

## توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی با روش فازی - ای.اچ.پی. در منطقه سمنان

محمود احمدی<sup>۱</sup> و عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>

تاریخ وصول: ۱۳۹۴/۳/۸، تاریخ تایید: ۱۳۹۴/۴/۱۹

### چکیده

باد نعمت خدادادی و به عنوان یکی از مظاهر انرژی‌های نو، برای جایگزین شدن سوخت‌های فسیلی از جایگاه ویژه‌ای طی سال‌های اخیر برای محققان برخوردار بوده است. استان سمنان با توجه به وضعیت توپوگرافی و موقعیت نسبی خود شرایط مناسب را برای انجام پژوهش در این زمینه داراست. هدف از این پژوهش توان‌سنجی استفاده از باد با رویکرد اقلیمی به‌منظور راه‌اندازی نیروگاه‌های بادی در منطقه سمنان می‌باشد. روش تحقیق ابتدا، برای فازی‌سازی معیارها نقاط کنترل و نوع تابع فازی برای هر یک از لایه‌ها (سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار، دما، شیب، ارتفاع، مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی...) براساس درجه‌بندی عضویت آنها در محدوده‌ی صفر الی یک در نرم‌افزار ادریسی مشخص گردید. سپس با توجه به اهمیت تلفیق اطلاعات، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار Expert choice پیاده‌سازی گردید. سپس از نرم‌افزار ArcGIS، به‌منظور تحلیل فضایی و همپوشانی لایه‌ها استفاده شد و بعد از تجزیه و تحلیل اطلاعات، استان سمنان، از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم گردیدند. نتایج نشان داد مناطق با درجه عالی جهت احداث نیروگاه بادی در منطقه شامل محدوده شمال در ایستگاه دامغان با مساحتی بالغ بر ۳۴۳۳۰۱/۷۰ هکتار یا ۳/۵۴ درصد قرار دارد. علاوه بر این، مناطق با درجه خوب با مساحتی بالغ بر ۲۲۷۹۲۵۰/۳۲ هکتار یا ۲۳/۴۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه، شامل ایستگاه‌های بیارجمند، جنوب غربی شاهرود (ایستگاه نماینده: شاهرود)، دامغان و شمال گرمسار (ایستگاه نماینده: گرمسار) می‌باشد.

کلیدواژگان: پتانسیل‌سنجی، نیروگاه بادی، روش فازی - ای.اچ.پی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، سمنان.

۱. استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی.

