

ارزیابی انرژی باد بوسیله مدل WRF؛ مطالعه موردی برای استان کرمان

رضا اسماعیل پور^۱، حسین ملکوتی^۲، محسن عراقی زاده^۳

۱- کارشناس همدیدی اداره کل هواشناسی استان کرمان

۲- حسین ملکوتی؛ استادیار دانشگاه هرمزگان

۳- محسن عراقی زاده؛ مدیر کل اداره کل هواشناسی استان کرمان

چکیده

توسعه مزارع بادی جدید مستلزم ارزیابی دقیق از پتانسیل باد در طولانی مدت است. از این ارزیابی‌ها جهت تصمیم‌گیری برای نصب یک مزرعه بادی در یک مکان ویژه استفاده می‌شود. استفاده از مدل‌های میان‌مقیاس یکی از روش‌های جدید پتانسیل‌سنجی برای این منظور است. این مطالعه نسل جدیدی از مدل عددی وضع هوا به نام مدل میان‌مقیاس WRF را مورد بحث قرار می‌دهد.

در این روش برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بایگانی شده باد حاصل از تحلیل‌نهایی مدل جهانی، از مدل WRF استفاده شد و خروجی مدل WRF توسط تحلیل‌گر WASP پس‌پردازش و انرژی باد ارزیابی شد. سرانجام دقت مدل با مقایسه خروجی WASP از داده‌های دکل سانا (که ارزیابی واقعی تولید نیروست) سنجیده شد.

مطالعه موردی برای استان کرمان انجام شد؛ الف- به منظور ارزیابی پتانسیل باد در منطقه، داده‌های باد دکل‌های سانا (رفسنجان، ارزوئیه و شهر بابک) مستقیماً بوسیله نرم‌افزار WASP تحلیل شدند که در بین آن‌ها رفسنجان با چگالی انرژی ۲۰۲ وات بر متر مربع، بیشترین مقدار را دارا بود. ب- مدل WRF برای ۱۵ روز ابتدایی آوریل ۲۰۰۷ اجرا شد و خروجی آن در موقعیت دکل رفسنجان اعتبارسنجی گردید که مدل با ۱/۹۶٪ اختلاف نسبت به مقادیر مشاهده‌ای، چگالی انرژی را برآورد کرد. ج- با استفاده از خروجی مدل WRF، اطلس باد منطقه محاسبه شد که الگوی مناسبی از میانگین باد در استان کرمان می‌باشد.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد، مدل‌سازی میان‌مقیاس هواشناسی، ریزمقیاس‌نمایی

مقدمه

به دلیل محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آثار مخرب زیست محیطی آن‌ها، انرژی باد به عنوان یک انرژی پاک و دائمی، مورد توجه قرار می‌گیرد.

مساله اصلی که کشورها را مجبور به توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کرده است، موضوع امنیت انرژی است. باد به عنوان یکی از امن‌ترین و اقتصادی‌ترین منابع تأمین انرژی، می‌تواند تا حدودی موضوع امنیت انرژی را برای کشورها حل کند، زیرا انرژی باد یک منبع داخلی است که نیازی به سوخت ندارد و منابع آن به اندازه کافی در طبیعت وجود دارد. افزایش هزینه برق از منابع سنتی باعث می‌شود که انرژی باد در آینده رقابت‌پذیری بیشتری داشته باشد، که از این میان اتحادیه اروپا سهم ۲۰٪ انرژی تجدیدپذیر از کل انرژی سوختی را در سال ۲۰۲۰ هدف کرده است. در اروپا توسعه انرژی باد امروزه به عنوان یک تکنولوژی تکامل یافته برای دستیابی به بخش بزرگی از آن هدف، برنامه‌ریزی شده است.

ایران دارای سرزمین پهناور و سواحل طولانی است و از همین رو از نظر منابع بادی کشوری غنی به حساب می‌آید. به علت قرار گرفتن مناطقی با کاربری متفاوت در مجاورت هم، مانند دریا و خشکی همچنین بیابان و کوهستان، یک تضاد دمایی شدید بین دو منطقه متفاوت برقرار می‌شود که همین اختلاف دما باعث ایجاد بادهایی در مقیاس محلی می‌شود. این نوع بادهای الگوهای سالانه دارند یعنی در طول یک سال همیشگی هستند اما در فصل‌های مختلف با شدت و ضعف‌هایی همراه هستند.

تاکنون ارزیابی‌های اندکی در سطح ملی برای منابع باد ایران صورت گرفته است. از جمله در دهه اخیر، از سال ۱۳۸۵ تا کنون، سازمان انرژی‌های نو (سانا)، با نصب دکل‌های پراکنده در سراسر ایران داده‌های باد را از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ میلادی به مدت دو سال ثبت و بایگانی کرده است و بوسیله نرم‌افزارهای اندازه‌گیری و ارزیابی انرژی باد از قبیل Windpro، اطلس باد مشاهداتی ایران را تهیه کرده است.

یک مطالعه سودمند مستلزم ارزیابی دقیق از تولید انرژی در آینده است. روش معمول برای ارزیابی پتانسیل باد، سنجش و

اندازه‌گیری داده‌های باد (سمت و سرعت باد) در یک دوره زمانی یک تا سه ساله توسط سایت‌های دکل است. دکل در مدت یک سال قابل نصب و اندازه‌گیری داده‌های باد است. بنابراین این یک روش طولانی مدت است. علاوه بر آن، این دکل‌ها پرخرج هستند و ابزار اندازه‌گیری آنها هیچ کدام دقیق نیستند و مشکلاتی از قبیل نقص، یخ زدگی و عمر باطری آنها را غیر قابل اعتماد می‌کند. در نهایت همبستگی نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به دکل جهت ارزیابی پتانسیل بلندمدت نیز خطاهایی را نمایان می‌کند. بنابراین استفاده از پیش‌بینی‌های بلندمدت باد بوسیله روش‌های عددی جدید شاید یک راه حل باشد.

