

ارائه مدل نوین آماری برای پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد

محمد منفرد^{*}، حسن رستگار^{*} و ارسطو صادقیان^{**}

^{*} دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)

^{**} دفتر انرژی باد، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)

واژه‌های کلیدی: مدل کردن، پیش‌بینی، سرعت و جهت باد، آمار

چکیده

پیش‌بینی پارامترهای باد، برای استفاده بهینه از سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ضروری است. در این مقاله، با استفاده از روشی آماری، مدل جدیدی برای پیش‌بینی سرعت و جهت باد ارائه شده است. ایده‌های مشابهی، قبلاً برای بدست آوردن چرخه‌های حرکت اتوموبیل‌ها و الگوی آب و هوایی ارائه شده‌اند. روش ارائه شده در این مقاله، قابل استفاده در مطالعات طراحی و شبیه‌سازی توربین‌های بادی و بطور کلی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی است. در این مطالعه از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد، برای سه سایت مختلف در ایران بهره برده شده است. ایده اولیه آنگونه متحول و اصلاح گشته است تا توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد را، به بهترین نحو ممکن بیابد. مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل ارائه شده و سایر مدل‌های موجود انجام گرفته است که این مقایسه نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی در روش اخیر بسیار بیشتر است.

۱- مقدمه:

یافتن منابع جدید انرژی، از مهمترین دغدغه‌های بشر در قرن حاضر می‌باشد. با افزایش تقاضا برای منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی و مسائل مربوط به آن نیز اخیراً مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند. بر طبق پیش‌بینی‌ها، استفاده از انرژی باد، بیشترین پیشرفت را در بین تمامی منابع انرژی خواهد داشت [۱]. غیر قابل پیش‌بینی بودن پارامترهای باد، بزرگترین ضعف آن به عنوان یک منبع انرژی است. توان تولیدی هر سیستم تبدیل انرژی بادی، به سرعت و جهت وزش باد بستگی دارد، لذا هرگونه تلاشی برای پیش‌بینی توان تولیدی بوسیله آنها، نیازمند به آگاهی از این دو پارامتر است؛ در نتیجه توانایی پیش‌بینی سرعت و جهت وزش باد، الزامی است. از جمله سایر مزایای تخمین پارامترهای باد، توانایی کنترل و تنظیم توربین بادی برای استحصال حداکثر توان ممکن از باد وزشی است. بعلاوه در صورتیکه عملکرد توربین و سیستم الکتریکی نیروگاه بادی، با پیش‌بینی دقیق تغییرات سرعت و جهت باد، کنترل موثری شوند، راندمان تولید توان الکتریکی و طول عمر تجهیزات تا حد بسیار چشمگیری افزایش می‌یابد و این

بر روش‌های هوش مصنوعی^۲ می‌باشند. امروزه روش‌های پیش‌بینی متعددی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی برای مدل کردن سرعت باد، بعنوان یک پدیده فیزیکی کاملاً غیرخطی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا مقدار سرعت باد در چند گام زمانی بعدی را پیش‌بینی کنند که بعضی نیز به نتایج مناسبتری نسبت به روش‌های قبلی دست یافته‌اند [۷، ۱]. در کلیه روش‌های تشریح شده، خطای پیش‌بینی‌ها، با بزرگ شدن بازه زمانی پیش‌بینی، افزایش یافته و به سرعت از واقعیت فاصله می‌گیرند. این در صورتی است که پیش‌بینی بلند مدت پارامترهای باد، از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است. در اختیار داشتن الگوی بادی هر سایت، در مراحل مکان‌یابی و طراحی و ساخت، پیش‌بینی توان قابل استحصال از هر سایت، مسائل مربوط به تعیین نوع توربین و تجهیزات، طراحی استراتژی‌ها و ادوات کنترلی مناسب هر سایت و برنامه‌ریزی زمانبندی‌های سوئیچ بین حالات عملکردی مختلف را میسر می‌سازد. در حین بهره‌برداری نیز، امکان استفاده موثر از منابع انرژی بادی در دیسپاچینگ توان سیستم قدرت را فراهم کرده و هزینه‌ها را بنحو موثری کاهش می‌دهد.

تاکنون چندین مدل برای سرعت باد ارائه شده‌اند که معتبرترین آنها مبتنی بر کارهای Van der Hoven و Von Karman هستند. مدل Van der Hoven، الگویی برای تغییرات سرعت باد ارائه می‌دهد که کاملاً عمومی است و مولفه اغتشاشی^۳ بصورت یک فرآیند کاملاً تصادفی مدل شده است [۸]؛ حال آنکه الگوی Von Karman، وابسته به مقادیر سرعت میانگین، انحراف معیار و طول اغتشاش^۴ سایت مورد مطالعه می‌باشد [۹]. مرجع [۱۰] این دو روش را با یکدیگر مقایسه کرده و هر کدام را به تنهایی ناکارآمد دانسته و در نهایت از ترکیب این دو مدل، الگوی جدیدی ارائه داده که ما آنرا LBM^۵ خواهیم نامید و مدعی است که عملکرد بهتری در