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشگاه شهید بهشتی

## مقدمه

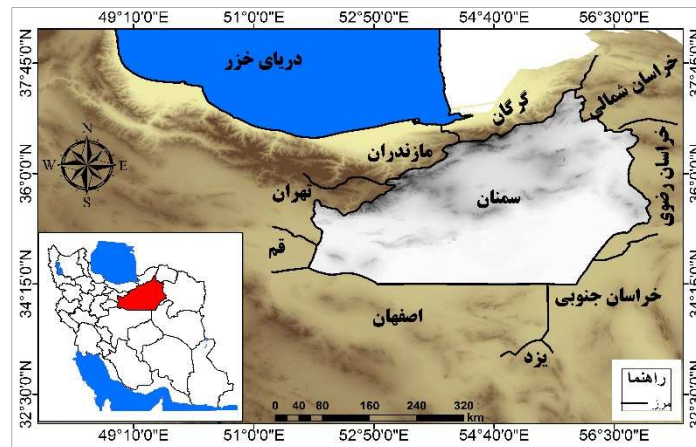
گسترده‌گی نیاز انسان به منابع انرژی همواره از مسائل مهم و اساسی محسوب می‌شود. تلاش برای دستیابی به یک منبع انرژی پایان‌ناپذیر از آرزوهای دیرینه انسان بوده است (امانی و شمعی، ۱۳۸۹: ۲). کلیه منابع انرژی فسیلی روزی به اتمام خواهند رسید (عبدلی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۸) و با اتمام انرژی‌های فسیلی غیر قابل تجدید، تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد و نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۳). از طرف دیگر، مصرف منابع با انرژی فسیلی، مشکلات و هزینه‌های مادی و زیست‌محیطی خاص خود را در پی دارد (برزویی، ۱۳۹۱: ۳). استفاده از انرژی اتمی نیز صرف‌نظر از پیامدهای شدید زیست-محیطی نظیر زباله‌های اتمی و غیره، هزینه بالا و تکنولوژی پیشرفته‌ای می‌طلبد (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۳). این مسئله سبب شده است که 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 ببار نیاورد (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۲: ۴۲). با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان به پتانسیل‌سنجی مناطق مختلف برای احداث نیروگاه بادی و استفاده از این انرژی تجدیدپذیر پرداخت. در این راستا (Prabamroong et al, 2009) توسعه‌ی نصب مزارع بادی در تایلند را به وسیله‌ی سیستم حمایتی تصمیم‌گیری GIS بررسی کرده و وضعیت فعلی و نتایج آن را مورد ارزیابی قرار دادند. از تحلیل حاضر، پس از بکار بردن محدودیت‌های انتخاب شده، درصد کل مساحت محتمل برای نصب نیروگاه بادی با توجه به کل مساحت در هر منطقه محاسبه گردید (Yasmina, 2012). امکان‌سنجی اقتصادی انرژی باد را در قاهره مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش، برای این منظور از داده‌های 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 می‌تواند به تامین برق مورد نیاز صنعت‌گران کمک کند. از دیگر کارهای انجام یافته می‌توان به (Ahmed Shata, 2012; Masseran et al, 2012; Mostafaeipour, 2011; Yasmina, 2012 and Bennui et al, 2007) اشاره کرد. برزویی (۱۳۹۱) امکان‌سنجی انرژی باد در منطقه سبزواری 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. پژوهش دیگری در این زمینه، پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه است که در سال ۱۳۹۱ توسط محمدی و همکاران انجام گرفته است. نتایج این پژوهش گویای این است که سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند. منطقه اسلام آباد غرب در صورت استفاده از توربین‌های بادی مرتفع، برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب است و کرمانشاه برای استفاده از انرژی باد، پتانسیل مناسبی ندارد. اسدی (۱۳۹۲) در پایان‌نامه خود تحت عنوان شناسایی مزارع و مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در شمال شرق کشور با استفاده از روش AHP و سامانه اطلاعات جغرافیایی، به بررسی مکانهای مستعد برای احداث نیروگاه بادی پرداخت. در این پژوهش، ۷ منطقه با اولویت احداث مزارع بادی، با در نظر گرفتن همپوشانی و انطباق نقشه‌های محدودیت و مکان‌یابی، مساحت مناطق دارای اولویت، شرایط اقلیمی و نیز بازدید میدانی تعیین گردیدند که این مناطق به ترتیب، تربت‌جام، گل‌مکان، نیشابور، سبزوار، بجنورد و فردوس می‌باشد. در این تحقیق، سعی بر این است در استان سمنان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش Fuzzy-AHP به مکان‌یابی و شناسایی مناطق مستعد برای احداث نیروگاه‌های بادی پرداخته شود.

#### مواد و روش

منطقه مورد مطالعه، با وسعتی حدود ۹۶۸۱۵ کیلومتر مربع، در محدوده‌ی جغرافیایی، بین مدارهای ۵۱ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این استان از شمال به استان‌های خراسان شمالی، گلستان و مازندران، از جنوب به استان‌های یزد و اصفهان، از شرق به استان خراسان رضوی و از غرب به استان‌های تهران و قم محدود می‌باشد (شکل ۱).

در پتانسیل‌یابی نیروگاه بادی، به عنوان یک مساله تصمیم‌گیری به مواد و ابزار خاص این موضوع نیاز می‌باشد. در این تحقیق، از آمار ۲۵ ساله اقلیمی استان سمنان در بازه‌ی آماری ۲۰۱۲-۱۹۸۷ استفاده و برای تجزیه و تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های (بجز نقشه کاربری اراضی)، مقیاس مابقی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ می‌باشد. به منظور بررسی کاربری اراضی از تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره لندست مربوط به سال ۲۰۱۰ استفاده گردید و برای تحلیل و تفسیر اطلاعات



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور

آن از نرم‌افزار ENVI4.8 بهره گرفته شد. سپس برای فازی‌سازی معیارها و زیرمعیارها از نرم‌افزار ادریسی، و به‌منظور 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 GIS10.2.2 بهره گرفته شد.

#### فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۱</sup>

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری برای زمانی است که تصمیم‌گیرنده دارای معیارهای چندگانه باشد (Taylor, 2004: 374). زیرا تحلیل‌گران یا تصمیم‌گیرندگان را جهت سازماندهی مسائل حساس و حیاتی یاری می‌نماید (Bevilacqua Amore and Polonara, 2044: 255). 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 ارتباط بین آن‌ها منجر به ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی می‌شود. ایجاد یک ساختار

1. Analytic Hierarchy Process

سلسله مراتبی از موضوع مورد بررسی، نخستین گام در فرایند تحلیل سلسله مراتبی به‌شمار 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 زیرمعیارها، محاسبه‌ی ضریب اهمیت (وزن) گزینه‌ها، محاسبه‌ی نهایی گزینه‌ها، و بررسی سازگاری منطقی قضاوت‌هاست (16: Saaty, 1996; 12: Saaty, 1990; 22: Saaty, 1980).