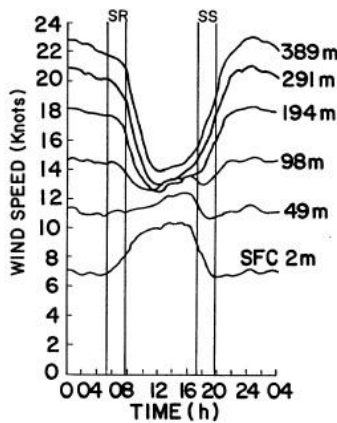
پیش‌بینی عددی وضع هوا همزمان با توسعه رایانه‌ها، پیشرفت کرد و مدل‌های جدید (مدل‌های میان‌مقیاس) به تازگی پدیدار شدند. نام مدل میان‌مقیاس به مدل‌هایی که با ابعاد چند تا چندصد کیلومتر سروکار دارند، اشاره دارد. این ابعاد کمتر از مدل‌های رایج پیش‌بینی جهانی وضع هواست. مدل‌های جهانی، باد را در مقیاس بزرگ ابعاد حدود هزار کیلومتر ارائه می‌دهند که به الگوی جهانی باد معروفند و مدل‌های میان‌مقیاس، الگوی باد را در یک منطقه خاص ارائه می‌دهند که از نظر همدیدی این شرایط باد قابل تجزیه و تحلیل است. به دلیل اهمیت موضوع در بعضی از کشورهای صنعتی و پیشرفته حتی از مدل‌هایی با مقیاس حدود چند تا چندصد متر با عنوان مدل خردمقیاس، الگویی دقیق از شرایط باد در ابعاد کوچک تهیه کرده‌اند و جهت راه‌اندازی مزارع بادی، مورد ارزیابی قرار می‌دهند. این روش اندازه‌گیری باد به روش ریز مقیاس‌نمایی معروف است، که در آن جهت ارزیابی دقیق‌تر، از داده‌های خروجی مدل بزرگ‌تر به عنوان ورودی مدل کوچک‌تر استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

یک گره عمومی - تجربی برای توزیع سرعت میانگین که در کارهای عملیاتی باد (پتانسیل‌سنجی باد) به کرات از آن استفاده شده، نیمرخ قانون توان می‌باشد.

$$\frac{\bar{V}}{V_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^m \quad (1)$$

گسترده تا زمان بعد از ظهر می‌رسد و هنگام غروب با یک شیب تند کاهش می‌یابد. با توجه به شکل در ارتفاعات بین ۳۰ تا ۱۰۰ متری، باد از پایداری نسبی برخوردار است یعنی تغییرات سرعت باد در طول شبانه روز به حداقل رسیده است. بنابراین این ارتفاعات مناسب جهت استقرار هاب (مرکز چرخنده توربین بادی) هستند.



شکل شماره ۱- تغییرات میانگین روزانه سرعت باد بر اساس یک سال در ارتفاعات مختلف لایه مرزی نزدیک شهر اکلاهما (آریا، ۲۰۰۱)

تولید انرژی از باد توسط توربین‌های بادی نیازمند برآورد دقیق سرعت باد می‌باشد. اصول اساسی تبدیل باد به نیرو، از ارتباط بین آنها حاصل می‌شود. به طور خلاصه نیرویی که از باد استحصال می‌شود با مکعب سرعت باد متناسب است. مرتبه توان سه سرعت باد، اهمیت ارزیابی دقیق تر آن را جهت تولید نیرو، بیشتر و بیشتر می‌کند. معادله نیرو برای سرعت باد، از انرژی جنبشی جاری حاصل می‌شود.

$$E = \frac{1}{2} mu^2 \quad (3)$$

که m ، جرم بسته هوا و u سرعت این المان است. نیرو (p) از تغییرات انرژی نسبت به زمان بدست می‌آید.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} u^2 \quad (4)$$

که سرعت، در یک حجم بسته هوا بایستی ثابت فرض شود. طبق رابطه چگالی $m = \rho AL$ ؛ L طول حجم ثابت هوا و A نیز سطح مقطع بسته هوا (متناسب با سطحی که تیغه توربین جاروب می‌کند) است. بنابراین با ثابت نگه داشتن A و ρ ، جرم و در نتیجه L با زمان تغییر می‌کند.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho AL) = \rho A \frac{dL}{dt} = \rho Au \Rightarrow P = \frac{1}{2} \rho Au^3 \quad (5)$$

که $\sqrt{V_z}$ ، سرعت باد در ارتفاع مرجع Z_r و m یک مقدار عددی، کمتر یا مساوی یک می‌باشد. این قانون اساس نظری قوی ندارد، ولی بطور تقریبی روی ناحیه وسیعی از تغییرات ناهمواری سطح و پایداری جواب قابل قبولی می‌دهد. مقدار m با افزایش ناهمواری سطح (ثابت بودن پایداری) افزایش می‌یابد.

جهت باد در ارتفاع‌های مختلف نیز در برآورد انرژی باد بسیار مهم است. از آنجا که نیروهای گرادیان فشار، کوریولیس و اصطکاک باعث تغییر جهت باد در بالای لایه سطحی می‌شوند، این بار وان آلدن (۱۹۸۵) رابطه تجربی زاویه چرخش (α) را نسبت به باد نزدیک بدست آورد.

$$\frac{\alpha(z)}{\alpha(h)} = d_1 \left[1 - e^{-\frac{zd_2}{h}} \right] \quad (2)$$

این رابطه بر اساس دیدبانی‌هایی که روی یک دکل ۲۰۰ متری در کابا در نترلند انجام شد بدست آمد. که $d_1 = 1/58$ و $d_2 = 0/1$ ، ثابت‌های تجربی این رابطه هستند. رابطه‌ای جامع و کاربردی برای چرخش کامل باد، در عرض لایه مرزی وجود ندارد. میزان چرخش باد با ارتفاع، به ناهمواری سطح، پایداری، کژفشاری، عرض جغرافیایی و... بستگی دارد.

تغییرات روزانه سمت و سرعت باد در لایه مرزی سیاره‌ای از مشاهدات جمع‌آوری شده در مکان‌های مختلف، استنباط شده است. برآورد نیمرخ‌های باد در طول یک چرخه روزانه ممکن است تغییرات فاحشی از یک روز به روز دیگر نمایش دهد که این در اثر تغییرات شرایط همدیدی هوا و توازن انرژی سطحی می‌باشد. بنابراین وقتی میانگین‌گیری در یک بازه زمانی بیشتر از یک ماه انجام شود، تغییرات روزانه باد بهتر تشخیص داده می‌شود.

شکل ۱ تغییرات روزانه سرعت باد را نمایش می‌دهد که میانگین‌گیری یک‌ساله از داده‌های مشاهداتی چندین سنجنده در ارتفاعات مختلف است. این اندازه‌گیری‌ها روی یک دکل ۵۰۰ متری نزدیک شهر اکلاهما آمریکا توسط کرافورد و هاتسون در سال ۱۹۷۳ انجام شد. بازه‌های زمانی طلوع و غروب و همچنین ارتفاعات مشاهداتی در شکل نشان داده شده است. توجه کنید سرعت باد در نزدیک سطح زمین بعد از طلوع به سرعت افزایش می‌یابد و به یک بیشینه

با توجه به وجود داده‌های صفر در داده‌های سرعت باد، باید از توزیع هیبرید ویبال که در حقیقت توزیعی با میانگین وزنی از داده‌های صفر و غیر صفر است، استفاده شود.

