریوهای موجود

سناریوهای موجود را با در نظرگیری تئوری قابلیت اطمینان وقوع تک حادثه می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

- احتمال وجود تغییرات بار و باد کمتر از میزان رزرو سیستم در زمانی که واحدها هیچ نوع خروج اضطراری ندارند
- احتمال وجود تغییرات بار و باد بیش از میزان رزرو سیستم در زمانی که واحدها هیچ نوع خروج اضطراری ندارند
- احتمال خروج تنها یکی از واحدها و تغییرات بار و باد کمتر از میزان رزرو سیستم

LSI	سرانه خاموشی به ازای هر مشترک	سال
$2/48 * 10^{-4}$	1/09	1388
$2/28 * 10^{-4}$	1	1389

همان طور که ملاحظه می‌شود، بار پیش‌بینی شده متشکل از میزان واقعی بار به اضافه خطای پیش‌بینی بار می‌باشد [24]. فرض می‌شود این خطا دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار استاندارد متناسب با درصدی از بار است [25]. اگر برای میزان توان پیش‌بینی شده تولیدی توسط باد نیز رابطه‌ای مانند خطای بار در نظر گرفته شود، آن‌گاه تقاضای خالص پیش‌بینی شده مطابق رابطه (3) خواهد شد.

$$D_{Ftotal} = I_F - W_F = I_A - W_A + \varepsilon_d \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\varepsilon_d$  ترکیب دو خطای پیش‌بینی بار و باد است و چون این دو مورد دارای دو توزیع نرمال مستقل از یکدیگر می‌باشند آن‌گاه، با استفاده از روابط ریاضی می‌توان ثابت نمود که، انحراف معیار استاندارد دو تابع توزیع نرمال مستقل، از جذر مجموع آنان به دست می‌آید [1 و 19]. یعنی داریم:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{wind}^2 + \sigma_{load}^2} \quad (4)$$

اگر مقدار رزرو اولیه سیستم که الزاماً بهینه نیست (در این جا 6٪ بار) را به میزان  $R_0$  در نظر بگیریم، آن‌گاه تابع توزیع نرمال خطای پیش‌بینی باد و بار مانند رابطه (5) است.

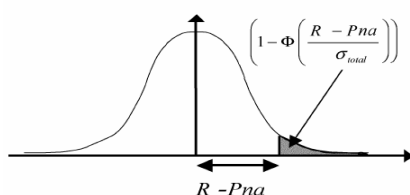
$$\Phi\left(\frac{R}{\sigma_{total}}\right) \quad (5)$$

در نتیجه احتمال داشتن تغییرات بار و باد بیش از میزان رزرو سیستم، در زمانی که واحدها هیچ نوع خروج اضطراری نداشته باشند (سناریوی 2)، برابر است با:

$$P_{s2} = 1 - \Phi\left(\frac{R}{\sigma_{total}}\right) \quad (6)$$

در شرایطی که یکی از واحدهای تولیدی از سیستم خارج شده باشد و توان تولیدی آن به میزان  $P_{na}$  باشد، با توجه به سناریوی 4 (احتمال خروج تنها یکی از واحدها و تغییرات بار و باد بیش از میزان رزرو سیستم) و شکل 2، احتمال داشتن خطای پیش‌بینی باد و بار بیش از میزان رزرو در نظر گرفته شده در سیستم مانند رابطه (7) خواهد بود.

$$P_{s4} = 1 - \Phi\left(\frac{R - P_{na}}{\sigma_{total}}\right) \quad (7)$$



4) احتمال خروج تنها یکی از واحدها و تغییرات بار و باد بیش از میزان رزرو سیستم در موارد 1 و 3 فوق، سیستم می‌تواند تمام تقاضای بار خود را تأمین نماید و مشکلی وجود نخواهد داشت اما، در موارد 2 و 4 فوق، سیستم قادر به تأمین تقاضای بار خود نمی‌باشد.