### تعیین اهمیت ضریب معیارها و زیرمعیارها

در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، برتری بین گزینه‌ها به وسیله‌ی 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 بوسیله‌ی آن ارجحیت یا اهمیت دو گزینه را نسبت به هم می‌سنجند (522: Taha, 2003). در این فرایند از اعداد ۱ تا ۹ به عنوان یک مقیاس استاندارد، برای مشخص کردن اهمیت گزینه‌ها (از اهمیت مساوی تا اهمیت فوق‌العاده زیاد) نسبت به هم استفاده می‌شود (جدول ۱). در ماتریس مقایسه جفتی، عدد ۹ نشان دهنده اهمیت فوق‌العاده زیاد یک معیار نسبت به دیگری است و عدد ۱/۹ نشان دهنده‌ی ارزش فوق‌العاده پایین یک معیار نسبت به معیار دیگر و ارزش عددی ۱ نیز نشان دهنده‌ی اهمیت‌ها برابر می‌باشد (8: Kunz, 2010).

#### جدول ۱: مقیاس ۹ کمیته‌ی ساعتی برای مقایسه جفتی

(Bowen, 1990: 137; Dey and Ramcharan, 2007: 1392)

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 Z است.
۵	اهمیت بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت I خیلی بیشتر از Z است.
۷	اهمیت خیلی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت I خیلی بیشتر از Z است.
۹	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی بیشتر نسبت به Z 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 ۰/۱ باشد، می‌توان سازگاری مقایسه‌ها را پذیرفت؛ در غیر اینصورت باید مقایسه‌ها مجدداً انجام گیرد (Moreno-Jimenez, 2005: 103; Bertolini, 2006: 427). نرخ سازگاری به روش ذیل قابل محاسبه می‌باشد (Kordi, 2008: 9).

$$C.R. = C.I. / R.wI. \quad (1)$$

$$C.I. = \lambda Max - n / n - 1 \quad (2)$$

در روابط فوق n تعداد معیارها و R.I. شاخص سازگاری تصادفی است.

### مدل فازی

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به‌عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل‌سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم قطعیت موجود در فرایندهای شناختی انسانی، ابزارهای بسیارکارآمد و مفیدی به‌شمار می‌رود (Lootsma, 2005: 66). این نظریه نخستین بار توسط پرفسور لطفی‌زاده دانشمند ایرانی‌الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد (امینی فسخودی، ۱۳۸۴: ۴۱). تئوری مجموعه فازی، روشی است که قضاوت‌های فردی و مبهم در مورد یک پدیده منحصر به‌فرد را وارد مدل‌های احتمالی یا ریاضی می‌نماید (قائد رحمتی، ۱۳۹۰: ۱۱۱).

### فازی‌سازی 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 (کرمی و عبدشاهی، ۱۳۹۰: ۱۱۹). 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 یک نشان‌دهنده‌ی درجه عضویت کامل است (Zadeh, 1975: 206). در روش استانداردسازی فازی، برای ارزش‌گذاری مقادیر معمولاً از توابع عضویت مختلفی چون

توابع Linear, J-Shape و Sigmoidal استفاده می‌شود (Eastman, 1993: 12). علاوه بر این توابع، کاربر می‌تواند با توجه به نیاز خود، تابع نیز تعریف نماید. 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 کاهش یا افزایشی بودن معیار موردنظر می‌باشد. در اینجا منظور از کاهش، حداقل شونده یا صعودی بودن تابع می‌باشد (سالاری، ۱۳۹۱: ۱۰۱).

### یافته‌های تحقیق

نتایج حاصل از استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی

در این تحقیق، زیرمعیارهای موثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی براساس جدول ۲، با در نظر گرفتن انواع توابع فازی و نیز نقاط کنترل معرفی شده از سوی کارشناسان مختلف و تحقیقات پیشین، فازی‌سازی و استاندارد شده‌اند. به‌طوریکه، 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. اما در سایر موارد مانند سرعت باد و سرعت باد غالب نوع تابع فازی براساس نظرات کارشناسی افزایشی تعریف شد. چرا که با افزایش سرعت باد، توان قابل استحصال از توربین بادی بیشتر خواهد شد و در نتیجه صرفه اقتصادی بیشتری خواهد داشت. همچنین در خصوص افزایشی بودن نوع تابع فازی معیارهای شهرها و روستا باید به این نکته اشاره کرد که در شهرها، ساختمان‌ها نوعی مانع در مقابل باد محسوب می‌شوند که خود باعث کاهش توان قابل استحصال از توربین می‌شود. همچنین توربین‌ها نیز با توجه به چرخش موتور و پره‌ها، صدای آئرودینامیکی خاصی ایجاد می‌کنند که مخلل آسایش اطراف خود است، بنابراین نوع تابع باید افزایشی باشد تا بتوان از حداکثر توان باد و توربین بادی برای تولید الکتریسیته استفاده نمود. در مورد مناطق حفاظت شده، رودخانه‌ها و گسل‌ها هر چه فاصله از این معیارها بیشتر باشد یعنی نوع تابع فازی افزایشی باشد، به ترتیب آسیب کمتری به محیط زیست و نیروگاه بادی خواهد رسید، چرا که امکان دارد مناطق حفاظت شده محل زندگی گونه‌های نادر جانوری باشد که

