



سال ششم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۷  
تاریخ دریافت: ۱۹ / ۱۱ / ۱۳۹۶ تاریخ تأیید نهایی: ۲۲ / ۰۴ / ۱۳۹۷  
صص: ۲۰-۱

## امکان‌سنجی احداث نیروگاه‌های بادی در شمال استان سیستان و بلوچستان

### از دیدگاه شرایط اقلیمی و محیطی

عزیزالله گوهرنیا، کارشناس ارشد آب و هوا شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

محمود خسروی<sup>۱</sup>، استاد اقلیم شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

محسن حمیدیان پور، استادیار اقلیم شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

#### چکیده

کشور ایران پرجمعیت‌ترین کشور منطقه خاورمیانه است بنابراین در روند توسعه خود نیاز به افزایش انرژی دارد و ضرورتاً می‌بایست در برنامه‌ریزی توسعه خود جایگاه ویژه‌ای را برای تأمین انرژی‌های تجدید پذیر در نظر داشته باشد. در این میان، باد به‌عنوان یکی از مظاهر انرژی‌های نو از جایگاه ویژه‌ای با توجه به منابع داده‌های بادی و شرایط توپوگرافی در کشور ایران برخوردار است. در این پژوهش برای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در شمال استان، از فرایند تحلیل سیستم فازی برای وزن دهی به لایه‌ها انتخاب گردید. از سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌منظور تحلیل فضایی و همپوشانی لایه‌ها استفاده شد و بعد از تجزیه و تحلیل اطلاعات، شمال استان سیستان و بلوچستان از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی به مساحت ۷۱۴۲۴۵/۴۹ هکتار، خوب به مساحت ۱۳۰۴۱۲/۰۲ هکتار، متوسط به مساحت ۱۶۳۵۶۵/۳۱ هکتار و ضعیف به مساحت ۶۳۸۸۲۹/۲۵ هکتار تقسیم گردیدند. در نهایت با نحوه آرایش چیدمان توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی در منطقه پژوهش نزدیک به ۳۰۷۱۰۶ توربین بادی قابل نصب می‌باشد. دوره بازگشت سرمایه حدود شش سال و هفت ماه برآورد گردید.

**کلمات کلیدی:** مکان‌سنجی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، نیروگاه بادی، منطق فازی، انرژی‌های

تجدیدپذیر

## مقدمه

کشور ایران پرجمعیت‌ترین کشور منطقه خاورمیانه، واقع در حدفاصل خلیج فارس و دریای عمان در جنوب و دریای خزر در شمال است. اتکای بیش از اندازه کشور ایران به منابع سوخت‌های فسیلی به یک مشکل تبدیل شده و موجب شده است که ایران سالانه ۳۰ میلیارد دلار برای زیرساخت نیروگاه‌های حرارتی بپردازد. این هزینه هنگفت به دلیل ناکارآمدی زیرساخت‌های کهنه و مستهلک نیروگاه‌های سوخت فسیلی از دست می‌رود. تقاضا برای برق در حدود ۶/۵ درصد در سال در حال رشد است. این نرخ در حال حاضر در ایران ۳/۵ برابر سریع‌تر از رشد تولید ناخالص داخلی کشور است (Wheeler, 2016). در بیست‌ویکمین اجلاس بزرگ تغییرات اقلیمی کشور ایران متعهد گردید که تا سال ۲۰۳۰ میلادی برنامه‌اش کاهش ۴ درصدی میزان تولید گازهای گلخانه‌ای باشد و در صورتی که تحریم‌ها برداشته شود مقدار این کاهش به ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت (COP21, 2015). با توجه به تقاضای ۵۰۰ مگاوات برق استان‌های زنجان، نمریز و فراه کشور افغانستان و ۱۰۰۰ مگاوات برق کشور پاکستان که دو کشور هم‌جوار در منطقه مطالعه می‌باشند (سرگلزایی، ۱۳۹۲). به ازای تأمین برق از طریق منبع لایزال الهی انرژی باد در قالب احداث نیروگاه بادی به ترتیب در خصوص تأمین آب دریاچه هامون و امنیت پایدار در مرز کشور اقدام کرد. هدف در این پژوهش به دنبال سؤالات زیر جهت برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیران استانی و ملی از مباحث موردتوجه می‌باشد.

