

## پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی در استان اصفهان با استفاده از روش فازی ای اچ پی

غلام عباس فلاح قاله‌ری<sup>۱</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۳</sup>، مهدی اسدی<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۰۵/۱۵

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۱۲/۲۵

### چکیده:

محدودیت ذخایر انرژی فسیلی، بشر را برای جایگزین کردن منابع انرژی جدید به چالش کشانده است. در این بین، باد به عنوان یکی از مظاهر انرژی‌های نو از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. استان اصفهان با توجه به وضعیت توپوگرافی و موقعیت نسبی خود، از مناسب‌ترین مکان‌ها برای احداث نیروگاه بادی می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در استان اصفهان، معیارهای مختلفی مد نظر قرار گرفت و فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار Expert choice پداده‌سازی گردید. برای فازی‌سازی معیارها، داده‌ها وارد نرم‌افزار IDRISI گردیده و براساس نظرات کارشناسی، نقاط کنترل و نوع تابع فازی برای هر یک از لایه‌ها مشخص گردید. سپس از نرم‌افزار Arc GIS، به منظور همپوشانی لایه‌ها استفاده شد و در نهایت، استان اصفهان از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم گردید.

### کلمات کلیدی:

نیروگاه بادی، تحلیل سلسله مراتبی، مکان‌یابی، منطق فازی، پتانسیل سنجی

## مقدمه

نگرانی های موجود بحران انرژی از یک سو و اثرات زیست محیطی انرژی تجدیدناپذیر؛ دولت‌ها را تحریک نموده تا برای اجرای سیاست های مختلف افزایش ظرفیت انرژی تجدید پذیر اقدام نمایند (نوری و همکاران، ۲۰۱۵). در میان انرژی های تجدید پذیر، انرژی باد به عنوان یک منبع پیشرو انرژی های تجدید پذیر در مقایسه با انرژی های بیوماس، خورشیدی، زمین گرمایی تلقی می گردد [۱۹]. چرا که فناوری های تولید برق در حال حاضر متکی بر انرژی های غیر قابل تجدید پذیر (به عنوان مثال زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و اورانیوم) هستند و پیش بینی شده است که تا ۱۰۰ سال آینده این منابع تهی خواهند شد [۳۸، ۳۲، ۲۶]. از سوی دیگر، هزینه رو به افزایش سوخت های فعلی می باشد، به طوری که بر اساس آخرین برآورد های بین المللی، متوسط قیمت خرده فروشی بنزین در مناطق مختلف جهان بین آوریل ۱۹۹۳ تا آوریل ۲۰۱۲ میلادی به ازای هر گالن ۱/۰۷ تا ۴ دلار افزایش یافته است [۳۸]. ادامه روند فعلی تولید انرژی در جهان منجر به افزایش آلودگی هوا، افزایش گاز های گلخانه ای (GHG) خواهد شد. با این حال، امضا کنندگان کنوانسیون تغییر آب و هوایی در آفریقای جنوبی (۲۰۱۰) و فرانسه (۲۰۱۶) بیش از هر چیز به جایگزینی منابع انرژی اشاره داشته اند که بایسته است در گام ابتدایی اقدام به شناسایی منابع بهینه گردد. لذا انرژی بادی به عنوان یک منبع انرژی جایگزین مناسب برای تولید برق با هدف کاهش اثرات مضر تولید فعلی برق می تواند تضمین کننده امنیت انرژی پایدار در آینده نزدیک باشد [۳۳]. گستردگی نیاز انسان به منابع انرژی همواره از مسائل مهم و اساسی محسوب می شود. تلاش برای دستیابی به یک منبع انرژی پایان ناپذیر از آرزوهای دیرینه انسان بوده است [۱]. کلیه منابع انرژی فسیلی روزی به اتمام خواهند رسید [۹] و با اتمام انرژی های فسیلی تجدیدناپذیر، تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد و نیاز به انرژی های تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت [۷]. از طرف دیگر، مصرف منابع با انرژی فسیلی، مشکلات و هزینه های مادی و زیست محیطی خاص خود را در پی دارد [۳]. استفاده از انرژی اتمی نیز صرف نظر از پیامدهای شدید زیست محیطی نظیر زباله های اتمی و غیره، هزینه بالا و فناوری پیشرفته ای را می طلبد [۷]. این مساله سبب شده تا بشر همواره در پی منابع انرژی نو جهت جایگزینی دو منبع انرژی مذکور باشد، منابعی که نه تنها ارزان قیمت و قابل دسترس باشد، بلکه مصرف آنها آلودگی چندانی به بار نیاورد [۷]. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می توان به پتانسیل سنجی مناطق مختلف برای احداث نیروگاه بادی و استفاده از این انرژی تجدیدپذیر پرداخت. در این راستا، مرجع [۳۱] توسعه نصب مزارع بادی در تایلند را به وسیله سیستم حمایتی تصمیم گیری GIS بررسی کرده و وضعیت فعلی و نتایج آن را مورد ارزیابی قرار داد. از تحلیل حاضر، پس از بکار بردن محدودیت های انتخاب شده، درصد کل مساحت محتمل برای نصب نیروگاه بادی با توجه به کل مساحت در هر منطقه محاسبه گردید. مرجع [۴۲] امکان سنجی اقتصادی انرژی باد را در قاهره مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش، برای این منظور از داده های نیم ساعته سرعت باد در سراسر سال ۲۰۰۹ استفاده شده است و محاسبات آشکار کرد که هر چند منابع انرژی باد در قاهره ضعیف است، اما در صورت مهار انرژی آن می تواند به تامین برق مورد نیاز

