

## ارائه الگوریتم جدیدی برای تعیین سهم قابل تبدیل نیروگاههای سنتی به نیروگاههای انرژی تجدید پذیر به روش مونت کارلو

هادی اکرمی<sup>۱</sup>، شاهرخ شجاعیان<sup>۲\*</sup>، مهری لطفی<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: shojaeian@iaukhsh.ac.ir

چکیده	واژه‌های کلیدی
<p>با توجه به روند جایگزینی نیروگاه های سنتی با نیروگاه های تجدید پذیر در شبکه های قدرت مدرن، در این مقاله الگوریتمی ابتکاری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای این منظور پیشنهاد شده است. در ابتدا شاخص LOLE سیستم بدون ظرفیت توان بادی محاسبه و به عنوان شاخص مرجع انتخاب گردید. سپس به بررسی جایگزینی واحد های توربین بادی به جای نیروگاه های سنتی پرداخته شده و در هر مرحله، از تولید ظرفیت سنتی کاسته، و ظرفیت تولید توان بادی جایگزین آن گردیده است. میزان ظرفیت تولید توان بادی مورد نیاز برای جایگزینی مناسب، با اتکا به روش مونت کارلو و از مقایسه شاخص LOLE در هر مرحله با شاخص LOLE مرجع، بدست آمده است. در آخر، روند رشد بار ۵٪ در استراتژی توسعه با تمرکز صرف روی تولید بادی بررسی شده و میزان تولید مورد نیاز به ازاء هر رشد بار معین تعیین گردیده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه IEEE-RTS پیاده سازی شده است.</p>	<p>نیروگاه بادی، نیروگاه سنتی، قابلیت اطمینان، مونت کارلو، LOLE</p>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

۳- مربی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

## ۱- مقدمه

(MCS) است. روش مناسب برای شبیه سازی سیستم های قدرت شامل توان باد به علت ماهیت متغیر سرعت باد و به طبع آن توان خروجی متناوب، روش شبیه سازی مونت کارلو می باشد. مراجع [۶-۱۰] از سری زمانی آرما و روش شبیه سازی مونت کارلو برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل توان بادی استفاده کرده اند. روش مونت کارلو ماهیت تصافی سرعت باد را در شبیه سازی ها نظر گرفته و نتایج واقعی تری را نسبت به روش تحلیلی ارائه می دهد.

## ۲- بیان مسئله

در این مقاله از شبکه تست IEEE-RTS به منظور شبیه سازی بار و تولید استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از اطلاعات قبلی سیستم مورد نظر، مدل بار با پیک بار ۲۸۵۰ مگاوات شبیه سازی و سپس برای بدست آوردن مدل ریسک سیستم با مدل تولید ترکیب می شود. مقدار شاخص LOLE محاسبه شده در این مرحله به عنوان شاخص مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه، به بررسی روند جایگزینی نیروگاه های بادی به جای نیروگاه های سنتی پرداخته و با توجه به ترتیب ظرفیت های تولید توان سنتی، دائماً از توان تولید سنتی کاسته و میزان مورد نیاز توان بادی برای جانشینی آن محاسبه میگردد. برای محاسبه میزان توان بادی مورد نیاز در هر مرحله شاخص LOLE همان مرحله محاسبه و سپس با شاخص LOLE مرجع مقایسه میشود. سپس در ادامه مقدار مورد نیاز توان بادی برای ثابت نگه داشتن شاخص LOLE نسبت به شاخص مرجع محاسبه میشود البته در این اثنا رشد بار ۵٪ شبکه هم مورد توجه است. فرض شده که می خواهیم تمام تولید مورد نیاز را از طریق توان بادی تامین نمایم، عبارت دیگر تصمیم داریم توسعه سیستم را بیشتر به سمت توان بادی سوق دهیم.

مطابق آنچه در بالا گفته شد با محاسبه شاخص LOLE در هر مرحله، میزان مورد نیاز توان بادی تخمین زده شده و در نهایت مقدار شاخص LOLE و مقدار مورد نیاز توان بادی برای تمامی موارد فوق ارائه گردیده است. تمام مراحل فوق برای شبکه تست IEEE-RTS در محیط MATLAB® شبیه سازی گردیده اند.

توجه به افزایش روز افزون مصرف برق و گسترش صنایع وابسته به این انرژی مهم، مسئله قابلیت اطمینان نیروگاهها را از اهمیتی ویژه برخوردار کرده است. از سوی دیگر محدودیت های مربوط به منابع سوخت فسیلی از قبیل نفت، گاز و ذغال سنگ، تمایل جوامع پیشرفته را به سمت تولید انرژی از منابع تجدید پذیر سوق داده است. از جمله انرژی های تجدید پذیری که امروزه امکان تولید انرژی الکتریکی از آنها وجود دارد میتوان به باد، خورشید، جذر و مد اقیانوس، انرژی زمین گرمایی و .. اشاره نمود. انرژی بادی بالاترین روند رشد را در جهان داشته و به عنوان یکی از اصلی ترین و پرکاربرد ترین واحد های تولید انرژی در جهان شناخته می شود. توان بادی نسبت به توان سنتی مقرون به صرفه تر و پاکیزه تر می باشد [۱].

توان خروجی ژنراتور توپین بادی به علت ذات متغیر سرعت باد، دارای نوسان است. لذا ارزیابی داشتن دیدگاهی احتمالاتی در برآورد آن ضروری می باشد. به همین دلیل عملاً مدل های متعددی برای پیش بینی سرعت باد در مزارع بادی مورد استفاده قرار گرفته اند [۲-۵].

