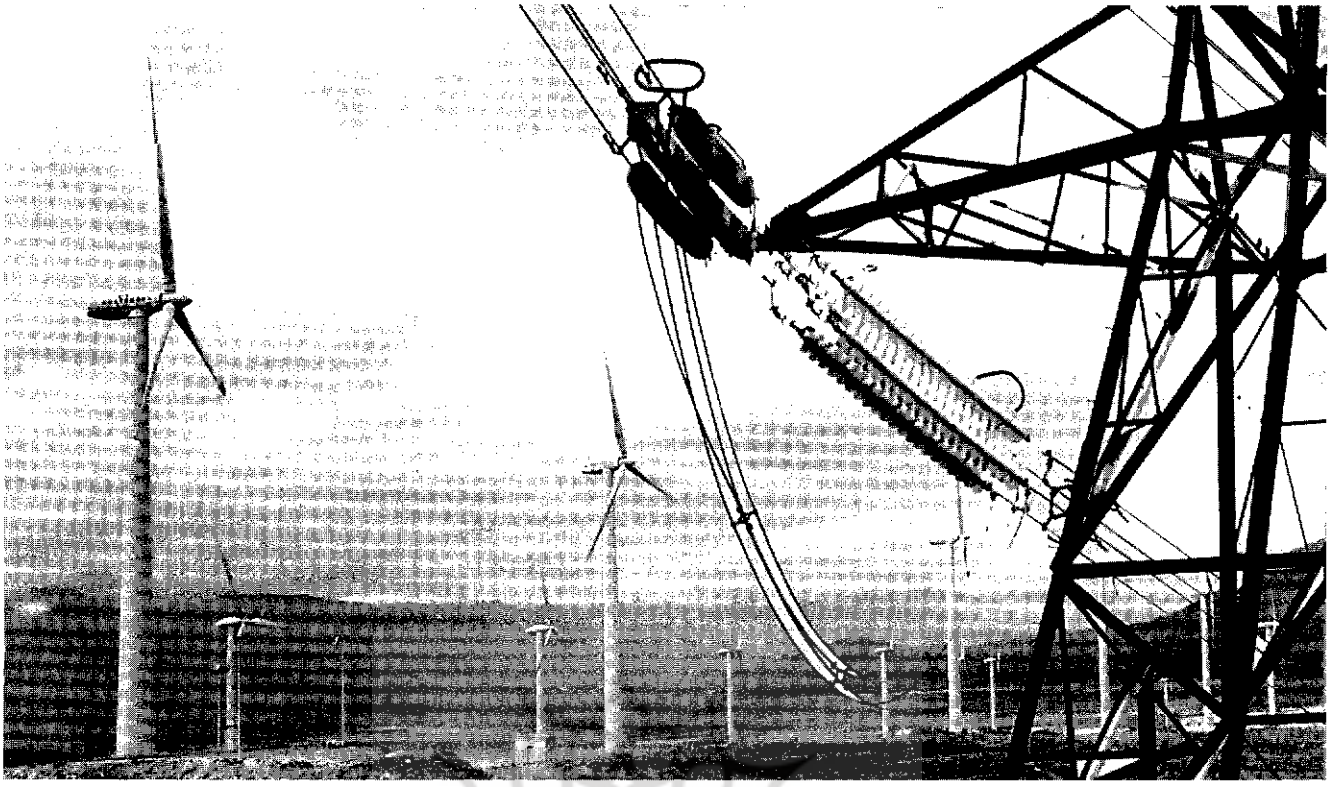


تولید برق از نیروی باد

نویسنده: مایکل آر-میلیگان
مترجم: همایون نسیمی

در بسیاری از کشورهای جهان، توسعه نیروگاه‌های بادی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است، زیرا در این نیروگاه‌ها، بدون آلوده کردن محیط زیست می‌توان برق تولید کرد. اما بسیاری از شرکت‌های تولید برق مایل نیستند بخش اعظم ظرفیت تولید خود را به نیروگاه‌های بادی واگذارند، زیرا این منبع انرژی به طور دائم در دسترس نیست. نیروگاه‌های بادی را نمی‌توان همانند نیروگاه‌های متداول و معمولی کنترل کرد و این نیروگاه‌ها شدیداً وابسته به حضور باد هستند، در نتیجه ممکن است میزان تولید برق سالیانه در نیروگاه‌های بادی بسیار متغیر باشد. هر یک از این دو عامل را می‌توان از جنبه‌های مختلف خطر پذیری و ریسک دانست که این موضوع به موازات تجدید ساختار صنعت برق و در نتیجه رقابتی‌تر شدن آن از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار شده است.

برای کاهش خطرات ناشی از متکی بودن به نوع خاصی از سوخت و یا فناوری تولید برق، می‌توان از راهکارهای خاص برنامه‌ریزی منابع که در برگیرنده روش‌های مختلف برای تنوع بخشیدن به منابع و فناوری‌های تولید برق است، استفاده کرد. برای ارزیابی هزینه‌های نسبی که مشخص کننده زمان مناسب برای ساخت یک نیروگاه برق است نیز می‌توان از تئوری گزینه‌های مالی[1] بهره جست. روش دیگری برای اجتناب از ریسک، معاملات تأمینی است که شامل معاملات با قراردادهای سلف می‌شود.

با به کارگیری اصول تئوری و عملی مربوط به برنامه‌ریزی منابع که در بالا ذکر شد، شرکت‌ها می‌توانند ریسک‌های احتمالی موجود در محیط‌های رقابتی را مورد شناسایی قرار داده و از احتمال بروز آنها بکاهند.

در کشورهایی که صنعت برق تحت نظارت دولت است، مصرف‌کنندگان و شرکت‌های برق به طور مشترک ریسک‌ها را به عهده می‌گیرند؛ اما عده‌ای معتقدند که بخش اعظم ریسک متوجه مصرف‌کنندگان می‌شود، زیرا در چنین کشورهایی، تولید برق به طور انحصاری در دست شرکت‌های برق است و نرخ بازگشت سرمایه توسط دولت تضمین می‌شود. اما به موازات حرکت بازارهای برق به سمت آزادسازی هر چه بیشتر، شرکت‌های برق تلاش می‌کنند تا انواع مختلف خطرات و ریسک‌هایی را که قبلاً می‌توانستند از آنها چشم‌پوشی کنند مورد شناسایی قرار دهند و ابعاد آنها را ارزیابی کنند. از جمله این ریسک‌ها می‌توان به مواردی چون عدم تکمیل واحد جدید تولید برق در زمان مورد نیاز، افزایش بهای سوخت و قوانین جدید مربوط به انتشار آلاینده‌ها اشاره کرد. از چند جهت ریسک‌های مربوط به نیروگاه‌های ادواری[2] همچون نیروگاه‌های بادی را می‌توان مورد بحث و بررسی قرار داد. یکی از بارزترین انواع ریسک که متوجه نیروگاه‌های بادی می‌شود این است که ممکن است این نیروگاه‌ها در زمان مورد نیاز قادر به تولید برق نباشند. ولی این احتمال خطر تقریباً معادل ریسکی است که متوجه نیروگاه‌های برق

معمولی می‌شود و آن عدم امکان محاسبه دقیق روند تحولات قیمت سوخت در خلال عمر مفید این نیروگاه‌ها است. اگر چه سوخت مورد نیاز نیروگاه‌های بادی بسیار ارزان است و به وفور یافت می‌شود، ولی نمی‌توان از قبل زمان دقیق دستیابی به این منبع انرژی را پیش‌بینی کرد. سایر خطراتی که نیروگاه‌های برق سنتی را مورد تهدید قرار می‌دهند عبارتند از: قوانین و مقرراتی که این نیروگاه‌ها را مجبور به کاهش تولید آلاینده‌ها می‌کنند و در نتیجه باعث می‌شوند که هزینه‌های تولید برق افزایش یابد. شرکت‌های برقی که در حال تجدید ساختار هستند، سعی می‌کنند تا با اصول مربوط به تجزیه و تحلیل ریسک‌ها آشنا شوند و از فواید و محسنات نیروگاه‌های بادی اطلاع یابند. با گذشت زمان، تولیدکنندگان برق و بازارهای مرتبط با آن و همچنین سیستم‌های تولید و توزیع برق، بیش از پیش در عملکردها و اقدامات خود ریسک‌ها و جنبه‌های مختلف آن را مد نظر قرار می‌دهند.

مقاله حاضر به بررسی برخی از عوامل مؤثر بر عملیات نیروگاه‌های بادی و نیز برنامه‌ریزی برای این گونه نیروگاه‌ها می‌پردازد. با وجود تمایل عمومی به سمت روش‌های نوین و تجدید ساختار صنعت برق، تأسیساتی که قصد به خدمت گرفتن نیروگاه‌های بادی را دارند، در ارزیابی این نیروگاه‌ها با سؤالات اساسی پیرامون تناوت دسترسی به باد و اثرات این عدم استمرار بر عملکرد سیستم‌های تولید برق مواجه می‌شوند. برای حل مشکل عدم استمرار دسترسی به باد، پیش‌بینی‌های دقیق جریان‌های هوا و باد بسیار مفید هستند. مسأله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، ارزیابی ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها است تا مشخص شود که آیا ظرفیت برق آنها جوابگوی تقاضا هست یا خیر. این امر ما را به سمت ارزیابی قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها و نیز اقدامات مبتنی بر این ارزیابی‌ها سوق می‌دهد. صنعت تولید برق طیف وسیعی از شرکت‌ها را شامل می‌شود که در این میان از شرکت‌های کوچک با یک یا دو واحد تولید برق گرفته تا شرکت‌های عظیم که صاحب نیروگاه‌هایی به ظرفیت ۳۰ هزار مگاوات و یا بیشتر هستند، به چشم می‌خورد. در بررسی صنایع برق کشورهای مختلف، اعم از صنایعی که هنوز تحت نظارت دولت هستند و یا آنهایی که مرحله تجدید ساختار را پشت سر گذارده‌اند، منظور از واژه تأسیسات [3] که در این مقاله به کار رفته است، ژنراتور برق و یا شرکت تولید برق

فواید نیروگاه‌های بادی را می‌توان در سه مقوله: صرفه‌جویی در مصرف انرژی، افزایش تولید برق و کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار داد

است. علاوه بر این، چنین فرض شده است که حداقل بعضی از این شرکت‌های برق، مجهز به نیروگاه‌های بادی و نیز واحدهای تولید برق سنتی هستند و همچنین این شرکت‌ها در حال سپری کردن تجدید ساختارند. صنعت برق تاکنون چنین تجربه‌ای را کسب نکرده است و پیشگویی این مطلب که واکنش بازار نسبت به این اقدامات چگونه خواهد بود، نیازمند زمان و کسب تجربه است. انگلستان یکی از اولین کشورهایی بود که به تجدید ساختار صنایع برق، خود اقدام کرد.