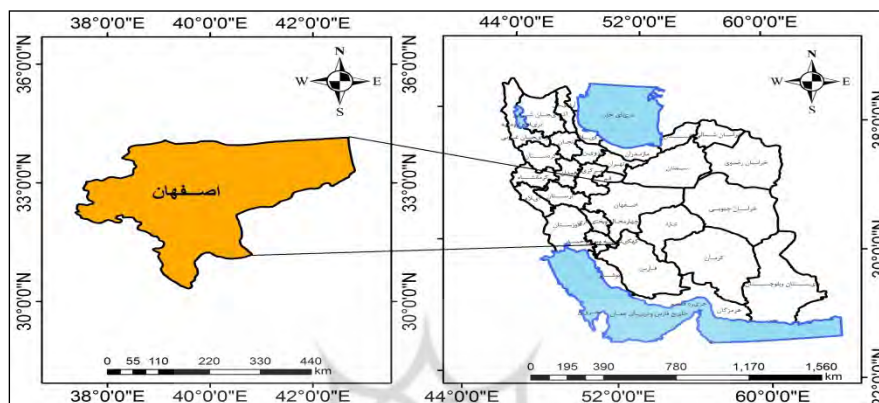
صنعت‌گران کمک کند. مرجع [۲۸] ارزیابی از چگالی برق بادی بدست آمده از چندین تابع چگالی سرعت باد را در مالزی انجام دادند، براساس نقشه متوسط تراکم توان برق در مالزی چندین منطقه مانند شمال شرق، شمال غرب، منطقه‌ی جنوب از سواحل مالزی و منطقه جنوب صباح را به عنوان مناطقی مشخص شد که نشان می‌دهد بهترین مناطق برای توسعه انرژی بادی است. مرجع [۲۳] به ارزیابی پتانسیل اقتصادی تولید برق از انرژی باد در اتریش پرداخت. نتایج پژوهش حاکی از این امر بوده است که به رغم اینکه برخی از نواحی کوهستانی این کشور توان بالایی برای تولید برق از انرژی بادی داشته‌اند، ولی در شرایط فعلی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و پیشنهاد شده که مناطق حاشیه‌ای شهری و صنعتی به عنوان جایگاه جایگزین مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی پتانسیل ۱۲ منطقه در هیمالیای غربی کشور هند پژوهشی است که توسط مرجع [۲۰] با استفاده از روش فاکتور الگویی انرژی باد (WEPF<sup>۱</sup>) انجام شده است و نتایج آن نشان داده که توربین‌ها در مقیاس خرد و وسیع بهترین نتیجه را برای تولید انرژی برق خواهند داشت. مرجع [۱۴] در پژوهشی به تجزیه و تحلیل توزیع باد و توان بالقوه تولید برق در مناطق ساحلی آفریقای جنوبی پرداخته و از ۵ مکان پیشنهادی برای تولید برق سایت شماره ۵ در ارتفاع ۶۰ متری سطح زمین بیش‌ترین توان در تولید برق را داشته و سالانه با توان ۲۲۱۶/۲۹ مگاوات توان تولید داشته است. مرجع [۳] امکان‌سنجی انرژی باد در منطقه سبزوار را در پایان‌نامه خود مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، بعد از انجام محاسبات، مشخص شد که انرژی حاصل از تولید یک توربین بادی در منطقه سبزوار ۴۴۳ مگاوات است. در این تحقیق، سعی بر این است در استان اصفهان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش Fuzzy-AHP به مکان‌یابی و شناسایی مناطق مستعد برای احداث نیروگاه‌های بادی پرداخته شود و توان منطقه در تولید انرژی الکتریسیته مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### - مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر در مرکز فلات ایران، تقریباً جزو مناطق کوهپایه‌ای ایران محسوب می‌گردد. این استان با مساحتی حدود ۱۰۷/۰۲۷ کیلومتر مربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد. این استان از شمال به استان مرکزی، قم و سمنان، از جنوب به استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد، از غرب به استان‌های لرستان، خوزستان و چهارمحال و بختیاری و از شرق به استان یزد محدود است.

1) Wind Energy Pattern Factor



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور (مأخذ: نامبردگان).

#### مواد و روش

در مکان‌یابی نیروگاه بادی، به عنوان یک مساله تصمیم‌گیری به مواد و ابزار خاص این موضوع نیاز می‌باشد. در این تحقیق، از آمار ۲۰ ساله اقلیمی استان اصفهان و برای تجزیه و تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های زیر معیارهای اقلیمی (سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار، دما)، جغرافیایی (ارتفاع، شیب)، اقتصادی-اجتماعی (راههای ارتباطی، شهرها، روستا)، زیست‌محیطی (مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی، رودخانه) و زمین‌شناسی (کانون‌های زلزله، گسل) از نرم‌افزار Arc GIS9.3 استفاده گردید. برای تهیه این نقشه‌ها از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است. به منظور بررسی کاربری اراضی از تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره لندست<sup>۱</sup> مربوط به سال ۲۰۰۸ استفاده گردید و برای تحلیل و تفسیر اطلاعات آن از نرم‌افزار ENVI4.8 بهره گرفته شد. سپس برای سازی معیارها و زیرمعیارها از نرم‌افزار IDRISI و به منظور انجام تحلیل سلسله مراتبی و وزن‌دهی به لایه‌ها از نرم‌افزار Expert choice استفاده گردید. در نهایت برای تولید نقشه نهایی داده‌ها از قابلیت‌های همپوشانی در نرم‌افزار Arc GIS9.3 بهره گرفته شد.

#### فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۲</sup>

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری برای زمانی است که تصمیم‌گیرنده دارای معیارهای چندگانه باشد [۳۲]. زیرا تحلیل گران یا تصمیم‌گیرندگان را جهت سازماندهی مسائل حساس و حیاتی یاری می‌نماید [۱۶]. فرایند تحلیل سلسله مراتبی با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر تصمیم‌گیری شروع می‌شود. این عناصر شامل اهداف، معیارها و گزینه‌های احتمالی است که در اولویت‌بندی به کار گرفته می‌شوند. در این فرایند، شناسایی عناصر و

1) Landsat

2) Analytic Hierarchy Process

ارتباط بین آنها منجر به ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی می‌شود. دلیل سلسله مراتبی بودن، به دلیل ساختار خلاصه‌سازی عناصر تصمیم‌گیری همچون زنجیری در سطوح مختلف است. بنابراین، ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی از موضوع مورد بررسی، نخستین گام در فرایند تحلیل سلسله مراتبی به شمار می‌رود و اهداف، معیارها و گزینه‌ها و نیز ارتباط آنها در همین ساختار نشان داده می‌شود. مراحل بعد در فرایند تحلیل سلسله مراتبی شامل محاسبه وزن (ضرایب اهمیت) معیارها و زیر معیارها، محاسبه ضریب اهمیت (وزن) گزینه‌ها، محاسبه نهایی گزینه‌ها و بررسی سازگاری منطقی قضاوت‌هاست [۲۶]، [۲۷]، [۲۸].

#### تعیین اهمیت ضریب معیارها و زیر معیارها

در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، برتری بین گزینه‌ها به وسیله مقایسه جفتی بین آنها تعیین می‌شود. در مقایسه جفتی روال کار چنین است که برای بررسی دو گزینه یکی از آنها را در نظر گرفته و بوسیله آن ارجحیت یا اهمیت دو گزینه را نسبت به هم می‌سنجند [۳۱]. در این فرایند از اعداد ۱ تا ۹ به عنوان یک مقیاس استاندارد مشخص کردن اهمیت گزینه‌ها (از اهمیت مساوی تا اهمیت فوق العاده زیاد) نسبت به هم استفاده می‌شود جدول (۱). در ماتریس مقایسه جفتی، عدد ۹ نشاندهنده اهمیت فوق العاده زیاد یک معیار نسبت به دیگری است و عدد ۱/۹ نشاندهنده ارزش فوق العاده پایین یک معیار نسبت به معیار دیگر و ارزش عددی ۱ نیز نشاندهنده اهمیت‌ها برابر می‌باشد [29]، [21].