۱. چه مقدار از مساحت منطقه پژوهش با توجه به توربین بادی و انرژی باد،

توانایی نصب برای تولید برق بادی را دارد؟

۲. با توجه به توربین نصب‌شده و انرژی باد، ظرفیت منطقه موردپژوهش از

انرژی بادی چه مقدار است؟

پژوهش‌های زیادی در خصوص امکان‌سنجی و پتانسیل سنجی انرژی باد در

اقلیم‌های مختلف جهان صورت گرفته است. از آن جمله، می‌توان به پژوهش‌های ذیل

اشاره کرد: ونتاس و همکاران (۱۹۹۸) در یونان به بررسی مطالعه انرژی‌های تجدید پذیر بالقوه با استفاده از اطلاعات همچون باد، توپوگرافی، مناطق شهری و... در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی پتانسیل انرژی بادی از نظر اقتصادی مورد مطالعه قرار داده‌اند. رودمن و من‌تمایر (۲۰۰۶) به مطالعه انتخاب مکان‌های مزرعه بادی در منطقه شمال کالیفرنیا با استفاده از GIS بر اساس معیارهای فیزیکی و زیست‌محیطی پرداخته‌اند. هدف از این پژوهش شناسایی مناطق مناسب برای نصب توربین‌های کوچک بادی با استفاده از عناصر اقلیمی همچون سرعت باد و محدودیت‌های محیطی برای برنامه‌ریزان انرژی هست. بنوئی و همکاران (۲۰۰۷) انتخاب مناسب توربین‌های بزرگ را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد مطالعه قرار داده‌اند، در این پژوهش بر اساس پارامترهای مختلف مانند (سرعت باد، ارتفاع، شیب، بزرگراه‌ها، راه‌آهن، مناطق جنگلی، مناطق خوش آب‌وهوا) مناطق مناسب را برای نصب و راه‌اندازی توربین‌های بادی در تایلند مکان‌یابی کرده‌اند. کنتال و همکاران (۲۰۱۰) با ارائه الگوی سیستم فازی و با استفاده از GIS و معیارهای زیست‌محیطی مکان‌سنجی توربین‌های بادی منطقه غرب ترکیه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اف‌تناکوس و هارن (۲۰۱۱) به مطالعه انتخاب مکان‌های مزرعه بادی در ایالت نیویورک با استفاده از تجزیه و تحلیل اطلاعات جغرافیایی و فن‌های تصمیم‌گیری چند معیاره پرداخته‌اند. همچنین لاتینوپولوس و کجوجیا (۲۰۱۵) انتخاب سایت مزارع بادی را بر اساس GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در یونان مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده‌اند. در این پژوهش برای اولین بار از معیارهای مختلف فن‌آوری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی که شامل (معیارهای شناخته‌شده) محدودیت‌ها و عوامل ارزیابی به‌منظور شناسایی پتانسیل انرژی باد برای نصب و راه‌اندازی مزرعه بادی استفاده شده است که نتایج حاصل از این مقاله نقش حمایت‌کننده بالقوه برای برنامه‌ریزان انرژی در کشور یونان به دنبال داشته است. در مطالعه‌ای دیگر در همان منطقه تسوتسو و همکاران (۲۰۱۵) به تحقیق در مورد فرایند مکان‌های پایدار باد در مزارع

بزرگ در جزایر کرت یونان پرداخته شده است. در این مطالعه از یک روش نظامند و قابل انعطاف از تجزیه و تحلیل چند معیاره جهت تقویت تصمیم‌گیرندگان سیاسی و ملی در منطقه بر اساس استراتژی پایدار که هدف پیاده‌سازی یک روش جامع بر اساس ارزیابی و اولویت‌بندی مناطق برای انتخاب سایت نیروگاه‌های بادی پایدار استفاده شده است. کریستی و جسیا (۲۰۱۶) کارایی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به منظور مکانی مناسب برای تولید انرژی تجدید پذیر به کار گرفتند.

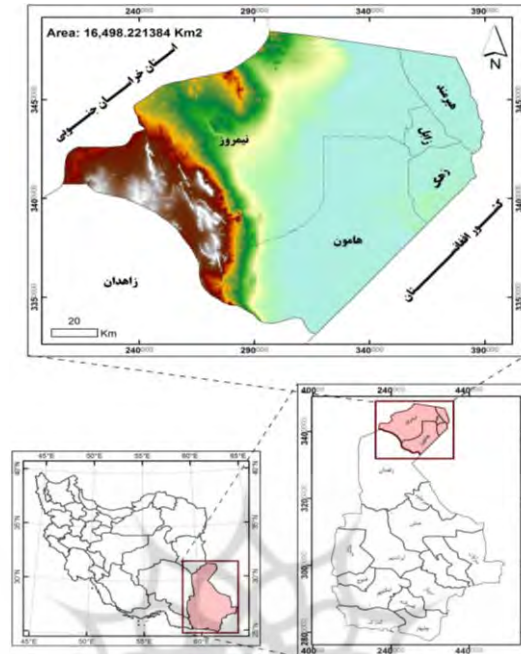
شرق ایران درست در منطقه دشت سیستان، باد به‌ویژه در فصل تابستان شدید است به طوری که هانتینگتون در سفر خود از این منطقه تحت سرزمین بادها یاد می‌کند (به نقل از حمیدیان پور، ۱۳۹۲). این باد موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه (باد سیستان) می‌باشند (حسین زاده، ۱۳۷۶). در فصل بادی سرعت باد در تمام ساعات روز زیاد است (مسعودیان، ۱۳۸۷). در سال‌های اخیر در خصوص ماهیت باد ۱۲۰ روزه سیستان به‌ویژه در مقیاس محلی و میان‌مقیاس مطالعات متعددی انجام شده از جمله می‌توان به مفیدی و همکاران (۱۳۹۲) حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵، الف) و حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵، ب) اشاره داشت. این مطالعات نشان داده است که باد سیستان از مدت و تداوم متفاوتی در طول سال‌های مختلف برخوردار است و ضمن این اینکه این باد از ساختاری چند مقیاسه برخوردار است و تحت تأثیر عوامل محلی و منطقه‌ای و کلان به وجود آمده و از ویژگی‌های خاصی برخوردار است. به‌هرروی این ویژگی‌های منحصر به فرد موهبتی الهی است و می‌توان از آن برای توسعه و آبادانی منطقه از آن بهره برد. همان‌طور که در سطور بالاتر به چندین مطالعه اشاره شد که می‌توان با استفاده از GIS مکان‌های مناسب برای تجهیز مزارع بادی استفاده کرد. بنابراین این مبحث نیز از نگاه اقلیم‌شناسان جغرافیدان دور نبوده و تلاش داشته‌اند با استفاده از روش‌های متعدد به این امر بپردازند. عالم رجیبی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه خود به پتانسیل سنجی انرژی بادی استان سیستان و بلوچستان و تحلیل اقتصادی برای احداث نیروگاه بادی در سه ایستگاه چابهار، دهک سراوان و دلگان پرداخته‌اند. در این تحقیق بر اساس کیفیت

