

امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان ایلام

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی میزان تولید انرژی و شناخت نواحی باد خیز در استان ایلام انجام شده است. بدین منظور از تمام داده‌های روزانه سمت و تندی باد ۷ ایستگاه همدید استان ایلام و همچنین ۱۵ ایستگاه نواحی مجاور استان گردآوری شد. ابتدا دو پایگاه داده از میانگین بلندمدت روزانه تندی و سمت باد به صورت جداگانه به اندازه 22×366 ایجاد شد. با استفاده از این دو پایگاه داده، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد محاسبه گردید. بر اساس مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری و به کمک روش زمین آمار کریجینگ، مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری در سطح منطقه مورد مطالعه برآورد شد. سرانجام برای استان ایلام دو پایگاه داده با ابعاد 366×896 ایجاد شد. در این دو پایگاه داده، 366 میانگین بلندمدت مؤلفه باد مداری و نصف‌النهاری در هر روز از سال و 896 نیز، تعداد یاخته‌های برآورد شده (اندازه هر یاخته $4/7 \times 4/7$ کیلومتر مربع) در سطح استان ایلام بود. پس از آن با انجام تحلیل خوشه‌ای بر روی این دو پایگاه داده، نواحی بادخیز استان ایلام مشخص گردید. در ادامه تحقیق، تندی باد هر یاخته با کمک مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری در هر یاخته محاسبه شد. سپس چگالی هوا در هر یاخته بدست آمد. بنابراین بر اساس داده‌های تندی، چگالی باد و اندازه توربین‌های مختلف (شعاع پره ۵، ۱۰ و ۱۵ متری) توان تولید انرژی باد در سطح استان ایلام (896 یاخته) برآورد گردید. نتایج نشان داد که آستانه تولید انرژی سالانه به وسیله توربین‌های با پره ۵ متر، ۱۱-۱ میلیون وات بر متر مربع، ۱۰ متر، ۴۵-۵ میلیون وات بر متر مربع و توربین‌های با پره ۱۵ متر نیز ۱۰۱-۱۲ میلیون وات بر متر مربع است. همچنین بر اساس توربین‌های مورد مطالعه، بخش‌های غربی استان ایلام و بویژه مهران توان تولید بیشینه انرژی باد را دارد. از نظر زمانی در طول سال، تیر ماه دارای بیشینه تولید انرژی باد است. ضریب تغییرپذیری باد در استان بین $17/2$ تا $40/6$ درصد است.

واژگان کلیدی: انرژی باد، کریجینگ، توربین باد، ایلام

مقدمه

انرژی یکی از نیازهای مهم جوامع امروزی است، که جنبه‌های مختلف زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است. روند رو به رشد جمعیت و ارتقای استانداردهای زندگی، تقاضا برای انرژی را افزایش داده است. علاوه بر این در دهه‌های اخیر، پیشرفت علم و فن‌آوری، رشد سریع اقتصادی جوامع صنعتی را به همراه داشته است. تأثیر این رشد سریع اقتصادی افزایش مصرف انرژی در جوامع را به همراه داشته است. با این حال، تجدید ناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از آنها، جوامع را با مشکلاتی مواجه ساخته است. یکی از راه‌حلهایی که برای رفع این مشکل مطرح شده، گسترش استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر (مانند انرژی خورشید و باد) به جای انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی (مانند نفت، گاز و زغال سنگ) است. در این میان، انرژی باد به طور فزاینده‌ای به بخشی از صنعت انرژی تجدید پذیر تبدیل شده و می‌تواند در تقاضای رو به رشد جهان برای مصرف برق کمک کند (کانز^۱ و همکاران،

۲۰۰۷؛ ۳۱۵). ماهیت پایان ناپذیر بودن انرژی باد و کاهش خطرات زیست محیطی، موجب شده که در حال حاضر، باد نقش مهمی در تولید انرژی در جهان داشته باشد. از این رو کشورهای مختلف سعی در استفاده از آن در کنار دیگر انرژی‌ها دارند. به نظر می‌رسد که در آینده نزدیک استفاده از این انرژی به طور قابل توجهی افزایش یابد. این در حالی است که دستیابی به حداکثر استفاده از آن، مستلزم چگونگی مکان‌گزینی مناسب توربین‌های بادی است (الماگری^۱ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۳۶). با این وجود افزایش کاربرد توربین‌های بادی و پیشرفت سریع در این زمینه موجب شده که صنایع و کارگاه‌های تولیدی به دنبال استفاده از تکنولوژی ارزان‌تر و مناسب‌تر باشند (امنا^۲ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۴۱). در این میان اولین توربین‌های بادی برای تولید الکتریسیته در اوایل قرن بیستم تولید شد و تکنولوژی آن تا دهه ۱۹۷۰ گام به گام بهبود یافت و در آخرین دهه قرن بیستم، استفاده از انرژی باد در هر سه سال تقریباً دو برابر شد. به طوری که در پایان سال ۱۹۸۹، توربین‌های بادی با توان ۳۰۰ کیلو وات و قطر پره‌های ۳۰ متر ساخته شد و فقط ۱۰ سال بعد توربین‌های ۱۵۰۰ کیلوواتی با قطر پره حدود ۷۰ متری در برخی کارخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت (گندمکار، ۱۳۸۸؛ ۸۶). از تمام انرژی تولید شده به وسیله باد در جهان در سال ۲۰۰۸، ۰/۴۲ درصد آن به ایالات متحده اختصاص دارد، پیش بینی شده است که این کشور می‌تواند تا سال ۲۰۵۰، بیش از ۰/۲۵ درصد کل انرژی مورد نیاز خود را از این طریق تأمین کند. ظرفیت بادی در ایالات متحده از ۱۰۰۰ مگاوات در سال ۱۹۸۵ به ۳۵۰۰۰ مگاوات تا پایان سال ۲۰۰۹ رسیده است (شرودر^۳، ۲۰۱۰؛ ۱۶۳۲).

به دلیل مورد توجه قرار گرفتن باد به عنوان یک منبع انرژی قابل اعتماد، در سطح جهان و ایران تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است. بلینتون^۴ و همکاران (۱۹۹۶) مدلهایی برای شبیه‌سازی توان باد در سری زمانی مختلف ارائه دادند. همچنین برای بررسی مدل‌های ارائه شده از معیار F و آزمون Q استفاده کردند و در نهایت ویژگی‌های آماری شبیه‌سازی شده تندی باد را با تندی واقعی باد مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بین مدل‌های پیشنهاد شده بر پایه آزمون‌های آماری (تخمین تندی باد در مقیاس روزانه و فصلی) با تندی باد واقعی همبستگی بالا وجود دارد. لو و همکاران^۵ (۲۰۰۲) پتانسیل نیروی باد و ویژگی‌های توربین‌های بادی مورد استفاده در برخی از جزایر هنگ‌کنگ را بررسی کردند. در واقع هدف پژوهش آن‌ها ارزیابی تندی باد برای انتخاب بهینه توربین‌های بادی در شرایط مختلف آب و هوایی بود. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که ۰/۳۵ درصد ظرفیت تولید برق توربین‌های بادی تنها در ماه اکتبر وجود دارد. رهمن^۶ و همکاران (۲۰۰۷) پتانسیل انرژی باد در نواحی ساحلی عربستان سعودی را بررسی کردند. آن‌ها میانگین داده‌های تندی و سمت باد در ۵ ایستگاه ساحلی (دههران، یانبو، الواج، جده و جیزان^۷) در طی دوره زمانی ۱۴ ساله (۱۹۸۳-۱۹۷۰) را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که از بین ایستگاه‌های بررسی شده یانبو بهترین موقعیت برای استفاده از انرژی باد را دارد در حالی که دههران موقعیت مناسبی ندارد و سه ایستگاه دیگر موقعیت کمابیش یکسانی دارند.

