

# مکان‌یابی توربین‌های بادی مبتنی بر ارزیابی فضایی زیست‌محیطی (نمونه موردی: استان خراسان رضوی)

حسین آقاجانی<sup>۱</sup>، مهدی فتاحی مقدم<sup>۲</sup>، هدی اکبری<sup>۳</sup>، رضا فتاحی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۷/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۳/۱/۱۷

## چکیده:

افزایش جمعیت و استانداردهای زندگی باعث افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی شده است. مصرف سوخت‌های فسیلی اثرات منفی شدیدی روی محیط زیست دارد. بنابراین، بسیاری از کشورها در سراسر جهان، در برنامه‌های آتی انرژی خود سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را قرار داده‌اند که می‌تواند انرژی قابل اعتماد و سازگار با محیط زیست را تولید کند. هدف از این مطالعه، ایجاد یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مکان‌یابی از توربین‌های بادی با استفاده از ابزارهای کاربردی سیستم اطلاعات جغرافیایی است. پتانسیل انرژی باد و سازگاری با محیط زیست به عنوان معیارهای تصمیم‌گیری اساسی در فرایند مکان‌یابی استفاده شده است. اهداف فازی محیطی مانند "قابل قبول از نظر سطح سروصدا"، "قابل قبول از نظر زیستگاه پرندگان"، "قابل قبول از نظر ایمنی وزیبابی‌شناسی" و "امن از نظر ذخایر طبیعی" مرتبط با توربین‌های بادی بر اساس تحقیقات قبلی مشخص شده و هر یک از این اهداف توسط مجموعه‌های فازی نشان داده شده است. درجه رضایت فرد از هر یک از این اهداف زیست محیطی محاسبه می‌شود. سپس این رضایت‌های فردی در یک درجه رضایت کلی با استفاده از عملکردهایی مانند (and)، (or) و "میانگین مرتب شده وزنی" تجمیع و در نهایت، نقشه‌های سازگار با محیط زیست در محیط Arc GIS با استفاده از این درجات تهیه گردید.

## کلمات کلیدی:

انرژی‌های تجدیدپذیر، باد، سیستم اطلاعات جغرافیایی، زیست‌محیطی، مکان‌یابی

Aqajani\_h@yahoo.com

mfattahi80@yahoo.com

h.akbari.geo@gmail.com

fattahi@ut.ac.ir

۱) دانشجوی دکتری برنامه ریزی شهری دانشگاه اصفهان و عضو هیات علمی جهاد دانشگاهی مشهد

۲) کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS (نویسنده مسئول)

۳) کارشناس ارشد جغرافیا و برنامه ریزی روستایی

۴) دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی و فضای سبز، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

## مقدمه

امروزه مصرف سوخت‌های فسیلی بدون در نظر گرفتن اثرات منفی آنها بر روی محیط زیست در حال افزایش است. در صورتی که روند جاری ادامه یابد، تا سال ۲۰۳۰ تقاضای جهانی برای انرژی دو برابر خواهد شد. نیمی از افراد متقاضی انرژی در هند و چین ساکن خواهند بود.<sup>۱</sup> در حال حاضر، حدود دو سوم انرژی بالقوه در مسیر تولید، توزیع، ذخیره و مصرف هدر می‌رود.<sup>۲</sup> پیش‌بینی می‌گردد که تقاضا برای تمامی سوخت‌ها افزایش یابد [۱]. روند جهانی، تمرکز بر روی سیستم‌های انرژی پایدار برای حفظ توسعه اقتصادی پیوسته و توسعه پایدار زیست محیطی می‌باشد. تعریف انرژی پایدار ترکیبی از تأمین انرژی به طور مساوی برای همه مردم و حفاظت از محیط زیست برای نسل‌های آینده است. با توجه به این تعریف، سیستم انرژی جدید باید پاسخگوی نیازهای جمعیت فعلی و آینده باشد [۳۱]. سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (RES) دارای یک تأیید مشترک (عمومی) به عنوان شکلی از انرژی پایدار هستند که نگرانی‌های اخیر را در نظر دارند [۲۷]. با دها در نتیجه توزیع نابرابر حرارت خورشیدی در اطراف جهان رخ می‌دهند. سرعت و جهت باد می‌تواند بر طبق ویژگی‌های توپوگرافی متفاوت باشد [۹]. همانند دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر، مردم از نیروی باد برای قرن‌ها تا عصر صنعت مدرن بهره گرفته‌اند و این موجب شده است تا مردم به گسترش منابع انرژی قابل اطمینان‌تر از سوخت‌های فسیلی روی آورند [۳]. به هر حال، بحران نفت که در اواسط دهه ۱۹۷۰ رخ داد، کشورها را به سرمایه‌گذاری بیشتر در منابع جدید انرژی برای از بین بردن وابستگی به سوخت‌های فسیلی تشویق کرده است [۱۵]. بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، وابستگی به کشورهای دیگر برای تولید انرژی را کاهش می‌دهد. انرژی باد در مقایسه با سوخت‌های فسیلی موجب خسارات زیست محیطی کمتری می‌شود. یکی از اثرات مفید انرژی باد بر محیط زیست، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای Co<sub>2</sub> است [۱۱]. توربین‌های بادی علاوه بر اینکه نیرو تولید می‌کنند، هیچگونه گازهای گلخانه‌ای در جو تولید نمی‌کنند. با این وجود، هنوز برخی اثرات منفی روی جامعه و محیط زیست وجود دارد [۱۷]. اولین استفاده شناخته شده از انرژی باد مربوط به کاربرد در قایق‌های بادی است. ملوانان باستانی نیروی لیفت را می‌شناختند و روزانه از آن استفاده می‌کردند اگر چه هیچ توضیحی علمی برای آن نداشتند. اولین آسیاب‌های بادی برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب به کار گرفته شده بود. این فناوری نقش بسیار مهمی در توسعه آسیاب‌های بادی دارد. نخستین مستندات مربوط به طراحی این آسیاب‌های بادی نیز مربوط به ایرانیان می‌باشد که پره‌های آن یا اصطلاحاً بادبان‌های آنها از جنس چوب و یا نی بوده که با تیرهای افقی به یک محور عمودی متصل می‌شدند مطابق شکل (۱) که به عنوان یکی از قدیمی‌ترین استفاده‌های از

