

مدل نوین آماری برای پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد: ارائه مدل و سنجش کارایی

سهیل پرخیال*^{۱،۲}، احمد کهربائیان^{۱،۳} و محمد منفرد^{۱،۴}

^۱سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

^۳دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

^۴گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده پیش‌بینی پارامترهای باد، برای استفاده بهینه از سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ضروری است. در این مقاله، با استفاده از روش‌های آماری، مدل جدیدی برای پیش‌بینی سرعت و جهت باد ارائه شده است. پیش از این، ایده‌های مشابهی، برای به دست 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 به طور کلی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی است. در این مطالعه از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد، برای سه محل مختلف در ایران استفاده شده است. ایده اولیه، به گونه‌ای اصلاح شده است که توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد را به بهترین نحو ممکن داشته باشد. در یک مطالعه جامع، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل ارائه شده و سایر مدل‌های موجود انجام شده است که این مقایسه نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی در روش اخیر به نحو مؤثری بهبود یافته است.

کلمات کلیدی پیش‌بینی، مدل‌سازی، سرعت باد، جهت باد، سیستم‌های تبدیل انرژی بادی.

Suggestion and Verification of a New Statistical Model for Wind Speed and Direction

Soheil Porkhial*^{1,2}, Ahmad Kahrobaian^{1,3} and Mohammad Monfared^{1,4}

¹Iran New Energies Insitutes (SANA)

²Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Iran

³Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract Forecasting of wind parameters is necessary for proper utilization of wind energy conversion systems. In this paper, a statistical method is used for development of a new wind forecasting model. The method was previously used for development of car driving cycles and climate patterns. The method can be used in design and simulation studies of wind energy conversion systems. Wind speed and direction data originating from three different wind sites are used in this study. The original statistical method is modified to fit requirements of the new domain of application. A comparison is made between the accuracy of the developed model and those of the previous models. It is shown that the model has superior functionality comparing to other currently available methods.

Keywords Forecasting, Modeling, Speed, Direction, Wind Energy Conversion System.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: استان البرز، کرج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، دانشکده مهندسی مکانیک.

تلفن: - - دورنگار: - پیام‌نگار: porkhial@yahoo.com

۱- مقدمه

سبب افزایش قابلیت اطمینان در شبکه و کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ها می‌شود.

افزایش سهم مزارع بادی در کل تولید برق شبکه‌های بزرگ، باعث شده تا در محاسبات اقتصادی مربوط به پخش بار، نقش این منابع نیز با توجه به پیش‌بینی‌هایی که از توان تولیدی آنها می‌شود، لحاظ شود؛ لذا تخمین دقیقی از میزان تولید انرژی مزارع بادی، توزیع بهینه توان را به دنبال دارد [۵،۴،۱].

با توجه به نیازها 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 روش‌های آماری استوارند و شامل روش‌های Persistence و NWP 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 نظیر حداقل سازی میانگین مجذور خطا، قابل پیش‌بینی است و فراگیرترین آنها ARMA است [۶،۵،۴].

اخیراً، استفاده از روش‌های آماری به همراه مفاهیم نوینی همچون فیلتر کالمن، علی‌رغم پیچیدگی، نتایج مناسبی برای پیش‌بینی سرعت باد در پی داشته است [۷]. از سوی دیگر، 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 اتمسفری و اقلیمی به دست آمده‌اند، صورت می‌پذیرد. این مدل‌ها، توسط سازمان‌های هواشناسی ملی مورد استفاده قرار می‌گیرند. NWP‌ها علاوه بر سرعت، قادر به پیش‌بینی جهت وزش باد نیز می‌باشند. به علت حجم بالای داده‌ها، استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های کوتاه مدت میسر نیست [۸،۴].

یافتن منابع جدید انرژی از مهمترین دغدغه‌های بشر در قرن حاضر می‌باشد. با افزایش تقاضا برای منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی نیز اخیراً مورد توجه خاص قرار گرفته است. استفاده از باد به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی، در حال گسترش روز افزون است و بر طبق پیش‌بینی‌ها، تا سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد به دست خواهد آمد و رشد سالانه تا سال ۲۰۴۰ بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ خواهد بود [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 به وسیله آنها، نیازمند به آگاهی از این دو پارامتر است. در نتیجه، توانایی پیش‌بینی سرعت و جهت وزش باد، برای استفاده مؤثر از باد به عنوان یک منبع انرژی، الزامی است.

از جمله سایر مزایای تخمین پارامترهای باد، توانایی کنترل و تنظیم توربین بادی برای به دست آوردن حداکثر توان ممکن از باد وزشی است. به علاوه در صورتی که عملکرد توربین و سیستم الکتریکی نیروگاه بادی، با پیش‌بینی دقیق تغییرات سرعت و جهت باد، به طور مؤثر کنترل شوند، راندمان تولید توان الکتریکی و طول عمر تجهیزات تا حد بسیار چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این پیش‌بینی‌ها، در سیستم‌های ترکیبی بادی-دیزلی، برای طراحی کنترل کننده‌های لازم برای بهره‌برداری از این سیستم‌ها ضروری است [۱-۳].

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 بهره برده و میزان انرژی ذخیره مورد نیاز را کاهش دهد که خود

از ترکیب این دو مدل، الگوی جدیدی ارائه داده که از این پس ما آنرا LBM خواهیم نامید و مدعی است که عملکرد بهتری در پیش‌بینی و مدل کردن سرعت باد، هم در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و هم بازه‌های زمانی بلند مدت دارد. روش پیشنهادی در این مقاله برای مدل‌سازی پارامترهای باد، یعنی توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت، قادر به پاسخگویی کلیه نیازهای مربوط به پیش‌بینی باد می‌باشد.

از سوی دیگر، امروزه استفاده از شبیه‌سازهای توربین‌های بادی در مطالعات مربوط به انرژی باد مطرح شده است. جزء اساسی این شبیه‌سازها، شبیه‌ساز تغییرات سرعت باد 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 [۱۶].

مدلی که در این کار ارائه شده است، به صورت 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 کار، به کمک روش آماری و با استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد در هر محل معین، الگوی دقیقی برای سرعت باد در آن محل به دست می‌آید. اصل این روش، در ابتدا، برای استخراج چرخه‌های حرکت اتوموبیل‌ها در مناطق پرجمعیت شهری مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. سپس به وسیله زادپور و گلشن برای به دست آوردن الگوهای آب و هوایی به کار رفت [۱۸]. این الگوی آب و هوایی، برای طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده چند مرحله‌ای، بسیار مؤثر واقع شد.