### 3-4- فرمول‌بندی مسئله

با توجه به مواردی که در بخش قبل بیان گردید و استراتژی شرکت برق منطقه‌ای خراسان، مدل قابلیت اطمینانی که در این جا در نظر گرفته شده است، حداکثر میزان خاموشی مجاز شبکه به ازای هر مشترک در سال و قضیه وقوع تنها یک حادثه در سیستم می‌باشد. بنابراین، احتمال خاموشی برابر است با میزان خاموشی اعمال شده به شبکه در طی یک دوره تقسیم بر انرژی مصرف شده شبکه، که مطابق رابطه (1) می‌باشد. در این‌جا دوره در نظر گرفته شده برابر یک سال می‌باشد.

$$LS = \frac{LSI}{NEC} \quad (1)$$

برای محاسبه احتمال خاموشی در یک ساعت، باید رابطه (1) را بر تعداد ساعات دوره در نظر گرفته شده تقسیم نمود:

$$PLS = \frac{LS}{8760} \quad (2)$$

برای محاسبه احتمال خاموشی در شبکه، با توجه به رابطه (1)، ابتدا باید مجموع خاموشی‌های اعمال شده به شبکه در هر ماه به دست آورده شود. با توجه به جداول خاموشی‌های استان خراسان [23]، خاموشی‌های اعمال شده به شبکه صرفاً به دلیل عدم وجود تولید کافی نمی‌باشد بلکه، مثلاً برخی به دلیل قطع خط، محدودیت انتقال، محدودیت ترانس، توسعه شبکه و... می‌باشد در نتیجه نیازی به در نظرگیری رزرو برای جبران این موارد نیست. لذا، پس از کسر مواردی که با در نظرگیری رزرو، خاموشی اعمال شده به شبکه قابل جبران نیست، میزان خاموشی اعمال شده به دلیل عدم وجود رزرو مناسب برای شبکه در ماه به دست آورده می‌شود. تمامی موارد فوق برای اطلاعات سال 1388 شبکه شرکت برق منطقه‌ای خراسان محاسبه گردیده است. در سال 1388 سرانه خاموشی به ازای هر مشترک در حوزه شرکت برق منطقه‌ای خراسان برابر با 1/09 دقیقه در شبانه‌روز بوده است. با توجه به استراتژی شرکت برق مبنی بر داشتن یک دقیقه سرانه خاموشی در روز برای هر مشترک میزان LSI مطابق تناسب جدول 2 قابل محاسبه می‌باشد.

جدول 2: محاسبه میزان LSI با توجه به استراتژی شرکت برق منطقه‌ای خراسان در آینده

شکل ۲: احتمال داشتن خطای پیش‌بینی باد و بار بیش از میزان رزرو در نظر گرفته شده در حالت خروج یکی از واحدهای تولیدی [۱۵]

به طور کلی احتمال خاموشی برابر است با احتمال وقوع سناریوی شماره ۲ یا سناریوی شماره ۴ که با توجه به تعاریف آن‌ها امکان وقوع هر دو حالت هم‌زمان وجود ندارد. با توجه به روابط فوق رابطه احتمال خاموشی را می‌توان نوشت:

$$PLS = \left[ \prod_{j=1}^n (1 - FOR_j) \left( 1 - \Phi \left( \frac{R}{\sigma_{total}} \right) \right) \right] + \left[ \sum_{i=1}^n FOR_i \left( \prod_{j=1, j \neq i}^n (1 - FOR_j) \left( 1 - \Phi \left( \frac{R - P_{na}}{\sigma_{total}} \right) \right) \right) \right] \quad (۸)$$

حال اگر رابطه (۲) و (۸) را برابر قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$\frac{LS}{8760} = \left[ \prod_{j=1}^n (1 - FOR_j) \left( 1 - \Phi \left( \frac{R}{\sigma_{total}} \right) \right) \right] + \left[ \sum_{i=1}^n FOR_i \left( \prod_{j=1, j \neq i}^n (1 - FOR_j) \left( 1 - \Phi \left( \frac{R - P_{na}}{\sigma_{total}} \right) \right) \right) \right] \quad (۹)$$

با توجه به معلوم بودن  $FOR$  [۱۶] واحدها،  $\sigma_{total}$  و

فرض اولیه میزان رزرو به مقدار ۰٫۶ بار، رابطه فوق با استفاده از روش عددی مبتنی بر تکرار قابل حل می‌باشد. میزان رزرو مورد نیاز با توجه به میزان تولید توسط نیروی باد و قطع واحدهای تولیدی به دست خواهد آمد.