1) International Energy Agency 2007

2) The Economist 2008c

انرژی پاک در منطقه خراسان رضوی، شهرستان خواف و روستای نیشتمان می‌باشد. علاوه بر این، نیروگاه بادی بینالود از مزارع بادی جدیدی است که در این استان با توجه به ظرفیت‌های طبیعی ایجاد شده است.



شکل (۱) تصویری از بادگیرهای قدیمی

به طور عمومی، اثرات زیست محیطی انرژی بادی که به طور مشترک توسط دانشمندان پذیرفته شده‌اند عبارتند از تأثیرات روی زیستگاه حیوانی مثل برخورد‌های پرنده (با توربین‌های بادی)، تولید سروصدا، تأثیرات بصری، مسائل ایمنی و تداخل‌های الکترومغناطیس [۷]. تیغه‌های دوار توربین‌های بادی باعث تار شدن تصویر در چشمان پرندگان شده و آنها تصور می‌کنند مسیری را که طی می‌کنند امن است و این امر باعث برخورد پرنده با توربین بادی می‌شود [۲۵].

به منظور جلوگیری از برخورد پرنده، توربین‌های بادی باید در فواصل معینی از مسیر پرندگان نصب شوند. توربین‌های بادی باید حداقل ۵۰۰ متر دورتر از نواحی حفاظت شده حیات وحش نصب شوند [۴۰]. پیشنهاد دیگر آن است که توربین‌های بادی حداقل ۳۰۰ متر دورتر از زیستگاه پرندگان نصب شوند تا بتواند پرندگان را از برخورد محافظت کند [۱۲]. تأثیر بیشتر انرژی بادی روی زیستگاه، تولید سر و صدا می‌باشد. هر چند که قوانین و آیین‌نامه‌هایی از نظر سطح قابل قبول تولید سر و صدا وجود دارد، اما این امر به توسعه جوامع بستگی دارد. گرچه به توافق رسیدن در میزان سر و صدای تولید شده آسان نیست [۳۵]. مقامات مختلف، ضوابط متفاوتی دارند (در مورد سر و صدا) که یکی از آنها این است که توربین‌های بادی باید حداقل ۵۰۰ متر دورتر از نزدیکترین زیستگاه قرار گیرد [۳۱]. تأثیرات بصری یکی دیگر از عوارض جانبی توربین‌های بادی است که بین افراد متفاوت است. از آنجایی که انرژی باد، انرژی پاکی ایجاد می‌کند، بعضی از مردم از دیدن آنها لذت می‌برند؛ از سوی دیگر، برخی افراد می‌توانند این مساله را مطرح کنند که نصب توربین‌های بادی مغایر چشم انداز شهری است [۲۸]. طبق [۸]، توربین‌های بادی باید ۲۰۰۰ متر دورتر از شهرک‌های بزرگ به خاطر اهمیت مساله

زیبایی چشم‌اندازها واقع شوند. هر چند تعدادی از حوادث جدی که رخ می‌دهد، ناشی از ضعف مدیریت یا عدم رعایت قوانین ایمنی است، زیرا انرژی بادی از دیدگاه ایمنی به طور کلی خوب محسوب می‌شود [۳۵].