در روش ارائه شده در این مقاله، تمرکز بر روی یک محل و استفاده مؤثر از داده‌های ثبت شده قبلی است تا با روشی ساده و به طرز بسیار مؤثرتری از روش‌های قبلی از

دسته دوم روش‌های پیش‌بینی، مبتنی بر روش‌های هوش مصنوعی می‌باشند. امروزه روش‌های پیش‌بینی متعددی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی برای مدل کردن سرعت باد، به عنوان 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 و هم اکنون مورد توجه جدی محققان می‌باشند [۱، ۹، ۱۳].

در کلیه روش‌های تشریح شده، خطای پیش‌بینی‌ها با بزرگ شدن بازه زمانی پیش‌بینی، افزایش یافته و به سرعت از واقعیت فاصله می‌گیرد. این در صورتی است که همانگونه که پیشتر اشاره شد، پیش‌بینی بلند مدت پارامترهای باد، از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است. در اختیار داشتن الگوی بادی هر محل، در مراحل مکان‌یابی و طراحی و ساخت، پیش‌بینی توان قابل حصول از هر محل، مسائل مربوط به تعیین نوع توربین و تجهیزات، طراحی استراتژی‌ها و تجهیزات کنترلی مناسب هر محل و برنامه‌ریزی زمانبندی‌های سوئیچ بین حالات عملکردی مختلف را میسر می‌سازد. در حین بهره‌برداری نیز، امکان استفاده مؤثر از منابع انرژی بادی در دیسپاچینگ توان سیستم قدرت را فراهم کرده و هزینه‌ها را به نحو مؤثری کاهش می‌دهد.

تاکنون چندین مدل برای سرعت باد ارائه شده است 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 مؤلفه اغتشاشی به صورت یک فرآیند کاملاً تصادفی مدل شده است [۱۴]؛ حال آنکه الگوی Von Karman، وابسته به مقادیر سرعت میانگین، انحراف معیار و طول اغتشاش محل مورد مطالعه می‌باشد [۱۵]. مرجع [۱۶] این دو روش را با یکدیگر مقایسه کرده و هر کدام را به تنهایی ناکارآمد دانسته و در نهایت

جغرافیایی است. این ایده برای تعیین چرخه‌های حرکت اتوموبیل‌ها در مناطق شهری استفاده شده است [۱۷].

به سبب حجم بالای داده‌های سرعت و جهت باد موجود، هرگونه استفاده از این داده‌ها، بدون اعمال روش‌های آماری مناسب، غیر ممکن است. این مشکل کاملاً مشابه شبیه‌سازی رفت و آمد خودروهاست. مسیر حرکت و اتفاقاتی که در عالم واقع برای یک خودرو پیش می‌آید، دارای مرتبه بزرگی از عدم قطعیت است، هرچند شباهت‌هایی بین این وقایع برای خودروهایی که در یک ناحیه معین مشغول رفت و آمد هستند وجود دارد. در ایده چرخه حرکت اتوموبیل‌ها، به کمک ابزارهای آماری مناسب، ویژگی‌های اصلی این وقایع برای خودروهایی که در یک ناحیه معین مشغول رفت و آمد هستند، استخراج می‌گردد. ایده اصلی این مقاله نیز آن است که داده‌های سرعت و جهت باد در بازه‌ای از زمان، می‌توانند داده‌های سرعت و جهت باد را در یک بازه زمانی بزرگتر، به طرز مؤثری نمایندگی کنند.

در ادامه، مشخص خواهد شد که یک روز (بازه زمانی ۲۴ ساعته)، کاندید مناسبی برای طول بازه زمانی نمونه خواهد بود. به علاوه، نشان خواهیم داد که برای بازه زمانی که طول آن ۱۰ روز باشد، بهترین و مؤثرترین روز نمونه را می‌توان به دست آورد. لذا به طرز مشابهی، روز نمونه برای بازه ۱۰ روزه اینگونه تعریف می‌شود که:

"روز نمونه، روزی است که اختلاف بین پارامترهای آن، که داده‌های سرعت و جهت باد در آن روز هستند، با مقادیر متناظری که برای کل جامعه آماری، به نحو مناسبی تعریف می‌گردند، حداقل باشد."

برای تعیین روز نمونه در هر بازه زمانی، نیاز به معیار مناسبی برای انتخاب می‌باشد. این پارامتر، ZM نامیده شده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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، پیش‌بینی‌های دقیقی از سرعت باد داشته باشیم. به علاوه، مؤلفه 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 تحقیق، در سه محل بادی مختلف ایران که دارای ویژگی‌های بادی متمایزی می‌باشند، با سایر مدل‌های متداول برای سرعت باد مقایسه شده و نتایج، برتری چشمگیری را نشان می‌دهند.

۲- نحوه انجام آزمایش

هدف اصلی این مقاله آن است که دوره زمانی کوچکی، مثلاً یک روز را به عنوان نماینده یک دوره زمانی طولانی‌تر، مثلاً یک ماه، به دست آوریم. ایده مشابهی به وسیله زادپور و همکاران [۱۸]، با هدف شبیه‌سازی انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار گرفته است. در کار آنها، پیشنهاد شده است که می‌توان برای هر ماه تابستان، یک روز را به عنوان نماینده انتخاب کرد. بر این اساس، "روز نمونه، روزی است که اختلاف بین پارامترهای آن، دمای حباب‌های خشک و تر، با مقادیر متناظری که برای کل جامعه آماری، به نحو مناسبی تعریف می‌گردند، حداقل باشد" [۱۸]. در واقع، کل فصل گرما به چندین ماه تقسیم شده و هر ماه به وسیله یک روز نمایندگی می‌شود. این کاملاً مشابه تقسیم‌بندی ترافیک یک شهر، بر اساس مناطق جغرافیایی، به چندین بخش و یافتن یک الگوی سفر (حرکت) که اصطلاحاً میکروتریپ نامیده می‌شود، به عنوان نماینده نحوه ترافیک در هر کدام از این بخش‌های

برای آن مقدار پارامتر ZM_i ، حداقل شود.

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

که در رابطه فوق،

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

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

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

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

در روابط فوق، اندیس‌های i و k ، به ترتیب، روزهای جامعه آماری و اندازه‌گیری‌های انجام شده در مدت هر روز از جامعه را نشان می‌دهند. کمیت ZM_i بدون بعد است.