باد و انتخاب نوع توربین، بهینه‌ترین توربین از نوع ۱۰ کیلوواتی در ارتفاع ۴۰ متر پیشنهاد داده شده است. صداقت و همکاری همکاران (۱۳۹۳) در پژوهش خود میزان پتانسیل انرژی باد را برای نصب توربین بادی در استان سیستان و بلوچستان؛ در سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت‌آباد با استفاده از روش آماری - احتمالی تابع توزیع ویبول مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج نشان داد که میانگین سرعت باد و چگالی توان متوسط ماهیانه ایستگاه خاش و نصرت‌آباد برای نصب گسترده‌ی توربین بادی مناسب نیستند؛ اما ایستگاه لوتک از پتانسیل بسیار بالایی برخوردار است. خسروی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به منظور استفاده از توربین بادی با مدل توزیع ویبول پرداخته‌اند. که در این پژوهش با در نظر گرفتن ضریب قدرت باد بیشترین توان تولید به ترتیب ایستگاه‌های دزفول، اهواز و آبادان برای نصب و راه‌اندازی توربین‌های بادی تجاری مناسب هستند. انتظاری و همکاران (۱۳۹۴) با روش فازی به توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی در استان سیستان و بلوچستان پرداخته‌اند که در این روش پس از تلفیق اطلاعات، استان سیستان و بلوچستان را از نظر احداث نیروگاه بادی به چهار منطقه عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم کرده‌اند.

پژوهش‌هایی که قبلاً بر اساس تلفیق اطلاعات انجام شده بیشتر متمرکز بر روی پتانسیل‌سنجی باد و تعیین کلی مناطق به عالی، خوب و ضعیف تعیین گردیده، در حالی که در این پژوهش پس از جمیع جهات لایه‌های مکان‌یابی، مناسب‌ترین مکان نصب توربین بادی مشخص شده است.

### داده‌ها و روش‌شناسی

استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق کشورمان قرار گرفته و با کشورهای افغانستان و پاکستان این استان را از اهمیت بسیاری برخوردار ساخته است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۵).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور

در این پژوهش به منظور دستیابی به اطلاعات اولیه در خصوص باد از آمار ایستگاه سینوپتیک زابل استفاده شده است. سعی شده است در این مقاله از سال‌های جدید که هیچ‌گونه خلاء آماری مشاهده نشده است استفاده گردد. قبل از هرگونه بهره‌گیری از این داده‌های صحت و سقم داده‌های مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای تجزیه و تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های معیارهای فنی (سرعت باد و فاصله از خطوط برق)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب)، زیست‌محیطی (آثار تاریخی، معادن، شهرها، روستاها، تالاب‌ها، کانال‌های آبرسانی، زمین‌های کشاورزی، فرودگاه، گسل‌های زمین‌شناسی)، اقتصادی (فاصله از پست‌های برق، فاصله از جاده‌های اصلی و فرعی) از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 و به منظور بررسی کاربری اراضی از نقشه پوشش و حدنگاری<sup>۱</sup> دشت

سیستان استفاده گردید. همچنین برای وزن دهی به لایه‌ها از منطق فازی استفاده گردید (جدول ۱).

تئوری مجموعه‌های فازی یا منطق فازی به‌عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل‌سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم قطعیت موجود در فرایندهای شناختی انسانی، ابزارهای بسیار کارآمد و مفید به شمار می‌رود (Lootsma, 2005). می‌توان پنج عملگر فازی AND، OR حاصل ضرب جبری فازی، حاصل جمع جبری فازی و عملگرهای فازی گاما را به‌عنوان عملگر روی توابع فازی نام برد (مهدوی و همکاران، ۱۳۹۰). از بین پنج عملگر فازی، بهترین نتیجه را حالت ضرب جبری فازی خواهد داشت. دلیل این امر آن است که کلیه لایه‌های اطلاعاتی با هر درجه عضویتی که باشند، در هم ضرب خواهند شد و ضرب چند عدد کوچک‌تر از یک، سبب تولید یک عدد کوچک‌تر از بقیه خواهد شد (عطایی زاده و چیت‌سازان، ۱۳۸۷).

جدول ۱- منبع تهیه نقشه‌های امکان‌سنجی در منطقه مورد مطالعه

منبع داده‌ها	شرح	لایه داده GIS
استخراج از سایت USGS	ارتفاع	رستر
استخراج از سایت USGS	شیب	رستر
سازمان صنعت و معدن استان	معادن	وکتور (پلی گون)
اداره کل راه، مسکن و شهرسازی	راه‌ها	وکتور (خطی)
فرودگاه زابل	فرودگاه	وکتور (پلی گون)
سازمان جهاد کشاورزی استان	زمینه‌ای کشاورزی	وکتور (پلی گون)
اداره کل محیط‌زیست	دریاچه	وکتور (پلی گون)
اداره کل برق منطقه‌ای استان	پست‌های برق	وکتور (نقطه)
اداره کل راه و مسکن و شهرسازی استان	شهرها	وکتور (پلی گون)
شرکت آب و فاضلاب روستایی و اداره کل بنیاد مسکن روستایی	روستاها	وکتور (پلی گون)
آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان	کانال‌های آبرسانی	وکتور (خطی)
سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدن	گسل‌ها	وکتور (خطی)

یکی از منابع موردنیاز در این مطالعه استفاده از تابع حریم (بافر) است. با در نظر گرفتن معیارهای چندگانه، لایه‌های حریم یا بافر متغیرهای مورد استفاده در امکان‌سنجی مناطق مناسب برای مزارع بادی تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش مقادیر و فواصل حریم‌های هر یک از لایه‌های با در نظر گرفتن اصول فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، توپوگرافی و با استفاده از برآوردها و استانداردهای علمی جهانی مطابق با جدول ۲ تعیین گردیده است.