ویویتاس و دیگران [۳۳] پیشنهاد داده اند که کمترین فاصله از شهرها باید ۱۰۰۰ متر باشد به دلایل ایمنی و اینکه این قبیل ضوابط در کاهش اثرات بصری تاثیرگذار است. همچنین سیستم‌های باد انرژی بادی در ویتنام مورد مطالعه قرار گرفته است و به این نتیجه رسیده‌اند که ایجاد یک منطقه حائل ۲۰۰۰ متری در اطراف مراکز شهرها برای توسعه انرژی باد با توجه به مساله ایمنی و ملاحظات بصری نامناسب است [۲۶]. یکی دیگر از محدودیت‌هایی که لازم است مورد توجه واقع شود، انتخاب موقعیت توربین‌های بادی در ارتباط با مجاورت آنها در مناطق فرودگاه به دلایل امنیتی و وضوح دید می‌باشد [۲۶]. یک پیشنهاد دیگر آن است که توربین‌های بادی باید حداقل ۲۵۰۰ متر دورتر از فرودگاه قرار گیرند. اساساً این محدودیت برای حفظ ایمنی پرواز و زندگی بشر است [۲۶]. در اولین مسافت ۳۰۰۰ متری نباید هیچ ساختمانی از قبیل بیمارستان‌ها، مدارس یا ساختمان‌های عمومی دیگر که ممکن است باعث بازتاب شود، وجود داشته باشد. در دومین مسافت ۳۰۰۰ متری، ساختمان‌هایی با ارتفاع کمتر از ۴۵ متر اجازه استقرار دارند [۱۴]. علاوه بر این، توربین‌های بادی باعث تداخل انرژی الکترومغناطیس و سیستم‌های ناوبری مخابراتی می‌شوند [۱۷]. گرچه ممکن است گاهی نصب توربین‌ها، به روی سیگنال‌های تلویزیون و رادیو واقع که در ۳-۲ کیلومتری تأثیر بگذارد، شبکه‌های کابلی یا خط دید فرستنده‌های ماهواره مایکروویو اثر تداخل الکترومغناطیس انرژی باد را از بین می‌برند [۱۶]. هر چند که اثرات زیست محیطی انرژی باد به طور محسوس، نسبت به سایر سیستم‌های انرژی متداول، قابل قبول‌تر است [۳۲]. بنابراین، قبل از نصب سیستم‌های انرژی بادی، تجزیه و تحلیل جامع به منظور شناسایی مکان‌های مناسب باید انجام گیرد.

در ایران نیز در این زمینه تحقیقاتی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

در مقاله‌ای با عنوان "مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS که به بررسی استان خوزستان از نظر قابلیت احداث نیروگاه‌های بادی می‌پردازد، استان خوزستان از این نظر به ۴ بخش ضعیف، متوسط، خوب و عالی تقسیم شده است [۳]. همچنین امیر گندمگار به ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران پرداخته و نهایتاً بر اساس یافته‌های این پژوهش، ایستگاه‌های سینوپتیک مناطق مختلف ایران، از نظر سرعت وزش باد، در چهار گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند [۴].

پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز عنوان پژوهشی دیگری است که در این زمینه انجام شده است. در این مقاله، هدف دستیابی به عوامل لازم جهت انتخاب محل‌های مناسب مزارع بادی در برق منطقه‌ای باختر به منظور ارائه معیارهایی بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و انتخاب مکانی مزارع بادی با استفاده از این معیارها در برق منطقه‌ای باختر می‌باشد [۵].

سیستم اطلاعات جغرافیایی، سهم قابل توجهی به عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری در شناسایی مکان‌های سازگار با محیط زیست مانند مکان‌یابی توربین‌های بادی که به مدیریت و تجزیه و تحلیل طیف گسترده‌ای از انواع داده مکانی نیازمند است، دارد. همچنین GIS هر دو ابزار فنی و توسعه چارچوب تحلیل را ارائه می‌کند. سطح پیچیده GIS را می‌توان با توجه به هدف تغییر داد. این امر ممکن است به منظور ارائه نقشه، برای محققان مورد استفاده قرار گیرد یا ممکن است داده‌هایی برای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی مشخص فراهم کند [۳۰]. پتانسیل انرژی باد و نگرانی‌های مختلف زیست محیطی باید توأمان در شناسایی مکان‌های مناسب برای توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گیرد. تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاری مکانی (MCDA) یکپارچه شده با GIS اجازه ترکیب اطلاعات (داده‌های) جغرافیایی با ترجیحات تصمیم‌گیرندگان را به منظور ارائه ارزیابی کل از چندین معیار متعارض و ناسازگار می‌دهد [۲۰]. بنابراین تجزیه و تحلیل GIS ممکن است به تعیین مناطق مناسب بر اساس ضوابط خاص به پیشرفت‌های آینده کمک کند [۲۱]. در این مطالعه، روش تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر GIS برای انتخاب امکان‌پذیرترین مکان مناسب برای نصب توربین‌های بادی بر اساس معیارهای مختلف ارائه شده است. نوآوری در این زمینه استفاده از تابع OWA در مکان‌یابی توربین‌های بادی است. تابع عملگر OWA در ایجاد دامنه وسیعی از گزینه‌های تصمیم‌گیری برای نشان دادن عدم اطمینان، در ارتباط با اثر متقابل چندین معیار به کار می‌رود. مزیت و تمایز روش OWA با سایر روش‌ها این است که سناریوهای مختلف مناسب مکان‌یابی را در مقیاس بین صفر و یک نشان می‌دهد. سناریوهای OWA برای تعیین کمیت سطوح ریسک پذیری (خوشبینانه، بدبینانه و خنثی) در نظر گرفته می‌شوند و همچنین به منظور تسهیل درک بهتر الگوهای که از گزینه‌های تصمیم‌گیری دخیل در فرایند تصمیم‌گیری پدیدار می‌شوند که از آخرین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیار است. از طریق تصمیم‌گیری چند معیاره یک شاخص عملکرد زیست محیطی کلی، برای هر مکان جایگزین (گزینه) و ترکیب شده با پتانسیل انرژی باد هر منطقه، به دست آمده است.