جدول (۱) مقیاس ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه جفتی. [۱۷]، [۱۸]

امتیاز	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی	در تحقق هدف، دو معیار اهمیت مساوی دارند
۳	اهمیت اندکی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که برای تحقق هدف اهمیت I بیشتر از J است.
۵	اهمیت بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت I خیلی بیشتر از J است.
۷	اهمیت خیلی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت I خیلی بیشتر از J است.
۹	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی بیشتر نسبت به به طور قطعی به اثبات رسیده است
۲،۴،۶،۸	مقادیر متوسط بین دو قضاوت مجاور	هنگامی که حالت‌های میانه وجود دارد

#### نرخ سازگاری

یکی از مزیت‌های فرایند سلسله مراتبی این است که میزان سازگاری مقایسه‌های انجام شده را مشخص می‌کند. این نرخ نشان می‌دهد که تا چه اندازه می‌توان به اولویت‌های حاصل از اعضای گروه یا اولویت‌های جدول‌های ترکیبی اعتماد

کرد. تجربه نشان داده است که اگر نرخ سازگاری (C.R.) کمتر از ۰/۱۰ باشد، می‌توان سازگاری مقایسه‌ها را پذیرفت، در غیر این صورت باید مقایسه‌ها مجدداً انجام گیرد. [۲۴]، [۱۵]. نرخ سازگاری به روش ذیل قابل محاسبه می‌باشد [۲۰].

$$C.R. = C.I. / R. \quad (۱)$$

$$C.I. = \lambda \text{Max-n} / n-1 \quad (۲)$$

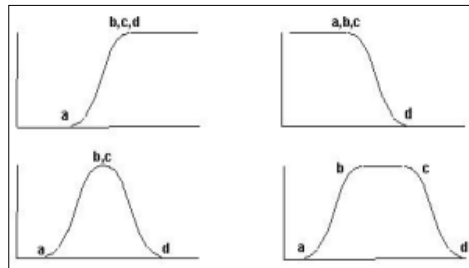
در دو رابطه فوق n تعداد معیارها و R شاخص سازگاری تصادفی است.

### مدل فازی

نظریه مجموعه‌های فازی و منطق فازی به عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل‌سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم قطعیت موجود در فرایندهای شناختی انسانی، ابزارهای بسیارکارآمد و مفیدی به شمار می‌رود [۲۲]. این نظریه نخستین بار توسط پرفسور لطفی‌زاده دانشمند ایرانی الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد [۲]. نظریه مجموعه فازی، روشی است که قضاوت‌های فردی و مبهم در مورد یک پدیده منحصر بفرد را وارد مدل‌های احتمالی یا ریاضی می‌نماید [۱۱].

### فازی سازی زیرمعیارها

این نظریه قادر است به بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سیستم‌های نادقیق (فازی) و مبهم، صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد [۱۲]. بر خلاف منطق کلاسیک که دارای دو ارزش صفر و یک است، منطق فازی ارزش‌های خود را به صورت درصد عضویت در بازه (۰،۱) نشان می‌دهد. عدد ۱ نشان‌دهنده درجه عضویت کامل است [۳۴]. در روش استاندارد سازی فازی، برای ارزش‌گذاری مقادیر معمولاً از توابع عضویت مختلفی چون توابع Linear, J-Shape و Sigmoidal استفاده می‌شود [۱۳]، [۱۹]. علاوه بر این توابع، کاربر می‌تواند با توجه به نیاز خود، تابع نیز تعریف نماید شکل‌های (۲ تا ۴). یکی دیگر از عوامل موثر در استانداردسازی نقشه‌های فازی، تعیین حد آستانه می‌باشد که به آنها نقاط کنترل می‌گویند. اما نکته‌ای که بایستی در انتخاب تابع به آن توجه نمود، نوع کاهشی یا افزایشی بودن معیار مورد نظر می‌باشد. در اینجا، منظور از کاهش، حداقل شونده یا نزولی بودن تابع می‌باشد [۶].

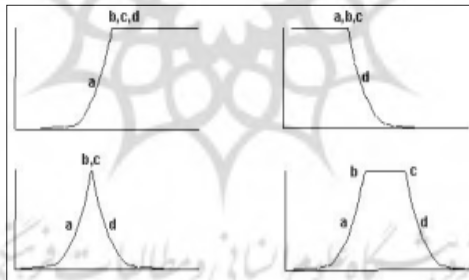


شکل ۲) تابع عضویت Sigmoidal [۱۳].

تابع عضویت Sigmoidal از رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۳].

$$a = (x-a) / (b-a) * p_1 / 2 \tag{۳}$$

if  $x \rightarrow \mu = 1$

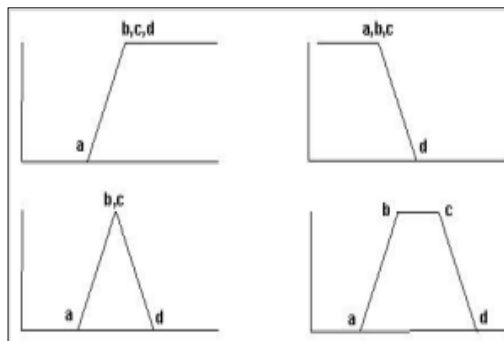


شکل ۳) تابع عضویت J-shape [۱۳].

تابع عضویت J-shape از رابطه (۴) به دست می‌آید [۵]، [۸].

$$\mu = 1 / (1 + ((x-a) / (b-a))^2) \tag{۴}$$

If  $z > \rightarrow \mu = 1$



شکل ۴) تابع عضویت Linear [۱۳].

## نتایج

برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان اصفهان ابتدا باید معیارهای موثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی شناخته شود که در این تحقیق، ۵ معیار اقلیمی، جغرافیایی، اجتماعی-اقتصادی، زیست محیطی و زمین‌شناسی انتخاب شدند که بعد از وزن‌دهی به روش AHP در نرم‌افزار Expert Choice برای تجزیه و تحلیل وارد نرم‌افزار ARC GIS گردید. سپس برای فازی سازی معیارها از نرم‌افزار ADRISI اسفاده گردید.