جدول ۲- منابع و استانداردهای موجود در جهان برای تعیین حریم متغیرهای مورد استفاده

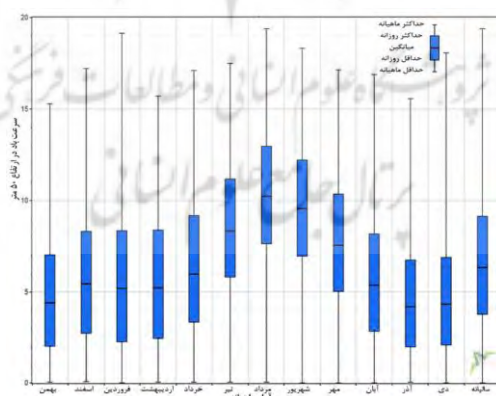
در تهیه نقشه‌های امکان‌سنجی

منبع	حدود محدودیت برای مکان‌یابی	لایه نقشه	معیارها
Farajzadeh,2013	ارتفاع کمتر از ۲۰۰۰ متر	ارتفاع	توپوگرافی
Baban,2001	شیب کمتر از ۵ درصد	شیب	
Fthenakis,2011	۵ متر بر ثانیه	سرعت باد	فنی
Effat,2014	فاصله احداث نیروگاه بادی به خطوط برق ۱۰۰۰ متر	فاصله از خطوط انتقال برق	
Kentel,2010	فاصله سایت مزارع بادی از تالابها ۱۰۰۰ متر	تالابها	زیست‌محیطی
Naguyen,2007	فاصله سایت مزارع بادی از شهر ۲۰۰۰ متر	شهر	
Latinopoulos,2015	فاصله سایت از روستاها ۱۰۰۰ متر	روستا	
Voivontas,1998	فاصله سایت از فرودگاهها ۲۵۰۰ متر	فرودگاه	
Kentel,2010	فاصله سایت از گسل‌های زمین‌شناسی ۱۰۰۰ متر	گسل‌های زمین‌شناسی	
Baban,2001	فاصله سایت از کانال‌های آب‌رسانی کشاورزی ۴۰۰ متر	کانال‌های آب‌رسانی	
Latinopoulos,2015	فاصله سایت از مراکز تاریخی ۱۰۰۰ متر	تاریخی	
Kentel,2010	فاصله سایت از معادن ۱۰۰۰ متر	معادن	
Effat,2014	فاصله سایت از پست‌های برق ۲۵۰ متر	فاصله از پست‌های برق	اقتصادی
GRASSI,2012	فاصله سایت از بزرگراه‌ها و جاده‌های اصلی ۲۴۰ متر و جاده‌های فرعی ۶۰ متر	فاصله از جاده‌های اصلی و فرعی	



## نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مناسب مزارع بادی و در نهایت احداث نیروگاه بادی از چهار معیار کلی مختلف شامل معیارهای فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و توپوگرافی استفاده شده است. در ادامه توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود. معیارهای مکان‌یابی: معیارهای مکان‌یابی معمولاً در قالب چهار گروه مختلف زیست‌محیطی، توپوگرافی، اقتصادی و فنی مورد مطالعه قرار گرفته است. **معیارهای فنی:** معیارهای فنی که شامل زیر معیارهای سرعت باد و فاصله خطوط انتقال برق هست، از معیارهای مهم می‌باشد. زیرا سرعت باد از شاخص‌ترین زیر معیارهای امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی هست و به طور متوسط میانگین سرعت باد سالانه در منطقه پژوهش بیشتر از ۵ متر بر ثانیه می‌باشد (شکل ۲). معیارهای زیست‌محیطی شامل زیر معیارهای، فاصله از شهرها (شکل ۶)، روستاها (شکل ۷)، فرودگاه (شکل ۸)، مناطق تاریخی (شکل ۱۱)، تالاب‌ها (شکل ۵)، گسل‌های زمین‌شناسی (شکل ۹)، کانال‌های آبرسانی (شکل ۱۲) و معادن (شکل ۴) می‌باشد. معیار کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با منطق فازی به ۵ کلاس طبقه‌بندی شده است (جدول ۳).



شکل ۲- نمودار جعبه‌ای تغییرات میانگین ماهیانه سرعت باد ۱۲۰ روزه طی دوره ۱۳۷۹-

جدول ۳- وزن دهی زیر معیارهای کاربری اراضی با استفاده از روش فازی

نام معیار	لایه	کلاس	وزن معیار	مساحت (هکتار)
کاربری اراضی	اراضی بدون پوشش	عالی	۱	۸۲۹۹۵۵/۸۷
	اراضی شور			۳۴۹۵۷/۳۹
	مراعات کم تراکم	خوب	۰/۷۵	۲۸۱۶۰۹/۸۴
	زراعت آبی و باغات			۲۰۹۲۲۹/۷۲
	تپه‌های ماسه‌ای			۲۰۵۹۳/۲۳
	جنگل تنک			۶۱۶۵/۲۹
	جنگل نیمه انبوه	متوسط	۰/۵	۴۷۶۴۹/۶۶
	مراعات نیمه تراکم			۷۸۷/۶۵
	جنگل دست کاشت			۱۰۵۱/۷۳
	سطوح آبی	ضعیف	۰/۲۵	۱۹۷۱۲۷/۱۴۱
	بستر رودخانه	نامناسب	۰/۰۱	۱۵۱۹۶/۴۵
	مناطق مسکونی			۲۴۳۲/۱۶

**معیارهای اقتصادی:** از دیگر معیارهای مهمی که در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی باید به آن توجه داشت، معیارهای اقتصادی است. معیارهای اقتصادی شامل جاده‌های فرعی (شکل ۱۵) و جاده‌های اصلی (شکل ۱۴) می‌باشد.

**معیارهای توپوگرافی:** معیارهای توپوگرافی شامل شیب و ارتفاع می‌باشد. شیب منطقه از عوامل مهم در عملکرد مناسب توربین‌ها و نصب آن‌ها می‌باشد. نقشه شیب با در نظر گرفتن قابلیت‌های متفاوت شیب در ارتباط با شرایط امکان‌سنجی طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری شده و در جدول شماره (۴) نمایش داده شده است.