### معرفی منطقه

طبق آخرین تقسیمات کشوری، خراسان رضوی دارای وسعتی حدود ۱۱۶۴۹۳ کیلومتر مربع، معادل ۷ درصد از کل مساحت کشور است. این استان در منتهی الیه شمال شرق کشور و از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۳۰° ۳۳ تا ۴۱° ۳۷ عرض شمالی و ۱۹° ۵۶ تا ۱۸° ۶۱ طول شرقی قرار دارد. ۴۹/۲ درصد وسعت استان مناطق کوهستانی و ۵۰/۸ درصد به صورت دشت و ۳۳۱۶ متر اختلاف ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقطه استان (بلندترین نقطه استان قله بینالود با ۳۶۱۵ متر و پست‌ترین نقطه در دشت سرخس با ارتفاع ۲۹۹ متر از سطح دریا) می‌باشد. غلبه اقلیم خشک و سرد بیابانی با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد از ویژگی‌های اقلیمی آن است [۲].

## روش

در ارتباط با مکان‌یابی توربین‌های بادی، گام اول شناسایی و کمی‌سازی اهداف زیست‌محیطی است. سپس داده‌های مربوط به اهداف زیست‌محیطی، مرزها و مکان‌های بالقوه و همچنین پتانسیل باد جمع‌آوری و در GIS به منظور به دست آوردن لایه‌های داده‌های فضایی مورد استفاده در روند مکان‌یابی، پردازش گردید.

در مرحله بعد، اهداف زیست‌محیطی شناسایی شده به صورت مجموعه‌های فازی نشان داده شده است. توابع عضویت این مجموعه‌های فازی برای محاسبه درجه رضایت فرد از هر مکان بالقوه برای هر هدف زیست‌محیطی در محیط GIS استفاده شده است. درجه رضایت فرد از هر هدف زیست‌محیطی با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی برای هر مکان بالقوه محاسبه گردیده است. به موازات این، پتانسیل انرژی باد، به عنوان یک مجموعه فازی و تابع عضویت از این مجموعه فازی برای تولید نقشه پتانسیل مکانی استفاده از انرژی باد در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشان داده شده است.

### شناسایی و تعیین اهداف زیست‌محیطی

اهداف زیست‌محیطی مرتبط با تولید انرژی بادی از طریق بررسی متون و سؤال از قوانین و مقررات دولتی شناخته شده است. این اهداف با معیارهای مشخص، کمی گردیده است. معیار یکی از جنبه‌های قابل اندازه‌گیری یک قضاوت است که آن را برای مشخص کردن و تعیین کمیت گزینه‌ها در فرایند تصمیم‌گیری، ممکن می‌سازد [۱۳، ۳۴].

اهداف زیست‌محیطی و معیارهای شناسایی مرتبط از طریق بررسی متون در جدول (۱) ارائه و وزن‌های مربوط به اهداف و معیارها با کمک روش AHP محاسبه شده است.

### جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

برای مکان‌یابی نیاز است لایه‌های مختلف نقشه جمع‌آوری شوند. این لایه‌ها شامل مناطق حفاظت شده، شیب، ارتفاع، پتانسیل سرعت باد (ارتفاع ۶۰ متری از سطح زمین)، مناطق اسکان، جاده‌ها، گسل و... می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه به شبکه‌های منظم با اندازه معینی (۲۵۰\*۲۵۰ m) تقسیم می‌شود و هر کدام از این شبکه‌ها به عنوان یک منطقه دارای پتانسیل برای نصب توربین‌های بادی در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه، معیار مرتبط با هر هدف زیست‌محیطی نیاز است که به وسیله نقشه‌های معیار نشان داده شود. به عنوان مثال، در لایه نقشه مجاورت با شهر پذیرفته شدن از نظر بحث ایمنی و زیبایی شناسی برای شهر با محاسبه هر شبکه به نزدیک‌ترین شهر در منطقه مورد مطالعه آماده می‌شود. به طور مشابه، لایه‌های مختلف نقشه برای هر هدف زیست‌محیطی با استفاده از معیارهای داده شده آماده می‌گردد.

## آماده سازی اهداف زیست محیطی به صورت مجموعه های فازی

هدف دیگر محیط زیست این است که برای تولید برق، یک طرح مناسب از نظر ایمنی و زیبایی شناسی ارائه دهد که در جدول (۱) دیده می شود. معیارهای متفاوتی برای مراکز بزرگ اسکان شهری، روستاها و راهها و ... تنظیم شده است.

سر و صدا عامل دیگری است که باید در محیط ارزیابی شود. سطح سر و صدای یک توربین بادی که قدرت ۱MW دارد، انتظار می رود که در مسافت ۳۰۰ متری از ۴۵ dB باشد.

مسیر مهاجرت پرند و طول امتداد این مسیر برای استقرار توربین های بادی مناسب نیستند. تالابها و مناطق حفاظت شده، محل اصلی سکونت پرندگان است که باید حداقل ۲/۵ کیلومتر از نظر اکولوژی و توپوگرافی، منطقه حائل وجود داشته باشد تا مناطق حفاظت شده را حمایت کند.