### نتایج حاصل از اختصاص وزن به معیارها و زیرمعیارها

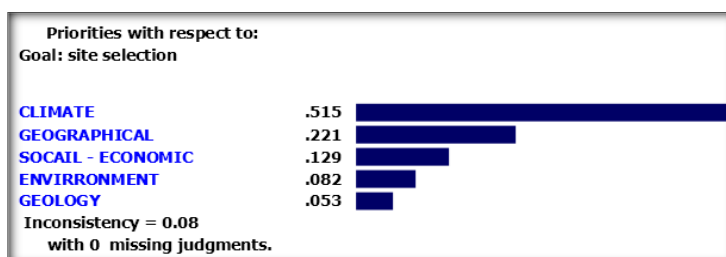
در این تحقیق، این وزن‌ها با توجه به اهمیت معیارها و زیرمعیارها در مقابل یکدیگر، نسبت به هدف "مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی" تعیین شده است. ابتدا معیارهای لایه‌های اصلی با یکدیگر مقایسه می‌شوند که این مقایسه‌ها بر اساس جدول ۹ کمیته‌ی ساعتی انجام شده است (جدول ۱). ارجحیت یک گزینه یا عامل نسبت به خودش مساوی با ۱ است، لذا اصل معکوس بودن یک عامل نسبت به دیگری و ارجحیت ۱ برای یک عامل دیگر یا گزینه نسبت به خودش، دو خاصیت اصلی ماتریس مقایسه‌ای دو به دویی در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی هستند. این دو خاصیت باعث می‌شود که برای مقایسه n معیار یا گزینه، تصمیم‌گیرنده تنها به  $\frac{n(n-1)}{2}$  سؤال پاسخ دهد. جداول (۲ الی ۷) مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارهای موثر در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی را نشان می‌دهد و شکل‌های ۵ الی ۱۰ وزن‌های محاسبه شده معیارها و زیرمعیارها را در نرم‌افزار Expert Choice نشان می‌دهد.

در جدول (۲) از بین معیارهای موثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی، معیار اقلیمی و زمین‌شناسی با بیشترین و کمترین تاثیر به ترتیب اثرگذار است. این در حالی است که از بین معیارهای تاثیرگذار عامل جغرافیایی در رده دوم اهمیت و با وزن ۰/۲۲۱ می‌باشد. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که ضریب سازگاری مقایسه زوجی معیارها در نرم‌افزار Expert Choice کمتر از ۰/۱ می‌باشد که نشان از دقت بالای وزن‌دهی معیارها می‌باشد.

جدول ۲) مقایسه زوجی معیارهای اصلی در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی

وزن	زمین‌شناسی	زیست محیطی	اقتصادی - اجتماعی	جغرافیایی	اقلیمی	معیارهای موثر در پتانسیل‌سنجی
۰/۵۱۵	۶	۶	۶	۳	۱	اقلیمی
۰/۲۲۱	۳	۳	۳	۱	-	جغرافیایی
۰/۱۳۹	۳	۳	۱	-	-	اقتصادی - اجتماعی
۰/۰۸۲	۳	۱	-	-	-	زیست محیطی
۰/۰۵۳	۱	-	-	-	-	زمین‌شناسی





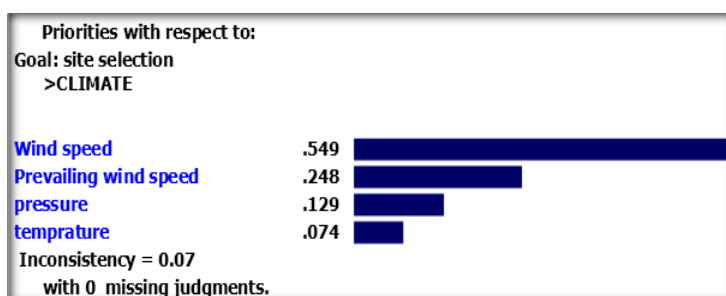
شکل ۵) وزن‌های محاسبه شده معیارها در نرم‌افزار Expert Choice

### زیر معیار اقلیمی

سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما جزو زیر معیارهای معیار اقلیمی می‌باشند. در بررسی جدول (۳) که مقایسه زوجی معیار اقلیمی در آن انجام گرفته، سرعت باد بیشترین وزن (۰/۵۴۹) و دما کمترین وزن (۰/۰۷۴) را به خود اختصاص داده است. در اینجا، با توجه به اینکه سرعت باد اصلی‌ترین عامل در مکان‌یابی نیروگاه بادی می‌باشد، وزن بیشتری به خود اختصاص داده است و شکل (۶) نمودار وزن‌های محاسبه شده در نرم‌افزار Expert choice را نشان می‌دهد که در آن نیز میزان نرخ سازگاری مقایسه زوجی بین معیارها ۰/۰۷ می‌باشد که بیان‌کننده دقت وزن‌دهی معیارها می‌باشد.

جدول (۳) مقایسه زوجی زیر معیارهای در نظر گرفته شده در معیار اقلیمی در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی

وزن	دما	فشار	سرعت باد غالب	سرعت باد	زیر معیارهای اقلیمی
۰/۵۴۹	۵	۵	۳	۱	سرعت باد
۰/۲۴۸	۳	۳	۱	-	سرعت باد غالب
۰/۱۲۹	۳	۱	-	-	فشار
۰/۰۷۴	۱	-	-	-	دما



شکل ۶) وزن محاسبه شده زیر معیارهای اقلیمی در نرم‌افزار Expert Choice

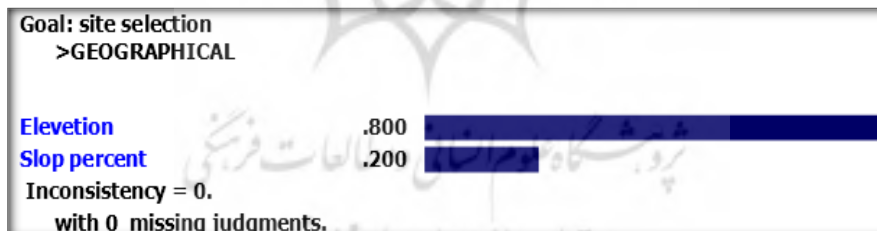
### زیر معیارهای جغرافیایی

زیر معیارهای جغرافیایی شامل ارتفاع از سطح دریا و شیب می‌باشد. شکل (۷) نمودار وزن‌های محاسبه شده در نرم‌افزار Expert choice را نشان می‌دهد که ضریب یا نرخ سازگاری در آن صفر می‌باشد بنابراین، وزن‌دهی این عامل نیز با دقت انجام یافته است. در جدول (۴) که نشان‌دهنده مقایسه زوجی زیر معیارهای جغرافیایی می‌باشد معیار ارتفاع از سطح دریا، با توجه به اینکه ارتفاع هر چه کمتر باشد، در نتیجه حمل تجهیزات توربین به منطقه آسانتر خواهد شد و لذا از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود، وزن (۰/۸۰۰) بیشتری نسبت به شیب (۰/۲۰۰) به خود اختصاص داده است.

