

تحلیل ظرفیت‌سازی اقلیمی در بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران

قاسم عزیزی^{۱*}، مصطفی قویدل^۲، معصومه مقبل^۳، علی اکبر شمس‌پور^۴، سعید بازگیر^۵

۱- دکترای تخصصی، استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران.

۲- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران.

۳- دکترای تخصصی، دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران.

۴ و ۵- دکترای تخصصی، دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران.

چکیده

در این مطالعه ظرفیت‌سازی اقلیمی به‌رندی از باد در نوار جنوبی ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. مصرف انرژی با توجه به افزایش جمعیت، تغییر سبک زندگی و گرمایش جهانی روز به روز بیشتر می‌شود. با توجه به حجم عظیم مصرف انرژی بهره‌مندی از انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است. در جنوب ایران نیز با توجه به حجم زیاد جمعیت ساکن و گستردگی فعالیت‌های اقتصادی انرژی بسیاری زیادی مصرف می‌شود و استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز ضمن فشار به منابع فسیلی سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. لذا ضروری است ظرفیت‌سازی اقلیمی در بحث بهره‌مندی از انرژی باد در این منطقه مورد بررسی قرار گیرد. هدف این مطالعه شناسایی مناطق مطلوب و غیرمطلوب در ظرفیت‌سازی بهره‌مندی از باد است تا در نهایت مناطق مناسب و نامناسب جهت بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران مشخص شوند. برای اینکار از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. داده‌های هواشناسی مورد استفاده مطالعه فشار، سرعت باد و دما میانگین در مقیاس روزانه هستند که برای ۶۱ ایستگاه نوار جنوبی در دوره زمانی ۲۰۲۴-۲۰۱۵ از آنها استفاده شده است. در تحلیل سلسله‌مراتبی از ۸ عامل بهره‌برداری شد. جهت انجام تحلیل سلسله‌مراتبی از زبان برنامه‌نویسی متلب و جهت تولید نقشه‌ها از زبان برنامه‌نویسی آر استفاده شد. نتایج نشان داد که مناطق شمال غرب استان فارس، جنوب خوزستان و جنوب شرق استان هرمزگان مطلوب‌ترین مناطق و شرق نیمه جنوبی استان سیستان و بلوچستان، نیمه جنوبی فارس و مرکز خوزستان نامطلوب‌ترین مناطق در ظرفیت‌سازی بهره‌مندی از باد در نوار جنوبی ایران هستند. همچنین مهم‌ترین عوامل در ظرفیت‌سازی بهره‌مندی از باد سه عامل چگالی توان باد، سرعت باد و پایداری باد تشخیص داده شد.

کلید واژه‌ها: ظرفیت‌سازی اقلیمی، بهره‌برداری از باد، تحلیل سلسله‌مراتبی، نوار جنوبی ایران، تغییر اقلیم.

مقدمه

افزایش تقاضا برای مصرف منابع طبیعی، به ویژه سوخت‌های فسیلی، منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تشدید بحران‌های اقلیمی، کمبود منابع طبیعی و کمبود سوخت‌های فسیلی شده است. لذا گرایش به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند مزارع انرژی بادی، برای کاهش این اثرات و پایداری منابع انرژی ضروری است (وانگ ج، اعظم. وی، ۲۰۲۳). افزایش جمعیت چالش‌های زیست محیطی را تشدید می‌کند. رشد سریع جمعیت، همراه با الگوهای مصرف ناپایدار، انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشدید می‌کند و منابع طبیعی را تحت فشار قرار می‌دهد (تغییرات آب و هوا و جمعیت، ۲۰۲۱). افزایش تراکم جمعیت با تخریب بیشتر محیط زیست ارتباط مستقیم دارد. افزایش فشار جمعیت، منابع طبیعی را کاهش داده و به تغییر اقلیم سرعت بخشیده است لذا تلاش‌های پایدارسازی منابع انرژی یک نیاز ضروری است (فشار جمعیت و بحران آب و هوا، ۲۰۲۰). مزایای پیشرفت در بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار کربن به طور قابل توجهی با اثرات رشد جمعیت خنثی می‌شود. نیاز حیاتی به راه‌حل‌ها و ابتکارات منجر به تولید هر چه بیشتر انرژی تجدیدپذیر برای متعادل کردن فشارهای محیطی ناشی از افزایش تقاضای جمعیت وجود دارد (سالورتی، ب، ۲۰۲۱). تأثیرات فزاینده تغییر اقلیم مستلزم سازگاری فوری و راهبرد‌های کاهش نوآورانه، به ویژه در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر است. مزارع بادی، به عنوان یک راه حل تامین انرژی پایدار از نظر زیست محیطی نیز اثرات قابل توجهی در کاهش اثرات مخرب اقلیمی دارد (عباس. ک و همکاران ۲۰۲۲). در مطالعات گذشته موارد زیادی بهره برداری از باد و انرژی آن را مورد بحث قرار داده اند مثلا بروس لاکهارت. سی و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله ای مزایای زیست محیطی و اقتصادی انرژی باد و خورشید را بررسی کرده است و توانایی آن‌ها در ارائه جایگزین‌های پاک، پایدار و مقرون به صرفه به جای سوخت‌های فسیلی برجسته نموده است. این مطالعه پیشرفت‌های فناوری را برجسته می‌کند که هزینه‌های سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را به میزان قابل توجهی کاهش داده و آنها را در سطح جهانی قابل دسترس‌تر کرده است. همچنین ژانگ. دی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ای نشان داد که رویدادهای شدید اقلیمی می‌تواند هزینه‌های نصب توربین‌های بادی را تا حدود ۱۲ درصد افزایش دهد زیرا نیازمند زیرساخت‌های مقاوم تر هستند. علی‌رغم این

چالش‌ها، این مطالعه مزایای انرژی باد را در کاهش انتشار کربن و کاهش تغییر اقلیم برجسته می‌کند. گالیج. بنگگا (۲۰۲۴) در مطالعه ای ادغام سیستم‌های بادی را با سایر منابع تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و جزر و مدی، برای افزایش پایداری شبکه و رسیدگی به مسائل متناوب، برجسته کرد. نتایج مطالعه تولید پایدار، امکان بازیافت، و مقاوم سازی سیستم‌های انرژی باد برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی را ضروری دانست. بهره برداری از انرژی باد با توربین‌های کوچک شخصی نیز مورد مطالعه بوده است مثلا لیو. اس. وای و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ای کاربردهای انرژی باد برای ساختمان‌های تابوان را با روش‌هایی شامل تجزیه و تحلیل الگوهای جریان باد در اطراف ساختمان‌ها، بهینه‌سازی محل قرارگیری توربین و ارزیابی اقتصادی بودن تاسیسات اس دلیوئی اس بررسی کرد. نتایج چالش‌هایی مانند سرعت باد کم، آشفتگی و هزینه‌های نصب بالا را برجسته کردند. در حالی که راهبرد‌هایی مانند سیستم‌های هیبریدی، مشوق‌های دولتی و طراحی‌های پیشرفته توربین برای افزایش کارایی نیز شناسایی شدند. در کشور ایران نیز مطالعات زیادی در رابطه با بهره برداری از انرژی باد صورت گرفته است چنانچه سعیدی. دی و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه ای با روش‌های آماری توزیع ویبول برای مدل‌سازی فرکانس سرعت باد و محاسبه پارامترهای کلیدی مانند میانگین سرعت باد و چگالی توان با داده‌های سرعت باد از سال ۲۰۰۷ در ارتفاعات ۱۰ متر، ۳۰ متر و ۴۰ متر، پتانسیل انرژی بادی را در استان‌های خراسان شمالی و جنوبی ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. نتایج چهار منطقه بجنورد و اسفراین در خراسان شمالی و نهبندان و فدشک در خراسان جنوبی را به عنوان مناطق دارای پتانسیل انرژی بادی قابل توجه تشخیص داد. رازقی. ام و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه ای از یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره ادغام شده با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی مکان‌های بهینه مزارع بادی در ایران با هدف تامین انرژی دستگاه‌های اسمز معکوس برای تولید آب شیرین استفاده کرد. نتایج مناطق با ظرفیتی را برجسته کرد و امکان ادغام انرژی باد با فناوری‌های نمک‌زدایی را برای رفع کمبود آب در ایران نشان داد. امید ا و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ای پتانسیل انرژی باد در شهرستان دهلران واقع در بخش جنوبی استان ایلام ایران را با تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲ ارزیابی کرد. توابع توزیع

رایلی و ویبول برای ارزیابی پتانسیل سرعت باد با پارامترهایی مانند شکل (k) و مقیاس (c) محاسبه شد. نتایج نشان داد که میانگین سرعت باد سالانه در ارتفاع ۵۰ متری تقریباً ۶ متر بر ثانیه است که در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد سرعت باد بیشتری وجود داشت. بهاریسروی، سیدرضا (۱۳۹۴) در مطالعه ای پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در استان مازندران، ایران را با تمرکز بر منابع انرژی بادی و خورشیدی ارزیابی کرد. این مطالعه عوامل محیطی و جغرافیایی را برای شناسایی مکان‌های مناسب برای زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفت. نتایج نشان داد که استان مازندران دارای پتانسیل متوسطی هم برای انرژی بادی و هم برای انرژی خورشیدی است. این مطالعه همچنین پتانسیل انرژی جزر و مدی در منطقه را برجسته کرد و بررسی بیشتر این منابع انرژی را توصیه نمود. آروین. آ. آ (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل انرژی بادی در مناطق روستایی شهرستان اردستان جهت ارتقای پایداری این سکونتگاه‌ها پرداخته است. روش مطالعه شامل تجزیه و تحلیل ۱۲ سال داده‌های سرعت و جهت باد سه ساعته از ایستگاه هواشناسی اردستان بود و از تابع توزیع احتمال ویبول برای تخمین توان خروجی توربین بادی، با ترکیب عواملی مانند چگالی سرعت باد، دما و ارتفاع استفاده کرد. بر اساس نتایج قدرت نظری توربین در ماه مارس به دلیل سرعت باد بیشتر به اوج خود رسید و خروجی عملی توان در طول ماه‌های گرم‌تر جولای و آگوست بهتر از سایر ماه‌ها بود.