### ۳-۵- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به این که در این جا مقادیر واقعی نیاز مصرف در دسترس می‌باشد، بار پیش‌بینی شده در جدول ۳ با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردیده است. مجموع تبادلات برق منطقه‌ای خراسان نیز محاسبه و لحاظ گردیده است. لازم به ذکر است مجموع تبادلات برابر است با جمع جبری میزان تبادل با مازندران، یزد، ترکمنستان، افغانستان، سمنان و سیستان و بلوچستان. با توجه به آمار روند تولید نیروگاه بادی بینالود [۲۷] میزان تولید توسط مزرعه بادی با توجه به شکل ۱ و همچنین رابطه (۳) به دست آورده شده است. جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی برای تعیین میزان رزرو مورد نیاز سیستم قدرت †

ساعت	نیاز مصرف پیش‌بینی شده	مجموع تبادلات پیش‌بینی شده	تولید مزرعه بادی پیش‌بینی شده	میزان رزرو مورد نیاز
۳	۲۰۹۶	۱۷۱	۳۶۸	۱۶۸/۵۳
۱۱	۲۴۶۶	۳۷۹	۳۲۲	۲۲۶/۴۶
۱۵	۲۵۷۷	۴۹۹	۲۹۸	۲۳۳/۱۵
۲۱	۲۵۹۲	۶۱۲	۳۵۴	۳۲۱/۶۱

† ساعات در نظر گرفته شده به ترتیب ساعات کم باری، میان باری و پر باری است.

در این جدول میزان رزرو مورد نیاز از رابطه (۹) محاسبه

شده است. با توجه به ماهیت متغیر  $\sigma_{total}$ ، یک سری عدد تصادفی تولید و برای هر  $\sigma_{total}$  تولید شده، مقدار رزرو مورد نیاز با استفاده از روش‌های عددی محاسبه و سپس میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان رزرو مورد نیاز در هر ساعت در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان رزرو مورد نیاز در اکثر موارد بیش از حالتی است که به میزان بزرگترین واحد در مدار و یا ۰٫۶ بار در نظر گرفته می‌شده است و این به دلیل ماهیت متغیر نیروی باد می‌باشد.

نتایج جدول ۳ بر مبنای  $\sigma_{total}$  تصادفی، محاسبه شده است. برای نشان دادن تأثیر شدت تغییرات باد و بار،  $\sigma_{total}$  در بازه ۰٫۰۵ تا ۰٫۳ با گام ۰٫۰۵ تغییر داده شده و سایر موارد مانند نیاز مصرف پیش‌بینی شده شبکه، مجموع تبادلات پیش‌بینی شده و میزان تولید مزرعه بادی پیش‌بینی شده، همانند قبل در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی برای تعیین میزان رزرو مورد نیاز سیستم قدرت

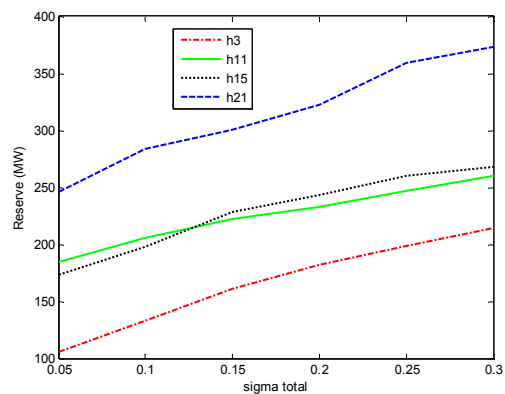
با  $\sigma_{total}$  های متفاوت

میان گین	۰٫۰۳	۰٫۲۵	۰٫۲	۰٫۱۵	۰٫۱	۰٫۰۵	$\sigma_{total}$ رزرو
ساعت ۳	۲۱۴	۱۹۸	۱۸۲	۱۶۱	۱۳۳	۱۰۶	۱۶۶
ساعت ۱۱	۲۵۹	۲۴۷	۲۳۳	۲۲۲	۲۰۶	۱۸۵	۲۲۵
ساعت ۱۵	۲۶۸	۲۵۹	۲۴۴	۲۲۹	۱۹۷	۱۷۳	۲۲۹
ساعت ۲۱	۳۷۳	۲۶۸	۳۲۱	۳۰۱	۲۸۳	۲۴۶	۳۱۴