جدول (۱) وزن بندی معیارهای استاندارد شده فازی جهت مکان یابی توربین های بادی

اهداف	وزن هدف	معیارها	وزن معیار	نقاط کنترل	تابع عضویت فازی
عوامل جغرافیایی	۰,۱۸۵	مناطق حفاظت شده	۰,۰۷۵	a=۱۰۰۰, b= 3000	Linear – increasing
		فاصله از رودخانه	۰,۰۲۵	a=۱۰۰۰, b= 5000	Sigmoidal – increasing
		فاصله از تالاب	۰,۰۲۵	a=۱۰۰۰, b= 3000	Sigmoidal – increasing
		فاصله از گسلها	۰,۰۴۷	a=۲۵۰۰, b=4000	Sigmoidal – increasing
عوامل اجتماعی-اقتصادی	۰,۱۱۴	فاصله از شهر	۰,۰۳	a=۲۰۰۰, b=10000	Linear – increasing
		فاصله از روستا	۰,۰۲	a=۱۵۰۰, b=3000	Linear – increasing
		فاصله از راهها	۰,۰۷	a=500, b=2۰۰۰, c=10000, d= 20000	Sigmoidal-symmetric
		شبکه انتقال برق	۰,۰۴۸	a=۲۵۰۰, b=10000	Linear – decreasing
اقلیم	۰,۵۸۱	سرعت باد (ارتفاع ۶۰ متری)	۰,۵۶	a=۳, b=6.5	Sigmoidal – increasing
جغرافیایی	۰,۱۸۵	ارتفاع	۰,۰۷۵	a=۱۰۰۰, b=2000	Linear – decreasing
		شیب (درجه)	۰,۰۲۵	a=۱۵, b=35	Linear – decreasing

### محاسبه درجات رضایت فرد

توابع عضویت تولید شده برای محاسبه درجه رضایت فرد از هر مکان بالقوه برای هر هدف زیست محیطی استفاده می‌شود. برای محاسبه و ذخیره تمام اطلاعات موردنیاز برای درجه رضایت فرد از هر هدف زیست محیطی فازی، یک لایه جداگانه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شده است. برای مثال، در لایه مربوط به "قابل قبول از نظر سر و صدا" اطلاعات مرتبط با نواحی مسکونی ذخیره شده است، اطلاعات مرتبط با مناطق مسکونی نباید جمعیت منطقه مسکونی را از نظر صداهای ایجاد شده توسط توربین‌های بادی بر هم بریزد. میزان رضایت شخصی از هر هدف زیست محیطی فازی برای هر شبکه با استفاده از داده‌های ذخیره شده در این لایه‌ها ارزیابی می‌شود. توابع عضویت هدف زیست محیطی فازی برای تعیین میزان تحقق این اهداف برای هر محل بالقوه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این درجات رضایت شخصی در پایگاه داده GIS در ستون جداگانه‌ای ثبت (ذخیره) می‌شود. شکل (۱) اهداف زیست محیطی فازی را نشان می‌دهد.

### تصمیم‌گیری چند معیاره

این تصمیم‌گیری برای ارزیابی مجموعه‌ای از گزینه‌ها که از معیارهای متعارض و ناسازگار استخراج شده است، استفاده می‌شود. تصمیم‌گیری چند معیاری (MCDM) به دو زیر گروه تقسیم می‌شود: تصمیم‌گیری چند صفتی (MCDM) و تصمیم‌گیری چند هدفی (MODM). تصمیم‌گیری چند معیاری MADM و MODM به زیر طبقه‌هایی شامل مسائل تصمیم‌گیری منفرد و تصمیم‌گیری گروهی دسته‌بندی می‌شوند که این دو دسته نیز در قالب تصمیمات قطعی، احتمالی و فازی قابل تفکیک هستند [۲۰].

در این مطالعه، عملکردهای تجمیع OR، And و میانگین مرتب شده وزنی (OWA) به عنوان ابزار تصمیم‌گیری چند هدفی (MODM) در ارزیابی گزینه‌ها، با توجه به اهداف مختلف زیست محیطی فازی، استفاده می‌شود. به طور معمول، بیشترین عملگرهای تجمعی که استفاده می‌شود عملگرهای and و or است. آنها برای نشان دادن دو حالت کرانی (حد غایی): "رضایت‌مندی از همه معیارهای موردنظر" و رضایت‌مندی از هر یک از معیارهای موردنظر به ترتیب استفاده می‌شوند. با این حال، در برخی از موارد، ممکن است تصمیم‌گیرندگان بخواهند تجمعی که بین این دو حالت کرانی (حد غایی) واقع شده، انجام دهند. برای چنین مواقعی [۳۷] تابع OWA را که ترکیبی از عملگرهای and و or و به نام عملگر "orand" است، پیشنهاد داد. منطق این کاربرد به جمع صفات است؛ نه به میانگین وزنی کلاسیک، بلکه به وسیله موقعیت مرتب شده صفات.

عملگر t-norms: and راهی است برای اعمال عملگرهای "anding"، برای تصمیم‌گیرندگان که تمایل به برآورد



کردن همه معیارها دارند. عملگرهای t-norms، اجرای تجمیع مجموعه‌های فازی را قادر می‌سازد.