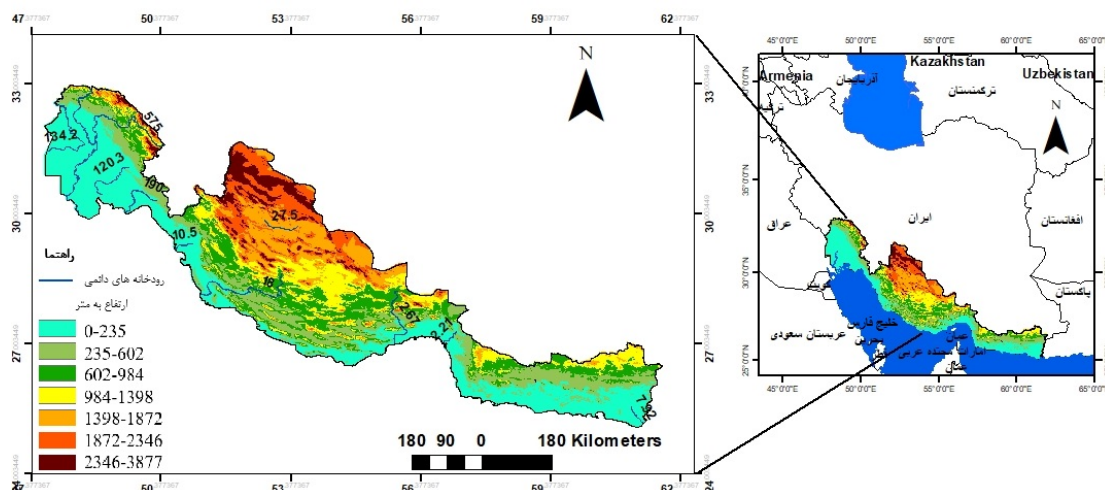
ضرورت تحقیق

در واکنش به بحران جهانی انرژی، تغییر اقلیم و تخریب محیط زیست، نیاز به گذار از شیوه‌های سنتی تامین انرژی بسیار ضروری است (چن. ال و همکاران ۲۰۲۳). منطقه جنوب ایران دارای منابع انرژی بادی قابل توجهی است، اما بهره‌برداری از آنها به دلیل فقدان مطالعات ظرفیت اقلیمی و برنامه‌ریزی راهبردی ناکافی همچنان بدون بهره‌باقی مانده است. این شکاف مانع از توانایی منطقه برای گذار از منابع انرژی سنتی و حل مشکل تقاضای رو به رشد انرژی شده است (فیلم. اس و همکاران ۲۰۲۱). بهره‌براری از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی بادی کمبود انرژی مورد نیاز نوار جنوبی ایران را تامین خواهد نمود. هدف این مطالعه ارائه دیدگاه‌هایی در مورد بهره‌برداری از نیروی باد به‌عنوان راه‌حلی

مناسب برای رفع نیازهای انرژی ایران و در عین حال کاهش اثرات زیست‌محیطی است (مختاری. م، زهرا. شجاعی، ۱۳۹۰). این مطالعه نیاز گسترش تلاش‌ها به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی و برآوردن نیازهای رو به رشد انرژی را برجسته نموده است (محمدی. اچ و همکاران ۲۰۲۱). با توجه به نیازهای روزافزون جنوب ایران به انرژی، ضروری است ظرفیت بهره‌برداری از انرژی باد در نوار جنوبی بررسی شود. مصرف انرژی با توجه به حجم عظیم جمعیت ساکن دائمی و فعالیت‌های اقتصادی گسترده در نوار جنوبی ایران بسیار زیاد است. با توجه به آنچه در مطالعات گذشته بیان شد هیچ مطالعه‌ای ظرفیت اقلیمی جنوب ایران را با هدف برآورد پتانسیل بهره‌برداری از عنصر باد بررسی نکرده است و این مطالعه در قدم اول در جهت پر نمودن این فقدان مطالعاتی گام برداشته است. هدف اصلی این مطالعه شناسایی مکان‌های مناسب و نامناسب بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران است. نتایج این مطالعه جهت رفع مشکل کمبود انرژی و گذار به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر در نوار جنوبی ایران قابل استفاده هستند.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد ارزیابی این مطالعه در نوار جنوبی ایران قرار دارد و از تنوع جغرافیایی و اقلیمی قابل توجهی برخوردار است. این ناحیه شامل استان‌های خوزستان، فارس، بوشهر، هرمزگان و بخش‌هایی از حوزه آبریز بلوچستان جنوبی در محدوده جغرافیایی استان سیستان و بلوچستان است. این منطقه در امتداد سواحل شمالی خلیج فارس و تنگه هرمز قرار گرفته که رشته‌کوه‌های زاگرس و دشت‌های ساحلی را شامل می‌شود. از نظر موقعیت جغرافیایی، این ناحیه جنوبی‌ترین بخش ایران بوده و در مجاورت خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد. مرزهای بین‌المللی این منطقه از غرب با عراق و از شرق با پاکستان، آن را به یک منطقه راهبردی برای اهداف تجاری و سیاسی تبدیل کرده است. نزدیکی به تنگه هرمز که یکی از آبراه‌های کلیدی در حمل‌ونقل جهانی به شمار می‌رود بر اهمیت این منطقه افزوده است. ویژگی‌های طبیعی متنوع آن شامل دشت‌های ساحلی، مناطق کوهستانی و رودخانه‌های بزرگ است. شکل ۱ نقشه جغرافیایی این منطقه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ نقشه جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسنده)

محاسبه داده‌ها

خودهمبستگی به همبستگی یک سری زمانی با مقادیر گذشته خود اشاره دارد که به شناسایی الگوها در طول زمان کمک می‌کند. در تجزیه و تحلیل پایداری باد، چگونگی ارتباط سرعت باد هر روز با سرعت های قبلی ارزیابی می‌شود (کوچاک، کا، ۲۰۰۲). در این شاخص هر چه مقدار خودهمبستگی بین داده های سرعت باد یک ایستگاه بیشتر باشد به معنای اینست که پایداری باد بیشتری دارد. طریقه محاسبه این شاخص در رابطه ۱ دیده می‌شود.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2}$$

رابطه ۱ نحوه محاسبه شاخص خودهمبستگی (منبع: جتفیلد، سی، ۲۰۰۴)

که در آن X_t سرعت باد در زمان، \bar{X} میانگین سرعت باد، N تعداد کل مشاهدات و k تاخیر بین مشاهدات است که در این مورد $k = 1$ اولین تاخیر بوده است.

هنگام تجزیه و تحلیل داده های هواشناسی روزانه درازمدت از ایستگاه های متعدد، شاخص کاپا می‌تواند نشان دهد که الگوهای باد مشاهده شده تا چه اندازه با الگوهای مورد انتظار همسو هستند (زی، وای و همکاران ۲۰۲۳). شاخص کاپا که معمولاً برای مدل سازی داده‌های سرعت باد استفاده می‌شود، از توزیع ویبول مشتق شده است. تابع چگالی احتمال توزیع ویبول در رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$f(x; k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k}$$

رابطه ۲ تابع چگالی احتمال توزیع ویبول (منبع: جانسون،

ان. ال و همکاران ۱۹۹۵)

در این مطالعه از داده‌های روزانه سرعت باد، فشار و دما میانگین سازمان هواشناسی بهره برداری شد. جدول ۱ ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه را نشان داده است. بازه زمانی بهره برداری از داده های هواشناسی ۲۰۲۴-۲۰۱۵ بوده است. برای تهیه میانگین روزانه داده های مذکور برای هر کدام از ۳۶۶ روز سال از دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ میانگین به دست آمد. به طور مثال برای میانگین گیری فشار هوا در روز ۱ ژانویه از داده های فشار هوا مربوط به روز ۱ ژانویه همه سال‌های دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ استفاده شده است. این روال برای تمام روزهای سال در دوره مذکور برای داده‌های مربوطه انجام گرفته است. این داده‌ها برای محاسبه روزانه چگالی توان باد در نوار جنوبی ایران ضروری بودند. استفاده از داده های جهت باد نیز جهت نمایش فضایی جهت غالب باد در ایستگاه های هواشناسی این مطالعه ضروری بود. این مطالعه بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است. ابتدا داده های مختلف عوامل مورد نیاز برای تحلیل مهیا شد. عوامل مورد نیاز و وزن اختصاص داده شده به آنها برای تحلیل در این مطالعه در جدول ۲ دیده می‌شود. غیر از دما میانگین، فشار و سرعت باد سایر عوامل با محاسبه استخراج شده اند. همان طور که در بخش داده ها شرح داده شد مقدار هر متغیر در هر روز میانگین همان متغیر در همان روز در تمام سال های دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ بوده است. در ادامه به شرح عوامل محاسبه شده پرداخته شده است.

که در آن x سرعت باد، k چهارچوب شکل و λ چهارچوب مقیاس است. در این مورد شاخص هر چقدر بالا بوده باشد همان قدر همبستگی بین مقادیر سرعت باد بیشتر بوده و نشانگر تداوم سرعت باد بوده است.