#### جدول (۴) مقایسه زوجی زیر معیارهای در نظر گرفته شده در معیار جغرافیایی

##### در پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی

وزن	شیب	ارتفاع از سطح دریا	زیر معیارهای جغرافیایی
۰/۸۰۰	۴	۱	ارتفاع از سطح دریا
۰/۲۰۰	۱	-	شیب



شکل (۷) وزن محاسبه شده زیر معیارهای جغرافیایی در نرم‌افزار Expert Choice

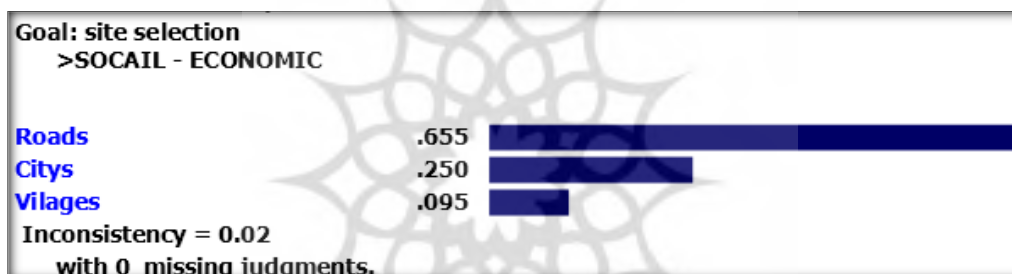
### زیر معیارهای اقتصادی-اجتماعی

زیر معیارهای اقتصادی-اجتماعی شامل فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از شهرها و فاصله از روستاها می‌باشد. جدول (۵) مقایسه زوجی معیار، اجتماعی-اقتصادی را نشان می‌دهد. در این جدول، براساس نظرات کارشناسی راه‌های ارتباطی وزن (۰/۰۶۵۵) بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند، چرا که نیروگاه بادی با قرار گرفتن در فاصله مناسب از راه‌های ارتباطی هم از لحاظ اقتصادی به صرفه خواهد بود (نیازی به احداث راه‌های ارتباطی جدید نخواهد بود) و هم از لحاظ زیبایی شناسی جلوه خاصی به منطقه قرارگیری نیروگاه خواهد بخشید و از طرف دیگر، باعث کاهش خطرات ناشی از کنده شدن پرها در کناره جاده‌ها خواهد شد که می‌تواند صدمات شدیدی را به وسایل نقلیه وارد نماید. شکل (۸) نشان‌دهنده مقایسه زوجی زیر معیار اجتماعی-اقتصادی است که ضریب سازگاری ۰/۰۲ در آن به معنای دقت بالای مقایسه‌های انجام یافته در بین زیر معیارهای معیار اجتماعی-اقتصادی می‌باشد.

## جدول ۵) مقایسه زوجی زیر معیارهای در نظر گرفته شده در معیار اقتصادی-اجتماعی

## در پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی

وزن	فاصله از روستا	فاصله از شهرها	فاصله از راه‌های ارتباطی	زیر معیارهای اقتصادی - اجتماعی
۰/۶۵۵	۶	۳	۱	فاصله از راه‌های ارتباطی
۰/۲۵۰	۳	۱	-	فاصله از شهرها
۰/۰۹۵	۱	-	-	فاصله از روستا



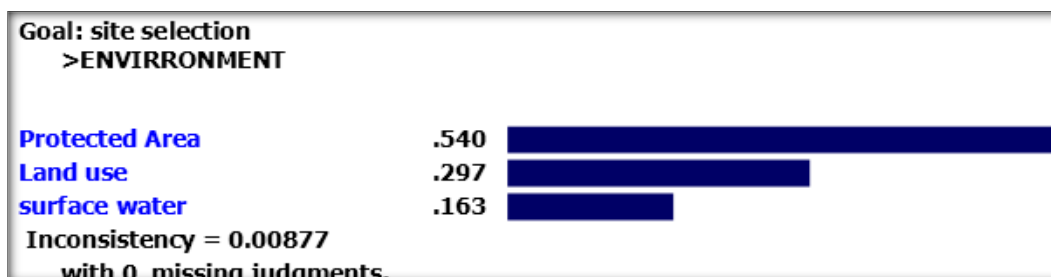
شکل ۸) وزن محاسبه شده زیر معیارهای معیار اقتصادی-اجتماعی در نرم‌افزار Expert Choice

## زیر معیارهای زیست محیطی

زیر معیارهای معیار زیست محیطی نیز شامل فاصله از مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه‌ها می‌باشد. در جدول (۶) مقایسه زوجی زیر معیارهای معیار زیست محیطی انجام گرفت که فاصله مناطق حفاظت شده با توجه به اینکه اکثراً محل زندگی گونه‌های نادر گیاهی و جانوری می‌باشد، با احداث نیروگاه در این مکان باعث وارد آمدن لطمات شدید به محیط زیست و از بین رفت گونه‌های گیاهی و جانوری نادر خواهد شد. لذا براساس نظرات کارشناسان، فاصله از مناطق حفاظت شده وزن (۰/۵۴۰) بیشتری را به خود اختصاص داد. در شکل (۹) وزن‌های محاسبه شده زیر معیارهای معیار زیست محیطی در نرم‌افزار Expert choice با ضریب سازگاری ۰/۰۰۸۷۷ که نزدیک به صفر است ارائه گردیده است و نشانگر دقت بسیار بالای مقایسه‌های زوجی انجام یافته می‌باشد.