صنعت برق این کشور اخیراً تغییرات چشمگیری در بسیاری از جنبه‌های عملیاتی صنایع تولید برق ایجاد کرده است. وقایع اخیر در بازار برق ایالت کالیفرنیا، ثابت کرد که عواملی چون کافی بودن عرضه برق، قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها و ارزیابی ظرفیت تولید، هنوز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. مقاله حاضر، بحث خود در خصوص بازار برق را مبتنی بر این فرض قرار داده است که روند تجدید ساختار صنایع برق در کل جهان هنوز در جریان است و به نتیجه نهایی نرسیده است. بسیاری از مسائل فنی و زیربنایی وجود دارند که بازار باید به آنها توجه کند و ممکن است قوانین اولیه بازار و حتی قوانین بازنگری شده بعدی نیز تمامی این مسائل و موارد را مورد توجه قرار ندهند.

نتایجی که در این مقاله ارائه شده است، حاصل مطالعات متعددی است که در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده [4] (NREL) و با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی تولید برق که مبتنی بر داده‌های واقعی مربوط به سرعت باد، ژنراتور و بار الکتریکی است، صورت پذیرفته است. علاوه بر این، از اطلاعات مربوط به چندین شرکت برق و نیروگاه‌های بادی در مقاله حاضر استفاده شده است. اطلاعات ساعت به ساعت که برای نیروی باد استفاده می‌شود مبتنی بر داده‌های واقعی باد بوده و در منحنی‌های قدرت انواع مختلف توربین‌های بادی به کار گرفته شده است که به این ترتیب می‌توان برق تولید شده توسط نیروگاه‌های فرضی مجهز به توربین‌های بادی را به طور ساعت به ساعت محاسبه کرد. برنامه‌های شبیه‌سازی تولید برق و ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از برنامه Elfin و p^+ به دنبال تجدید ساختار شرکت‌های برق، این دو برنامه برای بازارهای جدید برق، بازنویسی شدند ولیکن الگوریتم‌های اولیه محاسبه حداقل هزینه‌ها هنوز اساس و پایه این برنامه‌ها را تشکیل می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌های تجربی قابلیت اطمینان در طول زمان که در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر (NREL) به اجرا درآمده‌اند نیز در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. اگر چه با اجرای تغییرات ساختاری، بعضی از اهداف تغییر یافته‌اند و بر روی مسایل دیگری تأکید شده است، ولی شرکت‌ها همواره به انتخاب بهترین راه برای تولید برق و افزایش هر چه بیشتر سودآوری ترغیب می‌شوند. برای تضمین میان عرضه برق، اتخاذ یکی از دو روش زیر یعنی قیمت‌گذاری مبتنی بر قابلیت اطمینان و یا نظارت دولت ضروری به نظر می‌رسد.

با طرح سؤالات زیر می‌توان بعضی از عوامل مربوط به استفاده از نیروگاه‌های بادی در صنایع برق را معرفی کرد.

آیا اضافه کردن یک نیروگاه بادی می‌تواند باعث افزایش ارزش شرکتی شود که خود دارای نیروگاه‌های متعدد و گوناگون تولید برق است؟ آیا نیروگاه‌های بادی می‌توانند باعث کاهش نیاز به نیروگاه‌های معمولی و سنتی شوند؟ اگر چنین است، چه میزان از برق تولیدی را می‌توان به این نوع نیروگاه‌ها واگذار کرده و میزان این واگذاری را چطور می‌توان محاسبه کرد؟ آیا عدم استمرار دسترسی به نیروی باد و دوره‌ای بودن فعالیت نیروگاه‌های بادی باعث بروز مشکلات اساسی برای سیستم‌های تولید برق می‌شود؟ در صورت مثبت بودن پاسخ این پرسش، چگونه می‌توان این مشکلات را مرتفع کرد؟ آیا صاحبان نیروگاه‌های بادی قادر خواهند بود در بازارهای نوین برق همچون بازارهای روزانه [5] رقابت کنند و جایگاهی در ساختار چنین بازارهایی داشته باشند؟

ارزش نیروگاه‌های بادی

امروزه همگان به ارزش نیروگاه‌های بادی واقف هستند و می‌دانند که این نیروگاه‌ها توانایی تأمین برق شبکه‌های برق را دارند. این نیروگاه‌ها توانایی جبران کمبود برق ناشی از خارج شدن نیروگاه‌های معمولی از مدار را دارند. ارزش میزان سوخت صرفه‌جویی شده و کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها را می‌توان با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز تولید برق محاسبه کرد. در بسیاری از موارد، نیروگاه‌های بادی می‌توانند جایگزین نیروگاه‌های سنتی و معمولی شوند. هزینه‌های ثابت و متغیر نیروگاه‌های بادی به طور معمول از هزینه‌های اغلب نیروگاه‌های سنتی کمتر است، زیرا هزینه‌های مربوط به سوخت در این نوع از نیروگاه‌ها صفر و هزینه‌های تعمیر و نگهداری و عملیات بسیار پایین است. به ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده توسط نیروگاه‌های بادی، شرکت‌های برق دست خود را برای برچیدن نیروگاه‌های سنتی بازتر می‌بینند. به موازات حرکت صنایع برق به سمت تجدید ساختارها، شرکت‌های تولیدکننده برق که با بهره‌گیری از انواع فناوری‌های مختلف اقدام به تولید برق می‌کنند، سعی دارند هزینه‌های خود را کاهش داده و سودآوری خود را به حداکثر برسانند.

بنابراین، یک شرکت تولیدکننده برق که دارای انواع مختلفی از نیروگاه‌ها (و از جمله نیروگاه بادی) است، سعی خواهد کرد تا با به حداکثر رساندن کارآیی نیروگاه‌های بادی، هزینه‌های سوخت نیروگاه‌های سنتی خود را نیز کاهش دهد.

میزان ارزشی که نیروگاه‌های بادی ممکن است برای شرکت‌های تولید برق داشته باشند، بستگی زیادی به عواملی چون ترکیب و تنوع نیروگاه‌های تولید برق شرکت‌های برق و آثار مربوط به الگوی جریان‌های باد در طی زمان و رابطه این الگوها با میزان بار برق مورد انتظار دارد. به عنوان مثال ممکن است که یک نیروگاه بادی که در محل خاصی قرار گرفته است برای یک شرکت تولیدکننده برق بسیار حائز اهمیت باشد، در حالی که برای سایر شرکت‌ها جذابیتی نداشته باشد. میلیگان و میلر[6]، آزمایش‌هایی را با ترکیبات متنوعی از جایگاه‌های مختلف و اطلاعات مربوط به تأسیسات تولید برق به عمل آوردند و دریافتند که نیروگاه‌هایی که از لحاظ کلیه خصوصیات مشابه یکدیگر هستند، ممکن است برای شرکت‌های برق دارای اهمیت یکسانی نباشند. در تحقیقاتی که توسط میلیگان صورت گرفت، از دو شرکت بزرگ تولید برق مدل‌سازی شد. در این مدل، هر دو شرکت به همراه هر یک از نیروگاه‌های بادی آنها در یک زمان با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. فواید نیروگاه‌های بادی را می‌توان در سه مقوله مورد بررسی قرار داد:

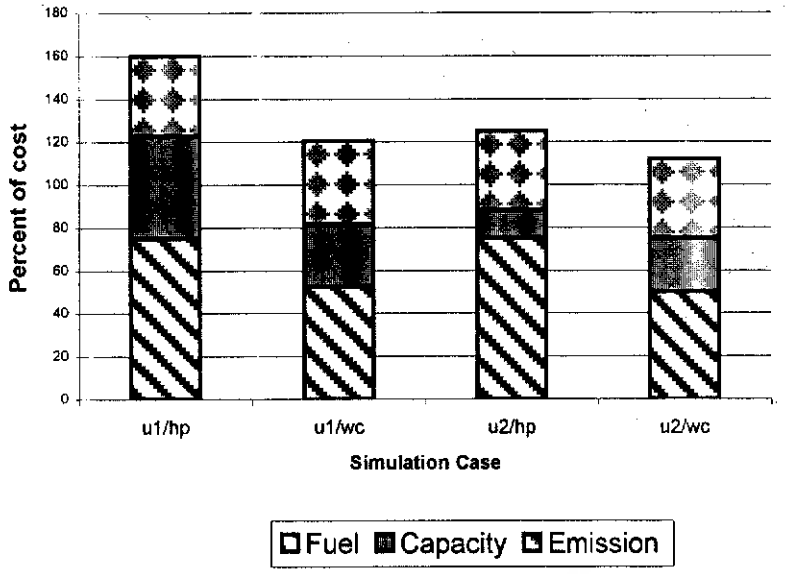
۱- صرفه‌جویی در مصرف انرژی که حاصل کاهش هزینه‌های سوخت‌های متداول به سبب بهره‌گیری از نیروگاه‌های بادی است.

۲- افزایش ظرفیت تولید برق، که در مقاله حاضر این میزان افزایش با روش محاسبه کمبود ظرفیت تولید که توسط کمیسیون انرژی کالیفرنیا [7] و قبل از تجدید ساختار صنایع برق در این ایالت مورد استفاده قرار گرفته، به دست آمده است.