در برخی مطالعات گذشته، از جمله [۲]، برای مدل سازی سرعت باد از توزیع وایبل استفاده شده است؛ ضعف این مدل آنست که نمی تواند تغییرات سرعت باد را به طور پیوسته لحاظ نماید. روش دیگر استفاده از سری زمانی آرما (ARMA) است که تغییرات سرعت باد را به طور پیوسته شبیه سازی نموده و مدل مناسبی برای استفاده در مدل های تولید ژنراتور ارائه می نماید [۳]. رابطه بین توان خروجی ژنراتور بادی و سرعت باد توسط منحنی توان قابل توصیف می باشد [۴]. در [۵] از تکنیک های تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های قدرت استفاده شده است. یعنی کلیه اجزاء سیستم با استفاده از معادلات ریاضی مدل سازی شده و شاخص ها بر اساس آن ها محاسبه گردیده اند.

روش تحلیلی، روش مناسبی برای تحلیل ژنراتور هایی با توان خروجی ثابت و یا به عبارت دیگر ژنراتور های معمولی می باشد. روش دیگری که میتوان استفاده نمود شبیه سازی رفتار تصادفی سیستم به روش شبیه سازی مونت کارلو

## ۳- مفاهیم پایه

داشتن مدل‌های دقیق و واقعی از تولید نیاز به مدل‌های دقیقی از تولید ژنراتورهای توربین بادی و به تبع آن مدل دقیقی از سرعت باد خواهد بود.

## ۴- مدل‌سازی سرعت باد

باد در اثر تغییرات درجه حرارت هوا به وجود آمده و همیشه از منطقه پر فشار به سمت منطقه کم فشار حرکت می‌کند. بنابراین همواره سرعت باد برای مکان‌های متفاوت و زمان‌های متفاوت، بسته به دمای منطقه متغیر است. برای مدل‌سازی ریاضی سرعت باد در یک مکان خاص، نیاز به اطلاعات سرعت باد در زمان‌های قبلی می‌باشد. یک مدل مناسب بایستی بتواند تغییرات سرعت باد و وابستگی آن به زمان‌های گذشته و آینده را بطور پیوسته در نظر بگیرد. سری زمانی آرما این ویژگی را دارد. در این مقاله از اطلاعات سرعت باد منطقه سوئیفت کارنت (Swift Current) کشور کانادا در یک دوره ۱۵ ساله از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۰۳ بعنوان داده‌های تست استفاده شده است. به کمک اطلاعات فوق سری زمانی آرما برای منطقه فوق استخراج می‌گردد [۱۱]. مدل عمومی سرعت باد در قالب سری زمانی آرما به صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$y_t = 0.8782y_{t-1} - 0.0061y_{t-2} + 0.0265y_{t-3} + \alpha_t - 0.2162\alpha_{t-1} + 0.0091\alpha_{t-2} \quad (1)$$

$$\alpha_t \in NID(0, 0.55792^2)$$

در این رابطه  $y_t$  مقدار سری زمانی در زمان  $t$  و  $\alpha_t$  نویز سفید با متوسط صفر و واریانس  $0.55792^2$  می‌باشد [۱۱]. با استفاده پیشینه اطلاعات باد منطقه فوق میانگین و انحراف استاندارد سرعت باد در دوره زمانی فوق محاسبه شده و با ترکیب آن با رابطه (۱)، سرعت باد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$SW_t = \mu_t + \sigma_t \cdot y_t \quad (2)$$

در این رابطه  $\mu_t$  پیشینه متوسط سرعت باد و  $\sigma_t$  انحراف استاندارد سرعت باد می‌باشد. با استفاده از روابط فوق سرعت باد برای یک سال شبیه‌سازی شده و در مراحل بعد برای تولید توان باد استفاده می‌گردد.

مهم‌ترین مسئله در ارزیابی کیفیت سیستم‌های قدرت دارای توان بادی، بررسی توانایی سیستم در تامین بار مورد نیاز سیستم می‌باشد. حوزه این تعریف، ناظر بر همه قسمت‌های شبکه از تولید، انتقال و توزیع تا نقطه مصرف می‌باشد. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در سه بخش تولید انتقال و توزیع و به طور کلی در سطح سلسله مراتبی HL1، HL2 و HL3 تقسیم بندی می‌شود. با توجه به این که نیروگاه‌ها در راس هرم هر سیستم بوده و اختلال در آن‌ها بر روی کل شبکه تاثیر گذار می‌باشد، در این مقاله شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح تولید و به عبارت دیگر، همان سطح HL1 مورد بررسی قرار گرفته و شبکه انتقال در قیاس با آن کاملاً قابل اطمینان فرض می‌شود [۱].

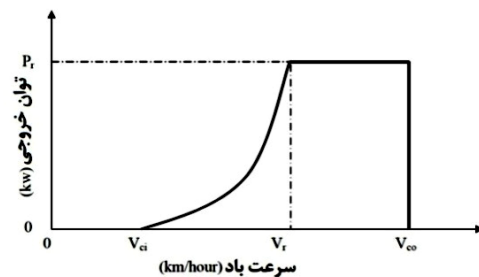
محاسبات قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت برای تعیین میزان تولید و رزرو مورد نیاز برای یک سیستم قدرت به دو روش قطعی و احتمالاتی انجام می‌گیرد. در روش قطعی میزان تولید و رزرو مورد نیاز شبکه بر اساس تجربه و اطلاعات رشد بار تخمین زده می‌شود و روش قابل اعتمادی نیست. در صورتی که در روش احتمالاتی با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم، میزان رشد بار مشخص و سپس تولید و رزرو مورد نیاز برآورد خواهد شد. در روش احتمالاتی با استفاده از ترکیب مدل بار و تولید، مدل مناسبی برای ریسک سیستم بدست می‌آید. در این مقاله کلیه محاسبات و شبیه‌سازی‌ها بر اساس روش احتمالاتی انجام شده است.