به عبارت دیگر، اگر یکی از گزینه‌ها درجه رضایت فرد دارد، ارزیابی میزان رضایت کلی صفر را بر می‌گرداند. برای مثال، اگر تصمیم گیرندگان، رضایت همه  $n$  معیار را بخواهند،  $\bar{F}_i$ ،  $i=1, \dots, n$ ، این به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$D = \bar{F}_1 \cap \bar{F}_2 \cap \dots \cap \bar{F}_n$$

علامت نوار روی حروف بزرگ برای نمایش مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود.

عملگر "OR": t-Conorms عملگرهای تجمیع هستند که در ارتباط با عملگرهای "oring" هستند. اگر تصمیم گیرندگان رضایت هر یک از معیارها را بخواهند، با t-Conorms می‌توان این هدف را به دست آورد. برای این منظور، عملگر اجتماع به منظور ارتباط معیارها، به شرح زیر استفاده می‌شود [۳۶].

$$D = \bar{F}_1 \cup \bar{F}_2 \cup \dots \cup \bar{F}_n$$

میانگین مرتب شده وزنی (OWA): مفهوم تجمیع OWA اولین بار توسط یاگر [۳۷] پیشنهاد گردید. این عملگر روشی برای رتبه بندی معیارها و پرداختن به عدم اطمینان اثر متقابل آنها است (Yager, 1998). توانایی روش OWA در این است که آن منجر به درجه بندی پیوسته سناریوهایی بین عملگر اشتراک (ریسک ناپذیری) و عملگر اجتماع (ریسک پذیری) می‌شود. این درجه بندی پیوسته به وسیله وزن سراسری (کلی) و محلی انجام شده است. وزن‌های سراسری ابتدا بر اساس قضاوت تصمیم گیرندگان و یا از طریق مقایسه زوجی برای کنترل سطح جبران پذیری معیارها نسبت به معیارهای دیگر تعیین می‌شوند در حالی که وزن‌های محلی به طور تدریجی اضافه شده و حذف معیارها و قدرت نفوذ برای کنترل سطح عدم اطمینان و ریسک پذیری فراهم می‌کند. در پیاده سازی مکانی، OWA با  $i$ -امین مکان (پیکسل رستر) و مجموعه‌ای از وزن‌های مرتب شده  $v = v_1, v_2, \dots, v_n$  تعریف شده است. به طوری که:

$$\sum_{j=1}^n v_j = 1 \quad v_j \in [0, 1] \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

مجموعه مقادیر خصوصیات معلوم  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$  در  $i$ امین مکان یک مجموعه از  $n$  معیار نقشه به وسیله رسترها نشان داده می‌شود:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n v_j z_{ij} \quad (2)$$

که توالی  $Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{in}$  به وسیله دوباره مرتب کردن مقادیر خصوصیات  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$  در ترتیب صعودی به دست می‌آید. مقدار خصوصیت ویژه  $a_{in}$  با وزن خاص  $v_n$  مربوط نمی‌باشد اما ترجیحاً  $v_n$  مرتبط با یک مکان مرتب شده خاص از عناصر متراکم (جمع شده) می‌باشد. به عنوان مثال، در یک موقعیت خاص از مقادیر خصوصیت وزن مرتبه اول،  $v_1$ ، با پایین‌ترین مقدار خصوصیت مناسب برای  $i$  امین مکان اختصاص داده می‌شود،  $v_2$  به مقدار خصوصیت مناسب پایین بعدی برای  $i$  امین مکان اختصاص داده شده در حالی که  $v_n$  به بالاترین مقدار خصوصیت مناسب برای  $i$  امین مکان تخصیص داده می‌شود. اجتماع OWA هنگامی به دست می‌آید که وزن‌های دوباره مرتب شده تعیین می‌شوند به وسیله مقادیر خصوصیت که با مجموعه وزن‌های مرتب شده ترکیب شده‌اند. برای نشان دادن OWA، باید تک تک پیکسل با درجات (نمرات) عامل  $a_{ij} = (0.5, 0.2 \text{ and } 0.9)$  و مجموعه‌ای از وزن‌های ترتیبی مرتبط  $v_j = (0.5, 0.3 \text{ and } 0.2)$  با معلوم بودن ورودی‌ها، عوامل دوباره مرتب شده برای این پیکسل از مقدار حداقل تا حداکثر: به صورت  $Z_{i1} = 0.2$  و  $Z_{i2} = 0.5$  و  $Z_{i3} = 0.9$  می‌باشد. برای این پیکسل ترکیب مقادیر خصوصیت وزن‌های ترتیبی به این صورت که:  $(0.9, 0.3, 0.2) = 0.43$ ،

$$OWA = (0.9, 0.3, 0.2) + (0.5, 0.3, 0.2)$$

سطوح جبران‌پذیری بین معیارها به طور مستقیم به وسیله وزن‌های ترتیبی کنترل می‌شوند [۲۲]. این به وسیله وزن‌های ترتیبی مختلف حاصل می‌شود که در عوض، فرایند تراکم پیوسته غیرخطی تولید می‌کند.