به روشنی درمی‌یابیم که با توجه به تعاریف فوق، هرچه مقادیر قدرمطلق تفاضل‌ها به صفر نزدیک‌تر باشند، آنگاه میانگین داده‌های موجود در یک روز معین از جامعه آماری به میانگین کل داده‌های موجود در همه روزهای جامعه نزدیکتر است. بر این اساس، روز نمونه، روزی (یک i معین) است که

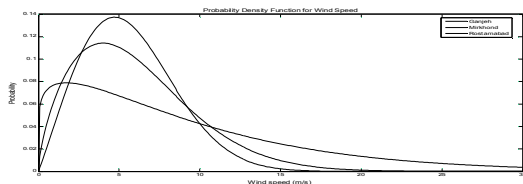
۳- نتایج و بحث

۳-۱- معرفی محل‌های مورد مطالعه

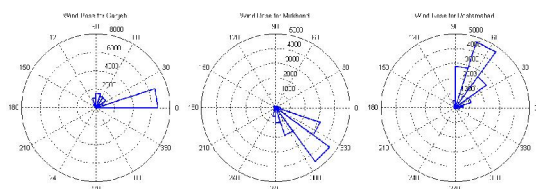
سه محل بادی رستم‌آباد، میرخوند و گنجه، برای بررسی صحت عملکرد روش ارائه شده و مقایسه نتایج با روش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اندازه‌گیری‌های مقادیر جهت و سرعت باد برای این سه محل در ارتفاع ۴۰ متری و در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در دسترس می‌باشند. جدول ۱ پارامترهای آماری این سه محل را که برای داده‌های اندازه‌گیری شده معتبر در کلیه فصول سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ میلادی محاسبه شده‌اند نشان می‌دهد. به علاوه، تابع توزیع ویبول سرعت باد و گلباد جهت باد در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۱ و شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده می‌شود، این سه محل دارای ویژگی‌های کاملاً متفاوتی هستند. در هر سه، داده‌های سرعت باد، دارای نوسانات شدید و شکل توزیع پراکنده‌ای می‌باشند. به علاوه، شرایط هوای ساکن نیز وجود دارد؛ یعنی سرعت باد در لحظاتی از طول روز نزدیک

جدول ۱. پارامترهای آماری سرعت و جهت باد در سه سایت مورد مطالعه.

	Mirkhond	Gangeh	Rostamabad
<i>Speed:</i>			
Std deviation (m/s):	8.11	2.88	3.75
Mean (m/s):	9.27	5.69	6.07
Weibul shape factor:	1.15	2.09	1.68
Weibul scale factor (m/s):	9.76	6.43	6.81
<i>Direction:</i>			
Std deviation (m/s):	76.07	46.99	65.60
Mean (degree):	285.60	38.84	76.82



شکل ۱. تابع توزیع ویبول سرعت باد در سه سایت مورد مطالعه.



شکل ۲. گلباد در سه سایت مورد مطالعه.

تشخیص داد. همچنین برای سایر ماه‌ها نیز، این الگو، به وضوح، قابل تشخیص است. لذا کوچکترین واحدی که برای اعمال این روش انتخاب می‌شود، الگوی روزانه (۲۴ ساعته) است و همان‌طور که خواهیم دید، از بین روزهای هر بازه، یک روز به عنوان روز نمونه برای آن بازه به دست آورده می‌شود. 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 امر آن است که سرعت و جهت باد دارای تغییرات فصلی و بین 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، توازن بین دقت بررسی آماری و کیفیت روز نمونه در نمایندگی هر بازه برقرار گردد. به این

صفر است که همه این عوامل کار پیش‌بینی را دشوارتر می‌کنند.

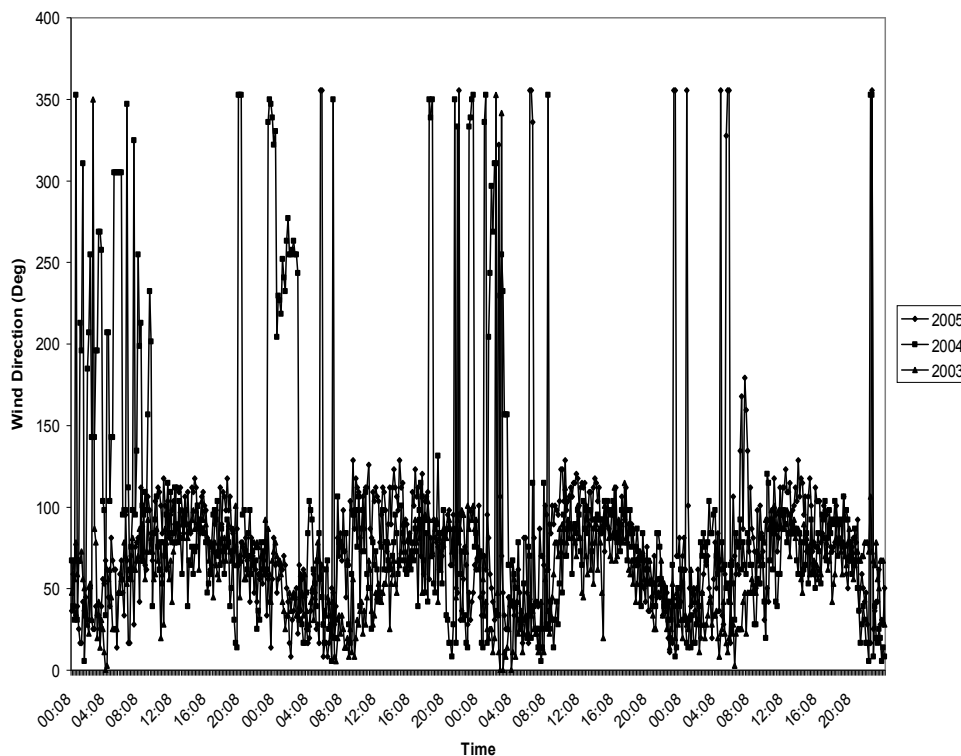
شرایط هوای ساکن در می‌رخوند شدیدتر است. از آنجا که میانگین سرعت باد در می‌رخوند بالاست، لذا توزیع آن بسیار پراکنده است. گنجه تیزترین اوج در توزیع ویبول و لذا کمترین پراکندگی توزیع را دارد. افزایش قابل ملاحظه پارامتر مقیاس توزیع ویبول در می‌رخوند، سبب کاهش اوج توزیع شده است. مشخصات سرعت باد رستم آباد نیز مابین می‌رخوند و گنجه است. از نظر جهت نیز، گنجه و می‌رخوند، به ترتیب، کمترین و بیشترین نوسانات جهت وزش باد را دارا هستند.

در این کار، از اطلاعات سرعت و جهت باد در ماه اوت سالهای ۲۰۰۲-۲۰۰۵ استفاده شده است؛ زیرا اولاً این اطلاعات برای این محل‌ها به طور 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.

۲-۳- چگونگی انتخاب کوچکترین واحد، واحد نمونه و طول بازه‌ها

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 با روشی مناسب انتخاب خواهیم شده اند. شکل‌های ۳ تا ۵ تغییرات سرعت و جهت باد را برای محل‌های مورد مطالعه، در چهار روز اول اوت سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۵ نشان می‌دهند.