موفولو^۸ و همکاران (۲۰۱۲) ویژگی‌های باد در بخش‌هایی از لسوتو^۹ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در بیش از ۷۵ درصد از سال، باد از تندی کافی برای تولید انرژی به وسیله توربین‌های بادی برخوردار است. بلال^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد برای تولید برق در ساحل شمال غرب سنگال را

۱. Elmagri

۲. Emna

۳. Schroeder

۴. Billinton

۵. Lu Et al

۶. Rehman

۷. Dhahran, Yanbo, Al-Wajh, Jeddah and Gizan

۸. Mpholo

۹. Masitise Sani and Lesotho

۱۰. Bilal

بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد چگالی توان باد بین ۱۲۰/۰۱ تا ۳۰/۰۵ وات بر متر مربع است. بالاترین ظرفیت تولید باد در منطقه ساخور و کمترین میزان تولید انرژی در گاندون است. هاروی^۱ (۲۰۱۳) پتانسیل انرژی باد به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در کانادا را مورد بررسی قرار داد. ایشان برای بررسی قدرت توربین‌های بادی از داده‌های انرژی باد اطلس کانادا استفاده کرد. نتایج نشان داد که در کانادا مناطق پراکنده‌ای با ظرفیت بیشتر از ۰/۴ و برخی بیشتر از ۰/۵ وجود دارد و سرمایه مزرعه بادی در حدود ۲۰۰۰ دلار در کیلو وات و ۳۰۰۰ دلار در هر کیلو وات به ترتیب برای خشکی و دریا و هزینه خط انتقال ۰/۵ دلار کیلو وات در کیلومتر مربع و ۰/۷۵ دلار به ترتیب برای خشکی و دریا است.

صلاحی (۱۳۸۴) پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های استان اردبیل را مورد بررسی قرار داد. ایشان از داده‌های بلند مدت سه ساعته سمت و تندی باد استفاده کرد. نتایج نشان داد که چگالی توان باد در ایستگاه‌های اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب ۳۴۲/۰۲۶، ۶۰/۶۶۸ و ۷۲/۳۶۳ و ۴۳۰/۳۸۳ وات در متر مربع است. بنابراین ایستگاه همدید اردبیل می‌تواند به عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی باد به حساب آید. گندمکار (۱۳۸۸) با استفاده از آمار ۱۰ ساله وزش باد در ایستگاه های همدید کشور نشان در که بسیاری از نواحی ایران از جمله سواحل دریای عمان و جزایر خلیج فارس، نواحی ساحلی استان خوزستان و نواحی شرقی کشور و چند نقطه پراکنده از بالاترین توان تولید انرژی بادی بویژه در فصل تابستان برخوردار هستند.

رحیم زاده و همکاران (۱۳۸۸) انرژی باد در ایستگاه‌های همدید استان اصفهان را با استفاده از برازش نوع پیوندی (هیبرید) توزیع‌های ویبول و معکوس نرمال و همچنین روش مستقیم برآورد کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تندی وزش باد در طول ماه‌های سرد سال نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است. چگالی توان باد در ایستگاه‌های همدید استان اصفهان در ماه‌هایی که وزش باد ضعیف است به کمتر از ۶۰ وات بر متر مربع می‌رسد. به طور کلی ایستگاه‌های منطقه خور و بیابانک، داران و نطنز با تندی چگالی و توان باد کم مواجه هستند. محمدی و همکاران (۱۳۹۱) توان باد در استان کرمانشاه را بر پایه داده‌های سه ساعته ارزیابی کردند. براساس این پژوهش سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور به ترتیب بهترین شرایط را برای تولید انرژی بادی دارند. در این میان ایستگاه کرمانشاه از کمترین توان تولید انرژی بادی در سطح استان برخوردار است.

انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوهر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از داده‌های روزانه و ساعته سمت و تندی باد دوره‌ی زمانی (۲۰۰۷-۱۹۸۷) و همچنین تغییرپذیری آن‌ها استفاده کردند. با استفاده از روش‌های آماری و روابط ریاضی، مقدار انرژی پتانسیل باد در ارتفاع ۴۰ متری محاسبه نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تندی متوسط سالانه باد در این ایستگاه ۲/۵۳ متر بر ثانیه بوده است. بیشترین انرژی پتانسیل در ماه جولای ۶۳۲۷ ژول بر متر مربع و کم‌ترین انرژی (۳۸۸ ژول بر متر مربع) مربوط به ماه دسامبر است.

بختیاری و همکاران (۱۳۹۲) پتانسیل انرژی باد بر مبنای داده‌های کوتاه مدت ۱۰ دقیقه‌ای در مناطق کرمان، جیرفت و بم را با استفاده از توزیع احتمال و محاسبه تابع چگالی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ایستگاه بم از نظر متوسط تندی باد، درصد فراوانی باد غالب، ضریب تداوم تندی باد و تابع چگالی توان باد، نسبت به دو ایستگاه دیگر برتری دارد و چگالی توان باد در ایستگاه بم ۲۴۵۵/۴ ساعت در سال است. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از پارامترهای متعدد، تناسب اراضی جهت ایجاد مزارع باد در استان آذربایجان شرقی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در کمتر از ۳ درصد استان شرایط جهت انجام چنین پروژه‌هایی مناسب است. همچنین براساس دیگر نتایج این پژوهش مشخص شد که مهمترین عوامل موثر در مکان‌یابی مزارع بادی، ارتفاع، فاصله از دریاچه‌ها،

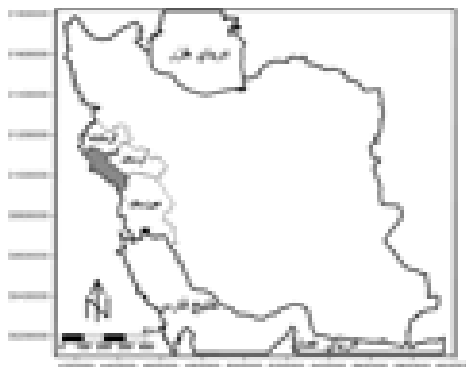
کاربری اراضی شهرها و روستاها است. عزیززی و همکاران (۲۰۱۳) مکان‌های مناسب جهت استقرار توریسم بادی در استان اردبیل را با استفاده از تحلیل سلسله مراتب فازی و تحلیل شبکه شناسایی کردند. شهرستان نمین به عنوان مناسب‌ترین مکان جهت استقرار توریسم بادی معرفی شد. مقایسه نتایج حاصل از مقایسه دو روش نیز نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتب فازی به مراتب بهتر از تحلیل شبکه است.

روشن و همکاران (۱۳۹۳) پتانسیل انرژی باد را در برخی از ایستگاه‌های منتخب ایران بررسی کردند. براساس این پژوهش مشخص شد که ایستگاه‌های زابل، اردبیل و کیش به ترتیب با ۳۰۴۲، ۱۶۷۵ و ۱۰۹۲ وات بر متر مربع، بالاترین توان تولید انرژی بادی را در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه دارند. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۳) امکان سنجی استفاده از انرژی باد در پنج ایستگاه همدید واقع در استان‌های اردبیل و زنجان را بررسی کردند. در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه اردبیل با ۲۸۵/۵۹ وات بر متر مربع در ارتفاع ۴۰ متری، از بالاترین چگالی توان باد برخوردار بود.