مدل سازی عددی باد

مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP)، برنامه‌های رایانه‌ای هستند که معادلات دینامیک سیالات حاکم بر جو را حل می‌کنند، این معادلات از قبیل پایستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی در یک شبکه سه بعدی هستند. یک مدل همچنین شامل تعدادی طرحواره‌های پارامترسازی است که در حیطه زیرشبکه فیزیکی محاسبه می‌شود و قابل حل بوسیله مدل عددی نیستند.

WRF

WRF مدل پیش‌بینی و پژوهشی وضع هوا، توسعه یافته بوسیله NCAR و مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) و همچنین چندین آژانس و آزمایشگاه دیگر می‌باشد. WRF یک برنامه نیست، بلکه مجموعه‌ای از برنامه‌هاست. اولین برنامه هسته محاسبه گر و شبیه‌ساز خودش می‌باشد و برنامه‌های موجود دیگر برای پردازش ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده می‌شود. این مدل بصورت رایگان و تمام وقت در دسترس کاربران از قبیل دانشمندان، شرکت‌ها و افراد حقیقی دیگر در هر گوشه از جهان است. مدل WRF دارای دو نوع جدید است الف) WRF-NAM؛ مدل میان‌مقیاس غیر هیدروستاتیک که بیشتر برای پیش‌بینی‌های عملیاتی وضع هوا استفاده می‌شود. ب) WRF-ARW؛ مدل میان‌مقیاس پیشرفته که دارای اجرای کندتر و پیچیده‌تر است و برای مقاصد پژوهشی جو استفاده می‌شود.

NCL

NCL در مدل WRF وجود ندارد، اما نرم‌افزاری است که بوسیله NCAR به خوبی توسعه یافته است و برای استخراج و نقشه کردن فایل‌های خروجی با فرمت NETCDF مفید است. با استفاده از یک برنامه NCL می‌توان کمیت‌های

با توجه به مطالب قبل، چگالی توان باد نیز با توان سوم سرعت باد متناسب است که مقدار مورد انتظار یا میانگین آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E(P) = \frac{1}{2} E(\rho)E(u^3) \quad (6)$$

در این رابطه $E(P)$ میانگین چگالی توان باد، $E(u^3)$ میانگین توان سوم سرعت باد و $E(\rho)$ میانگین چگالی هواست. معمولاً در مطالعات چگالی توان باد، توزیع ویبال برای نمایش تابع چگالی احتمال سرعت بادهای مورد نظر باد بکار می‌رود. این تابع برای برآورد توزیع پیوسته باد از مقادیر گسسته مشاهده‌ای بسیار مناسب است. بیان ریاضی تابع چگالی ویبال برای متغیر u عبارتست از:

$$F(u, k, A) = \left(\frac{k}{A}\right) \times \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right] \quad (7)$$

که k پارامتر شکل و A پارامتر مقیاس است، که در این جا آنها k و A دیدبانی نامیده می‌شوند. در صورتی که سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه باشد، پارامتر k بدون بعد و A بر حسب متر بر ثانیه بدست می‌آید. میانگین و انحراف معیار توزیع سرعت باد به ترتیب از روابط ۸ و ۹ بدست می‌آیند.

$$U = A\Gamma(1 + 1/k) \quad (8)$$

$$\sigma = A \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

که در آن تابع شناخته شده گاما

$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt$ $\left(\frac{u}{A} = t\right)$ است. معادله ۹ را می‌توان به صورت زیر برآورد کرد:

$$\sigma = Uk^{-0.921} \quad (10)$$

در صورت استفاده از تابع ویبال $E(u^3)$ از رابطه ۱۱ بدست می‌آید:

$$E(u^3) = \sigma^3 [\alpha + 3U/\sigma + (U/\sigma)^3] \quad (11)$$

U و σ ، میانگین و انحراف معیار از روابط قبلی محاسبه می‌شوند و α نیز چگالی توزیع سرعت باد است. نکته جالب این است که با در نظر گرفتن تبدیل $y = u^3$ ، تابع توزیع فراوانی تجمعی توان سوم سرعت باد نیز بصورت رابطه ۱۲ خواهد بود:

$$F(y) = 1 - \exp(-A^{-k}y^{\frac{k}{3}}) \quad (12)$$

بحث و نتایج

مطالعه موردی برای استان کرمان انجام گرفت که شامل چند مرحله است.

الف) بررسی شرایط بالقوه باد در منطقه (پتانسیل سنجی) با استفاده از داده‌های مشاهداتی؛

سازمان انرژی‌های نو از سال ۱۳۸۵ اقدام به نصب سایت‌های دکل‌ی در سرتاسر ایران کرده‌است. این دکل‌ها در ارتفاعات مختلف ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری مجهز به سنجنده‌هایی شده‌اند که داده‌های هواشناسی از قبیل سمت و سرعت باد، دما، رطوبت و تشعشع را به مدت دو سال از سپتامبر ۲۰۰۶ تا جولای ۲۰۰۸ اندازه‌گیری کرده‌اند. بدین‌گونه که توسط یک سیستم رایانه‌ای متصل به سنجنده‌ها کمیت‌ها هر ۱۰ دقیقه یک‌بار میانگین‌گیری، ثبت و بایگانی شده‌اند.

چون دکل‌ها طبق برنامه‌ریزی کشوری نصب شده‌اند متأسفانه فقط سه دکل در محدوده استان کرمان قرار گرفته‌اند و شامل دکل‌های رفسنجان، ارزوئیه و شهر بابک می‌باشند. مشخصات دکل‌ها در جدول ۱ آمده‌است. شکل ۲ نیز موقعیت دکل‌ها را در استان نمایش می‌دهد.

دلخواه هواشناسی را برای هر نقطه از شبکه با مشخصات جغرافیایی معین در ترازها و ارتفاعات دلخواه استخراج کرد.