واضح است که می‌توان الگوی منظم روزانه را در روزهای متوالی هر سال و روزهای مشابه در سالهای مختلف



شکل ۳. تغییرات سرعت و جهت باد، چهار روز اول اوت ۲۰۰۳-۲۰۰۵، گنجه.

نمایندگی خواهند شد.

۳-۳- اضافه کردن اغتشاش (مؤلفه short-term) در مدل سرعت باد

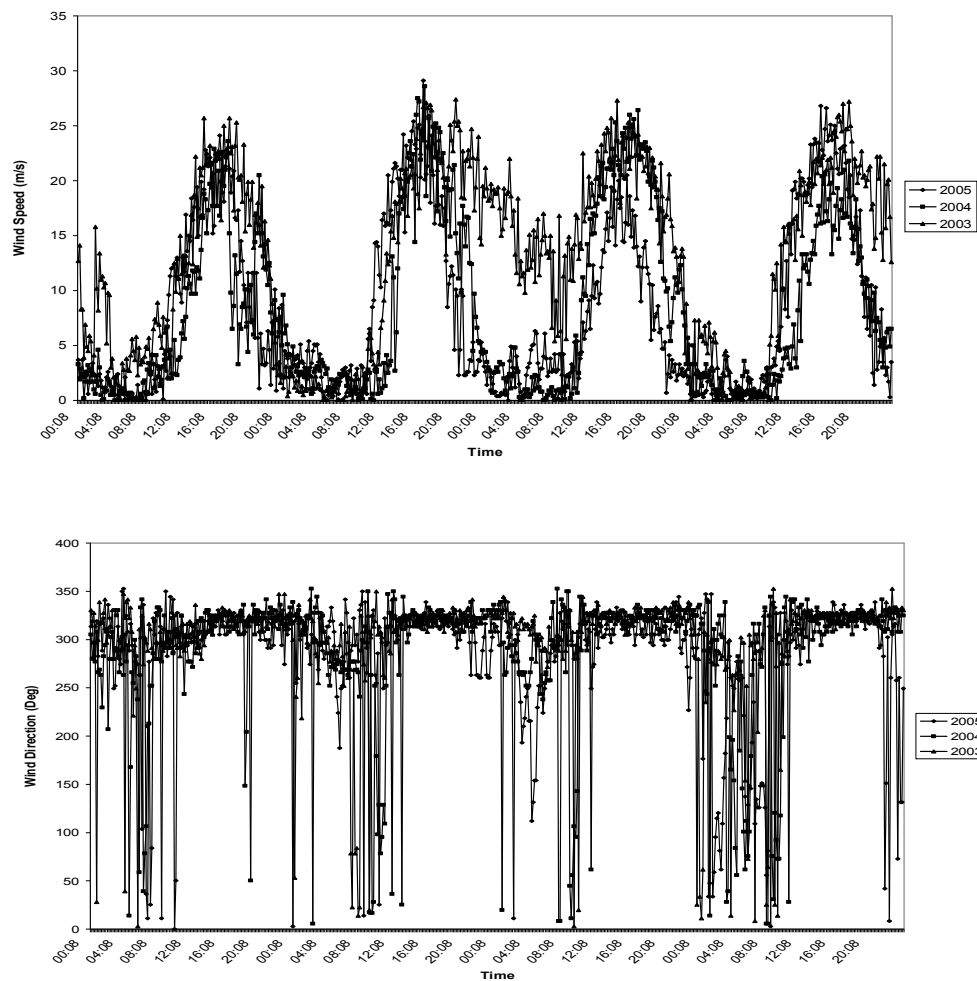
همانگونه که بیان شد، داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت و جهت باد، در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای در دسترس هستند؛ عموماً نیز اکثر ثبات‌های مورد استفاده، داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین را در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای و گاهی تا ۳۰ دقیقه‌ای می‌دهند. در نتیجه روز نمونه مناسب که به عنوان روز الگو برای هر بازه به دست می‌آید، حاوی الگوی جهت و سرعت باد در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای است؛ لذا روز نمونه، الگوی

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 ۲ خلاصه شده‌اند. همانگونه که در بخش مربوط به تشریح روش نیز آمد، بازه زمانی که دارای کوچکترین مقدار برای ZM_{min} باشد، دارای طول بهینه است.

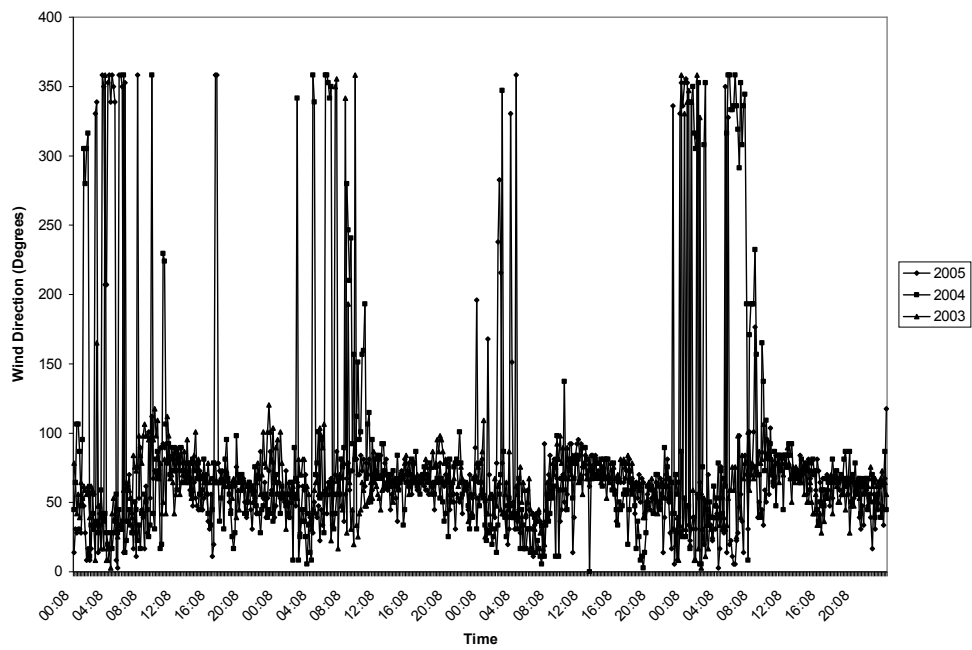
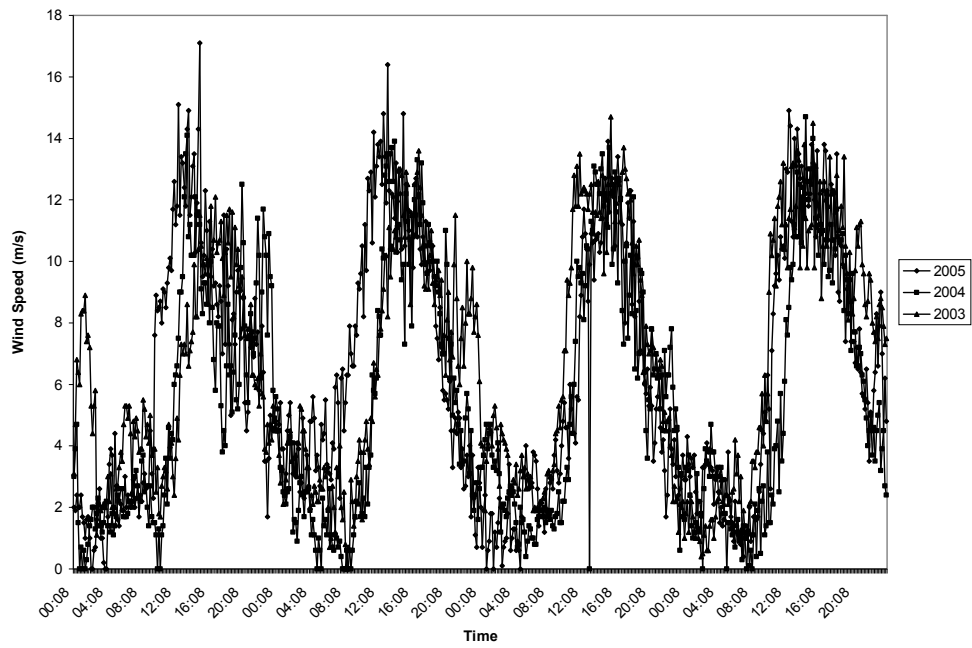
همانطور که از نتایج مقایسه کمی در جدول ۲ برمی‌آید، کمترین مقدار پارامتر ZM_{min} تقریباً در طول بازه ۱۰ روزه به دست می‌آید. نکته حائز اهمیت دیگر این است که روز نمونه برای طول بازه‌های نزدیک ۱۰، تقریباً ثابت می‌ماند که این مسئله برای سایر ماه‌ها نیز صادق است. بدین ترتیب، اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که طول بازه ۱۰ روزه، مناسبترین انتخاب برای بازه‌های زمانی است که هر کدام به وسیله یک روز نمونه،