وزن‌های ترتیبی  $v = [v_1, v_2, \dots, v_n]$  که در آن  $v_n$  رتبه ترتیبی را نشان می‌دهد،  $v_{\min} = [1, 0, \dots, 0]$  برای عملگر AND،  $v_{\max} = [0, 0, \dots, 1]$  برای عملگر OR و  $v_{\text{mean}} = [1/n, 1/n, \dots, 1/n]$  برای میانگین حسابی که جوابی مشابه WLC تولید می‌کند. تمایز و برتری عملگر OWA نسبت به روش‌های تجمیع دیگر بر اساس این واقعیت است که وزن‌ها به معیارها، نه بر اساس یک عنصر خاص، بلکه بر اساس موقعیت مرتب شده (خاص) تخصیص داده می‌شود [۳۷]. ارزیابی نسبی وزن‌های ترتیبی سطح ریسک مرتبط با AND و OR، را می‌توان در پیوستگی بین AND و OR از طریق معادلات (۳، ۴ و ۵) در OWA به دست آورد.

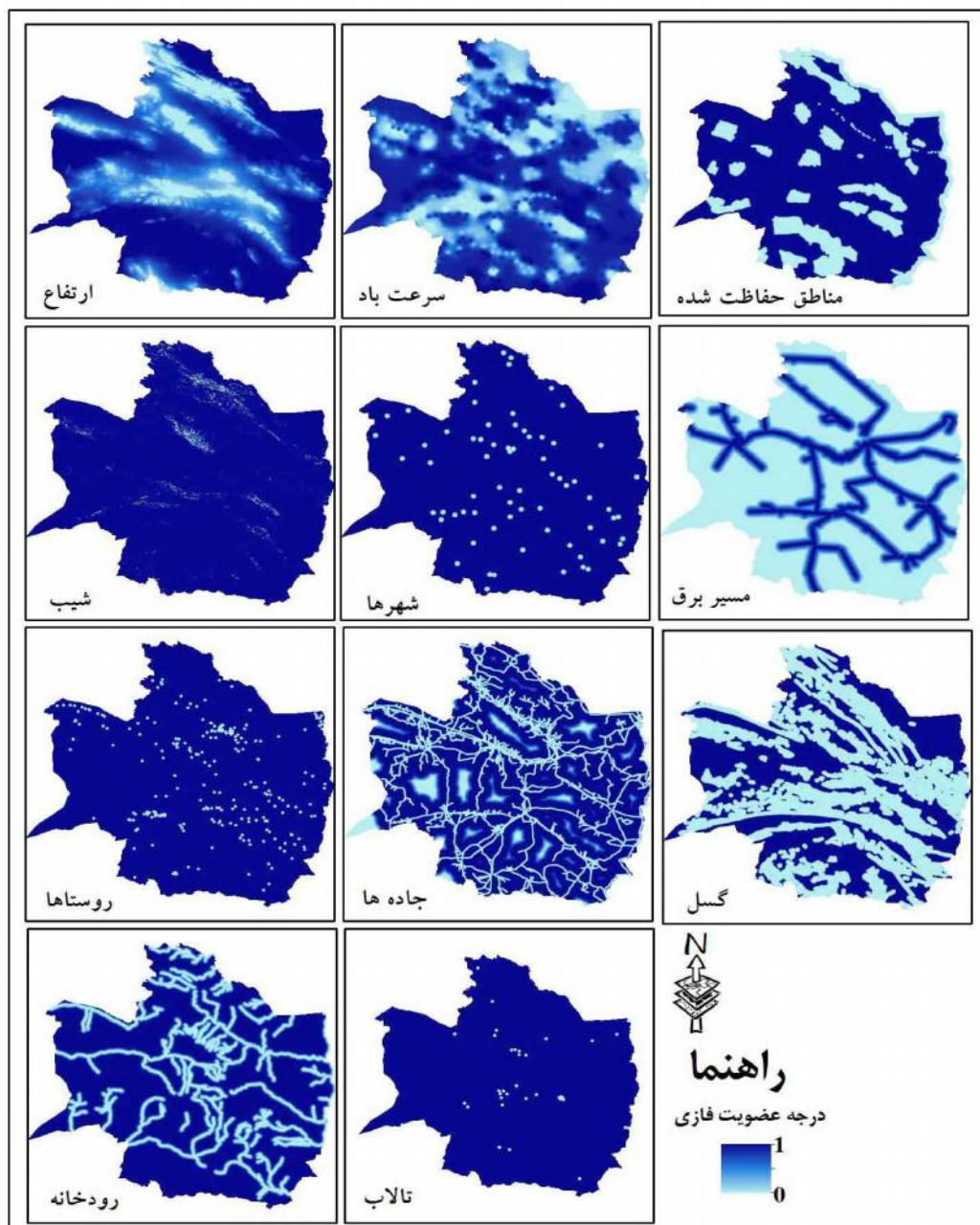
$$ANDness = \frac{1}{n-1} \sum_r (n-r)w_r \quad (3)$$

$$ORness = 1 - ANDness \quad (4)$$

$$TRADE-OFF = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_r (w_r - 1/n)^2}{n-1}} \quad (5)$$

که  $n$  تعداد معیارهاست،  $r$  ترتیب معیارهاست و  $w_r$  وزن هر معیار در  $r$  امین ترتیب است. در این معادلات، ANDness درجه‌ای که عملگر OWA شبیه به AND منطقی است را اندازه‌گیری می‌کند در حالی که

