

مکانیابی نیروگاه‌های بادی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از روش AHP

مهدی اسدی^۱

علی محمد خورشید دوست^۲

چکیده

محدودیت ذخایر انرژی فسیلی در جهان و افزایش سطح مصرف انرژی، همواره بشر را برای جایگزین کردن منابع انرژی جدید به چالش کشیده است. در این بین، باد به عنوان یکی از مظاهر انرژی‌های نو از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. استان آذربایجان شرقی با توجه به وضعیت توپوگرافی و موقعیت نسبی خود یکی از مناسب‌ترین مکان‌ها برای احداث نیروگاه بادی می‌باشد. لذا در این پژوهش برای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در این استان، معیارها و زیر معیارهای مختلفی مد نظر قرار گرفت و با توجه به اهمیت تلفیق اطلاعات، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار Expert choice پیاده‌سازی گردید. از نرم‌افزار Arc GIS، به منظور تحلیل فضایی و همپوشانی لایه‌ها استفاده شد و بعد از تجزیه و تحلیل اطلاعات، استان آذربایجان شرقی از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم گردید. در نهایت نتایج حاصله نشانگر آن است که سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان یک سیستم حمایتی تصمیم‌گیری، می‌تواند هم در آماده‌سازی داده‌ها و هم در مدل کردن اولویت‌ها و نظرات کارشناسان در رابطه با عوامل مختلف بسیار کارآمد باشد و طراحان را در انتخاب مکان مناسب جهت احداث نیروگاه بادی یاری کند. در این تحقیق، ۱۵

۱- کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری (نویسنده مسئول) - Email: Asadimehdi11@yahoo.com

Tel:09142190338

۲- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه تبریز

منطقه، با در نظر گرفتن همپوشانی و انطباق نقشه‌های محدودیت، شرایط اقلیمی و نیز بازدید میدانی تعیین گردیدند که این مناطق به ترتیب، تبریز، سهند، اسکو، آذرشهر، بستان‌آباد، شبستر، جلفا، هریس، میانه، بناب، مراغه، سراب، اهر، چارویماق و هشترود می‌باشند.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، نیروگاه بادی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، آذربایجان شرقی.

مقدمه

گسترده‌گی نیاز انسان به منابع انرژی همواره از مسائل مهم و اساسی محسوب می‌شود (امانی و شمعی، ۱۳۸۹، ۲). تلاش برای دستیابی به یک منبع انرژی پایان‌ناپذیر از آرزوهای دیرینه انسان بوده است. کلیه منابع انرژی فسیلی نظیر نفت، گاز، زغال سنگ، اورانیوم و غیره روزی به اتمام خواهند رسید (عبدلی و همکاران، ۱۳۸۸، ۵۸). با اتمام انرژی‌های فسیلی غیر قابل تجدید، تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹، ۳). از طرف دیگر، مصرف منابع تولید انرژی فسیلی مشکلات و هزینه‌های مادی و زیست محیطی خاص خود را در پی دارد. استفاده از انرژی اتمی نیز صرف نظر از پیامدهای شدید زیست‌محیطی نظیر زباله‌های اتمی و غیره، هزینه بالا و تکنولوژی پیشرفته‌ای می‌طلبد. 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 بیار نیورد (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۲، ۴۲). با در نظر گرفتن پارامترهای جغرافیایی، اقتصادی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی می‌توان به پتانسیل‌یابی مناطق برای نیروگاه بادی از طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی دست یافت.

تاکنون پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج در رابطه با امکان استفاده از پتانسیل انرژی باد برای مناطق مختلف جغرافیایی انجام شده است. یکی از پژوهش‌ها در این زمینه، کار بابان و پاری^۱ (۲۰۰۰) است که توسعه و اعمال یک رویکرد به کمک GIS^۲ به منظور مکان‌یابی نیروگاه باد در انگلستان را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از GIS از ۲

1. Baban and Tim Parry
2. Geographic Information system

روش مختلف برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی ایستگاه لنگشایر^۱ استفاده کردند. اول همه لایه‌ها به یک اندازه مهم در نظر گرفته شدند و به آنها وزن برابر داده شد. دوم، لایه‌های اطلاعاتی گروه‌بندی شد، و با توجه به درجه اهمیتشان رتبه‌بندی شدند. و نشان دادند که از این نقشه‌ها می‌توان برای کمک به فرآیند تصمیم‌گیری و یافتن محل مناسب نیروگاه بادی استفاده کرد. در پژوهشی دیگر، بنیوی^۲ و همکاران (۲۰۰۷) مکان مناسب برای توربین‌های بادی بزرگ با استفاده از GIS را انتخاب نمودند. این تحقیق که بر روی ۵ استان کشور تایلند انجام شده است، با هدف بکار بردن جامع سیستم اطلاعات جغرافیایی با ترکیب سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) برای انتخاب بهتر و موثرتر مکان توربین‌های بادی بزرگ در تایلند است. که برای دستیابی به این منظور از پارامترهایی همچون: اطلاعات سرعت باد، ارتفاع، شیب، بزرگ‌راهها، راه‌آهن‌ها، مناطق ساخته شده، مناطق جنگلی و مناطق خوش منظره استفاده شده است که در نهایت بهترین مکان برای نصب توربین بادی در سواحل شرقی تایلند از استان ناخن سی تاممارت^۳ تا استان ناراتی‌واس^۴ انتخاب شده‌اند. تحقیقات انجام یافته در گذشته نشانگر توانایی بالای سیستم اطلاعات جغرافیایی در مشخص کردن مکان‌های مستعد برای استفاده از انرژی بادی می‌باشد. از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه، می‌توان به کار پرابامرونگ^۵ و همکاران (۲۰۰۹)، مصطفایپور، و همکاران^۶ (۲۰۱۱)، شاتا احمد^۷ (۲۰۱۲)، ماسران^۸ و همکارانش (۲۰۱۲)، همودا^۹ (۲۰۱۲) و ... اشاره کرد. همچنین می‌توان از پژوهش‌های انجام یافته در داخل به پتانسیل‌سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) توسط (نوراللهی و همکاران) در سال ۱۳۹۰ انجام شد. در روش محاسبه پتانسیل باد در این مقاله معیارهای مورد نظر با اهمیتی یکسان مورد بررسی قرار گرفته‌اند و این معیارها شامل