شکل ۳ روند تغییرات میزان رزرو مورد نیاز بر اساس شدت تغییرات باد و بار را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود این روند صعودی است. یعنی به عبارت دیگر، در شرایطی که شدت تغییرات بار و باد بیشتر باشد به میزان رزرو بیشتری در شبکه نیاز می‌باشد. با استفاده از نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که هر چه میزان بار و تولید توسط واحدهای بادی بیشتر باشد، میزان رزرو مورد نیاز سیستم افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۳ میزان تولید توسط واحدهای بادی در ساعت ۱۱ بیشتر از ساعت ۱۵ است. در نتیجه انتظار می‌رود میزان رزرو مورد نیاز برای ساعت ۱۱ بیش از ساعت ۱۵ باشد ولی در محاسبات این چنین نشده است. زیرا بار ساعت ۱۵ از بار ساعت ۱۱ بیشتر است و در محاسبه میزان رزرو مورد نیاز، خطای بار نیز در نظر گرفته می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود اختلاف میزان تولید پیش‌بینی شده برای مزرعه بادی در این دو ساعت ۲۴ مگاوات است در حالی که اختلاف بار کل این دو ساعت به مقدار ۲۳۱ مگاوات است لذا، به طور کلی ذخیره چرخان مورد نیاز برای ساعت ۱۵ بیشتر از ساعت ۱۱ می‌باشد. در جدول ۴ در ستون‌های اول و دوم که انحراف معیار کلی خطای باد و بار کم است میزان رزرو

- [6] A.G. Orths, P.B. Eriksen, and V. Akhmatov; "Planning under Uncertainty - Securing Reliable Electricity Supply in Liberalized Energy Markets", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 24-28 June 2007 Page(s):1 – 6
- [7] T. Yong, R. Entriiken and P. Zhang; "Reserve Determination for System with Large Wind Generation"; *Power & Energy Society General Meeting*, 2009.
- [8] مهدی صمدی، حبیب رجبی مشهدی؛ "تعیین بهینه مقدار ظرفیت رزرو چرخان و توزیع آن بین واحدها با در نظر گرفتن حوادث احتمالی در سیستم قدرت؛ بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، مهر ۱۳۸۸
- [9] رجبی مشهدی مصطفی، محمدحسین جاویدی، صادق قاضی‌زاده، "تخصیص ظرفیت معین مشارکت در کنترل فرکانس با ارائه یک الگوریتم اصلاحی در حلقه کنترل فرکانس نیروگاه شریعتی مشهد" بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران ۱۳۸۸
- [10] تکتم شریفیان عطار، محمدحسین جاویدی دشت بیاض؛ "ارائه یک روش جدید برای تصمیم‌گیری جهت شرکت واحدهای تولیدی در بازار رزرو از دیدگاه مالک با استفاده از محاسبه هزینه فرصت" بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ایران ۱۳۸۹
- [11] G. Calabrese Determination Of Reserve Capacity by The Probability MBETOD-EPPECT on Interconnections, *AIEE Transactions*, vol. 70, pt. I, 1951, pp. 1018-20.
- [12] ILEX Energy Consulting and UMIST, "Quantifying the System Costs of Additional Renewables in 2020", a report to the Department of Trade & Industry, October 2002. Available online: <http://www.berr.gov.uk/files/file21352.pdf>
- [13] B. Stott, O. Alsac, A. Monticelli, "Security Analysis and Optimization," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No. 12, pp: 1623-1644, Dec. 1987
- [14] M. Ilic, J. Arce, Y. Yoon, E. Fumagalli, "Assessing Reliability as the Electric Power Industry Restructures". *Elsevier; Electricity Journal*, 2001, pp: 55-67
- [15] R. Doherty; M.O'Malley; "A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems with Significant Installed Wind Capacity" *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 20, Issue: 2; 2005
- [16] V.D. Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour", *Journal of Metrology*; 1957; 160-164
- [17] M.H. Albadi, E.F. El-Saadany; "Overview of wind power intermittency impacts on power systems"; Elsevier, *Electric Power Systems Research*; 2010, pp. 627-632
- [18] L. Landberg, G. Giebel, H. Nielsen, T. Nielsen, H. Madsen, "Short-term prediction- an overview", Elsevier, *Wind Energy*; 2003, pp. 273-280
- [19] M. Ortega-Vazquez, D. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*; 2009, pp. 114-124.
- [20] B. Hasche, R. Barth, D.J. Swider, "Effects of improved wind forecasts on operational costs in the German electricity system", *EcoMod Conference on Energy and Environmental Modeling*, Moscow, Russia, 2007
- [21] B. Satish, K.S. Swarp; "Effect of temperature on short term load forecasting using an integrated ANN"; *Electric Power System Research* 72, 2004 pp:95-101
- [22] G. Mu, Y. H. Chen, Zh. Liu, and E. Fan; "Studies on the Forecasting Errors of the Short Term Load Forecast"; *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, 2001
- [۲۳] سایت اینترنت شرکت برق منطقه‌ای خراسان- راهبری شبکه
- [24] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Economic impact assessment of load forecast errors considering the cost of interruptions," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, Montreal, QC, Canada, 2006, p. 8
- [25] A. Papoulis and S. U. Pillai, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes", 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002
- [۲۶] مهرداد حجت، حمیدرضا جعفریان، تکتم شریفیان عطار، مهدی علوم‌بایگی، غلامرضا غلامی و محمدحسین جاویدی، "ارائه شاخصی جدید به منظور رتبه‌بندی کارآمدی نیروگاه‌ها در بازار برق از دیدگاه مالک (مطالعه موردی: نیروگاه‌های برق منطقه‌ای خراسان)"؛ هفدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران تهران، ایران؛ اردیبهشت ۱۳۸۸
- [۲۷] سید محمود هاشمی نژاد، "ارائه راهکارهای استفاده بهینه از کنترل توربین (V47) نیروگاه بادی بینالود" طرح اینترنت‌شپ شرکت برق منطقه‌ای خراسان ۱۳۸۸

