# مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری AHP و VIKOR در سیستم اطلاعات مکانی (استان فارس)

**سید وحید رضوی ترمه**، دانشجوی دکتری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
**فرشته شنبه پور مادوان***، دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۸

## چکیده

استفاده از نیروگاه‌های بادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید انرژی برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر قلمداد می‌شود. اثرات مخرب زیست‌محیطی کم نسبت به سایر روش‌ها و قابلیت بهره‌برداری در سطح گسترده از جمله مزایای استفاده از انرژی باد در تولید برق است. در این راستا یافتن مکان بهینه برای استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود و بالقوه ضروری است. هدف از تحقیق حاضر مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان فارس با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و رتبه‌بندی گزینه‌های مکانی با استفاده از روش ویکور (Vikor) می‌باشد. در این مطالعه سعی شده تا با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل ویکور مکان مناسب برای نیروگاه‌های بادی بر مبنای معیارهای مؤثر فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی- اجتماعی در امر مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی اولویت‌بندی شوند. ابتدا داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری و در محیط GIS آماده گردید و سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی بین معیارها مقایسات زوجی و سپس وزن‌دهی انجام گرفته و در نهایت با استفاده از روش ویکور بین مکان‌های نهایی اولویت‌بندی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از بین معیارهای مطرح در پژوهش، معیارهای فنی (تندی باد، پایداری باد و چگالی باد)، دارای اهمیت بیشتری بوده و وزن بیشتری (۰/۷۳۱) را به خود اختصاص داده است و تندی باد با وزن (۰/۵۹۴) مهم‌ترین عامل تأثیرگذار است. در ادامه نتایج حاصل از مدل ویکور نشان داد که مناطق شمالی و شرقی استان از پتانسیل خوبی برای استفاده از انرژی باد برخوردار است. شهرستان‌های آباده، اقلید و نی‌ریز نسبت به دیگر نقاط استان مکان‌های مناسبی جهت احداث نیروگاه بادی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه بادی، سیستم اطلاعات مکانی، تحلیل سلسله‌مراتبی، روش ویکور

# Site Selection of Wind Power Plants Using AHP and Vikor Decision Making Methods in Geographic Information System GIS (Fars Province)

**Seyed Vahid Razavi Termeh**, Ph.D. in GIS, K.N.Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran.
**Fereshteh Shanbehpoor Madovan**, Ph.D. in geography and urban planning, shahid Chamran University of Ahvaz., Iran.

**Abstract:** The use of wind power plants is considered as one of the most important ways of generating electricity using renewable energies. The environmental impact of the environment is low compared to other methods and the potential for extensive exploitation, including the benefits of using wind energy in electricity production. In this regard, it is necessary to find the optimal location for deploying equipment and facilities to exploit existing and potential potentials. The purpose of this research is wind power plants site selection in Fars province using AHP and ranking the spatial options using the Vikor method. In this study, we tried to prioritize the location of wind power plants based on effective technical, environmental and socioeconomic measures using the AHP decision making model. At first, the required data were collected and prepared in the GIS environment. Then, using AHP method, the two criteria were compared and then weighted, and finally, using the Vikor method, the priority was drawn between the final locations. The results of this research show that among the criteria in the research, the technical criteria (wind speed, wind stability and wind density) are more important and have a higher weight (0.731), and the wind speed 0.594) is the most important factor. The results of the Vikor model showed that the northern and eastern regions of the Fars province have a good potential for wind energy. Abadeh, Eqlid and Neyriz are the right places to build a wind power plant in other parts of the province.

**Key words**: Wind power, GIS, AHP, Vikor method

**نویسنده مسئول:** فرشته شنبه پور مادوان، دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه شهید چمران اهواز vafashanbepoor@yahoo.com