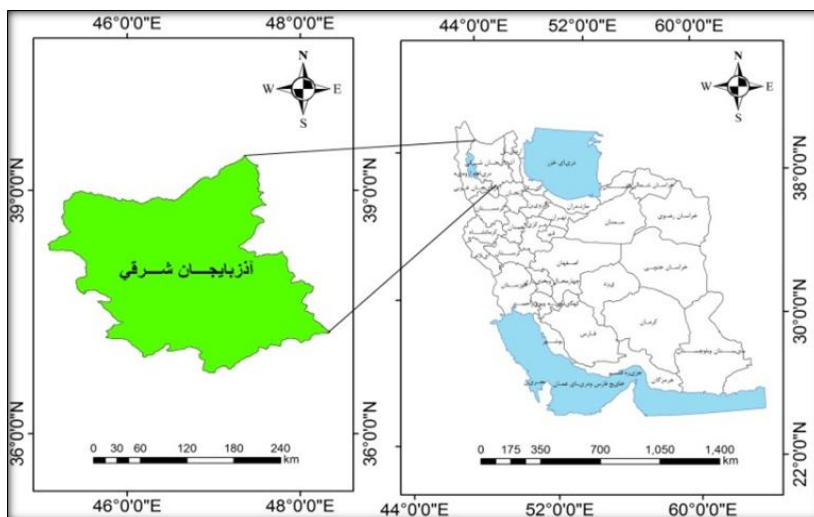
1. Lancashire
2. Bennui
3. Nakhon Si Thammarat
4. Narathiwas
5. Prabamroong
- 6 . mostafaeipour
- 7.shata ahmed
8. Masseran
9. hamouda

معیارهای فنی، زیست محیطی، اقتصادی و جغرافیایی می‌باشند. این مطالعات نشان داده است که با فرض استفاده از توربین Gamesa G58 می‌توان حداکثر ۱۸۹۷ مگاوات برق بادی در منطقه مورد مطالعه تولید کرد، که این مقدار تامین کننده‌ی ۲۶٪ برق منطقه در افق ۱۴۰۴ می‌باشد. همچنین پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه اشاره نمود که در سال ۱۳۹۱ توسط (محمدی و همکاران) بر پایه داده‌های جهت و سرعت سه ساعته باد ایستگاه‌های همدید کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، روانسر، کنگاور و سرپل ذهاب، در طول سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ انجام شده است. نتایج این پژوهش گویای این است که سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند. منطقه اسلام‌آباد 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. به همین منظور سعی بر این است در استان آذربایجان شرقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به مکان‌یابی و شناسایی نیروگاه‌های بادی پرداخته و توان منطقه در تولید انرژی الکتریسیته مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، با مساحتی حدود ۴۵۴۹۱ کیلومتر مربع در محدوده‌ی جغرافیایی، بین مدارهای ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است (شکل ۱). این استان از شمال به جمهوری آذربایجان و کشور ارمنستان، از غرب و جنوب غرب به استان آذربایجان غربی، از شرق به استان اردبیل و از جنوب به استان زنجان محدود می‌شود.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور

در مکان‌یابی نیروگاه بادی، به عنوان یک مساله تصمیم‌گیری به مواد و ابزار خاص این موضوع نیاز می‌باشد. در این تحقیق، از آمار ۱۵ ساله اقلیمی استان آذربایجان شرقی استفاده و برای تجزیه و تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های معیارهای اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی-اجتماعی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی از نرم‌افزار ARC GIS9.3 استفاده گردید. به منظور بررسی کاربری اراضی از تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره لندست^۱ مربوط مربوط به سال ۲۰۰۸ استفاده گردید و برای تحلیل و تفسیر اطلاعات آن از نرم‌افزار ENVI+8 و از تابع الحاقی Spatial Analyst استفاده شد. همچنین برای وزن‌دهی به لایه‌ها از نرم‌افزار Expert choice استفاده گردید.

1. Landsat

روش پردازش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تعیین اهمیت ضریب معیارها:

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از بهترین روش‌های تصمیم‌گیری برای زمانی است که تصمیم‌گیرنده دارای معیارهای چندگانه باشد (تیلور^۱، ۲۰۰۴، ۳۷۴). زیرا تحلیل‌گران یا تصمیم‌گیرندگان را جهت سازماندهی مسائل حساس و حیاتی یاری می‌نماید (بولاکا، امور و پولونارا^۲، ۲۰۰۴، ۲۵۵). 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. دلیل سلسله مراتبی بودن، دلیل ساختار خلاصه‌سازی عناصر تصمیم‌گیری همچون زنجیری در سطوح مختلف است. پس، 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 (ساعتی، ۱۹۹۰، ۱۲؛ ساعتی، ۱۹۹۶، ۱۶).