Nichita و همکارانش [۱۶] استفاده شده است. در این مرجع نشان داده شده است که مدل Von Karman [۱۵]، مؤلفه اغتشاشی سرعت باد را در بازه‌های ثانیه، دقیقه و یا ساعت، با توجه به سرعت باد میانگین، شدت اغتشاش و طول اغتشاش، به خوبی برازش می‌کند.

درازمدت و میان مدت سرعت باد را بخوبی نمایش می‌دهد، لیکن حاوی اطلاعات سرعت باد کوتاه مدت نیست. برای اضافه کردن این مؤلفه‌های سریع (اجزای اغتشاشی) به الگویی که برای سرعت باد هر بازه انتخاب شده است (روزی که دارای کوچکترین ZM است)، از نتایج کار



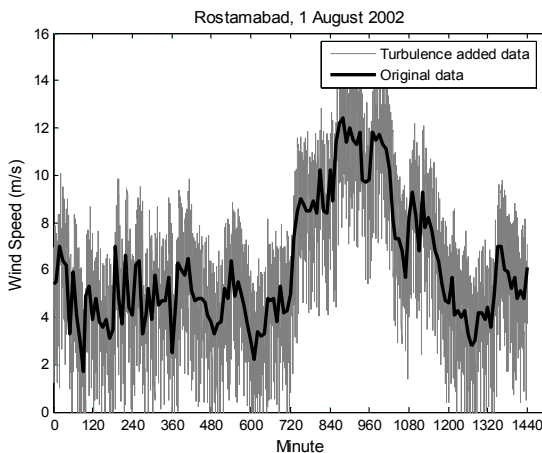
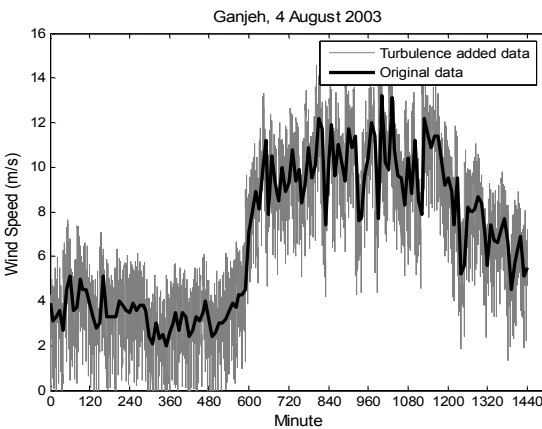
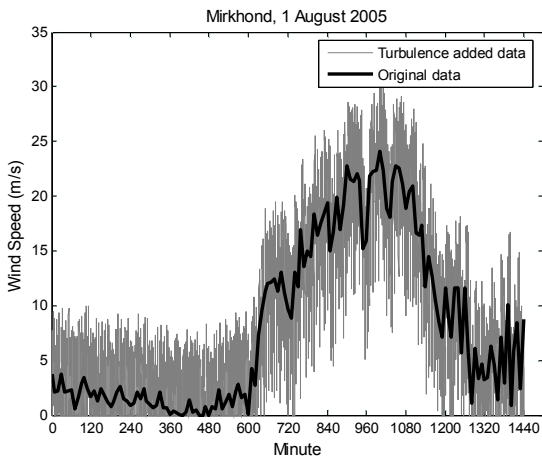
شکل ۴. تغییرات سرعت و جهت باد، چهار روز اول اوت ۲۰۰۳-۲۰۰۵، می‌خوانند.



شکل ۵. تغییرات سرعت و جهت باد، چهار روز اول اوت ۲۰۰۳-۲۰۰۵، رستم آباد.

جدول ۲. ZM_{min} و روز نمونه مربوطه برای سایت های میرخوند، گنجه و رستم آباد.