## ۱- مقدمه و بیان مسئله

گستردگی نیاز انسان به منابع انرژی همواره از مسائل مهم و اساسی محسوب می‌شود. تلاش برای دستیابی به یک منبع انرژی پایان‌ناپذیر از آرزوهای دیرینه انسان بوده است. منابع انرژی فسیلی روزی به اتمام خواهند رسید و با اتمام انرژی‌های فسیلی غیر قابل تجدید، تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد و نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت (اسدی و جهانبخش، ۱۳۹۴: ۹۶). امروزه انرژی‌های نو به‌رغم ناشناخته ماندن، به‌سرعت در حال گسترش و نفوذ است و غفلت از آن، غیرقابل‌جبران خواهد بود. انرژی خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده، زیست‌گاز و انرژی‌های زمین‌گرمایی از عمده‌ترین منابع انرژی‌های پاک به شمار می‌آید (حاجیلو و جلوخانی نیارکی، ۱۳۹۵: ۷۴). یکی از بهترین راه‌های تأمین انرژی موردنیاز، انرژی بادی است که از طریق نصب توربین‌های بادی استحصال می‌شود. توسعه سریع در فنآوری‌های استحصال انرژی باد آن را به جایگزین مطمئنی به جای سیستم‌های انرژی امروزه تبدیل ساخته است بسیاری از کشورها به دلیل نصب راحت و راه‌اندازی سریع توربین‌های بادی و هزینه‌های کم به استحصال این نوع انرژی روی آورده‌اند (طباطبایی و امیری، ۱۳۹۴: ۲). انرژی باد از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر است که به علت گستردگی، قدرت بازدهی بالا، اقتصادی بودن و اینکه در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر در ابعاد وسیع‌تری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، عملاً از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (مرشدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۸). نیروگاه‌های بادی با توجه به هزینه‌ی پایین تولید برق و همچنین سازگاری با محیط‌زیست از جمله منابع انرژی پرطرفدار بوده و در چند سال گذشته رشد بسیار خوبی داشته است (عبادزاده‌حور و همکاران، ۱۳۹۷: ۱). کشور ایران با توجه به وسعت زیاد، وجود آب و هوای متنوع، کوه‌های مرتفع، دشتهای پهناور و سواحل طوالنی، مناطق باد خیز فراوانی دارد و از این منظر رتبه اول را در بین کشورهای منطقه داراست. ایران همگام با پیشرفت جهانی از سال ۱۳۷۳ با نصب توربینهای بادی با ظرفیت ۵۵۰ کیلووات به باشگاه کشورهای صاحب فناوری تولید برق از جریان باد پیوست. اما هنوز با مقدار ۵۵۰ مگاواتی با پتانسیل توان تولیدی کشور، فاصله بسیار زیادی داریم. برای رسیدن به هدف مدنظر باید مناطق دارای پتانسیل بال شناسایی و معرفی شود (رعنایی و همکاران: ۲). بررسی ۱۰ ساله وزش باد در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور نشان‌دهنده وجود توان تولید برق بادی در بسیاری از نواحی کشور به‌ویژه در فصل تابستان است (Khanjarpanah et al., 2019 ؛گندم‌کار، ۱۳۸۷: ۸۷). تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان می‌دهد که تنها در ۲۶ منطقه از کشور میزان ظرفیت اسمی با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳ ٪ در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می‌باشد ضمن آنکه با برنامه‌ریزی مناسب دستیابی به توان ۱۰ گیگاوات نیز امکان‌پذیر می‌باشد، اما مجموع ظرفیت‌های نصب‌شده تاکنون کمتر از ۲ درصد میزان تخمین پتانسیل باد در سطح کشور است (علم‌الهدی، ۱۳۸۹: ۶۱). گام اول و اساسی برای توسعه‌ی انرژی‌های نوین، مطالعه‌ی دقیق پتانسیل‌های مربوطه می‌باشد (Dutra & Szklo, 2008, 2507; Bina et al., 2018 ). در مرحله دوم یافتن مکان بهینه برای استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود و بالقوه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. فرآیند مکان‌یابی را می‌توان شامل مراحل شناخت، تهیه داده‌های مورد نیاز، تعیین فاکتورهای تأثیرگذار، شناخت دقیق از محدوده مطالعاتی، گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، تهیه نقشه، تلفیق نقشه‌ها و تهیه نقشه‌های خروجی دانست (Pamučar et al., 2017 ؛پاکزاد و اسلامی، ۱۳۹۶: ۴۹). وجود فاکتورهای متعدد در مکان‌یابی محل نیروگاه‌های بادی، لزوم به‌کارگیری سیستمی که علاوه بر دقت بالا ازنظر سرعت عمل و سهولت انجام عملیات در حد بالایی قرار داشته باشد را ضروری می‌سازد. امروزه سیستم‌های اطلاعات مکانی در تلفیق با مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به‌طور گسترده قابلیت به‌کارگیری در برنامه‌ریزی‌های محیط زیستی و مباحث مربوط به مکان‌یابی را دارا می‌باشند (مینائی، ۱۳۸۸: ۱۱).

در ادامه به بررسی کارهای صورت گرفته در این زمینه، مواد و روش‌ها و در نهایت به نتایج حاصل از ترکیب این دو روش پرداخته می‌شود.

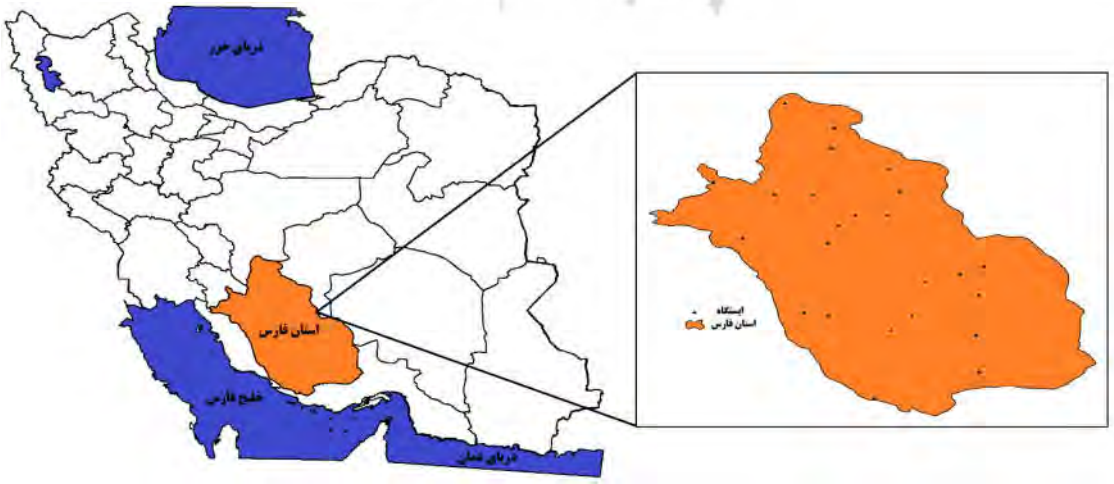
بنئویی و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در کشور تایلند با ترکیب GIS و مدل تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله‌مراتبی با در نظر دادن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی، بزرگراه‌ها، مناطق راهبُردی، رودخانه‌ها و کانال‌ها، مناطق مستعد برای نصب توربین‌های بادی بزرگ را شناسایی کردند. آیدین و همکاران (۲۰۱۰)، از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و منطق فازی و با استفاده از معیارهای پتانسیل باد، فاصله از شهرهای بزرگ، رودخانه، شهرک، فرودگاه، مناطق حفاظت‌شده و سکونتگاه پرنده‌ها و فاکتور آلودگی صوتی، مناطق مناسب برای نیروگاه‌های بادی به‌منظور بهره‌گیری در برنامه‌ریزی فضایی را تعیین نمودند. سلیز و همکاران (۲۰۱۰)، در لهستان اقدام به ارزیابی پراکنش پتانسیل باد با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با در نظر گرفتن سه معیار اقتصادی، اکولوژیکی و فنی نمودند. ایشان با در نظر گرفتن عواملی چون ارتفاع، مناطق شهری، پهنه‌های آبی، مناطق جنگلی، مناطق حفاظت‌شده، شیب، راه‌های ارتباطی، شبکه انتقال نیرو مناطق، پهنه‌های مناسب برای سرمایه‌گذاری در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی را مشخص نمودند. عبدی و همکاران (۱۳۹۰)، در پژوهش خود به امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی در مراوه‌تپه استان گلستان ازلحاظ فنی و اقتصادی پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان می‌دهد که درصورتی‌که روند مطالعات امکان‌سنجی قبل از احداث نیروگاه‌های بادی از طریق میکروسایتینگ به‌صورت صحیح انجام پذیرد، بیشتر مشکلات کنونی در رابطه با مرحله احداث نیروگاه بادی مرتفع می‌گردد. جعفری و همکاران (۱۳۹۲)، برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل از تلفیق دو مدل تحلیل شبکه و دیمتل استفاده کرده و نتایج حاصل از این دو روش را با یکدیگر مقایسه کردند. در تحقیق‌های پیشین، رتبه‌بندی گزینه‌های نهایی جهت احداث نیروگاه بادی انجام‌نشده است. از نوآوری‌های تحقیق حاضر رتبه‌بندی بین گزینه‌های مکانی توسط روش ویکور است.