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 (طاهّا^۳، ۲۰۰۳، ۵۲۲). در این فرایند از اعداد ۱ تا ۹ به عنوان یک مقیاس استاندارد، برای مشخص کردن اهمیت گزینه‌ها (از اهمیت مساوی تا اهمیت فوق العاده زیاد) نسبت به هم استفاده می‌شود. در ماتریس مقایسه جفتی، عدد ۹ نشان دهنده اهمیت فوق العاده زیاد یک

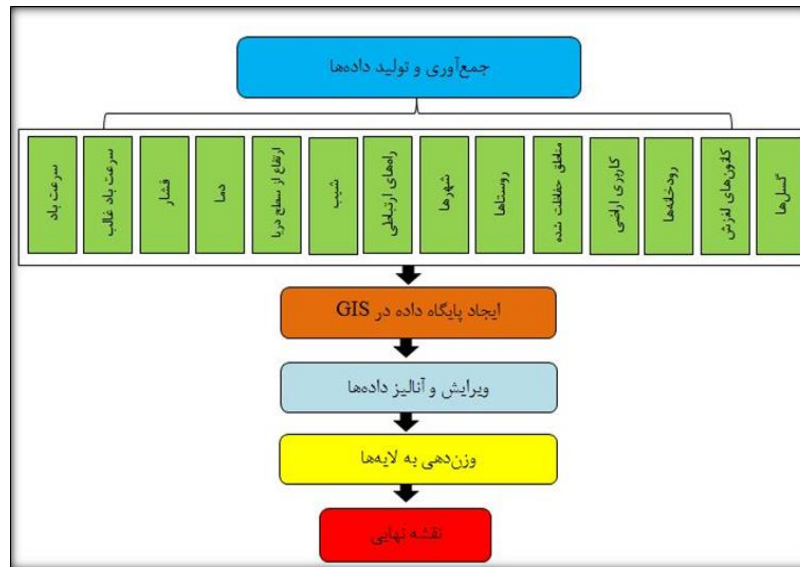
1. Analytic Hierarchy Process
3. Taylor
4. Bevilacqua, Amore and Polonara
1. Taha

معیار نسبت به دیگری است و عدد $1/9$ نشان دهنده‌ی ارزش فوق العاده پایین یک معیار نسبت به معیار دیگر و ارزش عددی ۱ نیز نشان دهنده‌ی اهمیت‌ها برابر می‌باشد (کونز^۲، ۲۰۱۰، ۸). شکل ۲ مراحل مختلف تحقیق را به شکل شماتیک نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقیاس ۹ کمیته‌ی ساعتی برای مقایسه جفتی (بوئن، ۱۹۹۰، ۱۳۷؛ دی، ۲۰۰۷، ۲۰۰۷؛ ۱۳۹۲).

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 ۱ بیشتر از ۳ است.
۵	اهمیت بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است.
۷	اهمیت خیلی بیشتر	تجربه نشان می‌دهد که اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است.
۹	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی بیشتر ۱ نسبت به ۳ به طور قطعی به اثبات رسیده است
۲، ۴، ۶، ۸	مقادیر متوسط بین دو قضاوت مجاور	هنگامی که حالت‌های میانه وجود دارد

2. Kunz
3. Dey



شکل (۲): مراحل مختلف تحقیق

تعیین امتیاز نهایی (اولویت) گزینه‌ها و نرخ سازگاری

تا این مرحله، ضرایب اهمیت معیارها و زیر معیارها در ارتباط با هدف مطالعه و نیز ضرایب اهمیت (امتیاز) گزینه‌ها در ارتباط با هر یک از زیر معیارها تعیین شده است. در این مرحله، از تلفیق ضرایب اهمیت مزبور، امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها تعیین خواهد شد. برای این کار از «اصل ترکیب سلسله مراتبی» ساعتی که منجر به بردار اولویت، با در نظر گرفتن همه قضاوت‌ها در تمامی سطوح سلسله مراتبی می‌شود، استفاده خواهد شد (برتولونی، ۲۰۰۶، ۴۲۳).

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 اینصورت باید مقایسه‌ها مجدداً انجام گیرد (مرنو و جیمز^۲، ۲۰۰۵، ۱۰۳). نرخ سازگاری به روش ذیل قابل محاسبه می‌باشد.

$$\text{C.R.} = \text{C.I.} / \text{R.I.} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

در روابط فوق n تعداد گزینه‌های رقیب و R.I. شاخص سازگاری تصادفی است. با توجه به اینکه نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ به دست آمد، ماتریس تلفیق شده گروهی مقایسات زوجی انواع معیارهای مکان‌یابی نیروگاه بادی از سازگاری برخوردار است.

حداقل محدودیت‌های اعمال شده بر روی لایه‌ها

در هر عملیات یا پژوهش مکان‌یابی نیاز است، تا برای جلوگیری از تلف شدن وقت و هزینه، از بین رفتن محیط زیست و حیاط جانوری و همچنین برای دوری کردن از بلایایی طبیعی مانند زلزله، سیل، حداقل محدودیت‌هایی در نظر گرفته شود. که این کار در محیط نرم‌افزار Arc GIS بصورت باینری یا همان ۰ و ۱ انجام گرفت و به مناطقی که در کم‌تر از حداقل فاصله‌های در نظر گرفته شده قرار داشتند عدد ۰ و به مناطقی که در رنج مناسب قرار داشتند عدد ۱ اختصاص داده شد. جدول ۲ نشانگر عوامل محدود کننده، حداقل و حداکثر فاصله از معیارهای مورد بررسی می‌باشد.

