

## ارزیابی انرژی بالقوه باد به منظور امکان‌سنجی تأسیس نیروگاه بادی در مناطق مختلف اردبیل

آذر بیرانوند<sup>۱</sup>، مسعود گودرزی<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری آب‌وهواشناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران.

۲- دکترا، دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران.

### چکیده

تجدیدپذیری، عدم آلودگی، گسترش جهانی منابع و سادگی بهره‌برداری، انرژی تجدیدپذیر را به‌ویژه برای کشورهای درحال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار کرده است. در مطالعه حاضر از داده‌های ۳ ساعته ایستگاه سینوپتیک اردبیل طی دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۲ و اطلاعات اطلس جهانی باد برای برهه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ در سطح شهرستان اردبیل بهره گرفته شده است. نتایج حاصله نشان داد که در سه ماه از سال (دسامبر، ژانویه، فوریه) قابلیت استحصال انرژی در بخش زیادی از ساعات شبانه‌روز در ایستگاه همدید اردبیل وجود دارد و در سایر ماه‌ها نیز در یک سوم ساعات شبانه روز این قابلیت پابرجاست. در اکثر ماه‌ها تغییرات معنی‌دار مثبت در روند سرعت باد ایستگاه اردبیل رخ داده است که به نفع استحصال انرژی می‌باشد. بیشینه روند مثبت متعلق به ژانویه بوده که در طول دوره حدود ۴ متر در ثانیه سرعت تغییرات مثبت داشته است. بر اساس واکاوی صورت گرفته بر روی اطلاعات اخذ شده از اطلس جهانی باد برای ۶ نقطه در مناطق بادخیز شهرستان اردبیل کمترین میزان سرعت باد و قدرت چگالی آن در اردبیل (حوالی ایستگاه همدید) و بیشترین آن متعلق به منطقه‌ای در دهستان هیر-بخش هیر در جنوب‌شرق شهرستان اردبیل می‌باشد. متوسط قدرت چگالی برای ۱۰ درصد منطقه منتخب در هر بخش در شهرستان اردبیل در ارتفاع ۵۰ متری، به ترتیب بیشینه مقدار را در دهستان هیر-بخش هیر، دهستان دوجاق-بخش ثمرین و دهستان فولادلوی-بخش هیر با مقادیر ۸۹۶ وات در مترمربع، ۷۲۰ وات در متر مربع و ۶۱۱ وات در متر مربع داشته است. در این مناطق متوسط باد در این ارتفاع ۸/۵۸، ۶/۴۱ و ۷/۲ متر در ثانیه می‌باشد. مطابق کلاس بندی باد در کمیسیون الکترونیکی بین‌المللی دهستان هیر-بخش هیر در کلاس دوم و دو ایستگاه دیگر در کلاس سوم این طبقه بندی جای می‌گیرند.

کلید واژه‌ها: امکان‌سنجی، اردبیل، اطلس جهانی باد، روند.

## مقدمه

انرژی یکی از مهمترین نهادهای حیاتی اجتماعی - اقتصادی توسعه می‌باشد (Keyhani et al., 2010). گسترش صنایع، افزایش روزافزون جمعیت و محدودیت منابع تجدیدناپذیر گرایش به مطالعه در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و به ویژه انرژی باد را شدت بخشیده است. ظرفیت تولید انرژی بادی جهان در سال ۲۰۱۵ به ۴۳۵ گیگاوات رسیده است و این تنها ۷ درصد از ظرفیت بالقوه تولید انرژی از این منبع عظیم انرژی پاک می‌باشد. کشورهای چین، آمریکا، آلمان، هند و اسپانیا پیشروان بهره‌برداری از این انرژی در جهان می‌باشند. کشور چین حدود ۵۰ درصد از انرژی بدست آمده از توان باد را در جهان به نام خود به ثبت رسانیده است. این در حالی است که ایران در سال ۲۰۱۵ تنها ۱۱۷ مگاوات یعنی حدود ۰/۰۳ درصد از کل انرژی بدست آمده از باد در جهان، تولید انرژی از توان باد داشته است (World Energy Council, 2016). گستره پهناور ایران با تنوع آب و هوایی ظرفیت بالقوه بالاتری را نسبت به آنچه در حال حاضر به بهره‌برداری رسیده است، دارد. لذا شناخت درست از الگوی زمانی-مکانی سرعت باد و تغییرپذیری سالانه و درون سالانه آن گامی آغازین برای تمرکز بر نواحی مستعد تولید برق بادی در کشور می‌باشد.

در زمینه روندیابی رفتار باد و انرژی حاصل از آن در جهان مطالعات زیادی صورت گرفته است. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2010) به بررسی تغییرات سرعت باد در چین در طول دوره آماری ۱۹۵۶-۲۰۰۴ پرداختند. بر اساس نتایج روند میانگین سالانه سرعت باد، روزهای همراه با بادهای قوی و حداکثر باد در اکثر نقاط چین کاهش یافته است و عواملی همچون افزایش میزان شهرنشینی، تغییر ابزار اندازه‌گیری و جابه‌جایی ایستگاه‌ها از عواملی بوده است که باعث کاهش متوسط سالانه سرعت باد ذکر شده است اما دلیل اصلی روند کاهش متوسط سالانه باد کاهش اختلاف فشار و حرارت سطح دریا و سطح زمین در اثر گرمایش جهانی ذکر شده است. پرایر و همکاران (Pryor et al., 2009) روند سرعت باد در آمریکا را بر اساس دو پایگاه داده‌ای از داده‌های دوباره تحلیل شده و نیز خروجی دو مدل محاسبه کردند. ایشان نتایج حاصل از داده‌های مختلف را با هم مورد مقایسه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مقادیر صدک ۵۰ و ۹۰ و نیز سرعت متوسط

باد روند کاهشی داشته است. تراکولی و همکاران (Troccoli et al., 2012) روند سرعت باد در استرالیا را برای دو دوره زمانی ۱۹۷۵-۲۰۰۶ و ۱۹۸۹-۲۰۰۶ مورد بررسی قرار داد. نتایج با توجه به ارتفاع (۲ یا ۱۰ متر) تفاوت‌هایی را نشان داده است به طوری که در ارتفاع ۲ متری مقادیر منفی بالا در روند مشاهده شده است اما در ارتفاع ۱۰ متری غالباً روند مثبت بوده است. رابطه کیفی بین روند مشاهده شده و چرخه‌های جوی مانند متوسط فشار سطح دریا، سرعت باد در ۸۵۰ هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال به خصوص در ارتفاع ۱۰ متری بیان شده است. هلت و وانگ (Holt And Wang, 2012) روند سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری را بر اساس داده‌های دوباره تحلیل شده NARR مورد توجه قرار دادند. روند مثبت معنی‌دار سالانه با مقادیر بالاتر فصلی در دو فصل بهار و زمستان در داده‌ها مشاهده شده است. روند مثبت در منطقه جنوب شرق و مناطق مرتفع به سبب روند افزایشی باد جنوبی است در حالی که روند در مناطق شمالی به سبب افزایش روند باد غربی رخ داده است. ترالبا و همکاران (Torralba et al., 2017) تغییرپذیری باد در بلند مدت در جهان را بر اساس داده‌های دوباره تحلیل شده ERA-I و MERRA-2 و JRA-55 در دوره زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه تغییرپذیری قوی فضایی و فصلی را در سرعت باد نشان داد و همچنین روند افزایشی در سرعت باد در اقیانوس‌ها و روند کاهشی در خشکی‌ها مشاهده شد.

سابقه بررسی ویژگی‌های باد و توجه به بکارگیری انرژی آن در کشور ما تقریباً به دهه ۱۳۷۰ برمی‌گردد (کاویانی، ۱۳۷۴: ۱۲۷-۱۴۴). اما در دهه‌های بعدی بر تعداد مطالعات افزوده شده و این امر مهم بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نتایج بررسی تغییرات سرعت باد در ارتفاع ده متری از سطح زمین در تعدادی از شهرهای بزرگ کشور توسط رحیم زاده و همکاران (۱۳۸۵) در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۱ نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد علاوه بر نوسانات شدید دارای روند کاهشی در اغلب شهرهای مورد مطالعه بوده است. گندمکار (۱۳۸۸)، به ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران پرداخت و به این نتیجه رسید که ایستگاه‌های همدید از نظر سرعت وزش باد در چهار گروه دارای توان بادخیزی بالا در بیشتر زمان‌های سال، دارای توان بادخیزی بالای در برخی

نشان داد که ایستگاه بیجار از ارتفاع تقریبی ۵۰ متری و ایستگاه زرینه اوباتو از ارتفاع ۱۰۰ متری به بعد برای نصب توربین‌های تجاری به صورت مزرعه‌ی بادی مناسب می‌باشند. صلاحی و همکاران (۱۳۹۴) برای دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۰ در استان فارس به ارزیابی پتانسیل باد پرداختند. نتایج نشان داد که ایستگاه همدیدی شیراز با چگالی توان بادی معادل ۵۸۴/۳۳ و ۱۱۶۴/۲۷ وات بر متر مربع در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری و قرارگیری در طبقه هفتم اطلس انرژی باد ایالات متحده دارای پتانسیل خوبی برای استحصال انرژی بادی می‌باشد. محمدی (۱۳۹۴) توان باد را برای توربین‌های با شعاع چرخان ۱۰، ۱۵ و ۲۵ متری در استان کردستان مورد محاسبه قرار داده است. مناطق زرینه اوباتو، قروه و بیجار نسبت به بقیه مناطق از توان بالاتری برای تولید انرژی بادی برخوردار هستند. در بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه بررسی انرژی باد از جمله میرحسینی و همکاران (Mirhosseini et al., 2011)، سعیدی و همکاران (Saeidia et al., 2011)، محمدی و همکاران (۱۳۹۱)، میرموسوی (Mirmousavi, 2015)، فاضل پور و همکاران (Fazelpour et al., 2015) و دباغیان (Dabbaghiyan, 2016) استفاده از توزیع احتمالی ویبول مشاهده شده است. برخی مطالعات نظیر انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) و یوسفی و همکاران (۱۳۹۵) سهم لایه‌های مختلف اطلاعاتی مؤثر بر بهره‌برداری از انرژی بادی را مد نظر قرار داده و با تحلیل‌های سلسله‌مراتبی مانند AHP به مکانیابی سایت‌های مناسب برای بهره‌برداری از انرژی بادی پرداخته‌اند.