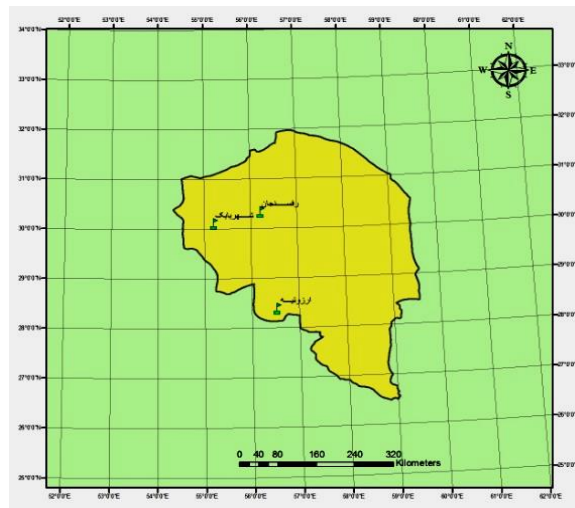
WASP

WASP شامل یک برنامه کاربردی و یک تحلیل‌گر اطلس باد می‌باشد که توسط آزمایشگاه Riso دانمارک توسعه یافته است.

WASP climate analysis برنامه‌ای است که به انجام تجزیه و تحلیل سری زمانی داده‌های هواشناسی می‌پردازد. بدین ترتیب که تحلیل‌گر ابتدا سری‌های زمانی و فراوانی داده‌های باد را در بازه‌ی زمانی مشخص شده رسم می‌کند، سپس با انجام تحلیل داده‌ها بر اساس توزیع احتمالی ویبال، خروجی به صورت نمودار گلباد و نمودار ویبال حاصل خواهد شد. WASP Engineering برنامه کاربردی موسسه Riso می‌باشد که با پرداخت هزینه کاربری به موسسه امکان استفاده از آن میسر می‌شود، این نرم‌افزار مهندسی در واقع یک مدل ریزمقیاس نمای خطی است که با دقت یک متر مکان نصب هر توربین بادی را مشخص می‌کند.

جدول شماره ۱: مشخصات دکل‌های سانا در منطقه مورد مطالعه

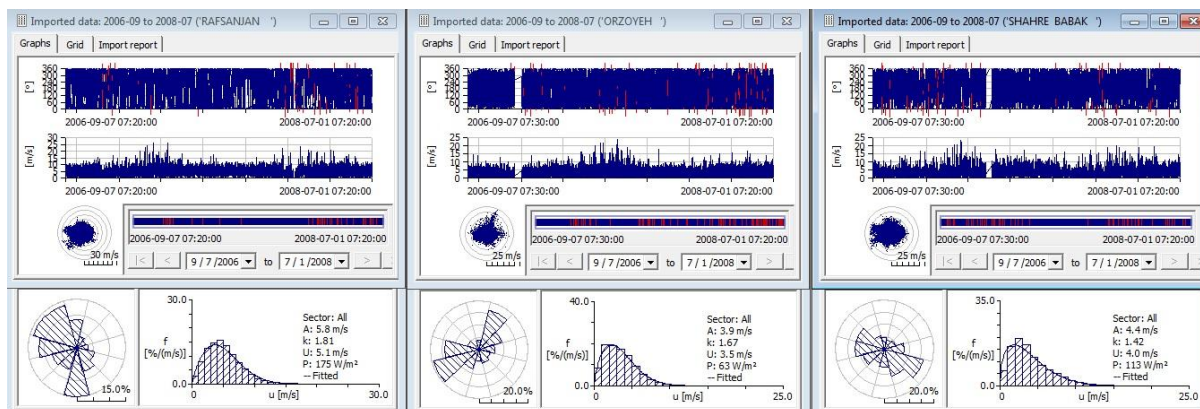
دکل سانا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
رفسنجان	۳۰° ۱۹' ۱۵/۹۶"	۵۶° ۱۳' ۱۹/۰۲"
ارزوئیه	۲۸° ۲۲' ۲۴/۸۹"	۵۶° ۳۲' ۳۷/۱۴"
شهر بابک	۳۰° ۰۵' ۳۱/۵۶"	۵۵° ۱۳' ۰۹/۹۵"



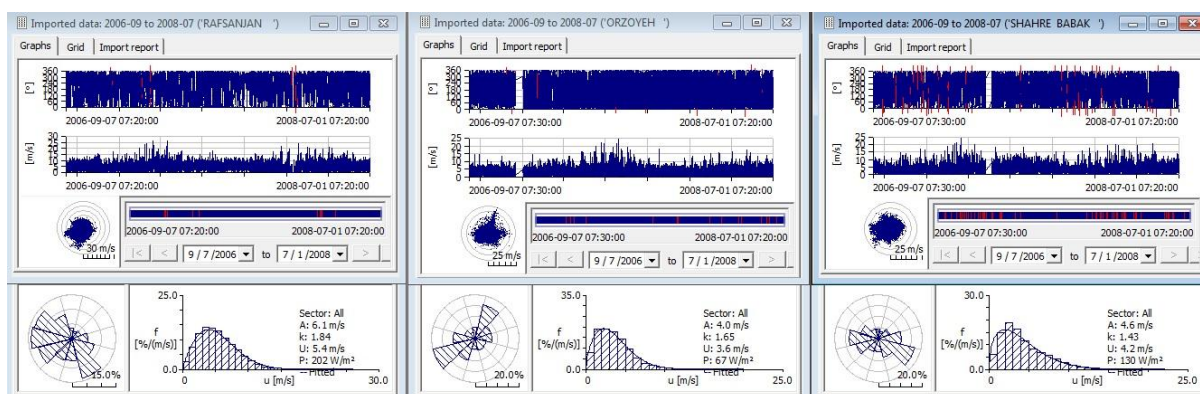
شکل شماره ۲- موقعیت دکل‌های سانا در استان کرمان (نقشه GIS)

نرم افزار با برآزش داده های گسسته باد، یک توزیع پیوسته از سرعت باد (توزیع ویبول) بدست آورد و سرانجام میانگین سرعت باد، توان سوم سرعت و در نهایت چگالی انرژی باد را در بازه های زمانی دو ساله محاسبه کرد. شکل های ۳ و ۴ نتایج تحلیل های نرم افزار WasP از دکل های سانا است.

داده های بایگانی دکل ها پس از یک نامه نگاری با سازمان انرژی های نو دریافت گردید. از این داده ها با فرمت TXT جهت استفاده در تحلیل گر WasP استفاده شد. داده های هر دکل در ارتفاع ۴۰ و ۳۰ متری به صورت مجزا به تحلیل گر WasP داده شد که البته خوراندن داده ها به نرم افزار نیاز به راهنمایی از موسسه RISO در دانمارک بود که انجام شد.



شکل شماره ۳- نتایج پتانسیل سنجی WasP از داده های ۳۰ متری دکل های سانا از سپتامبر ۲۰۰۶ تا جولای ۲۰۰۸؛ دکل رفسنجان (سمت چپ)، دکل ارزوئیه (وسط)، دکل شهر بابک (سمت راست).