Length (day)	ZM_{min} for spd & dir	Representative day for spd & dir	ZM_{min} for spd only	Representative day for spd only	ZM_{min} for dir only	Representative day for dir only
Mirkhond:						
2	0.006462	01-August-03	0.009597	01-August-03	0.003327	01-August-03
4	0.02034	01-August-05	0.03649	04-August-02	9.37E-05	04-August-03
5	0.008967	01-August-05	0.01685	04-August-02	0.001087	04-August-02
6	0.01139	06-August-02	0.01983	06-August-02	0.000585	04-August-03
7	0.001006	01-August-03	9.24E-05	03-August-02	0.000443	06-August-02
8	0.02694	05-August-03	0.03738	08-August-04	0.001228	01-August-05
9	0.005277	01-August-05	0.00175	05-August-03	0.003831	06-August-03
10	0.002838	01-August-05	0.002357	01-August-05	0.003319	01-August-05
11	0.01045	01-August-05	0.01301	05-August-03	0.001436	01-August-05
12	0.01793	05-August-03	0.02753	05-August-03	1.2E-05	01-August-05
13	0.01737	05-August-03	0.02871	05-August-03	0.000321	01-August-05
14	0.01606	05-August-03	0.02647	05-August-03	0.000558	01-August-05
15	0.01605	05-August-03	0.025161	05-August-03	0.001276	01-August-05
Ganjeh:						
2	0.144	01-August-03	0.01257	02-August-05	0.2233	01-August-03
4	0.0756	04-August-03	0.008229	03-August-05	0.1019	04-August-03
5	0.06715	04-August-03	0.005659	03-August-05	0.07032	04-August-03
6	0.05178	04-August-03	0.00542	02-August-05	0.06599	04-August-03
7	0.0403	04-August-03	0.01486	02-August-05	0.06396	04-August-03
8	0.03704	04-August-03	0.006865	04-August-03	0.06721	04-August-03
9	0.02862	04-August-03	0.004303	04-August-03	0.05163	04-August-03
10	0.02078	04-August-03	0.005137	04-August-03	0.0238	04-August-03
11	0.02271	04-August-03	0.001367	02-August-05	0.01485	04-August-03
12	0.03191	04-August-03	0.001025	02-August-05	0.03079	04-August-03
13	0.03576	04-August-03	0.004939	02-August-05	0.03445	04-August-03
14	0.03625	04-August-03	0.006519	02-August-05	0.0338	04-August-03
15	0.02979	04-August-03	0.004908	02-August-05	0.03059	04-August-03
Rostamabad:						
2	0.02673	01-August-02	0.007268	01-August-02	0.03992	02-August-03
4	0.01584	01-August-02	0.003714	03-August-05	0.004771	02-August-03
5	0.03983	01-August-02	0.01539	01-August-05	0.01048	04-August-04
6	0.0286	01-August-02	0.002799	01-August-05	0.006622	04-August-04
7	0.01031	01-August-02	0.005432	01-August-02	0.008699	02-August-03
8	0.008902	08-August-05	0.00107	08-August-05	3.62E-05	02-August-03
9	0.008002	08-August-05	0.001584	04-August-02	0.003393	01-August-02
10	0.005989	01-August-02	0.003065	08-August-05	0.001341	01-August-02
11	0.004283	01-August-02	0.003063	04-August-03	0.002085	02-August-03
12	0.008202	01-August-02	0.000686	01-August-02	0.003444	09-August-02
13	0.007253	01-August-02	0.003826	11-August-05	0.002669	11-August-03
14	0.007377	01-August-02	0.003665	11-August-05	0.002677	11-August-03
15	0.00698	01-August-02	0.003716	11-August-05	0.002001	11-August-03



شکل ۶. افزودن مؤلفه اغتشاشی به سرعت باد.

مدل Von Karman طیف توان زیر را برای مؤلفه

اغتشاشی پیشنهاد می‌دهد:

$$S(\omega_i) = \frac{0.475\sigma^2 \frac{L}{\bar{v}}}{\left[1 + \left(\frac{\omega_i L}{\bar{v}}\right)^2\right]^{5/6}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در رابطه فوق σ ، L و \bar{v} به ترتیب، شدت و طول اغتشاش و سرعت میانگین هستند و ω_i فرکانس زاویه‌ای مؤلفه هارمونیک i -ام است. بر اساس این طیف پیشنهادی، دامنه هارمونیک فرکانس ω_i عبارت است از:

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S(\omega_i) + S(\omega_{i+1})]} (\omega_{i+1} - \omega_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

سرعت نهایی با جمع مؤلفه میانگین (در بازه ۱۰ دقیقه‌ای) و کلیه مؤلفه‌های هارمونیک (اغتشاشی) مورد نظر (در بازه فرکانسی مطلوب) با دامنه A_i و فرکانس ω_i به دست می‌آید.

با توجه به این مطلب، از روش Von Karman برای اضافه کردن مؤلفه اغتشاشی (کوتاه مدت) در بازه ۵ سیکل بر ساعت تا ۱۰۰۰ سیکل بر ساعت استفاده شده است. حد پایین این بازه فرکانسی، با توجه به تناوب زمانی بین داده‌های متوالی سرعت باد (۱۰ دقیقه) تعیین می‌شود و حد بالا نیز سریع‌ترین مؤلفه‌های مطلوب موجود در طیف سرعت باد است. نتیجه کار، الگوی کامل سرعت باد، برای بازه مورد نظر می‌باشد که دارای کلیه مؤلفه‌های بلند، میان و کوتاه مدت است.

در واقع، تمایز اصلی این کار در به دست آوردن سرعت باد باند وسیع با کار انجام شده [۱۶] در این است که در آنجا مؤلفه بلند مدت و میان مدت سرعت باد از مدل Van der Hoven به دست آمد، لیکن در کار ما، این مؤلفه‌ها برای هر محل مورد مطالعه، با استفاده مؤثر از داده‌های اندازه‌گیری شده

برای مقایسه وجود ندارد. اما برای سرعت باد، مدل‌های Von Karman و Van der Hoven موجود هستند که غیر از کار انجام شده در مرجع [۱۶] مدل LBM، تنها کارهای انجام شده قبلی برای مقایسه هستند.

از دو پارامتر آماری برای مقایسه استفاده می‌شود: معیار اول RMSE و معیار دوم COD یا R^2 است. RMSE، مقدار مطلق خطای موجود بین الگوی واقعی و مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، مدل پیشنهادی با دقت بیشتری داده‌های واقعی را نمایش می‌دهد. COD نیز کمیت بسیار مفیدی 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.

$$\text{COD} = 1 - \frac{\sigma_{y,x}^2}{\sigma_y^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

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

برای آن محل و به مدد روشی کاملاً ابتکاری و مدون، در هر بازه به دست می‌آید که نماینده بسیار دقیقی از تغییرات سرعت باد در آن بازه می‌باشد. شکل ۶ تاثیر افزودن مؤلفه‌های سرعت بالای سرعت باد را برای یک روز کامل نشان می‌دهد (روز نمونه برای ۱۰ روز اول اوت). ملاحظه می‌شود که شکل و توزیع اغتشاش کاملاً وابسته به مشخصات میان مدت و بلند مدت سرعت باد است.