جدول (۲): عوامل محدود کننده، حداقل و حداکثر فاصله از معیارهای مورد بررسی (بابان^۳، ۲۰۰۰، ۶۳).

ردیف	کلاس عوامل	جزئیات عامل	حداقل فاصله (M)	حداکثر فاصله (M)
۱	فاصله از مناطق حفاظت شده	پناگاه حیات وحش	۲۰۰۰	۴۰۰۰
		منطقه حفاظت شده		
		منطقه شکار ممنوع		
۲	فاصله از کانون‌های لغزش	-	۵۰۰	۱۵۰۰

1 . capability Ratio

2 . Moreno-Jimenez

3. baban

۱۰۰۰	۱۰۰۰	-	فاصله از گسل‌ها	۳
-	۱۰۰۰	-	فاصله از رودخانه‌ها	۴
۱۰۰۰	۱۰۰۰	-	فاصله از راه‌های ارتباطی	۵
۶۰۰	۲۰۰	-	فاصله از شهرها	۶
-	۱۰۰۰	-	فاصله از روستاها	۷

نتایج و بحث

وزن معیارها

در اولین اقدام، وزن معیارها تعیین می‌شود. این وزن‌ها، با توجه به اهمیت معیارها در مقابل یکدیگر، نسبت به هدف "مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی" تعیین می‌شود. ابتدا معیارهای لایه‌های اصلی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در شکل ۳ مقایسه زوجی معیارهای لایه‌های اصلی در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی نشان داده شده که در آن معیار اقلیمی با وزن $0/515$ و معیار زمین‌شناسی با وزن $0/053$ بترتیب بیشتری (زیرا عوامل اقلیمی که شامل گزینه‌های سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما می‌باشد از اصلی‌ترین عوامل مکان‌یابی نیروگاه بادی می‌باشد به همین دلیل وزن بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند) و کمترین تاثیر را در احداث نیروگاه بادی دارد و شکل ۳ وزن‌های محاسبه شده معیارها در نرم افزار Expert Choice را نشان داده شده که نرخ سازگاری در آن $0/08$ می‌باشد که کمتر از مقدار استاندارد آن یعنی $0/1$ می‌باشد و این نشان دهنده دقت وزن‌دهی‌های انجام شده می‌باشد.

معیارهای اقلیمی

معیارهای اقلیمی یکی از مهم‌ترین معیارها جهت احداث نیروگاه‌های بادی می‌باشند. در این تحقیق، عناصر اقلیمی، در مقایسه با معیارهای دیگر دارای اهمیت بالاتری بوده و در نتیجه وزن بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. در این خصوص پارامترهای اقلیمی سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما از زیر معیارهای اقلیمی بوده که برای مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی انتخاب شده‌اند.

معیارهای جغرافیایی

یکی از عوامل اصلی که باید در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی مورد توجه قرار گیرد، معیارهای جغرافیایی است. زیر معیارهای جغرافیایی مورد بررسی، ارتفاع از سطح دریا و شیب زمین می‌باشند، که هر چه ارتفاع و شیب کم باشد بنابراین حمل تجهیزات آسانتر شده و لذا از لحاظ اقتصادی باصرفه خواهد بود. این معیارها پس از وزن‌دهی، در محیط نرم‌افزار ArcGIS مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

معیارهای اقتصادی - اجتماعی

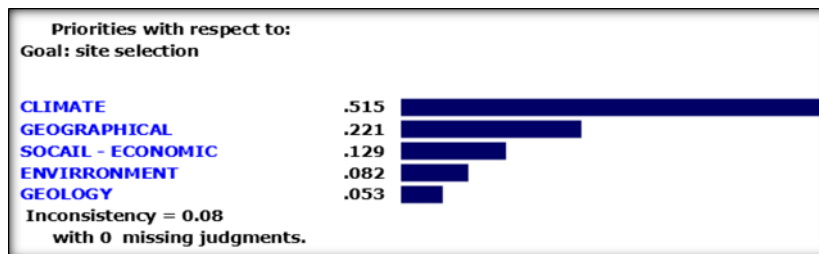
از دیگر معیارهای مهمی که در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی باید به آن توجه داشت، معیارهای اقتصادی - اجتماعی می‌باشد. معیارهای اقتصادی - اجتماعی شامل زیر معیارهای فاصله از راه‌های ارتباطی (جاده‌های فرعی، جاده‌های اصلی، خطوط راه آهن)، فاصله از شهرها و روستاها (مراکز جمعیتی) می‌باشند. فاصله استاندارد از راه‌های ارتباطی دستیابی به شبکه‌های برق سراسری را راحت‌تر خواهد نمود و نیازی به احداث جاده‌های جدیدتر نخواهد بود همچنین ساختمان‌ها در شهرها و روستا به دلیل اینکه نوعی مانع در برابر عملکرد باد محسوب می‌شوند که باعث پایین آمدن توان قابل استحصال از توربین بادی خواهد شد. لذا در احداث نیروگاه بادی باید فاصله‌های استاندارد از این مناطق حفظ شود.