آستانه سرعت باد برای تولید انرژی در این مطالعه ۳ متر بر ثانیه بوده است. انتخاب سرعت باد مقطع ۳ متر بر ثانیه یک استاندارد رایج در صنعت انرژی باد است، زیرا به طور کلی به عنوان حداقل سرعت باد که در آن اکثر توربین‌های بادی

شروع به تولید برق می‌کنند پذیرفته شده است. این مقدار بسته به طراحی خاص و فناوری توربین بادی می‌تواند کمی متفاوت باشد، اما ۳ متر بر ثانیه به طور گسترده‌ای شناخته شده است (وزارت انرژی ایالات متحده، ۲۰۱۵). بر این اساس تعداد روزهایی که سرعت باد در آنها به طور میانگین بیشتر از ۳ متر بر ثانیه بوده است برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ در تمامی ایستگاه‌ها محاسبه شده و به عنوان یکی از عوامل تحلیل سلسله مراتبی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه

ارتفاع از سطح دریا	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه
۳۵۴.۰۰	۴۸.۲۵	۳۲.۶۷	حسینیه	۶.۶۰	۴۸.۲۱	۳۰.۳۸	آبادان
۵۹۱.۱۰	۶۰.۷۲	۲۷.۲۳	ایران‌شهر	۲۰۳۰.۰۰	۵۲.۶۲	۳۱.۲۰	آباده
۲۱۸۸.۰۰	۵۲.۱۳	۳۱.۵۳	ایزدخواست	۲۲.۵۰	۴۸.۷۴	۳۱.۳۴	اهواز
۷۶۷.۰۰	۴۹.۸۵	۳۱.۸۵	ایذه	۱۶۷۶.۰۰	۵۳.۲۸	۲۹.۹۴	ارسنجان
۱۰۸۲.۰۰	۵۳.۵۳	۲۸.۴۸	جهرم	۷.۰۰	۵۲.۶۲	۲۷.۴۸	عسلویه (فرودگاه)
۶۵۹.۰۰	۵۲.۳۶	۲۷.۸۲	چم	۹.۸۰	۵۶.۳۷	۲۷.۲۲	بندرعباس
۵.۲۰	۵۷.۷۷	۲۵.۶۴	چاسک	۶.۲۰	۴۹.۱۶	۳۰.۵۵	بندر ماهشهر
۸۴۰.۰۰	۵۱.۶۵	۲۹.۶۰	کازرون	۴.۰۰	۵۱.۹۳	۲۷.۸۳	بندر دیر
۳۶۵.۰۰	۴۹.۱۰	۳۲.۳۴	لالی	۳.۹۰	۵۰.۱۷	۳۰.۰۵	بندر دیلم
۴۱۱.۰۰	۵۳.۲۰	۲۷.۳۶	لامرد	۲۷.۰۰	۵۵.۵۷	۲۶.۹۵	بندر خمیر
۷۹۲.۰۰	۵۴.۳۷	۲۷.۶۷	لار	۲۲.۷۰	۵۴.۸۳	۲۶.۵۳	بندر لنگه
۳۲۰.۵۰	۴۹.۲۴	۳۱.۹۸	مسجد سلیمان	۲۲۳۱.۰۰	۵۳.۶۱	۳۰.۴۸	بوانات
۲۹.۶۰	۵۷.۰۹	۲۷.۱۱	میناب	۳۱۳.۰۰	۵۰.۲۲	۳۰.۶۱	بهبهان
۱۶۳۲.۰۰	۵۴.۳۵	۲۹.۱۹	نی ریز	۸۹.۹۰	۵۱.۲۲	۲۹.۲۷	بrazجان
۵۱۰.۰۰	۶۰.۲۰	۲۶.۲۳	نیکشهر	۷.۸۰	۴۸.۰۱	۳۱.۷۱	بستان
۹۷۲.۰۰	۵۱.۵۴	۳۰.۰۷	نورآباد (ممسنی)	۹.۰۰	۵۰.۸۲	۲۸.۹۶	بوشهر (فرودگاه)
۵۹.۰۰	۵۳.۰۴	۲۷.۲۲	پارسیان	۸.۴۰	۵۰.۸۲	۲۸.۹۰	بوشهر (ساحلی)
۷۴۶.۰۰	۵۳.۰۶	۲۸.۴۸	قیروکارزین	۸.۰۰	۶۰.۶۵	۲۵.۲۸	چابهار
۱۵۰.۵۰	۴۹.۶۰	۳۱.۲۷	رامهرمز	۱۴۵۷.۰۰	۵۰.۲۸	۳۱.۷۱	دهدز
۴۰۶.۰۰	۶۱.۴۰	۲۶.۲۳	راسک	۱۴۳.۰۰	۴۸.۳۸	۳۲.۴۰	دزفول (فرودگاه)
۲۱۹.۶۰	۵۷.۱۹	۲۷.۴۶	رودان	۱۶۴۲.۰۰	۵۲.۴۷	۳۰.۱۸	درودزن
۲۲۵۱.۰۰	۵۳.۱۶	۳۰.۵۹	صفاشهر	۲۳۰۰.۰۰	۵۲.۶۳	۳۰.۹۰	اقلید
۸۲.۹۰	۴۸.۴۳	۳۲.۲۵	صفی آباد (دزفول)	۱۶۹۰.۰۰	۵۴.۰۵	۲۹.۱۴	استهبان
۷۳۷.۰۰	۵۷.۸۸	۲۶.۴۵	سردشت بشاگرد	۱۲۶۸.۰۰	۵۳.۷۲	۲۸.۹۰	فسا
۲۲۰۱.۰۰	۵۲.۰۱	۳۰.۲۳	سپیدان	۱۳۶۲	۵۲.۵۵	۲۸.۸۹	فیروزآباد (فارس)
۳.۰۰	۴۸.۶۴	۳۰.۶۶	شادگان	۷۰.۰۰	۴۸.۸۱	۳۲.۲۲	گنوند
۱۴۸۸.۰۰	۵۲.۶۰	۲۹.۵۴	شیراز	۹۳۱.۲۰	۵۵.۹۱	۲۸.۳۱	حاجی آباد (هرمزگان)
۶۵.۰۰	۴۸.۲۴	۳۲.۱۹	شوش	۱۰۹۸.۲۰	۵۴.۳۰	۲۸.۷۹	حسن آباد (داراب)
۶۷.۰۰	۴۸.۸۳	۳۲.۰۵	شوشتر	۳.۰۰	۴۹.۷۱	۳۰.۲۵	هندیجان
۱۶۰۵.۰۰	۵۲.۸۹	۲۹.۹۲	تخت جمشید	۱۰۲۹.۰۰	۵۴.۴۳	۲۸.۳۷	زرین دشت
۱۵۹۶.۰۰	۵۲.۷۰	۲۹.۷۸	زرقان				

جدول ۲ عوامل مورد استفاده و وزن اختصاص داده شده به آنها برای تحلیل سلسله مراتبی این مطالعه

وزن	نام عامل	وزن	نام عامل	وزن	نام عامل	وزن	نام عامل
۰.۱	مجموع همبستگی خودکار	۰.۱۵	میانگین سرعت باد	۰.۱	میانگین فشار	-۰.۱ (منفی یک دهم)	میانگین دما
۰.۱	تعداد روزهای با سرعت باد بالاتر از آستانه تولید انرژی در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴	۰.۱	شاخص پو	۰.۱	شاخص کاپا	۰.۲۵	چگالی توان باد

رابطه ۳ محاسبه چگالی توان باد (منبع: منول، جی.اف و همکاران ۲۰۱۰)

که در آن p_w چگالی توان باد (بر حسب وات بر متر مربع، W/m^2) است. ρ چگالی هوا (به کیلوگرم بر متر مکعب) و v سرعت باد بر حسب متر در ثانیه است. که در این مطالعه چگالی توان باد برای ایستگاه‌های هواشناسی بر حسب مجموع مقدار آن در طول یک سال محاسبه شده است. یعنی میانگین سالانه چگالی توان باد در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ در ماتریس ثبت شده است. جدول ۳ ماتریس داده‌های مهیا شده ایستگاه‌های هواشناسی برای انجام تحلیل سلسله مراتبی را نشان داده است.

یکی دیگر از عوامل ماتریکس تحلیل سلسله مراتبی چگالی توان باد بوده است. این عامل با در نظر گرفتن فشار هوا، دما و سرعت باد حداکثر توان تولید انرژی که باد در یک مقطع زمانی خاص می تواند تولید کند را محاسبه می کند. برای محاسبه چگالی توان باد در این مطالعه ارتفاع ۷۰ متری برای داده های سرعت باد لحاظ شده است. این مهم برای این است که بیشتر توربین‌های بادی متداول در ایران در این ارتفاع نصب شده اند. محاسبه توان باد در این ارتفاع نتایج واقع بینانه تری ایجاد کرده است. در رابطه ۳ طریقه محاسبه چگالی توان باد آورده شده است.