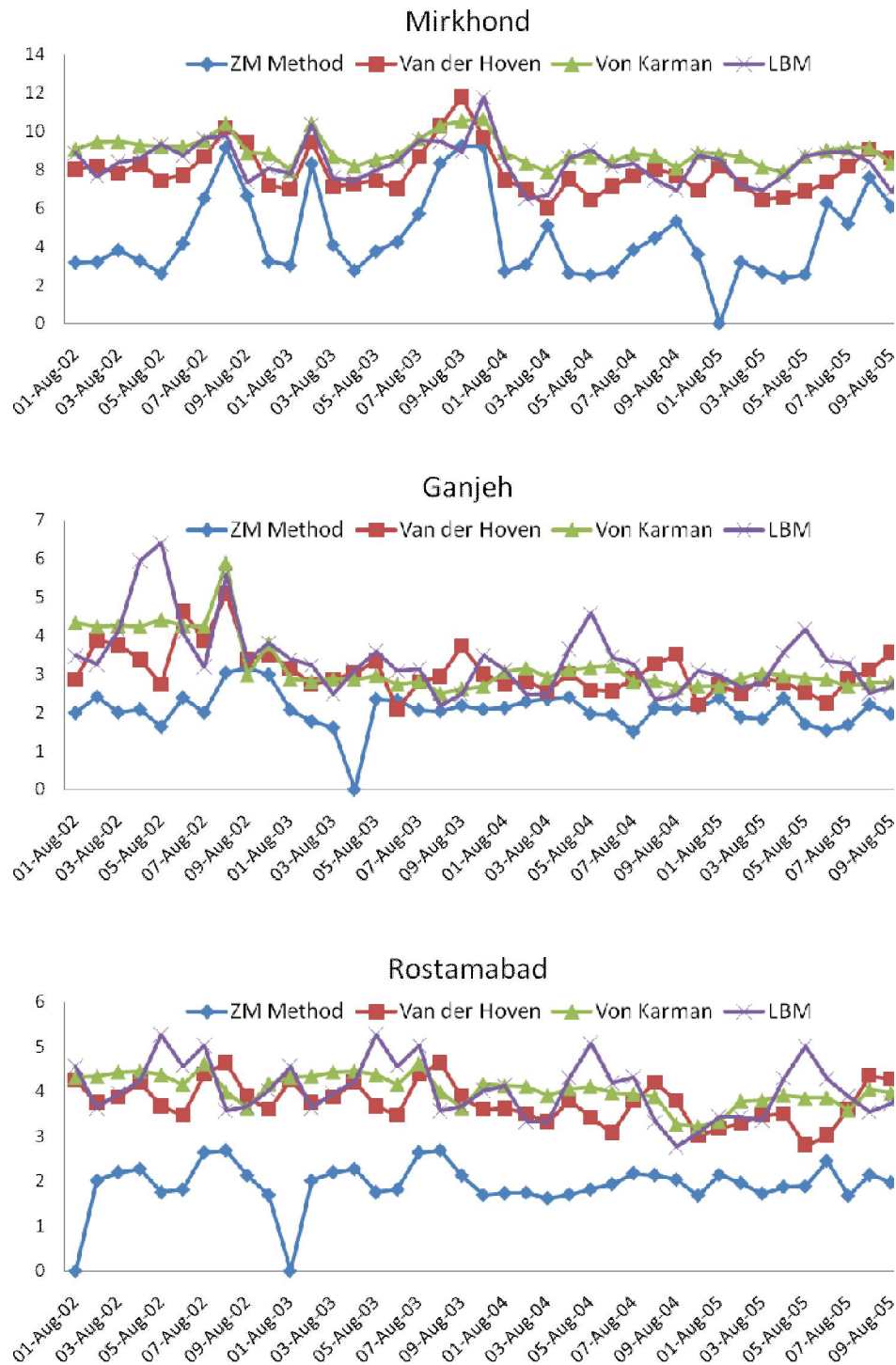
۴-۳- مقایسه کارایی روش پیشنهادی با سایر روش‌های متداول

جدول ۳، روز نمونه را در بازه ۱۰ روزه مورد مطالعه نشان می‌دهد. حال مؤلفه اغتشاشی به روشی که در بخش ۵ توضیح دادیم به سرعت باد کلیه روزهای در این بازه ۱۰ روزه و چهار سال متوالی و از جمله روز نمونه‌ای که به دست آورده‌ایم، اضافه می‌شود که شکل ۶ تاثیر افزودن مؤلفه اغتشاشی را برای روزهای نمونه نشان می‌دهد.

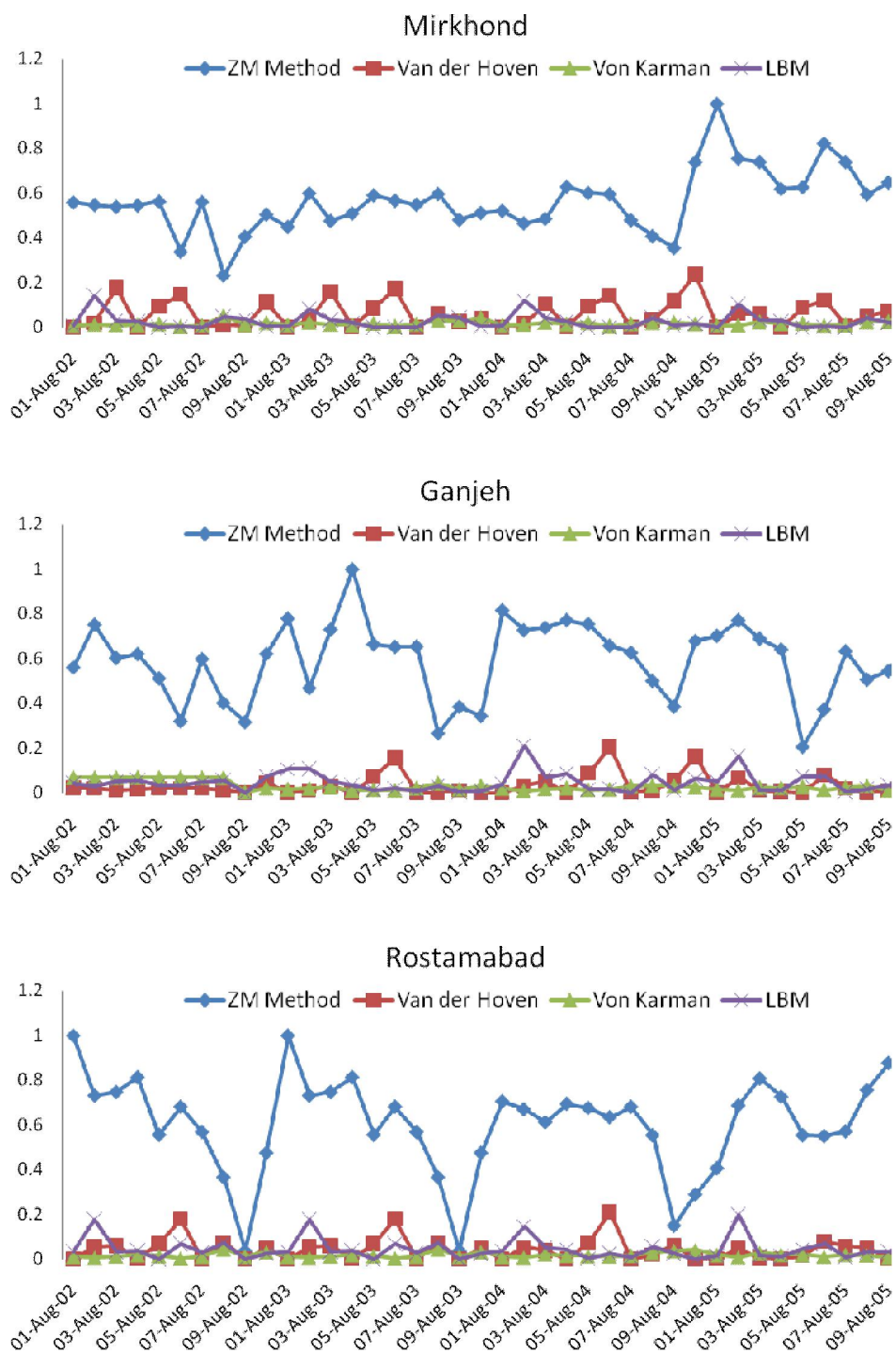
از طرفی همانگونه که اشاره شد، تاکنون هیچ مدل خاصی برای پیش‌بینی جهت باد در بازه‌های زمانی بلند و میان مدت ارائه نشده است، لذا در مورد جهت باد هیچ کار قبلی