با توجه به اهمیت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان درحال توسعه امروز، هدف از این مطالعه بررسی و امکان‌سنجی انرژی باد در اردبیل می‌باشد. در این مطالعه علاوه بر داده‌های زمین‌پایه از اطلاعات و نقشه‌های سامانه اطلس جهانی باد که بر پایه داده‌های شبکه‌ای می‌باشد نیز استفاده شده است. گروبر و همکاران (Gruber et al., 2022) با تأکید بر استفاده از داده‌های بازتحلیل برای شبیه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه تولید برق بادی، به ارزیابی قیاسی دو نوع داده MERRA-2 و ERA5 پرداختند. ایشان مناطقی را مورد ارزیابی قرار دادند که به طور قابل توجهی از نظر آب‌وهوایی متفاوت می‌باشند، شامل ایالات متحده، برزیل، آفریقای جنوبی و نیوزیلند. یافته‌های اصلی ایشان نشان داد که ERA5 از نظر معیارهای خطای ارزیابی شده بهتر از MERRA-2 عمل می‌

زمان‌های سال در بخش‌هایی از شبانه روز، دارای توان بادخیزی در زمان‌های محدودی از سال و فاقد توان بادخیزی در تمام طول سال جای می‌گیرند. رحیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) به برآورد انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان پرداختند بر طبق نتایج تحقیق سرعت باد در طول ماه‌های سرد سال (نوامبر، دسامبر و ژانویه) نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است. با شروع فصل بهار (آوریل)، سرعت باد در منطقه کم‌کم افزایش می‌یابد و روند کاهشی از ماه سپتامبر به بعد مجدداً شروع می‌شود. جوان (۱۳۸۹) با استفاده از روش‌های آماری روند تغییرات سرعت باد را در شمال‌غرب کشور مورد بررسی قرار داد و اذعان داشت که شمال‌غرب ایران از نظر سرعت باد منطقه همگنی نیست و روندهای حادث شده در منطقه تابع نظم خاصی نیست. در ایستگاه‌های ارومیه و خوی روند کاهشی و در اردبیل و زنجان روند افزایشی و در تبریز و سنندج در یک و دو سری زمانی روند کاهشی دیده می‌شود و ایستگاه سقر در مقیاس‌های فصلی و سالانه فاقد روند است. قهرمان و قره‌خانی (۱۳۸۹) با بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گستره اقلیمی ایران به این نتایج رسیدند که در سری زمانی سالانه بر اساس روش‌های من-کندال، اسپیرمن و پیرسون به ترتیب ۵۰ و ۷۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند بوده‌اند همچنین مشخص شد که بیشترین روند افزایشی در فصل زمستان و کمترین روند افزایشی در فصل تابستان مشاهده گردید. علمداری و همکاران (Alamdari et al., 2012) در ارزیابی انرژی باد برای ایران داده‌های ۱۰ دقیقه‌ای سرعت باد را برای سال ۲۰۰۷ در ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری از سطح زمین به کار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که شرق و شمال‌غرب ایران از پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی برای استحصال انرژی بادی برخوردار می‌باشد. مناطق مرکزی و جنوبی مطابق خروجی حاصل از کار این پژوهشگران مناسب نصب توربین تشخیص داده نشده است و تنها مناسب راه‌اندازی پمپ‌های آب و کارهای کوچک می‌باشند. مجرد و همتی (۱۳۹۲) داده‌های ۳ ساعته باد را برای ۱۱ ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و کردستان به کار گرفتند. ایشان مجموع ساعات با سرعت کمتر از ۳ متر در ثانیه را به عنوان ساعات سکون و با سرعت برابر یا بیشتر از آن را به عنوان ساعات تداوم در نظر گرفته‌اند. بررسی تداوم سرعت، میانگین سرعت و چگالی قدرت باد در این مطالعه

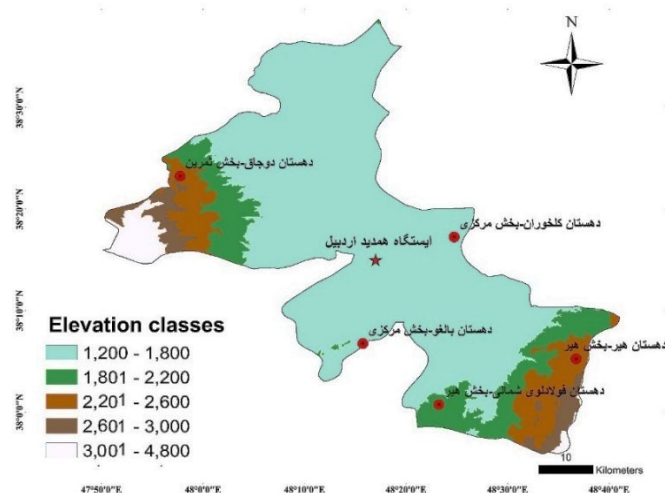
است. ارزیابی کارایی آن در پهنه کشور نیز نتایج نسبتاً مناسبی را نشان داده است. بنابراین با استناد به پژوهش‌های موجود می‌توان از نقشه‌ها و اطلاعات اطلس جهانی باد برای مطالعات کلی اولیه در مناطق مختلف بهره برد، سپس با شناسایی پتانسیل‌های قابل توجه در این زمینه، به امکان‌سنجی دقیق پرداخت. مطالعه حاضر یک گام اولیه برای شناسایی پتانسیل‌های موجود بادی در شهرستان اردبیل می‌باشد که با اتکا به داده محدود زمینی قابل تبیین نبوده و لذا از اطلس جهانی باد استفاده شده است.

### داده‌ها و روش‌ها

شهرستان اردبیل مرکز استان اردبیل در شمال غرب ایران می‌باشد. رشته کوه‌های سبلان در غرب این شهرستان از سه قله‌ی سلطان ساوالان، هرم داغی و جنوار داغی تشکیل شده است. ساوالان که نام محلی سبلان به معنی آبگیر است، ارتفاعی برابر با ۴۸۱۱ متر دارد. این کوه در ۳۵ کیلومتری غرب شهر اردبیل و ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی مشگین‌شهر قرار دارد. سبلان سومین قله بلند ایران پس از دماوند و علم کوه و یکی از ۱۵۱۵ قله بسیار برجسته جهان به‌شمار می‌رود. همچنین کوه‌های تالش در جنوب شرق اردبیل دیده می‌شوند (شکل ۱). ارتفاعات فوق بر آب‌وهوای این استان تأثیرات زیادی دارند. در واقع اردبیل با واقع شدن در دامنه کوه مرتفع سبلان و با فاصله کم از بندر آستارا با ارتفاع ۳۰ - به منزله دامنه وسیع کوه مرتفعی مشرف بر دریاست که دارای اقلیم مناطق فوقانی از یک طرف و تأثیرپذیری از مناطق بحری از طرف دیگر است. شهرستان اردبیل دارای چهار اقلیم مدیترانه‌ای گرم، مدیترانه‌ای معتدل، کوهستانی سرد و معتدل است. این شهرستان به عنوان یکی از مناطق سردسیر ایران و استان بوده و بین پنج تا هشت ماه از سال سرد است.

در مطالعه حاضر از داده‌های ۳ ساعته ایستگاه همدید اردبیل طی دهه ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۲ بهره گرفته شده است. از این رو، به منظور پتانسیل‌سنجی انرژی باد برای این ایستگاه داده‌های مربوط به سرعت و جهت باد و نیز دما که در ساعات اصلی (۰۶، ۱۲ و ۱۸) و ساعات فرعی (۰۳، ۰۹، ۱۵ و ۲۱) به وقت گرینویچ در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین اندازه‌گیری شده‌اند بهره گرفته شده است و گلباد سرعت و انرژی آن با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT نسخه ۷ ترسیم گردیده است.

کند. مولینا و همکاران (Molina et al., 2022) سرعت باد ساعتی ۱۰ متر از داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل ERA5 را با مشاهدات باد در ۲۴۵ ایستگاه در سراسر اروپا مقایسه نمودند. نتایج ایشان حاکی از این است که میانگین داده‌های ساعتی ERA5 می‌تواند چرخه سالانه سرعت ماهانه باد در اروپا را بازتولید کند. ERA5 میانگین ماهانه کمی بزرگتر (کوچکتر) را در زمستان (تابستان) نسبت به مشاهدات زمینی نشان می‌دهد. از طرفی ERA5 قادر به بازتولید طیف سرعت باد، از خفیف تا نسبتاً قوی، برای هر مکانی در اروپا می‌باشد. نکته قابل توجه در مطالعه ایشان این است که همبستگی بین ERA5 و داده‌های زمینی در بازه زمانی طولانی‌تر (۶ تا ۲۴ ساعت) افزایش می‌یابد و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و انحراف استاندارد کاهش می‌یابد. ایشان معتقدند که داده‌های بازتحلیل باد ERA5 حتی در مقیاس زمانی ساعتی، علی‌رغم برخی کاستی‌ها، اطلاعات ارزشمندی برای انجام مطالعات دقیق بیشتر با توزیع منظم مکانی و زمانی باد، از دیدگاه‌های اقلیمی با انرژی‌های تجدیدپذیر به‌شمار می‌آیند. پوتیسومپورن و همکاران (Potisomporn et al., 2023) نیز در پهنه بریتانیا به ارزیابی داده بازتحلیل ERA5 با اندازه‌گیری‌های سرعت باد در ۲۰۵ ایستگاه خشکی و فراساحلی پرداختند. مشخص شد که ERA5 دارای انحراف در میانگین سرعت باد ۰.۱۶۶ متر بر ثانیه و ۰.۱۳۶ متر بر ثانیه برای مناطق خشکی و فراساحلی است. این نوع خطا در پاییز و زمستان بارزتر است. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که بزرگترین خطاها مربوط به مکان‌هایی است که در مناطق ساحلی و کوهستانی واقع شده‌اند. در ایران نیز سام‌خانی و محمدی (۱۴۰۱) به ارزیابی داده‌های بازتحلیل ERA5 با استفاده از داده‌های زمین‌پایه پرداختند. ایشان پارامترهای مختلف از جمله سرعت باد ۱۰ متری زمین را در ۴۰۶ ایستگاه همدیدی برای سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ مورد ارزیابی قرار دادند. مطابق نتایج ایشان میانگین همبستگی دو نوع داده مربوط به سرعت باد در پهنه کشور ۰.۴۹ بوده است. همچنین بررسی اریبی داده‌های بازتحلیل به نسبت داده‌های ایستگاهی کم‌برآوردی این نوع داده را نشان داده است. سامانه اطلس جهانی باد از داده‌های سرعت باد ERA5 بهره برده است. با توجه به آنچه گفته شد با وجود عدم قطعیت‌هایی در این نوع داده، استفاده از آن بیش از سایر داده‌های شبکه‌ای پیشنهاد شده



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه (اردبیل) به همراه طبقات ناهمواری و نمایش ایستگاه‌های منتخب برای بررسی وضعیت سرعت و انرژی باد

از مقابل پرها عبور می‌کند. البته پره‌های توربین تمام انرژی جنبشی باد را نمی‌گیرند زیرا اگر چنین بود، باد پس از برخورد به پرها سرعتش صفر می‌شد و متوقف می‌گردید. به طور نظری حداکثر قدرت باد در یک توربین بادی که ممکن است تبدیل به انرژی مکانیکی شود  $\frac{16}{27}$  یعنی تقریباً ۵۹/۳ درصد انرژی جنبشی باد است که آن را ضریب توان ماکزیمم نیز می‌نامند (تقفی، ۱۳۷۲: ۹۲-۸۹). البته به سبب پارامترهایی چون درگ پرها، راندمان آئرو دینامیکی روتور، تلفات ناشی از بخش‌های مکانیکی هر سیستم عملی، این ضریب کمتر از مقدار مذکور است (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴).

چگالی هوا در ارتفاع و دمای متفاوت تغییر می‌کند، لذا میزان آن را نسبت به شرایط متعارف سطح دریا و دمای ۱۵/۵ درجه سانتیگراد، طبق جداولی که در دست است تصحیح کرده و آن را ضریب چگالی نسبت به ارتفاع (DRA) و ضریب چگالی نسبت به دما (DRT) می‌نامند. برای محاسبه قدرت عملی ایستگاه از رابطه زیر بهره برده شده است:

$$P = K \times e \times DRA \times DRT \times A \times V^3 \quad (5)$$

در این رابطه P قدرت عملی توربین، K ضریب ثابت، e بازده توربین، DRA نسبت چگالی در ارتفاع، DRT نسبت چگالی در دما، A سطح جارو شده به وسیله پره‌های توربین (در اینجا ۶ متر در نظر گرفته شده است) و V سرعت جرم هوا می‌باشد (تقفی، ۱۳۷۲: ۹۲-۸۹). چگالی هوا با تغییر ارتفاع و با تغییر دما تغییر می‌کند. تغییرات چگالی هوا در شرایط

قدرت باد حاصل ضرب نیرو در سرعت است، چون نیروی باد متناسب با مربع سرعت آن است، قدرت باد متناسب با مکعب سرعت آن خواهد بود. برای محاسبه قدرت نظری در توربین‌های بادی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K.E = \frac{1}{2} M V^2 \quad (1)$$

در این رابطه K.E انرژی جنبشی، M جرم هوای در حرکت (باد)، V سرعت جرم هوا می‌باشد. قدرت نظری توربین (P) از برخورد جرم هوا به آن در واحد زمان به دست می‌آید:

$$P = K.E / \text{واحد زمان} \quad (2)$$

که در این رابطه m جرم هوا در واحد زمان عبارت است از:

$$m = P.A.V \quad (3)$$

در اینجا P چگالی هوا، A سطح جارو شده به وسیله پره‌های توربین، V سرعت جرم هوا می‌باشد. در شرایط متعارف دما و فشار، چگالی هوا تقریباً  $1.21 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. از ترکیب فرمول‌های (۱)، (۲) و (۳) فرمول نظری قدرت توربین بادی به دست می‌آید.

$$P = \frac{1}{2} \rho.A.V^3 \quad (4)$$

که در این رابطه P قدرت نظری بر حسب (m)،  $\rho$  چگالی هوا برابر ( $1.21 \text{ kg/m}^3$ )، A سطح بر حسب ( $\text{m}^2$ ) و V سرعت بر حسب (m/s) می‌باشد.