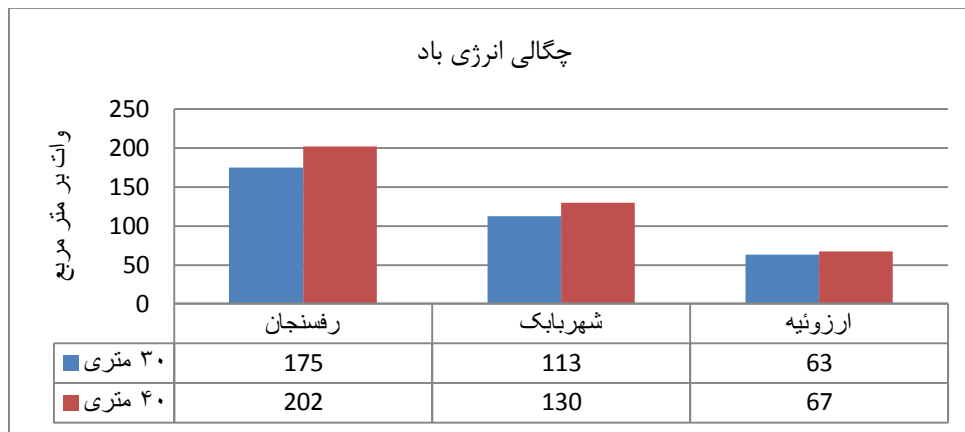


شکل شماره ۴- نتایج پتانسیل سنجی WasP از داده های ۴۰ متری دکل های سانا از سپتامبر ۲۰۰۶ تا جولای ۲۰۰۸؛ دکل رفسنجان (سمت چپ)، دکل ارزوئیه (وسط)، دکل شهر بابک (سمت راست).

میزان انرژی را در ارتفاعات و مکان های مختلف نمایش می دهد، که دکل رفسنجان با چگالی انرژی ۲۰۲ وات بر مترمربع بیشترین انرژی در ارتفاع ۴۰ متری را داراست.

شکل ها نشان می دهند که دکل رفسنجان و تا حدودی شهر بابک، با توجه به آستانه تولید انرژی ۱۰۰ وات بر مترمربع، از پتانسیل بادی خوبی برخوردار هستند. نمودار ۱ در یک نگاه

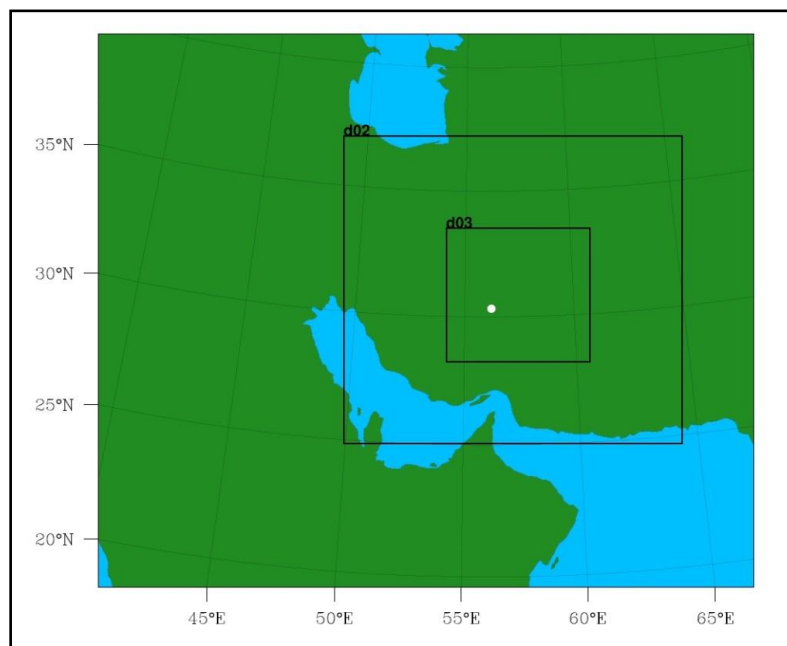
نمودار شماره ۱- میزان چگالی انرژی باد ۳۰ و ۴۰ متری دکل های سانا از سپتامبر ۲۰۰۶ تا جولای ۲۰۰۸



استفاده شد که جهت درک آن وقت زیادی صرف شد. از یک رایانه خانگی با تک هسته پردازش گر استفاده شد و مدل پیشرفته ARW نسخه ۳,۵ روی سیستم عامل لینوکس (فدورا ۱۷) نصب و راه اندازی شد.

سپس شبکه بندی افقی شامل سه حوزه تو در تو جهت شبیه سازی مدل WRF طراحی شد که داخلی ترین حوزه، محدوده استان کرمان را دربرگیرد. شکل ۵ این شبکه بندی را نمایش می دهد.

ب) اعتبارسنجی مدل WRF در موقعیت دکل رفسنجان
هدف اصلی در این مطالعه اعتبارسنجی مدل WRF در ریزمقیاس نمایی داده های باد حاصل از مدل جهانی است. برای این منظور بایستی داده های خروجی مدل WRF در موقعیت یکی از دکل های سانا توسط تحلیل گر WASP مورد ارزیابی قرار گیرند. در ابتدا داده های FNL (داده های تحلیل شده مدل جهانی) از سایت NOAA دریافت شد. این داده ها برای ۱۵ روز ابتدایی آوریل ۲۰۰۷ انتخاب شدند. برای راه اندازی مدل WRF از راهنمای چند صد صفحه ای آن



شکل شماره ۵- شبکه افقی مدل با سه حوزه تو در تو (لانه ای) که نقطه مشخص شده موقعیت دکل رفسنجان می باشد.