شایان به ذکر است که کاربری اراضی زمین بیانگر چگونگی استفاده از یک قطعه زمین است. بنابراین در مکان‌یابی احداث مزارع بادی اولویت با نوع کاربری است که اولاً کمترین اثر را بر روی محیط‌زیست داشته باشد و ثانیاً به لحاظ ارزشی (قیمت) از کمترین قیمت برخوردار باشد. بنابراین زمین‌های فاقد پوشش گیاهی و شور که کمترین مورد استفاده در کاربری اراضی برای دولت و مستثنیات می‌باشد برای مکان‌یابی طبق

سیستم فازی بیشترین امتیاز و مابقی لایه‌ها به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در معیار توپوگرافی از آنجایی که هر چه ارتفاع زمین بیشتر شود هزینه‌های جانبی بیشتر شده و همچنین امکان نصب توربین‌های بادی در ارتفاعات به کمتر می‌گردد؛ ضمن اینکه وضعیت حمل‌ونقل تجهیزات را نیز با دشواری روبرو می‌کند و حتی مانع آن نیز می‌گردد. بنابراین شیب ۰ تا ۵ درصد در اولویت اول در سیستم فازی قرار گرفته است.

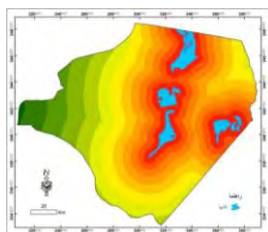
جدول ۴- وزن دهی زیر معیارهای شیب منطقه مورد مطالعه

نام معیار	درجه شیب	کلاس	وزن معیار	مساحت (هکتار)
لایه شیب	۵-۰	عالی	۱	۱۵۲۱۶۱۴/۶۹
	۱۰-۵	خوب	۰/۷۵	۷۵۵۹۷/۰۱
	۱۵-۱۰	متوسط	۰/۲۵	۳۴۱۰۹/۸۰
	بیشتر از ۱۵	نامناسب	۰/۵	۱۹۴۴۷/۹۶

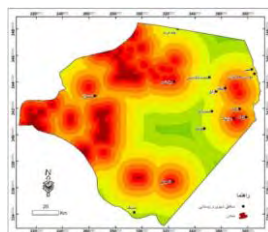
میزان ارتفاع باید مقداری در نظر گرفته شود که انتقال تجهیزات یا به بیانی حمل‌ونقل را با مشکل روبرو نسازد؛ بنابراین نباید میزان ارتفاع به اندازه‌ای باشد که در میزان این توانایی (حمل‌ونقل) تغییرات محسوسی ایجاد نماید. ارتفاع منطقه پژوهش به چهار کلاس طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری شده است (جدول ۵).

جدول ۵- وزن دهی نقشه ارتفاع منطقه مورد مطالعه

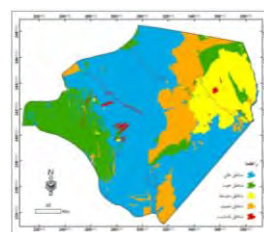
نام معیار	سطح ارتفاع	کلاس	وزن معیار	مساحت (هکتار)
لایه ارتفاع	۵۰۰-۰	عالی	۱	۷۷۶۵۹۳/۷۱
	۱۰۰۰-۵۰۰	خوب	۰/۷۵	۶۰۹۲۰۸/۳۹
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	متوسط	۰/۲۵	۲۶۴۰۰۷/۶۵
	بیشتر از ۱۵۰۰	نامناسب	۰/۵	۱/۴۸