معیارهای زیست‌محیطی

توجه به مسائل زیست‌محیطی در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی در حال حاضر یکی از مهم‌ترین اهداف پژوهشی در ایران و جهان می‌باشد. معیارهای زیست‌محیطی شامل زیر معیارهای فاصله از مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه‌ها می‌باشد. زیرا که این مناطق همواره محل زندگی گونه‌های نادر گیاهی و جانوری می‌باشد مخصوصاً ساحل دریاها که محل زندگی پرندگان مهاجر می‌باشد و احداث نیروگاه بادی در مناطق باعث برخورد پرندگان به پره‌های توربین بادی و تلف شدن آن‌ها خواهد شد.

معیارهای زمین‌شناسی

بررسی معیارهای زمین‌شناسی جهت احداث نیروگاه بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چرا که عدم توجه به معیارهای زمین‌شناسی برای احداث نیروگاه بادی باعث آسیب دیدن شدید نیروگاه و اتلاف سرمایه‌ها در احداث نیروگاه خواهد شد. زیر معیارهای زمین‌شناسی عبارتند از: فاصله از کانون‌های لغزشی و فاصله از گسل‌ها، که برای تعیین مکان مناسب جهت احداث نیروگاه بادی مورد توجه قرار می‌گیرند.



شکل (۳): وزن‌های محاسبه شده معیارها در نرم‌افزار Expert Choice

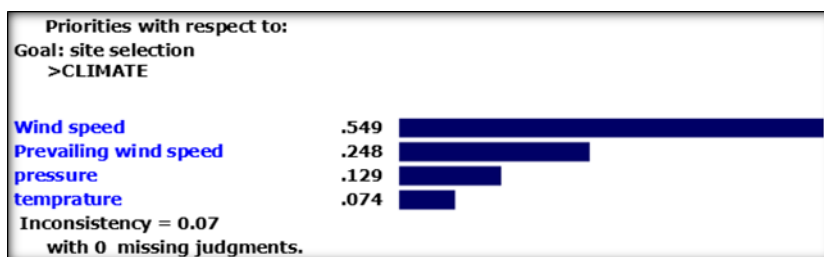
وزن زیر معیارها

با توجه به اینکه برای هر معیار، زیر معیارهایی تعریف شده است، در این مرحله، برای وزن‌دهی به زیر معیارها، دو به دو آنها با هم مقایسه می‌شوند. بدین صورت برای هر کدام از زیر معیارها، به طور جداگانه مقایسه زوجی انجام می‌گیرد. در ادامه به طور جداگانه به بررسی و ارزیابی هر یک از زیر معیارها پرداخته شده است.

زیر معیار اقلیمی

سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار و دما جزو زیر معیارهای معیار اقلیمی می‌باشند که بعد از وزن‌دهی مورد آنالیز قرار گرفتند. در بررسی شکل ۴ که مقایسه زوجی معیار اقلیمی در آن انجام گرفته و میزان نرخ سازگاری مقایسه زوجی بین معیارها در آن ۰/۰۷ می‌باشد سرعت باد بیشترین وزن (۰/۵۴۹) و دما کمترین وزن (۰/۰۷۴) را بخود اختصاص داده است

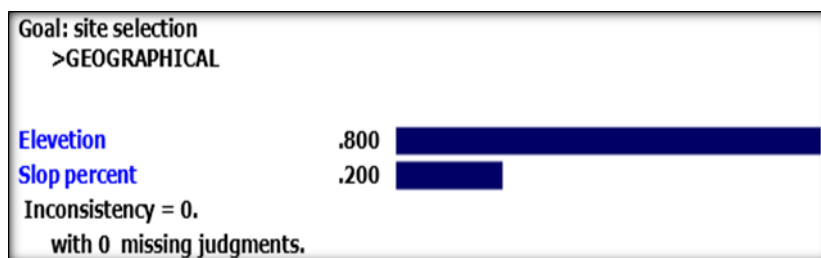
در اینجا با توجه به اینکه سرعت باد اصلی‌ترین عامل در مکان‌یابی نیروگاه بادی می‌باشد وزن بیشتری بخود اختصاص داده است.



شکل (۴): نمودار وزن محاسبه شده در نرم‌افزار Expert choice

زیر معیارهای جغرافیایی

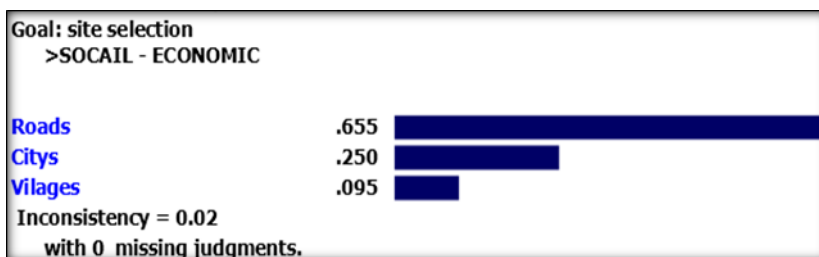
زیرمعیارهای جغرافیایی شامل ارتفاع از سطح دریا و شیب می‌باشد. این لایه‌ها بعد از وزن‌دهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. شکل ۵ نمودار وزن‌های محاسبه شده را نشان می‌دهد که ضریب یا نرخ سازگاری در آن صفر می‌باشد همچنین با توجه به اینکه ارتفاع هر چه کمتر باشد در نتیجه حمل تجهیزات توربین به منطقه آسانتر خواهد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



شکل (۵): نمودار وزن‌های محاسبه شده در نرم‌افزار Expert

زیر معیارهای اقتصادی-اجتماعی

زیر معیارهای اقتصادی-اجتماعی شامل فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از شهرها و فاصله از روستاها می‌باشد. پس از تولید رسترهای فاصله از تک‌تک این زیر معیارها، اوزان محاسباتی به طبقات مختلف هر زیر معیار اعمال گردیده است. شکل ۶ که مقایسه زوجی معیار، اجتماعی-اقتصادی را نشان می‌دهد و ضریب سازگاری ۰/۰۲ می‌باشد. در این شکل 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 چون دیگر نیازی به احداث راههای ارتباطی جدید نخواهد بود و هم از لحاظ زیبایی شناسی جلوه‌ی 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.