پیش‌بینی‌ها، در سیستم‌های هایبرید بادی-دیزلی، برای طراحی کنترلرهای لازم برای بهره‌برداری از این سیستم‌ها ضروری است [۳، ۱]. پیش‌بینی سرعت باد در بازه‌های زمانی طولانی، به مدیریت شبکه برق این امکان را می‌دهد تا با برنامه‌ریزی صحیح، از حداکثر ظرفیت منابع انرژی بادی در دسترس بهره‌برده و میزان انرژی ذخیره مورد نیاز را کاهش دهد که خود سبب افزایش قابلیت اطمینان در شبکه و کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ها می‌گردد. افزایش سهم مزارع بادی در کل تولید برق شبکه‌های بزرگ، باعث شده تا در محاسبات اقتصادی مربوط به پنخس بار، نقش این منابع نیز با توجه به پیش‌بینی‌هایی که از توان تولیدی آنها می‌شود، لحاظ گردد [۵، ۱]. با توجه به ضروریات و منافعی که به آنها اشاره شد، تلاش‌های فراوانی برای پیش‌بینی پارامترهای باد در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و تا حدودی میان مدت، انجام گرفته است که به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛ دسته اول، بر تکنیک‌های آماری استوارند و شامل روش‌های Persistence و NWP^۱ می‌باشند. روش اول که مدل سری زمانی نیز نامیده می‌شود، ساده‌ترین روشی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض اصلی در این روش، آن است که اندازه سرعت باد در گام بعدی، از روی داده‌های سرعت باد قبلی، با استفاده از روش‌های آماری همچون حداقل‌سازی میانگین مجذور خطا، قابل پیش‌بینی است و فراگیرترین آنها ARMA است [۶، ۴]. پیش‌بینی‌ها در روش NWP، با استفاده از حجم وسیع داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی و مدل‌های بسیار بزرگ و پیچیده کامپیوتری که برای تغییرات اتمسفریک و آب و هوایی بدست آمده‌اند، صورت می‌پذیرد. این مدل‌ها، توسط سازمان‌های هواشناسی ملی، مورد استفاده هستند. NWPها علاوه بر سرعت، قادر به پیش‌بینی جهت باد نیز می‌باشند. به سبب حجم داده‌های ورودی مورد نیاز بسیار زیاد و حجم بالای پردازش‌ها، استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های کوتاه مدت میسر نیست [۴]. دسته دوم، مبتنی

2. Artificial Intelligence Methods
3. Turbulence Component
4. Turbulence Length
5. Large Band Model

1. Numerical Weather Prediction

پیش‌بینی‌های دقیقی از سرعت باد داشته باشیم. بعلاوه، مولفه اغتشاشی نیز به روش مناسبی به الگو افزوده شده است. همچنین ارائه الگوی مناسب برای جهت باد که روش‌های قبلی فاقد این توانایی هستند نیز از مزایای روش پیشنهادی است. الگوی حاصل از روش ارائه شده در این مقاله، با سایر مدل‌های متداول برای سرعت باد مقایسه شده و نتایج، برتری چشمگیری را نشان می‌دهند.

۲- تشریح روش ارائه شده:

هدف اصلی این مقاله این است تا دوره زمانی کوچکی، مثلا یک روز را به عنوان نماینده یک دوره زمانی طولانی‌تر، مثلا یک ماه، بدست آورد. ایده مشابهی بوسیله زادپور و گلشن [۱۲]، با هدف شبیه‌سازی انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار گرفته است. در کار آنها، پیشنهاد شده که می‌توان برای هر ماه تابستان، یک روز را به عنوان نماینده انتخاب کرد. بر این اساس، "روز نمونه، روزی است که اختلاف بین پارامترهایش، دمای حباب‌های خشک و تر، با مقادیر متناظر کل جامعه آماری را حداقل کند" [۱۲]. در واقع، کل فصل گرما به چندین ماه تقسیم شده و هر ماه بوسیله یک روز نمایندگی می‌شود. این کاملاً مشابه تقسیم‌بندی ترافیک یک شهر، بر اساس مناطق جغرافیایی، به چندین بخش و یافتن یک میکروتریپ به عنوان نماینده نحوه ترافیک در هر کدام از این بخش‌های جغرافیایی است. این ایده برای تعیین چرخه‌های حرکت اتوموبیل‌ها در مناطق شهری استفاده شده است [۱۱]. در این مقاله، پیشنهاد می‌شود که داده‌های سرعت و جهت باد در بازه‌ای از زمان، می‌تواند داده‌های سرعت و جهت باد را در یک بازه زمانی بزرگتر، به طرز موثری نمایندگی کنند. در ادامه، مشخص خواهد شد که یک روز (بازه زمانی ۲۴ ساعته)، کاندید مناسبی برای طول بازه زمانی نمونه خواهد بود. بعلاوه، نشان خواهیم داد که برای بازه زمانی که طول آن ۱۰ روز باشد، بهترین و موثرترین روز نمونه را می‌توان بدست آورد. لذا به طرز مشابهی با آنچه برای