موقعیت جغرافیایی ایران از یک سو باعث شده است که در زمان‌های مختلف سال در مسیر ورود توده‌های هوای مختلف قرار بگیرد و از سوی دیگر وجود تنوع توپوگرافی و به دنبال آن ایجاد مراکز فشار حرارتی محلی، سبب شده که در برخی از نقاط کشور، در طول سال، بادهایی با شدت‌های مختلف بوزد و در صورت وجود آستانه ای تندی و دوام باد می‌توان از آن استفاده نمود (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۳؛ ۴۲). به نظر می‌رسد در برخی از بخش‌های ایران شرایط مناسب برای بهره برداری از این انرژی فراهم باشد. مشروط بر این که در این زمینه در سطوح ملی، منطقه‌ای و محلی برنامه ریزی لازم در جهت استفاده از انرژی باد انجام شود. مطالعاتی در زمینه امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد، برآورد تندی و تداوم آن و همچنین ارزیابی میزان تولید انرژی در هر مکان می‌تواند در راستای این امر باشد. استان ایلام در غرب ایران واقع شده است. شرایط حاد دمایی از جمله ویژگی‌های اقلیمی در استان ایلام است. در این بخش از ایران در طول سال برای تأمین انرژی مورد نیاز، از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. با توجه به شرایط حاد دمایی که در این استان وجود دارد، میزان مصرف این سوخت‌ها نسبتاً بالا است. با توجه به محدودیت‌های سوخت‌های فسیلی، به نظر می‌رسد بررسی امکان‌سنجی منابع جدید انرژی در استان ایلام می‌تواند راهگشای بسیاری از مشکلات زیست محیطی و فراهم نمودن شرایط لازم برای رسیدن به توسعه پایدار در منطقه باشد. در این تحقیق تلاش شد تا با بررسی متغیر باد در استان ایلام، مکان(های) مناسب برای احداث توریسم بادی به عنوان یکی از منابعی که می‌تواند در کنار سوخت‌های فسیلی، تأمین کننده بخشی از نیازهای انرژی در استان ایلام باشد، شناسایی شود. بنابراین، این پژوهش با هدف شناخت نواحی بادخیز و برآورد توان باد در استان ایلام انجام شد.

داده‌ها و روش پژوهش

ایلام یکی از استان‌های غربی کشور ایران است. از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. از شمال با استان کرمانشاه، از جنوب با استان خوزستان، از شرق با استان لرستان و از غرب با کشور عراق، همسایه است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان ایلام و همسایگی با استان‌های مجاور

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی میزان توان تولید انرژی باد در استان ایلام است. برای این منظور ابتدا داده‌های تنیدی و سمت باد در مقیاس روزانه از ۲۲ ایستگاه هواشناسی هم‌دید جمع‌آوری شد. ویژگی هر کدام از ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- ویژگی ایستگاه‌های مورد استفاده در داخل و خارج از پهنه استان ایلام

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	طول دوره آماری
۱	ایلام	۴۶:۲۶	۳۳:۳۸	۱۳۳۷	۱۹۸۶-۲۰۱۳
۲	دهلران	۴۷:۱۶	۳۲:۴۱	۲۳۲	۱۹۸۷-۲۰۱۳
۳	ایوان	۴۶:۱۹	۳۳:۵۰	۱۱۷۰	۱۹۹۹-۲۰۱۳
۴	دره شهر	۴۷:۲۴	۳۳:۰۸	۶۷۰	۲۰۰۲-۲۰۱۳
۵	مهران	۴۶:۱۱	۳۳:۰۷	۱۵۰	۲۰۰۴-۲۰۱۳
۶	سرابله	۴۶:۳۴	۳۳:۴۷	۱۰۴۵	۲۰۰۶-۲۰۱۳
۷	لومار	۵۰:۴۶	۳۴:۳۳	۸۵۰	۲۰۰۷-۲۰۱۳
۸	اهواز	۴۸:۴۰	۳۱:۲۰	۲۲,۵	۱۹۵۱-۲۰۱۰
۹	شوشتر	۴۸:۵۰	۳۲:۰۳	۶۷	۱۹۹۴-۲۰۱۰
۱۰	دزفول	۴۸:۲۳	۳۲:۲۴	۱۴۳	۱۹۶۱-۲۰۱۰
۱۱	بوسستان	۴۸:۰۰	۳۱:۴۳	۷/۸	۱۹۸۶-۲۰۱۰
۱۲	آبادان	۴۸:۱۵	۳۰:۲۲	۶/۶	۱۹۵۱-۲۰۱۰
۱۳	خرم آباد	۴۸:۱۷	۳۳:۲۶	۱۱۴۷/۸	۱۹۵۱-۲۰۱۰
۱۴	کوه‌دشت	۴۷:۳۸	۳۳:۳۲	۱۱۹۹/۸	۱۹۹۷-۲۰۱۰
۱۵	الشتر	۴۸:۱۵	۳۳:۴۹	۱۵۶۷/۲	۱۹۹۷-۲۰۱۰
۱۶	نورآباد	۴۸:۰۰	۳۴:۰۳	۱۸۵۹/۱	۲۰۰۰-۲۰۱۰
۱۷	پل دختر	۴۷:۴۳	۳۳:۰۹	۷۱۳/۵	۱۹۹۸-۲۰۱۰
۱۸	کرمانشاه	۴۷:۰۹	۳۴:۲۱	۱۳۱۸	۱۹۵۱-۲۰۱۰
۱۹	سرپل ذهاب	۴۵:۵۲	۳۴:۲۷	۵۴۵	۱۹۸۶-۲۰۱۰
۲۰	کنگاور	۴۷:۵۹	۳۴:۳۰	۱۴۶۸	۱۹۸۷-۲۰۱۰
۲۱	اسلام‌آباد غرب	۴۶:۲۸	۳۴:۰۷	۱۳۴۸/۸	۱۹۸۷-۲۰۱۰
۲۲	سرارود	۴۷:۱۸	۳۴:۲۰	۱۳۶۱/۷	۱۹۸۹-۲۰۱۰

پس از جمع‌آوری داده‌های مورد استفاده، میانگین بلندمدت روزانه سمت و تنیدی باد محاسبه شد.

$$\bar{F}_{itm} = \frac{\sum_{n=1}^k f_i F_i}{n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\bar{D}_{itm} = \frac{\sum_{n=1}^k f_i D_i}{n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

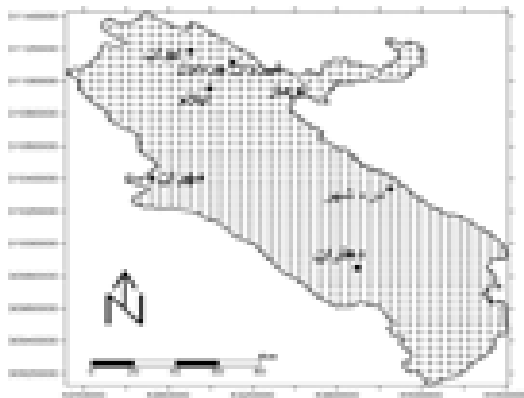
در روابط بالا، F تنیدی باد و D سمت باد است. قبل از انجام میان‌یابی باد در سطح استان ایلام، با استفاده از روابط ۳ و ۴، داده‌های تنیدی باد و سمت باد به داده‌های باد مداری و نصف‌النهاری تبدیل شدند. علت استفاده از داده‌های مداری و نصف‌النهاری باد این است که این داده‌ها ویژگی‌های برداری باد را در سطح پهنه بهتر نشان می‌دهند.

$$U = -F \times \sin(D \times 3.1416 / 180) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$V = -F \times \cos(D \times 3.1416 / 180) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط بالا، F ، تنیدی باد؛ D ، سمت باد است. در مرحله بعد، عمل میان‌یابی مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در منطقه مورد مطالعه برای هر روز از سال انجام شد. بنابراین برای تمام منطقه به روش کریجینگ، مؤلفه‌های مداری و

نصف‌النهاری باد در ۶۲۰۰ یاخته و در ۳۶۶ روز از سال با ابعاد $۴/۷ * ۴/۷$ کیلومتر مربع برآورد گردید. از این تعداد یاخته، ۸۹۶ یاخته در محدوده مورد مطالعه قرار داشتند. بنابراین پایگاه داده‌ای از مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد و به اندازه $۸۹۶ * ۳۶۶$ ایجاد شد (شکل ۲).