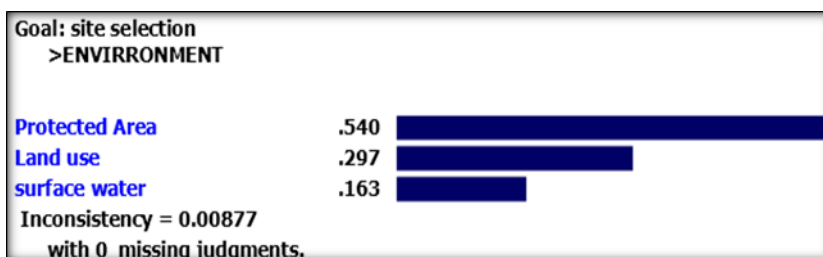


شکل (۶): مقایسه زوجی زیرمعیارهای اجتماعی-اقتصادی (منبع: نگارندگان).

زیر معیارهای زیست محیطی

زیر معیارهای، معیار زیست محیطی نیز که شامل فاصله از مناطق حفاظت شده، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه‌ها می‌باشد. در شکل ۷ مقایسه زوجی زیرمعیارهای، معیار زیست-محیطی انجام گرفت و ضریب سازگاری ۰/۰۰۸۷۷ که نزدیک به صفر است می‌باشد فاصله از مناطق حفاظت شده با توجه به اینکه اکثرا محل زندگی گونه‌های نادر گیاهی و جانوری می‌باشد لذا با احداث نیروگاه در این مکان باعث وارد آمدن لطمات شدید به محیط زیست و

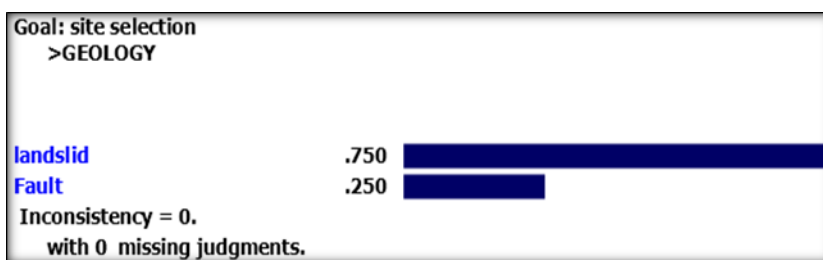
از بین رفت گونه‌های گیاهی و جانوری نادر خواهد شد لذا براساس نظرات کارشناسان فاصله از مناطق حفاظت شده وزن (۰/۵۴۰) بیشتری را بخود اختصاص داد.



شکل (۷): وزن‌های محاسبه شده زیرمعیارهای، معیار زیست‌محیطی در نرم‌افزار Expert Choice

زیرمعیار زمین‌شناسی

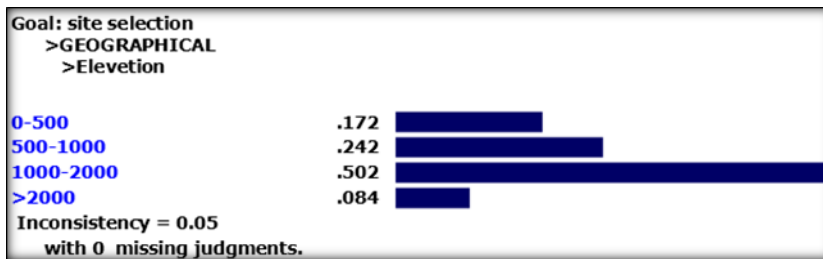
در تعیین زیر معیارهای زمین‌شناسی، فاصله از کانون‌های لغزش و فاصله از گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که در تعیین مکان نیروگاه بادی باید به نقش عوامل فوق توجه نمود. در شکل ۸ مقایسه زوجی زیر معیارهای، معیار زمین‌شناسی در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی ارائه گردیده است که در آن فاصله از کانون‌های لغزشی براساس نظرت کارشناسان وزن ۰/۷۵۰ نسبت به معیار فاصله از گسل‌ها داد چرا که احداث نیروگاه بادی در مناطق لغزشی به دلیل سست بودن زمین باعث آسیب دیدن توربین‌های بادی و کاهش توان استحصال از توربین‌ها خواهد شد. در این مورد نیز ضریب سازگاری صفر شد.