## جدول ۶) مقایسه زوجی زیر معیارهای معیار زیست محیطی

وزن	فاصله از رودخانه‌ها	کاربری اراضی	فاصله از مناطق حفاظت شده	زیر معیارهای زیست محیطی
۰/۵۴۰	۳	۲	۱	فاصله از مناطق حفاظت شده
۰/۲۹۷	۲	۱	-	کاربری اراضی
۰/۱۶۳	۱	-	-	فاصله از رودخانه‌ها



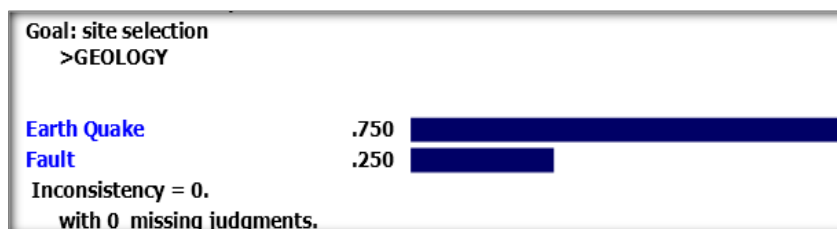
شکل ۹) وزن‌های محاسبه شده زیر معیارهای معیار زیست محیطی در نرم‌افزار Expert Choice

#### زیرمعیار زمین‌شناسی

در تعیین زیر معیارهای زمین‌شناسی، فاصله از کانون‌های زلزله و فاصله از گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که در جدول (۷) مقایسه زوجی زیر معیارهای معیار زمین‌شناسی در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی ارائه گردیده است که در آن فاصله از کانون‌های زلزله براساس نظرت کارشناسان وزن  $0.750/0.250$  نسبت به معیار فاصله از گسل‌ها داد، چرا که احداث نیروگاه بادی در مناطق زلزله‌خیز باعث آسیب دیدن توربین‌های بادی و کاهش توان استحصال از توربین‌ها خواهد شد. شکل (۱۰) وزن محاسبه شده زیر معیارهای زمین‌شناسی را در نرم‌افزار Expert Choice نشان می‌دهد که در این مورد نیز ضریب سازگاری صفر شد و مقایسه زوجی معیارها با دقت بالا انجام گرفت.

جدول ۷) مقایسه زوجی زیر معیارهای معیار زمین‌شناسی در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی

وزن	فاصله از گسل‌ها	فاصله از کانون‌های زلزله	زیر معیارهای زمین‌شناسی
۰/۷۵۰	۳	۱	فاصله از کانون‌های زلزله
۰/۲۵۰	۱	-	فاصله از گسل‌ها



شکل ۱۰) وزن محاسبه شده زیر معیارهای زمین‌شناسی در نرم‌افزار Expert Choice

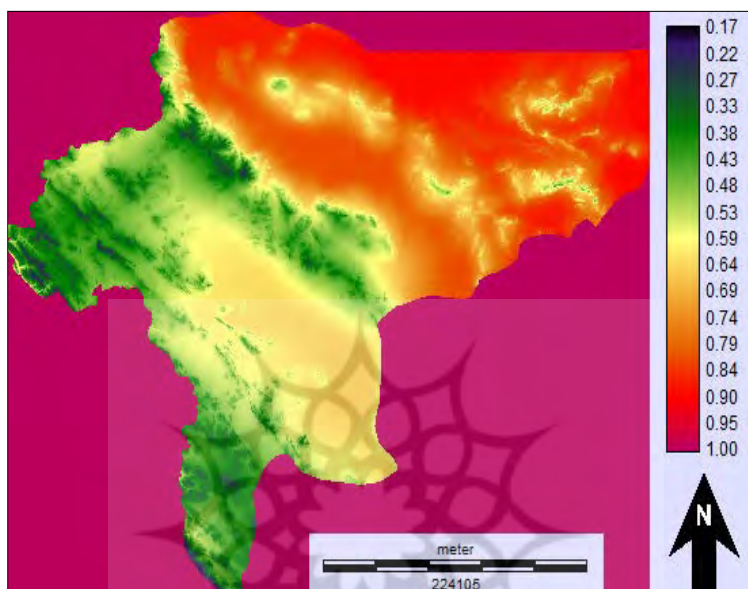
#### نتایج حاصل از استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی

در این تحقیق، زیرمعیارهای موثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی براساس جدول (۸)، با در نظر گرفتن توابع فازی و انواع آن و نیز نقاط کنترل معرفی شده از سوی کارشناسان مختلف و تحقیقات پیشین، فازی‌سازی و استاندارد

شده‌اند. به طوری که در رابطه با شیب، هر چه شیب زمین کمتر باشد، برای احداث نیروگاه بادی مناسب‌تر خواهد بود یا در رابطه با ارتفاع، هر چه ارتفاع کمتر باشد، حمل تجهیزات به محل نیروگاه آسانتر شده و شرایط برای احداث نیروگاه از لحاظ اقتصادی با صرفه‌تر خواهد بود. در نتیجه، در این موارد تابع کاهش استفاده می‌شود، در اینجا با توجه به اینکه نوع تابع فازی کاهش می‌باشد، پس زمینه نقشه به صورت خودکار با رنگ زرشکی تعریف می‌شود شکل (۱۱)، اما در سایر موارد نوع تابع فازی براساس نظرات کارشناسی افزایشی تعریف شد. جدول (۸) مقادیر آستانه و نوع تابع فازی جهت استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی را نشان می‌دهد.

جدول (۸) حد آستانه و نوع تابع فازی جهت استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی [۱۴]، [۳۰]، [۶]

ردیف	نام معیار	نقاط کنترل		نوع تابع فازی	نام تابع فازی
		A یا C	B یا D		
۱	سرعت باد (نات)	۳	۱۰	افزایشی	Linear
۲	سرعت باد غالب (نات)	۷	۱۴	افزایشی	Linear
۳	فشار (هکتوپاسکال)	۸۳۱	۹۳۱	افزایشی	Linear
۴	دما (سانتیگراد)	۹	۱۶	افزایشی	Linear
۵	ارتفاع (متر)	۰	۲۰۰۰	کاهشی	J-Shape
۶	شیب (درصد)	۰	۱۵	کاهشی	J-Shape
۷	راه ارتباطی (متر)	۱۰۰۰	۶۰۰۰	افزایشی-کاهشی	Near
۸	شهر (متر)	۲۰۰۰	۶۰۰۰	افزایشی	Linear
۹	روستا (متر)	۱۰۰۰	۴۰۰۰	افزایشی	Linear
۱۰	مناطق حفاظت شده (متر)	۲۰۰۰	۴۰۰۰	افزایشی	J-Shape
۱۱	کاربری اراضی (متر)	۲۰۰۰	۴۰۰۰	افزایشی	Linear
۱۲	رودخانه (متر)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	افزایشی	Linear
۱۳	گسل (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	افزایشی	Linear
۱۴	نقاط لغزشی (متر)	۵۰۰	۱۵۰۰	افزایشی	Linear