بازه پره‌های توربین بادی عبارت است از نسبت انرژی جنبشی که پرها از باد می‌گیرند به انرژی جنبشی کل باد که

چگالی هوا متناسب با دماهای مختلف فرق می‌کند. نسبت چگالی در درجه‌های مختلف هوا برابر با ۶۰ درجه فارنهایت می‌باشد که آن را با DRT نشان می‌دهند. جدول زیر تغییرات چگالی هوا را نسبت به دما نشان می‌دهد (همان؛ ۹۱):

متعارفی (۶۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۵/۵ درجه سانتیگراد در کنار دریا) ۰/۰۶۷ پوند برای یک فوت مکعب ( ۱/۲۱ کیلوگرم برای یک متر مکعب) است. جدول زیر تعدادی از تغییرات چگالی هوا را نسبت به ارتفاع نشان می‌دهد (همان ص ۹۱):

جدول ۱. تغییرات چگالی هوا نسبت به ارتفاع

ارتفاع به فوت	۰	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۷۵۰۰	۱۰۰۰۰
DRA (در ۶۰ F)	۱	۰/۹۱۲	۰/۸۳۲	۰/۷۵۶	۰/۶۸۷

مأخذ: ثقفی، ۱۳۷۲

جدول ۲. تغییرات چگالی هوا نسبت به دما

دما به F	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
DRT	۱/۳۰	۱/۰۸۳	۱/۰۴۰	۱	۰/۹۳۶	۰/۹۲۹	۰/۸۹۷

مأخذ: ثقفی، ۱۳۷۲

رایگان حاصل از فرآیند مقیاس‌کاهی است که با دریافت داده‌های باد در مقیاس بزرگ، آنها را به داده‌های باد در مقیاس کوچک تبدیل می‌کند. داده‌های اقلیمی باد در مقیاس بزرگ توسط داده‌های باز تحلیل جوی ارائه می‌شوند، در GWA نسخه ۳، مجموعه داده ERA5 از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا (ECMWF) برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۰۸-۲۰۱۷ استفاده شده است. داده‌ها بر روی یک شبکه با ابعاد تقریباً ۳۰ کیلومتر قرار دارند. برای وارد کردن این داده‌ها به مدل WRF در مقیاس متوسط با فاصله شبکه تعمیم‌یافته ۳ کیلومتر استفاده می‌شود. در مرحله بعد، با دریافت مجموعه‌ای از مقادیر اقلیمی باد آنها را با استفاده از سیستم مقیاس‌کاهی DTU Wind Energy به سراسر جهان (به جز قطب‌های شمال و جنوب و مناطق دور از ساحل اقیانوس) تعمیم می‌دهد. فرآیند مقیاس‌کاهی از طریق یک برنامه کاربردی مبتنی بر وب با نام WASP انجام می‌شود که در آن داده‌ها در ابعاد شبکه‌ای محلی ۲۵۰ متر در پنج ارتفاع ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر تولید می‌شوند. مجموعه داده‌ها و برنامه‌های کاربردی مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل آماری برای ابعاد مقادیر شبکه ۲۵۰ متری در وب سایت GWA موجود است.

در این برنامه مدل‌سازی برای اجرای مدل‌سازی در منطقه بسیار بزرگ، از نرم افزار و سرور به نام GWA Frogfoot

به‌منظور سنجش تغییرات بلند مدت سرعت متوسط باد در این مطالعه از روش رگرسیون خطی ساده بهره گرفته شده است. در این روش معادله برازش خط به صورت رابطه ۶ است:

$$\hat{y}_i = a + bt_i \quad (6)$$

این معادله یک معادله درجه اول است و رابطه‌ای خطی را

بیان می‌دارد. در این رابطه  $\hat{y}$  مختصات خط به ازای  $t$ های

مختلف است. جزء  $a + bt_i$  در این معادله به عنوان مؤلفه

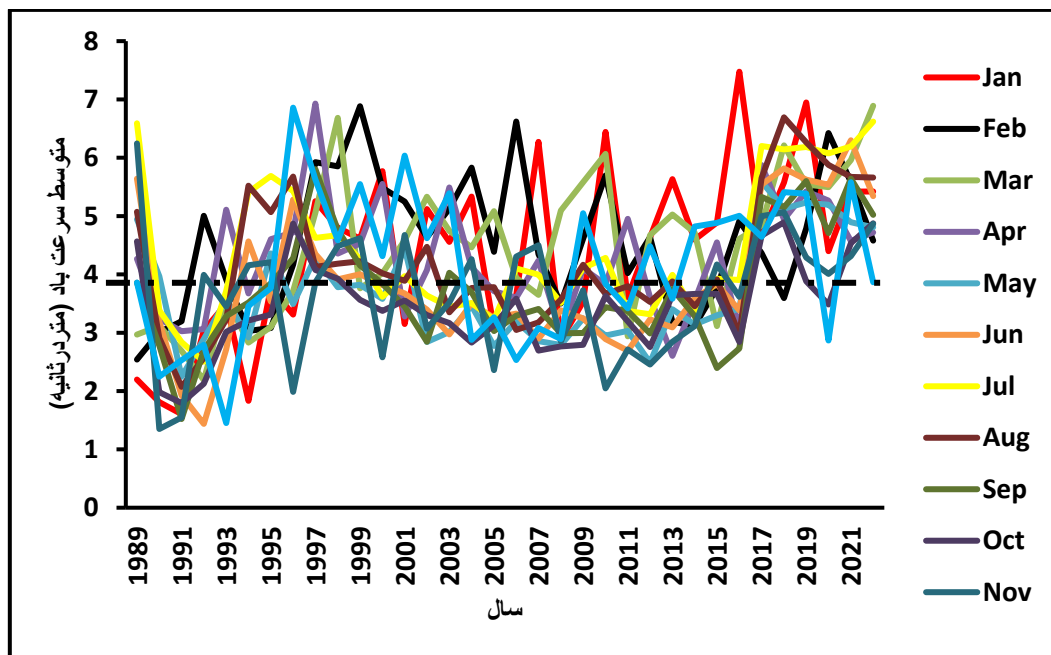
قطعی موسوم است که در آن  $a$  عرض از مبدا و  $b$  شیب خط حاصل از معادله است. عرض از مبدا، بیان‌گر نقطه‌ی آغاز ارتباط دو متغیر است درحالی‌که شیب خط، مقدار کجی و انحناء بهترین خط برازش یافته و عبارت از تانژانت زاویه خط وایازی و محور افقی (X) است (عساکره، ۱۳۹۰). مثبت یا منفی بودن شیب خط به ترتیب بیان‌گر روند افزایشی یا کاهش می‌باشد، در حالی‌که صفر بودن آن دال بر فقدان روند است. در این پژوهش به منظور محاسبه ضرایب رگرسیونی، از روش کم‌ترین مربعات خطا (LSE) بهره گرفته شده است. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر به همراه دانشگاه صنعتی دانمارک (DTU) کامل‌ترین اطلس بادهای جهان را ارائه نموده‌اند. GWA (Global Wind Atlas). سامانه برخط

استفاده می‌شود. روش آن بسیار شبیه به چیزی است که در نرم افزار WASP استفاده می‌شود. به عنوان مثال، روش مدل سازی جریان برای کوه نگاری، زبری و تغییر زبری در نرم افزار WASP یکسان است. با این حال، محاسبه GWA از راه‌های مختلفی انجام می‌شود تا بتوان یک منطقه بسیار بزرگ را پوشش دهد. در این سامانه در مواردی که برای انجام محاسبات مربوط به سرعت و انرژی باد در ارتفاعات مختلف نقطه‌ای تعریف می‌شود، تمام محاسبات در شبکه‌ای با ابعاد ۳ در ۳ کیلومتر (۹ کیلومتر مربع) به انجام می‌رسد. در مطالعه حاضر ۶ نقطه شامل ایستگاه همدید اردبیل و ۵ نقطه در مناطق بادخیز این شهرستان با استفاده از اطلاعات این سامانه مورد واکاوی قرار گرفته است. موقعیت نقاط فوق در شکل ۱ ارائه شده است. در نمودارهای استخراجی از این سامانه از شاخص سرعت باد استفاده شده است که این فراسنج حاصل تقسیم متوسط سالانه سرعت باد بر متوسط ده ساله (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) می‌باشد (Badger et al., 2015).

## نتایج و بحث

بر اساس آنچه در شکل ۲ قابل مشاهده است، تغییرات درون‌دوره‌ای در متوسط سرعت باد در ایستگاه همدید اردبیل را می‌توان به سه زیر دوره تقسیم نمود. از سال ۱۹۹۰ تا سال ۱۹۹۵ در اکثر ماه‌ها متوسط سرعت باد کمتر از ۴ متر در ثانیه بوده است (حداقل سرعت مورد نیاز برای به حرکت در آوردن توربین بادی ۴ متر در ثانیه است و به عنوان یک معیار در سنجش پتانسیل انرژی بادی این ایستگاه مورد توجه قرار گرفته است)، از سال ۱۹۹۵ به بعد رفتار این متغیر به گونه‌ای بوده است که در هر سال حداقل ۴ ماه متوسط سرعت ۴ متر به بالا را داشته است، از سال ۲۰۱۷ به بعد در هر سال در اغلب ماه‌ها متوسط سرعت بیش از ۴ متر در ثانیه مشاهده می‌شود. جدای از علت‌یابی این تغییرات در ماه‌های مختلف در هر سال طی دوره مورد مطالعه باید به این نکته توجه نمود که این تغییرات می‌تواند به نفع استحصال انرژی بادی در این ایستگاه باشد. چرا که متوسط رخداد بالای ۴ متر در ثانیه شرایط مطلوبی برای بهره‌برداری از این انرژی تجدیدپذیر می‌باشد.