۳- کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها که این میزان کاهش نیز توسط کمیسیون انرژی کالیفرنیا بر حسب تن محاسبه شده است. ارزش واقعی کاهش سطح تولید آلاینده‌ها ممکن است در معادلات بازار جایی نداشته باشد ولی یکی از عوامل بیرونی شناخته شده بازار است. در ابتدا، میزان انرژی مصرف شده، میزان ظرفیت تولید برق و انتشار آلاینده‌ها با اجرای یک مدل و بدون در نظر گرفتن نیروگاه بادی مورد محاسبه قرار گرفت. پس از جمع‌آوری اطلاعات، با دخالت دادن نقش یک نیروگاه بادی ۲۵ مگاواتی، متغیرهای بالا دوباره مورد محاسبه قرار گرفتند. اختلاف میان نتایج به دست آمده در دو مرحله، نشان دهنده میزان سودی است که این نیروگاه می‌تواند با خود به همراه بیاورد.

نمودار ۱

سود به دست آمده در مقایسه با هزینه‌های تولید در چند نیروگاه بادی و مجموعه نیروگاه‌های برق



در نمودار شماره یک نتایج حاصل از دو مرحله مشاهده می‌شود. نیروگاه‌های بادی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، یکی در گذرگاه وست کاست (WC) [8] و دیگری در ارتفاعات پلینز [9] قرار گرفته‌اند. محور عمودی این نمودار نشان دهنده سود به دست آمده به ازای یک درصد از هزینه‌هاست که معادل هزار دلار در هر کیلووات ساعت است. از نمودار یک می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که:

۱- محل قرار گرفتن نیروگاه بادی باعث تغییر در میزان سوددهی آن نیروگاه می‌شود که این امر خود بستگی به نوع شرکت برق و سایر انواع نیروگاه‌های آن دارد.

۲- میزان برق به دست آمده توسط نیروگاه بادی بر حسب تابع تغییرات زمانی و تناوت نیروگاه بادی متغیر است.

علاوه بر این، میلیگان با بهره‌گیری از مدل‌های زمانی و با اجرای چند شبیه‌سازی تولید برق توانست به نتایجی برسد. به این ترتیب که او توانست با استفاده از الگوهای جریان باد و مجتمع‌های نیروگاهی که مجهز به انواع نیروگاه هستند و با بهینه‌سازی زمانبندی فعالیت هر یک از نیروگاه‌ها در نظر گرفتن موارد اقتصادی تولید برق، در مواقعی که میزان تولید برق توسط نیروگاه‌های بادی قابل ملاحظه است، سایر نیروگاه‌ها را از مدار خارج کند. این آزمایش در یکی از تأسیسات بزرگ تولید برق به اجرا درآمد و به این ترتیب او توانست تعداد دفعات خارج شدن نیروگاه‌های سنتی از مدار را به ۷۰۰ بار در سال کاهش دهد.

پیش‌بینی ظرفیت و خطرپذیری

چند راه برای ارزیابی ظرفیت مؤثر تولید[10] نیروگاه‌های بادی وجود دارد. در بازارهای تحت نظارت دولت، واژه اعتبار ظرفیت[11] اغلب به معنای آن بخش از ظرفیت تولید توسط نیروگاه‌های سنتی است که نیروگاه‌های بادی می‌توانند جایگزین آن شوند. در این بخش از مقاله فرض بر این است که استفاده از واژه اعتبار ظرفیت در بازارهایی که جدیداً تحت تجدید ساختار قرار گرفته‌اند مفهومی وسیع‌تر و عمومی‌تر دارد. در این بخش ابتدا به بحث پیرامون چند ویژگی عمومی تولید برق در مجتمع‌های نیروگاهی مرکب از چند نوع نیروگاه و مسائل خاصی که از به کارگیری نیروگاه‌های بادی در این‌گونه مجتمع‌ها ناشی می‌شود می‌پردازیم. طی این بحث، بازارهای کوتاه مدت و نقشی که پیش‌بینی جریان‌های باد در این گونه بازارها می‌تواند داشته باشد، مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس اقدامات به عمل آمده در مورد اعتبار ظرفیت که مبتنی بر برآوردهای قابلیت اطمینان می‌باشد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از این ارزیابی‌ها در چندین بازار تحت نظارت دولت استفاده شده است اما این مسأله که آیا این ارزیابی‌ها برای بازارهای نوین برق نیز مناسب هستند یا خیر هنوز جای بحث دارد.

ورود برق حاصل از نیروی باد به شبکه عرضه

به دلیل این که عرضه برق در مواقع اوج تقاضای مصرف برق ارزش بالایی دارد، شرکت‌های تولیدکننده برق دارای انگیزه‌های قوی اقتصادی برای تضمین عرضه برق در این دوره‌های زمانی هستند. به موازات پیشرفت روند تکاملی تجدید ساختار صنایع برق، بسیاری از جنبه‌های بازار عمده فروشی برق نیز تغییر می‌کند؛ همان‌طور که چنین تغییری در ایالت کالیفرنیا و همچنین در انگلستان نیز مشاهده شده است. اما مکانیسم جدیدی در حال شکل‌گیری است. طبق این مکانیسم خریداران و فروشندگان برق قبلاً در مورد قیمت و مقدار برق خریداری شده به توافق می‌رسند. مدت زمان میان عقد قرارداد و مصرف برق در این نوع بازارهای کوتاه مدت ممکن است از چند ساعت تا چند روز متغیر باشد. این مقاله فقط به معاملات عملیاتی کوتاه مدت می‌پردازد و از معاملات بلند مدت صرف نظر می‌کند، به این ترتیب بخش اعظم

کارآمدترین ابزار برای صاحبان و گردانندگان نیروگاه‌های بادی همانا پیش‌بینی صحیح وضعیت باد در دوره‌ای است که طبق قرارداد باید برق توسط نیروگاه بادی تأمین شود. زیرا کل برق عرضه شده همواره باید برابر کل تقاضا برای مصرف برق باشد تا به این وسیله هزینه‌های ناشی از عرضه بیش از حد و یا ناکافی برق به حداقل برسد

بحث، حول محور بازارهای عملیاتی می‌چرخد.

صاحبان نیروگاه‌های برق باید چنین مجتمع‌های نیروگاهی را در برنامه‌های خود بگنجانند. اگر چه در بازارهای کوتاه مدت پیش‌بینی‌های لازم برای ذخایر اضطراری برق[12] به هنگام بروز خرابی در ژنراتورها و یا بالا رفتن میزان مصرف شده است؛ اما اگر صاحبان نیروگاه‌های بادی بتوانند عرضه برق در مواقع خاص و ضروری را تضمین کنند، این امر نقطه قوتی برای این‌گونه نیروگاه‌ها محسوب خواهد شد. هر چند در مواقعی که برق مطابق شرایط قرارداد به مشتریان عرضه نشود، می‌توان از مکانیسم‌های مختلفی که برای این منظور در نظر گرفته شده، استفاده کرد. به عنوان مثال، مکانیسم تعادل و تثبیت (BSC)[13] را می‌توان یکی از انواع این مکانیسم‌ها قلمداد کرد که در انگلستان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مکانیسم، هر دو طرف پس از عقد قرارداد موظف خواهند بود که به ازای بروز هرگونه عدم تعادل در خلال مدت قرارداد مبلغی را متحمل شوند.

بنابراین، صاحبان نیروگاه‌های بادی دارای انگیزه قوی اقتصادی برای عرضه برق به بازار در این‌گونه مواقع هستند.

برای دست‌اندرکاران نیروگاه‌های بادی مشکلات بیشتری نیز وجود دارد و آن طبیعت تناوبی و غیرمستمر جریان‌های باد است که سبب می‌شود کنترل نیروگاه‌های بادی با کنترل نیروگاه‌های سنتی تفاوت‌های اساسی داشته باشد. به هنگام خاموشی برق، هزینه‌های سنگینی متوجه مصرف‌کنندگان و جامعه می‌شود و به این علت است که کلیه شبکه‌های برق در جهان دارای ذخایر اضطراری هستند. از سوی دیگر تولید بیش از حد نیاز برق نیز، هزینه‌های اضافی را به تولیدکنندگان تحمیل می‌کند. سطح این هزینه‌ها بسته به مورد، بسیار متغیر بوده و ممکن است مجتمع‌های نیروگاهی شرکت‌های برق، شرکت‌های توزیع برق و یا مصرف‌کنندگان نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. کل برق عرضه شده همواره باید معادل کل تقاضا برای مصرف برق باشد تا به این وسیله هزینه‌های ناشی از عرضه بیش از حد و یا ناکافی برق به حداقل برسد. بنابراین طبیعت ناپایدار و تناوبی باد به عنوان منبع سوخت نیروگاه‌های بادی، ایجاب می‌کند که صاحبان نیروگاه‌های بادی پیش‌بینی‌های صحیح و دقیقی در مورد سرعت باد در مدت زمان مورد نظر به عمل آورند.

پیش‌بینی‌های صحیح در قراردادهای فروش برق بسیار با ارزش است زیرا به موجب این قراردادها صاحبان نیروگاه‌های بادی مکلف می‌شوند تا در زمان معین و مشخص، برق مورد نظر را تأمین کنند. ارزش پیش‌بینی‌های دقیق در مورد جریان‌های باد در مجتمع‌های نیروگاهی مبتنی بر چند عامل است که در میان این عوامل نحوه استفاده از نیروگاه‌های مختلف و ظرفیت اختصاص داده شده به هر یک توسط شرکت تولیدکننده برق از همه مهم‌تر است اگر در این مجتمع‌های نیروگاهی یک واحد واکنش سریع پیش‌بینی شود، این واحد می‌تواند به محض بروز مشکل وارد مدار شود و برق مورد نیاز را تأمین کند. بر عکس، اگر خلاف انتظار برای مدتی باد به وزش درآید می‌توان توربین‌های با سوخت‌های فسیلی و با سوخت‌های مشابه را از مدار خارج کرد تا به این وسیله از مصرف این‌گونه سوخت‌های نسبتاً گران قیمت جلوگیری شود.