شکل ۱۱) نقشه فازی سازی شده لایه ارتفاع در نرم افزار IDRISI

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

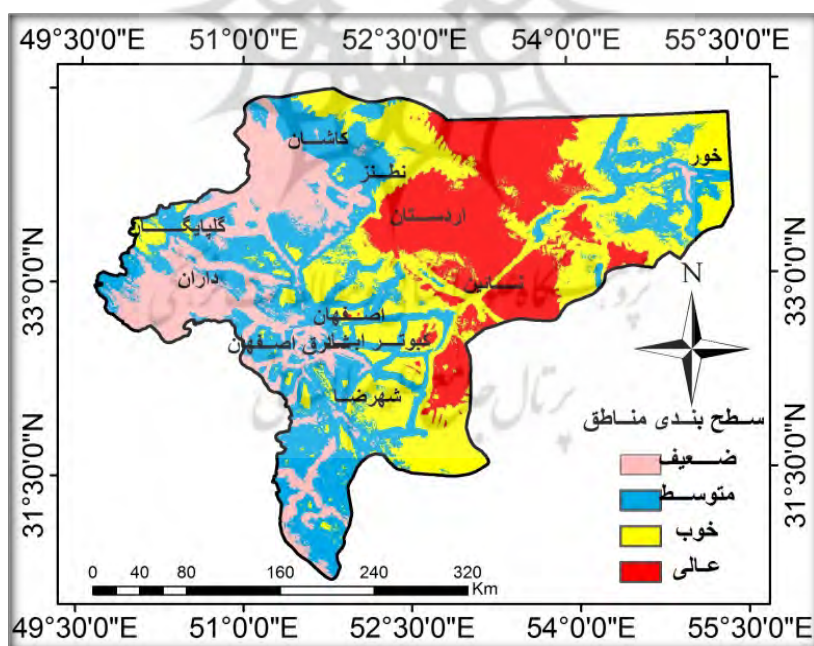
طبیعت منطقه در واقع، بهترین راهنمای انتخاب سایت توربین‌های بادی است. بنابراین، در مکان‌یابی سایت توربین‌های بادی بایستی از وجود بادهای غالب و همیشگی مطمئن بود و در طول مسیر جهت این بادهای نیز کمترین مانع وجود داشته باشد. علاوه، جهت، سرعت باد غالب و تداوم آن نیز از عوامل بسیار مهم تلقی می‌شوند. علاوه بر این، تپه‌های وسیع، مسطح و تقریباً گرد، مناسب‌ترین محل نصب توربین‌های بادی هستند.

با استفاده از مدل AHP و منطق فازی و با توجه به نقشه نهایی، مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه بادی در سطح استان اصفهان شناسایی شدند. نتایج بدست آمده نشانگر پتانسیل بالای شهرهای شهرهای اردستان، نائین، جنوب شرق اصفهان، اطراف خور و غرب گلپایگان برای احداث مزارع بادی می‌باشند شکل (۱۲). این مناطق با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل مانند سرعت باد، سرعت باد غالب، وسعت، محدودیت و ... تعیین شده‌اند. در این تحقیق، از بین معیارهای اقلیمی، جغرافیایی، زیست‌محیطی، اقتصادی - اجتماعی و زمین‌شناسی، معیارهای اقلیمی و جغرافیایی شامل سرعت باد، سرعت باد غالب، شیب و ارتفاع با اهمیت بیشتر در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی ارزیابی شده‌اند. همچنین یافته‌ها حاکی از آن است که استان اصفهان حدود ۰/۵۱ درصد دارای مناطق خوب و عالی می‌باشد که مساحتی بالغ بر ۵۵۰۲۸۳۷/۸۸ هکتار می‌باشد جدول (۹). یافته‌های این تحقیق توانایی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و منطق فازی را در

مدل‌سازی و کمک به برنامه‌ریزی محیطی و نیز ترکیب معیارهای کمی و کیفی با مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به قابلیت‌هایی که این سیستم‌ها در مدل‌سازی فضایی داده‌ها دارند، تعمیم اطلاعات، ساخت مدل‌های جدید و آزمون روش‌های مختلف را دارا می‌باشند.

جدول ۹) مشخصات نقشه مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی

محدوده	ردیف	کلاس	مساحت (هکتار)	درصد از سطح استان
اصفهان	۱	ضعیف	۱۸۸۴۵۳۸/۴۰	۰/۱۸
	۲	متوسط	۳۳۱۱۸۶۲/۰۴	۰/۳۱
	۳	خوب	۳۲۸۲۷۳۵/۹۷	۰/۳۱
	۴	عالی	۲۲۲۰۱۰۱/۹۱	۰/۲۰



شکل ۱۲) نقشه مکان‌یابی نیروگاه بادی در استان اصفهان

## منابع

- [۱] امانی، ابوالفضل. حسینی شمعچی، عباس (۱۳۸۹)، بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های حوضه آبریز رودخانه ارس جنوبی، مجله فضای جغرافیایی، سال دهم، شماره ۲۹، صص ۲۶-۱.
- [۲] امینی فسخودی عباس (۱۳۸۴)، کاربرد استنتاج منطق فازی در مطالعات برنامه‌ریزی و توسعه منطقه‌ای، مجله دانش و توسعه، شماره ۱۷، صص ۳۹-۶۱.
- [۳] برزویی، اکرم (۱۳۹۱)، امکان‌سنجی انرژی باد در منطقه سبزوار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری.
- [۴] زاهدی، مجید. صالحی، برومند. جمیل، مجید (۱۳۸۴)، محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، صص ۴۱-۵۵.
- [۵] ساسان‌پور، فرزانه. موسی‌وند، جعفر (۱۳۸۹)، تاثیر عوامل انسان ساخت در تشدید پیامدهای مخاطرات طبیعی در محیط‌های کلان شهری با کاربرد منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۳، شماره ۱۶، صص ۲۹-۵۰.
- [۶] سالاری، مرجان. معاضد، هادی. رادمنش، فریدون (۱۳۹۱)، مکان‌یابی محل دفن پسماند شهری با استفاده از مدل AHP-FUZZY در محیط GIS (مطالعه موردی: شهر شیراز)، فصلنامه علمی پژوهشی دانشکده بهداشت یزد، سال یازدهم، شماره اول، صص ۱۰۹-۹۶.
- [۷] سلطانی، سید باقر. غلامیان، سید اصغر. دستجانی فراهانی، کسری (۱۳۸۹)، بررسی پتانسیل انرژی باد در بند امیرآباد به منظور امکان‌سنجی تاسیس نیروگاه بادی، نشریه انرژی ایران، دوره سیزدهم، شماره ۱۳، صص ۱۶-۱.
- [۸] صفاری، امیر. ساسان‌پور، فرزانه. موسی‌وند، جعفر (۱۳۹۰)، ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر خطر سیل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و منطق فازی مطالعه موردی: منطقه ۳ تهران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۷، شماره ۲۰، صص ۱۲۹-۱۵۰.
- [۹] عبدلی، حبیب. ساری صراف، بهروز. شمعچی، عباس (۱۳۸۸)، امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد و کاربرد آن در طرح‌های توسعه صنعتی (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)، مجله فضای جغرافیایی، سال نهم، شماره ۲۸، صص ۵۷-۲۴.
- [۱۰] عبدی، حمدی. حسین‌زاده خنکداری، تقی. ذاکری‌فر، رزم‌آرا. عباسیه‌کهن، سید حسین و هاشمی پنبه‌چوله، سید ابراهیم (۱۳۹۰)، امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه تپه، نشریه انرژی، دوره ۱۴، شماره ۱۵، صص ۲۲-۱.
- [۱۱] قائدرحمتی، صفر. باستانی‌فر، ایمان. سلطانی، لیلا (۱۳۹۰)، بررسی تاثیرات تراکم بر آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در شهر اصفهان (با رویکرد فازی)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۴۲، شماره پیاپی ۴۱، شماره ۱، صص ۱۲۲-۱۰۷.
- [۱۲] کرمی، آیت‌الله. عبدشاهی، عباس (۱۳۹۰)، رتبه‌بندی توسعه یافتگی مناطق روستایی استان کهگیلویه و بویراحمد به روش فازی، تحقیقات اقتصاد کشاورزی، جلد ۳، شماره ۳، صص ۱۳۶-۱۱۷.
- [۱۳] متکان، علی‌اکبر. شکیبیا، علیرضا. پورعلی، سید حسین. حسین، نظم‌فر (۱۳۸۷)، مکان‌یابی مناطق مناسب جهت دفن پسماند با استفاده از GIS (ناحیه مورد مطالعه: شهر تبریز)، علوم محیطی، سال ششم، شماره دوم، صص ۱۳۲-۱۲۱.