هدف از این تحقیق مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان فارس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و رتبه‌بندی گزینه‌های مکانی با استفاده از روش ویکور بود که این مناطق در قالب نقشه تهیه شد.

## ۳- داده‌ها و روش‌ها

### ۳- ۱- منطقه موردمطالعه

منطقه مورد مطالعه، استان فارس واقع در جنوب غربی کشور ایران است که مساحت این استان ۱۲۲۶۰۸ کیلومترمربع است. این منطقه بین عرض‌های ۲۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی از خط استوا و طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. ارتفاع بیشینه و کمینه منطقه موردمطالعه، ۳۰۴۵ و ۲۷۳ متر می‌باشد. منطقه موردمطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.




شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

## ۳-۲- روش تحقیق

پردازش و تحلیل داده‌ها در این پژوهش با توجه به معیارهای سه‌گانه اقتصادی، فنی و محیطی صورت گرفته است. داده‌های مربوط به معیار فنی از داده‌های ۲۶ ایستگاه هواشناسی استان فارس در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۳ تهیه شد. نقشه معیارهای اقتصادی اجتماعی از منابع طبیعی استان فارس در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. معیارهای ارتفاع و شیب از تصاویر ماهواره‌ای استر با دقت ۳۰ متر تهیه گردید. پس از آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی بر اساس روند نما (شکل۲)، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی جهت وزن‌دهی هر یک از شاخص‌های اصلی و زیر شاخص‌ها استفاده می‌گردد. در روش‌های مذکور ابتدا با استفاده ازنظر کارشناسان و متخصصین مقایسه زوجی هرکدام از معیارها و زیر معیارها در نرم‌افزار Expert Choice مشخص می‌شود و جهت رتبه‌بندی بین گزینه‌های مکانی نهایی از روش ویکور در نرم افزار متلب استفاده می‌گردد. معیارهای در نظر گرفته‌شده جهت این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل (۲): ساختار پژوهش

## ۴- یافته‌های تحقیق

در مرحله‌ی اول پس از تعیین معیارهای مکان‌یابی، لایه‌ی مکانی مربوط به هر یک از معیارها ایجادشده و هم‌پوشانی لایه‌ها صورت می‌گیرد و مناطق دارای محدودیت نیز مشخص می‌شود. سپس از روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی بین معیارهای موردنظر صورت گرفته و ده مکان نهایی جهت احداث نیروگاه بادی مشخص می‌گردد. در نهایت با استفاده از روش ویکور رتبه‌بندی بین ده گزینه مکانی انجام می‌گردد.

### ۴-۱- معیارهای موردنظر در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی

همان‌طور که اشاره شد معیارهای مکان‌یابی برای احداث توربین‌های بادی به سه دسته فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی اجتماعی تقسیم می‌گردد. معیارهای فنی به سه زیر معیار سرعت باد، پیوستگی و چگالی باد تقسیم می‌گردد، تندی باد به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای تولید انرژی باد توسط توربین‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن سرعت باد در

استان از داده‌های ماهیانه هواشناسی و میانگین سرعت باد در ایستگاه‌های همدید استان و ایستگاه‌های هم‌جوار استفاده‌شده است. برای تبدیل این مقادیر به‌دست‌آمده که در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌گردد به ارتفاع ۵۰ متری که معمولاً توربین‌های بادی در این ارتفاع قرار می‌گیرد از رابطه۱۰ استفاده شده است:

$$\frac{V}{V_{ref}} = \left(\frac{Z}{Z_{ref}}\right)^{\alpha} \quad [۱۰]$$

در این رابطه $V$ سرعت باد در ارتفاع $Z$ بالای سطح زمین (سرعت باد در ارتفاع موردنظر)، $V_{ref}$ سرعت باد در ارتفاع $Z_{ref}$ یا ارتفاعی است که اندازه‌گیری صورت گرفته است (ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین) و $\alpha$ تابع مربوط به زبری یا ناهمواری زمین است. یکی دیگر از زیر معیارهای فنی پیوستگی و تداوم باد است. با توجه به اهمیت این موضوع در میزان تولید انرژی از رابطه ۱۱ درصد تغییرپذیری باد به دست می‌آید. در این رابطه $cv$ درصد تغییرپذیری، $\sigma$ معیار داده‌ها و $X$ میانگین داده‌ها می‌باشد.