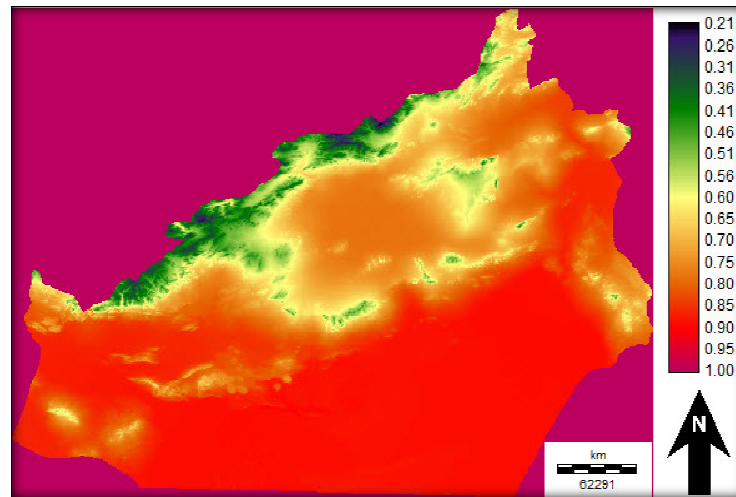
احداث نیروگاه باعث به خطر افتادن حیات جانوری شود. از طرفی، رودخانه‌ها اکثراً محل زندگی پرندگان مهاجر است که اگر یک فاصله استاندارد از رودخانه‌ها در نظر گرفته نشود، باعث برخورد پرندگان با پره‌های توربین شده و حیات پرندگان با خطر مواجه می‌شود. در مورد گسل‌ها، با فعالیت گسل صدمات جبران ناپذیری به نیروگاه از نظر مالی وارد می‌شود. شکل ۲ نشان‌دهنده نقشه‌های فازی شده ارتفاع در نرم‌افزار ادریسی هستند. که با توجه به نظرات کارشناسان امر، نوع تابع آن به صورت کاهش می‌باشد.

جدول ۲: حد آستانه و نوع تابع فازی جهت استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی

(Serwan, 2001: 63 Bennui et al, 2007: 3;)

ردیف	نام معیار	نقاط کنترل		نوع تابع فازی	نام تابع فازی
		A یا C	B یا D		
۱	سرعت باد (نات)	۳	۸	افزایشی	Linear
۲	سرعت باد غالب (نات)	۶	۲۰	افزایشی	Linear
۳	فشار (هکتوپاسکال)	۸۶۵	۹۲۰	افزایشی	Linear
۴	دما (سانتیگراد)	۱۵	۱۹	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	Linear
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 زلزله خیز (متر)	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰	افزایشی	Linear