مدل مورد استفاده در این مطالعه مدل دو حالت مارکوف می‌باشد. طبق این مدل، واحد تولید در هر لحظه از زمان فقط میتواند در یکی از دو حالت تولید کامل (Up) و یا حالت خروج کامل (Down) باشد. مدل‌های مرتبه بالاتر مارکوف که در این مقاله مصداقی ندارند، علاوه بر دو حالت فوق، حالات کسر ظرفیت (Derated) را نیز محسوب میکنند.

در مدل دو حالت مارکوف سیستم با نرخ خرابی  $\lambda$  از حالت Up به Down، و با نرخ تعمیرات  $\mu$  از حالت Down به Up می‌رود. با استفاده از این مدل و روش شبیه‌سازی مونت کارلو توان تولیدی ژنراتورها بدست می‌آیند. جهت

## ۵- مدل تولید توربین بادی

ژنراتورهای بادی، به دلیل نوسانات سرعت باد، مانند ژنراتورهای سنتی دارای تولید انرژی پایدار نیستند. توان خروجی ژنراتورهای توربین بادی تحت تأثیر سرعت باد بوده و با تغییرات سرعت باد، توان خروجی ژنراتور نیز تغییر می کند. نکته قابل توجه دیگری که قابل ذکر است محدود بودن محدوده تولید ژنراتورهای توربین بادی می باشد. معمولاً ژنراتورهای توربین بادی در سرعت های پایین باد قادر به تولید توان نمی باشند.  $V_{ci}$  حداقل سرعت باد برای شروع به تولید می باشد، در این سرعت توربین شروع به تولید می کند ولی فقط درصدی از توان نامی خود را ارائه می دهد و هر چه در واقع توان خروجیش با سرعت باد در رابطه است. هنگامی که سرعت باد به سرعت نامی  $V_r$  رسد، ژنراتور بادی قادر است توان نامی ( $P_r$ ) را در خروجی تحویل دهد. ولی این توان تولیدی به دلیل محدودیت های مکانیکی توربین تنها تا سرعت  $V_{co}$  می تواند ادامه یابد و پس از آن توربین به حالت قفل در آمده و توان خروجی آن صفر می گردد. مطالب اخیر را می توان به صورت یک رابطه غیرخطی بین توان خروجی ژنراتور بادی و سرعت باد به صورت یک، مطابق شکل (۱) نشان داد.



شکل (۱): منحنی توان تولیدی توربین

منحنی فوق به وسیله رابطه ریاضی (۳) بیان می شود [۴]:

$$P(SW_t) = \begin{cases} 0 & , 0 < SW_t \leq V_{ci} \\ (A + B \cdot SW_t + C \cdot SW_t^2) P_r & , V_{ci} < SW_t \leq V_r \\ P_r & , V_r < SW_t \leq V_{co} \\ 0 & , V_{co} < SW_t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

که مقادیر  $V_{ci}$ ،  $V_r$  و  $V_{co}$  در شبکه تست مورد مطالعه به ترتیب ۱۴/۴، ۳۶ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت میباشند [۱۲]. قدرت نامی هر واحد ( $P_r$ ) هم یک مگاوات فرض شده است. در [۴] روابط ریاضی برای محاسبه مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $C$  ارائه شده است. این روابط تماماً بر اساس مقادیر  $V_{ci}$  و  $V_r$  بوده و

مقادیر آنها برای یک ژنراتور خاص ثابت می باشد. با استفاده از روابط ارائه شده در [۴] مقایر ثابت  $A$ ،  $B$  و  $C$  به ترتیب برابر  $۰/۰۳۱۱$ ،  $۰/۰۲۱۵$  و  $۰/۰۱۳$  بدست می آیند. با استفاده از روابط فوق، توان خروجی ژنراتور توربین بادی محاسبه و با مجموع توان تولیدی ژنراتورهای سنتی جمع شده و مدل تولید را با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو استخراج می گردد. سپس برای ارزیابی کفایت سیستم شاخص های ریسک سیستم محاسبه می گردد. برای این منظور، مدل تولید و مدل بار ترکیب می گردد. شاخص های ریسک مورد استفاده در این مقاله، انتظار از دست دادن بار (LOLE) و انتظار از دست دادن انرژی (LOEE) هستند.

## ۷- شبیه سازی

در ابتدا با استفاده از اطلاعات بار، مدل بار سیستم با پیک بار ۲۸۵۰ مگاوات شبیه سازی شده و سپس برای بدست آوردن مدل ریسک، با مدل تولید سیستم ترکیب می شود. برای برآورد میزان تولید ژنراتورهای معمولی به روش مونت کارلو، ابتدا یک عدد بین [۰، ۱] به طور تصادفی و با توزیع یکنواخت تولید می شود. جهت تعیین وضعیت سیستم، عدد فوق با نرخ خروج اجباری (FOR) مقایسه شده و در صورتی که عدد فوق از FOR سیستم بزرگتر باشد واحد در حال تولید کامل و در غیر این صورت در حالت خروج کامل فرض می شود. این حلقه برای تمام واحدهای تولید تکرار و پس از این که در آن مرحله، تولید تمام واحدها مشخص گردید، توان تولیدی همه واحدها با هم جمع شده و در  $C_c$  ذخیره می گردد.