میلیگان، میلر و چپمن اقدام به مدل‌سازی دو نیروگاه بزرگ در یک بازار کردند و نشان دادند در بازاری که تحت قوانین و مقررات دولتی است، پیش‌بینی صحیح از وضعیت باد می‌تواند فواید اقتصادی چشمگیری به همراه داشته باشد. روش آنها این بود که حداکثر توان هر واحد نیروگاهی را با در نظر گرفتن عوامل مختلف همچون زمانبندی باد و در دسترس بودن این منبع انرژی مورد محاسبه قرار دادند. برای لحاظ کردن خطا در پیش‌بینی‌های خود آنها پس از ثابت

کـردن بـرنامه تـولید بـرق مـطابق یک بـرنامه پیش‌بینی خاص، برنامه دسترسی به باد را مطابق آن تغییر دادند. این امر به آنها اجازه داد تـفاوت هزینه‌های تولید برق را که ناشی از میزان صحت پیش‌بینی وضعیت باد از صفر تا صددرصد است، محاسبه کنند. آنها به این ترتیب دریافتند که فواید اقتصادی یک پیش‌بینی صحیح بسیار چشمگیر و قابل ملاحظه است زیرا خطا در میزان تـولید و عرضه اقتصادی برق به حـداقـل مـی‌رسد و یـا حذف می‌شود. علاوه بر صحت پیش‌بینی‌ها در مورد وضعیت باد می‌تواند بـاعث کـاهش و یـا حذف جریمه عملیاتی شود که به لحاظ دوره‌ای بـودن طـبیعت بـاد مـمکن است گـریبانگیر نیروگاه‌های بادی شود.

در حال حاضر آزمـایشگاه مـلی انـرژی‌های تجدیدپذیر ایالت متحده بـا هـمکاری مـؤسسه تحقیقات نیروی باد[14] سـرگرم تـحقیق بـر روی ابداع برنامه پیش‌بینی وضعیت باد و آزمایش آن است. در ضمن این دو مؤسسه در حـال انـجام تـحقیقات جـداگـانه‌ای در مـورد تکـنیک‌های پیش‌بینی وضعیت باد هستند. پیش‌بینی صحیح وضعیت باد یکی از مهمترین مسائلی است کـه گردانندگان نیروگاه‌های بادی با آن مواجه خواهند بود. به موازات گسترش عرضه تـجاری بـرق بـا استفاده از نیروگاه‌های ترکیبی در سراسر جـهان، گردانندگان و صـاحبان نـیروگاه‌های بـادی بـاید بتوانند قیمت‌گذاری‌های مـختلفی را بـرای بـرق تولیدی خود در نظر بگیرند. به این ترتیب که در بازارهای کوتاه مدت عرضه برق هنوز معین نشده است که برق حاصل از منابع مختلف باید دارای قیمت‌گذاری متفاوتی باشد و یـا ایـن کـه صـرفاً قیمت برق در زمان اوج (پیک) بـالاتر از زمـان غیرپیک در نظر گرفته شـود؛ امـا بـاید در نـظر داشت که زیان ناشی از برآورد غلط منابع بیشتر متوجه زمـان پـیک مـی‌شود تـا سـایر زمـان‌ها. کارآمدترین ابـزار بـرای صـاحبان و گـردانـندگان نـیروگاه‌های بـادی هـمانا پـیش‌بینی صـحیح وضعیت باد در دوره‌ای است که طبق قرارداد باید برق توسط نیروگاه بادی تأمین شود.

ارزیابی قابلیت اطمینان اعتبار ظرفیت

به موازات بهره‌گیری هر چه بیشتر نیروگاه‌ها از استراتژی‌های ارزیـابی خـطرپذیری، قـابلیت اطمینان کلی این نیروگاه‌ها بـیش از پـیش حـائز اهمیت می‌شود. از آنجا کـه تـعداد و پـیچیدگی قراردادها در مورد شبکه‌های انتقال و توزیع برق روزبروز افزایش مـی‌یابد در ایـن مـقاله قـابلیت

میان نتایج حاصل از مدل‌سازی LMLOLE یعنی محاسبه قدرت باد به عنوان عامل تغییر دهنده بار و نتایج حاصل از مدل‌سازی DLOLE یعنی محاسبه مستقیم مبتنی بر زمانبندی میزان تولید برق توسط باد اختلاف چشمگیری وجود دارد

اطـمینان ایـن‌گونه شبکه‌ها مـورد بـررسی قـرار نگرفته است؛ اما باید تـوجه داشت کـه قـابلیت اطمینان و تـوزیع در آینده از اهـمیت بـسیاری برخوردار خواهد بود به عنوان مثال در میز گردی که اخـیراً تـوسط کـارشناسان قـابلیت اطـمینان سیستم‌های برق تشکیل شد شـرکت‌کنندگان در این میز گرد در موارد زیر اتفاق نظر داشتند:

۱- قابلیت اطـمینان سـیستم‌های بـرقی ایـالات متحده مخصوصاً در بخش تولید برق این کشور بسیار بالاست

۲- قراردادهایی که در آینده به واسطه بـازسازی ساختار صنعت برق در مورد خرید و فروش کلی بـرق مـنعقد خـواهـد شـد بـسیار پـیچیده‌تر از قراردادهای امروزی خواهد بود.

۳- اگر چه قابلیت اطمینان سیستم‌های برق در آینده در وضعیت بدتری نسبت به زمان حال قرار خواهد داشت؛ اما کماکان به صورت یک مسأله مهم و حیاتی باقی خواهد مـاند. ایـن بـخش از مقاله به قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید بـرق خـواهـد پـرداخت. وقـایع اخـیر در بـخش‌های مـختلف ایـالات مـتحده نشـان مـی‌دهند کـه نگرانی‌های موجود در مورد کافی نبودن عـرضه برق کاملاً موجه و به جاست.

با تـوجه بـه مـتغیر بـودن تـقاضای بـرق و همچنین طبیعت غیرقابل پیش‌بینی تـولید بـرق توسط نیروی باد، شبکه‌های انتقال و توزیع برق هنوز درگیر مشکلات مربوط به ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضا هستند. از آنجایی که مجتمع‌های هماهنگ‌کننده و یا مجموعه‌های تولید و عرضه برق در دوره‌های زمانی مختلف اوج مـصرف را مورد ارزیـابی قـرار خـواهـند داد، در آیـنده نـیز ارزیـابی خـطرپذیری و ریسک حـائز اهـمیت خـواهـد بـود. هـنوز هـم شـرکت‌های بـزرگ تولیدکننده برق (GENCO) دست به مـطالعات تحقیقاتی متعددی می‌زنند و هنوز هـم احـتمال بروز ضرر و زیان ناشی از افت بـار (LOLP)[15] برای ارزیابی کارآیی سیستم مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرد.

در مـجموع، چـند راه بـرای ارزیـابی مـیزان قابلیت اطمینان یک نیروگاه بـرق و نـقش آن در قابلیت اطمینان کل سـیستم تـولید بـرق وجـود دارد. یک راه، محاسبه قابلیت اطمینان یک واحد نمونه (بـه عـنوان مـثال مـحاسبه LOLP و یـا ENS)[16] و سپس مقایسه نتایج به دست آمده با واحد تولیدی مـورد نـظر است. راه دیگـر بـرای محاسبه میزان قابلیت اطمینان یک واحد شـبیه راه اول است؛ اما با این تفاوت که در این روش به جای محاسبه LOLP و یـا ESN از کـمیتی بـا واحد مگاوات استفاده می‌شود. قابلیت تولید بار مؤثر (ELCC)[17] که نام این کمیت است کـاملاً شناخته شده بوده و چندین سال است که بـرای اندازه‌گیری اعتبار ظرفیت به کار مـی‌رود. بـرای ارزیابی و مـقایسه نـیروگاه‌های بـرق بـاید تـوان ELCC هر یک از آنها را اندازه گرفت تا به ایـن ترتیب سهم هر یک از این نـیروگاه‌ها در تأمـین ظرفیت مؤثر کل سیستم مشخص شود. راه دیگر برای مـحاسبه مـیزان قـابلیت سـیستم‌های بـرق مـقایسه یک نـیروگاه بـرق ادواری مـانند یک نیروگاه باد با یک نـیروگاه گـاز است کـه رقـیب نـیروگاه‌های بـادی بـه حسـاب مـی‌آید. بـرای محاسبه میزان قابلیت باید مراحل زیر را طی کرد. ابتدا میزان قابلیت اطمینان سیستم تولید برق کل مـجموعه کـه نـیروگاه گـازی را در بـر مـی‌گیرد مـــحاسبه مـی‌شود. سـپس مـیزان قـابلیت سیستم‌های مختلف کل مجموعه ثبت می‌شود. بعد از آن نیروگاه گازی از محاسبات خارج شده و ظرفیت نیروگاه جایگزین بـادی بـتدریج اضـافه می‌شود. این عمل آنقدر ادامـه پـیدا مـی‌کند تـا قابلیت اطمینان کل مجموعه معادل زمانی شود که نیروگاه گازی در مجموعه مورد محاسبه قرار گرفته است. زمانی که برابری حاصل شد ظرفیت نیروگاه بادی بر حسب مگـاوات مـیزان قـابلیت اطمینان معادل نیروگاه گازی خواهد بود.