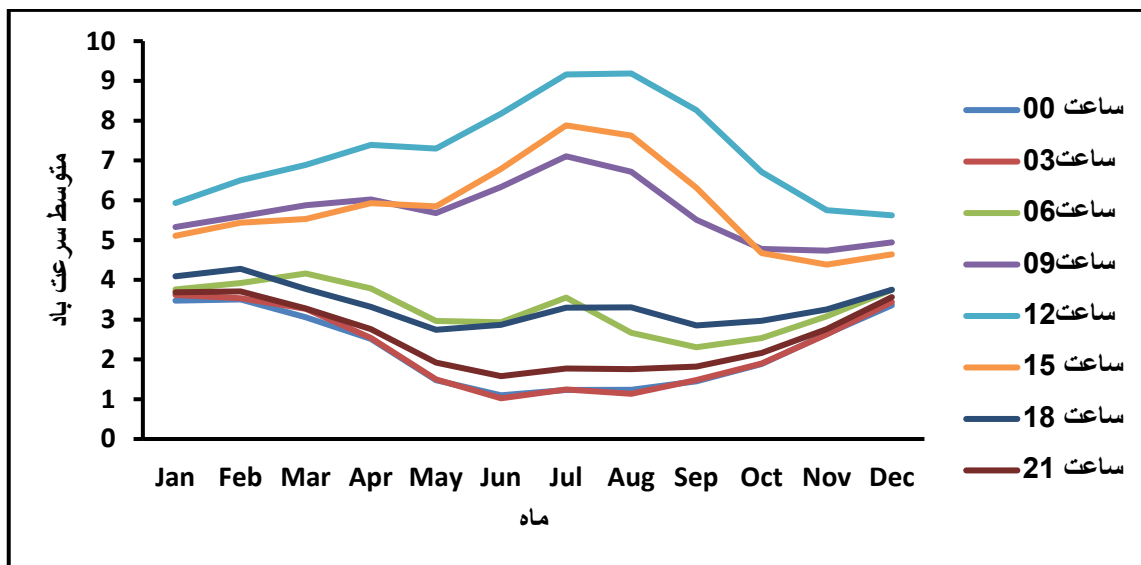
از زمان انقلاب صنعتی، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به دلیل فعالیت‌های انسانی باعث نگرانی‌های قابل توجهی درخصوص گرم شدن کره زمین با افزایش میانگین دمای سطح شده است (Dai et al, 2022). در این راستا بررسی توزیع زمانی متوسط دمای هوای فصلی ایران بر اساس مدل MPI-ESM-LR برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سه سناریو خوش بینانه RCP۲/۶، RCP۴/۵ و RCP۸/۵ (جدول ۱) نشان می‌دهد که در همه دوره‌های آینده و تحت هر سه سناریو، افزایش دمای هوا در هر چهار فصل سال پیش‌نگری شده است به طوری که در تمام فصول سال کمینه گرمایش هوا تحت سناریو RCP۲/۶ در دوره آینده دور به میزان ۷/۱، ۲۱/۵، ۲۵/۷، ۱۰/۸ درجه سلسیوس و بیشینه افزایش دما تحت سناریو بدبینانه RCP۸/۵ در دوره آینده دور به میزان ۱/۵، ۲۵/۷، ۳۰/۳، ۱۴/۹ درجه سلسیوس به ترتیب در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز پیش‌نگری شده است. در حالی که در دوره تاریخی متوسط دمای هوا در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۶/۳، ۲۰/۳، ۲۴/۸ و ۹/۹ درجه سلسیوس می‌باشد و به وضوح افزایش دما در دوره‌های آتی نسبت به دوره تاریخی یا مشاهداتی با اختلاف ۴/۲ درجه سلسیوس تحت RCP۸/۵ و ۰/۸ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل زمستان، اختلاف ۵/۴ درجه تحت RCP۸/۵ و ۱/۲ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل بهار، اختلاف ۵/۵ درجه تحت RCP۸/۵ و ۰/۹ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل تابستان و اختلاف ۵ درجه سلسیوس تحت RCP۸/۵ و ۰/۹ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل پاییز را نشان می‌دهد. همچنان که اختلاف RCP۴/۵ نسبت به دوره تاریخی نیز مابین مقادیر اختلافی RCP۲/۶ و RCP۸/۵ است. توسعه شهرها و افزایش استفاده از وسایل نقلیه و افزایش آلاینده‌ها به دنبال صنعتی شدن هرچه بیشتر فعالیت‌ها به گرمایش هرچه بیشتر هوا در دوره‌های پیش‌رو دامن خواهد زد (تقوی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۲. نمودار سری‌زمانی ماهانه متوسط سرعت باد (متر در ثانیه) در ایستگاه همدید اردبیل.

متر در ثانیه رخ داده است. در ساعت ۱۵ حدوداً بیش از ۶۰ درصد روزها و در ساعت ۹ نیز بیش از ۶۵ درصد روزها در طی سال این‌گونه بوده است. در ژانویه و دسامبر در تمام ساعات شبانه‌روز بیش از یک سوم روزهای مورد بررسی سرعت باد بالاتر یا مساوی ۴ متر در ثانیه را به ثبت رسانده‌اند. در ماه فوریه نیز به‌جز در ساعت ۳ در سایر ساعات شبانه‌روز بیش از یک سوم روزهای مورد بررسی سرعت باد بالاتر یا مساوی ۴ متر در ثانیه را داشته است. به عبارتی در سه ماه از سال قابلیت استحصال انرژی در بخش زیادی از ساعات شبانه‌روز در این ایستگاه وجود دارد و در سایر ماه‌ها نیز در یک سوم ساعات شبانه‌روز این قابلیت پابرجاست. بررسی روند تغییرات سرعت باد در ساعت ۱۲ که در تمام ماه‌ها بیشینه سرعت باد در این ایستگاه مشاهده شد، با استفاده از رگرسیون خطی محاسبه شد (جدول ۴). همانطور که دیده می‌شود در تمام ماه‌ها تغییرات معنی‌دار در روند سرعت باد ایستگاه اردبیل رخ داده است. این تغییرات در تمام ماه‌ها بجز ماه می به نفع استحصال انرژی می‌باشند چرا که تغییرات مثبت معنی‌دار بوده است. بیشترین تغییرات در ماه ژانویه بوده که در ۳۶ سال مورد بررسی بیش از ۴ متر در ثانیه به متوسط سرعت باد در این ساعت افزوده شده است و با شیب قابل توجه تغییر مثبت در آن اتفاق افتاده است.

به منظور بررسی تغییرات ساعتی متوسط سرعت باد در ایستگاه همدیدی اردبیل، برای ۸ مقطع زمانی در روز به تفکیک ماه در هر سال به ترسیم نمودار پرداخته شد (شکل ۳). بر این اساس مشخص شد که تغییرات روزانه این متغیر بیشترین دامنه تغییر را در ماه‌های گرم سال دارد. به‌طوری‌که در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر تفاوت فاحش متوسط سرعت وزش باد در ساعات میانی روز نسبت به سایر ساعات دیده می‌شود. این در حالی است که در ماه‌های سرد سال از نوامبر تا آوریل مقادیر متوسط سرعت باد به سمت ارقام نزدیک به هم حالت همگرایی نشان می‌دهد بدین معنا که دامنه سرعت در ساعات مختلف این ماه‌ها مقادیر مشابه‌تری را تجربه می‌کند. در ساعات ۹، ۱۲ و ۱۵ رخداد سرعت بیش از ۴ متر در ثانیه در تمام ماه‌ها این امکان را برای بدست آوردن انرژی در تمام ماه‌ها از این متغیر به دست می‌دهد اما در ماه‌های سرد گرچه بیشینه سرعت وزش در ساعات فوق‌کمتر از ماه‌های گرم می‌باشد اما با توجه به اینکه در سایر ساعات شبانه‌روز نیز سرعت باد متوسط نزدیک به ۴ متر در ثانیه را نشان می‌دهد قابلیت استحصال انرژی با تداوم بالاتر و در ساعات بیشتری فراهم می‌آورد. مطابق جدول ۳، در ساعت ۱۲ در این ایستگاه در دوره مورد مطالعه بین ۸۲ درصد در ماه‌های دسامبر و ژانویه تا ۱۰۰ درصد روزها در ۶ ماه از سال سرعت باد بالاتر یا مساوی ۴



شکل ۳. تغییرات متوسط سرعت باد (متر در ثانیه) در مقیاس سه ساعته برای هر ماه در ایستگاه همدید اردیبه‌ل طی دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۲. جدول ۳. درصد رخداد متوسط باد با سرعت بالای ۴ متر در ثانیه برای ساعات مختلف در هر ماه در طول دوره مورد مطالعه (۱۹۸۹-۲۰۲۲)

ماه	ساعت ۰۰	ساعت ۰۳	ساعت ۰۶	ساعت ۰۹	ساعت ۱۲	ساعت ۱۵	ساعت ۱۸	ساعت ۲۱
ژانویه	۳۵/۳	۳۵/۳	۴۱/۲	۷۹/۴	۸۲/۳	۷۳/۵	۶۱/۷	۴۱/۱
فوریه	۳۲/۳	۲۶/۵	۵۰	۷۹/۴	۹۴/۱	۸۲/۳	۵۰	۳۲/۳
مارس	۱۷/۶	۲۶/۵	۵۸/۸	۸۲/۳	۹۷	۸۸/۲	۲۹/۴	۲۰/۱
آوریل	۵/۹	۸/۸	۳۸/۲	۹۴/۱	۱۰۰	۹۱/۱	۲۳/۵	۱۱/۸
می	۰	۰	۱۷/۶	۹۱/۱	۱۰۰	۹۴/۱	۱۴/۷	۵/۶
ژوئن	۰	۰	۱۷/۶	۹۱/۱	۹۷/۱	۹۷	۲۰/۶	۹/۲
جولای	۰	۰	۲۹/۴	۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۲۹/۴	۲/۹
اگوست	۰	۰	۱۷/۶	۹۴/۱	۱۰۰	۱۰۰	۲۶/۵	۲/۹
سپتامبر	۰	۰	۲/۹	۹۱/۱	۱۰۰	۹۴/۱	۲۰/۶	۲/۹
اکتبر	۰	۰	۲/۹	۷۳/۵	۱۰۰	۶۷/۶	۸/۸	۲/۹
نوامبر	۵/۹	۸/۸	۱۴/۷	۶۷/۶	۹۱/۲	۵۸/۸	۳۲/۳	۸/۸
دسامبر	۳۲/۳	۴۱/۲	۴۷	۶۴/۷	۸۲/۳	۶۷/۶	۳۸/۲	۳۸/۲

جدول ۴. معادله‌های رگرسیون خطی روند متوسط سرعت ماهانه باد برای ساعت ۱۲ در ایستگاه همدید اردیبه‌ل.

ماه	معادله خط	ماه	معادله خط
جولای	$Y=0.0331x+8.5836$	ژانویه	$Y=0.1143x+3.9315$
اگوست	$Y=0.0419x+8.454$	فوریه	$Y=0.0144x+6.251$
سپتامبر	$Y=0.0172x+7.9649$	مارس	$Y=0.0781x+5.5202$
اکتبر	$Y=0.0105x+6.5299$	آوریل	$Y=0.0165x+7.6802$
نوامبر	$Y=0.013x+5.5247$	می	$Y=-0.015x+7.5617$
دسامبر	$Y=0.0164x+5.3351$	ژوئن	$Y=0.0341x+7.5794$

\*\*معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹٪. Y رفتار متوسط ماهانه باد (شیب متوسط باد) و X سال می‌باشد.

سطح دنیا ارتفاع ۵۰ متر دارند وضعیت سرعت باد در این ارتفاع در شهرستان اردبیل قابل توجه می باشد. با توجه به اینکه در دو ارتفاع مورد بررسی، برخی مناطق این شهرستان سرعت‌های متوسط سالانه (۲۰۰۸-۲۰۱۷) باد خوبی را نشان می‌داند ۵ منطقه (برای هر نقطه یک شبکه ۹ کیلومتر مربعی در اطلس جهانی باد برای محاسبه پارامترهای مختلف وضعیت باد در نظر گرفته می‌شود) در اطلس جهانی در این شهرستان انتخاب و به واکاوی شرایط آن پرداختیم. همچنین ایستگاه همدید اردبیل که پیشتر از این به بررسی شرایط وزش باد آن در سطح زمین پرداخته بودیم نیز در این ارتفاع‌ها مورد واکاوی قرار گرفت.

مطابق شکل ۶ متوسط سرعت باد در ایستگاه همدید اردبیل کمتر از ۴ متر در ثانیه بوده است (در ارتفاعات ۱۰ و ۵۰ متری). بررسی متوسط سرعت باد این دهه (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) در این نقطه در داده‌های ایستگاه همدیدی سطح زمین نیز نشان می‌دهد که متوسط سالانه در سطح نیز کمتر از ۴ متر در ثانیه بوده است (این امر گواهی بر همخوانی اطلاعات این سامانه با داده‌های زمینی می‌باشد). اما با توجه به آنچه در بالا ارائه شد در ساعات مختلف شبانه‌روز و در ماه‌های مختلف سال این متغیر پویا بوده و رفتار متفاوتی نسبت به متوسط بلند مدت داشته است. این نوع تحلیل که بر اساس داده زمینی بوده و قابلیت تحلیل در مقیاس‌های زمانی متفاوت را به ما می‌داد از ارجحیت و قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار بود. اما با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری زمین‌پایه و با در نظرگیری عدم امکان وجود امکانات سنجش این متغیر در نقاط مختلف شهرستان اردبیل به بهره‌گیری از اطلس جهانی باد پرداخته شد.