در مرحله اول، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بدون حضور نیروگاه بادی مورد بررسی قرار گرفته و شاخص LOLE محاسبه می شود. شاخص محاسبه شده در این مرحله در تمامی مراحل به عنوان شاخص مرجع محاسبات محسوب میشود. موضوع مهمی که به دلیل تصادفی بودن فرآیند، در این نوع شبیه سازی بسیار مهم است، دقت در همگرا شدن شاخص محاسبه شده می باشد. اگر شاخص استفاده شده به میزان مناسبی از همگرایی نرسیده باشد نتایج مورد استفاده در کلیه قسمتها نادرستند ولذا کلیه محاسبات با خطا همراه می باشد.

جدول (۱) میزان توان بادی اضافه شده در هر مرحله با در نظر گرفتن رشد بار ۵٪

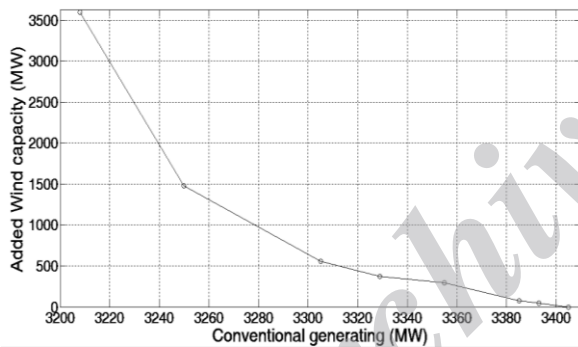
ظرفیت تولید ژنراتورهای معمولی سیستم در هر حالت (MW)										
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
۳۴۰۵	۳۳۹۳	۳۳۸۵	۳۳۵۵	۳۳۲۹	۳۳۰۵	۳۲۵۰	۳۲۰۸	۳۰۵۵	۳۰۰۵	
state										
ظرفیت توان بادی اضافه شده در هر وضعیت برای بررسی شاخص های قابلیت اطمینان مربوطه (MW)										
میزان بار ۲۸۵۰ مگا وات										
۱	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲	.	۱۲	۲۰	۵۰	۷۶	۱۰۰	۱۵۵	۱۹۷	۳۵۰	۴۰۰
۳	.	۳۲	۴۰	۱۵۰	۱۷۶	۴۰۰	۶۵۵	۱۸۹۷	۸۰۰۳۵۰	۸۰۰۴۰۰
۴	.	۴۲	۶۰	۲۰۸	۲۷۶	۵۵۰	۱۱۵۵	۳۵۹۷	۲۰۰۰۳۵۰	۲۰۰۰۴۰۰
۵	.	۴۹	۷۲	۲۱۶	۳۷۱	۵۶۰	۱۴۷۵	۳۶۴۷	۳۱۰۰۳۵۰	۳۱۰۰۴۰۰
میزان بار ۲۹۹۳ مگا وات										
۶	.	۴۹	۷۲	۲۱۶	۳۷۱	۵۶۰	۱۴۷۵	۴۵۹۷	۳۳۰۰۳۵۰	۳۳۰۰۴۰۰
۷	۸۵۰	۱۰۴۹	۱۲۲۲	۱۵۳۷	۳۲۲۱	۶۴۱۰	۱۲۳۲۵	۴۵۴۴۷	۳۴۰۱۲۰۰	۳۴۰۱۲۵۰
۸	۸۸۰	۱۱۷۴	۱۳۰۷	۲۵۴۷	۵۲۲۶	۱۱۴۱۵	۲۲۳۳۰	۸۵۴۵۲	۳۵۰۱۲۰۵	۳۵۰۱۲۵۵
۹	۹۱۷	۱۱۷۹	۱۳۲۷	۲۸۲۷	۷۲۳۱	۱۱۶۴۷۸	۲۳۲۳۹۳	۹۲۵۵۱۵	۵۶۰۱۲۶۸	۵۶۰۱۳۱۸
میزان بار ۳۱۴۳ مگا وات										
۱۰	۹۱۷	۱۱۷۹	۱۳۲۷	۲۸۲۷	۷۲۳۱	۱۱۶۴۷۸	۲۳۲۳۹۳	۹۲۵۵۱۵	۵۶۰۱۲۶۸	۵۶۰۱۳۱۸
۱۱	۵۰۹۱۷	۵۱۳۵۶	۵۱۶۶۴	۵۳۵۳۴	۶۰۲۸۸	۱۷۶۴۷۷	۳۰۲۳۹۲	۱۰۵۵۵۱۴	۵۸۵۱۲۶۷	۵۸۵۱۳۱۷