$$cv = \frac{\sigma}{X} * 100 \quad [۱۱]$$

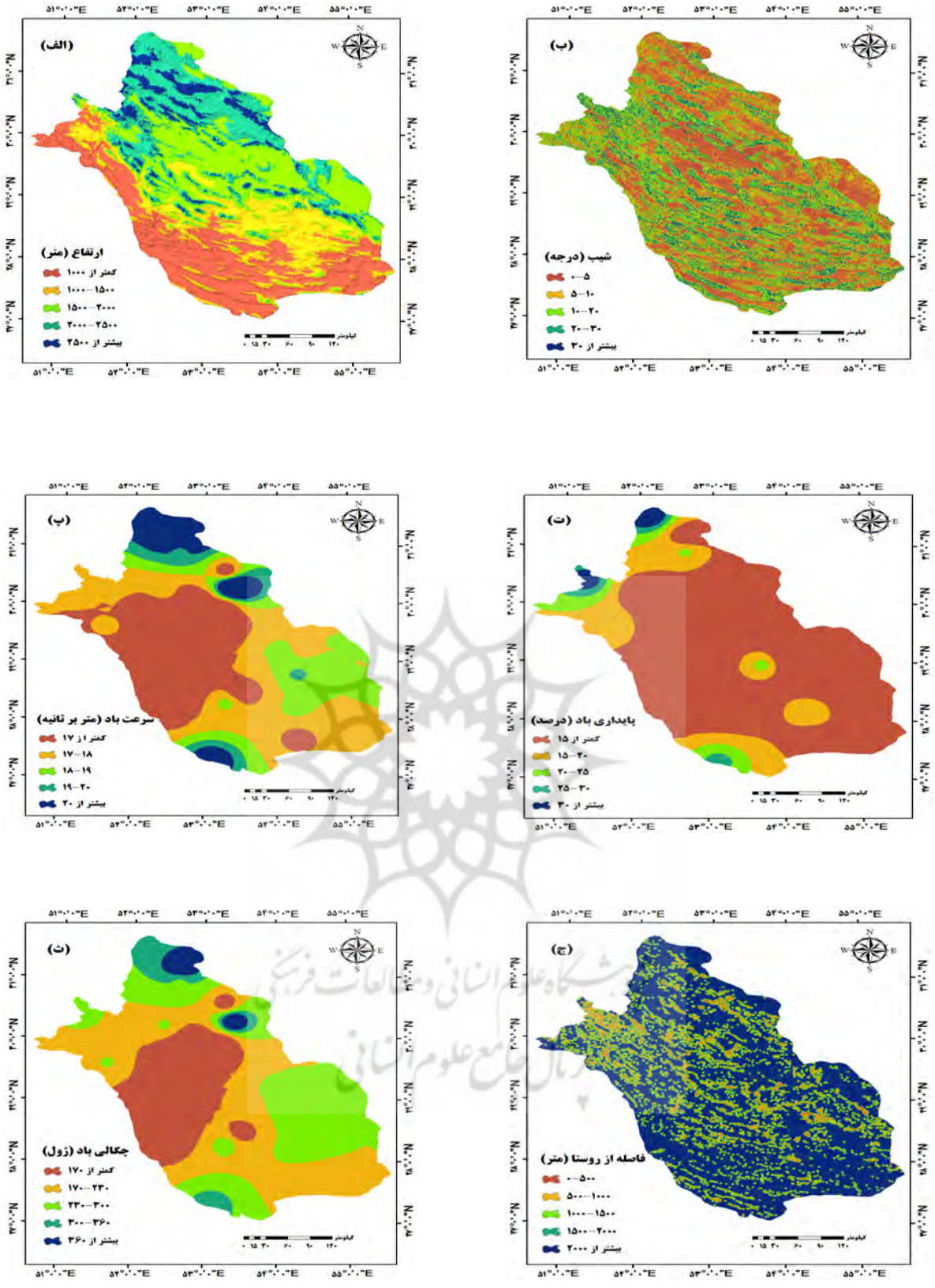
چگالی باد بر روی میزان استحصال انرژی بسیار تأثیرگذار است. چگالی توان باد بر واحد سطح (به دانسیته هوا) در شرایط استاندارد سطح دریا $\rho$=۱/۲۲۵ $Kg/m^3$ بستگی دارد و از رابطه ۱۲ به دست می‌آید. در این رابطه $\rho$ چگالی هوا، v سرعت باد، A مساحت سطح و T زمان موردنظر است.