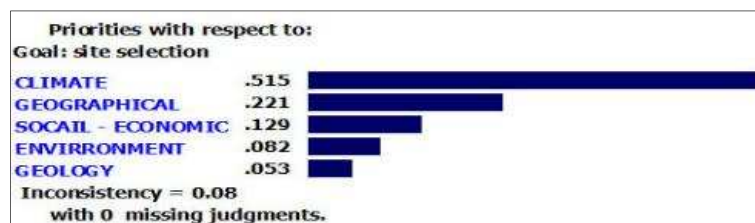




شکل ۲. نقشه فازی سازی شده ارتفاع

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

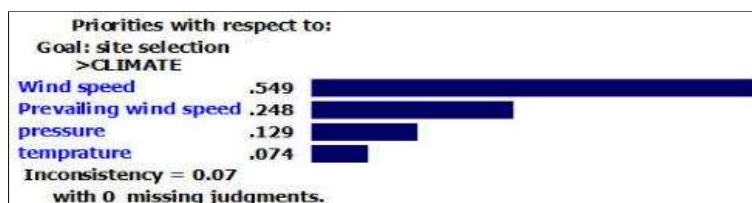
در این تحقیق، این وزن‌ها با توجه به اهمیت معیارها و زیرمعیارها در مقابل یکدیگر، نسبت به هدف "پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی" تعیین شده است. ابتدا معیارهای لایه‌های اصلی با یکدیگر مقایسه می‌شوند که این مقایسه‌ها بر اساس کمیته ساعتی انجام شده است (جدول ۱). ارجحیت یک گزینه یا عامل نسبت به خودش مساوی با یک است، لذا اصل معکوس بودن یک عامل نسبت به دیگری و ارجحیت یک برای یک عامل دیگر یا گزینه نسبت به خودش، دو خاصیت اصلی ماتریس مقایسه‌ای دو به دویی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی هستند. این دو خاصیت باعث می‌شود که برای مقایسه  $n$  معیار یا گزینه، تصمیم‌گیرنده تنها به  $\frac{n(n-1)}{2}$  سوال پاسخ دهد. شکل‌های ۳ الی ۸، وزن‌های محاسبه شده معیارها و زیرمعیارها را در نرم‌افزار Expert Choice نشان می‌دهد. در شکل ۳ 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  $0/221$  می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب سازگاری مقایسه زوجی معیارها در نرم‌افزار Expert Choice کمتر از  $0/1$  می‌باشد که نشان از دقت بالای وزن‌دهی معیارها می‌باشد.



شکل ۳. وزن‌های محاسبه شده معیارها در نرم‌افزار Expert Choice.

### زیرمعیار اقلیمی

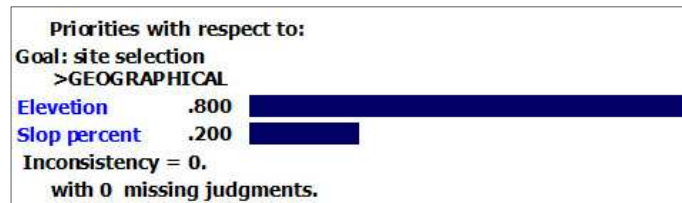
سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما جزو زیرمعیارهای، معیار اقلیمی می‌باشند. در بررسی شکل ۴ که مقایسه زوجی معیار اقلیمی در آن انجام گرفته، سرعت باد بیشترین وزن (۰/۵۴۹) و دما کمترین وزن (۰/۰۷۴) را بخود اختصاص داده است. در اینجا با توجه به اینکه سرعت باد اصلی‌ترین عامل در پتانسیل‌سنجی نیروگاه بادی می‌باشد، وزن بیشتری بخود اختصاص داده است در این معیار نیز میزان نرخ سازگاری مقایسه زوجی بین معیارها ۰/۰۷ می‌باشد.



شکل ۴. وزن محاسبه شده زیر معیارهای اقلیمی در نرم‌افزار Expert Choice.

### زیرمعیارهای جغرافیایی

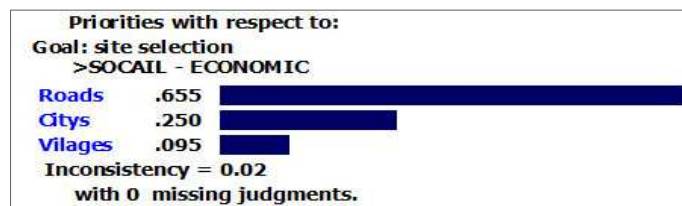
زیرمعیارهای جغرافیایی شامل ارتفاع از سطح دریا و شیب می‌باشد. شکل ۵ نمودار وزن‌های محاسبه شده در نرم‌افزار Expert choice را نشان می‌دهد که ضریب یا نرخ سازگاری در آن صفر می‌باشد. در اینجا زیر معیار ارتفاع از سطح دریا، با توجه به اینکه ارتفاع هر چه کمتر باشد در نتیجه حمل تجهیزات توربین به منطقه آسانتر خواهد شد و لذا از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود، وزن (۰/۸۰۰) بیشتری نسبت به شیب (۰/۲۰۰) بخود اختصاص داده است.



شکل ۵. وزن محاسبه شده زیر معیارهای جغرافیایی در نرم‌افزار Expert Choice.

### زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی

زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی شامل فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از شهرها و فاصله از روستاها می‌باشد. در شکل ۶ 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 به‌صرفه خواهد بود، چون دیگر نیازی به احداث راه‌های ارتباطی جدید نخواهد بود و هم از لحاظ زیبایی‌شناسی جلوه‌ی خاصی به منطقه قرارگیری نیروگاه خواهد بخشید و از طرف دیگر باعث کاهش خطرات ناشی از کنده شدن پره‌ها در کناره جاده‌ها خواهد شد که می‌تواند صدمات شدیدی را به وسایل نقلیه وارد نماید. ضریب سازگاری ۰/۰۲ می‌باشد.