$$p_w = 0.5 * \rho * v^3$$

جدول ۳- ماتریس مهیا شده ایستگاه های هواشناسی برای انجام تحلیل سلسله مراتبی

نام ایستگاه	دما میانگین	فشار میانگین	سرعت باد	میانگین سالانه چگالی توان باد	شاخص خود همبستگی	شاخص پو	توزیع و بیول کاپا	تعداد روزهای با سرعت باد بیشتر از ۳ متر در ثانیه در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴
آبادان	۲۶.۹۲	۱۰۱۰.۱۴	۳.۲۱	۱۴۴۳۹.۴۷	۰.۳۷	۰.۱۴	۲.۰۴	۱۶۴۰.۰۰
آباده	۱۵.۰۷	۱۰۰۹.۸۱	۲.۹۴	۱۱۷۷۳.۴۲	۰.۵۰	۰.۰۷	۲.۱۴	۱۵۰۱.۰۰
اهواز	۲۶.۸۱	۱۰۰۹.۲۷	۲.۱۸	۴۳۰۳.۵۵	۰.۳۴	۰.۰۲	۲.۱۳	۶۶۵.۰۰
ارسنجان	۱۹.۳۶	۱۰۰۹.۶۲	۳.۶۵	۱۶۴۱۹.۸۶	۰.۵۳	۰.۱۲	۲.۸۹	۲۷۴۲.۰۰
عسلویه (فرودگاه)	۲۷.۶۸	۱۰۰۷.۴۷	۲.۶۶	۷۱۱۵.۵۵	۰.۴۰	۰.۰۶	۲.۲۹	۱۰۲۲.۰۰
بندرعباس	۲۶.۳۹	۱۰۰۹.۵۲	۳.۵۲	۱۷۷۵۴.۸۸	۰.۳۵	۰.۱۸	۲.۱۵	۱۹۹۴.۰۰
بندر ماهشهر	۲۸.۳۳	۱۰۰۸.۴۴	۲.۸۷	۱۰۴۱۸.۲۴	۰.۳۸	۰.۱۰	۲.۰۸	۱۳۸۱.۰۰
بندر دیر	۲۷.۶۷	۱۰۰۹.۲۱	۲.۶۰	۵۹۷۰.۸۲	۰.۴۴	۰.۰۲	۲.۵۵	۱۱۷۳.۰۰
بندر دیلم	۲۹.۸۲	۱۰۰۷.۴۷	۲.۳۲	۴۸۱۵.۹۰	۰.۵۸	۰.۰۲	۲.۳۲	۷۱۸.۰۰
بندر خمیر	۲۷.۵۴	۱۰۰۸.۵۵	۳.۱۷	۱۰۱۵۲.۳۰	۰.۴۴	۰.۰۶	۲.۹۵	۱۷۵۹.۰۰
بندر لنگه	۲۷.۲۸	۱۰۰۸.۶۶	۳.۴۵	۱۱۰۵۲.۹۶	۰.۵۰	۰.۰۳	۳.۸۹	۲۵۲۰.۰۰
بوانات	۲۹.۲۷	۱۰۰۶.۲۳	۱.۲۹	۱۲۰۱.۵۱	۰.۵۱	۰.۱۱	۱.۵۸	۱۲۸۹.۰۰
بهبهان	۱۵.۹۳	۱۰۰۸.۹۵	۳.۰۱	۲۲۷۹۴.۹۸	۰.۳۸	۰.۰۱	۲.۰۷	۳۸۲.۰۰
برازجان	۲۵.۴۵	۱۰۰۹.۰۷	۱.۸۵	۲۷۸۳.۰۶	۰.۴۸	۰.۰۱	۱.۸۵	۳۱۱.۰۰
بستان	۲۹.۸۵	۱۰۰۷.۵۰	۱.۵۶	۲۰۰۶.۰۳	۰.۳۸	۰.۰۹	۲.۲۹	۱۵۰۸.۰۰
بوشهر (فرودگاه)	۲۵.۷۳	۱۰۰۹.۴۳	۳.۰۳	۱۰۸۳۶.۶۸	۰.۴۴	۰.۲۰	۲.۲۱	۲۳۶۲.۰۰
بوشهر (ساحلی)	۲۶.۳۷	۱۰۰۸.۷۴	۳.۷۰	۲۰۳۷۶.۴۰	۰.۳۷	۰.۰۶	۲.۵۲	۱۵۰۳.۰۰
چابهار	۲۷.۰۴	۱۰۰۹.۱۰	۲.۹۲	۸۸۶۸.۲۰	۰.۶۲	۰.۰۳	۲.۲۷	۱۱۲۲.۰۰
دهدز	۲۶.۹۴	۱۰۰۸.۶۱	۲.۶۱	۶۹۷۹.۴۰	۰.۳۲	۰.۰۶	۳.۳۹	۲۱۱۷.۰۰
دزفول (فرودگاه)	۱۹.۹۸	۱۰۰۹.۰۶	۳.۳۸	۱۱۷۴۳.۷۷	۰.۳۸	۰.۰۴	۲.۲۸	۱۴۰۸.۰۰

ادامه جدول ۳- ماتریس مهیا شده ایستگاه‌های هواشناسی برای انجام تحلیل سلسله مراتبی

نام ایستگاه	دما میانگین	فشار میانگین	سرعت باد	میانگین سالانه چگالی توان باد	شاخص خود همبستگی	شاخص پو	شاخص توزیع ویبول کاپا	تعداد روزهای با سرعت باد بیشتر از ۳ متر در ثانیه در دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴
درودزن	۱۸.۹۶	۱۰۱۰.۵۱	۲.۷۰	۷۹۵۴.۷۷	۰.۵۸	۰.۱۳	۱.۵۵	۱۲۵۵.۰۰
اقلید	۱۴.۸۵	۱۰۱۰.۶۲	۲.۸۶	۱۸۴۹۱.۷۸	۰.۴۱	۰.۰۴	۱.۹۸	۹۶۸.۰۰
استهبان	۲۰.۶۰	۱۰۰۴.۵۸	۲.۳۴	۶۴۰۰.۶۸	۰.۴۷	۰.۰۱	۲.۲۰	۷۴۳.۰۰
فسا	۲۱.۱۳	۱۰۰۵.۹۲	۲.۲۰	۴۲۶۰.۷۲	۰.۵۰	۰.۰۳	۲.۳۷	۱۱۲۱.۰۰
فیروزآباد (فارس)	۲۳.۱۴	۱۰۰۷.۹۶	۲.۵۴	۶۰۴۹.۴۴	۰.۲۷	۰.۰۱	۱.۹۶	۳۱۸.۰۰
گنوند	۲۶.۷۹	۱۰۱۰.۴۳	۱.۷۱	۲۵۲۱.۲۵	۰.۵۱	۰.۰۲	۲.۲۶	۶۰۶.۰۰
حاجی آباد(هرمزگان)	۲۴.۳۶	۱۰۰۸.۶۷	۲.۲۳	۴۵۰۸.۷۹	۰.۵۵	۰.۰۱	۱.۷۳	۲۹۶.۰۰
حسن آباد (داراب)	۲۵.۰۰	۱۰۰۷.۶۱	۱.۵۲	۲۱۷۵.۶۱	۰.۳۳	۰.۲۴	۲.۶۸	۲۴۶۰.۰۰
هندیجان	۲۷.۵۸	۱۰۰۹.۹۴	۴.۰۷	۲۳۰۰۰.۴۱	۰.۴۰	۰.۱۵	۲.۳۴	۱۸۸۳.۰۰
حسینیه	۲۷.۵۷	۱۰۰۹.۰۱	۳.۵۴	۱۷۱۷۸.۳۰	۰.۵۵	۰.۰۱	۲.۶۶	۷۵۱.۰۰
ایرانشهر	۲۷.۶۴	۱۰۰۷.۸۲	۲.۳۶	۴۴۳۷.۶۸	۰.۵۵	۰.۱۹	۱.۹۸	۲۱۵۸.۰۰
ایزدخواست	۱۷.۵۱	۱۰۰۹.۰۸	۳.۶۸	۲۴۵۴۲.۱۷	۰.۳۵	۰.۰۳	۱.۸۳	۶۶۱.۰۰
ایذه	۲۴.۰۵	۱۰۰۶.۶۰	۲.۱۲	۵۱۵۱.۳۲	۰.۶۵	۰.۰۲	۱.۶۱	۲۸۱.۰۰
چهرم	۲۴.۵۸	۱۰۰۸.۱۰	۱.۵۱	۲۶۷۳.۳۰	۰.۵۹	۰.۰۱	۲.۵۷	۱۱۴.۰۰
جم	۲۷.۳۴	۱۰۱۲.۶۶	۳.۰۴	۹۰۰۹.۰۶	۰.۵۵	۰.۰۵	۲.۶۲	۱۹۲۳.۰۰
چاسک	۲۷.۴۲	۱۰۰۸.۲۳	۴.۱۱	۲۵۰۴۴.۵۷	۰.۵۹	۰.۲۴	۲.۵۳	۲۵۲۰.۰۰
کازرون	۲۶.۱۴	۱۰۰۸.۰۱	۱.۹۹	۲۹۳۹.۴۵	۰.۵۱	۰.۰۰	۲.۳۴	۴۸۰.۰۰
لالی	۲۶.۶۱	۱۰۱۱.۱۳	۲.۹۸	۹۸۹۵.۶۸	۰.۴۰	۰.۰۵	۲.۴۰	۱۵۵۱.۰۰
لامرد	۲۹.۰۳	۱۰۰۷.۷۹	۲.۴۶	۶۷۱۳.۴۸	۰.۵۵	۰.۰۵	۱.۹۷	۱۰۳۶.۰۰
لار	۲۳.۵۵	۱۰۰۸.۱۱	۱.۵۱	۱۹۱۳.۱۲	۰.۴۶	۰.۰۰	۱.۷۶	۲۵۷.۰۰
مسجدسلیمان	۲۶.۱۵	۱۰۰۸.۵۳	۱.۸۲	۲۰۸۱.۷۶	۰.۳۵	۰.۰۰	۲.۶۴	۱۸۰.۰۰
میناب	۲۸.۴۶	۱۰۰۹.۱۷	۱.۵۶	۲۵۳۳.۱۰	۰.۴۹	۰.۰۱	۱.۷۶	۱۹۶.۰۰
نی ریز	۲۰.۸۲	۱۰۰۹.۷۴	۲.۲۲	۵۵۷۱.۶۳	۰.۴۱	۰.۰۳	۲.۰۳	۹۱۳.۰۰
نیکشهر	۲۹.۶۵	۱۰۰۶.۵۱	۲.۵۹	۵۲۲۸.۱۴	۰.۴۷	۰.۰۱	۳.۱۷	۹۷۱.۰۰
نورآباد (ممسنی)	۲۲.۷۸	۱۰۱۱.۵۴	۱.۴۷	۲۸۶۷.۷۰	۰.۴۹	۰.۰۲	۱.۵۷	۳۸۳.۰۰
پارسیان	۲۹.۳۳	۱۰۰۸.۸۰	۱.۸۳	۲۵۳۹.۰۴	۰.۳۹	۰.۰۱	۲.۲۰	۲۸۸.۰۰
قیروکارزین	۲۶.۶۶	۱۰۰۷.۴۵	۱.۳۵	۱۷۰۷.۶۱	۰.۴۸	۰.۰۰	۱.۶۶	۲۵۲.۰۰
رامهرمز	۲۸.۳۶	۱۰۰۹.۰۲	۲.۰۴	۳۶۰۶.۸۳	۰.۲۴	۰.۰۱	۲.۱۵	۴۶۶.۰۰
راسک	۳۰.۳۳	۱۰۰۷.۱۲	۱.۷۰	۱۹۵۵.۲۲	۰.۵۲	۰.۰۰	۲.۳۱	۱۹۲.۰۰
رودان	۳۰.۰۵	۱۰۰۵.۵۹	۲.۴۷	۷۰۸۵.۳۲	۰.۵۲	۰.۰۵	۲.۰۲	۸۶۱.۰۰
صفائشهر	۱۵.۷۱	۱۰۱۱.۵۵	۲.۹۲	۱۲۵۵۸.۹۹	۰.۵۲	۰.۰۹	۱.۹۹	۱۵۳۶.۰۰
صفی آباد (دزفول)	۲۴.۵۲	۱۰۰۹.۸۴	۲.۱۷	۴۷۵۷.۶۵	۰.۳۹	۰.۰۲	۲.۰۰	۶۶۴.۰۰
سردشت بشاگرد	۲۸.۳۳	۱۰۰۸.۴۵	۲.۲۲	۴۱۸۸.۷۲	۰.۴۸	۰.۰۱	۲.۴۲	۶۹۷.۰۰
سپیدان	۱۷.۸۲	۱۰۰۸.۲۷	۲.۷۲	۷۷۸۲.۴۷	۰.۴۳	۰.۰۴	۲.۳۷	۱۲۷۶.۰۰
شادگان	۲۷.۷۲	۱۰۰۹.۰۱	۳.۳۸	۱۶۵۷۰.۶۷	۰.۲۵	۰.۱۵	۲.۱۳	۱۷۵۶.۰۰
شیراز	۲۰.۶۳	۱۰۰۷.۸۲	۱.۸۱	۳۳۷۵.۳۸	۰.۶۴	۰.۰۲	۱.۷۵	۴۰۲.۰۰
شوش	۲۷.۲۹	۱۰۰۹.۵۶	۱.۷۲	۳۰۹۴.۰۲	۰.۳۸	۰.۰۱	۱.۹۱	۴۰۹.۰۰
شوشتر	۲۸.۲۸	۱۰۰۸.۶۰	۲.۰۳	۴۰۰۷.۷۴	۰.۳۱	۰.۰۲	۲.۰۸	۵۱۹.۰۰
تخت جمشید	۲۱.۳۰	۱۰۰۸.۷۶	۱.۵۳	۳۰۳۳.۵۳	۰.۵۳	۰.۰۱	۱.۷۷	۵۰۱.۰۰
زرقان	۲۱.۴۶	۱۰۰۸.۸۴	۱.۴۹	۲۸۷۵.۶۱	۰.۴۰	۰.۰۱	۱.۷۲	۴۲۵.۰۰
زرین دشت	۲۶.۶۷	۱۰۰۷.۷۴	۱.۵۷	۱۹۰۰.۷۲	۰.۴۸	۰.۰۰	۲.۰۱	۲۴۲.۰۰