شکل (۸): وزن محاسبه شده زیر معیارهای زمین‌شناسی در نرم‌افزار Expert Choice

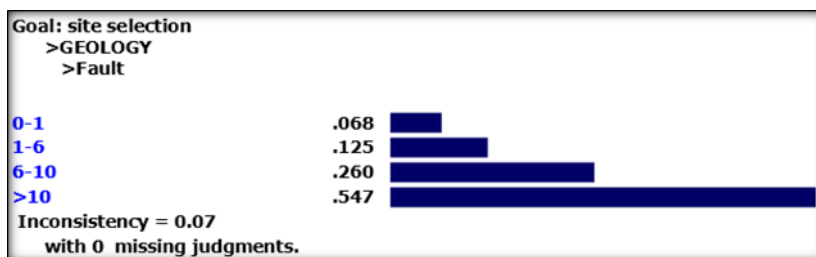
وزن گزینه‌ها

بعد از تعیین وزن زیر معیارها نوبت به تعیین وزن گزینه‌ها می‌شود و اهمیت هر گزینه نسبت به گزینه‌ی دیگر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در اینجا بدلیل تعدد مقایسه‌ها فقط به ۲ مورد از آن‌ها (ارتفاع و گسل) اشاره شده است (جدول ۹ و ۱۰) (شکل ۹ و ۱۰). در جدول ۹ که مقایسه‌های زوجی گزینه‌های ارتفاع در آن انجام گرفته سرعت ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر وزن (۰/۵۰۲) بیشتری را بخود اختصاص داده چراکه بر اساس نظرات کارشناسان امر، ارتفاع مذکور هم از لحاظ سرعت باد و هم از لحاظ حمل تجهیزات حالت متوسط داشته و این امر توان قابل استحصال از توربین بادی را افزایش خواهد داد.



شکل (۹): وزن محاسبه شده گزینه‌های ارتفاع در نرم‌افزار Expert Choice (منبع: نگارندگان).

براساس نظرات کارشناسان فعالیت گسل‌ها می‌توانند باعث وارد آسیب‌های جبران ناپذیری به نیروگاه بادی بشوند بنابراین هرچه در احداث نیروگاه بادی از گسل‌ها فاصله بگیریم نیروگاه بادی همان‌قدر از آسیب‌های ناشی از فعالیت گسل در امان خواهد بود. بنابراین فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر وزن (۰/۵۴۷) را در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی به خود اختصاص داد.



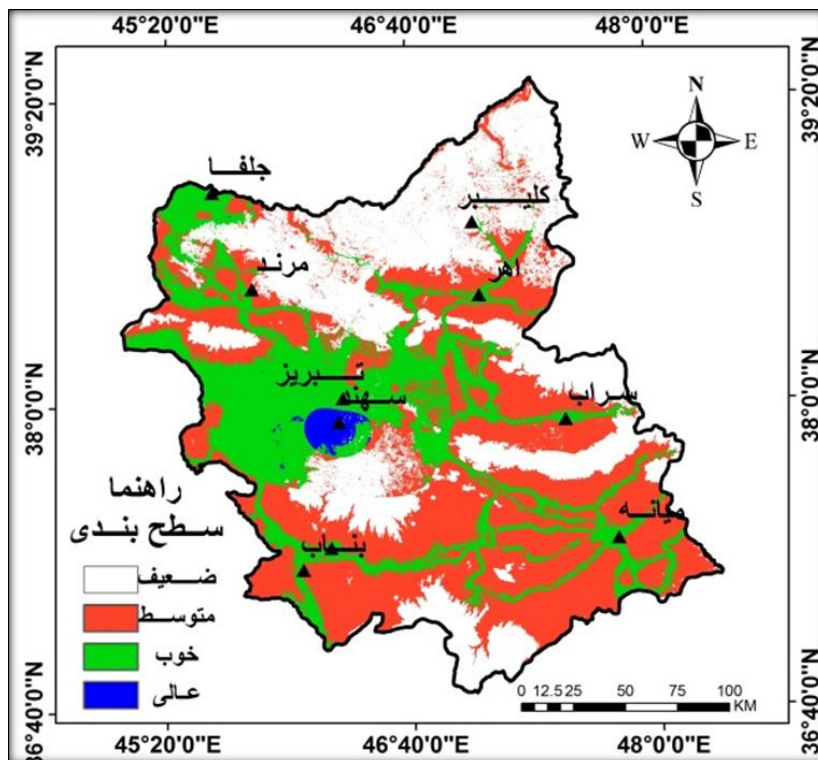
شکل (۱۰): وزن محاسبه شده گزینه‌های گسل در نرم‌افزار Expert Choice

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

پس از تهیه تمام لایه‌های اطلاعاتی و تعیین عوامل موثر در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی و نقش آن‌ها در مکان‌یابی، و با انجام مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های فضایی به کمک GIS به تهیه نقشه‌های فاکتورهای موثر در مکان‌یابی نیروگاه بادی پرداخته شد. پس از وزن‌دهی لایه‌های موثر در مکان‌یابی نیروگاه بادی بر اساس فرایند تحلیل سلسه مراتبی (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. مناطق عالی جهت احداث نیروگاه بادی در منطقه مورد بررسی، در محدوده جنوب شهر تبریز در ایستگاه-های سهند، اسکو و قسمتی کوچکی از شهر آذر شهر با مساحتی بالغ بر ۴۵۳۲۹/۷۵ هکتار قرار دارد. و مناطق خوب با مساحتی بالغ بر ۱۰۹۵۴۳۵/۹۷ هکتار شامل ایستگاه‌های تبریز، اسکو، آذر شهر، بستان‌آباد، شبستر، جلفا، هریس و همچنین به صورت رگه‌هایی در ایستگاه-های میانه، بناب، مراغه، سراب، اهر، چارویماق، مرند و هشترود می‌باشد. این در حالی است که کلاس ضعیف با مساحت بالغ بر ۸۵۳۲۵۵/۷۳ هکتار سطح وسیعی از مناطق جنوب، جنوب، مرکز و شمال غرب منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. در شکل ۱۱ نقشه مکان‌یابی مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه بادی مشخص گردیده است. جدول ۳ مشخصات نقشه مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی را نشان می‌دهد.