پیش‌بینی و مدل کردن سرعت باد، هم در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و هم بازه‌های زمانی بلند مدت دارد. کاری که در این مقاله برای مدلسازی پارامترهای باد، یعنی توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت انجام شده است، قادر به پاسخگویی کلیه نیازهای مربوط به پیش‌بینی باد می‌باشد. علاوه بر این، امروزه استفاده از شبیه‌سازهای توربین‌های بادی^۱ در مطالعات مربوط به انرژی باد مطرح شده است. جزء اساسی این شبیه‌سازها، شبیه‌ساز تغییرات سرعت باد^۲ است که نماینده الگوی تغییرات باد در منبع بادی مورد مطالعه است و نقش بسیار مهمی در صحت عملکرد و نتایج حاصل از این شبیه‌سازهای توربین‌های بادی دارد [۱۰]. مدلی که در این مقاله ارائه شده است، بصورت سری زمانی در بازه‌های زمانی بسیار طولانی و با گامهای بسیار کوتاه، نماینده واقعی منبع بادی مورد مطالعه بوده و ورودی قابل اطمینانی برای سیستم‌های شبیه‌ساز توربین‌های بادی است. در روش ارائه شده در این مقاله، به کمک تکنیکی آماری و با استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد در هر سایت معین، الگوی دقیقی برای سرعت باد در آن سایت بدست می‌آید. اصل این روش، در ابتدا، برای استخراج چرخه‌های حرکت اتوموبیل‌ها^۳، در مناطق پرازدحام شهری، از روی میکروتریپ‌ها^۴، مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. سپس بوسیله زادپور و گلشن برای بدست آوردن الگوهای آب و هوایی به کار رفت [۱۲]. این الگوی آب و هوایی، برای طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده چند مرحله‌ای، بسیار موثر واقع شد. در روشی که در این مقاله ارائه شده است، تمرکز بر روی یک سایت و استفاده موثر از داده‌های ثبت شده قبلی است تا با روشی ساده و به طرز بسیار موثرتری از روش‌های قبلی از داده‌های در اختیار استفاده کنیم و الگوی بسیار دقیقتری برای سرعت باد ارائه دهیم تا هم در بازه‌های زمانی کوتاه و هم بازه‌های زمانی متوسط و بلند،

1. Real Time Wind Turbine Simulator
2. Wind Speed Generator
3. Car Driving Cycles
4. Micro-trip

سایت، داده‌های سرعت باد، دارای نوسانات شدید و شکل توزیع پراکنده‌ای هستند، بعلاوه شرایط هوای ساکن نیز وجود دارد؛ یعنی سرعت باد در لحظاتی از طول روز نزدیک صفر است که همه این عوامل کار پیش‌بینی را دشوارتر می‌کنند. از نظر جهت نیز، باد با پراکندگی زیادی به سمت شمال غربی می‌وزد. از اطلاعات سرعت و جهت باد در ماه مرداد سالهای ۱۳۸۴-۱۳۸۱ که از طریق دفتر انرژی باد سازمان انرژی‌های نو ایران در اختیار قرار گرفته است، استفاده می‌کنیم؛ زیرا اولاً این اطلاعات برای این سایت بطور کامل و دقیق در اختیار هستند و از سوی دیگر به سبب وجود شرایط نامساعد جوی، همچون بارش برف و باران، کاهش شدید دمای هوا و یخ‌زدگی و سایر عوامل جوی، انحرافات در اندازه‌گیری‌های فصول بهار، پاییز و زمستان وجود دارند.

۴- چگونگی انتخاب کوچکترین واحد، واحد نمونه^۱ و طول بازه‌ها^۲:

همانگونه که قبلاً بیان شد، انتخاب هوشمندانه و مناسب کوچکترین واحد و طول بازه‌ها ضروری است. واحد نمونه، برای نمایندگی ویژگی‌های هر بازه تعیین خواهد شد. لذا در ادامه، ابتدا کوچکترین واحد و سپس طول بازه‌ها را با روشی بدون انتخاب خواهیم کرد. شکل (۱)، تغییرات سرعت و جهت باد را برای سایت مورد مطالعه، در چهار روز اول ماه مرداد در سالهای ۱۳۸۴-۱۳۸۲ نشان می‌دهد. واضح است که می‌توان الگوی منظم روزانه را در روزهای متوالی هر سال و روزهای مشابه در سالهای مختلف تشخیص داد. همچنین برای سایر ماه‌ها نیز، این الگو، به وضوح، قابل تشخیص است. لذا کوچکترین واحدی که برای اعمال روش خود برمی‌گزینیم، الگوی روزانه است و همانطور که خواهیم دید، از بین روزهای هر بازه، روزی را بعنوان روز نمونه^۳ بدست می‌آوریم.

شبه‌سازی انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار گرفت، روز نمونه برای بازه ۱۰ روزه اینگونه تعریف می‌شود که: روز نمونه، روزی است که اختلاف بین پارامترهایش، که سرعت و جهت باد هستند، با مقادیر متناظر کل جامعه آماری را حداقل کند.

برای تعیین روز نمونه در هر بازه زمانی، نیاز به معیار مناسبی برای انتخاب داریم: پارامتری که مولفین آنرا ZM می‌نامند و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$ZM_i = \frac{1}{2} \left(|\bar{d}_{rel,i} - 1| - |\bar{S}_{rel,i} - 1| \right) \quad (1)$$

که در آن:

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{k=1}^N d_{i,k}}{N} \quad \bar{S}_i = \frac{\sum_{k=1}^N S_{i,k}}{N}$$

$$\bar{d}_{rel,i} = \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{total}} \quad \bar{S}_{rel,i} = \frac{\bar{S}_i}{\bar{S}_{total}}$$

$$\bar{d}_{total} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N d_{i,k}}{N \times M} \quad \bar{S}_{total} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N S_{i,k}}{N \times M}$$

و:

N : تعداد کل اندازه‌گیری‌ها در یک روز

M : تعداد کل روزها

d : جهت باد (درجه)

S : سرعت باد (متر بر ثانیه)

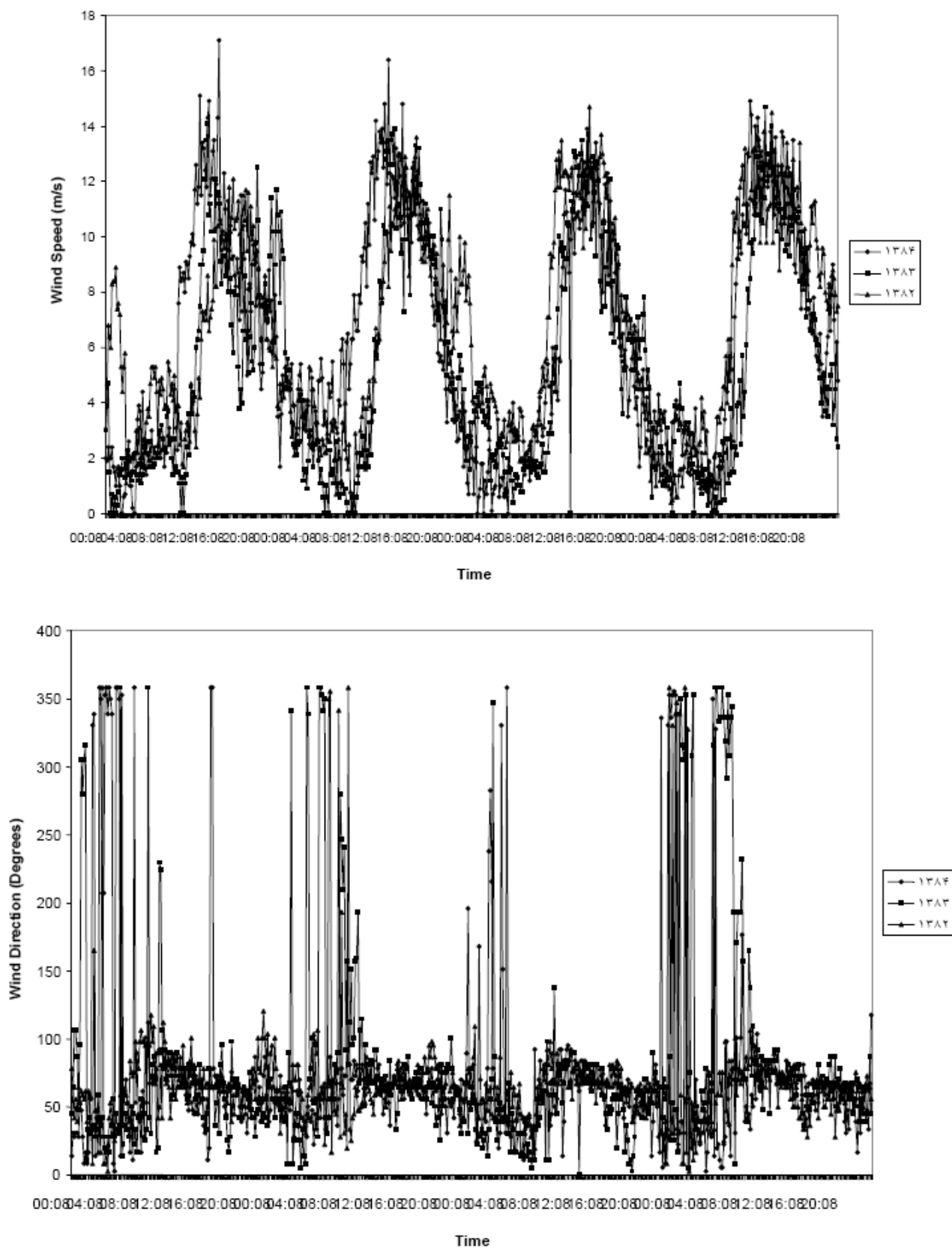
روز نمونه، روزی است که برای آن مقدار پارامتر ZM، حداقل شود.

۳- معرفی سایت مورد مطالعه:

سایت بادی رستم‌آباد که در شمال ایران واقع است، برای بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده و مقایسه نتایج با روش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های جهت و سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری و در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در دسترس می‌باشند. در این

1. Representative unit
2. Time Spans
3. Representative day

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱: تغییرات سرعت و جهت باد، رستم‌آباد، چهار روز اول ماه مرداد در سالهای ۱۳۸۲-۱۳۸۴

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۱: ZM_{min} و روز نمونه مربوطه