امتیاز دهی شدند. در روش تحلیل سلسله مراتبی با رابطه زیر امتیازدهی ایستگاه‌های مورد مطالعه انجام شده است.

بعد از استخراج داده‌های عوامل مدنظر، در مرحله اول داده‌های عوامل به دست آمده با روش تحلیل سلسله مراتبی

بر اساس استخراج ظرفیت سازی باد در ایستگاه خاصی نبوده است باید این نتایج گروه بندی می شدند تا گستره های مطلوب و نامطلوب منطقه مورد مطالعه در ظرفیت سازی بهره برداری از باد مشخص شوند. برای اینکار از روش خوشه بندی وارد استفاده شد. روش خوشه بندی وارد نیز یکی از روش های تحلیل سلسله مراتبی است. محاسبه خوشه بندی با استفاده از رابطه زیر و در نرم افزار متلب انجام شده است.

$$DE(C_i, C_j) = \frac{(|C_i| * |C_j|)}{(|C_i| + |C_j|)} * d(\mu_i, \mu_j)^2$$

رابطه ۵ رابطه خوشه بندی وارد (منبع: (آج. وارد. جی. آر،

(۱۹۶۳))

که در آن C_i, C_j گروه هایی از نقاط داده، $|C_i|, |C_j|$ تعداد نقاط داده در هر خوشه، μ_i, μ_j موقعیت میانگین تمام نقاط داده در خوشه و d اندازه گیری فاصله بین دو نقطه در فضای اقلیدسی می باشد. بنابراین ماتریس داده های مهیا شده برای تحلیل سلسله مراتبی به عنوان ورودی روش وارد در نظر گرفته شد و با توجه به تعداد ایستگاه های هواشناسی منطقه مورد مطالعه (۶۱)، ایستگاه ها در ۷ خوشه گروه بندی شد.

نتایج و بحث

شکل ۲ نتایج درونیابی میانگین ماهانه چگالی توان باد نوار جنوبی ایران را در دوره ۲۰۲۴-۲۰۱۵ نشان داده است. برای اینکه این مطالعه بر اساس یک ایستگاه خاص نبوده و به صورت گستره مطالعاتی بررسی شده است، تفکیک ایستگاه های هواشناسی به محدوده شهرستان های آنها نمی توانست هدف مطالعه را برای گستره جغرافیایی نوار جنوبی ایران برآورده کند. لذا داده های به دست آمده ایستگاه ها با روش آی دی دبلیو (IDW) درونیابی شد تا ضمن نمایش فضایی نتایج چگالی توان باد، بتواند نقاط مطلوب و نامطلوب به لحاظ میزان چگالی توان باد را شناسایی کند. در این شکل پهنه های با توان باد بالا با رنگ آبی و پهنه های با توان باد پایین با رنگ صورتی نشان داده شده است. از بین این دو رنگ نیز هر چقدر داده های نقشه دارای توان باد بالا بوده، رنگ آبی پررنگ تر بوده است همچنین هر چقدر داده های نقشه دارای توان باد پایین بوده، رنگ صورتی پررنگ تر بوده است. به طور کلی در تمام ماه ها توان باد زیاد در جنوب

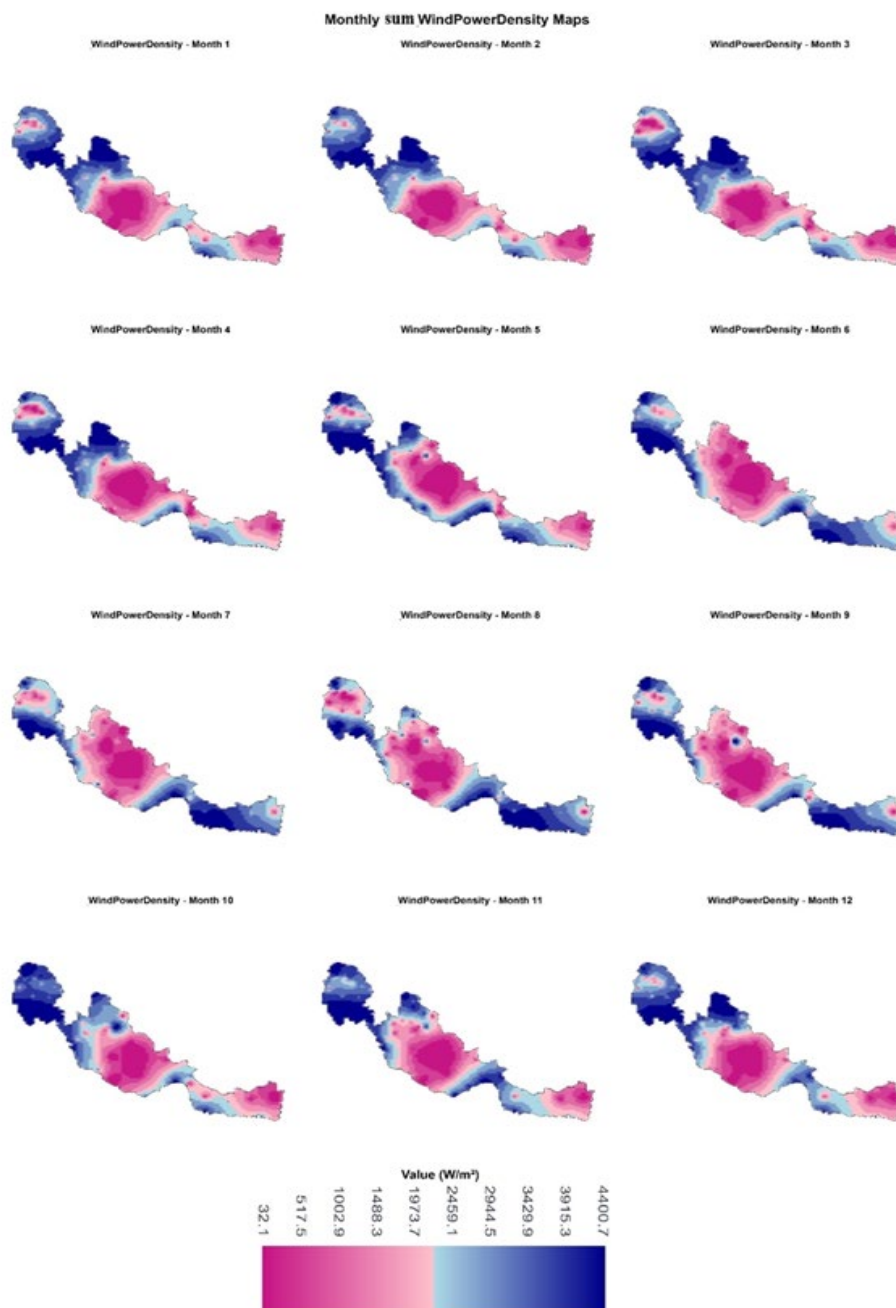
$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j * \frac{x_{ij}}{\sum_{k=1}^m x_{kj}}$$

رابطه ۴ محاسبه تحلیل سلسله مراتبی ((ساتی. تی. ال، ۱۹۹۴)) که در آن S_i امتیاز تحلیل سلسله مراتبی برای هر ایستگاه است. W_j وزن هر کدام از معیارها است. x_{ij} نمره عملکرد هر ایستگاه در هر کدام از معیارهای هشت گانه و m تعداد معیارهای به کار گرفته شده است.