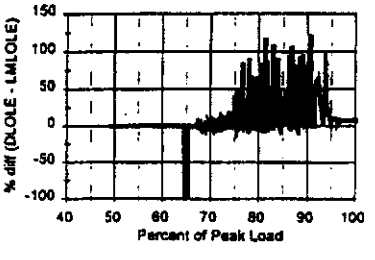
برای نیروگاه‌های بادی نیز مـی‌توان ELCC را بـا اسـتفاده از روش‌هـای اولیـه‌ای کـه بـرای نیروگاه‌های قدیمی مورد استفاده قرار می‌گرفت، حساب کرد. مزیت محاسبه ELCC در این است که در این محاسبات زمانبندی وزش باد و نیز

میزان بار مربوط به هر وضعیت مورد محاسبه قرار می‌گیرد. به عنوان مثال نیروگاه بادی که بخش اعظم تولید برق آن در خارج از دوره زمانی پیک مصرف برق است در مقایسه با نیروگاهی که در خلال اوج مصرف بیشترین میزان تولید برق را دارد، دارای ELCC کمتری است. علاوه بر این، با استفاده از ELCC می‌توان دو یا چند نیروگاه را که دارای میزان قابلیت اطمینان واحدی در شبکه هستند، با یکدیگر مقایسه کرد. اگر چه محاسبات فوق‌الذکر را می‌توان در مدل مربوط به طول مدت بار نیز انجام داد؛ اما نتایج این گونه محاسبات صحیح‌تر است؛ زیرا این گونه محاسبات از زمانبندی صحیح و ساعت به ساعت وضعیت باد و همچنین وضعیت بار شبکه بهره می‌گیرند.

اما باید پذیرفت که برنامه‌های شبیه ساز زمانبندی تولید و مدل‌های قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی نیز نمی‌توانند تعیین کنند که دقیقاً چه موقعی یک نیروگاه بادی توانایی تولید برق مورد انتظار و برنامه‌ریزی شده را ندارد و به این ترتیب از ارائه یک مدل زمانبندی شده برای نیروگاه‌های بادی عاجز هستند.

در نمودار شماره(۲) نتایج حاصل از روش قدیمی محاسبه میزان قابلیت LOLE[18] براساس مدل تجاری با نتایج حاصل از مدل آزمایشی زمانبندی برای محاسبه قابلیت اطمینان مقایسه شده است. این روش در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده ابداع شده است. نمودار (۲) تفاوت موجود را به صورت تابعی از میزان بار برای عرضه برق در ایالت مینسوتا نشان می‌دهد. علاوه بر این از نمودار شماره (۲) می‌توان چنین استنباط کرد که میان نتایج حاصل از مدل سازی LMLOLE یعنی محاسبه قدرت باد به عنوان عامل تغییر دهنده بار و نتایج حاصل از مدل‌سازی DLOLE یعنی محاسبه مستقیم مبتنی بر زمانبندی میزان تولید برق توسط باد اختلاف چشمگیری وجود دارد.

نمودار ۲
مقایسه روش‌های مختلف محاسبه قابلیت اطمینان یک نیروگاه بادی



به موازات افزایش ضرورت و نیاز محاسبات مربوط به قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی، لازم است تا الگوریتم بنیادین قابلیت اطمینان نیز طوری تنظیم شود که نتایج صحیح‌تری در مقایسه با قبل به دست آید. حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا محاسبه ELCC در بازارهای نوین نیز کارایی دارد؟ پاسخ این است که محاسبه خطرپذیری و نقش هر یک از واحدها در تأمین ظرفیت تولید هنوز امری ضروری تلقی می‌شود. اگر محاسبه ELCC روشی غیرضروری محسوب شود روش دیگری جای آن را برای محاسبه کلان ظرفیت و کارآیی واحدهای تولید خواهد گرفت. علاوه بر این سرمایه‌گذاران و شرکت‌های تولید برق برای مقایسه گزینه‌های مختلف تولید برق، ریسک‌ها و نرخ بازگشت هر یک از نیروگاه‌های پیشنهادی نیازمند اطلاعاتی هستند که در این زمینه به آنها کمک کند. نرخ بازگشت هر یک از گزینه‌ها (حداقل تا حدی) بستگی به ظرفیت تولید و ساختار و نوع قراردادهای خرید و فروش برق در بازارهای مربوط دارد. محاسبه ELCC، اطلاعات مهمی در مورد چگونگی عملکرد یک نیروگاه در بافت یک بازار و یا دارایی‌های یک شرکت تولیدکننده برق و نیز خطرات و ریسک‌های موجود ارائه می‌کند.

بنابراین به موازات افزایش اهمیت تجزیه و تحلیل خطرپذیری و ریسک در بازارهای نوین، بر اهمیت محاسبه ELCC نیز افزوده خواهد شد. محاسبه ELCC و یا نسخه‌های مختلف از آن می‌تواند نقش مهمی در تعیین ظرفیت تولید و یا ارزیابی‌های مبتنی بر ریسک نیروگاه‌های بادی داشته باشد. به این ترتیب می‌تواند تعیین کند که آیا یک نیروگاه بادی می‌تواند نیازهای یک بازار روزانه و یا بازارهای ساعتی[19] را برآورده کند یا خیر. از آنجایی که طبیعت بازسازی ساختار بازار برق تکاملی و در حال گذر است، ممکن است ایده اعتبار ظرفیت نیز تا حدی موقتی و گذرا باشد. در این صورت مفید بودن محاسبه ELCC در دراز مدت با شک و تردید همراه خواهد بود.

قابلیت اطمینان سالیانه و تمدید ارزیابی‌های مربوط به انواع ریسک

از آنجایی که سرعت وزش باد سال به سال و حتی ساعت به ساعت دچار تغییرات چشمگیری می‌شود، ارزیابی اعتبار ظرفیت نیروگاه‌ها که مبتنی بر اطلاعات جمع‌آوری شده در طول یک سال (و یا حتی کمتر از یک سال) باشد، قابل اطمینان نخواهد بود. در این بخش از مقاله، تکنیک‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند که می‌توانند در ارزیابی و تخمین این تغییرات به ما یاری برسانند و به این ترتیب خواهیم توانست تا از روش‌های فوق‌الذکر برای ارزیابی عمومی انواع ریسک‌ها بهره بگیریم.

بسیاری از مدل‌های قابلیت اطمینان و هزینه تولید[20] از گزینه مونت کارلو[21] بهره می‌گیرند. این روش برای تخمین بهتر و صحیح‌تر دامنه تولید است که در حالت عادی برای به دست آوردن آن باید از روش‌ها و محاسبات پیچیده و دشواری استفاده کرد. مزیت دیگر روش مونت کارلو این است که ما را قادر می‌سازد تا انواع مختلف توزیع احتمال[22] از قبیل هزینه‌های سیستم و قابلیت اطمینان را تخمین بزنیم. مدل P^+ نیز یک روش جانبی دارد که از ترکیب روش مونت کارلو و روش پیچیده قدیمی به وجود آمده است. در این روش کلیه واحدهای تولید برق به غیر از یک واحد مورد ارزیابی و محاسبات قرار می‌گیرد و وضعیت واحد مزبور نیز بارها توسط روش مونت کارلو مورد نمونه‌برداری قرار می‌گیرد. این روش باعث می‌شود تا بدون تحمل هزینه‌های مربوط به برنامه کامل شبیه‌سازی مونت کارلو، بتوان تأثیر یک واحد تولید برق بر روی کل مجموعه را ارزیابی کرد. مارنی و استراوس در مورد تکنیک فوق‌الذکر در مدل‌های زمانبندی هزینه تولید مباحثات جایی را ارائه کرده‌اند. روش فوق‌الذکر برای مدل‌سازی نیروگاه‌های بادی ایده‌آل است؛ اما متأسفانه برنامه شبیه‌سازی مونت کارلو از یک توزیع احتمال بسیار ساده و ابتدایی نمونه‌برداری می‌کند که به همین دلیل برای نیروگاه‌های بادی مناسب نیست به همین دلیل ما ناگزیریم نمونه‌برداری مبتنی بر احتمالات را از مدل هزینه تولید جدا کنیم. این روش شامل داده‌پردازی‌های متعدد در مورد سرعت باد است که از آنها می‌توان به راحتی برای محاسبه ساعت به ساعت قدرت باد استفاده کرد.

به این ترتیب می‌توان توالی چنین اطلاعاتی را به دست آورد و سپس مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های مدل تولید را اجرا و در نهایت نتایج به دست آمده و این شبیه‌سازی‌ها خلاصه کرد. در روش مونت کارلو مجموعه‌ای از اطلاعات غیر واقعی در مورد باد به دست می‌آید و مدل‌های قابلیت اطمینان و هزینه تولید برای هر یک از این مجموعه اطلاعات قابل اجرا و عملی است. این روش را گاهی اوقات روش

مونت‌کارلو متوالی [23] می‌نامند تا به این ترتیب از روش متداول مونت کارلو که در این مدل‌ها نیز از آنها استفاده می‌شود متمایز باشد. میلیگان به خوبی روش مونت کارلو متوالی را توضیح داده است. این روش بسیار شبیه تکنیک‌هایی است که توسط بیلینتون و چن پیشنهاد شده است. میلیگان از این روش برای داده‌پردازی اطلاعات جمع‌آوری شده طی ۱۳ سال استفاده کرد و نتایج حاصل را با نتایج به دست آمده از روش مونت کارلو که در آن اطلاعات واقعی مورد پردازش قرار گرفته بود، مقایسه کرد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که روش مونت‌کارلو متوالی برای تخمین تغییرات احتمالی در اعتبار ظرفیت بسیار مناسب است؛ اما برآوردهای آن از میزان تغییرات در تولید انرژی تا حدی کمتر ازحد واقعی است. میلیگان و گراهام چارچوب این مدل را با بهره‌گیری از مدل‌های الفین [24] و P^+ گسترش دادند و برای به حداقل رساندن زمان اجرای مدل که برای اجرای کامل برنامه شبیه‌سازی لازم و ضروری است، از تکنیک‌های خاص کاهش زمان استفاده کردند. تحقیقات میلیگان و گراهام تأثیر تغییرات سالیانه وضعیت باد بر روی ELCC، هزینه تولید و برنامه‌ریزی انواع مختلف نیروگاه‌های قدیمی و متداول را مورد ارزیابی و بررسی قرار داد. روش آنها به این ترتیب بود که یک هزار مجموعه اطلاعاتی غیرواقعی ساعت به ساعت در مورد سرعت باد که مشابه اطلاعات واقعی بودند، مورد پردازش قرار دادند. برای هر یک از این مجموعه اطلاعات غیرواقعی، آنها یک مدل شبیه‌سازی تولید را اجرا و سپس ELCC هر یک را محاسبه کردند.