طول بازه (روز)	روز نمونه فقط برای جهت	ZM_{min} فقط برای جهت	روز نمونه فقط برای سرعت	ZM_{min} فقط برای سرعت	روز نمونه برای سرعت و جهت	ZM_{min} برای سرعت و جهت
۲	۲ مرداد ۸۲	0.03992	۱ مرداد ۸۱	0.007268	۱ مرداد ۸۱	0.02673
۴	۲ مرداد ۸۲	0.004771	۳ مرداد ۸۴	0.003714	۱ مرداد ۸۱	0.01584
۵	۴ مرداد ۸۳	0.01048	۱ مرداد ۸۴	0.01539	۱ مرداد ۸۱	0.03983
۶	۴ مرداد ۸۳	0.006622	۱ مرداد ۸۴	0.002799	۱ مرداد ۸۱	0.0286
۷	۲ مرداد ۸۲	0.008699	۱ مرداد ۸۱	0.005432	۱ مرداد ۸۱	0.01031
۸	۲ مرداد ۸۲	3.62E-05	۸ مرداد ۸۴	0.00107	۸ مرداد ۸۴	0.008902
۹	۱ مرداد ۸۱	0.003393	۴ مرداد ۸۱	0.001584	۸ مرداد ۸۴	0.008002
۱۰	۱ مرداد ۸۱	0.001341	۸ مرداد ۸۴	0.003065	۱ مرداد ۸۱	0.005989
۱۱	۲ مرداد ۸۲	0.002085	۴ مرداد ۸۲	0.003063	۱ مرداد ۸۱	0.004283
۱۲	۹ مرداد ۸۱	0.003444	۱ مرداد ۸۱	0.000686	۱ مرداد ۸۱	0.008202
۱۳	۱۱ مرداد ۸۲	0.002669	۱۱ مرداد ۸۴	0.003826	۱ مرداد ۸۱	0.007253
۱۴	۱۱ مرداد ۸۲	0.002677	۱۱ مرداد ۸۴	0.003665	۱ مرداد ۸۱	0.007377
۱۵	۱۱ مرداد ۸۲	0.002001	۱۱ مرداد ۸۴	0.003716	۱ مرداد ۸۱	0.00698

بخش مربوط به تشریح روش نیز آمد، بازه زمانی که دارای کوچکترین مقدار برای ZM_{min} باشد، دارای طول بهینه است. همانطور که از نتایج مقایسه کمی در جدول (۱) برمی‌آید، کمترین مقدار پارامتر ZM_{min} تقریباً در طول بازه ۱۰ روزه بدست می‌آید. مقادیر جدول (۱) برای چند روز اول ماه مرداد هستند. در مطالعه مشروحی که برای سایر ماه‌ها نیز انجام گرفته است، مقدار کمینه پارامتر ZM_{min} در طول بازه‌ای حدود ۱۰ روز اتفاق می‌افتد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که روز نمونه برای طول بازه‌های نزدیک ۱۰، تقریباً ثابت می‌ماند که این مساله برای سایر ماه‌ها نیز صادق است. بدین ترتیب، اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که طول بازه ۱۰ روزه، مناسبترین انتخاب برای بازه‌های زمانی است که هر کدام بوسیله یک روز نمونه، نمایندگی خواهند شد.

در نهایت امکان اینکه یک الگوی ۲۴ ساعته واحد را به عنوان روز نمونه برای کل یک سال و یا فصل ارائه دهیم میسر نیست. دلیل این است که سرعت و جهت باد دارای تغییرات فصلی هستند. بنابراین باید طول بازه‌ها را به نحو مناسبی انتخاب کرد که مسلماً باید مضرب صحیحی از اندازه واحد نمونه (یعنی یک روز) باشد. از یکسو، اگر طول بازه‌ها خیلی بزرگ باشند، روز نمونه با دقت کمی بازه زمانی را نمایندگی می‌کند و از سوی دیگر، اگر این طول، خیلی کوچک باشد، تعداد نمونه کافی در جامعه آماری وجود نخواهد داشت و در نتیجه، دقت این بررسی آماری کاهش خواهد یافت. پس لازم است تا به نحو مناسبی، توازنی بین دقت بررسی آماری و کیفیت روز نمونه در نمایندگی هر بازه برقرار گردد. به این منظور، ZM_{min} برای بازه‌های ۲ تا ۱۵ روزه، برای سرعت و جهت باد، هر کدام جداگانه و هر دو با هم، محاسبه شده است که نتایج در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. همانگونه که در

۵- اضافه کردن اغتشاش (مولفه short-term) در مدل سرعت باد:

همانگونه که بیان شد، داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد، در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای در دسترس هستند؛ عموماً نیز اکثر ثبات‌های مورد استفاده، داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین را در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای و گاهی تا ۳۰ دقیقه‌ای می‌دهند. در نتیجه روز نمونه مناسب که بعنوان روز الگو برای هر بازه بدست می‌آید، حاوی الگوی جهت و سرعت باد در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای است؛ لذا روز نمونه، الگوی درازمدت^۱ و میان مدت^۲ سرعت باد را بخوبی نمایش می‌دهد اما حاوی اطلاعات سرعت باد کوتاه مدت^۳ نیست. برای اضافه کردن این مولفه‌های سریع (اجزا اغتشاشی) به الگویی که برای سرعت باد هر بازه برگزیده‌ایم (روزی که دارای کوچکترین ZM است)، از نتایج کار Nichita و همکارانش [۱۰] استفاده خواهیم کرد. در این مرجع نشان داده شده است که مدل Von Karman [۹]، مولفه اغتشاشی سرعت باد را در بازه‌های ثانیه، دقیقه و یا ساعت، با توجه به سرعت باد میانگین، شدت اغتشاش^۴ و طول اغتشاش^۵، بخوبی برازش می‌کند. با توجه به این مطلب، از روش ارائه شده در [۱۰] برای اضافه کردن مولفه اغتشاشی (کوتاه مدت) در بازه ۵ سیکل بر ساعت تا ۱۰۰۰ سیکل بر ساعت استفاده می‌کنیم. حد پایین این بازه فرکانسی، با توجه به پریود زمانی بین داده‌های متوالی سرعت باد (۱۰ دقیقه) تعیین می‌گردد و حد بالا نیز سریعترین مولفه‌های مطلوب موجود در طیف سرعت باد است. نتیجه کار، الگوی کامل سرعت باد، برای بازه مورد نظر می‌باشد که دارای کلیه مولفه‌های بلند، میان و کوتاه مدت است. در واقع، تمایز اصلی کار این مقاله در بدست آوردن سرعت باد بانند وسیع^۶ با کار انجام شده در [۱۰] این است که در آنجا مولفه بلند مدت و میان مدت سرعت باد از مدل Van