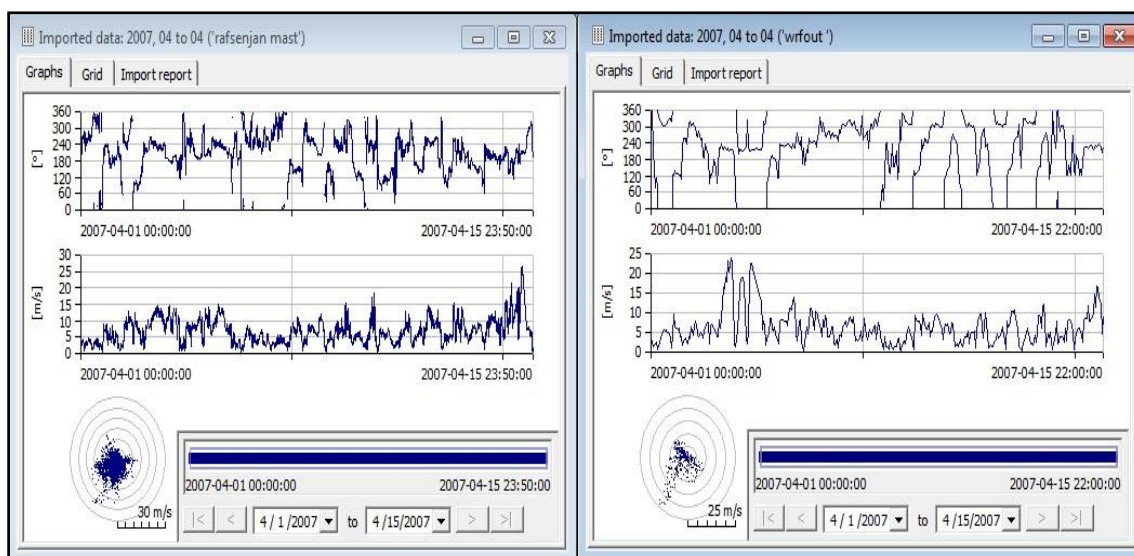
مدل با اجراهای کوتاه مدت یک روزه در موقعیت دکل رفسنجان حساسیت سنجی شد و نتیجه این اجراها پیکربندی دکل رفسنجان صورت می پذیرد. بنابراین اعتبارسنجی مدل فقط در موقعیت دکل رفسنجان صورت می پذیرد.

جدول شماره ۲- پارامترسازی مدل WRF

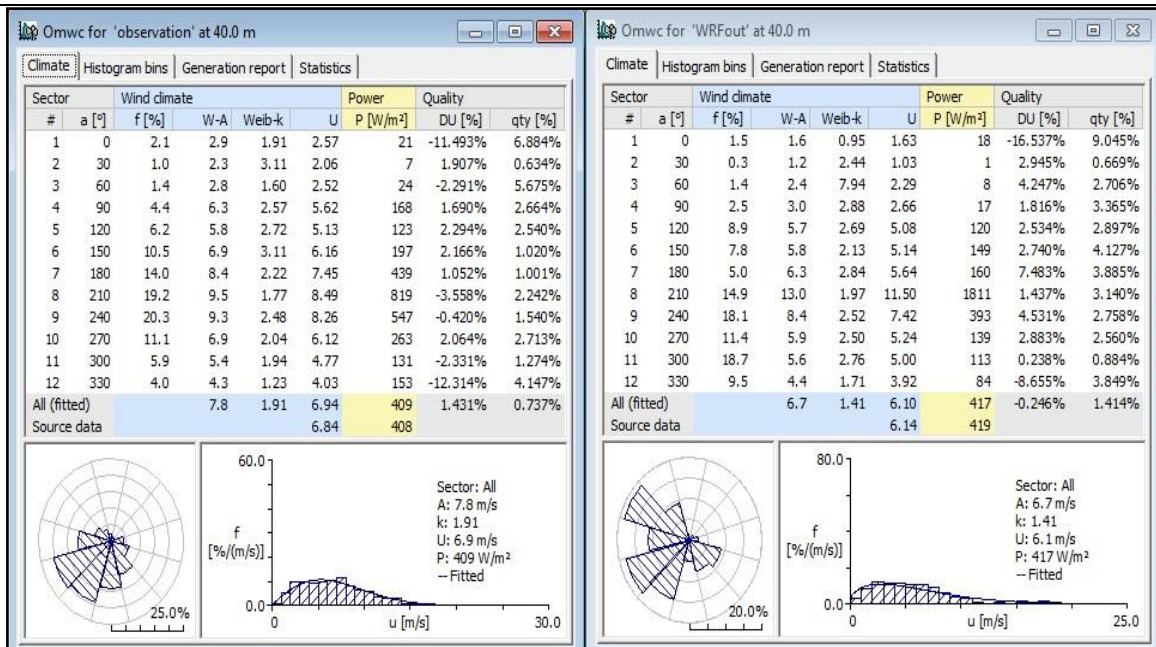
حوزه	تفکیک	شبکه بندی	تفکیک داده های جغرافیایی	طرحواره میکروفیزیک	طرحواره تابش طول موج بلند	طرحواره تابش طول موج کوتاه	طرحواره لایه مرزی	طرحواره سطح زمین	طرحواره لایه سطحی	پارامتر کومولوس
حوزه اصلی (۱)	۴۵۰۰۰ متر	۶۵*۵۵	۱۰ دقیقه	WSM 3-class	RRTM	Dudhia	YSU	Noah	Monin-obukhov	Kain-fritsch
حوزه شماره ۲	۱۵۰۰۰ متر	۱۰۰*۹۱	۲ دقیقه	WSM 3-class	RRTM	Dudhia	YSU	Noah	Monin-obukhov	Kain-fritsch
حوزه شماره ۳	۵۰۰۰ متر	۱۲۱*۱۱۲	۲ دقیقه	WSM 3-class	RRTM	Dudhia	YSU	Noah	Monin-obukhov	Kain-fritsch

تحلیل شدند و از طرفی داده های دکل رفسنجان نیز در این بازه زمانی ۱۵ روزه مستقیماً به وسیله WASP تحلیل شدند و در نهایت با مقایسه دو تحلیل WASP از داده های مشاهداتی و محاسباتی باد در ارتفاع ۴۰ متری، کارایی مدل WRF در ارزیابی انرژی باد نمایان شد.

پس از یک سری پارامترسازی ها که ذکر شد؛ مدل برای ۱۵ روز از تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۱ تا ۲۰۰۷/۰۴/۱۶ اجرا شد و داده های خروجی در بازه زمانی هر ۶۰ دقیقه به دست آمد. سپس به کمک یک برنامه NCL، خروجی داده های باد در ارتفاع ۴۰ متری در موقعیت دکل رفسنجان محاسبه شد. خروجی های NCL با فرمت TXT در نرم افزار WasP



شکل شماره ۶- مقایسه سری های زمانی ۱۵ روزه مشاهداتی و محاسباتی در ارتفاع ۴۰ متری؛ سری زمانی داده های دکل رفسنجان (سمت چپ)، سری زمانی داده های خروجی مدل میان مقیاس WRF در موقعیت دکل رفسنجان (سمت راست)



شکل شماره ۷- پتانسیل سنجی داده‌های ۱۵ روزه توسط WASP؛ نتایج تحلیل از داده‌های مشاهده‌ای در ارتفاع ۴۰ متری دکل رفسنجان (سمت چپ)، نتایج تحلیل از داده‌های خروجی مدل WRF در موقعیت دکل رفسنجان در ارتفاع ۴۰ متری (سمت راست)

اندازه‌گیری و در نتیجه تفاوت فراوانی داده‌ها است. البته آنچه مهم است میانگین‌گیری و تحلیل بر اساس توزیع ویول است که بر اساس شکل ۷ نتایج آن و اختلاف نسبی کمیت‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در جدول ۳ آمده است.