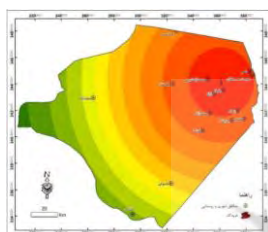
شکل ۵- نقشه حریم  
تالاب‌ها



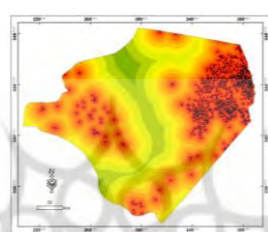
شکل ۴- نقشه حریم  
معادن



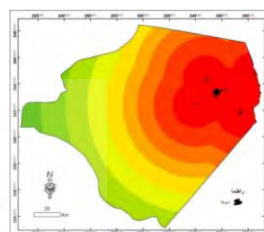
شکل ۳- نقشه کاربری  
اراضی



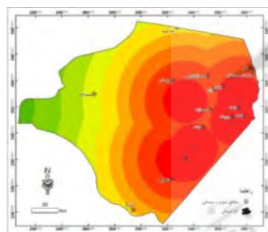
شکل ۸- نقشه حریم  
فرودگاه



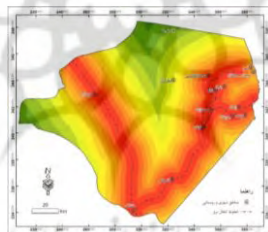
شکل ۷- نقشه حریم  
روستاها



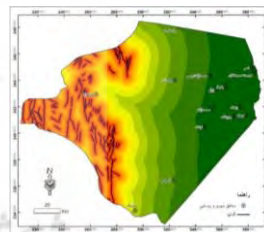
شکل ۶- نقشه حریم  
شهرها



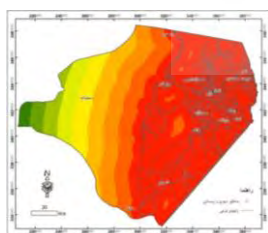
شکل ۱۱- نقشه حریم  
مراکز تاریخی



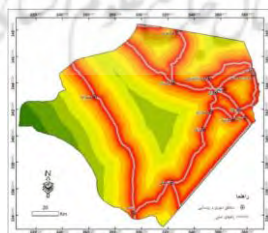
شکل ۱۰- نقشه حریم  
خطوط انتقال برق



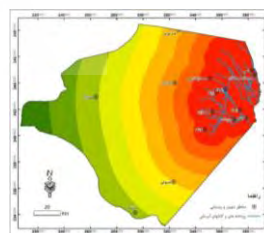
شکل ۹- نقشه حریم  
گسل‌ها



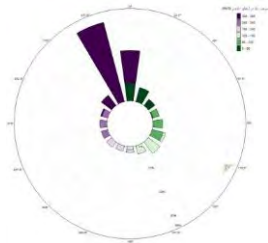
شکل ۱۴- نقشه حریم  
جاده‌های فرعی



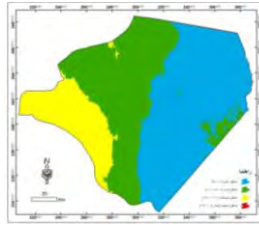
شکل ۱۳- نقشه حریم  
جاده‌های اصلی



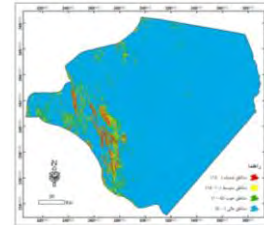
شکل ۱۲- نقشه حریم  
رودخانه‌ها و کانال‌ها



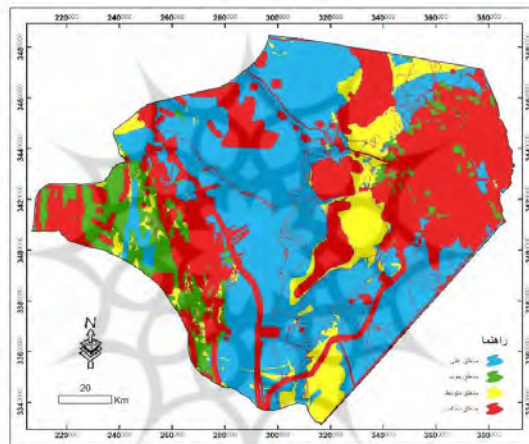
شکل ۱۷- فراوانی گلباد جهت باد ۱۲۰ روزه سیستان



شکل ۱۶- لایه ارتفاعی



شکل ۱۵- نقشه شیب



شکل ۱۸- تهیه نقشه نهایی امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در منطقه پژوهش

جدول ۰۶- مساحت مناطق لایه نقشه نهایی امکان‌سنجی با منطق فازی در منطقه مورد

مطالعه

نام معیار	کلاس	مساحت (هکتار)
لایه تلفیق فازی	عالی	۷۱۴۲۴۵/۴۹
	خوب	۱۳۰۴۱۲/۰۲
	متوسط	۱۶۳۵۶۵/۳۱
	نامناسب	۶۳۸۸۲۹/۲۵

در این مرحله ابتدا نقشه‌های پایه که شامل شیب، ارتفاع و کاربری اراضی می‌باشد بر مبنای منطق فازی کلاس‌بندی شده است و برای لایه‌های مذکور کلاس‌های عالی، خوب، متوسط و ضعیف در نظر گرفته شده و در مرحله بعدی با نقشه‌های معیارهای زیست‌محیطی و معیارهای فنی برای احداث نیروگاه‌های بادی تهیه شده همپوشانی و در نهایت به چهار کلاس مناطق عالی، مناطق خوب، مناطق متوسط و مناطق نامناسب برابر (شکل ۱۸) اولویت‌بندی و طبقه‌بندی گردیده است. برای محاسبه انرژی برق بادی قابل دسترس به عواملی از قبیل مساحت زمین قابل دسترس، نحوه چیدمان توربین بادی و مشخصات فنی توربین جهت مشخص شدن حداکثر تعداد توربین‌ها نیازمند است. بر اساس یک قاعده تجربی فاصله میان توربین‌های بادی در نیروگاه‌های بادی در صورتی که در جهت باد غالب باشند بین ۵ تا ۷ یا ۱۰ برابر قطر روتور توربین بادی خواهد بود. لذا تعداد توربین‌ها در طراحی الگویی چیدمان توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی با قطر روتور ۲۴/۵ در یک کیلومتر مربع ۴۳ توربین می‌باشد. در منطقه عالی پژوهش با مساحت ۷۱۴۲۴۵/۴۹ هکتار می‌توان تعداد ۳۰۷۱۰۶ توربین ۱۰۰ کیلوواتی نصب کرد. تولید برق سالیانه توربین ۱۰۰ کیلوواتی در سرعت‌های مختلف باد طبق اعلام شرکت آولوس انگلستان در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- عملکرد توربین ۱۰۰ کیلوواتی شرکت آولوس (AEOLOS) با سرعت باد متغیر

سرعت باد (متر بر ثانیه)	توان خروجی توربین (کیلووات)	انرژی تولیدی سالیانه (کیلووات ساعت)
۳/۰	۱/۰۱	۳۲۱۴۱
۳/۵	۱/۸۶	۵۷۸۵۷
۴/۰	۳/۱۴	۹۳۰۰۶
۴/۵	۵/۰۰	۱۳۵۶۴۱
۵/۰	۸/۳۰	۱۸۲۸۸۸
۵/۵	۱۲/۴۹	۲۳۱۷۲۸
۶/۰	۱۸/۰۹	۲۸۰۵۲۹
۶/۵	۲۵/۳۸	۳۲۵۰۸۰
۷/۰	۳۴/۶۶	۳۷۱۰۰۷
۷/۵	۴۵/۰۷	۴۱۱۴۸۴

۸/۰	۵۷/۶۶	۴۴۸۴۰۷
۸/۵	۷۰/۹۳	۴۸۱۶۹۸
۹/۰	۸۴/۲۰	۵۱۱۳۴۸
۹/۵	۹۶/۵۵	۵۳۷۳۸۴
۱۰/۰	۱۰۱/۰۶	۵۵۹۸۵۴
۱۰/۵	۱۰۰/۲۸	۵۷۸۸۳۶
۱۱/۰	۱۰۱/۰۸	۵۹۴۴۳۹
۱۱/۵	۱۰۰/۱۳	۶۰۶۸۰۷
۱۲/۰	۱۰۰/۷۹	۶۱۶۱۱۶