1. Long term
2. Medium term
3. Short term
4. Turbulence intensity
5. Turbulence length
6. Large band

der Hoven بدست آمد، لیکن در این کار، این مولفه‌ها برای هر سایت مورد مطالعه، با استفاده موثر از داده‌های اندازه‌گیری شده برای آن سایت و به مدد روشی کاملاً ابتکاری و مدون، در هر بازه بدست می‌آید که نماینده بسیار دقیقی از تغییرات سرعت باد در آن بازه می‌باشد. شکل (۲)، تاثیر افزودن مولفه‌های سرعت بالای سرعت باد را برای یک روز کامل نشان می‌دهد؛ ملاحظه می‌گردد که شکل و توزیع اغتشاش کاملاً وابسته به مشخصات میان مدت و بلند مدت سرعت باد است.

۶- مقایسه کارایی روش ارائه شده و سایر روش‌های متداول:

طول بازه برای ماه مرداد، ۱۰ روز انتخاب شد، پس همانگونه که از جدول (۱) مشخص است، روز نمونه (الگو) در این بازه بدینگونه است:

روز نمونه برای پیش‌بینی همزمان سرعت و جهت: ۱ مرداد ۸۱

روز نمونه برای فقط پیش‌بینی سرعت: ۷ مرداد ۸۴

روز نمونه برای فقط پیش‌بینی جهت: ۱ مرداد ۱۳۸۱

حال مولفه اغتشاشی را نیز به روشی که در بخش قبل توضیح دادیم به سرعت باد کلیه روزهای در این بازه ۱۰ روزه و چهار سال متوالی و از جمله روز نمونه‌ای که بدست آورده‌ایم، اضافه می‌کنیم. از طرفی همانطور که اشاره شد، تاکنون هیچ مدل خاصی برای پیش‌بینی جهت باد در بازه‌های زمانی بلند و میان مدت ارائه نشده است، لذا در مورد جهت باد هیچ کار قبلی برای مقایسه نداریم. اما برای سرعت باد، مدل‌های Von Karman و Van der Hoven موجودند که به اضافه کار انجام شده در [۷] که ما آنرا مدل LBM نامیدیم، تنها کارهای انجام شده قبلی برای مقایسه هستند. از دو پارامتر آماری برای مقایسه استفاده خواهیم کرد؛ معیار اول RMSE^۷ و معیار دوم COD^۸ یا R^۲ است. RMSE، مقدار مطلق خطای موجود بین الگوی واقعی و مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد و هرچه مقدار

7. Root Mean Square Error

8. Coefficient Of Determination

می‌شود، مقادیر COD در روش ارائه شده، بسیار بزرگتر از بقیه روش‌ها هستند. این بدان معناست که روش اخیر، الگویی بسیار مشابه الگوی واقعی سرعت باد در هر سایت موردنظر را ارائه می‌دهد. بعلاوه، مقایسه مشابهی برای چند سایت بادی دیگر که دارای مشخصات بادی کاملاً متفاوتی هستند انجام شده است که در کلیه موارد، مقادیر معیارهای RMSE و COD برای همه سایت‌های مورد مطالعه، در روش پیشنهادی، بسیار بهتر از سایر روش‌های متداول است؛ این یعنی اینکه روش، برای مشخصات بادی مختلف، روش بسیار مقاومی است.

نتیجه‌گیری:

در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین الگوی پارامترهای باد ارائه شده است. روش مشابهی، بوسیله سایر محققین و در چند زمینه دیگر مورد استفاده قرار گرفته است که آنگونه متحول و اصلاح گشته‌اند تا توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد را، به بهترین نحو ممکن بیابند. تاثیرات اغتشاشی نیز به کمک مدل Von Karman به الگوی سرعت باد بدست آمده اضافه شد. الگوهای سرعت باد برای چند سایت مختلف، با ویژگی‌های بادی متفاوت، بدست آمد و نتایج، برای یکی از آنها، در این مقاله ارائه شدند. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این مقاله و سایر روش‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند، با یکدیگر مقایسه شد و این مقایسه نشان داد که دقت پیش‌بینی در روش اخیر بسیار بیشتر است.