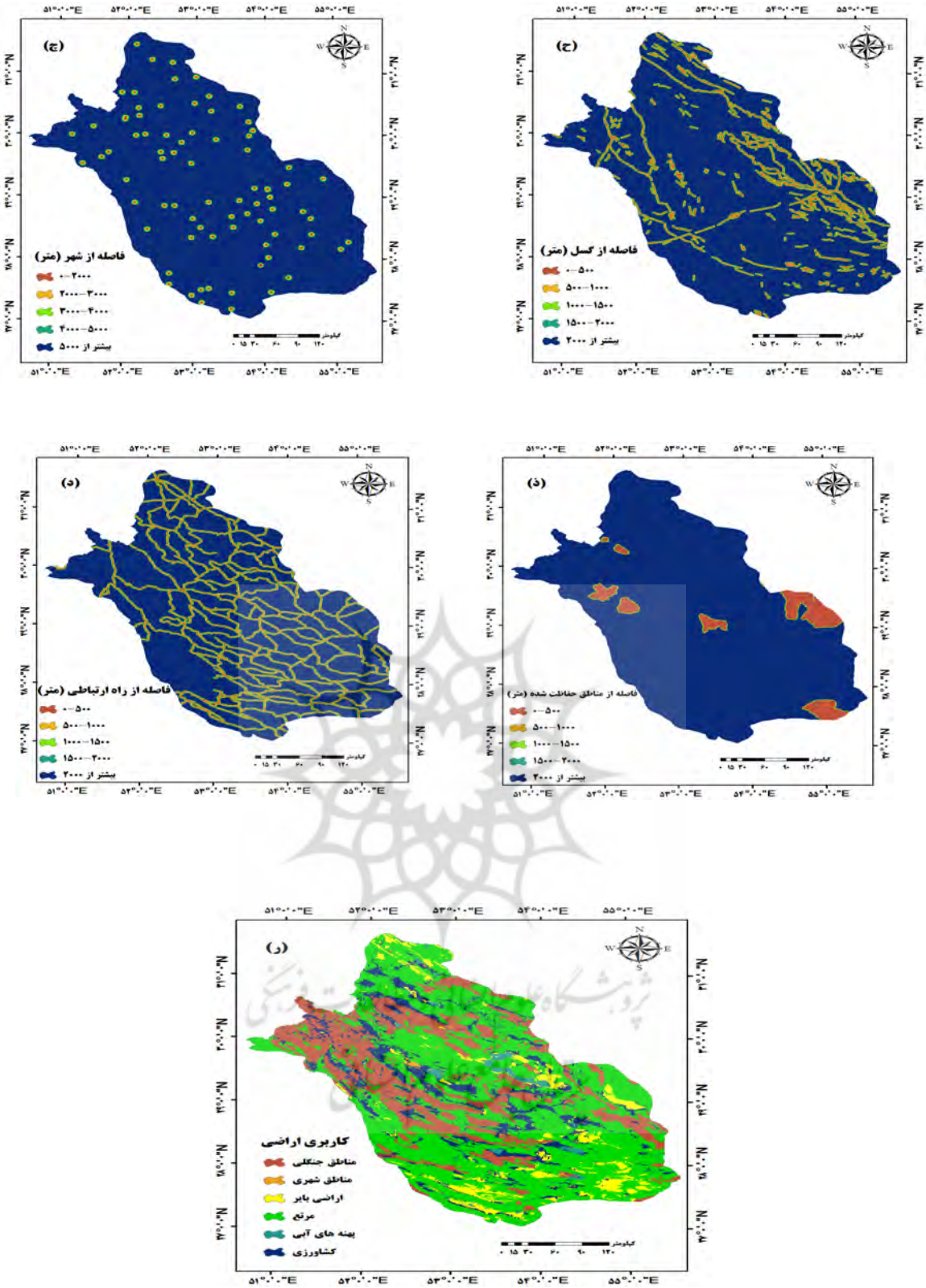
$$W = 0/5\ \rho\ v^3 AT \quad [۱۲]$$

معیار محیطی شامل زیر معیار ارتفاع، شیب، فاصله از گسل‌ها، فاصله از رودخانه‌ها و فاصله از مناطق حفاظت‌شده است. ارتفاع و شیب مستقیماً بر روی میزان انرژی تولیدی تأثیرگذار هستند. ارتفاع زیاد باعث دسترسی سخت به این مناطق می‌شود و همچنین شیب زیاد در میزان استفاده از باد تأثیرگذار است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۲). فاصله از مناطق حفاظت‌شده و رودخانه‌ها ازلحاظ زیست‌محیطی برای ایجاد نیروگاه بادی حائز اهمیت هستند. فاصله از خطوط گسل و رودخانه‌ها حداقل ۵۰۰ متر می‌باشد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۴). معیارهای اقتصادی اجتماعی شامل زیر معیارهای فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از مناطق روستایی و فاصله از مناطق شهری و همچنین پوشش اراضی می‌باشد. شهرها و مناطق جمعیتی با جمعیت زیاد ممکن است به جهات ایمنی، سروصدا و منظره تحت تأثیر مزارع بادی قرار گیرند. ازنظر بین‌المللی سیاست کاهش تأثیرات دیداری توربین‌های بادی بر این مناطق به دلیل تأثیر بر جمعیت بیشتر در شهرها نسبت به مناطق روستایی ارجحیت دارد لذا مطالعات مختلف نشان داده است که مزارع بادی حداقل باید ۲۰۰۰ متر از شهرها و ۵۰۰ متر از مراکز جمعیتی فاصله داشته باشد. همچنین فاصله از راه‌های ارتباطی نیز باید حداقل ۵۰۰ متر باشد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۴). تمامی معیارها در نرم افزار ArcGIS 10.3 آماده گردید. این معیارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۴-۲- وزن‌دهی به روش تحلیل سلسله مراتبی

جهت وزن‌دهی به معیارهای اصلی و زیر معیارها از روش وزن-دهی تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده می‌کنیم. به منظور مقایسات زوجی بین معیارها، از نظرات ۲۰ کارشناس در تخصص های محیط زیست، انرژی، منابع طبیعی و سامانه اطلاعات مکانی استفاده گردید و مقایسات زوجی برمبنای میانگین نظرات این کارشناسان صورت گرفت. مقایسه زوجی بین معیارها و وزن‌دهی آن‌ها در نرم‌افزار Expert Choice انجام گرفت و این مقایسات در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج وزن‌های خروجی حاصل از معیارهای اصلی و زیر معیارها در جدول ۲ نشان داده شده است. و همچنین خروجی حاصل از نرم‌افزار Expert Choice به همراه نرخ ناسازگاری در شکل ۴ نشان داده شده است.


(الف)
ارتفاع (متر)
کمتر از ۱۰۰۰
۱۰۰۰-۱۵۰۰
۱۵۰۰-۲۰۰۰
۲۰۰۰-۲۵۰۰
بیشتر از ۲۵۰۰
(ب)
شیب (درجه)
کمتر از ۵
۵-۱۰
۱۰-۲۰
۲۰-۳۰
بیشتر از ۳۰
(پ)
سرعت باد (متر بر ثانیه)
کمتر از ۱۷
۱۷-۱۸
۱۸-۱۹
۱۹-۲۰
بیشتر از ۲۰
(ت)
پایداری باد (درصد)
کمتر از ۱۵
۱۵-۲۰
۲۰-۲۵
۲۵-۳۰
بیشتر از ۳۰
(ث)
چگالی باد (ژول)
کمتر از ۱۷۰
۱۷۰-۲۳۰
۲۳۰-۳۰۰
۳۰۰-۳۶۰
بیشتر از ۳۶۰
(ج)
فاصله از روستا (متر)
۰-۵۰۰
۵۰۰-۱۰۰۰
۱۰۰۰-۱۵۰۰
۱۵۰۰-۲۰۰۰
بیشتر از ۲۰۰۰



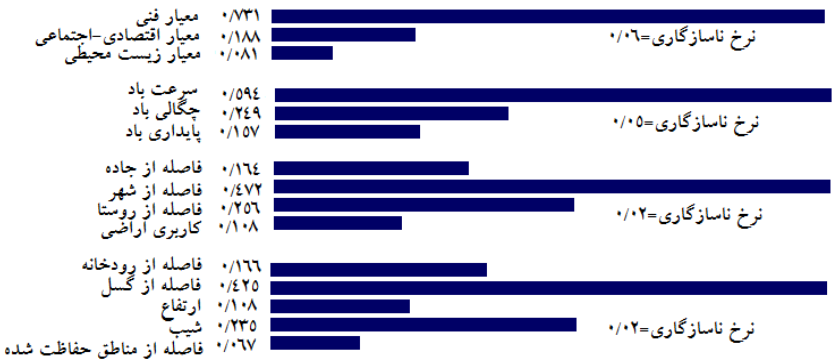

شکل (۳): لایه‌های اطلاعاتی الف) ارتفاع ب) شیب پ) تندی باد ت) پایداری باد ث) چگالی باد ج) فاصله از روستا چ) فاصله از شهر ح) فاصله از گسل د) فاصله از راه ارتباطی ذ) فاصله از مناطق حفاظت شده ر) اراضی