جدول ۳. روز نمونه برای ۱۰ روز اول ماه اوت.

	Mirkhond	Ganjuh	Rostamabad
Representative day for spd & dir:	1-August-2005	4-August-2003	1-August-2002
Representative day for spd only:	1-August-2005	4-August-2003	8-August-2005
Representative day for dir only:	1-August-2005	4-August-2003	1-August-2002



شکل ۷. مقایسه مقادیر RMSE برای روش‌های مختلف و سه سایت.



شکل ۸ مقایسه مقادیر COD برای روش‌های مختلف و سه سایت مورد مطالعه.

بهترین نحو ممکن بیابند. در روش ارائه شده در این تحقیق، تمرکز بر روی یک مکان و استفاده مؤثر از داده‌های ثبت شده قبلی است تا با روشی ساده و به طرز بسیار مؤثرتری نسبت به روش‌های قبلی از داده‌های موجود استفاده شود و الگوی بسیار دقیق‌تری برای سرعت و جهت باد تعیین شود تا هم در بازه‌های زمانی کوتاه و هم بازه‌های زمانی متوسط و بلند، پیش‌بینی‌های دقیقی از سرعت و جهت باد ارائه شود. به علاوه، تأثیرات اغتشاشی نیز به کمک مدل Von Karman به الگوی سرعت باد به دست آمده اضافه شد. همچنین ارائه الگوی مناسب برای جهت باد که روش‌های قبلی فاقد این توانایی هستند نیز از مزایای روش پیشنهادی است.

الگوهای سرعت باد برای سه محل بادی مختلف در ایران، با ویژگی‌های بادی متفاوت به دست آمد و نتایج برای آنها ارائه شدند. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این کار 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.

مراجع

- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. "Wind Energy Handbook", *Chichester: John Wiley and Sons*; 2001.
- 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.
- Spera DA. "Wind Turbine Technology", New York: *ASME Press*; 1994.
- 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.
- 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.
- Wang X, Sideratos G, Hatzigiorgiou N, Tsoukalas LH.

دو کمیت اخیر، انحراف معیار داده‌های پیش‌بینی شده را از مقدار میانگین داده‌های واقعی و مقدار واقعی تک تک داده‌ها نشان می‌دهند.

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ip})^2 \right]^{1/2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

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 شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که مقدار متوسط RMSE برای همه سال‌ها و در هر سه محل، در روش پیشنهادی، بسیار کمتر از سایر روش‌هاست، به‌علاوه 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 می‌شود، مقادیر COD در روش پیشنهادی، بسیار بزرگتر از بقیه روش‌ها هستند. این بدان معناست که روش اخیر، الگویی بسیار مشابه الگوی واقعی سرعت باد در هر محل مورد نظر را ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، با توجه به مشخصات بادی کاملاً متفاوت محل‌های مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، برای مشخصات بادی مختلف، روش بسیار مقاومی است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین الگوی پارامترهای باد (سرعت و جهت) ارائه شده است. روش مشابهی به وسیله سایر محققان در چند زمینه دیگر مورد استفاده قرار گرفته است که در این مقاله، آن‌گونه اصلاح شده‌اند تا توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت و جهت باد را، به

- Portilla-Figueras A, Prieto L, Correoso F. "Accurate short-term wind speed prediction by exploiting diversity in input data using banks of artificial neural networks", *Neurocomputing* 2009; 72: 1336-1341.
13. Monfared M, Rastegar H, Kojabadi HM. "A new strategy for wind speed forecasting using artificial intelligent methods", *Renewable Energy* 2009; 34: 845-848.
 14. Van der Hoven I. "Power spectrum of horizontal wind speed in frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour", *Journal of the Atmospheric Sciences* 1957; 14(2): 160-4.
 15. Welfonder E, Neifer R, Spanner M. "Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines", *Control Engineering Practice* 1957; 5(1): 63-73.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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. 111-118.
 7. Louka P, Galanis G, Siebert N, Kariniotakis G, Katsafados P, Pytharoulis I, Kallos G. "Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using Kalman filtering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2008; 96:2348-2362.
 8. Mitchell SJ, Lanquaye-Opoku N, Modzelewski H, Shen Y, Stull R, Jackson P, Murphy B, Ruel JC. "Comparison of wind speeds obtained using numerical weather prediction models and topographic exposure indices for predicting wind throw in mountainous terrain", *Forest Ecology and Management* 2008; 254: 193-204.
 9. 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 Technolo* , 18-21 Dec. 1994, p. 381-5.
 10. Barbounis TG, Theocharis JB. "A locally recurrent fuzzy neural network with application to the wind speed prediction using spatial correlation", *Neurocomputing* 2007; 70: 1525-1542.
 11. Carolin Mabel M, Fernandez E. "Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study", *Renewable Energy* 2008; 33: 986-992.
 12. Salcedo-Sanz S, Perrez-Bellido AM, Ortiz-Garcia EG, "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.