بر اساس گلباد فراوانی وزش باد (شکل ۷)، جهت غالب باد در این منطقه در طی دوره ده ساله نیز جنوب‌غربی بوده است، بیشینه سرعت وزش و بیشینه انرژی نیز در این جهت رخ می‌دهد. سری زمانی شاخص سرعت باد در ارتفاع ۱۰۰ متری (متوسط سالانه سرعت باد تقسیم بر متوسط ده ساله سرعت باد در منطقه) نشان می‌دهد که در نیمی از سال‌های مورد بررسی شاخص ۱ یا بالاتر از ۱ بوده است. نمودار عنکبوتی (راداری) نشان می‌دهد که در ساعات نزدیک به ظهر تغییرات شاخص سرعت باد کمتر بوده است. این استنباط با نمودار

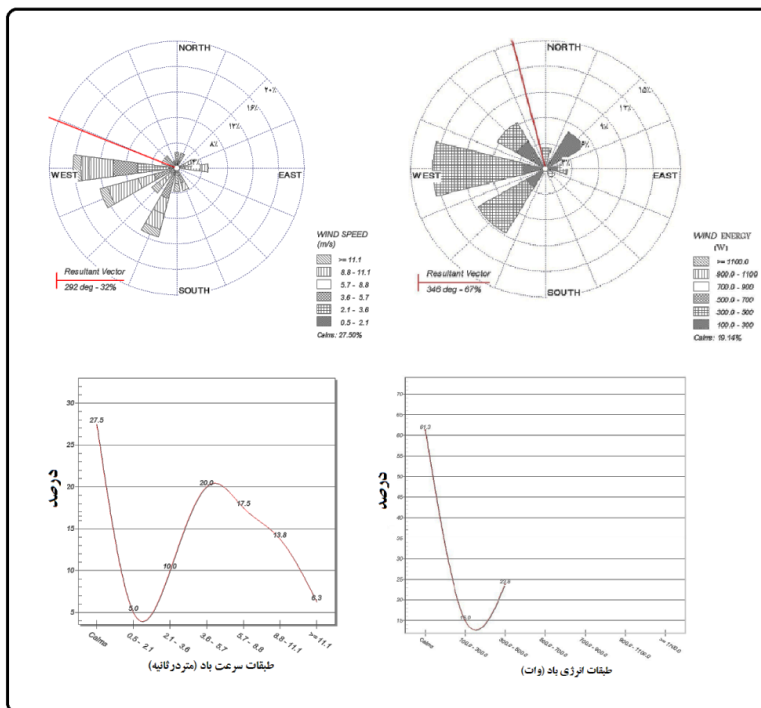
نتایج حاصل از ترسیم گلباد سرعت متوسط روزانه در ژانویه حاکی از آن است که در این ماه بیشترین فراوانی وزش (۲۰ درصد) را در سرعت ۳/۶-۵/۷ متر در ثانیه در ایستگاه اردبیل داشته‌ایم، همچنین در این ماه ۶/۳ درصد موارد باد سرعتی بالای ۱۱/۱ متر در ثانیه را تجربه نموده است؛ ۲۷/۵ درصد موارد باد حالت آرام را داشته است، ۱۳/۸ درصد سرعت بین ۸/۸ تا ۱۷/۱۱، ۵/۱ درصد ۵/۷-۸/۸ و ۱۰ درصد سرعت ۳/۶-۲/۱ بوده است؛ بیشترین فراوانی جهت وزش باد در این ماه به ترتیب جنوب‌غربی با ۲۱ درصد و غربی با ۲۰ درصد بوده است. در همین راستا بررسی و تجزیه و تحلیل گلباد انرژی و نمودار انرژی در این ماه بیانگر این امر است که در ۲۳/۸ درصد موارد انرژی قابل استحصال بین ۳۰۰-۵۰۰ وات بوده است و در ۱۶ درصد موارد انرژی بین ۳۰۰ تا ۱۰۰ وات بوده است، که این انرژی در ۲۲ درصد موارد از بادهای با جهت غربی و جنوب‌غربی می‌باشد (شکل ۴).

در ماه فوریه در ۱۹/۴ درصد موارد باد آرام، در ۸/۳ درصد ۱/۶-۲/۳ متر در ثانیه، ۱۲/۵ درصد ۳/۶-۵/۷ متر در ثانیه، ۳۱/۹ درصد ۵/۷-۸/۸ متر در ثانیه، ۱۱/۱ درصد ۸/۸-۱۱/۱ متر در ثانیه و نهایتاً در ۱۶/۷ درصد مواقع سرعت بالای ۱۱/۱ متر در ثانیه بوده است. نتایج حاصل از بررسی گلباد انرژی آن نشان داد که ۲۰ درصد موارد باد مولد انرژی ۳۰۰-۵۰۰ وات و در ۱۰ درصد موارد مولد انرژی ۱۰۰-۳۰۰ وات بوده است (با در نظرگیری قطر پره ۶ متر)، در این ماه در ۲۵ درصد موارد، باد وزشی جنوب‌غربی داشته است؛ در ۵ درصد موارد انرژی ۳۰۰-۵۰۰ وات از بادهای با جهت غربی قابل استحصال است (شکل ۵).

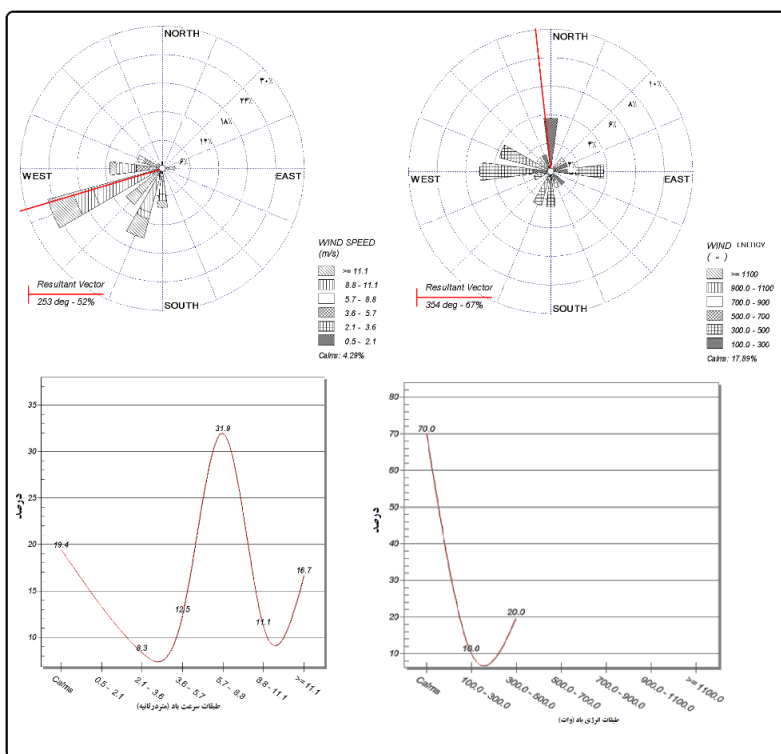
در ادامه با بهره‌گیری از سامانه اطلس جهانی باد به استخراج متوسط سرعت باد در ۱۰ متری و ۵۰ متری در پهنه شهرستان اردبیل نمودیم. اگر پهنه شهرستان اردبیل را به دو نیمه شمال‌غربی و جنوب‌شرقی تقسیم نماییم، چنانچه مشاهده می‌شود مناطق جنوب‌شرقی این شهرستان دارای سرعت قابل توجه‌تری از وزش باد بوده است (شکل ۶). در هر دو ارتفاع مناطق با سرعت متوسط باد کمتر و مساوی ۴ متر در ثانیه به‌رنگ سفید نمایش داده شده است. بخش زیادی از پهنه خصوصاً در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین سرعت باد کمتر از ۴ متر در ثانیه را دارند. اما با توجه به اینکه اکثر توربین‌ها در

بیشینه سرعت در ساعات میانی روز و نیز در ماه‌های سرد مشهود می‌باشد.

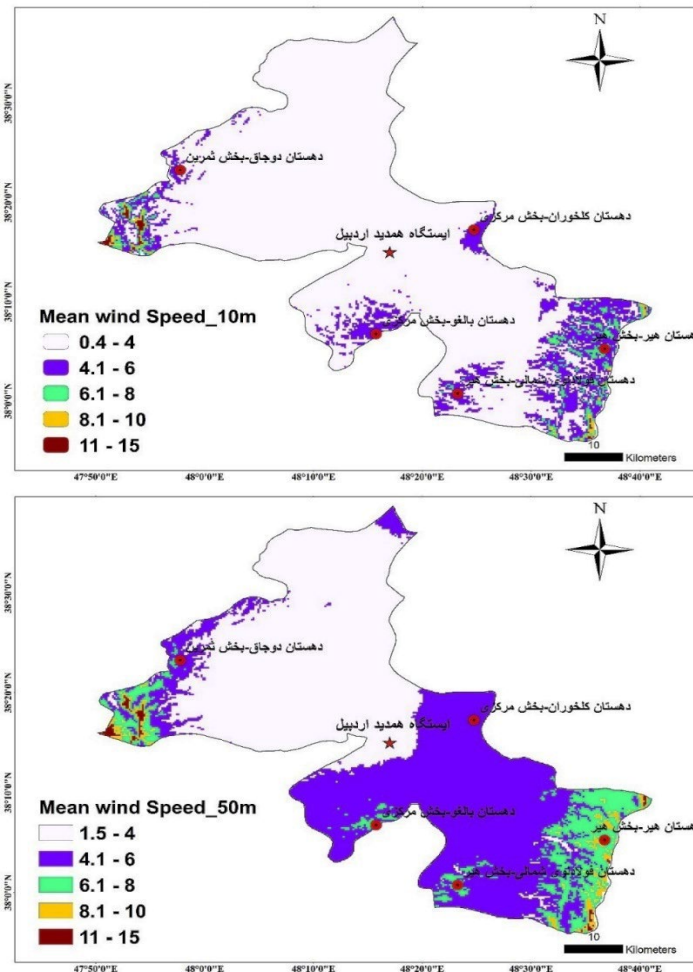
برشی نیز قابل تأیید می‌باشد چرا که در ساعات میانی روز مطابق این نمودار در تمام ماه‌ها بیشینه سرعت دیده شده است. در ارتفاع ۱۰۰ متری نیز مشابه رفتار باد در سطح زمین،



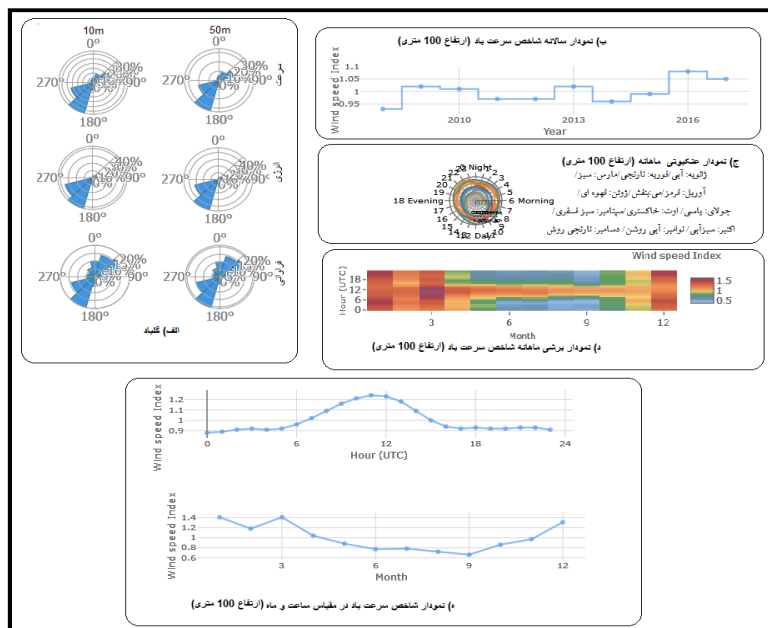
شکل ۴: گلباد سرعت و انرژی باد در ژانویه



شکل ۵: گلباد سرعت و انرژی باد در فوریه.