مقایسه تطبیقی سری‌های زمانی WASP از داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در ارتفاع ۴۰ متری در موقعیت دکل رفسنجان (شکل ۶) نشان می‌دهد که مدل در برآورد سمت و سرعت باد موفق بوده‌است و تنها در برآورد جهت باد اندکی تفاوت دیده می‌شود و دلیل آن احتمالاً تفاوت در بازه‌های

جدول شماره ۳- مقایسه تحلیل WASP از داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی

	پارامتر شکل (k) بدون بعد	پارامتر مقیاس (A) متر بر ثانیه	میانگین سرعت باد (U) متر بر ثانیه	میانگین چگالی انرژی (P) وات بر متر مربع
مشاهداتی	۱/۹۱	۷/۸	۶/۹	۴۰۹
محاسباتی	۱/۴۱	۶/۷	۶/۱	۴۱۷
درصد اختلاف نسبی	-۲۶/۱۸٪	-۱۴/۱۰٪	-۱۱/۵۹٪	+۱/۹۶٪

مشاهداتی هر چه کمتر باشد مقدار چگالی انرژی بیشتر می‌شود. با مثبت در نظر گرفتن اختلاف نسبی در ستون مربوط به پارامتر شکل، همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد مجموع سه اختلاف نسبی سه ستون سمت چپ جدول ۳، ۴۹٪+ می‌باشد به عبارتی میزان اختلاف نسبی چگالی انرژی بایستی مثبت باشد، که اینگونه است.

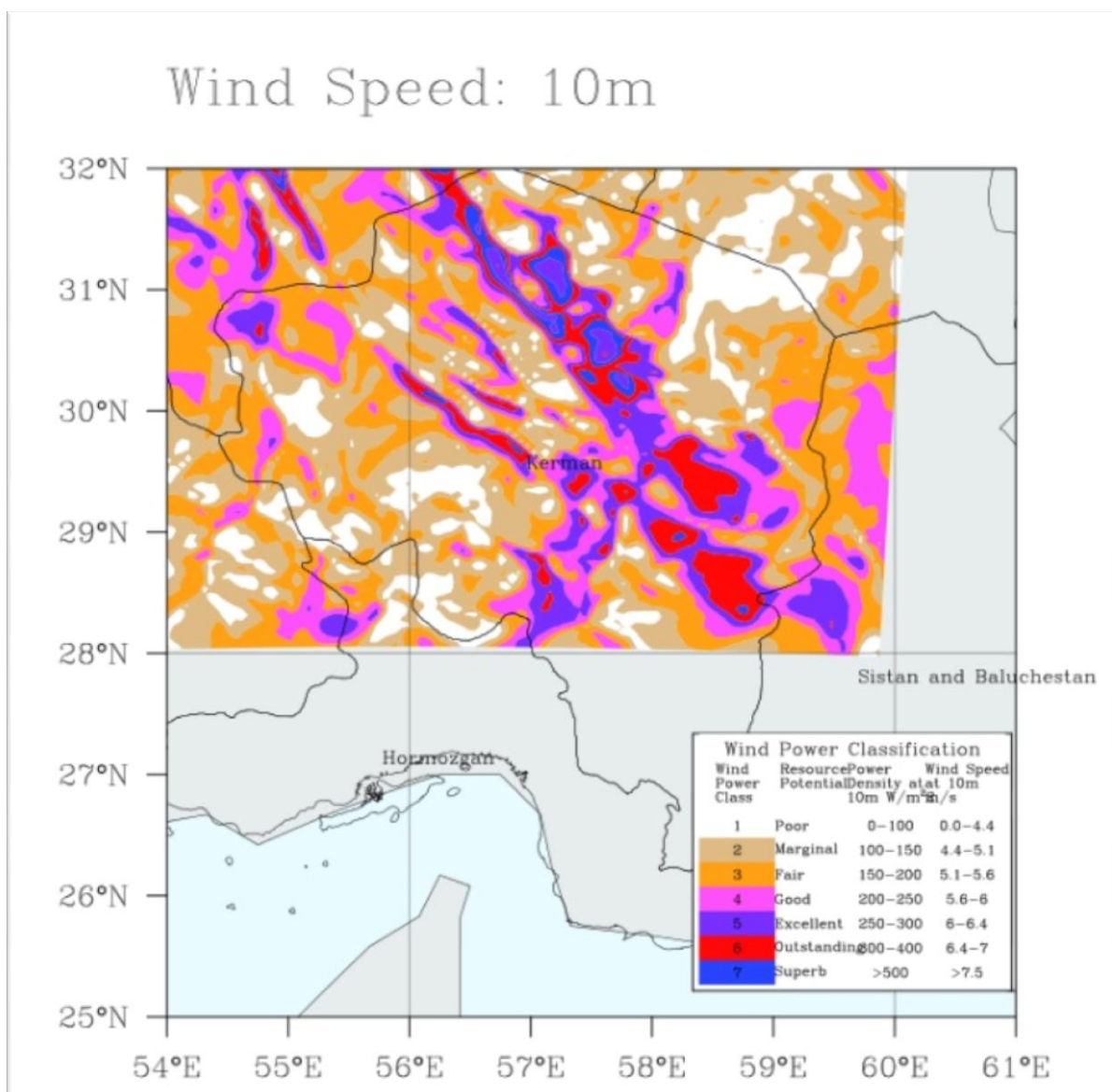
اختلاف نسبی بر طبق رابطه ۱۳ محاسبه شده‌است. البته شاید پرسیده شود با اینکه کمیت‌های بدست‌آمده مشاهده‌ای بزرگ‌تر هستند، چرا میانگین چگالی انرژی مشاهده‌ای کمتر شده‌است؟ طبق رابطه ۸، سرعت با پارامتر شکل نسبت عکس دارد در نتیجه محاسبه انرژی با توان سوم سرعت نیز با پارامتر شکل نسبت معکوس دارد. بنابراین پارامتر شکل مقادیر