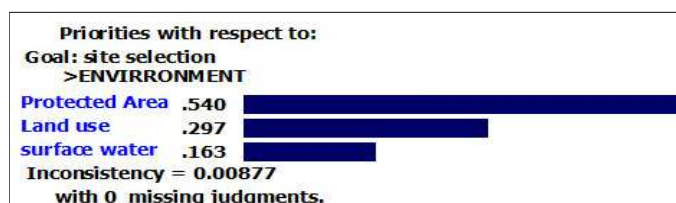


شکل ۶. وزن محاسبه شده زیر معیارهای، معیار اقتصادی-اجتماعی در نرم‌افزار Expert Choice.

### زیرمعیارهای زیست محیطی

زیرمعیارهای، معیار زیست‌محیطی شامل فاصله از مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه‌ها می‌باشد. مناطق حفاظت شده با توجه به اینکه اکثراً محل زندگی گونه‌های نادر گیاهی و جانوری می‌باشد، لذا با احداث نیروگاه در این مکان باعث وارد آمدن لطمات شدیدی به محیط زیست و از بین رفتن گونه‌های گیاهی و جانوری نادر خواهد شد لذا براساس نظرات

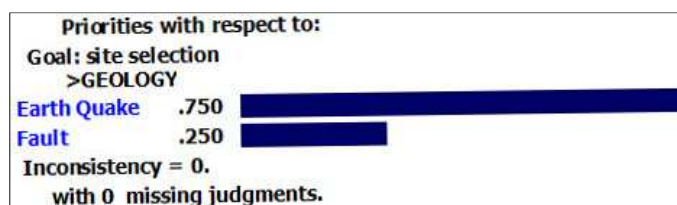
کارشناسان فاصله از مناطق حفاظت شده وزن (۰/۵۴۰) بیشتری را بخود اختصاص داد. در شکل ۷ وزن‌های محاسبه شده زیر معیارهای، معیار زیست‌محیطی در نرم‌افزار Expert choice با ضریب سازگاری ۰/۰۰۸۷۷ ارائه گردیده است و نشانگر دقت بسیار بالای مقایسه‌های زوجی انجام یافته می‌باشد.



شکل ۷. وزن‌های محاسبه شده زیر معیارهای، معیار زیست‌محیطی در نرم‌افزار Expert Choice.

### زیرمعیار زمین‌شناسی

در تعیین زیرمعیارهای زمین‌شناسی، فاصله از کانون‌های زلزله و فاصله از گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل ۸ وزن محاسبه شده زیر معیارهای، معیار زمین‌شناسی در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی ارائه گردیده است که در آن به فاصله از کانون‌های زلزله براساس نظرات کارشناسان وزن بیشتری (۰/۷۵۰) نسبت به معیار فاصله از گسل‌ها اختصاص یافته است، چرا که احداث نیروگاه بادی در مناطق زلزله‌خیز باعث آسیب دیدن توربین‌های بادی و کاهش توان استحصال از توربین‌ها خواهد شد. در این مورد نیز ضریب سازگاری صفر شد و مقایسه زوجی معیارها با دقت بالا انجام گرفت.

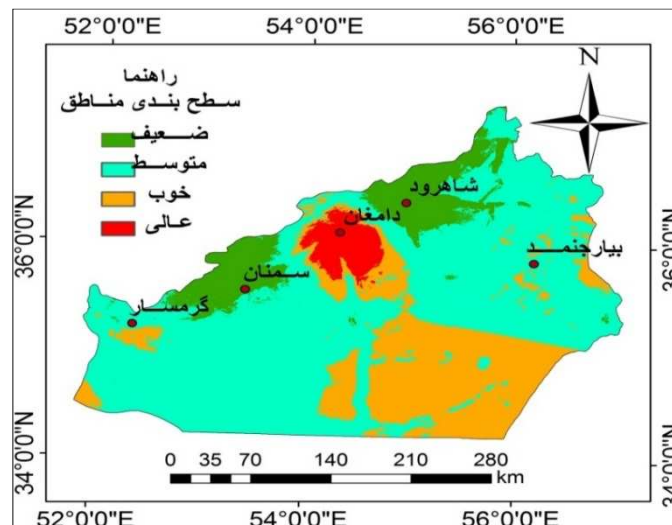


شکل ۸. وزن محاسبه شده زیر معیارهای زمین‌شناسی در نرم‌افزار Expert Choice.