شکل ۶. متوسط سرعت باد در شهرستان اردبیل برای ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین (۲۰۰۸-۲۰۱۷).



شکل ۷. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در ایستگاه همدید اردبیل در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.

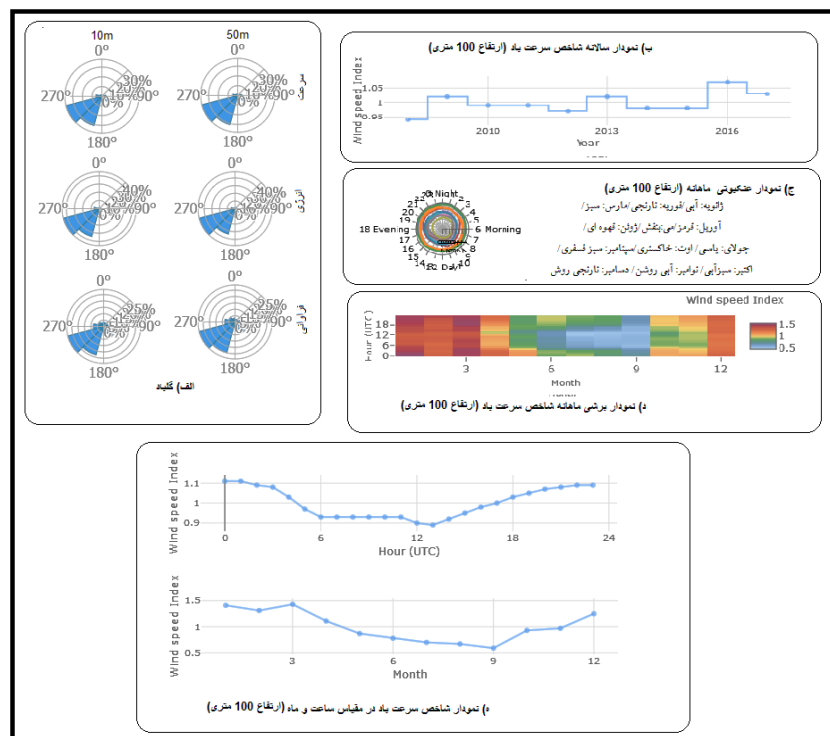
شاخص سرعت باد قابل توجه بوده اما در ماه‌های گرم بیشینه آن محدود به ساعات میانی روز بوده است. ساعت ۷ صبح تا ساعت ۱۶ شاخص سرعت باد بیش از ۱ بوده است (شکل ۹). در دهستان فولادلوی بخش هیر، باد غالب جنوبی بوده است. همانند مورد قبل بیشینه های شاخص سرعت باد در ساعات میانی روز و در فصول سرد دیده می شود. از ساعت ۶ صبح تا حدود ۱۴ شاخص سرعت باد ۱ یا بالاتر بوده است (شکل ۱۰).

در دهستان دوجاق بخش ثمرین، باد غالب غربی بوده است. از ساعت ۱۹ عصر تا ۴ بامداد شاخص سرعت باد در ارتفاع ۱۰۰ متری این منطقه بالای ۱ بوده است. در فصل سرد بیشینه سرعت ها دیده می شود (شکل ۱۱).

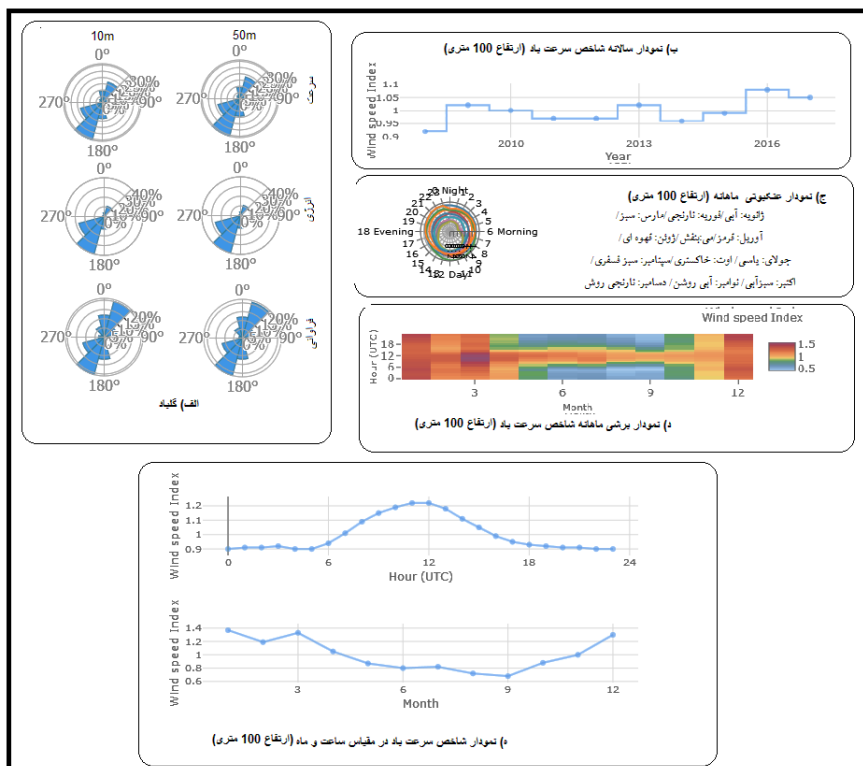
در دهستان کلخوران، در شمال شرق اردبیل بر خلاف موارد قبل جهت باد غالب شمال شرقی بوده است. از ساعت ۱۹ تا ساعت ۷ صبح شاخص سرعت باد بیش از ۱ بوده است. بیشینه در ساعات بعد ۱۲ حدوداً ساعت ۱۳ تا ۱۴ رخ می دهد. ماه مارس بیشترین میزان شاخص سرعت دیده می شود (شکل ۱۲).

بر اساس گلباد فراوانی وزش باد (شکل ۸)، جهت غالب باد در بخش منتخب دهستان هیر-بخش هیر در طی دوره ده ساله نیز تقریباً مشابه اردبیل بوده و جهت جنوب غربی داشته است، بیشینه سرعت وزش و بیشینه انرژی نیز در این جهت رخ می دهد. سری زمانی شاخص سرعت باد در ارتفاع ۱۰۰ متری، نیز با تغییرات اندکی در میزان شاخص و تغییرات بین سالانه، مشابه مورد قبل بوده است. اما سایر نمودارها تفاوت در ساعات بیشینه سرعت و فراوانی وزش باد در این منطقه را نشان می دهد. به طوری که در این منطقه باد شبانه غالب بوده و در ساعات بین ۲۰ شب تا ۳ بامداد بیشینه شاخص باد رخ داده است.

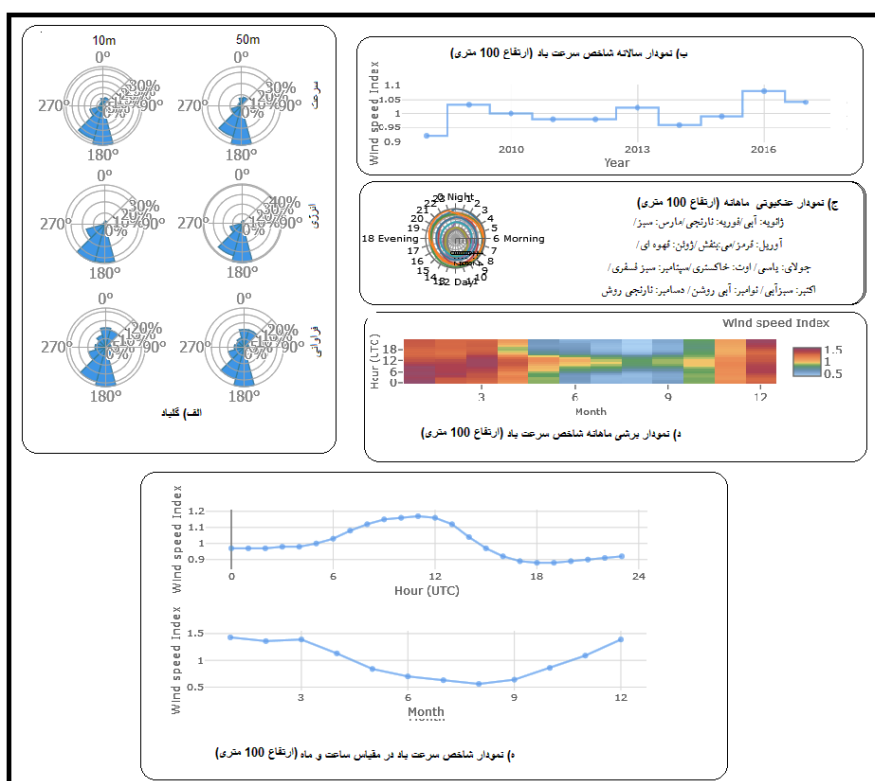
در دهستان بالغو در جنوب اردبیل جهت غالب باد طی دوره ده ساله نیز جنوب غربی بوده است، از این رو بیشینه سرعت وزش و بیشینه انرژی نیز در این جهت رخ می دهد. سری زمانی شاخص سرعت باد در ارتفاع ۱۰۰ متری نشان می دهد که در بیش از نیمی از سال‌های مورد بررسی شاخص ۱ یا بالاتر از ۱ بوده است. در ساعات میانی روز تمام ماه‌ها بیشینه سرعت دیده شده است، در سایر ساعات نیز در فصول سرد



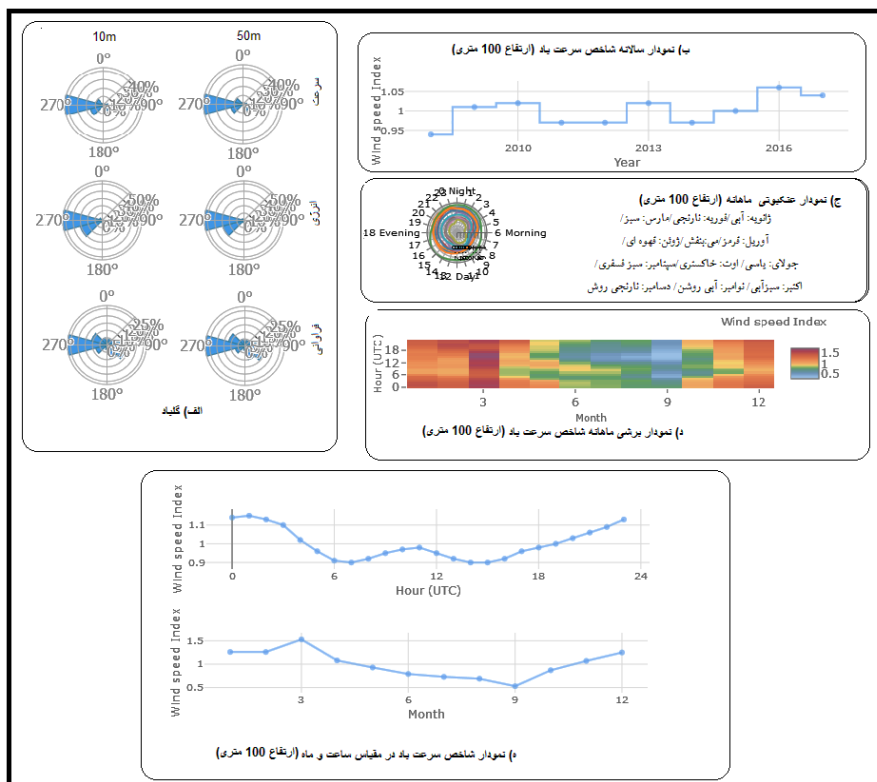
شکل ۸. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در دهستان هیر- بخش هیر در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.