شکل ۲- میان‌بانی مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری باد در سطح استان ایلام

بر اساس شکل ۲، هر کدام از یاخته‌ها دارای مؤلفه باد مداری و نصف‌النهاری است. باید برای هر کدام از یاخته‌ها تندی باد، چگالی باد و در نهایت انرژی باد برآورد شود. برای این کار، ابتدا باید بر اساس داده‌های مداری و نصف‌النهاری باد، تندی باد در هر یاخته و برای ۳۶۶ روز از سال محاسبه شود.

$$\text{Wind Speed} = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه بالا، u ، مؤلفه‌های مداری باد؛ v ، مؤلفه‌های نصف‌النهاری باد است. در نهایت با محاسبه میانگین و انحراف معیار تندی باد در هر یاخته، ضریب تغییرپذیری تندی باد در سطح استان محاسبه و نقشه آن شد. برای برآورد میزان پتانسیل انرژی باد علاوه بر تندی باد در هر یاخته، چگالی آن نیز محاسبه گردید.

$$\rho = 1.225 - (1.194 * 10^{-4}) * Z \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه بالا، Z ارتفاع؛ ρ چگالی باد است.

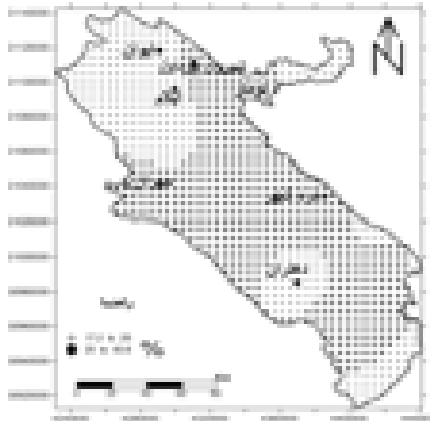
در مرحله بعد، میزان توان تولید انرژی در سطح استان (۸۹۶ یاخته) برای چهار توربین با پره‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر برآورد شد.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi r^2 V^3 \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه بالا P میزان انرژی تولید شده در هر یاخته بر حسب وات بر متر مربع است. ρ چگالی باد بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، r شعاع پره‌های توربین مورد استفاده بر حسب متر و V تندی باد بر حسب متر بر ثانیه است.

بحث

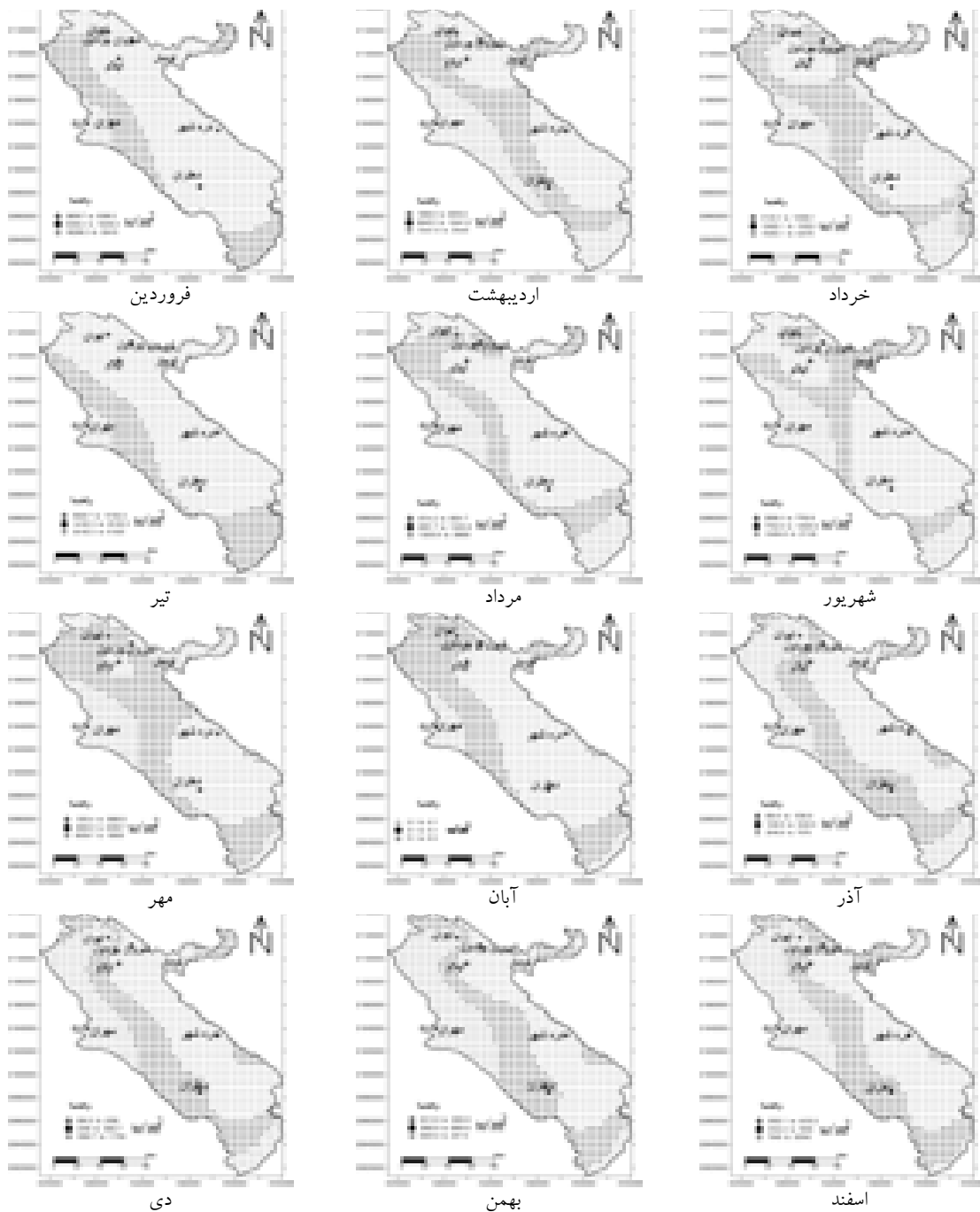
در بحث استفاده از انرژی باد، معمولاً ضریب تغییرات این متغیر نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. نقشه ضریب تغییرپذیری تندی باد نشان داد که آستانه کمینه و بیشینه آن بین $۱۷/۲$ تا $۴۰/۶$ درصد است. در مجموع $۶۲/۵$ درصد از وسعت استان دارای ضریب تغییرپذیری سالانه بالای $۰/۲۵$ درصد است، که بخش‌هایی از تمامی شهرهای استان بجز ایوان و ایلام را در بر می‌گیرد. با این حال $۳۷/۵$ درصد از وسعت استان دارای ضریب تغییرات کمتر از $۰/۲۵$ درصد است، که به طور پراکنده در تمام شهرهای استان وجود دارد (شکل ۳).