جدول (۱): مقایسات زوجی بین معیارها و زیر معیارها

| | زیرمعیارها | (۱) | (۲) | (۳) | (۴) | (۵) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| معیارهای اصلی | فنی (۱) | ۱ | ۵ | ۷ | – | – |
| | اقتصادی اجتماعی (۲) | ۰/۲ | ۱ | ۳ | – | – |
| | زیست محیطی (۳) | ۰/۱۴ | ۰/۳۳ | ۱ | – | – |
| اقتصادی اجتماعی | فاصله از جاده (۱) | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۵ | ۲ | – |
| | فاصله از نقاط شهری (۲) | ۳ | ۱ | ۲ | ۴ | – |
| | فاصله از نقاط روستایی (۳) | ۲ | ۰/۵ | ۱ | ۲ | – |
| | کاربری اراضی (۴) | ۰/۵ | ۰/۲۵ | ۰/۵ | ۱ | – |
| زیست محیطی | فاصله از رودخانه (۱) | ۱ | ۰/۳۳ | ۲ | ۰/۵ | ۳ |
| | فاصله از گسل (۲) | ۳ | ۱ | ۴ | ۲ | ۵ |
| | ارتفاع (۳) | ۰/۵ | ۰/۲۵ | ۱ | ۰/۵ | ۲ |
| | شیب (۴) | ۲ | ۰/۵ | ۲ | ۱ | ۳ |
| | فاصله از مناطق حفاظت‌شده (۵) | ۰/۳۳ | ۰/۲ | ۰/۵ | ۰/۳۳ | ۱ |
| فنی | تندی باد (۱) | ۱ | ۳ | ۳ | – | – |
| | چگالی باد (۲) | ۰/۳۳ | ۱ | ۲ | – | – |
| | پایداری باد (۳) | ۰/۳۳ | ۰/۵ | ۱ | – | – |

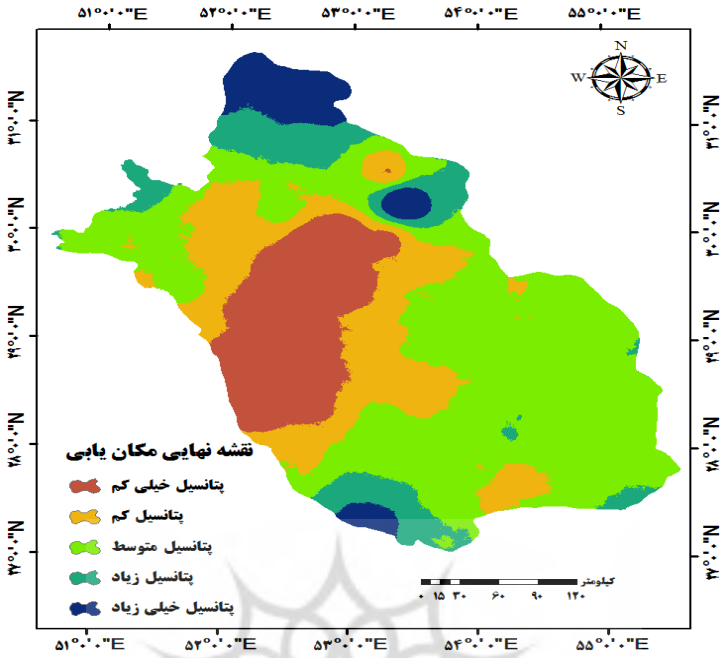
جدول (۲): وزن نهایی معیارها و زیر معیارها

| معیار | وزن | زیر معیار | وزن |
|---|---|---|---|
| فنی | ۰/۷۳۱ | تندی باد | ۰/۵۹۴ |
| | | پایداری باد | ۰/۱۵۷ |
| | | چگالی باد | ۰/۲۴۹ |
| اقتصادی-اجتماعی | ۰/۱۸۸ | فاصله از جاده | ۰/۱۶۴ |
| | | فاصله از نقاط شهری | ۰/۴۷۲ |
| | | فاصله از نقاط روستایی | ۰/۲۵۶ |
| | | کاربری اراضی | ۰/۱۰۸ |
| زیست‌محیطی | ۰/۰۸۱ | فاصله از گسل | ۰/۴۲۵ |
| | | فاصله از رودخانه | ۰/۱۶۶ |
| | | ارتفاع | ۰/۱۰۸ |
| | | فاصله از مناطق حفاظت‌شده | ۰/۰۶۷ |
| | | شیب | ۰/۲۳۵ |



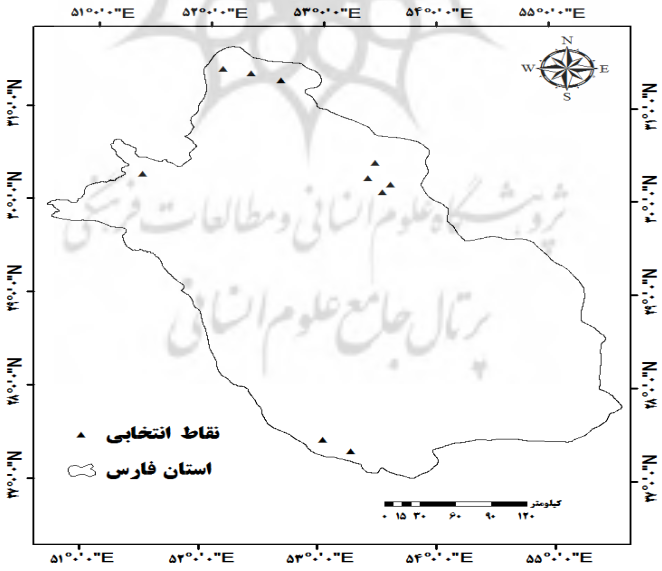

شکل (۴): وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها در نرم‌افزار Expert Choice

سرانجام پس از وزن‌دهی معیارها، لایه‌های موردنظر در وزن‌شان ضرب و در محیط GIS تلفیق می‌شوند. نقشه نهایی مکان‌یابی نیروگاه بادی در چهار طبقه نامناسب تا بسیار مناسب طبقه‌بندی گردیده است. نقشه نهایی مکان‌یابی در شکل ۵ نشان داده‌شده است.