ج) تهیه اطلس باد محاسباتی استان کرمان

از خروجی ۱۵ روزه مدل استفاده شد و با استفاده از یک برنامه NCL، میانگین باد ۱۵ روزه در ارتفاع ۱۰ متری روی داخلی‌ترین حوزه (حوزه ۳) در قالب یک اطلس محاسبه شد. شکل ۸ این اطلس باد محاسباتی را نشان می‌دهد. البته برای تهیه اطلس باد نیاز به اطلاعات یک‌ساله باد می‌باشد، یعنی لازم است مدل WRF برای حداقل یک سال تمام اجرا شود.

$$\text{درصد اختلاف نسبی} = \frac{P_{\text{مشاهداتی}} - P_{\text{محاسباتی}}}{P_{\text{مشاهداتی}}} \times 100$$

مجموع سه اختلاف نسبی (میانگین سرعت باد، پارامتر مقیاس و پارامتر شکل) در واقع عاملی بود که از آن در آزمایش حساسیت سنجی در موقعیت دکل رفسنجان استفاده شد، هر چه این عدد به صفر نزدیک‌تر می‌شد مدل، باد بهتری از نقطه مورد مطالعه بدست می‌آورد. البته در پارامترسازی مدل میان مقیاس می‌توان تفکیک^۱ (در حدود ۵۰۰ متر) و همچنین تعداد حوزه‌های شبکه‌بندی (مثلا پنج حوزه تو در تو) را بالا برد و نتایج خیلی مطلوب‌تری بدست آورد.



شکل شماره ۸- اطلس باد ۱۰ متری استان کرمان؛ نقشه NCL مربوط به خروجی مدل WRF در داخلی‌ترین حوزه، میانگین ۱۵ روزه آوریل ۲۰۰۷

بحث و نتایج

موضوع اصلی که در این تحقیق دنبال شده است پیدا کردن مکان‌های مستعد باد جهت تأسیس مزارع بادی است. برای این منظور بایستی سرعت باد و در نهایت انرژی آن در مناطق مورد مطالعه تحلیل شود. در روش‌های قبلی که آمار باد ایستگاه‌های همدیدی تحلیل می‌شد، دو اشکال عمده وجود دارد؛ اول اینکه این ایستگاه‌ها باد را در ارتفاع ۱۰ متری اندازه می‌گیرند و با شرایط قرارگرفتن ایستگاه‌ها در داخل مناطق شهری و تأثیر کاربری و زبری سطح شهر، میزان باد دقیق برآورد نمی‌شود؛ دوم اینکه درون‌یابی باد در ارتفاعات بالاتر که بر اساس روابط تجربی (روابط ۱ و ۲) محاسبه می‌شود نیز خطاهایی دارد. پتانسیل سنجی بوسیله سایت‌های دکلی نیز به دلیل تعداد کم این دکل‌ها و عدم همبستگی صحیح داده‌های آنها با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی نیز خطا در محاسبات را به دنبال دارد.

با توجه به استدلال‌های بالا بهترین روش، استفاده از مدل جهت برآورد باد می‌باشد. ابتدا با بررسی سیستم‌های گرمایی یک منطقه در فصول مختلف سال و همچنین بررسی توپوگرافی منطقه می‌توان یک گمانه‌زنی برای وجود باد پایدار و متناوب انجام داد. سپس روی منطقه موردنظر متمرکز شده و مدل میان‌مقیاس WRF را با تفکیک خوب به مدت یک سال تمام اجرا و خروجی‌ها را در بازه‌های زمانی ۶۰ دقیقه‌ای ثبت کرد. سپس با استفاده از برنامه NCL، اطلس باد را در داخلی‌ترین حوزه رسم کرده تا باد شارهای موجود در منطقه نمایان شود. همچنین با استفاده از نرم‌افزار تحلیل‌گر WASP در چندین نقطه مستعد از منطقه، انرژی باد از داده‌های خروجی مدل میان‌مقیاس WRF ارزیابی شود. زمانی که از وجود پتانسیل بادی مناسب در منطقه اطمینان کامل حاصل شد اقدام به نصب یک مزرعه بادی می‌شود، به این منظور ابتدا بایستی با استفاده از یک مدل ریزمقیاس نما تفکیک در منطقه را بالا برد. یکی از مدل‌هایی که در این زمینه موفق بوده است مدل خرد مقیاس مهندسی WASP می‌باشد که به خوبی با مدل‌های میان‌مقیاس رایج از قبیل WRF و KAMM جفت می‌شود. در این ریزمقیاس‌نمایی، داده‌های خروجی مدل میان‌مقیاس به مدل خرد مقیاس

مهندسی WASP داده می‌شود. مدل خرد مقیاس با تکیه بر محاسبات معادلات خطی جزئیات دقیق‌تری از سطح زمین را در معادلات منظور می‌کند و خروجی آن، باد در مقیاس کوچک (دقت بیشتر) است. این نرم‌افزار همچنین قادر به تهیه اطلس باد در مقیاس متر است و با انجام یک سری محاسبات مهندسی جای توربین‌های بادی یک مزرعه را با دقت یک متر تعیین می‌کند و در نهایت مزرعه بادی طراحی خواهد شد. در این مطالعه هزینه‌های کاربری نرم‌افزار مهندسی WASP بالا بود (حدود ۴۵۰۰ دلار) و متأسفانه چون هیچ‌گونه حمایت مالی صورت نگرفت، از این نرم‌افزار استفاده نشد.

منابع

- ۱- پدرام، مزده، رحیم زاده و صداقت کردار، ۱۳۸۷، برآورد و برون‌یابی میانگین چگالی توان باد در راستای قائم (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک شرق اصفهان)، علمی-ترویجی نیوار شماره ۶۸ و ۶۹.
- ۲- جمیل، مجید، ۱۳۸۰، چگالی انرژی باد، مجله علمی - ترویجی نیوار شماره ۴۲ و ۴۳.
- 3- Arya S.Pal, Introduction to Micrometeorology, Copyright 2001, 1998 by ACADEMIC RESS.
- 4- NCAR, 2012. Weather Research & Forecasting ARW Version 3 Modeling System User's Guide [online] Available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf
- 5- Benedicte Jourdiar, 2012, Study and implementation of mesoscale weather forecasting models in the wind industry, Master of Science Thesis, Energy Technology EGI-2012- Division of Heat and Power Technology SE-100 44 STOCKHOLM.
- 6- Brandon A. Storm, August 2008, Texas Tech University, Modeling of Low-Level

-
- 8- NCAR/CISL/Data registry: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083>. 2<http://rda.ucar.edu/download>. Auto/ ESMAILPOUR 16204. Jets over the Great Plains: Implications for Wind Energy.
- 7- WAsP Climate Analyst, Users Guide, Riso_ National Laboratory
Technical support: wassupport@dtu.dk