اگر چه این روش بسیار وقت گیر است، اما به کمک آن می‌توان به سؤالات اساسی پیرامون احتمال بروز تغییرات قابل توجه در زمانبندی و چگونگی وضعیت باد در آینده پاسخ داد. در نمودار شماره (۳) توزیع فراوانی [25] یک هزار مدل که مبتنی بر اطلاعات یک نیروگاه بادی به ظرفیت یک صد مگاوات اجرا شده‌اند نشان داده شده است. با مشاهده این نمودار می‌توان فهمید که از هر یک هزار دفعه مدل‌سازی در ۵۰۰ مورد می‌توان انتظار داشت که ELCC نیروگاه باد مورد نظر به ۳۲ الی ۴۰ درصد ظرفیت کاهش یابد.

از همین روش می‌توان برای موارد مشابه استفاده کرد. به عنوان مثال یک شرکت تولید برق می‌تواند از چنین مدلی استفاده کند تا با در نظر گرفتن استراتژی اتخاذ شده و خطای مورد انتظار در مورد پیش‌بینی وضعیت باد، میزان و چگونگی تولید واحدهای تولید برق خود را پیش‌بینی کند. میلیگان و گراهام توانستند از این مدل با موفقیت برای ارزیابی برنامه‌های مختلف تولید و همچنین هزینه‌های مربوط به هر یک، بسته به تغییرات سالیانه وضعیت باد دچار تغییر می‌شوند، استفاده کنند. یکی از نتایج فرعی حاصل از این نوع مدل‌سازی برآورد توزیع احتمال در پارامتر سود است.

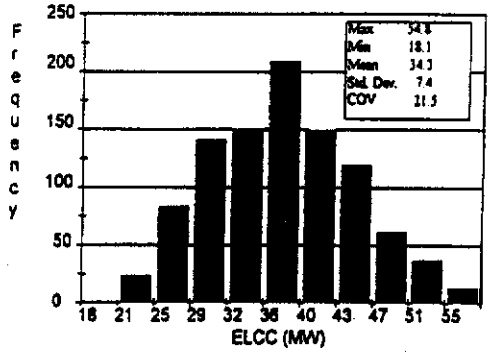
تأثیر پراکندگی جغرافیایی

مطالعات متعددی مسأله پراکندگی جغرافیایی نیروگاه‌های بادی و همچنین فواید جمع‌آوری برق تولید شده توسط آنها را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. مزیت اصلی نصب نیروگاه‌های باد در مناطق مختلف در این است که وقفه‌های به وجود آمده در وزش باد فقط در سطح محلی محدود شده و یک منطقه وسیع جغرافیایی را تحت تأثیر خود قرار نمی‌دهد بنابراین نصب نیروگاه‌های بادی در موقعیت‌های مختلف یک منطقه جغرافیایی باعث می‌شود تا مسائل ناشی از دوره‌ای بودن وزش باد و طبیعت غیرقابل پیش‌بینی این منبع انرژی تا حدی حل شود؛ هر چند که فواید ناشی از گستردگی جغرافیایی توسط مشکلات مربوط به کنترل مناطق و نیروگاه‌های موجود در آنها تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود صاحبان نیروگاه‌های بادی که در بازارهای رقابتی فعالیت می‌کنند این تأثیرات را از نزدیک مورد بررسی قرار دهند و به این نتیجه برسند که برای کاهش ریسک مربوط به کاهش میزان تولید برق و عدم توانایی در عمل کردن به تعهدات و کاهش نوسانات قدرت باد، نیروگاه‌های خود را در مکان‌های مختلف نصب کنند. کاهن تجزیه و تحلیل‌های خود در این مورد را بر اطلاعات جمع‌آوری شده از ایالات کالیفرنیا بنا نهاد. گراب نیز تأثیرات پراکندگی جغرافیایی را در واحدهای تولید برق در انگلستان مورد بررسی قرار داد.

میلیگان و آرتیک روند بهینه‌سازی قابلیت اطمینان را در ایالت مینسوتا مورد بررسی قرار دادند؛ اما بر روی مزیت‌های اقتصادی آن کار نکردند و ارنست تحلیلی کوتاه مدت و بسیار دقیق از اطلاعات به دست آمده در مورد وضعیت باد در آلمان انجام داد. در نهایت میلیگان و فکتور بهینه‌سازی جغرافیایی را با استفاده از دو هدف بهینه‌سازی یعنی قابلیت اطمینان و مزیت اقتصادی مورد ارزیابی قرار دادند. کارشناسان در کلیه مطالعات تحقیقاتی فوق‌الذکر به این نتیجه رسیده‌اند که پراکندگی جغرافیایی نیروگاه‌های بادی دارای مزیت‌های چندی است، البته به شرط آن که برق تولید شده توسط آنها جمع‌آوری و در یک شبکه واحد عرضه شود. اگر چه روش محاسبات در هر یک از این مطالعات با یکدیگر فرق می‌کند؛ اما نتایج حاصل از آنها در فواصل زمانی چند دقیقه تا چند ساعت کاملاً روشن و بی عیب و نقص هستند. از این پس روند تجزیه و تحلیل قدری پیچیده‌تر می‌شود زیرا می‌توان مزیت‌های پراکندگی جغرافیایی نیروگاه‌های بادی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد تا تعداد اهداف بهینه سازی را به حداکثر رساند. آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده و اداره خدمات عمومی ایالت مینسوتا [26] پروژه مشترکی با هدف یافتن فاصله نیروگاه‌های بادی از یکدیگر و نحوه ادغام آنهارا به مورد اجرا گذاشته‌اند تا به این ترتیب قابلیت اطمینان مجموعه برق این ایالت را به حداکثر برسانند. طی مذاکراتی میان مسؤولان ایالت مینسوتا و شرکت Northern States Power قرار شد تا به عنوان بخشی از قرارداد نگهداری زباله‌های اتمی جزیره پریری، هشتصد و بیست و پنج مگاوات ظرفیت نصب شده در نیروگاه‌های بادی جایگزین برق تولید شده توسط نیروگاه‌های هسته‌ای با ظرفیتی مشابه شود. میلیگان و آرتیک از تکنیک جستجو مبتنی بر منطق نادقیق [27] برای یافتن بهترین مکان برای نصب نیروگاه‌های بادی و همچنین فاصله آنها از یکدیگر استفاده کردند. آنها قابلیت اطمینان سیستم تولید برق به صورت مرکب را به عنوان تابعی از پراکندگی جغرافیایی در ایالت مینسوتا مورد ارزیابی قرار دادند تا به این وسیله

نمودار ۳

برآورد تغییرات ELCC نیروگاه بادی



ظرفیت و توان نیروی باد در این ایالت را تعیین کنند. آنها دریافتند که بالاترین سطح قابلیت اطمینان سیستم تولید برق از طریق نصب نیروگاه‌های بادی در مجموعه‌ای از مناطق میسر خواهد شد و به این ترتیب اثر تغییرات ساعت به ساعت نیروی باد بر روی میزان تولید برق به طور چشمگیری کاهش خواهد یافت.

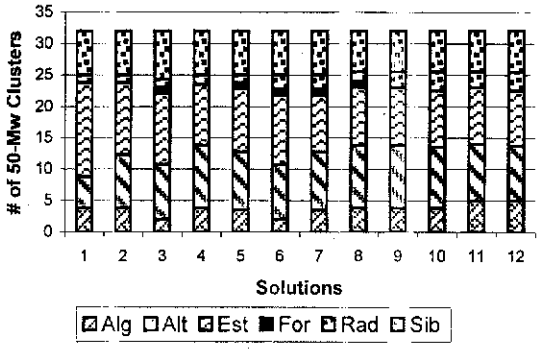
میلیگان و فکتور تحقیقات مشابهی را در ایالت ایوا انجام دادند و نتایج حاصل از این تحقیق، نتایج تحقیقات به عمل آمده در ایالت مینسوتا را تأیید می‌کرد. آنها علاوه بر تکنیک جستجو مبتنی بر منطق نادقیق از الگوریتم تکوینی[28] نیز برای بهینه‌سازی روند تحقیق بهره گرفتند؛ اما مطالعات ایالت ایوا تعداد دوازده نیروگاه بادی را در بر می‌گرفت که مجموع ظرفیت نصب شده آنها ۱۶۰۰ مگاوات بود. مدل میلیگان و فکتور براساس اطلاعات پیش‌بینی شده ساعت به ساعت در سال ۲۰۱۵ به اجرا درآمد. علاوه بر این آنها از اطلاعات مربوط به کلیه واحدهای تولیدی برق و تبادل برق در بازار عمده فروشی ایالت ایوا در اجرای مدل خود استفاده کردند.

برای کاهش مدت زمان اجرای مدل توسط کامپیوتر، آنها حداقل میزان افزایش ظرفیت ممکن در هر نیروگاه بادی را ۵۰ مگاوات در نظر گرفتند. حتی با این عمل نیز حدود ۵×۱۰^{۹} روش مختلف برای توزیع ۱۶۰۰ مگاوات ظرفیت میان ۱۲ نیروگاه بادی به دست آمد. با توجه به تعداد بسیار زیاد راه‌حل‌های به دست آمده برای چگونگی پراکندگی نیروگاه‌های بادی آنها تصمیم گرفتند که راه‌حل‌ها را به چندین دسته تقسیم کنند. هریک از مجموعه راه‌حل‌ها (یا گزینه‌ها) بهترین مکان‌ها و یا تقریباً بهترین مکان‌های ممکن برای نصب نیروگاه‌های بادی را نشان می‌داد. میلیگان و فکتور در تحقیق خود تعریف جدیدی برای واژه «بهترین» ارائه کردند. طبق تعریف آنها بهترین مکان، زمانی به دست می‌آید که هزینه بهره‌برداری از واحدهای تولید برق معمولی و متعارف به حداقل برسد. با اجرای مدل‌های دیگر آنها توانستند نحوه ترکیب و محل قرار گرفتن هر یک از نیروگاه‌ها را به گونه‌ای تعیین کنند که باعث به حداکثر رسیدن قابلیت اطمینان کل مجموعه شود.