جدول (۳): مشخصات نقشه مکان‌یابی

محدوده	ردیف	کلاس	مساحت (هکتار)	درصد از سطح استان
آذربایجان شرقی	۱	ضعیف	۸۵۳۲۵۵/۷۳	۰/۲۲
	۲	متوسط	۱۸۶۵۷۱/۹۶	۰/۴۸
	۳	خوب	۱۰۹۵۴۳۵/۹۷	۰/۲۸
	۴	عالی	۴۵۳۲۹/۷۵	۰/۰۱۱



شکل (۱۱)- نقشه مکان‌یابی مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه بادی

نتیجه‌گیری

در مکان‌یابی سایت توربین‌های بادی بایستی از وجود بادهای غالب و همیشگی مطمئن بوده و در طول مسیر جهت این بادهای کم‌ترین مانع وجود داشته باشد. به علاوه جهت، سرعت و تداوم باد غالب 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 براساس معیارهای مورد نظر و با توجه به نقشه نهایی، مناطق مستعد جهت احداث نیروگاه بادی در سطح استان آذربایجان شرقی شناسایی شدند. نتایج بدست آمده نشانگر پتانسیل بالای شهرهای تبریز، سهند، اسکو، آذرشهر، بستان‌آباد، شبستر، جلفا، هریس، میانه، بناب، مراغه، سراب، اهر، چارویماق، مرند و هشترود برای احداث نیروگاه بادی می‌باشند. این مناطق با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل 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. یافته‌های این تحقیق توانایی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی 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. مکان‌یابی و تحلیل با روش AHP به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا بتوانند بر اساس داده‌های مکانی بهتر تصمیم بگیرند. قدر مسلم است که هر چه از معیارهای بیشتر و دقیق‌تری استفاده شود نتایج بهتری را می‌توان انتظار داشت. علی‌رغم انتقاداتی که بر این روش وارد می‌شود، این روش دارای مزایای بسیاری می‌باشد و جهت استقرار و مکان‌یابی انواع تاسیسات انسانی و زیست محیطی کاربرد فراوان دارد و کارایی‌های خود را به اثبات رسانیده است.

منابع

- امانی، ابوالفضل، حسینی شمعی، عباس (۱۳۸۹)، بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های حوضه آبریز رودخانه ارس جنوبی، *مجله فضای جغرافیایی*، سال دهم، شماره ۲۹، اهر.
- زاهدی، مجید، صلاحی، برومند، جمیل، مجید (۱۳۸۲)، محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، *پژوهش‌های جغرافیایی*، شماره ۵۳، تهران.
- سلطانی، باقر، غلامیان، اصغر، دستجانی فراهانی، کسری (۱۳۸۹)، بررسی پتانسیل انرژی باد در بندر امیرآباد به منظور امکان‌سنجی تاسیس نیروگاه بادی، *نشریه انرژی ایران*، دوره سیزده، شماره ۱۳، تهران.
- عبدلی، حبیب، ساری صراف، بهروز؛ شمعی، 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، اهر.
- محمدی، حسین؛ رستمی جلیلیان، نیما؛ تقوی، فرناز؛ شمسی‌پور، علی اکبر (۱۳۹۱)، پتانسیل-سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، سال چهل و چهار، شماره ۲، تهران.
- نوراللهی، یونس، محمدعلی، اشرف، زمانی، محسن (۱۳۹۰)، پتانسیل انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۴، شماره ۱، تهران.
- Ahmed Shata Ahmed, (2012). Potential wind power generation in South Egypt, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 1528–1536.
- Baban, Serwan M, J, Tim Parry, (2000). Developing and applying a GIS assisted approach to locating wind farms in the UK, *Renewable Energy* 24(1), Pp. 59-71.
- Bennui A, Rattanamanee 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.

- Bertolini, M, Braglia, M, (2006). Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract, *International Journal of Project Management* 24, pp. 422-430.
- 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: 253-263.
- Bowen, William M, (1990). Subjective judgments and data environment analysis in site selection, *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 14, Pp. 133-144.
- Dey, P.K, E.K, Ramcharan, (2008). Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados, *Journal of Environmental Management*. Pp. 1384-1395.
- Kunz, J. (2010). The Analytic Hierarchy Process (AHP), Eagle City Hall Location Options Task Force, pp.1-25.
- 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.
- Moreno-Jimenez, J.M., et al. (2005). A spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making, *Group Decision and Negotiation* 14 89–108.
- Mostafaeipour a, A. Sedaghat b , A.A. Dehghan-Niri c , V.Kalantar. (2011). Wind Energy feasibility study for city of Shahrababak in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p.p 2545- 2556.
- Prabamroong, Ariyawat. , Kasemsan Manomaiphobon, Wanvisa Chanaprasert, and Nuttee ajpreja, (2009). Development of a Gis Decision Support System for Wind Farm Installations in Thailand: Current State and Results. *World Renewable Energy Congress 2009 – Asia*, p.p 690-695.
- Saaty, Thomas L. (1990), *Decision Making for Leaders*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, Thomas L. (1996), *the Analytic Network Process*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Taha, H.A. (2003). *Operations Research*. Pearson Education Inc. Fayetteville.

- Taylor, B.W. (2004). Introduction to Management Science. Pearson Education Inc. New Jersey.
- Yasmina Abdellatif Hamouda, (2012). Wind energy in Egypt Economic feasibility for Cairo. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, p.p 3312- 3319.