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در شمال استان، از فرایند تحلیل سیستم فازی برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب گردید. از سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌منظور تحلیل فضایی و همپوشانی لایه‌ها استفاده شد و بعد از تجزیه و تحلیل اطلاعات، شمال استان سیستان و بلوچستان از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی به مساحت ۷۱۴۲۴۵/۴۹ هکتار، خوب به مساحت ۱۳۰۴۱۲/۰۲ هکتار، متوسط به مساحت ۱۶۳۵۶۵/۳۱ هکتار و ضعیف به مساحت ۶۳۸۸۲۹/۲۵ هکتار تقسیم گردیدند. در نهایت با نحوه آرایش چیدمان توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی در منطقه پژوهش نزدیک به ۳۰۷۱۰۶ توربین بادی قابل نصب می‌باشد. دوره بازگشت سرمایه حدود شش سال و هفت ماه برآورد گردیده است.

با توجه به نتایج پژوهش منطقه موردنظر، تعداد ۳۰۷۱۰۶ توربین بادی می‌توان نصب و راه‌اندازی کرد. شرکت آوولوس انگلستان، که یکی از معتبرترین شرکت‌های تولید و عرضه توربین بادی در سطح جهان است، قیمت پایه هر توربین ۱۰۰ کیلوواتی ۱۰۴۲۰۰ دلار اعلام کرده است که هزینه خرید این مقدار توربین

$$۳۰۷۱۰۶ \times ۱۰۴۲۰۰ \times ۴۰۰۰ = ۱۲۸۰۰۱۷۸۰۸۰۰۰۰۰$$

<sup>۱</sup> تبدیل دلار بر اساس قیمت هر دلار ۴۰۰۰ تومان محاسبه شده است

تومان خواهد شد. بر اساس اعلام وزارت نیرو در سال ۱۳۹۵ که هر کیلووات ساعت انرژی تولیدی از مزرعه بادی را ۴۲۰ تومان تضمینی خریداری می‌کند می‌توان برگشت سرمایه را به صورت زیر محاسبه کرد:

مقدار برق متوسط سالیانه خریداری شده توسط وزارت نیرو از نیروگاه بادی برحسب تومان به صورت زیر محاسبه می‌شود. شرکت آوولوس طبق جدول ۷ برق تولیدی سالانه برای هر توربین ۱۰۰ کیلوواتی با سرعت متوسط ۵ متر بر ثانیه باد را ۱۴۹۱۱۵ کیلووات ساعت اعلام کرده است

$$307106 \times 420 \times 149115 = 1923352669800$$

با توجه به هزینه محاسبه شده خریداری توربین‌های بادی، برگشت سرمایه

$$12800178080000 \div 1923352669800 = 6/6$$

تقریباً حدود شش سال و هفت ماه خواهد شد. برگشت کوتاه مدت سرمایه از نظر اقتصادی یکی از ویژگی‌های مهم این پژوهش است و به سود منطقه و باعث رشد و شکوفایی کشور می‌گردد.

آفرینش کار این صنعت در میان دیگر منابع انرژی از همه بیشتر است در اروپا نصب یک مگاوات برق بادی برای ۱۵ تا ۱۹ نفر کار ایجاد می‌کند که این شمار در کشورهای در حال توسعه به ویژه کشور ایران به راحتی می‌تواند دو تا سه برابر بیشتر از اروپا کار ایجاد شود و با نگرش به اینکه اشتغال‌زایی و دگرگونی اجتماعی در مناطق محروم از مباحث مورد توجه برای توسعه انرژی‌های نو در کشور است. نتایج این مقاله یافته‌های صداقت و رضویه (۱۳۹۳) در رابطه با مناسب بودن ایستگاه لوتک به عنوان یکی از مکان‌های مناسب نصب توربین را تأیید می‌کند ولی محاسبات فنی و توجیه اقتصادی آن با توجه به نتایج این نوشتار کامل می‌گردد. همچنین با توجه به پژوهش انتظاری و اسدی (۱۳۹۴) و مقایسه نتایج آن با یافته‌های کنونی نشان می‌دهد پهنه بندی این پژوهشگران بر پایه سنج‌های استفاده شده نتوانسته با قدرت جداسازی بایسته پهنه‌های شمال استان را آشکار کند. برای اجرایی شدن برنامه‌های به کارگیری توربین‌های بادی



نیاز به در نظر گرفتن تنگناها و سنجه‌های بیشتری بوده که توجیه اقتصادی یکی از آنها است. از این روی دست آوردهای این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی برای اجرایی شدن استفاده از توربین‌های بادی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

### منابع

- انتظاری، علیرضا و اسدی مهدی، (۱۳۹۴)، توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی در استان سیستان و بلوچستان با روش فازی-ای. اچ. پی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۱۸، صص ۸۴-۶۷.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۵)، سالنامه آماری استان سیستان و بلوچستان، سازمان برنامه و بودجه‌ی کشور، ریاست جمهوری.
- جمیل، مجید، کمال عباسپورثانی و اسماعیل خراسانی، (۱۳۸۳)، فاصله بهینه بین توربین‌های بادی در نیروگاه بادی، نشریه انرژی ایران، سال هشتم، شماره ۱۹، صص ۶۳-۵۵.
- حسین‌زاده، سیدرضا، (۱۳۷۶)، بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال دوازدهم، شماره ۳، شماره پیاپی ۴۶، صص ۱۲۷-۱۰۲.
- حمیدیان‌پور، محسن، عباس مفیدی و محمد سلیقه، (۱۳۹۵)، الف، تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۰، شماره ۱۰، صص ۱۰۹-۸۳.
- حمیدیان‌پور، محسن، عباس مفیدی، محمد سلیقه، و بهلول علیجانی، (۱۳۹۵)، ب، نقش توپوگرافی بر شبیه‌سازی ساختار باد سیستان در شرف فلات ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال شانزدهم، شماره ۴۳، صص ۵۳-۲۵.
- خسروی، محمود، محمد ابراهیمی و محمود بهروزی، (۱۳۹۵)، بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به منظور استفاده از توربین‌های بادی، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال ۶، شماره پیاپی ۲۲، صص ۴۲-۲۹.