نمودار شماره (۴) نتایج حاصل از این تحقیق را نشان می‌دهد. هر یک از ستون‌ها نشان دهنده یک راه‌حل (گزینه) است که خود بیانگر محل قرار گرفتن نیروگاه‌های بادی و ابعاد آنها است. به عنوان مثال ستون سمت چپ نشان می‌دهد که ۴ مجموعه[29] از توربین‌های ۵۰ مگاواتی باید در منطقه (Alg) Algona ، ۵مجموعه توربین در منطقه Alta (Alta) و ۱۳مجموعه توربین در (Est) Estherville و... قرار گیرند. ستون شماره دو ترکیبی از محل قرار گرفتن نیروگاه‌ها و فاصله آنها را نشان می‌دهد که با ستون شماره یک کمی متفاوت است، به این ترتیب که این گزینه پیشنهاد می‌کند نیروگاه‌های بیشتری در منطقه Alta نصب شود و در عوض از ظرفیت تولید منطقه Estherville کاسته شود.

نمودار ۴

گزینه‌های مختلف برای محل نصب و ابعاد نیروگاه‌های بادی در ایالت ایوا بر حسب مزیت اقتصادی



حتی اگر تعداد توربین‌های باد در منطقه Alta و Estherville در دو گزینه با یکدیگر تفاوت کلی داشته باشد مزیت اقتصادی این دو راه حل تفاوت بسیار کمی با یکدیگر خواهد داشت.

هیچ یک از ۱۲ گزینه یا راه حل پیشنهادی مورد قبول مسؤولان قرار نگرفت. این امر به این معنای بود که اگر چه پراکندگی جغرافیایی نیروگاه‌های بادی می‌تواند مزایایی به همراه داشته باشد؛ اما این به آن معنا نیست که نیروگاه‌های دور از هم ضرورتاً مزیت اقتصادی و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش خواهند داد. میلیگان و فکتور راه‌حل‌های دیگری را که فکر می‌کردند به راه حل‌های پیشنهاد شده توسط مدلشان نزدیک باشد مورد ارزیابی و بررسی دقیق قرار دادند. آنها تعداد بسیار زیادی راه حل و یا گزینه برای محل نصب نیروگاه‌های بادی پیدا کردند که مطابق معیارهای آنها به خوبی راه‌حل‌های پیشنهاد شده توسط مدل بود. آنها معتقد بودند که این گزینه‌های متعدد به آنها آزادی عمل لازم را خواهد داد تا محدودیت‌هایی را مد نظر قرار دهند که مدل اجرا شده توسط آنها، این محدودیت را نادیده گرفته بود. بعضی از این محدودیت‌ها عبارت بودند از محدودیت‌های حمل و نقل، استفاده از زمین برای نصب نیروگاه‌ها و سایر مسائل عملیاتی نظیر تأمین ولتاژ و یا ولت آمپراکتیو (RAV) در محل. این مدل‌سازی به آنها اجازه داد تا مزیت‌های ساخت یک نیروگاه با ظرفیت کم را در مکانی که توسط مدل قبلی پیشنهاد نشده بود مورد ارزیابی قرار دهند با این شرط که در یازده نیروگاه دیگر آنها تغییراتی را در ظرفیت تولید در نظر گرفتند. این امر باعث شد تا تصمیم‌گیران، آزادی عمل بیشتری در انتخاب محل قرار گرفتن نیروگاه‌های بادی و همچنین فاصله آنها از یکدیگر و یا به عبارت دیگر پراکندگی جغرافیایی آنها داشته باشند.

سایر مسائل

شبکه‌های مختلف برق سیستم‌های کنترل مناطق مختلف، روش‌های خاصی براساس عملیات روزانه برای ارزیابی اعتبار ظرفیت عملیاتی کلیه واحدهای تولید برق در منطقه خود دارند. ارزیابی و تعیین اعتبار ظرفیت بخشی به این علت است که معلوم شود در خلال یک دوره زمانی معین آیا ظرفیت تولید مورد نیاز در شبکه منطقه موجود است یا خیر. نیروگاه‌های بادی می‌توانند اعتبار ظرفیت عملیاتی مورد نیاز را فراهم کنند البته معمولاً ظرفیت واقعی آنها قدری کمتر از ظرفیت اسمی خواهد بود. از آنجایی که بازارهای برق تحت بازسازی ساختاری قرار خواهند گرفت و رشد شبکه‌های برق سیستم‌های کنترل منطقه‌ای تحت چنین شرایطی خواهد بود بنابراین لازم است تا قوانین ارزیابی سیستم‌های برق مورد تجدید نظر قرار گیرد. این قوانین باید کلیه منابع انرژی را بدون پیش داوری و تعصب مورد ارزیابی قرار دهند و مشکلاتی را که ممکن است طبیعت ناپایدار و دوره‌ای نیروی باد و نیروگاه‌های بادی به وجود آورند را نیز مورد شناسایی قرار دهند.

در تحقیقی که میلیگان و فکتور در ایالت ایوا

انجام دادند از روش محاسبه اعتبار ظرفیت که توسط شبکه MAPP[30] ابداع شده است استفاده کردند. این شبکه یکی از دو شبکه‌ای است که نیروگاه‌های بادی را در برنامه کاری خود قرار داده است. با به کارگیری این روش در ۱۲ گزینه به دست آمده، میانگین اعتبار ظرفیت سالیانه معادل ۴۷ درصد ظرفیت اسمی مجموعه نیروگاه‌های بادی تعیین شد. در این محاسبات تغییرات ماهانه وضعیت باد نیز منظور شده است. روش MAPP مبتنی بر تعیین میانگین میزان تولید یک نیروگاه در خلال ۴ ساعت اوج مصرف برق ماهیانه است. در روش‌های محاسباتی که براساس LOLP اجرا می‌شود مدت زمان مورد سنجش طولانی‌تر است.

نیروگاه‌های بادی باید در مکان‌هایی نصب شوند که دارای منابع باد خوبی باشد. متأسفانه بیشتر این مکان‌ها دور از بازارهای مصرف و یا شبکه‌های انتقال نیروست. اگر خط انتقال نیرو در نزدیکی یک نیروگاه بادی باشد؛ اما خطی که لازم است برق را از این نیروگا بادی منتقل کند در ساعات اوج تولید نیروگاه دارای حداکثر بار ممکن باشد و یا به عبارت دیگر ظرفیت اضافی برای انتقال برق تولید شده توسط نیروگاه را نداشته باشد مشکل انتقال برق پیچیده‌تر خواهد شد. از آنجایی که فاکتور ظرفیت تولید سالیانه نیروگاه‌های بادی ۲۰ الی ۴۰ درصد است هزینه ساخت خط انتقال نیرو برای هر کیلووات ساعت بسیار بیشتر از نیروگاه‌های معمولی خواهد شد.

هنگامی که یک نیروگاه بادی برق تولید شده را وارد شبکه می‌کند، خط انتقال نیرو باید ظرفیت گنجانش و انتقال این مقدار برق را داشته باشد که این زمان معمولاً هنگامی است که نیروی باد در دسترس باشد و توربین‌ها شروع به کار می‌کنند. این امر باعث پیچیده‌تر شدن مشکل نیروگاه‌های بادی شده است. هرچند برای یک نیروگاه بادی که فقط در ساعات محدودی از شبانه روز میزان تولید آن به حداکثر می‌رسد بهترین راه این است که به جای صرف هزینه‌های کلان برای ارتقای ظرفیت خط انتقال نیرو از بخشی از برق تولید شده صرف نظر کرد.

بازنگری و وضع قوانین جدید انتقال نیرو و همچنین چگونگی دسترسی به خطوط انتقال نیرو نقش مهمی را در توسعه نیروگاه‌های بادی در هزاره سوم ایفا می‌کنند. این قوانین نباید به طور مستقیم و غیرمستقیم مانع از ورود نیروگاه‌های بادی به شبکه تولید برق شوند و باید طوری وضع شوند که منابع مالی به طور منصفانه

نصب نیروگاه‌های بادی در موقعیت‌های مختلف یک منطقه جغرافیایی باعث می‌شود تا مسائل ناشی از دوره‌ای بودن وزش باد و طبیعت غیرقابل پیش‌بینی این منبع انرژی تا حدی حل شود؛ هر چند که فواید ناشی از گستردگی جغرافیایی توسط مشکلات مربوط به کنترل مناطق و نیروگاه‌های موجود در آنها تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد

به تمامی انواع نیروگاه‌ها اختصاص یابد. قوانین تنبیهی[31] معمولاً در بازارهای خدمات جنبی و پشتیبانی مطلوب نیستند بلکه در عوض باید از قوانین جبرانی[32] استفاده کرد تا به این وسیله واحد تولیدکننده برق بتواند آن بخش از معایب خود در امر تولید و عرضه برق را اصلاح و سیستم بهتری را جایگزین آن کند؛ اما تنبیهاتی که متوجه عملکرد غلط واحدهای تولید برق و سرپیچی آنها از دستورالعمل‌های مصوبه می‌شود قابل قبول و مطلوب هستند. کمیته ملی هماهنگی نیروی باد[33] در ایالت متحده عهده‌دار وظیفه بررسی و تحلیل مسائلی از این دست و سایر مسائل مربوط به انتقال نیروست. نتایج عملکرد این کمیته در آدرس:

www.national wind.org/pubs

در دسترس علاقمندان قرار دارد.