منظور از امتیازدهی این بود که ایستگاه های منطقه مورد مطالعه با توجه به ۸ عامل شرح داده شده و وزن آنها چه رتبه ای را در ظرفیت سازی بهره برداری از انرژی باد می توانند به دست آورند. در وزن دهی به عوامل مورد استفاده در این تحلیل مجموع وزن ها عدد ۱ است یعنی وزن ها بر اساس صدم یا درصد هستند. چگالی توان باد سالانه بیشترین وزن ممکن یعنی ۰.۲۵ را به خود اختصاص داده است. این به سبب تاثیرگذاری بیشتر این عامل نسبت به سایر عوامل در ظرفیت سازی باد بوده است. عامل بعدی که وزن بیشتری گرفته است سرعت باد است. امتیاز بیشتر این عامل نیز به دلیل تاثیر مستقیم آن در چگالی توان باد بوده است. برای دیگر عوامل وزن ۰.۱ در نظر گرفته شده است. اما برای عامل میانگین دما وزن ۰.۱- (منفی یک دهم) اختصاص یافته است. وزن منفی به این عامل به این سبب است که هر چقدر مقدار دما زیاد باشد از چگالی توان باد کاسته می شود، بنابراین هنگام اجرای تحلیل سلسله مراتبی برای اینکه وزن این عامل نیز مثبت شود تمامی داده های ستون دما هنگام اجرا معکوس می شوند تا وزن اختصاص داده شده به عامل دما مثبت شود. وقتی که داده های ستون دما معکوس می شوند ابتدا وزن اختصاص داده شده به ستون به ارزشی مثبت بدل شده و بعد از آن دمای بالا اثر کاهنده و دمای کم اثر افزایش دهنده برای امتیاز نهایی ایستگاه ها بر جای می گذارند. این مهم برای اینست که غیر از دما، داده های تمامی ستون های دیگر هر چقدر بیشتر باشند همان قدر نیز امتیاز ایستگاه ها را در تحلیل سلسله مراتبی افزایش می دهند. لذا برای هم سویی اثر عامل دما با سایر عوامل اینکار انجام گرفته است. بعد از انجام تحلیل سلسله مراتبی هر ایستگاه هواشناسی یک امتیاز بر حسب درصد به دست آورده است که رتبه هر نقطه را در توانایی آن در بهره برداری از انرژی بادی نشان داده است. اما چون هدف مطالعه

هم به خصوص بخش ساحلی تر آن در تمام ماه‌های سال توان باد خوبی داشته است. در این بین بخش جنوبی استان فارس و شمال و غرب استان هرمزگان کمترین توان باد را در کل سال از خود نشان داده است. بخش‌های غربی نیمه جنوبی استان سیستان و بلوچستان هم فقط در ۴ ماه جون، ژولای، آگست و سپتامبر دارای توان باد خوبی بوده است. بخش‌های شرقی این حوضه نیز توان باد قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نداده است.

استان خوزستان، شمال غرب استان فارس و جنوب شرق استان هرمزگان دیده می‌شود. در نگاه دقیق‌تر به استان خوزستان دیده شد که جنوب این استان در تمام ماه‌های سال توان باد بالایی داشته است. بخش شمالی استان فارس در تمام ماه‌های سال به غیر از جون، ژولای، آگست و سپتامبر دارای توان باد قابل توجهی بوده است. بخش جنوب شرق استان هرمزگان نیز در تمام ماه‌های سال توان باد خوبی داشته است، علی‌الخصوص در ماه‌های جون، ژولای، آگست و سپتامبر توان باد بسیار بالایی از خود نشان داده است. استان بوشهر



شکل ۲- نقشه‌های درون‌بای میانگین ماهانه چگالی توان باد نوار جنوبی ایران در دوره ۲۰۲۴-۲۰۱۵ (منبع: نویسنده)

تجزیه و تحلیل داده های جدول مشخص شد که ایستگاه های جاسک، هندیجان، ارسنجان، بندرعباس، شادگان، ایزدخواست، بوشهر (فرودگاه)، بوشهر (ساحلی) و آبادان به ترتیب بیشترین امتیازات ممکن را در تحلیل ظرفیت سازی اقلیمی در بهره برداری از نوار جنوبی ایران به دست آورده اند. همچنین ایستگاه های قیر و کارزین، لار، زرین دشت، راسک، مسجد سلیمان، میناب، پارسیان، زرقان، شوش و برازجان نیز به ترتیب کمترین امتیازات ممکن را در تحلیل مذکور به دست آورده اند. به این ترتیب ایستگاه های جاسک با امتیاز ۳۵.۴۲ از هرمزگان مطلوب ترین و قیر و کارزین با امتیاز ۸.۸۰ از فارس نامطلوب ترین ایستگاه های این مطالعه در ظرفیت سازی اقلیمی در بهره مندی از باد معرفی می شوند.

ظرفیت سنجی اقلیمی در بهره مندی از نیروی باد تنها با محاسبه توان باد به دست نمی آید. برای اینکه ظرفیت اقلیمی در این بخش به عواملی مانند پایداری باد و محاسبه تعداد روزهای دارای سرعت مطلوب باد نیز نیازمند است. لذا با استفاده از داده های سرعت باد در شاخص های مربوط به سنجش پایداری مانند خودهمبستگی و توزیع ویبول کاپا میزان پایداری باد در هر شاخص به دست آمد. همچنین تعداد روزهای دارای سرعت باد بالاتر از آستانه تولید انرژی (۳ متر در ثانیه) نیز برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۴ نیز محاسبه شد. پس از آن برای محاسبه اثر تمامی عوامل تحلیل سلسله مراتبی برای داده های مهیا شده انجام گرفت. جدول ۴ نتایج تحلیل سلسله مراتبی این مطالعه را به تفکیک ایستگاه نشان داده است. با

جدول ۴ نتایج تحلیل سلسله مراتبی این مطالعه به تفکیک ایستگاه هواشناسی (منبع: نویسنده)

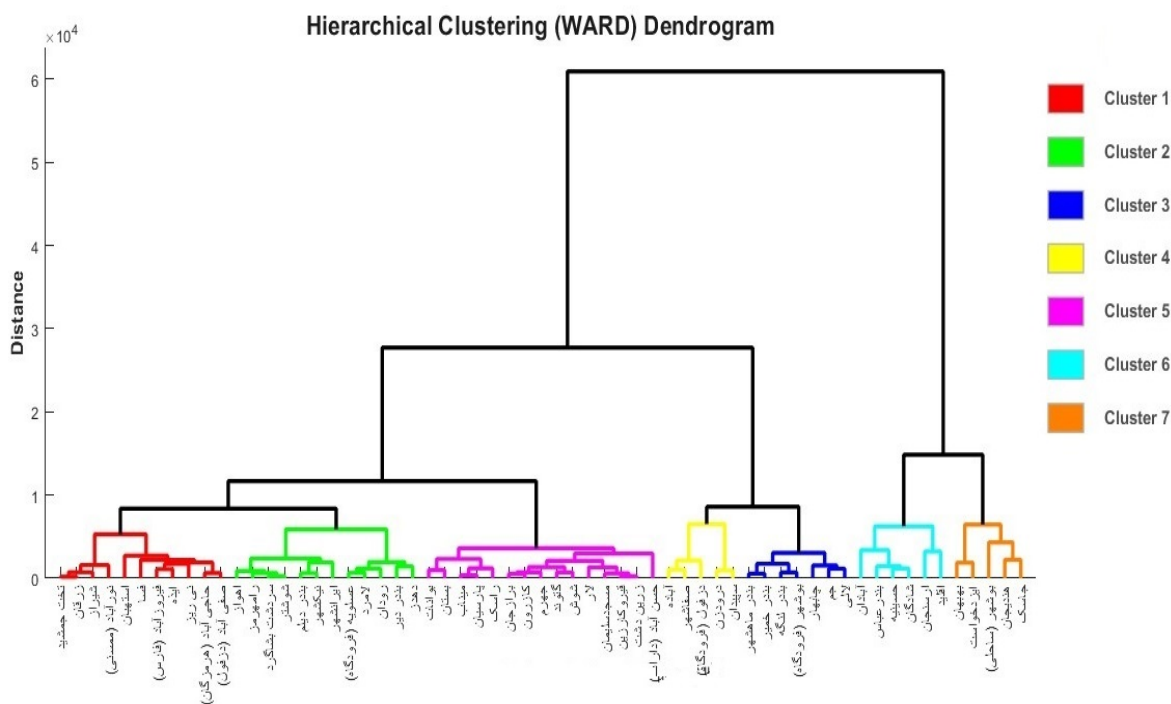
نام ایستگاه	امتیاز به درصد	نام ایستگاه	امتیاز به درصد	نام ایستگاه	امتیاز به درصد	نام ایستگاه	امتیاز به درصد	نام ایستگاه	امتیاز به درصد
آبادان	۲۳.۶	بهبهان	۲۲.۷	فیروزآباد (فارس)	۱۲.۲	کازرون	۱۱.۱	راسک	۹.۶
آباده	۲۱.۳	بrazجان	۱۰.۳	گنوند	۱۱.۲	لالی	۱۸.۵	رودان	۱۵.۲
اهواز	۱۱.۹	بستان	۱۳.۷	حاجی آباد (هرمزگان)	۱۱.۸	لامرد	۱۵.۵	صفاشهر	۲۲.۰
ارسنجان	۲۷.۷	بوشهر (فرودگاه)	۲۴.۸	حسن آباد (داراب)	۲۰.۳	لار	۹.۳	صفی آباد (دزفول)	۱۲.۵
عسلویه (فرودگاه)	۱۶.۰	بوشهر (ساحلی)	۲۴.۷	هندیجان	۲۹.۹	مسجد سلیمان	۹.۶	سردشت بشاگرد	۱۲.۳
بندرعباس	۲۷.۳	چابهار	۱۷.۳	حسینیه	۲۰.۹	میناب	۹.۷	سپیدان	۱۷.۱
بندر ماهشهر	۱۹.۳	دهدز	۱۸.۱	ایرانشهر	۲۰.۴	نی ریز	۱۳.۹	شادگان	۲۵.۰
بندر دیر	۱۴.۷	دزفول (فرودگاه)	۱۹.۷	ایزدخواست	۲۴.۹	نیکشهر	۱۴.۰	شیراز	۱۱.۹
بندر دیلم	۱۳.۴	درودزن	۱۹.۷	ایذه	۱۲.۷	نورآباد (ممسنی)	۱۰.۴	شوش	۱۰.۳
بندر خمیر	۱۹.۸	اقلید	۲۲.۳	چهرم	۱۰.۵	پارسیان	۹.۹	شوشتر	۱۱.۲
بندر لنگه	۲۱.۸	استهبان	۱۴.۱	جم	۱۹.۴	فیروکارزین	۸.۸	تخت جمشید	۱۱.۰
بوانات	۱۳.۴	فسا	۱۴.۰	جاسک	۳۵.۴	رامهرمز	۱۰.۶	زرقان	۱۰.۳
زرین دشت	۹.۴								