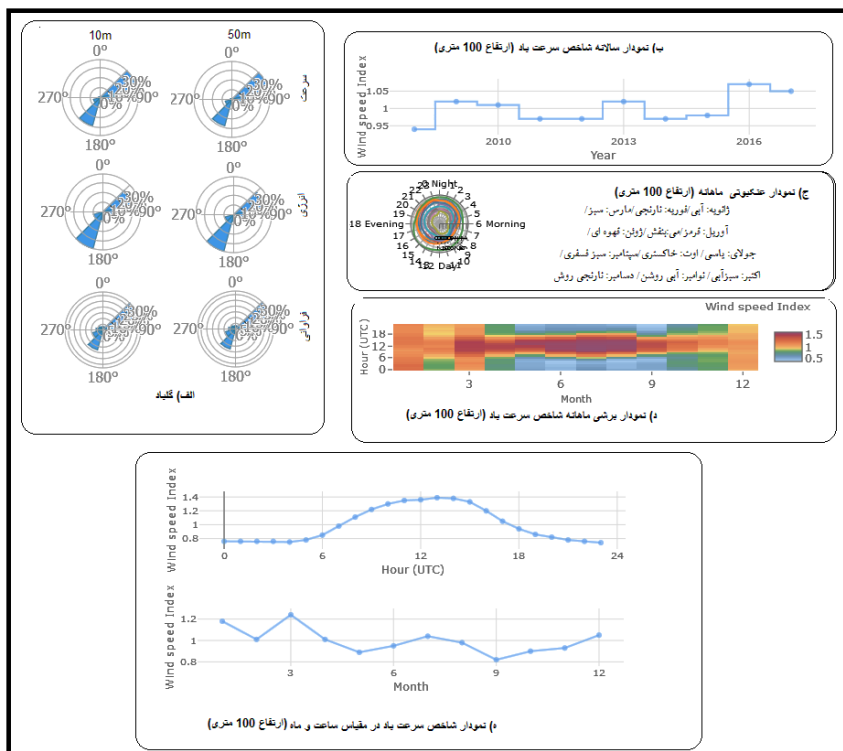
شکل ۹. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در بالغو-بخش مرکزی در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.



شکل ۱۰. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در فولادلوی-بخش هیر در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.



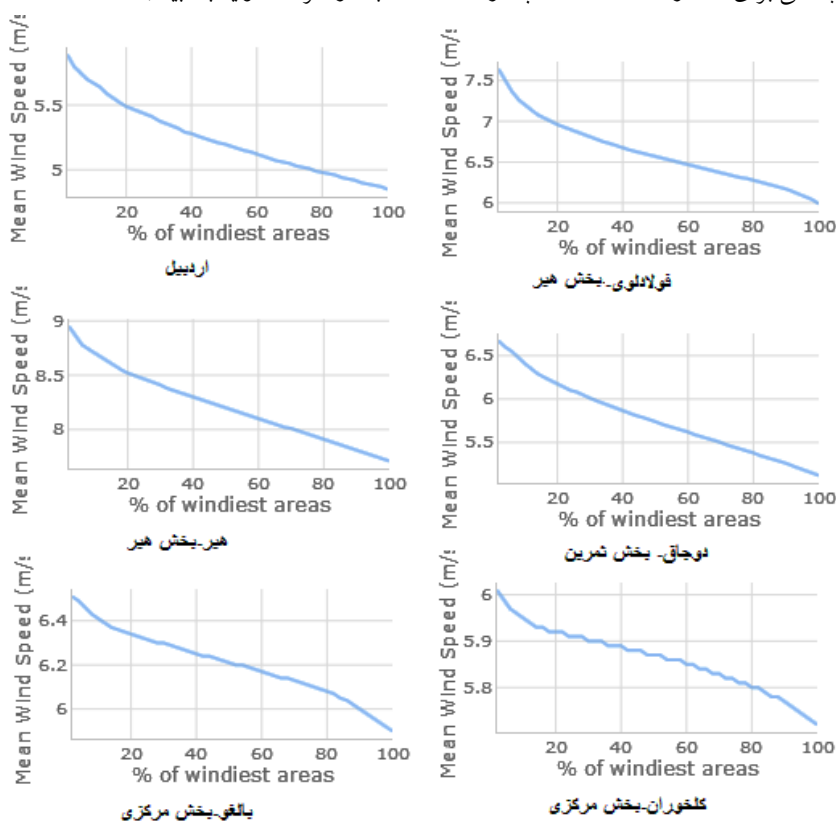
شکل ۱۱. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در دوجاق-بخش ثمرین در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.



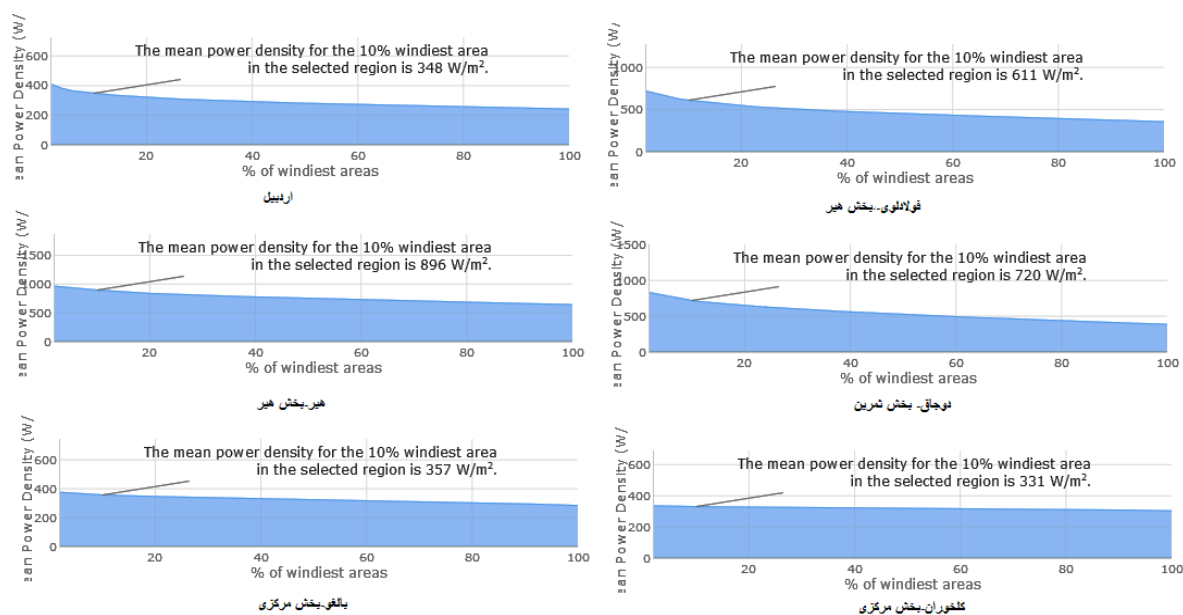
شکل ۱۲. نمودار و گلبادهای متوسط سالانه سرعت باد در کلخوران-بخش مرکزی در ارتفاع‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری بر پایه اطلس جهانی باد.

هر نقطه (۱۰ درصد از ۹ کیلومتر مربع حوالی نقطه منتخب) به ترتیب بیشینه مقدار را در دهستان هیر-بخش هیر، دهستان دوجاق-بخش ثمرین و دهستان فولادلوی-بخش هیر با مقادیر ۸۹۶ وات در مترمربع، ۷۲۰ وات در متر مربع و ۶۱۱ وات در متر مربع داشته است. مقدار متوسط قدرت چگالی برای اردبیل، دهستان بالفو-بخش مرکزی و دهستان کلخوران- بخش مرکزی به ترتیب ۳۴۸، ۳۵۷ و ۳۳۱ وات در متر مربع بوده است. به عبارتی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل (سه نقطه منتخب) متوسط قدرت چگالی مقداری بیش از یک سوم متوسط قدرت چگالی در دهستان هیر-بخش هیر بوده است. این پارامتر می‌تواند به تمایز نقاط منتخب و شاید مشابه در سرعت اولیه باد بیانجامد.

بررسی متوسط سرعت باد در منطقه مورد بررسی (۹ کیلومتر اطراف نقطه مشخص شده- شبکه ۳ در ۳ کیلومتری)، در ارتفاع ۵۰ متری برای تمام مناطق منتخب نشان داد که در ۱۰۰ درصد منطقه ۹ کیلومتری سرعت بهینه برای حرکت توربین یعنی سرعت ۴ متر در ثانیه و بالاتر وجود دارد. در دو ایستگاه دهستان هیر-بخش هیر و دهستان فولادلوی-بخش هیر بیشینه سرعت باد دیده می‌شود. در دهستان هیر-بخش هیر حدود ۷۰ درصد از ۹ کیلومتر، متوسط باد بیش از ۸ متر در ثانیه رخ می‌دهد (شکل ۱۱). متوسط قدرت چگالی برای مناطق منتخب در سطح شهرستان اردبیل در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که قابل مشاهده است متوسط قدرت چگالی برای ۱۰ درصد منطقه منتخب در



شکل ۱۳. سرعت باد در منطقه (۹ کیلومتر مربع اطراف نقطه مربوطه در نقشه) در ارتفاع ۵۰ متری



شکل ۱۴. چگالی انرژی در منطقه (۹ کیلومتر مربع اطراف نقطه مربوطه در نقشه) در ارتفاع ۵۰ متری

## نتیجه گیری

ایجاد آلودگی حاصل از به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی، محدودیت استفاده از آن‌ها، دسترسی پرهزینه‌تر به آن‌ها، بحران انرژی در جهان و نهایتاً افزایش روزافزون جمعیت جهانی سبب استقبال هرچه بیشتر از انرژی‌های نو و به‌کارگیری آن‌ها خصوصاً در جهان توسعه‌یافته گردیده است. برآورد میزان انرژی باد نه تنها به سرعت، بلکه به تداوم آن و فراوانی اوقات وزش و یا عدم وزش باد بستگی دارد.

براساس تاریخچه مطالعات صورت گرفته در این زمینه نظیر علمداری و همکاران (Alamdari et al., 2012)، فدایی (Fadaii, 2007)، عساکره و همکاران (۱۳۹۷)، حنفی و ایران‌پور (۱۳۹۶) و زاهدی و همکاران (۱۳۸۴) حتی با توجه به عدم همسان بودن دوره آماری یا به‌کارگیری روش‌های مختلف بررسی همواره اردبیل به عنوان مکانی با پتانسیل مناسب (خوب) یا خیلی مناسب قلمداد شده است. بازدهی توربین‌های بادی از سرعت ۴ متر در ثانیه به میزان قابل توجهی بالا می‌رود و مطابق برآوردهای پیشین در این ایستگاه در حدود ۵۰ درصد اوقات سال سرعت باد بیش از ۴ متر در ثانیه (عساکره و همکاران، ۱۳۹۷) می‌باشد. برتری مطالعه حاضر بر مطالعات پیشین توسعه دوره زمانی و انجام تجزیه و تحلیل منفک از نظر ساعت و ماه بوده و از طرف دیگر بکارگیری اطلاعات موجود در سامانه اطلس جهانی باد که بر پایه

داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل بوده قابلیت تحلیلی جامع‌تر برای پهنه شهرستان اردبیل را در این مطالعه فراهم آورد. مطابق نتایج حاصله در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر تفاوت فاحش متوسط سرعت وزش باد در ساعات میانی روز نسبت به سایر ساعات دیده می‌شود. این در حالی است که در ماه‌های سرد سال از نوامبر تا آوریل مقادیر متوسط سرعت باد به سمت ارقام نزدیک به هم حالت هم‌گرایی نشان می‌دهد بدین معنا که دامنه سرعت در ساعات مختلف این ماه‌ها مقادیر مشابه‌تری را تجربه می‌کند. در سه ماه از سال (دسامبر، ژانویه، فوریه) قابلیت استحصال انرژی در بخش زیادی از ساعات شبانه‌روز در این ایستگاه وجود دارد و در سایر ماه‌ها نیز در یک سوم ساعات شبانه‌روز این قابلیت پابرجاست. در اکثر ماه‌ها تغییرات معنی‌دار مثبت در روند سرعت باد ایستگاه اردبیل رخ داده است. بیشترین تغییرات در ماه ژانویه بوده که در ۳۶ سال مورد بررسی بیش از ۴ متر در ثانیه به متوسط سرعت باد در این ساعت افزوده شده است. این نتایج همسو با نتایج مطالعه جوان (۱۳۸۹) مبنی بر روند افزایشی متوسط سرعت باد در اردبیل می‌باشد. در این ایستگاه در فصل سرد سال جهت باد غالب جنوب‌غربی و باد نایب غالب غربی بوده است.