البته هنوز چندین سؤال در مورد اثرات وقفه در تولید برق توسط نیروگاه‌های بادی وجود دارد که بدون جواب باقی مانده‌اند. برخی از این سؤالات عبارتند از: چه تعداد وقفه در یک یا چند ثانیه ممکن است در یک نیروگاه بادی اتفاق بیفتد؟ اثرات این نوع نوسانات کوتاه مدت به تنظیم فرکانس برق و همچنین منابع جایگزین برق چه خواهد بود؟ ارنست با استفاده از اطلاعات بسیار دقیق به دست آمده از برنامه نیروگاه بادی ۲۵۰ مگاواتی در آلمان سعی کرد تا این سؤالات را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. او اثرات بروز وقفه در تعداد کمی از توربین‌ها را بر روی توزیع برق، بار شبکه و همچنین منابع ذخیره برق مورد بررسی قرار داد طی این مطالعات ارنست دریافت که وجود تعداد زیادی از توربین‌های بادی که در منطقه وسیعی پراکنده شده باشند باعث کاهش بسیاری از مشکلات مربوط به این نوسانات خواهد شد. وی همچنین متوجه شد که فاصله میان توربین‌های بادی سبب خواهد شد که در فواصل زمانی کوتاه میزان تولید هر یک از توربین‌ها با دیگری اختلاف زیادی وجود داشته باشد و همین امر باعث ایجاد تنوع میزان تولید در میان توربین‌ها خواهد شد. آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده در حال حاضر سرگرم جمع‌آوری اطلاعات در دوره‌های زمانی یک ثانیه از یک نیروگاه بادی در میدوست است و قصد دارد تا تجزیه و تحلیل‌های دقیقی را در مورد نوسانات برق و اثرات آن بر روی سیستم‌های تولید برق جانبی به عمل آورد. پروژه دیگری که توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده در حال اجرا است طرح آزمایشی مدل زمانبندی تعیین قابلیت اطمینان است. کارشناسان این آزمایشگاه قصد دارند این‌گونه محاسبات راکه بر مبنای قابلیت اطمینان هستند اساس کار خود برای تقسیم بار شبکه در میان کلیه نیروگاه‌های بادی قرار دهند.

این تقسیم‌بندی براساس ظرفیت هر کدام از نیروگاه‌ها و همچنین کثرت توان تولید برق هر یک از نیروگاه‌ها است.

عواملی چون تعداد زیاد توربین‌های بادی و همچنین پراکندگی جغرافیایی آنها اثر بسیار چشمگیری در کاهش عواقب ناشی از بروز وقفه در وزش باد و نوسانات تولید برق دارد؛ اما هنوز به خوبی معلوم نشده است که این عوامل در نقاط دیگر جهان تا چه حد می‌توانند اثر بخش باشند. از آنجایی که صاحبان و گردانندگان نیروگاه‌های برق درصدد آن هستند تا با متنوع‌سازی نیروگاه‌های خود، میزان احتمال ریسک را کاهش دهند، بنابراین به نظر می‌رسد که ایجاد و نصب نیروگاه‌های بادی در نقاط مختلف و به صورت پراکنده می‌تواند نقش بسیار مهمی در تصمیم‌گیری‌های آنها داشته باشد. پراکندگی جغرافیای نیروگاه‌های بادی خطر افت ناگهانی نیروی باد را کاهش می‌دهد و خطاهای

مربوط به پیش‌بینی وضعیت باد را تا حد زیادی جبران می‌کند. تولید بدون وقفه برق توسط مجموعه نیروگاه‌های بادی عمل تقسیم بارمیان نیروگاه‌ها و سایر عوامل عملیاتی را تسهیل می‌کند.

علاوه بر این، لازم است تا نقش و اثر نیروگاه‌های بادی بر نحوه و چگونگی اداره منابع و ذخایر برق جایگزین و خدمات جانبی بدرستی مورد ارزیابی قرار گیرد. در مواقعی که مقدار برق وارد شده به شبکه توسط نیروگاه بادی کم است نوسانات موجود در میزان تولید نیروگاه بادی به مراتب کمتر از میزان تولید یک واحد تولید برق در کل شبکه است. در حقیقت نیروگاه‌های برق هیچ‌گونه کنترلی بر میزان بار گرفته شده از نیروگاه‌های بادی ندارند و فقط کارهای خود را براساس پیش‌بینی‌های به عمل آمده در مورد هوا، وضعیت باد در روزهای هفته و سایر عوامل تنظیم می‌کنند. اگر چه پیش‌بینی وضعیت باد و تغییرات و نوسانات تولید برق موارد جدیدی برای گردانندگان شبکه‌های برق به شمار می‌آیند؛ اما به نظر می‌رسد که این مسائل ادامه و دنباله همان مسایل قدیمی باشند که کارشناسان نیروگاه‌ها و شبکه‌های برق با آنها از دیرباز آشنایی دارند.

خلاصه

ما با ترکیب تجربیات روزافزون خود در مورد نیروگاه‌های بادی با نتایج حاصل از اجرای مدل‌های مختلف و با بهره‌گیری از روش‌ها و تکنیک‌های متعدد، توانستیم بسیاری از مسائل مربوط به استفاده وسیع و کلان نیروگاه‌های بادی را در بازارهای تحت کنترل دولت مورد بررسی قرار دهیم. به موازات استفاده روزافزون از انرژی باد، درک و فهم ما از مسائل مربوط به نیروگاه‌های بادی جنبه عملی و تجربی بیشتری پیدا خواهد کرد و احداث نیروگاه‌های جدید بادی دامنه تجربه و دید ما را وسیع‌تر خواهد کرد. بسیاری از مسائل دیگر نیز به موازات حرکت سیستم‌های برق به سمت بازارهای رقابتی‌تر مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

از دیر باز ما می‌دانیم که نیروگاه‌های بادی از لحاظ تأمین انرژی، ظرفیت تولید برق و میزان آلایندگی برای ما دارای ارزش هستند. از آنجایی که صنعت تولید برق وارد عصری می‌شود که مملو از خطر پذیری و ریسک است، بنابراین شرکت‌های برق لازم است تا به خوبی از انواع خطرها و ریسک‌هایی که بازارهای جدید پیش پای آنها می‌گذارند آگاه باشند. بهره‌گیری وسیع و کلان از نیروگاه‌های بادی از طرفی باعث بروز بعضی از ریسک‌ها می‌شود که از آن جمله می‌توان به عدم دسترسی به جریان باد در مواقعی که به برق نیروگاه‌های بادی نیاز است اشاره کرد و از طرف دیگر باعث کاهش احتمال بروز ریسک می‌شود، به این ترتیب که استفاده از نیروی باد ریسک افزایش هزینه‌های سوخت در آینده و همچنین ریسک قوانین سخت‌تر و محدودیت‌های بیشتر در مورد آلایندگی نیروگاه‌ها را کاهش می‌دهد. البته بعضی از ریسک‌های مربوط به انرژی باد را می‌توان با تعیین محل مناسب برای نصب نیروگاه‌ها و همچنین پراکندگی جغرافیایی آنها به حداقل رساند. تأثیر این عوامل در رفع مشکلات مربوط به نوسانات تولید برق در اطلاعات بسیار دقیق و ساعت به ساعت مطالعات و مدل‌سازی‌ها ثبت شده است. استفاده از مدل‌سازی‌ها و روش‌های تجزیه و تحلیل موجود برای سایر نیروگاه‌ها نیز مفید است. سایر ریسک‌های مربوط به نیروگاه‌های بادی را نیز می‌توان باکمک پیش‌بینی صحیح وضعیت باد به حداقل رساند.

انتقال برق نقش بسیار مهمی در آینده توسعه نیروی باد خواهد داشت. باوجود تکامل و تحول قوانین و بازارهای برق و به وجود آمدن بازارهای نوین در جهان، بسیاری از مسائل در مورد تخصیص هزینه‌ها، مشوق‌های مالی و اقتصادی، سیستم‌های انتقال برق کارآمد و بی‌عیب و نقص و قوانین و مقررات کارآمد در مناطق مختلف هنوز بدون پاسخ مانده است. برای پیروزی در بازارهای رقابتی نوین لازم است تا کلیه نیروگاه‌های برق صرف‌نظر از نوع فناوری که در آنها استفاده می‌شود به طور یکسان به سیستم انتقال برق دسترسی داشته باشند علاوه بر موارد فوق‌الذکر تعداد زیادی از مسائل مهم وجود دارند که نقش بسیار مهمی در تعیین سرنوشت نیروگاه‌های بادی دربازارهای نوین دارند و باید به آنها پرداخته شود. از جمله این مسائل می‌توان به قوانین و مقررات مربوط به بازارهای نوین، قوانین مربوط به شبکه‌های برق، نحوه عرضه برق به شبکه و روش‌های مربوط اشاره کرد. میزان قدرتی که تولیدکنندگان عمده برق در بازار می‌توانند به دست آورند نیز نقش مهمی در بهره‌برداری کلان از نیروگاه‌های بادی در بازارهای نوین خواهد داشت.

پی‌نوشت:

1- Financial Option theory
2- International Power Plants
3- Utility
4- Natinal Renewable Energy Laboratory
5- day-ahead markets
6- Miligan and Miller
7- california Energy Commission
8- West Cost
9- High Plains
10- effective capacity
11- Capacity Creddit
12- Spinning reserves
13- Balancing and settlement code mechanism
14- The Electric Power Research Institute
15- Loss of Load Probability
16- Expected Energy not Served
17- Effective Load Carrying Capacity
18- Loss of Lead Expectation
19- Hour-ahead Market
20- Production- Cost
21- Monte Carlo Option
این عبارت برگرفته از Monte Carlo Methods یا روش‌های مونت‌کارلو است که برای کشف خصوصیات نمونه کوچکی از برآوردکننده اقتصادسنجی در یک الگوی فرضی اقتصادی دارای پارامترهای معلوم که برای تعیین داده‌های ساختگی یا مجازی با خصوصیات معین مورد استفاده قرار می‌گیرد (مترجم).
22- Probability Distribution
23- Sequential Monte Carlo
24- Elfin
25- Frequency Distribution
26- The Minesota Department of Public Service
27- Fuzzy logic
28- Genetic Algorithm
29- Cluster
30- Mid -Continent Area Power Pool
31- Penalty -based Rules
32- Make -up Rules
33- The National Wind Coordinating Committee

■