نشان می دهد. هدف از خوشه بندی یافتن بهترین خوشه دارای ظرفیت بهره برداری از باد در نوار جنوبی ایران بوده است. عوامل به کار گرفته شده در خوشه بندی در بخش داده ها شرح داده شده است. اعداد روی محور وای نشان دهنده

پس از انجام تحلیل سلسله مراتبی، برای اینکه ایستگاه های مورد نظر با توجه به داده های خود در عوامل مختلف گروه بندی شوند با استفاده از روش وارد خوشه بندی شدند. شکل ۳ دندروگرام حاصل از خوشه بندی وارد در این مطالعه را

راسک، شوش و زرین دشت با کسب میانگین امتیاز ۹.۷ درصد نا مطلوب‌ترین خوشه در ظرفیت‌سازی اقلیمی در بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران بوده است. شکل ۴ نقشه درونیابی ظرفیت‌سازی اقلیمی بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران را نشان داده است. با بررسی نقشه مشخص شد که بیشترین وسعت مناطق مطلوب در ظرفیت‌سازی بهره‌برداری از باد در جنوب شرق استان خوزستان، شمال غرب استان فارس و جنوب شرق استان هرمزگان قرار دارد. بخش‌هایی کوچکی از نوار ساحلی استان بوشهر و همچنین ساحل مرکز استان هرمزگان نیز در محدوده مناطق مطلوب قرار گرفته است. وسیع‌ترین مناطق نامطلوب در ظرفیت‌سازی بهره‌برداری از باد نیز در نیمه جنوبی استان فارس و مرکز استان خوزستان قرار گرفته‌اند. بعد از آن شرق و شمال نیمه جنوبی استان سیستان و بلوچستان و غرب استان هرمزگان در جمله مناطق نامطلوب ظرفیت‌سازی اقلیمی بهره‌برداری از باد قرار دارند.

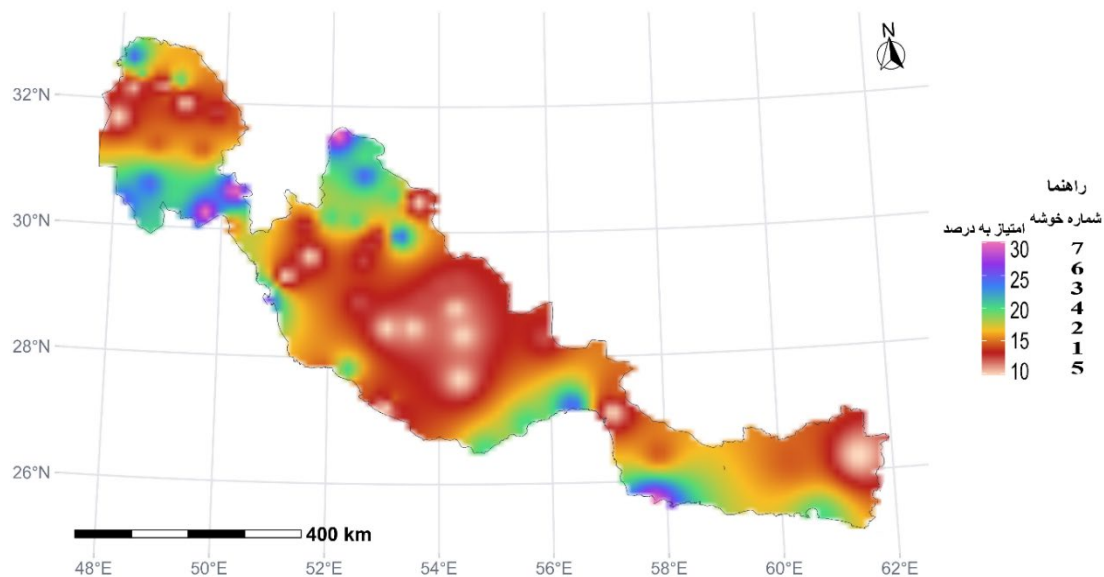
فاصله (یا عدم تشابه) بین خوشه‌ها در طول فرآیند ادغام سلسله‌مراتبی است. از آنجایی که از روش حداقل واریانس وارد استفاده شده است، این فاصله بر اساس افزایش کل واریانس درون خوشه‌ای زمانی که دو خوشه ادغام می‌شوند محاسبه می‌شود. طبق ارتفاع خوشه‌ها در دندروگرام خوشه‌ها ۶ و ۷ بالاترین امتیازات را کسب کرده و بیشترین شباهت را دارند. همچنین خوشه شماره ۵ که پایین‌ترین ارتفاع را دارد حاوی کمترین امتیازات بوده است. نتایج خوشه‌بندی در جدول ۵ نشان داده شده است. با تجزیه و تحلیل داده‌های جدول مشخص شد که خوشه شماره ۷ شامل ایستگاه‌های بهبهان، بوشهر (ساحلی)، هندیجان، ایزدخواست و جاسک با کسب میانگین امتیاز ۳۰.۲ درصد مطلوب‌ترین خوشه در ظرفیت‌سازی اقلیمی در بهره‌برداری از باد در نوار جنوبی ایران است. همچنین خوشه شماره ۵ شامل ایستگاه‌های بوانات، برازجان، بستان، گتوند، حسن‌آباد (داراب)، جهرم، کازرون، لار، مسجدسلیمان، میناب، پارسیان، قیروکارزین،



شکل ۳ دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی وارد در این مطالعه (منبع: نویسنده)

جدول ۵ نتایج خوشه بندی ظرفیت سازی باد در نوار جنوبی ایران (منبع: نویسنده)

شماره خوشه	میانگین امتیازات به درصد	شهرستان های شامل
۵	۹.۷	بوانات، برازجان، بستان، گتوند، حسن آباد (داراب)، جهرم، کازرون، لار، مسجدسلیمان، میناب، پارسیان، فیروکارزین راسک، شوش، زرین دشت
۱	۱۲.۲۴	استهبان، فسا، فیروزآباد (فارس)، نی ریز، نورآباد (ممسنی)، حاجی آباد (هرمزگان)، ایذه، تخت جمشید، زرقان، صفی آباد (دزفول)، شیراز
۲	۱۴.۴۴	اهواز، عسلویه (فرودگاه)، بندر دیر، بندر دیلم، دهدز، ایرانشهر، لامرد، نیکشهر، رامهرمز، رودان، سردشت، بشاگرد، شوشتر
۴	۱۹.۹۵	آباده، دزفول (فرودگاه)، درودزن، صفاشهر، سپیدان
۳	۲۰.۱۲	بندر ماهشهر، بندر خمیر، بندر لنگه، بوشهر (فرودگاه)، چابهار، جم، لالی
۶	۲۴.۴۷	آبادان، ارسنجان، بندرعباس، اقلید، حسینیه، شادگان
۷	۳۰.۲	بهبهان، بوشهر (ساحلی)، هنديجان، ایزدخواست، جاسک



شکل ۴ نقشه درونیابی خوشه بندی میزان بهره برداری از باد در نوار جنوبی ایران (منبع: نویسنده)

نتیجه گیری

باد استفاده شده است. روش تحلیل سلسله مراتبی یکی از روش های قدرتمند تفکیک و استخراج نقاط با هدف خاص در مطالعات با حجم عظیم داده است. در این روش نویسنده با امکان انتخاب عوامل مورد دلخواه و امکان وزن دهی متناسب به هر عامل می تواند نتایج نزدیک به واقعیت از

این مطالعه ظرفیت سازی اقلیمی بهره برداری از باد در نوار جنوبی ایران را بررسی کرده است. در این مطالعه از روش تحلیل سلسله مراتبی جهت تفکیک مناطق مطلوب و نامطلوب به لحاظ ظرفیت سازی اقلیمی در بهره برداری از

باد استان فارس را در شمال غرب این استان شناسایی کرده است، نتایج مطالعه فلاح، قاهره و همکاران (۱۳۹۶) را رد می‌کند. اسما، بی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه ای با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نقش تحلیل فضایی و تصمیم‌گیری چند معیاره جهت شناسایی مکان‌های مناسب نیروگاه‌های بادی با در نظر گرفتن عواملی مانند اقلیم، جغرافیا و شرایط اجتماعی-اقتصادی در استان خوزستان را برجسته نمود. درمقایسه با مطالعه حال حاضر هر دو مطالعه در کنار هم با پرداختن به جنبه‌های فنی و اقلیمی بهره برداری از انرژی بادی در ایران، با تمرکز مشترک بر استان خوزستان به عنوان یک منطقه کلیدی برای توسعه، مکمل یکدیگر هستند. فیلوم، اس و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای پتانسیل انرژی باد با استفاده از مدل‌های توزیع آماری، مناسب‌ترین توابع احتمال برای تحلیل دقیق سرعت باد و اولویت‌بندی توسعه بر اساس عوامل ظرفیت در سواحل جنوبی ایران را شناسایی کرده است. این مطالعه یک چارچوب روش شناختی برای تحلیل سرعت باد و مطالعات امکان‌سنجی ارائه کرده است در حالی که مطالعه حال حاضر یک ارزیابی عملی از میزان ظرفیت سازی انرژی باد انجام داده است. این دو مطالعه همدیگر را نفی نمی‌کنند و برای مطالعات ظرفیت‌سنجی انرژی باد به لحاظ روش مکمل یکدیگر هستند. در این مطالعه اهمیت توجه به ظرفیت سازی های اقلیمی علل خصوص در بخش استفاده از سرعت باد برجسته شد و لازمه توجه به مطالعات ظرفیت سازی اقلیمی بیش از پیش مورد توجه است.