با توجه به اینکه نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ به دست آمد، ماتریس تلفیق شده گروهی مقایسات زوجی انواع معیارهای پتانسیل‌سنجی نیروگاه بادی از سازگاری برخوردار است.

## نتایج حاصل از تلفیق لایه‌ها

پس از عملیات فازی‌سازی و وزن‌دهی لایه‌های موثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی بر اساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به منظور تلفیق و هم‌پوشانی نقشه‌ها استفاده شد، و نقشه مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه‌های بادی تهیه گردید. نقشه حاصله در ۴ کلاس (عالی، خوب، متوسط و ضعیف) طبقه‌بندی گردید. منطقه عالی جهت احداث نیروگاه بادی در منطقه مورد بررسی، در محدوده شمال منطقه مورد مطالعه حدود ۳/۵۴ درصد از سطح منطقه را بخود اختصاص داده است. منطقه عالی با مساحتی بالغ بر ۳۴۳۳۰۱/۷۰ هکتار در شهرستان دامغان قرار دارد. این در حالی است که بعقیه‌ی شهرهای استان سمنان با توجه به محدودیت بیشتر (گسل، ارتفاع، شیب، کانون زلزله ...) دارای منطقه عالی نمی‌باشد. و مناطق خوب با دارا بودن ۲۳/۴۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه، شامل ایستگاه‌های بیارجنمند، جنوب غربی شاهرود، دامغان و شمال گرمسار است. در حالی که کلاس متوسط ۶۲/۰۹ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده و سطح وسیعی از مناطق مرکزی، شرق، غرب، جنوب و جنوب‌غرب منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته است. در شکل ۹ نقشه پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه بادی مشخص گردیده است. جدول ۳ مشخصات نقشه پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی، در استان سمنان را بیان می‌کند.



شکل ۹. نقشه پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی در استان سمنان.

جدول ۳: مشخصات نقشه پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی

محدوده	ردیف	کلاس	مساحت (هکتار)	درصد از سطح استان
کل منطقه	۱	ضعیف	۱۰۶۶۴۸۸/۱۶	۱۰/۹۵
	۲	متوسط	۶۰۴۲۶۲۲/۷۵	۶۲/۰۹
	۳	خوب	۲۲۷۹۲۵۰/۳۲	۲۳/۴۳
	۴	عالی	۳۴۳۳۰۱/۷۰	۳/۵۴
مساحت کل	-	-	۹۷۳۱۶۵۶/۴۵	۱۰۰

### نتیجه‌گیری

طبیعت منطقه در واقع بهترین راهنمای انتخاب سایت توربین‌های بادی است. همچنین تهیه گلباد منطقه راهنمای اولیه مناسبی برای امکان استفاده از انرژی باد می‌باشد. بنابراین، در مکان‌یابی سایت توربین‌های بادی بایستی از وجود بادهای غالب و همیشگی مطمئن بوده و همچنین در طول مسیر جهت این بادهای کم‌ترین مانع وجود داشته باشد. به علاوه، جهت، سرعت باد غالب و تداوم آن نیز از فاکتورهای بسیار مهم تلقی می‌شوند. با وجود این‌ها، 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 سمنان شناسایی شدند. نتایج بدست آمده نشانگر پتانسیل بالای شهرهای دامغان، بیارجمند، جنوب غربی شاهرود، دامغان و شمال گرمسار برای احداث نیروگاه بادی می‌باشند (شکل ۹). این مناطق با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل سرعت باد، سرعت باد غالب، وسعت و محدودیت‌ها 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 پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه بادی ارزیابی شده‌اند. همچنین یافته‌ها حاکی از آن است که در کل استان سمنان، تنها شهرستان دامغان با توجه به محدودیت کم و دارا بودن بادهایی با سرعت و تداوم مناسب، در حدود ۳/۵۴ درصد نسبت به کل منطقه، دارای مناطق عالی می‌باشد. در حالی که سایر قسمتهای استان فاقد مناطق عالی برای احداث نیروگاه بادی می‌باشد و تنها حدود ۲۳/۴۳ درصد دارای

مناطق با سطح خوب برای احداث نیروگاه بادی می‌باشد (جدول ۳). 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 را 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. بنابراین، با احداث نیروگاه بادی در این مناطق مستعد می‌توان به توان انرژی‌های استحصالی از آنها را افزایش داده تا راهکارهای مناسب برای چالش کمبود انرژی در آینده محسوب گردد. نتایج این تحقیق با پژوهش Prabamroong و اسدی تطابق دارد.