شکل (۵): نقشه نهایی مکان‌یابی نیروگاه بادی

از بین مناطق مناسب و بسیار مناسب، ده نقطه به‌عنوان گزینه مکانی انتخاب می گردد که این نقاط در شکل ۶ نشان داده‌شده است.



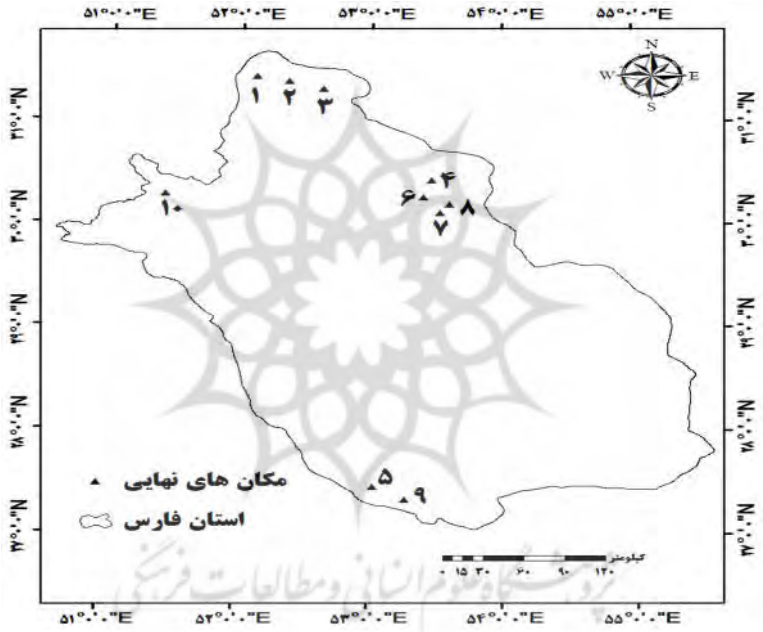

شکل (۶): ده مکان نهایی جهت رتبه‌بندی

و سرانجام با استفاده از روش ویکور بین ده مکان انتخاب‌شده، رتبه‌بندی انجام‌شده و ترتیب مکان‌ها مشخص می گردد. نتایج حاصل از این روش در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

جدول (۳): نتایج حاصل از روش ویکور

| رتبه‌بندی | Q | S | R | گزینه‌ها |
|---|---|---|---|---|
| ۴ | ۰/۴۹۷۷۳ | ۱/۳۸۶۱ | ۰/۴۷۲ | ۱ |
| ۶ | ۰/۶۱۶۵۹ | ۱/۶۷۵۲ | ۰/۴۷۲ | ۲ |
| ۳ | ۰/۳۷۲۹۷ | ۱/۲۵۱۸ | ۰/۴۲۵ | ۳ |
| ۲ | ۰/۳۱۹۵۳ | ۰/۹۵۲۶ | ۰/۴۷۲ | ۴ |
| ۱۰ | ۰/۸۱۹۵۳ | ۲/۱۶۸۹ | ۰/۴۷۲ | ۵ |
| ۸ | ۰/۷۳۷۲۸ | ۲/۱۳۸ | ۰/۴۲۵ | ۶ |
| ۷ | ۰/۶۹۰۴۵ | ۱/۸۵۴۹ | ۰/۴۷۲ | ۷ |
| ۵ | ۰/۵۶۴۸۳ | ۱/۵۴۹۴ | ۰/۴۷۲ | ۸ |
| ۱ | ۰/۱۸۹۹۹ | ۱/۴۱۴۸ | ۰/۲۵۶ | ۹ |
| ۹ | ۰/۷۶۰۲۷ | ۱/۵۸۵۸ | ۰/۵۹۴ | ۱۰ |

و سرانجام رتبه‌بندی بین ده گزینه مکانی انجام می‌گیرد و نتایج حاصل در شکل ۷ نشان داده شده است.




شکل (۷): رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

## نتیجه‌گیری

انرژی باد به دلیل فراوانی، اقتصادی بودن و قابلیت بهره‌برداری آسان در میان انرژی‌های نو از اقبال زیادی برخوردار هست. شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از این انرژی پاک مسئله‌ای است که نیاز به در نظر گرفتن عوامل بسیاری داشته که تجزیه و تحلیل را مشکل می‌سازد. با توسعه نگرش‌های زیست محیطی و راهبردهای صرفه‌جویانه در بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر، استفاده از انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی مطرح در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است. به دلیل به‌صرفه بودن استفاده از توربین‌های بادی در مقایسه با سایر منابع انرژی، استفاده از این منبع طبیعی را می‌توان یک انتخاب مناسب تلقی کرد. با توجه به گستردگی و پیچیدگی پارامترهای موثر در مکانیابی، ضرورت استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آن با سایر ابزار مدیریتی و برنامه‌ریزی مطرح می‌گردد. همچنین استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند نقش مهمی را در فرآیند مکانیابی این مناطق و تسریع در روند بهره‌برداری مناسب از انرژی بادی

در کشور ایفا نمایند. برای تحقق این اهداف، در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌های AHP و VIKOR در کنار سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی نواحی مستعد برای استقرار نیروگاه‌های بادی در استان فارس اقدام گردید و نقشه مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه‌های بادی تهیه شد. نقشه حاصله در چهار کلاس (نامناسب، متوسط، مناسب و بسیار مناسب) طبقه‌بندی گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از بین معیارهای مطرح در پژوهش، معیارهای فنی (سرعت باد، پایداری باد و چگالی باد)، دارای اهمیت بیشتری بوده و وزن بیشتری (۰/۷۳۱) را به خود اختصاص داده است و سرعت باد با وزن (۰/۵۹۴) مهم‌ترین عامل تأثیرگذار است. در ادامه نتایج حاصل از مدل ویکور نشان داد که مناطق شمالی و شرقی استان از پتانسیل خوبی برای استفاده از انرژی باد برخوردار است. شهرستان‌های آباده، اقلید و نی‌ریز نسبت به دیگر نقاط استان مکان‌های مناسبی جهت احداث نیروگاه بادی می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از دیگر روش‌های تصمیم‌گیری و یا روش‌های فازی جهت انتخاب مکان مناسب استفاده گردد.