شکل ۳- ضریب تغییر پذیری تندی باد در استان ایلام

برآورد انرژی باد در توربین‌های دارای پره‌های ۵ متری

نتایج حاصل از برآورد انرژی باد بر اساس توربین‌هایی با پره ۵ متر نشان داد که در ماه فروردین آستانه تولید انرژی بادی تقریباً بین ۳۸۰۰ تا ۳۰۴۰۰ وات بر متر مربع در هر روز است. مهران از حداکثر میزان تولید انرژی برخوردار است. در این ماه بیش از نیمی از وسعت استان تقریباً می‌تواند بین ۳۸۰۰ تا ۹۵۰۰ وات بر متر مربع انرژی بادی تولید کند. این در حالی است که میزان تولید انرژی در ماه اردیبهشت نسبت به ماه فروردین روند کاهشی داشته است. میزان حداقل تولید انرژی باد در این ماه به کمتر از ۲ هزار وات در طول هر روز کاهش یافته است. به طور کلی در ماه اردیبهشت نیمه غربی استان نسبت به نیمه شرقی آن از توان تولید انرژی بیشتری برخوردار است. در ماه خرداد میزان تولید انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۵ متر نسبت به دو ماه گذشته افزایش چشمگیری داشته است. این روند افزایشی در دره‌شهر، مهران و بخش‌هایی از دهلران چشمگیر است. مناطق ذکر شده به طور روزانه می‌توانند تقریباً بین ۱۵۳۰۰ تا ۴۲۵۰۰ وات بر متر مربع انرژی تولید کنند. با این حال تیرماه بالاترین میزان تولید انرژی را در بین ماه‌های سال به خود اختصاص داده است، در این ماه میزان حداقل و حداکثر تولید انرژی تقریباً بین ۶ هزار تا ۶۱۵۰۰ وات بر متر مربع است. همچنین در این ماه مانند ماه‌های گذشته مهران از حداکثر توان تولید انرژی بادی برخوردار است. در ماه مرداد آستانه‌های حداقل و حداکثر تولید انرژی تقریباً بین ۴۵۰۰ تا ۳۶۶۰۰ وات بر متر مربع است. این میزان تولید انرژی در ماه مرداد اگرچه بیانگر کاهش توان تولید انرژی باد نسبت به ماه تیر است، اما میزان تولید انرژی در این ماه نیز قابل توجه است. با این حال روند کاهشی میزان تولید انرژی در ماه شهریور قابل توجه است. این روند کاهشی در ماه‌های مهر، آبان و آذر نیز دیده می‌شود، به طوری که در ماه آذر حداقل میزان روزانه تولید انرژی به کمتر از ۷۰۰ وات بر متر مربع رسیده است. در ماه دی اگرچه میزان تولید انرژی در سطح استان کمتر از ۱۰۰۰ وات بر متر مربع است. با این وجود آستانه‌های حداقل و حداکثر توان تولید انرژی باد در دو ماه بهمن و اسفند تفاوت زیادی با هم ندارند. همچنین در هر دو ماه نیمه شمالی و غربی استان از توان تولید انرژی بیشتری نسبت به بخش‌های جنوبی و شرقی استان برخوردار هستند. به طور کلی، آنچه که آشکار است، بیشینه بودن میزان تولید انرژی بادی مهران در همه ماه‌های سال است (شکل ۴).



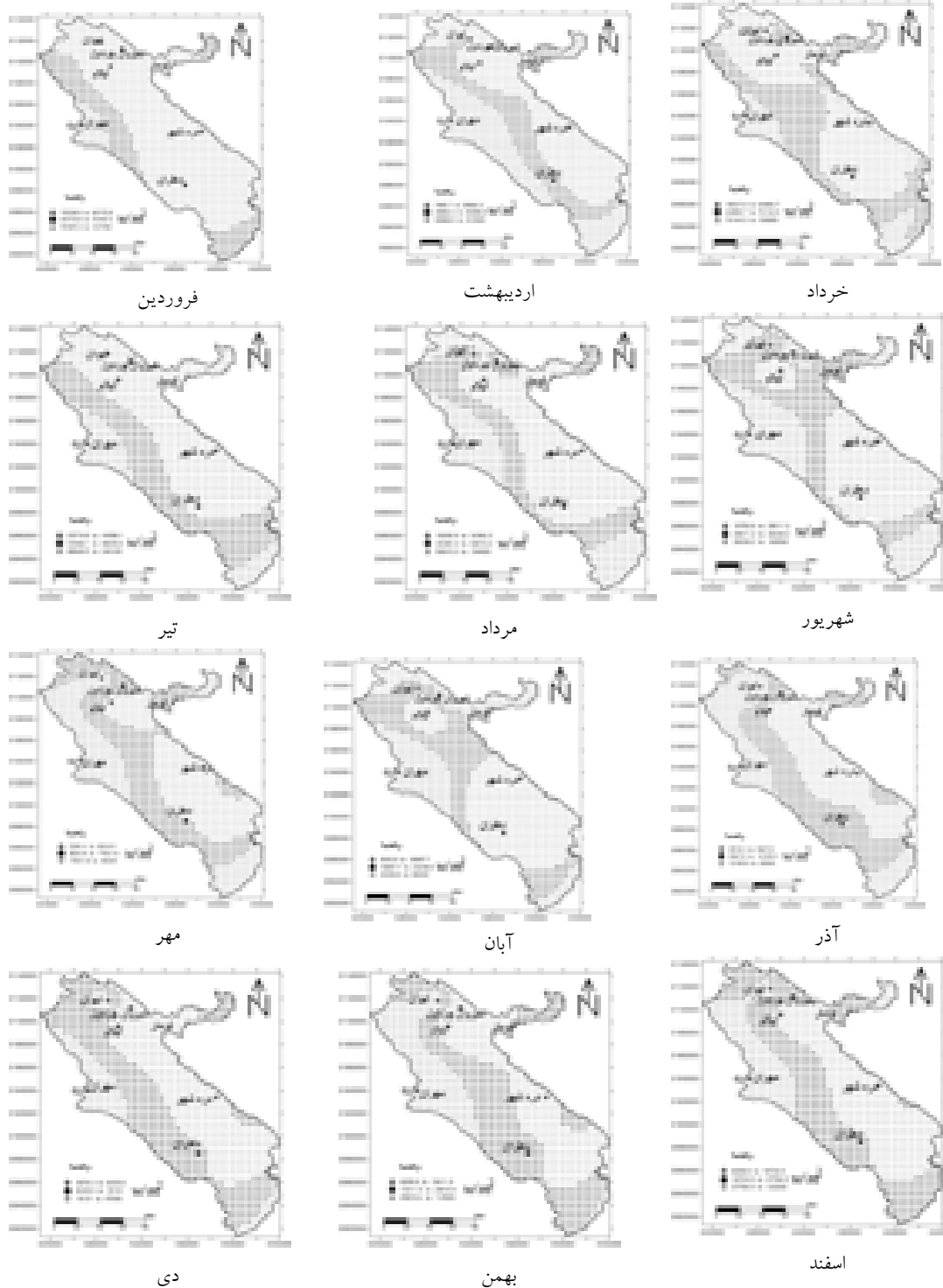
شکل ۴- میزان برآورد انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۵ متر در ماه‌های سال