منابع

- 1- Abbass, K, Qasim. M. Z, Song. H, Murshed. M, Mahmood. H, Younis. I, 2022, A Review of the Global Climate Change impacts, adaptation, and Sustainable Mitigation Measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 42539-42559. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- 2- Arvin. A. A, 2022, Capacity Measurement of Wind Energy and Sustainability of Rural Settlements (Case Study: Rural Area of Ardestan County in the Center of Iran). *Journal of Sustainable Rural Development*, 6(1), 105-116. https://www.jsrd.ir/article_166333.html
- 3- Asma. B, Morshedi. J, Borna. R, 2022, Feasibility of building wind power plants in

مطالعه خود به دست آورد. پس از استخراج نتایج مشخص شد که مناطق شمال غرب استان فارس و جنوب شرق استان های خوزستان و هرمزگان بیشترین امتیازات ممکن را نسبت به سایر مناطق به دست آورده اند و به عنوان مناطق مطلوب در ظرفیت سازی بهره برداری از باد نوار جنوبی ایران معرفی می‌شوند. همچنین مناطق جنوب استان فارس، شمال غرب استان هرمزگان، مرکز استان خوزستان و شرق نیمه جنوبی استان سیستان و بلوچستان کمترین امتیازات را نسبت به سایر مناطق کسب کرده اند و به عنوان مناطق نامطلوب در ظرفیت سازی بهره برداری از باد نوار جنوبی ایران معرفی می‌شوند. با تحلیل ایستگاهی نیز ایستگاه جاسک با کسب امتیاز ۳۵.۴۲ درصد از هرمزگان مطلوب ترین و قیر و کارزین با امتیاز ۸۸۰ درصد از فارس نامطلوب ترین ایستگاه های این مطالعه در ظرفیت سازی اقلیمی در بهره مندی از باد بودند. مهم ترین عوامل موثر در ظرفیت سازی اقلیمی بهره مندی از باد نیز سرعت باد، چگالی توان باد و پایداری در سرعت باد بالاتر از آستانه تولید انرژی تشخیص داده شدند. در مقایسه با مطالعات گذشته نیز گندمکار، امیر، (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای با بررسی آمار ده ساله وزش باد در ایستگاه های سینوپتیک کشور ایران نشان داد که بسیاری از نواحی ایران، از جمله نواحی ساحلی دریای عمان و جزایر خلیج فارس، نواحی ساحلی استان خوزستان و نواحی شرقی کشور به همراه چند نقطه پراکنده مانند: منجیل، رفسنجان، اردبیل و بیجار بادخیز هستند و در آنها توان تولید برق بادی، بویژه در فصل تابستان وجود دارد. مطالعه حال حاضر نتایج این مطالعه را مبنی بر امکان تولید انرژی از باد در جنوب استان خوزستان و سواحل دریای عمان در ایستگاه هایی مانند جاسک را تایید می‌کند. فلاح، قاهره و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه ای نشان داد که مناطق عالی جهت احداث نیروگاه بادی در استان فارس، در محدوده شمال، جنوب و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه در ایستگاه اقلید و لامرد با مساحتی بالغ بر ۸۹۳۷۲۲/۶۹ هکتار یا ۷/۲۹ درصد قرار دارد. علاوه بر این، مناطق خوب با مساحتی بالغ بر ۳۶۶۲۸۴۷/۷۶ هکتار یا ۲۹/۸۸ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه، شامل ایستگاه‌های لار، غرب فیروزآباد، ممسنی، آباده، اقلید و جنوب داراب می‌باشد. مطالعه حال حاضر که مناطق مطلوب جهت ظرفیت سازی بهره مندی از

- [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00033-6)
- 16- Liu. S. Y, Ho. Y. F, 2016, Wind energy applications for Taiwan buildings: What are the challenges and strategies for small wind energy systems exploitation? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.336>
 - 17- Manwell. J. F, McGowan. J. G, Rogers. A. L, 2010, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). Wiley
 - 18- Mohamadi. H, Saeedi. A, Firoozi. Z, Sepasi. Zangabadi. S, Veisi. S, 2021, Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran. *Heliyon*, 7(6), e07234. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07234>
 - 19- Mokhtari. M, Zahra. Shojaee, 2021, Investigating the Potential of Wind Energy Exploitation in Iran
 - 20- Omidi et al (2019), R. Alimardani, M. Khanali, 2019, Study of Potential, Characteristics and Parameters of the Wind Energy Case study: Dehloran County. *DOAJ* (DOAJ: Directory of Open Access Journals). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.64905>
 - 21- Population Pressure and the Climate Crisis, 2020, *Biologicaldiversity.org*
 - 22- Razeghi. M, Hajinezhad. A, Naseri. A, Noorollahi. Y, Moosavian. S. F, 2023, Multi-criteria decision for selecting a wind farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101018>
 - 23- Saaty. T. L, 1994, How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. In: *Interfaces*, 24(6), 19-43. DOI: 10.1287/inte.24.6.19.
 - 24- Saeidi. D, Mirhosseini. M, Sedaghat. A, Mostafaeipour. A, 2011, Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3558–3569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.011>
 - 25- Seyedreza. Baharisaravi, 2016, Status and potential of renewable energies in Mazandaran Province Iran. *Civilica.com*; CIVILICA. <https://civilica.com/doc/439996>
 - 26- Stallworthy. B, 2021, Study: Population growth cancelling out climate change progress - Population Matters. *Population Matters*
 - 27- U.S. Department of Energy (DOE), 2015, *Wind Technologies Market Report*. This report discusses various aspects of wind coastal areas of the country using GIS (case study: Khuzestan province). *Iranian Journal of Energy*, 25(2), 1–17. <http://necjournals.ir/article-1-1790-en.html>
 - 4- Bruce-Lockhart. C, Kaelin. C, Black. R, 2024, Why wind and solar are key solutions to combat climate change | Ember. *Ember*. <https://ember-energy.org/latest-insights/why-wind-and-solar-are-key-solutions-to-combat-climate-change/>
 - 5- Chatfield. C, 2004, *The Analysis of Time Series: An Introduction*. CRC Press.
 - 6- Chen. L, Hu. Y, Wang. R, Li. X, Chen. Z, Hua. J, Osman. A. I, Farghali. M, Huang. L, Li. J, Liang. D, Rooney. D, Yap. P, 2023, Green building practices to integrate renewable energy in the construction sector: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(22). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01675-2>
 - 7- Climate Change and Population, 2021, Union of Concerned Scientists. <https://www.ucs.org/resources/climate-change-and-population>
 - 8- Fallah. Qalheri, Gholam. Abbas, Shakeri. Fahimeh, Asadi. Mehdi, Rezaei, Hassan, 2017, Identifying areas susceptible to wind power plant construction: Case study: Fars Province. *Environmental Research*, 8(15), 3-16.
 - 9- Filom. S, Radfar. S, Panahi. R, Amini. E, Neshat. M, 2021, Exploring Wind Energy Potential as a Driver of Sustainable Development in the Southern Coasts of Iran: The Importance of Wind Speed Statistical Distribution Model. *Sustainability*, 13(14), 7702. <https://doi.org/10.3390/su13147702>
 - 10- Filom. S, Radfar. S, Panahi. R, Amini. E, Neshat. M. 2021, Exploring Wind Energy Potential as a Driver of Sustainable Development in the Southern Coasts of Iran: The Importance of Wind Speed Statistical Distribution Model. *Sustainability*, 13(14), 7702. <https://doi.org/10.3390/su13147702>
 - 11- Galih. Bangga, 2024, Editorial: Climate change challenge-a wind energy perspective. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1448211>
 - 12- Gandokkar. Amir, 2009, Evaluation of Wind Energy Potential in Iran, *Journal of Geography and Environmental Planning*, (36th series), Winter No. 4
 - 13- H. Ward. Jr, 1963, "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function"
 - 14- Johnson. N. L, Kotz. S, Balakrishnan. N, 1995, *Continuous Univariate Distributions*, Volume 1. Wiley-Interscience
 - 15- Kocak. K, 2002, A method for determination of wind speed persistence and its application, *Energy*, 27(10), 967–973.

- 29- Xie, Y, Li, C, Li .M, Liu, F, Taukenova. M2, 2023, An overview of deterministic and probabilistic forecasting methods of wind energy. *IScience*, 26(1), 105804. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105804>
- 30- Zhang, D, et al (2019) Xu, Z., Li, C., Yang, R., Shahidehpour, M., Wu, Q., & Yan, M. (2019). Economic and sustainability promises of wind energy considering the impacts of climate change and vulnerabilities to extreme conditions. *The Electricity Journal*, 32(6), 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.05.013>.
- energy, including turbine performance characteristics
- 28- Wang, J, Azam. W, 2023, Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757. *Sciencedirect*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>