سازمان آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۵)، معاونت فنی و اجرایی.

#### گزارشات و طرح‌های تحقیقاتی

سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، مدیریت امور اراضی، (۱۳۹۵)،  
واحد حدنگاری زمین.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معادن استان سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۵)، معاونت  
فنی، واحد نقشه.

سازمان صنعت، معدن و تجارت استان سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۵)، معاونت بخش  
معادن.

سرگلزایی، غلامرضا، (۱۳۹۲)، "ظرفیت‌های بی‌نظیر سیستان و بلوچستان برای تولید  
انرژی‌های نو"، روزنامه خراسان، مورخ شنبه ۱۳۹۲/۱۰/۰۷، شماره انتشار ۱۸۵۸۶،  
صداقت، احمد و سیدامین رضویه، (۱۳۹۳)، پتانسیل سنجی انرژی باد برای نصب  
توربین بادی در استان سیستان و بلوچستان، فصلنامه مهندسی مکانیک شریف،  
دوره ۳-۳۰، شماره ۲/۲، صص ۲۹-۲۱.

عزیزی، علی، حمیدرضا جعفری، بهرام ملک محمدی و فرامرز خوش‌اخلاق،  
(۱۳۹۳)، مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتب  
فازی و تحلیل شبکه در استان اردبیل، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی،  
سال چهاردهم، شماره ۳۴.

عطایی‌زاده، سمیه و منوچهر چیت‌سازان، (۱۳۸۷)، امکان‌سنجی تغذیه مصنوعی با  
استفاده از تکنیک‌های GIS، همایش ژئوماتیک، ۲۲-۲۳ اردیبهشت‌ماه، سازمان  
نقشه‌برداری کشور، تهران.

مفیدی، عباس، محسن حمیدیان پور، محمد سلیقه و بهلول علیجانی، (۱۳۹۲)، تعیین  
زمان آغاز، خاتمه و طول مدت وزش باد سیستان با بهره‌گیری از روش‌های  
تخمین نقطه تغییر، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره هشتم، صص ۸۷-۱۱۲.

مسعودیان، ابوالفضل، (۱۳۸۷)، اقلیم‌شناسی ایران. انتشارات دانشگاه اصفهان. چاپ اول.

مهدوی، عاطفه، محمدرضا نوری امام‌زاده‌یی، رسول مهدوی نجف‌آبادی و سیدحسن طباطبائی، (۱۳۹۰)، مکان‌یابی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی به روش منطق فازی در حوزه آبریز دشت شهرکرد، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال پانزدهم، شماره ۵۶، صص ۷۶-۶۷

۶۷

- Catalina, C., and Jocea, F.A., .2016. GIS application for wind energy. Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO. Energy Procedia 85 (2016) 132 – 140. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.28.
- Baban, M.J. 2001, Developing A Geoinformatics-Based approach to locate wind farms in the Caribbean region, using Trinidad and Tobago as a case study, Proceedings of the Second Caribbean Environmental Forum and Exhibition (GEF-2), Parallel Session 15: Appropriate Environmental Technologies and Systems, At Trinidad.
- Fthenakis,V, Haaren, R.V. 2011, GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis(SMCA):Evaluating the case for New York State, vol 15, pp:3332-3340.
- Bennui,A, Rattanamanee,P, Puetpaiboon,U, Phukpattaranont, P and Chetpattananondh, K, 2007, Site S1election for large wind Turbine using Gis, PSU-UNS international conference on Engineering and Enviroment-ICEE-2007, Phuket May 10-11.
- Effat, H. A. 2014, spatial modeling of optimum zones for wind farms using remote sensing and Geographic information system, application in the red sea, eygpt, Journal of Geographic information system, vol 6,pp: 358-374.
- Farajzadeh, M, Taghilo, A, 2013, the wind energy potential zoning using GIS and fuzzy MCDM- based Approach (study Area: zanzan province,iran),vol. 20(2),pp: 45-60.
- Fthenakis,V, Haaren, R.V. 2011, Gis-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis(SMCA):Evaluating the case for New York State, vol 15, pp:3332-3340.
- Grassi, S, Chokani, N, Abhari,R.S. 2012, Large scale technical and economical assessment of wind energy potential a GIS, Energy Policy, vol 45, p 73-85.

- Kentel, E, Duzgun, S and Nazli Yonca, A, 2010, GIBased environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from western Turkey, vol.14, pp: 364-373.
- Latinopoulos, D, Kechagia, K, 2015, A Gis- based multi- criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece, vol 78, pp: 550-560.
- Lootsma, F. A. 2005, Fuzzy Logic for Planning and Decision Making, Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- Nguyen, K. Q. 2007, wind energy in Vietnam: resource assessment, development status and future implications, vol 35, pp: 1405-1413.
- Rodman, L. C. Meentemeyer, R. K. 2006, A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California, vol 34, pp: 2137-2149.
- Rhodes, Christopher J. The 2015 Paris climate change conference, 2016, Mar, Science Reviews 2000 Ltd, cop21, vol 99, pp: 97-104.
- Tsoutsos, T, Tsitoura, I, kokologos, D and kalaitzakis, K, 2015, Sustainable siting process in Large Wind Farms Case study in Crete, Renewable Energy, vol 75, pp: 474-480.
- Voiontas, D, Assimacopoulos, D and Mourelatos, A, Corominas, J, 1998, Evaluation of Renewable Energy potential using a GIS decision support system, Renewable Energy, vol 13, No. 3, Pp: 333-344.
- Wheeler, E, Desai, M, 2016, Iran, vs Renewable Energy Potential, Middle East Institute, Article Section.