برآورد انرژی باد در توربین‌های دارای پره‌های ۱۰ متری

تحلیل انرژی باد به وسیله توربین‌هایی با پره ۱۰ متر نشان داد که روند افزایش و کاهش میزان تولید انرژی باد در ماه‌های سال مانند روند میزان تولید انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۵ متر است. آنچه که تفاوت دارد میزان تولید انرژی است که در توربین‌های با پره ۱۰ متر نسبت به توربین‌های با پره ۵ متر بیشتر است. با این حال میزان تولید انرژی بادی در ماه فروردین تقریباً بین ۱۵ هزار تا ۱۲۲ هزار وات در طول روز است. در این ماه بیش از ۷۰٪ درصد از سطح استان از میزان تولید انرژی یکسانی برخوردار است. همچنین حداکثر تولید انرژی بادی در ماه مهران دیده می‌شود. با این حال در ماه اردیبهشت توربین‌های با پره ۱۰ متر می‌توانند به طور روزانه در سطح استان حدود ۸ هزار تا ۱۰۲ هزار وات انرژی تولید کنند. در این ماه وسعت مناطق بیشینه تولید انرژی نسبت به ماه گذشته افزایش یافته است. آنچه که از نقشه برآورد میزان تولید

امکان سنجی استفاده از انرژی باد در استان ایلام / ۱۶۳

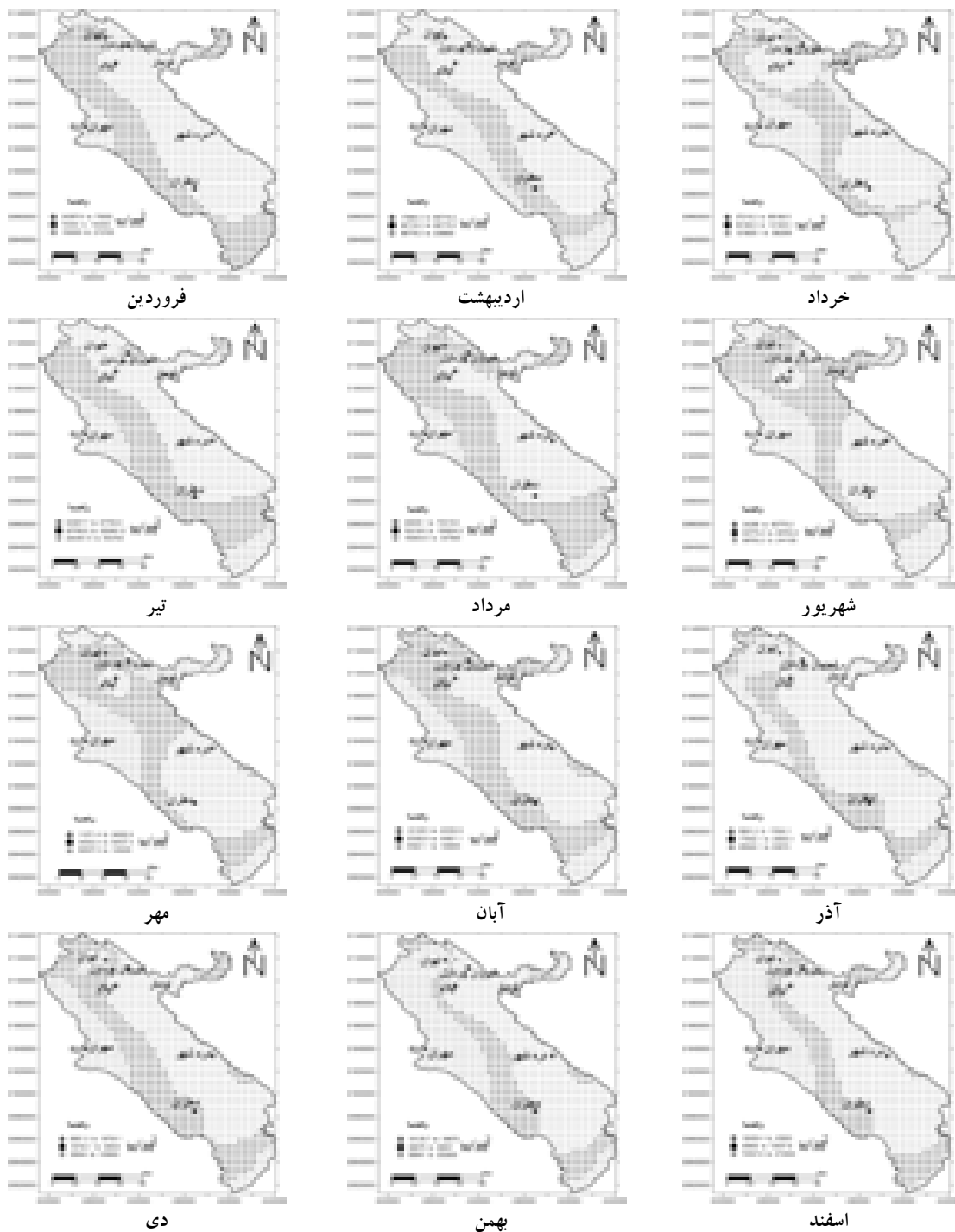
انرژی در ماه خرداد دریافت می‌شود، افزایش میزان تولید انرژی در این ماه نسبت به ماه فروردین و اردیبهشت است. به طور روزانه، آستانه تولید انرژی در نواحی مختلف استان تقریباً بین ۱۶۵۰۰ تا ۱۷۰ هزار وات بر متر مربع است. در خردادماه دره-شهر و بخش‌هایی از دهلران دارای قابلیت تولید انرژی مشابه مهران هستند در این نواحی حداکثر تولید انرژی بادی بیش از ۱۶۹ هزار وات بر متر مربع است. با این وجود در تیرماه میزان تولید انرژی به بالاترین میزان در طول ماه‌های سال رسیده است. حداقل و حداکثر تولید انرژی در روزهای این ماه بین ۲۳۷۱۸ تا ۲۴۰۱۰۰ وات بر متر مربع است.



شکل ۵- میزان برآورد انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۱۰ متر در ماه‌های سال

در ماه مرداد اگر چه میزان تولید انرژی نسبت به ماه تیر کاهش یافته است، اما باز هم در این ماه میزان تولید انرژی قابل توجه است. روند کاهش میزان تولید انرژی در ماه شهریور و مهر ادامه داشته است، به طوری که میزان حداقل و حداکثر تولید انرژی در شهریور ۱۱ هزار تا ۱۰۸۵۰۰ وات بر متر مربع است. در این راستا میزان تولید انرژی در مهرماه به نصف میزان آن در ماه شهریور رسیده است، که نشان دهنده کاهش قابل توجه توان تولید انرژی در روزهای مهر ماه است. با این حال کاهش میزان تولید انرژی در ماه آبان، نسبت به ماه مهر نیز مشاهده می‌شود. روند کاهشی در ماه آذر به بالاترین میزان خود در طول ماه‌های سال رسیده است به طوری که در این ماه آستانه‌ی حداقل و حداکثر تولید انرژی در سطح استان تقریباً بین ۲۵۰۰ تا ۲۸ هزار وات بر متر مربع است. در ماه دی اگرچه میزان تولید انرژی نسبت به ماه آذر بیشتر شده است، اما این افزایش قابل توجه نیست. میزان تولید انرژی در ماه‌های بهمن و اسفند مشابه هم است. آنچه که تفاوت دارد حداکثر میزان تولید انرژی است که در ماه اسفند اندکی بیشتر است. در کل می‌توان گفت مه‌ران در همه ماه‌های سال از بیشترین میزان تولید انرژی برخوردار است (شکل ۵). **برآورد انرژی باد در توربین‌های دارای پره های ۱۵ متری**