بر اساس داده‌های بازتحلیل ERA5، اگر پهنه شهرستان اردبیل را به دو نیمه شمال‌غربی و جنوب‌شرقی تقسیم نماییم،

امکان‌سنجی منطقه به منظور تأسیس نیروگاه‌های بادی با ظرفیت تجاری و مزارع کوچک باشد. قطعا یکی از الزامات ایجاد یک مزرعه بادی بررسی دقیق مرفوکلیماتیک زمین و کاربری منطقه می‌باشد. هم‌چنین یادآوری می‌شود که با توجه به اینکه مبنای بخشی از این مطالعه داده‌های شبکه‌ای باز تحلیل ERA5 بوده است (که البته در مقایسه با داده‌های ایستگاه همدید اردبیل این داده‌ها مورد اعتماد می‌باشند)، پیشنهاد می‌شود برای نقاط (مناطق) معرفی شده در این مطالعه به عنوان مناطق با پتانسیل خوب جهت بهره‌برداری انرژی بادی، تخصیص اعتبار در سطح استان و شهرستان صورت گیرد و با راه‌اندازی ادوات سنجش باد و اندازه‌گیری دقیق و پیوسته این فراسنج، ابتداً به اطلاعات پایه قوی‌تر دست یافته و سپس با واسنجی شرایط منطقه و شرایط مطلوب مزارع بادی اقدام به راه‌اندازی آن برای بهره‌برداری از این انرژی تجدیدپذیر نموده و در جهت توسعه بیشتر صنایع استان و در جهت پیشبرد بلندمدت پیشرفت کشور به کار گرفته شود.

#### منابع

- 1- Alamdari P., Nematollahi O., Mirhosseini M. 2012. Assessment of wind energy in Iran: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 836–860.
- 2- Alijani, B., Mahmoudi, P., Saligheh, M., and Rigi Chahi, A.B. 2011. Examining the changes of minimum and maximum annual temperature in Iran. *Geographical Research*, 26(3).
- 3- Asakereh, H., 2011. *Fundamentals of Statistical Climatology*. Zanjan university publication. (In Persian)
- 4- Asakereh, H., Beyranvand, A., & Doustkamian, M. (2019). Assessment of wind power in the synoptic station of Ardebil. *Spatial Planning*, 8(3), 65-82.
- 5- Badger, J., Hahmann, A., Larsén, X. G., Badger, M., Kelly, M., Olsen, B. T., & Mortensen, N. G. (2015). *The Global Wind Atlas: An EUDP project carried out by DTU Wind Energy*.
- 6- Dabbaghiyan A., Fazelpour F., DehghanAbnavi M., Rosen M.A. 2016. Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 455–466.
- 7- Enteziri, A.R, Amirahmadi A., Erfani A., Barzoui A. 2013. Evaluation of wind energy potential and the feasibility of building a wind power plant in Sabzevar. *Journal of*

مناطق جنوب‌شرقی این شهرستان دارای سرعت قابل توجه‌تری از وزش باد بوده است. بر اساس واکاوی صورت گرفته بر روی اطلاعات اخذ شده از اطلس جهانی باد برای ۶ نقطه در مناطق بادخیز شهرستان اردبیل، تفاوت‌هایی در میزان سرعت باد، جهت غالب وزش باد، ساعات اوج وزش باد و رفتار این متغیر در ماه‌های مختلف سال مشاهده شد. کمترین میزان سرعت باد و قدرت چگالی آن در اردبیل (حوالی ایستگاه همدید) و بیشترین آن متعلق به منطقه‌ای در دهستان هیر -بخش هیر در جنوب‌شرق شهرستان اردبیل می‌باشد. در اردبیل، دهستان هیر-بخش هیر و دهستان بالغو-بخش مرکزی جهت باد غالب جنوب‌غربی؛ در دهستان دوجاق-بخش ثمرین جهت باد غالب غربی؛ در دهستان کلخوران-بخش مرکزی باد غالب شرقی و در دهستان فولادلوی بخش هیر جهت باد غالب جنوبی بوده است. در دهستان هیر-بخش هیر و دهستان دوجاق-بخش ثمرین بر خلاف سایر نقاط که حداکثر سرعت باد در ساعات میانی روز حاصل می‌آید، این حداکثر در ساعات شبانه دیده می‌شود. متوسط قدرت چگالی برای ۱۰ درصد منطقه منتخب در هر نقطه به ترتیب بیشینه مقدار را در دهستان هیر-بخش هیر، دهستان دوجاق-بخش ثمرین و دهستان فولادلوی-بخش هیر با مقادیر ۸۹۶ وات در مترمربع، ۷۲۰ وات در متر مربع و ۶۱۱ وات در متر مربع داشته است. در این مناطق متوسط باد در ارتفاع ۵۰ متری ۸/۵۸، ۶/۴۱ و ۷/۲ متر در ثانیه می‌باشد. مطابق کلاس‌بندی باد در کمیسیون الکترونیکی بین‌المللی دهستان هیر-بخش هیر در کلاس دوم قرار می‌گیرد درحالی که در دو ایستگاه دیگر در کلاس سوم این طبقه‌بندی جای می‌گیرند. از آنجایی که حداقل سرعت مورد نیاز برای استقرار توربین‌های تجاری ۶ متر و برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک حدود ۴ متر است، پیشنهاد می‌شود در ایستگاه‌های اردبیل، دهستان بالغو-بخش مرکزی و دهستان کلخوران-بخش مرکزی برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک و در دهستان هیر-بخش هیر، دهستان دوجاق-بخش ثمرین و دهستان فولادلوی-بخش هیر برای راه‌اندازی مزارع با قابلیت بهره‌برداری تجاری، امکان‌سنجی صورت گیرد.

ذکر این نکته ضروری است که این مطالعه تنها شروعی برای سلسله مطالعات با دقت بالاتر و به صورت میدانی برای

- of Applied researches in Geographical Sciences, Year 13, Number 29, pp. 137-157.
- 20- Mirhosseini M., Sharifi F., Sedaghat A. 2011, Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 449-459.
  - 21- Mirmousavi S.H. 2015. Assessment of Wind Energy Potential in East Azarbaijan Province of Iran (Case Study: SAHAND Station), *Global NEST Journal*, 17 (2): 418-425.
  - 22- Mohammadi, B. 2015. Assessment of wind power in Kurdistan province. *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(2), 323-335. doi: 10.22059/jesphys.2015.52817.
  - 23- Mohammadi, H., Rostami Jalilian, S., Taghavi, F., & Shamsipour, A. 2012. Evaluation Of Wind Energy Potential in Kermanshah Province. *Physical Geography Research Quarterly*, 44(2), 19-32. doi: 10.22059/jphgr.2012.29204. (In Persian)
  - 24- Molina, M. O., Gutiérrez, C., & Sánchez, E. (2021). Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over Europe with observations from the HadISD dataset. *International Journal of Climatology*, 41(10), 4864-4878.
  - 25- Potisomporn, P., Adcock, T. A., & Vogel, C. R. (2023). Evaluating ERA5 reanalysis predictions of low wind speed events around the UK. *Energy Reports*, 10, 4781-4790.
  - 26- Pryor S. C., Barthelmie R. J., Young D. T. and et al. 2009. Wind speed trends over the contiguous United States, *Journal of Geophysical Research*, 114, D14105: 1-18.
  - 27- Rahimzadeh, F., Pedram, M., Sedaghat Kardar, A. and Kamali, Gh. 2010. wind energy estimation in the observation stations of Isfahan province, 2010. *Geography and Environmental Planning*, 35, 155-172.
  - 28- Rahimzadeh, F., Mohammadian, N., Akbarinejad, J. 2006. Investigation of changes in wind speed at a height of ten meters from the ground in a number of major cities in the country during the climatic period of 1951-2005. *Nivar*, 31(62-63), 7-20.
  - 29- Sabziparvar, A., Mirgaloybayat, R., & Ghyami Shamami, F. 2011. Evaluation of the possible changes in diurnal temperature range (DTR) trend in some arid climates of Iran since last five decades. *Iranian Journal of Physics Research*, 11(1), 27-37.
  - 30- Saeidia D., Mirhosseini M., Sedaghat A., Mostafaeipourb A. 2011. Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3558-3569.
  - 8- Fadai, D. 2007. The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 536-542.
  - 9- Fazelpour F., Soltani N., Soltani S., Rosen M.A. 2015. Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabriz and Ardabil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 87-99.
  - 10- Gandhamkar, A. 2009. Evaluation of wind potential energy in Iran, *Journal of Geography and Environmental Planning*, serial number 36, pp. 85-100. (In Persian)
  - 11- Ghahraman, N. and Qarakhani, A. 2009. Studying the trend of wind speed changes in the climatic range of Iran, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, No. 1, Volume 4, pp. 31-43.
  - 12- Gruber, K., Regner, P., Wehrle, S., Zeyringer, M., & Schmidt, J. (2022). Towards global validation of wind power simulations: A multi-country assessment of wind power simulation from MERRA-2 and ERA-5 reanalyses bias-corrected with the global wind atlas. *Energy*, 238, 121520.
  - 13- Hanafi, A., & Iranpour, F. 2017. Evaluation and zoning of wind speed potential in the country in order to plan for wind power generation. *Journal of Climate Research*, 1396(31), 73-88. (In Persian)
  - 14- Holt E. And Wang J. 2012. Trends in Wind Speed at Wind Turbine Height of 80 m over the Contiguous United States Using the North American Regional Reanalysis (NARR), *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 51:2188-2201.
  - 15- Javan, Kh. 2010. Trend analysis of wind speed changes in northwest Iran, 2nd National Conference on Wind Erosion and Yazd Dust Storms, Yazd. (In Persian)
  - 16- Jiang Y. & Luo Y. & Zhao Z. & Tao S. 2010. Changes in wind speed over China during 1956 - 2004, *Theor. Appl. Climatol.*, 99: 421-430.
  - 17- Kaviani, M.R. 1994. Wind turbines and assessment of wind energy potential in Iran, *Geographical Research Quarterly*, No. 36, 7026-7010.
  - 18- Keyhani A., Ghasemi-Varnamkhasti M., Khanali M., Abbaszadeh R. 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, *Tehran, Energy*. 35. 188-201.
  - 19- Magarad, F. and Hemmati, Sh. 2012. Evaluation of wind energy capabilities in Kermanshah and Kurdistan provinces *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 3(9), 33-46.

- 36- World Energy Council, 2016. Wind World Energy Resources: (<https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/>)
- 37- Yousefi, H. and Mousavi, M.M. and Noorollahi, Y. 2016. Evaluation of wind energy resources and potential measurement in order to determine the location priorities for the construction of wind power plants in Damghan city, Journal of Geomatic Sciences and Techniques. 6 (3). 35-50.
- 38- Zahedi, M., Salahi, B. and Jamil, M. 2005. Calculation of wind density and power in order to use its energy in Ardabil, Geographical Researches, No. 53, pp. 41-55.
- 31- salahi, B., Behruzi, M., Ebrahimi, M., & Jemes, H. 2015. Assessment of wind energy potential and feasibility of its use in the Synoptic stations of Fars province. *Journal of Applied Climatology*, 2(1), 1-16. (In Persian)
- 32- Sam Khaniani, A., & Mohammadi, A. (2022). Comparison of ERA5-Land reanalysis data with surface observations over Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(1), 195-212. doi: 10.30499/ijg.2022.313494.1376.
- 33- Thaghafi, M. 1994. Wind energy and its application in agriculture. First edition. University of Tehran.
- 34- Torralba V., Doblas-Reyes F.J. and Gonzalez-Reviriego N. 2017. Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: a global reanalysis intercomparison, *Environ. Res. Lett.* 12, 114019, 1-9.
- 35- Troccoli A., Muller K., Coppin P., Davy R., Russell C., Hirsch A.L. 2012. Long-Term Wind Speed Trends over Australia, *Journal of Climate*, 25: 170-183.