۱۲	۶۰۹۱۷	۶۲۸۵۶	۶۴۶۶۴	۶۸۵۳۴	۹۰۲۸۸	۲۳۶۴۷۷	۴۱۲۳۹۲	۱۴۶۵۵۱۴	۶۸۶۱۲۶۷	۶۸۶۱۳۱۷
۱۳	۷۲۹۱۷	۷۶۶۵۶	۸۰۲۶۴	۸۶۵۳۴	۱۲۶۲۸۸	۳۰۸۴۷۷	۵۴۴۳۹۲	۱۹۵۷۵۱۴	۸۰۷۳۲۶۷	۸۰۷۳۳۱۷
میزان بار ۳۳۰۰ مگا وات										
۱۴	۷۲۹۱۷	۷۶۶۵۶	۸۰۲۶۴	۸۶۵۳۴	۱۲۶۲۸۸	۳۰۸۴۷۷	۵۴۴۳۹۲	۱۹۵۷۵۱۴	۸۰۷۳۲۶۷	۸۰۷۳۳۱۷
۱۵	۱۷۳۹۱۷	۱۷۷۹۵۶	۱۸۱۸۶۴	۱۸۸۵۳۴	۲۳۱۲۸۸	۴۱۹۴۷۷	۶۶۵۳۹۲	۲۱۳۸۵۱۴	۸۳۷۴۲۶۷	۸۳۷۴۳۱۷
۱۶	۱۰۷۳۹۱۷	۱۰۷۹۳۰۶	۱۰۸۴۵۶۴	۱۰۹۳۰۳۴	۱۱۴۹۲۸۸	۱۳۶۴۴۷۷	۱۶۵۵۳۹۲	۳۳۹۸۵۱۴	۱۰۱۷۴۲۶۷	۱۰۱۷۴۳۱۷
۱۷	۲۳۷۳۹۱۷	۲۳۸۱۲۵۶	۲۳۸۸۶۶۶	۲۳۹۹۵۳۴	۲۴۷۵۲۸۸	۲۷۲۹۴۷۷	۳۰۸۵۳۹۲	۵۲۱۸۵۱۴	۱۲۷۷۴۲۶۷	۱۲۷۷۴۳۱۷
میزان بار ۳۴۶۵ مگا وات										
۱۸	۲۳۷۳۹۱۷	۲۳۸۱۲۵۶	۲۳۸۸۶۶۶	۲۳۹۹۵۳۴	۲۴۷۵۲۸۸	۲۷۲۹۴۷۷	۳۰۸۵۳۹۲	۵۲۱۸۵۱۴	۱۲۷۷۴۲۶۷	۱۲۷۷۴۳۱۷
۱۹	۲۷۷۳۹۱۷	۲۷۸۱۵۵۶	۲۷۸۹۰۶۴	۲۸۰۰۵۳۴	۲۸۷۹۲۸۸	۳۱۳۹۴۷۷	۳۵۰۵۳۹۲	۵۶۹۸۵۱۴	۱۳۳۷۴۲۶۷	۱۳۳۷۴۳۱۷
۲۰	۹۳۷۳۹۱۷	۹۳۸۴۸۵۶	۹۳۹۵۶۶۴	۹۴۱۱۵۳۴	۹۵۲۳۲۸۸	۹۸۴۹۴۷۷	۱۰۳۲۵۳۹۲	۱۳۱۷۸۵۱۴	۲۲۱۷۴۲۶۷	۲۲۱۷۴۳۱۷
میزان بار ۳۶۳۸ مگا وات										
۲۱	۹۳۷۳۹۱۷	۹۳۸۴۸۵۶	۹۳۹۵۶۶۴	۹۴۱۱۵۳۴	۹۵۲۳۲۸۸	۹۸۴۹۴۷۷	۱۰۳۲۵۳۹۲	۱۳۱۷۸۵۱۴	۲۲۱۷۴۲۶۷	۲۲۱۷۴۳۱۷
۲۲	۱۰۱۷۳۹۱۷	۱۰۱۸۵۱۵۶	۱۰۱۹۶۲۶۴	۱۰۲۱۲۳۴	۱۰۳۲۷۲۸۸	۱۰۶۵۹۴۷۷	۱۱۱۴۵۳۹۲	۱۴۰۵۸۵۱۴	۲۳۱۷۴۲۶۷	۲۳۱۷۴۳۱۷
۲۳	۲۱۱۷۳۹۱۷	۲۱۱۸۸۴۵۶	۲۱۲۰۲۸۶۴	۲۱۲۲۳۳۴	۲۱۳۷۱۲۸۸	۲۱۷۶۹۴۷۷	۲۲۳۶۵۳۹۲	۲۵۹۳۸۵۱۴	۳۶۳۷۴۲۶۷	۳۶۳۷۴۳۱۷
میزان بار ۳۸۲۰ مگا وات										
۲۴	۲۱۱۷۳۹۱۷	۲۱۱۸۸۴۵۶	۲۱۲۰۲۸۶۴	۲۱۲۲۳۳۴	۲۱۳۷۱۲۸۸	۲۱۷۶۹۴۷۷	۲۲۳۶۵۳۹۲	۲۵۹۳۸۵۱۴	۳۶۳۷۴۲۶۷	۳۶۳۷۴۳۱۷
۲۵	۴۴۶۷۳۹۱۷	۴۴۶۹۲۰۵۶	۴۴۷۱۰۰۶۴	۴۴۷۳۵۵۳۴	۴۴۹۱۹۲۸۸	۴۵۳۸۹۴۷۷	۴۶۱۰۵۳۹۲	۵۰۳۹۸۵۱۴	۶۲۲۷۴۲۶۷	۶۲۲۷۴۳۱۷
میزان بار ۴۰۱۱ مگا وات										
۲۶	۴۵۶۷۳۹۱۷	۴۵۶۹۲۹۵۶	۴۵۷۱۰۳۶۴	۴۵۷۳۶۰۳۴	۴۵۹۲۱۲۸۸	۴۶۳۹۹۴۷۷	۴۷۱۱۵۳۹۲	۵۱۴۳۸۵۱۴	۶۳۳۷۴۲۶۷	۶۳۳۷۴۳۱۷
۲۷	۶۹۶۷۳۹۱۷	۶۹۶۹۵۸۵۶	۶۹۷۱۷۵۶۴	۶۹۷۴۸۰۳۴	۶۹۹۶۹۲۸۸	۷۰۵۱۹۴۷۷	۷۱۳۵۵۳۹۲	۷۶۳۹۸۵۱۴	۸۹۷۷۴۲۶۷	۸۹۷۷۴۳۱۷