برآورد میزان تولید انرژی در استان ایلام به وسیله توربین‌های با پره ۱۵ متر نشان داد که طی ماه فروردین میزان تولید انرژی حدود ۳۴ هزار تا ۲۷۴ هزار وات در هر روز است. همچنین مه‌ران از بیشترین میزان تولید انرژی برخوردار است. این در حالی است که در ماه اردیبهشت میزان تولید انرژی در بخش‌های مختلف استان کاهش یافته است، به طوری که میزان حداقل و حداکثر آن به حدود ۱۸ هزار تا ۲۲۹ هزار وات بر متر مربع کاهش یافته است. اما در خرداد ماه روند تولید انرژی در بخش‌های مختلف استان افزایش یافته است. همچنین دره‌شهر و بخش‌هایی از دهلران دارای شرایط شبیه به مه‌ران هستند. در این ماه آستانه‌ی حداقل و حداکثر میزان تولید انرژی تقریباً بین ۳۸ هزار تا ۳۸۲ هزار وات بر متر مربع در مناطق مختلف استان افزایش یافته است. روند افزایشی میزان تولید انرژی در ماه تیر نیز مشاهده می‌شود. در این ماه حداکثر توان تولید انرژی بادی به بالاترین میزان (۵۵۳۷۰۰ وات در روز) رسیده است. حال در ماه مرداد اگرچه میزان تولید انرژی نسبت به تیر ماه کاهش یافته است، اما باز هم میزان تولید انرژی قابل توجهی در طول روزهای ماه دارد. آستانه‌های تولید انرژی در این ماه حدود ۴۰۵۰۰ تا ۳۴۸ هزار وات بر متر مربع است. با این وجود روند کاهشی میزان تولید انرژی در ماه‌های شهریور، مهر، آبان و آذر نیز مشاهده می‌شود. روند کاهشی بدین صورت است که میزان حداقل و حداکثر توان تولید انرژی هر ماه نسبت به ماه قبل کمتر شده است. در ماه شهریور میزان حداقل تولید انرژی به کمتر از ۳۰ هزار و میزان حداکثر تولید انرژی به کمتر از ۲۵۰ هزار وات کاهش یافته است. آستانه‌های تولید انرژی در ماه مهر نسبت به ماه شهریور نیز کمتر شده است. به طوری که میزان حداقل انرژی به حدود ۱۱ هزار و میزان حداکثر آن به کمتر از ۱۵۰ هزار وات در هر روز ماه کاهش یافته است. در آبان ماه باز هم میزان تولید انرژی باد کاهش یافته است. در این ماه آستانه‌های تولید انرژی تقریباً بین ۱۲ هزار تا ۱۰۹ هزار وات بر متر مربع در طول روز است. با این وجود روند کاهشی میزان انرژی باد در ماه آذر چشمگیر است. در این ماه آستانه‌ی حداقل و حداکثر باد تقریباً بین ۶ هزار تا ۶۴ هزار وات بر متر مربع کاهش یافته است. در این ماه مناطق شمالی استان دارای شرایط تولید انرژی مشابه مه‌ران هستند. در ماه دی روند میزان تولید انرژی بادی در مناطق مختلف استان افزایش یافته است. این روند افزایشی بخش‌هایی در مه‌ران، ایوان، ایلام و بخش بسیار کمی از دهلران دیده می‌شود. با این حال میزان تولید انرژی در ماه بهمن و اسفند تفاوت چندانی با هم ندارد. همچنین پراکنندگی مناطق دارای حداکثر توان باد در این دو ماه نیز مشابه هم هستند. آنچه که از نقشه میزان تولید انرژی در طول ماه‌های سال آشکار است، بیشینه بودن توان تولید انرژی مه‌ران در تمامی ماه‌های سال است (شکل ۶).



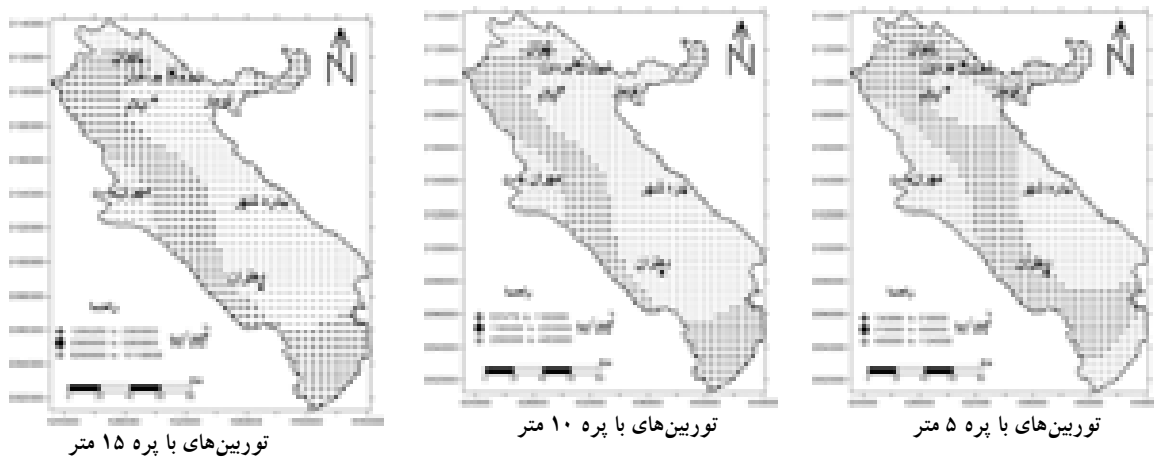
شکل ۶- میزان برآورد انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۱۵ متر در ماه‌های سال

برآورد سالانه تولید انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۵، ۱۰ و ۱۵ متر

نتایج حاصل از برآورد سالانه میزان تولید انرژی باد در استان ایلام حاکی از آن است که آستانه میزان حداقل و حداکثر تولید انرژی به وسیله توربین‌های با پره ۵ متر، تقریباً بین $\frac{1}{3}$ تا $\frac{11}{2}$ میلیون وات بر متر مربع است. مهران دارای بیشینه تولید انرژی در استان است. بخش‌هایی از این شهر می‌تواند بیش از ۱۱ میلیون وات بر متر مربع انرژی تولید کند. به طور کلی می‌توان گفت که مجموع تولید انرژی در طول هر سال در بیشتر نقاط استان (حدود ۵۵ درصد از سطح استان) تقریباً ۲ میلیون تا ۴ میلیون وات بر متر مربع است. با این وجود برآورد میزان تولید انرژی سالانه در استان به

وسیله توربین‌های با پره ۱۰ متر نشان داد که میزان تولید انرژی در استان ایلام تقریباً بین ۵ میلیون تا ۴۵ میلیون وات بر متر مربع است. بیش از ۵۷/۰ درصد از وسعت استان دارای تولید انرژی سالانه بین ۵ تا ۱۱ میلیون وات بر متر مربع است. همچنین بیشینه تولید انرژی بادی در غرب کشور بویژه در مهران وجود دارد.

نقشه میزان تولید انرژی به وسیله توربین‌های با پره ۱۵ متر حاکی از آن است که بیش از ۵۰ درصد از وسعت استان می‌تواند به وسیله توربین‌های با پره ۱۵ متر تقریباً بین ۱۲ میلیون تا ۲۳ میلیون وات انرژی بادی تولید کند. این در حالی است که مناطق دارای بیشینه تولید انرژی که شامل بخش‌هایی از مهران است تنها ۵/۲ درصد از وسعت استان را به خود اختصاص داده است. این منطقه می‌تواند به طور سالانه بین ۵۲ میلیون تا ۱۰۱ میلیون وات بر متر مربع انرژی بادی تولید کند (شکل ۷).