آن به صفر نزدیکتر باشد، مدل پیشنهادی با دقت بیشتری داده‌های واقعی را نمایش می‌دهد. COD نیز کمیت مفید دیگری است که در بازه صفر تا یک قرار داشته و هرچه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد، مدل با دقت بیشتری الگوی تغییرات داده‌های واقعی را دنبال می‌کند و پیش‌بینی‌های مدل به واقعیت نزدیکترند.

$$\text{COD} = 1 - \frac{\sigma_{y,x}^2}{\sigma_y^2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2}{N-1} \right]^{1/2}$$

$$\sigma_{y,x} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ip})^2}{N-2} \right]^{1/2}$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ip})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

که در آن:

N : تعداد کل داده‌ها

y_i : مقادیر واقعی y

y_{ip} : مقادیر پیش‌بینی شده برای y

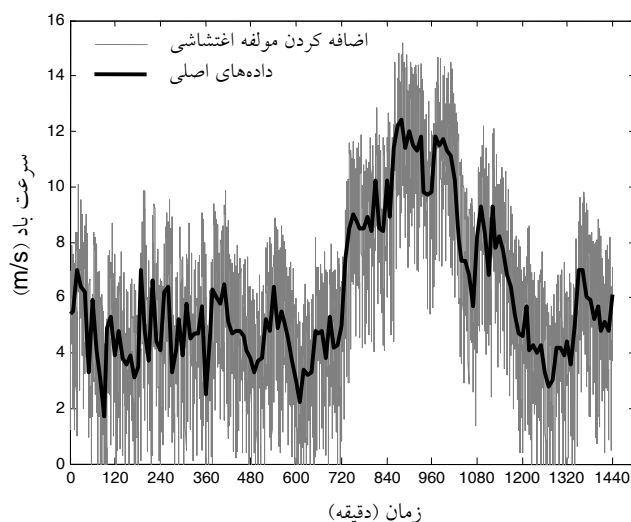
برای مقایسه نتایج پیش‌بینی روش ارائه شده با سایر مدل‌های موجود، مقادیر RMSE و COD برای همه مدل‌ها، با توجه به داده‌های واقعی سرعت باد، محاسبه شده‌اند و نتایج در جدول (۲) آمده‌اند. ملاحظه می‌گردد که مقدار متوسط RMSE برای همه سال‌ها، در روش پیشنهادی، بسیار کمتر از سایر روش‌هاست، بعلاوه برای اکثر روزهای سال نیز، این مقدار، در روش ارائه شده، کوچکتر از سایر مدل‌هاست. مقادیر COD، از اهمیت بیشتری برخوردارند و همانگونه که ملاحظه

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۲: مقایسه مقادیر معیارهای RMSE و COD برای سرعت باد