مورد نیاز برای ساعت ۱۵ کمتر از ساعت ۱۱ است ولی با افزایش انحراف معیار کلی خطای باد و بار میزان ذخیره چرخان مورد نیاز برای ساعت ۱۵ بیشتر از ساعت ۱۱ شده است که در شکل ۳ این روند مشاهده می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود اعداد ستون میانگین جدول ۴ به اعدادی که برای میزان رزرو مورد نیاز در جدول ۳ به دست آورده شده است بسیار نزدیک می‌باشند که، این خود بیانگر درستی روش حل مسئله است.



شکل ۳: روند تغییرات میزان رزرو مورد نیاز بر اساس شدت تغییرات باد و بار

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای محاسبه میزان رزرو سیستم قدرت در شرایط حضور نیروگاه‌های بادی ارائه گردید و نتایج بر روی شبکه خراسان پیاده‌سازی گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها ضرورت مطالعه بیشتر برای تعیین رزرو در شرایط بهره‌گیری از تولیدات پراکنده متکی بر انرژی‌های نو، به خصوص انرژی باد را نشان می‌دهند. پیشنهاد می‌گردد نحوه تأمین میزان تعیین شده ذخیره چرخان، از دیدگاه اقتصادی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

#### سیاسگزاری

در پایان جا دارد از زحمات و راهنمایی‌های ارزنده آقای دکتر مصطفی رجبی مشهدی معاون محترم برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان که در تهیه این تحقیق ما را یاری نموده‌اند، کمال تشکر را داشته باشیم.

#### مراجع

- [1] T. Ackerman, "Wind Power in Power System", *John Wiley* 2005.
- [2] B.C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W.L. Kling, "System Integration of Large-Scale Wind Power in the Netherlands" *Power Engineering Society General Meeting*, June 2006.
- [3] M. Ortega-Vazquez, D. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration", *IEEE Trans on Power Systems*; 2009
- [4] G. Dany; "Power reserve in interconnected systems with high wind power production" *IEEE PowerTech Proc.* Porto 2001
- [5] R. Doherty, and M. O'Malley; "Quantifying reserve demands due to increasing wind power penetration" *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, Bologna Volume 2, 23-26 June 2003