- [14] Ayodele, T. R., & Ogunjuigbe, A. S. O. 2016. "Wind energy potential of Vesleskarvet and the feasibility of meeting the South African' s SANAE IV energy demand". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 226-234.
- [15] Benui A, Rattanamanee P, Puetpaiboon U, Phukpattaranont P, hetpattananondh, K. 2007. "Site selection for large wind turbine using GIS". *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, Thailand*. pp. 1-6.
- [16] Bertolini, M, M, Braglia. 2006. "Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract", *International Journal of Project Management* 24, pp. 422-430.
- [17] Bevilacqua, M. D'Amore, A. & Polonara, F, .2004. " A Multi-Criteria Decision approach to Choosing the Optimal Blanching– Freezing System". *Journal of Food Engineering*, 63, pp. 253-263.
- [18] Bowen, Wiilliam M. 1990. "Subjective judgments and data environment analysis in site selection, Computer", *Environment and Urban Systems*, Vol. 14, pp. 133-144.
- [19] Conti, J. J., Holtberg, P. D., Beamon, J. A., Schaal, A. M., Ayoub, J. C., & Turnure, J. T. 2011. "Annual energy outlook 2011 with projections to 2035". United States of America Department of Energy Information. Office of Integrated and International Energy Analysis. Available at [http://www.eia.Gov/neic/speeches/newell\\_12162010.Pdf](http://www.eia.Gov/neic/speeches/newell_12162010.Pdf).
- [20] Chandel, S. S., Ramasamy, P., & Murthy, K. S. R.2014. "Wind power potential assessment of 12 locations in western Himalayan region of India". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 530-545.
- [21] Dey, P.K, E.K, Ramcharan.2007. "Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados", *Journal of Environmental Management*. pp. 1384-1395.
- [22] Eastman, J.R; Kyem, P.A, K; Toledano, J, Jin, W., (1993), GIS and Decision Making m 1st ed., *UNITAR*, pp. 108-112.
- [23] Gass, V., Schmidt, J., Strauss, F., & Schmid, E.2013. "Assessing the economic wind power potential in Austria". Paper presented at the European Energy Market (EEM), 2013 9th *International Conference on the*.
- [24] M.2008. Comparison of fuzzy and crisp analytic hierarchy process (AHP) methods for spatial multi criteria decision analysis in GIS, university of Gavle DEPARTMENT OF TECHNOLOGY AND BUILT ENVIRONMENT.
- [25] Kunz, J. 2010. "The Analytic Hierarchy Process (AHP) ", *Eagle City Hall Location Options Task Force*, pp.1-25.
- [26] Lee, R. 2010. "Hidden Costs of Energy"Unpriced Consequences of Energy Production and Use. *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*.
- [27] Lootsma, F, A. 2005. Fuzzy Logic for Planning and Decision Making. *Dordrecht, kluwer Academic Publisher*.
- [28] Masseran, N, A.M, Razali, K.Ibrahim. 2012. "An analysis of wind power density derived from several wind speed density functions: The regional assessment on wind power in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 6476- 6487.
- [29] Moreno-Jimenez, J.M., ET al. 2005. "a spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making", *Group Decision and Negotiation* 14, pp. 89–108.
- [30] Noori, M., Kucukvar, M., & Tatari, O. 2015. "A macro-level decision analysis of wind power as a solution for sustainable energy in the USA". *International Journal of Sustainable Energy*, 34(10), 629-644.

- [31] Probamroong, A. Kasemsan, M. Wanvisa, Ch. and Nuttee, a., 2009. "Development of a Gis Decision Support System for Wind Farm Installations in Thailand". Current State and Results. *World Renewable Energy Congress 2009 – Asia*, 690-695.
- [32] Quijano H, R., Botero B, S., & Domínguez B, J. 2012. "MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5176-5187.
- [33] Ribeiro, A. E. D., Arouca, M. C., & Coelho, D. M. 2016. "Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil" *The influence of location, area and shape. Renewable Energy*, 85, 554-563.
- [34] Saaty, Thomas L. 1980. "the Analytic Hierarchy Process" *Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Pittsburgh: RWS Publications.*
- [35] Saaty, Thomas L. 1990. "Decision Making for Leaders". *Pittsburgh: RWS Publications.*
- [36] Saaty, Thomas L. 1996. "the Analytic Network Process". *Pittsburgh: RWS Publications.*
- [37] Sarkis, J. & Talluri, S. 2004. "Evaluating and Selecting E-Commerce Software and Communication Systems for A Supply Chain". *European Journal of Operational Research*, 159, pp. 318-329.
- [38] Stein, E. W. 2013. "A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 640-654.
- [39] Serwan M, J, Baban, Tim Parry. 2001. "Developing and applying a GIS assisted approach to locating wind farms in the UK", *Renewable Energy* 24, 59-71.
- [40] Taha, H.A. 2003. "Operations Research. Pearson Education Inc". Fayetteville.
- [41] Taylor, B.W. 2004. "Introduction to Management Science". Pearson Education Inc. New Jersey.
- [42] Yasmina, A, H. 2012. "Wind energy in Egypt Economic feasibility for Cairo". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 3312- 3319.
- [43] Zadeh L.A. 1975. "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I", *Information Sciences*, 8, PP.199-249.