ZM _{min} Method		Van der Hoven		Von Karman		LBM		
RMSE	COD	RMSE	COD	RMSE	COD	RMSE	COD	
0.0000	1	4.2665	3.92E-04	4.3173	0.0124	4.5694	0.0366	۱ مرداد ۱۳۸۱
2.0247	0.7331	3.7589	0.0581	4.3379	0.0068	3.6429	0.1771	۲ مرداد ۱۳۸۱
2.2104	0.7488	3.8843	0.0621	4.4416	0.0138	3.9632	0.034	۳ مرداد ۱۳۸۱
2.2843	0.8146	4.2147	0.0054	4.4534	0.02	4.2348	0.0388	۴ مرداد ۱۳۸۱
1.7631	0.5575	3.6793	0.0692	4.3808	0.015	5.2755	0.0011	۵ مرداد ۱۳۸۱
1.8278	0.6833	3.4720	0.179	4.1594	0.0044	4.5759	0.069	۶ مرداد ۱۳۸۱
2.6562	0.5703	4.3943	3.17E-04	4.6267	0.0145	5.0350	0.0306	۷ مرداد ۱۳۸۱
2.7010	0.3682	4.6485	0.0766	3.9943	0.0467	3.5803	0.0742	۸ مرداد ۱۳۸۱
2.1408	0.0401	3.8884	0.0018	3.6394	0.0131	3.6792	9.46E-04	۹ مرداد ۱۳۸۱
1.7052	0.4767	3.6068	0.0502	4.1798	0.033	4.0337	0.0245	۱۰ مرداد ۱۳۸۱
1.9314	0.59926	3.9814	5.03E-02	4.2531	0.01797	4.2590	0.048685	میانگین
1.7736	0.6485	4.0310	0.0017	4.0344	0.0166	4.4068	0.0674	۱ مرداد ۱۳۸۲
2.0904	0.1439	3.5021	0.0025	3.7236	0.0166	4.0266	0.0814	۲ مرداد ۱۳۸۲
2.0786	0.845	3.7583	0.0232	4.1114	0.0194	3.6855	0.0194	۳ مرداد ۱۳۸۲
1.6493	0.7042	3.8983	0.0019	3.9555	0.0135	3.8854	0.0369	۴ مرداد ۱۳۸۲
2.1317	0.7897	4.1064	0.0694	4.0981	0.0135	4.3703	2.80E-04	۵ مرداد ۱۳۸۲
1.7466	0.641	2.8407	0.1578	3.7347	0.0073	4.1331	0.0549	۶ مرداد ۱۳۸۲
1.7444	0.3537	3.6285	0.0101	3.8009	0.0248	3.9639	0.0043	۷ مرداد ۱۳۸۲
2.0764	0.3891	4.0149	0.0294	3.6847	0.0412	3.1850	0.0358	۸ مرداد ۱۳۸۲
2.4381	0.2199	5.2505	0.0176	3.7222	0.0264	2.8148	0.01	۹ مرداد ۱۳۸۲
2.1730	0.1169	3.3533	0.001	3.6422	0.0365	4.0637	0.0079	۱۰ مرداد ۱۳۸۲
1.9902	0.48519	3.8384	0.03146	3.8508	0.02158	3.8535	0.031828	میانگین
1.7422	0.7074	3.6367	7.26E-04	4.1225	0.0132	4.1438	0.0377	۱ مرداد ۱۳۸۳
1.7566	0.6716	3.5099	0.0554	4.1181	0.007	3.3489	0.1464	۲ مرداد ۱۳۸۳
1.6314	0.6135	3.3264	0.0404	3.9099	0.0227	3.3316	0.0528	۳ مرداد ۱۳۸۳
1.7178	0.6965	3.8050	9.16E-04	4.0730	0.0179	4.3158	0.0444	۴ مرداد ۱۳۸۳
1.8287	0.6782	3.4272	0.0759	4.1203	0.0151	5.0724	0.0031	۵ مرداد ۱۳۸۳
1.9474	0.636	3.0976	0.213	3.9793	0.0122	4.2011	0.0279	۶ مرداد ۱۳۸۳
2.1922	0.6828	3.7969	0.0024	3.9408	0.0179	4.3387	0.0108	۷ مرداد ۱۳۸۳
2.1495	0.5556	4.2007	0.0207	3.8900	0.0287	3.3344	0.0583	۸ مرداد ۱۳۸۳
2.0475	0.152	3.7986	0.0636	3.2701	0.0393	2.7836	0.0263	۹ مرداد ۱۳۸۳
1.6959	0.2915	3.0288	4.45E-04	3.2269	0.0415	3.0803	4.78E-04	۱۰ مرداد ۱۳۸۳
1.8709	0.56851	3.5628	4.73E-02	3.8651	0.02155	3.7951	4.08E-02	میانگین
2.1549	0.4084	3.1962	0.0027	3.3423	0.0203	3.4486	0.0162	۱ مرداد ۱۳۸۴
1.9742	0.6888	3.2972	0.05	3.7924	0.0077	3.4434	0.1981	۲ مرداد ۱۳۸۴
1.7351	0.809	3.4687	0.0056	3.8103	0.028	3.3656	0.0173	۳ مرداد ۱۳۸۴
1.8862	0.7276	3.5171	0.0023	3.9201	0.0213	4.3134	0.0147	۴ مرداد ۱۳۸۴
1.8994	0.5555	2.8111	0.0158	3.8627	0.0199	5.0172	0.0458	۵ مرداد ۱۳۸۴
2.4684	0.5519	3.0297	0.0801	3.8654	0.0116	4.2851	0.0707	۶ مرداد ۱۳۸۴
1.6870	0.573	3.6232	0.0601	3.5868	0.0206	3.9034	0.0086	۷ مرداد ۱۳۸۴
2.1556	0.7577	4.3511	0.0514	4.0474	0.0181	3.5540	0.0335	۸ مرداد ۱۳۸۴
1.9832	0.8781	4.2849	0.0053	3.9743	0.007	3.7487	0.0353	۹ مرداد ۱۳۸۴
1.8118	0.8319	3.3660	0.112	4.1541	0.0281	4.5310	0.0627	۱۰ مرداد ۱۳۸۴
1.9756	0.67819	3.4945	0.03853	3.8356	0.01826	3.9610	0.05029	میانگین

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۲: افزودن مولفه اغتشاشی به سرعت باد

cycles per hour. Journal of the Atmospheric Sciences 1957; 14(2): 160-4.

- [9] Welfonder E, Neifer R, Spanner M. Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines. Control Engineering Practice 1957; 5(1): 63-73.
- [10] Nichita C, Luca D, Dakyo B, Ceanga E. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators. IEEE Transactions on energy conversion 2002; 17(4): 523-29.
- [11] Montazeri-Gh M, Naghizadeh M. Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy. In: Proceedings of 15th European Simulation Symposium, 2003.
- [12] Zadpoor A, Golshan H. Development of a climate pattern for design and simulation of evaporative cooling systems. In: eSim 2004 Building Energy Simulation Conference, Vancouver, Canada, p. 111-8.

فهرست مراجع و مأخذ:

- [1] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. Chichester: John Wiley and Sons; 2001.
- [2] Damousis IG, Dokopoulos P. A fuzzy expert system for the forecasting of wind speed and power generation in wind farms. In: PICA 2001, 20-24 May 2001, p. 63-9.
- [3] Spera DA. Wind turbine technology. New York: ASME Press; 1994.
- [4] Watson SJ, Landberg L, Halliday JA. Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy in to a large scale power system. In: IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 4, July 1994, p. 357-62.
- [5] Soder L. Simulation of wind speed forecast errors for operation planning of multi-area power systems. In: 8th International conference on probabilistic methods applied to power systems, Iowa state university, Iowa, 12-16 September 2004, p. 723-28.
- [6] Wang X, Sideratos G, Hatziargyriou N, Tsoukalas LH. Wind speed forecasting for power system operational planning. In: 8th International conference on probabilistic methods applied to power systems, Iowa state university, Iowa, 12-16 September 2004, p. 470-74.
- [7] Guangdian GW, Zhijie D. Wind pattern recognition in neural fuzzy wind turbine control system. In: NAFIPS/IFIS/NASA 1994 The Industrial Fuzzy and Intelligent Systems Conference and the NASA Joint Technology, 18-21 Dec. 1994, p. 381-5.
- [8] Van der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in frequency range from 0.0007 to 900