جدول (۲) میزان شاخص LOLE با توجه به توان بادی اضافه شده در هر مرحله و در نظر گرفتن رشد بار ۵٪ بر حسب (Hours/year)

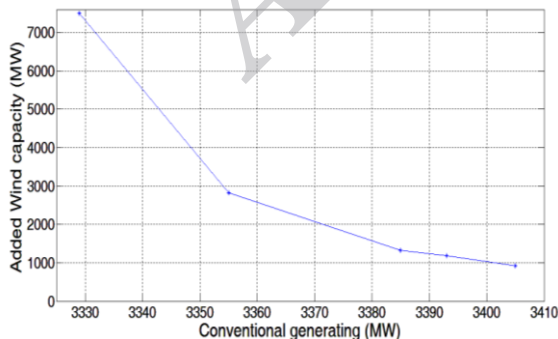
state	LOLE1	LOLE2	LOLE3	LOLE4	LOLE5	LOLE6	LOLE7	LOLE8	LOLE9	LOLE10
میزان بار ۲۸۵۰ مگا وات										
۱	۹/۵۵	۱۰/۶۳	۱۱/۰۶	۱۳/۶۴	۱۶/۲۴	۱۸/۷۲	۲۶/۴۱	۳۳/۲۸	۶۳/۳۱	۶۱/۳۳
۲	۹/۵۵	۱۰/۳۱	۱۰/۶۷	۱۲/۴۶	۱۴/۰۸	۱۵/۵۱	۲۰/۱۹	۲۳/۹۸	۳۹/۵	۳۵/۴۱
۳	۹/۵۵	۹/۸۱	۱۰/۱۴	۱۰/۴۹	۱۲/۰۵	۱۰/۷۶	۱۲/۷۸	۱۱/۱۷	۱۵/۷	۱۴/۷۲
۴	۹/۵۵	۹/۶۸	۹/۷۴	۹/۷	۱۰/۵	۹/۶۳	۱۰/۳۴	۹/۶۶	۱۵/۶۹	۱۴/۷۱
۵	۹/۵۵	۹/۵۵	۹/۵۵	۹/۵۴	۹/۵۵	۹/۵۵	۹/۵۶	۹/۵۴	۱۵/۶۹	۱۴/۷۱
میزان بار ۲۹۹۳ مگا وات										
۶	۲۲/۵۷	۲۲/۰۶	۲۲/۰۲	۲۲/۹۹	۲۱/۸۸	۲۱/۸۹	۲۲/۲۵	۲۰/۵۹	۳۲/۸۲	۳۲/۹۶
۷	۹/۸۲	۹/۸۹	۹/۸۲	۱۱/۱۷	۱۰/۸۵	۱۱/۳۴	۱۴/۸۳	۱۷/۰۸	۳۲/۸۲	۳۲/۹۶
۸	۹/۶۹	۹/۵۸	۹/۶۱	۹/۷۷	۱۰/۰۱	۱۰/۶۷	۱۴/۳۶	۱۶/۹۱	۳۲/۸۲	۳۲/۹۶
۹	۹/۵۵	۹/۵۵	۹/۵۵	۹/۵۷	۹/۵۹	۹/۸۵	۱۳/۸۴	۱۶/۷۴	۳۲/۸۲	۳۲/۹۶
میزان بار ۳۱۴۳ مگا وات										
۱۰	۲۳/۰۹	۲۲/۶۵	۲۲/۷۵	۲۱/۹۲	۲۱/۶۴	۲۱/۷۱	۲۹/۲۹	۳۵/۷۴	۶۶/۳۲	۶۸/۶۲
۱۱	۱۲/۵	۱۳/۵۳	۱۴/۰۷	۱۶/۷۳	۱۹/۳۲	۲۱/۶۹	۲۹/۲۷	۳۵/۷۴	۶۶/۳۲	۶۸/۶۲
۱۲	۱۲/۴۴	۱۳/۴۵	۱۴	۱۶/۶۳	۱۹/۱۹	۲۱/۶۹	۲۹/۲۶	۳۵/۷۴	۶۶/۳۲	۶۸/۶۲
۱۳	۱۲/۴۲	۱۳/۴۲	۱۳/۹۶	۱۶/۶	۱۹/۱۲	۲۱/۶۷	۲۶/۲۴	۳۵/۷۴	۶۶/۳۲	۶۸/۶۲