شکل ۷- میزان تولید سالانه انرژی باد به وسیله توربین‌های با پره ۵، ۱۰ و ۱۵ متر

نتیجه‌گیری

تجدیدپذیر بودن انرژی باد یکی از عواملی است که باعث شده بسیاری از کشورها به این منبع انرژی به عنوان پایه‌های اساسی رشد توجه داشته باشند. ایلام یکی از استان‌های غربی کشور است که شرایط حاد دمایی در آن باعث شده که سوخت‌های فسیلی در این استان مصرف بالایی داشته باشد. در این راستا توان سنجی استفاده از انرژی باد در استان ایلام الزامی به نظر می‌رسد. بنابراین این پژوهش با دو هدف شناسایی نواحی بادخیز در استان ایلام و برآورد انرژی باد در نواحی مختلف استان انجام شد. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در مناطق مختلف استان تندی باد متفاوت است. در بین مناطق مختلف استان، مهران از بیشینه تندی باد برخوردار است، با این حال در طول ماه‌های سال بخش‌هایی از دیگر مناطق استان دارای شرایط بادی شبیه به مهران بود. بنابراین به طور سالانه مهران بیشترین تندی باد را به خود اختصاص داده است. در نهایت می‌توان گفت که در دو ماه بهمن و اسفند تندی باد با هم تفاوت چندانی نداشته است اما بیشینه تندی باد در سه ماه خرداد، تیر و مرداد وجود دارد. نتایج حاصل از ضریب تغییر پذیری تندی باد در مناطق مختلف استان نیز نشان داد که آستانه میزان حداقل و حداکثر ضریب تغییر پذیری باد در استان ایلام تقریباً بین ۱۷ تا ۴۱ درصد است. ۳۷/۵ درصد از وسعت استان که بیشتر شامل مناطق شمال استان است، ضریب تغییر پذیری زیر ۰/۲۵ درصد را به خود اختصاص داده‌اند و ۶۲/۵ درصد از وسعت استان دارای ضریب تغییر پذیری بین ۰/۲۵ تا ۴۰/۶ درصد هستند.

علاوه بر این یافته‌های پژوهش بر اساس میزان سالانه تولید انرژی بادی به وسیله توربین‌های با پره ۵، ۱۰ و ۱۵ متر نشان داد که حداکثر میزان تولید انرژی به وسیله توربین‌های ذکر شده به ترتیب تقریباً ۱۱ میلیون، ۴۵ میلیون و ۱۰۱ میلیون وات بر متر مربع است. با این حال در بیشتر زمان‌های سال نیمه غربی استان نسبت به نیمه شرقی آن از توان تولید

انرژی باد بیشتری برخوردار است. بعد از نیمه غربی استان، نیمه شمالی آن دارای بیشینه تولید انرژی باد است. با توجه به نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در برنامه ریزی برای تولید انرژی، به نیمه غربی استان بویژه مهران توجه بیشتری شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تا متخصصین مرتبط با انرژی، میزان نیاز به انرژی در بخش‌های مختلف استان را محاسبه نمایند، تا متناسب با آن بهترین مکان جهت نصب توربین و همچنین نوع توربین بادی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع و مآخذ

۱. انتظاری، علیرضا، امیر احمدی، ابوالقاسم (۱۳۹۱)، ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال سوم، شماره نهم و دهم، پاییز و زمستان ۱۳۹۱، صص ۴۶-۳۳.
۲. بختیاری، بهرام، بذرافشان، بهرام، خانجانی، محمد جواد (۱۳۹۲)، ارزیابی پتانسیل انرژی باد بر مبنای داده‌های کوتاه مدت ۱۰ دقیقه‌ای در مناطق کرمان، جیرفت و بم، نشریه پژوهش‌های آبخیز داری شماره ۱۰۰، پاییز ۱۳۹۲ صص ۸۴-۷۶.
۳. روشن، غلامرضا، قانقرمه، عبدالعظیم، شاهکوئی، اسماعیل (۱۳۹۳)، ارزیابی پتانسیل انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران، فصلنامه برنامه ریزی منطقه ای، سال چهارم، شماره ۱۴، صص ۳۰-۱۳.
۴. سلیمانی، حسین، فرج زاده اصل، منوچهر، کرمی، جلال (۱۳۹۳)، ارزیابی تناسب جهت استقرار مزارع باد با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چند معیاره و GIS (مطالعه موردی: آذربایجان شرقی)، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره پیاپی ۵۵، صص ۴۲-۲۱.
۵. جهانبخش، سعید، رضایی بنفشه، مجید، دین پژوه، یعقوب، اسمعیل پور، مرضیه (۱۳۹۳)، امکان سنجی استفاده از انرژی باد در استان های اردبیل و زنجان، پژوهش های جغرافیای طبیعی، سال ۴۶، شماره ۳، صص ۲۷۴-۲۶۱.
۶. عزیزی، علی، جعفری، حمید رضا، ملک محمدی، بهرام، خوش اخلاق، فرامرز (۱۳۹۳)، مکان یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل های تحلیل سلسله مراتب فازی و تحلیل شبکه در استان کردستان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال چهاردهم، شماره ۳۴، صص ۱۹۴-۱۷۴.
۷. رحیم زاده، فاطمه، پدرام، مژده، صداقت کردار، عبدال... (۱۳۸۸)، برآورد انرژی باد در ایستگاه های همدیدی استان اصفهان، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۸۸ صص ۱۷۲-۱۵۵.
۸. زاهدی، مجید، صلاحی، برومند، جمیل، مجید (۱۳۸۴)، محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، پاییز ۱۳۸۴.
۹. محمدی، حسین، رستمی جلیلیان، شیما، تقوی، فرحناز، شمسی پور، علی اکبر (۱۳۹۱)، پتانسیل انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۲، صص ۳۲-۱۹.
۱۰. گندمکار، امیر (۱۳۸۸)، ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، زمستان، ۱۳۸۸، صص ۱۰۰-۸۵.
11. Bilal, B. O., Ndongo, M., Kebe, C. M. F., Sambou, V., and Ndiaye, P. A. (2013). Feasibility study of wind energy potential for electricity generation in the northwestern coast of Senegal. *Energy Procedia*, 36, pp. 1119-1129.
12. Billinton, R., Chen, H., & Ghajar, R. (1996). Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy. *Microelectronics Reliability*, 36(9), pp. 1253-1261.
13. Elmagri, A., Giri, F., Elfadili, A., and Dugard, L. (2013). Adaptive Nonlinear Control of Wind Energy Conversion System with PMS Generator
14. Emna, M. E., Adel, K., and Mimouni, M. F. (2013). The Wind Energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector Control and SMC Strategies. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 3(1), pp. 41-50.
15. Kunz, T. H., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., and Tuttle, M. D. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), pp. 315-324.
16. Lu, L., Yang, H., and Burnett, J. (2002). Investigation on wind power potential on Hong Kong islands—an analysis of wind power and wind turbine characteristics. *Renewable Energy*, 27(1), 1-12.
17. Harvey, L. D. (2013). The potential of wind energy to largely displace existing Canadian fossil fuel and nuclear electricity generation. *Energy*, 50, pp.93-102.
18. Mpholo, M., Mathaba, T., & Letuma, M. (2012). Wind profile assessment at Masitise and Sani in Lesotho for potential off-grid electricity generation. *Energy Conversion and Management*, 53(1), pp.118-127.
19. Rehman, S., El-Amin, I. M., Ahmad, F., Shaahid, S. M., Al-Shehri, A. M., Bakhshwain, J. M., & Shash, A. (2007). Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(4), pp. 635-653.
20. Schroeder, E. (2010). Turning Offshore Wind On, *California Law Review*, Vol. 98, Issue.5, pp.1631-1667.