## منابع


۱. اسدی، مهدی و سعید جهانبخش‌اصل (۱۳۹۴): «شناسایی مکان‌های مناسب احداث نیروگاه بادی در استان آذربایجان شرقی با روش فـازی»، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۱۰۹-۹۵.

۲. انتظاری، علیرضا. امیراحمدی، ابوالقاسم. عرفانی، عاطفه و اکرم برزویی (۱۳۹۱): «ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار»، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۳(۹): ۴۶-۳۳.

۳. پاکزاد، میعاد و علیرضا اسلامی (۱۳۹۶): «مکان‌یابی اراضی مستعد جهت توسعه کاشت گونهٔ کهور ایرانی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رحمت‌آباد استان کرمان)»، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۲): ۶۱-۴۸.

۴. تناکیان، ساناز. پیری صحراگرد، حسین و میثم امیری (۱۳۹۷): «مکانیابی مناطق برای ساخت نیروگاههای بادی به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت سیستان)»، مجله مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷(۱۹): ۱-۱۶۱.

۵. حاجیلو، فخرالدین و محمدرضا جلوخانی نیارکی (۱۳۹۵): «مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل ANP-OWA (مطالعه موردی: استان زنجان)»، علوم و فنون نقشه‌برداری، ۶(۱): ۸۶-۷۳.

۶. رعنایی، مجتبی. مرقبعی، نغمه و مصطفی کشتکار (۱۳۹۶): «مکان‌یابی نیروگاه بادی در استان قزوین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و روش تحلیل سلسله مراتبی و ادغام آن با منطق فازی»، زیست سپهر، ۱۲(۳): ۱۵-۱.

۷. طباطبایی، طیبه و فاضل امیری، فاضل (۱۳۹۴): «مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی بر اساس ارزیابی چندمعیاره مکانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: استان بوشهر)»، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۱): ۱۶-۱.

۸. عبادزاده حور، میترا. کیهانی‌نسب، فروغ و احمد فاضل (۱۳۹۷): «مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای ANPدر محیط GIS (مطالعه‌ی موردی: استان اردبیل)»، مهندسی بیوسیستم ایران، انتشار آنلاین از تاریخ ۷ مرداد ۱۳۹۷.

۹. عبدی، حمید. حسین‌زاده خنکداری، تقی. ذاکری‌فر، رزم‌آرا. عباسیه کهن، سیدحسن و سیدابراهیم هاشمی پنبه چوله (۱۳۹۰): «امکان سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه تپه»، نشریه انرژی ایران، ۱۴(۳۷): ۲۲-۲.

۱۰. عزیزی، علی. جعفری، حمیدرضا. ملک‌محمدی، بهرام و فرامرز خوش‌اخلاق (۱۳۹۴): «مکانیابی نیروگاههای بادی با استفاده از مدلهای تحلیل سلسله مراتب فازی و تحلیل شبکه در استان اردبیل»، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۴(۳۴): ۱۹۴-۱۷۴.

۱۱. جعفری، حمیدرضا. عزیزی، علی. نصیری، حسین و سپیده عابدی (۱۳۹۲): «تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاههای بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی و SAW در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)»، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۵(۲): ۴۱-۲۳.

۱۲. علم الهدی، سید حمزه (۱۳۸۹): «انرژی باد، سفیر امید»، نشریه علمی، آموزشی و پژوهشی صنعت نفت، گاز و پتروشیمی، ۱(۴): ۶۷-۶۱.

۱۳. گندم کار، امیر (۱۳۸۸): «ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۰(۴۶): ۱۰۰-۸۵.

۱۴. مرشدی، جعفر. برنا، رضا. اصغری‌پور، اسماء. احمدی، هدی و زینب ظاهری (۱۳۸۹): «مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (تحلیل سلسله مراتبی) در محیط GIS»، مجله کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برنامه-ریزی فصلنامه، ۱(۲): ۱۱۱-۹۷.

۱۵. مینائی، مسعود (۱۳۸۸): «پیاده‌سازی مدل آمایشی کشاورزی با استفاده از منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (منطقه مورد مطالعه فریدون‌شهر)»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ۱۴۶ صفحه.

16. Aydin N, Kentel E, Duzgun S. (2010). GIS based environmental assessment of wind energy systems for spatia planning: A case study from Western Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 364–373

17. Bennui A, Rattanamanee P, Puetpaiboon U. (2007). SITE SELECTION FOR LARGE WIND TURBINE USING GIS, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment (ICEE-2007)

18. Bina, S. M., Jalilinasrabady, S., Fujii, H., & Farabi-Asl, H. (2018). A comprehensive approach for wind power plant potential assessment, application to northwestern Iran. *Energy, 164*, 344-358.

19. Dutra R, Szklo A. (2008). Assessing long-teem incentive programs for implementing wind power in Brazil using GIS-based methods, Renewable Energy, 33(12): 2507–2515.

20. Khanjarpanah, H., & Jabbarzadeh, A. (2019). Sustainable wind plant location optimization using fuzzy cross-efficiency data envelopment analysis. *Energy, 170*, 1004-1018.

21. Pamučar, D., Gigović, L., Bajić, Z., & Janošević, M. (2017). Location selection for wind farms using GIS multi-criteria hybrid model: An approach based on fuzzy and rough numbers. *Sustainability, 9*(8), 1315.

22. Saaty T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. " McGraw-Hill, New York, NY, 437.

23. Saaty T.L. (1990). "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process, " European Journal of Operational Research, North-Holland 48: 9-26.

24. Sener S, Sener E, and Karagüzel R.. (2010). "Solid Waste Disposal Site Selection With GIS and AHP Methodology: A Case Study in Senirkent–Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey, "Springer Science+Business Media B.V., Environ Monit Assess 173: 533–554.

25. Sliz-Szkliniarza B, Vogta J. (2010). GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential,Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 1696–1707

26. Wei J, Lin X. (2008). The Multiple Attributed Decision- Making Vikor Method and Its Application, IEEE.

27. Ying X, Guang-Ming Z, Gui-Qiu C, Lin T, Ke-Lin, W. and Dao-You H. (2007). "Combining AHP with GIS in Synthetic Evaluation of Eco-environment Quality—A Case Study of Hunan Province, China, "Ecological Modeling, 209(2–4): 97–109.