میزان بار ۳۳۰۰ مگا وات										
۱۴	۲۷/۴۳	۲۹/۲۵	۲۹/۹۷	۳۵/۹۲	۴۰/۵۴	۴۴/۶۵	۵۸/۶۴	۷۰/۰۷	۱۲۱/۷۳	۱۲۹/۴۲
۱۵	۲۷/۱۸	۲۹	۲۹/۷۲	۳۵/۶۲	۴۰/۴۲	۴۴/۶۳	۵۸/۶۱	۷۰/۰۷	۱۲۱/۷۳	۱۲۹/۴۲
۱۶	۲۷/۰۷	۲۸/۸۸	۲۹/۶	۳۵/۴۹	۴۰/۲۸	۴۴/۵۳	۵۸/۵۳	۷۰/۰۵	۱۲۱/۷۳	۱۲۹/۴۱
۱۷	۲۷/۰۶	۲۸/۸۷	۲۹/۵۹	۳۵/۴۸	۴۰/۲۷	۴۴/۵۲	۵۸/۵	۷۰/۰۴	۱۲۱/۷۳	۱۲۹/۴
میزان بار ۳۴۶۵ مگا وات										
۱۸	۵۵/۷۹	۵۸/۸۸	۶۰/۵۵	۷۰/۳۹	۷۹/۶۹	۸۷/۸۹	۱۱۱/۰۶	۱۲۸/۹۷	۲۱۰/۷۴	۲۲۷/۵
۱۹	۵۵/۷۸	۵۸/۸۸	۶۰/۵۴	۷۰/۳۹	۷۹/۶۹	۸۷/۸۹	۱۱۱/۰۶	۱۲۸/۹۷	۲۱۰/۷۴	۲۲۷/۵
۲۰	۵۵/۷۸	۵۸/۸۷	۶۰/۵۳	۷۰/۳۷	۷۹/۶۶	۸۷/۸۶	۱۱۱/۰۳	۱۲۸/۹۴	۲۱۰/۷۳	۲۲۷/۵
میزان بار ۳۶۳۸ مگا وات										
۲۱	۱۰۸/۳۷	۱۱۳/۴۸	۱۱۶/۷۲	۱۳۲/۰۱	۱۴۴/۸۹	۱۵۷/۳۵	۱۹۱/۴۱	۲۱۸/۸۶	۳۳۶/۳۵	۳۶۵/۷
۲۲	۱۰۸/۳۷	۱۱۳/۴۸	۱۱۶/۷۲	۱۳۲/۰۱	۱۴۴/۸۹	۱۵۷/۳۵	۱۹۱/۴۱	۲۱۸/۸۶	۳۳۶/۳۵	۳۶۵/۷
۲۳	۱۰۸/۳۵	۱۱۳/۴۶	۱۱۶/۷	۱۳۱/۹۹	۱۴۴/۸۷	۱۵۷/۳۳	۱۹۱/۳۸	۲۱۸/۸۳	۳۳۶/۳۳	۳۶۵/۶۸
میزان بار ۳۸۲۰ مگا وات										
۲۴	۱۹۰/۴۱	۱۹۸/۷۱	۲۰۲/۸۵	۲۲۶/۰۵	۲۴۶/۲۷	۲۶۳/۴۱	۳۰۹/۷۸	۳۴۶/۴۹	۴۹۳/۵۳	۵۲۷/۶۸
۲۵	۱۹۰/۴۱	۱۹۸/۷۱	۲۰۲/۸۴	۲۲۶/۰۴	۲۴۶/۲۶	۲۶۳/۴	۳۰۹/۷۶	۳۴۶/۴۷	۴۹۳/۵۱	۵۲۷/۶۶
میزان بار ۴۰۱۱ مگا وات										
۲۶	۳۱۰/۶	۳۲۰/۹۵	۳۲۷/۴۳	۳۵۸/۱۹	۳۸۳/۰۹	۴۰۵/۵	۴۶۱/۴۴	۵۰۴/۵۹	۶۶۴/۸۴	۷۰۱/۵۳
۲۷	۳۱۰/۶	۳۲۰/۹۵	۳۲۷/۴۳	۳۵۸/۱۹	۳۸۳/۰۹	۴۰۵/۵	۴۶۱/۴۳	۵۰۴/۵۸	۶۶۴/۸۳	۷۰۱/۵۲