## کتابشناسی

۱. اسدی، مهدی، انتظاری، علیرضا و الهه اکبری (۱۳۹۲): شناسایی مزارع و مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در شمال‌شرق کشور با استفاده از روش AHP و سامانه اطلاعات جغرافیایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما علیرضا انتظاری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری؛
۲. امانی، ابوالفضل و عباس حسینی شمعی (۱۳۸۸): بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های حوضه آبریز رودخانه ارس جنوبی، مجله فضای جغرافیایی، سال دهم، شماره ۲۹، صص ۱-۲۶؛
۳. امینی فسخودی، عباس (۱۳۸۴): کاربرد استنتاج منطق فازی در مطالعات برنامه‌ریزی و توسعه منطقه‌ای، مجله دانش و توسعه، شماره ۱۷، صص ۳۹-۶۱؛
۴. برزوئی، اکرم (۱۳۹۱): امکان‌سنجی انرژی باد در منطقه سبزواری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما انتظاری علیرضا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری؛
۵. زاهدی، مجید، صالحی، برومند و مجید جمیل (۱۳۸۴): محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، صص ۵۱-۵۵؛
۶. سالاری، مرجان، معاضد، هادی و فریدون رادمنش (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 ۹۶-۱۰۹؛
۷. سلطانی، سیدباقر، غلامیان، سیداصغر و کسری دستجانی فراهانی (۱۳۸۹): بررسی پتانسیل انرژی باد در بند امیرآباد به منظور امکان‌سنجی تاسیس نیروگاه بادی، نشریه انرژی ایران، دوره سیزدهم، شماره ۱۳، صص ۱-۱۶؛
۸. صفاری، امیر، ساسان‌پور، فرزانه و جعفر موسی‌وند (۱۳۹۰): ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر خطر سیل با استفاده از سامانه 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؛ ساری‌صراف، بهروز و عباس شمعی (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 ۵۷-۷۴؛
۱۰. قائدرحمتی، صفر؛ باستانی‌فر، ایمان و لیلا سلطانی (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 ۱۰۷-۱۲۲؛
۱۱. کریمی، آیت‌اله و عباس عبدشاهی (۱۳۹۰): رتبه‌بندی توسعه یافتگی مناطق روستایی استان کهگیلویه و



- بویراحمد به روش فازی، تحقیقات اقتصاد کشاورزی، جلد ۳، شماره ۳، صص ۱۳۶-۱۱۷:
۱۲. محمدی، حسین؛ رستمی جلیلیان؛ نیما. تقوی؛ فرناز و علی‌اکبر شمسی‌پور (۱۳۹۱): پتانسیل انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و چهار، شماره ۲، صص ۱۹-۲۳:
13. Ahmed Shata Ahmed, (2012), Potential wind power generation in South Egypt, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 1528–1536;
  14. Bennui, A.Rattanamane, P.Puetpaiboon, U.Phukpattaranont, P. Chetpattananondh, K, (2007), Site selection for large wind turbine using GIS. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, Thailand, pp: 1 – 6;
  15. 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;
  16. 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;
  17. Bowen, William M, (1990), Subjective judgments and data environment analysis in site selection, *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 14, pp: 133-144;
  18. 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;
  19. Eastman, J.R. Kyem, P.A, K. Toledano, J. Jin, W, (1993): GIS and Decision Making, m 1st ed., UNITAR, pp: 108-112;
  20. Kordi, 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;
  21. Kunz, J, (2010), the Analytic Hierarchy Process (AHP), Eagle City Hall Location Options Task Force, pp: 1-25.
  22. Lootsma, F, A, (2005): Fuzzy Logic for Planning and Decision Making. Dordrecht, kluwer Academic Publisher;
  23. 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, p.p 6476- 6487;
  24. 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;
  25. Mostafaipour a, A. Sedaghat b, A.A. Dehghan-Niri c, V.Kalantar, (2011), Wind Energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p.p 2545- 2556;
  26. Prabamroong, 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, pp: 690-695;
27. Saaty, T, L, (1980), the Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Pittsburgh: RWS Publications;
  28. Saaty, T, L,(1990), Decision Making for Leaders. Pittsburgh: RWS Publications;
  29. Saaty, T, L,(1996), the Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications;
  30. Serwan, M, J, Baban, Tim Parry, (2001): Developing and applying a GIS assisted approach to locating wind farms in the UK, Renewable Energy 24, pp: 59 -71;
  31. Taha, H.A, (2003), Operations Research. Pearson Education Inc. Fayetteville;
  32. Taylor, B.W., 2004, Introduction to Management Science. Pearson Education Inc. New Jersey;
  33. Yasmina, A, H, (2012), Wind energy in Egypt Economic feasibility for Cairo. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp: 3312- 3319;
  34. Zadeh, L, A, (1975), The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I, Information Sciences, 8, pp: 199-249.