حذف مقادیر توان سنتی و یا روند رشد بار و به دنبال آن نیاز به تولید بیشتر، در تمامی مراحل توان بادی قادر به تامین بار مورد نیاز با توجه به شاخص LOLE مرجع نیست.

بنابراین تولید توان بادی به دلیل محدودیت های پایداری سیستم، تا درصد معینی از تولید کل را می تواند بر عهده بگیرد. در توان هایی بالاتر از ۵ الی ۶ درصد از توان کل سیستم، شاخص LOLE که نشان دهنده انتظار از دست دادن بار می باشد به شدت افزایش یافته و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم به شدت افت می کند. شکل های (۲) و (۳) ظرفیت توان بادی مورد نیاز به ازای کاهش تولید سنتی و با توجه به شاخص پایه  $LOLE=9.55$  را برای دو سال پیاپی با رشد بار ۵٪ نشان داده اند. مقادیر نشان داده شده قابل مشاهده در جدول (۲) می باشد. شکل (۲) در ۸ نقطه یا به عبارت دیگر تا مقدار پیک بار سنتی  $C_9$  و شکل (۳) در ۵ نقطه، تا مقدار پیک بار سنتی  $C_5$  می باشد.



شکل (۲): روند افزایش ظرفیت تولید بادی به ازای کاهش تولید سنتی در پیک بار ۲۸۵۰ مگاوات



شکل (۳): روند افزایش ظرفیت تولید بادی به ازای کاهش تولید سنتی با ۵٪ افزایش بار در پیک بار ۲۸۵۰ مگاوات

در این مقاله با توجه به کندتر بودن روند همگرایی شاخص LOEE نسبت به LOLE، روند همگرایی LOEE، ۳۰۰ سال مونت کارلویی فرض شده است. با توجه به روند جایگزینی نیروگاه های تجدیدپذیر بجای نیروگاه های سنتی در شبکه های قدرت مدرن، به بررسی جایگزینی نیروگاه های بادی پرداخته و به ترتیب توان های ۱۲، ۲۰، ۵۰، ۷۶، ۱۰۰، ۱۵۵، ۱۹۷، ۳۵۰ و ۴۰۰ مگاوات موجود در شبکه تست را از تولید سنتی کاسته و میزان مورد نیاز توان بادی محاسبه میشود.

در جدول (۱) میزان پیک توان تولیدی سنتی به ترتیب با مقادیر  $C_i$  ( $i=1...10$ ) و میزان توان بادی مورد نیاز نیز در زیر آن نشان داده شده است. با استفاده از سری زمانی آرما، سرعت باد به صورت مصنوعی شبیه سازی شده و با استفاده از آن توان خروجی ژنراتور توربین بادی شبیه سازی می گردد. برای محاسبه میزان توان بادی مورد نیاز در هر مرحله شاخص LOLE همان مرحله محاسبه و سپس با شاخص LOLE مرجع مقایسه شده و در صورتی که این مقدار بیشتر از مقدار مرجع باشد، مجدداً به توان بادی شبکه افزوده می گردد. این روند افزایشی تا جایی که شاخص LOLE محاسبه شده با شاخص مرجع با تقریب مناسبی برابری کند ادامه دارد. سپس مقدار مورد نیاز تولید برای ثابت نگه داشتن شاخص LOLE نسبت به شاخص مرجع با رشد بار ۵٪ مورد بررسی قرار میگیرد. در این مرحله فرض میشود که بخواهیم تمام تولید مورد نیاز را از طریق توان بادی تامین کنیم. مطابق آنچه در بالا گفته شد با محاسبه LOLE در هر مرحله، میزان مورد نیاز توان بادی تخمین زده می شود. در جدول (۱) مقدار پیک تولید توان سنتی با  $C_i$  و میزان توان بادی مورد نیاز با توجه به بار های مختلف ارائه شده است. جدول (۲) شاخص  $LOLE_i$  را برای مقایسه و درک بهتر نتایج در مراحل مختلف و مطابق با مقادیر جدول (۱) ارائه میدهد.

چون سرعت باد دارای ماهیت تصافی است، توان خروجی توربین بادی نیز دارای نرخ خروجی ثابتی نمی باشد. نکته قابل توجه و جالب در جدول (۱) و (۲) این است که با

## ۸ - نتیجه گیری

Conference, Newcastle, UK, September 6th-8th, 2006.

- [6] Wangdee W., Bulk electric system reliability simulation and application, Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, 2005.
- [7] Karki R., Billinton R., Maintaining supply reliability of small isolated power systems using renewable energy, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, No. 6, November, 2001 pp. 530-534.
- [8] Karki R., Billinton R., Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, No. 2, June, 2004, pp. 435-440.
- [9] Billinton R., Bai G., Generating capacity adequacy associated with wind energy, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, No. 3, September, 2004, pp. 641-646.
- [10] Karki R., Billinton R., Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, No. 4, December, 2001, pp. 368-373.
- [11] Pandit S.M., Wu S.M., Time Series and System Analysis with Application, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- [12] Billinton R., Li W., Reliability Assessment of Electrical Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Publishing, New York, 1994.

در این مقاله تأثیر اضافه نمودن ظرفیت های متفاوت توان بادی و در ازای آن کم کردن ظرفیت تولید ژنراتور های سنتی بر قابلیت اطمینان سیستم های قدرت، با دیدگاهی احتمالاتی، به روش مونت کارلو، مورد بررسی قرار گرفت. با محاسبه شاخصهای LOLE و LOEE در وضع موجود و با هدف ثابت نگه داشتن آن ها پس از جایگزینی تولید سنتی با تولید بادی، مشاهده شد که به علت ماهیت متغیر باد، صرفاً تا درصد معینی از توان تولیدی کل را می توان از سنتی به بادی تبدیل نمود. برای شبکه تست مورد استفاده در این مقاله این عدد چیزی بین ۵ الی ۶ درصد تولید کل بدست آمد. در این مقاله اثرات افزایش تدریجی بار در استراتژی توسعه نیز با تمرکز روی تولید بادی بررسی شد و میزان تولید مورد نیاز به ازاء هر رشد بار معین تعیین گردید. کلیه مراحل فوق بر روی شبکه تست IEEE-RTS با موفقیت در محیط MATLAB<sup>®</sup> شبیه سازی گردید.

## مراجع

- [1] Billinton R., Allan R.N., Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd Edition, Plenum Press, New York, 1996.
- [2] Abouzahr I., Ramakumar R., An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, no. 4, December, 1991, pp. 627-638.
- [3] Billinton R., Chen H., Ghajar R., Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy, *Microelectronics Reliability*, vol. 36, No. 9, September, 1996, pp. 1253-1261.
- [4] Giorsetto P., Utsurogi K.F., Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, No. 1, January, 1983, pp. 134-143.
- [5] Karki R., Hu P., Billinton R., Reliability evaluation of a wind power delivery system using an approximate wind model, 41st International Universities Power Engineering