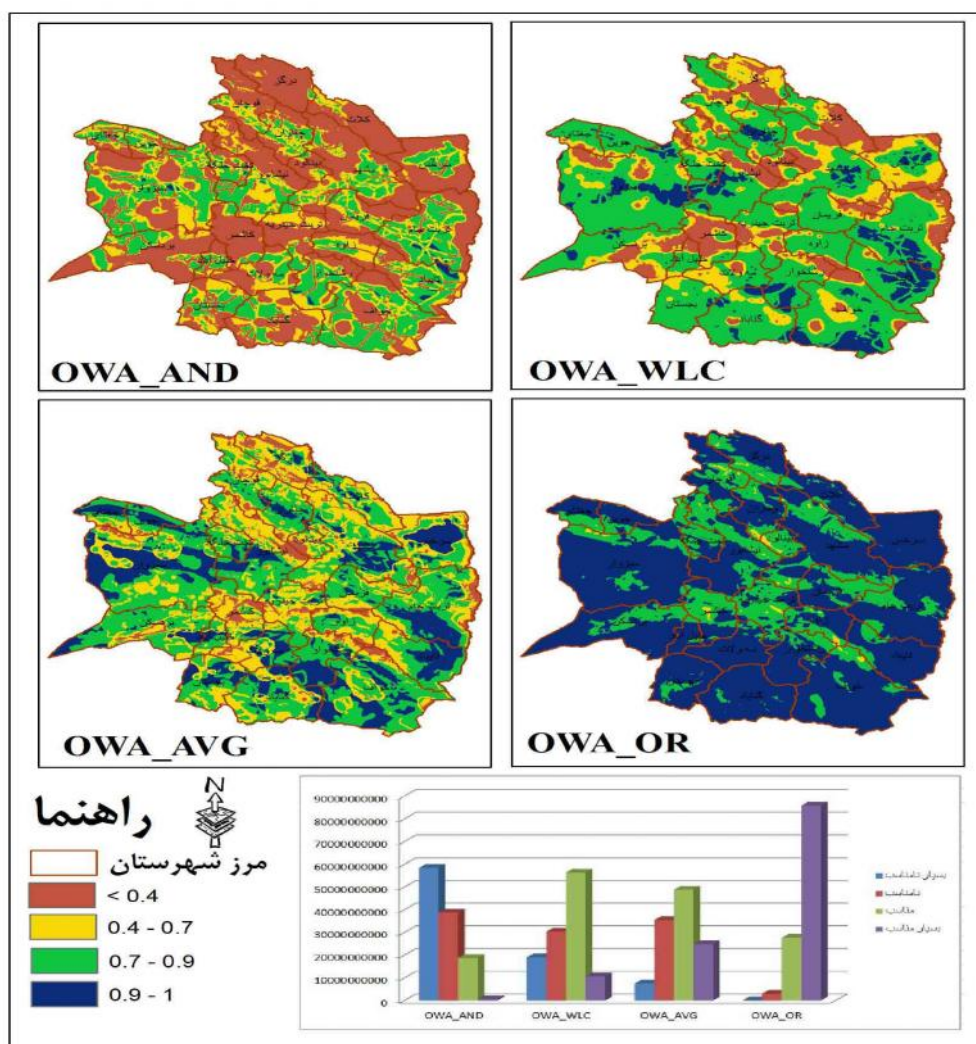
درجه‌ای که عملگر OWA شبیه به OR منطقی است، اندازه‌گیری می‌کند [۱۸،۲۹]. درجه پراکندگی وزن‌ها را سطح TRAD-OFF کنترل می‌کند که اندازه جبران کردن (جبرانپذیری) را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نقشه معیارهای استاندارد شده فازی به منظور مکان‌یابی توربین‌های بادی

## نتایج

طبق شکل (۳) مقادیر OWA حاصل در هر یک از سناریوها به چهار گروه بسیار نامناسب (کمتر از ۰,۴)، نامناسب (۰,۴-۰,۷)، مناسب (۰,۷-۰,۹) و بسیار مناسب (۰,۹-۱) طبقه‌بندی شده است. مقایسه یک به یک نقشه‌ها در شکل (۳) نشان می‌دهد که به تدریج وزن‌های ترتیبی پایین و پایین‌تر به مقادیر بالاتر شاخص‌ها اختصاص داده می‌شوند در حالی که وزن‌های ترتیبی بالا و بالاتر به مقادیر پایین شاخص‌ها با توجه به مکان معین اختصاص داده می‌شوند. به عنوان یک نتیجه، اندازه نواحی مناسب برای استفاده از انرژی بادی و نصب توربین بتدریج بیشتر و بیشتر می‌شود.



شکل (۳) نقشه طبقه‌بندی شده مکان‌های مناسب توربین‌های بادی

جدول ۲) وزن‌های ترتیبی و میزان ریسک پذیری

TRAD-OFF	ORness	ANDness	وزن‌های ترتیبی	روش
۰	۰	۱	(۱، ۰، ۰، ۰)	AND
۱	۰/۵	۰/۵	(۰/۰.۲۵/۰.۲۵/۲۵، ۰/۲۵)	WLC
۰/۹۴	۰/۵	۰/۵	(۰.۰۰/۵، ۰/۵، ۰)	AVG
۰	۱	۰	(۱، ۰، ۰، ۰)	OR

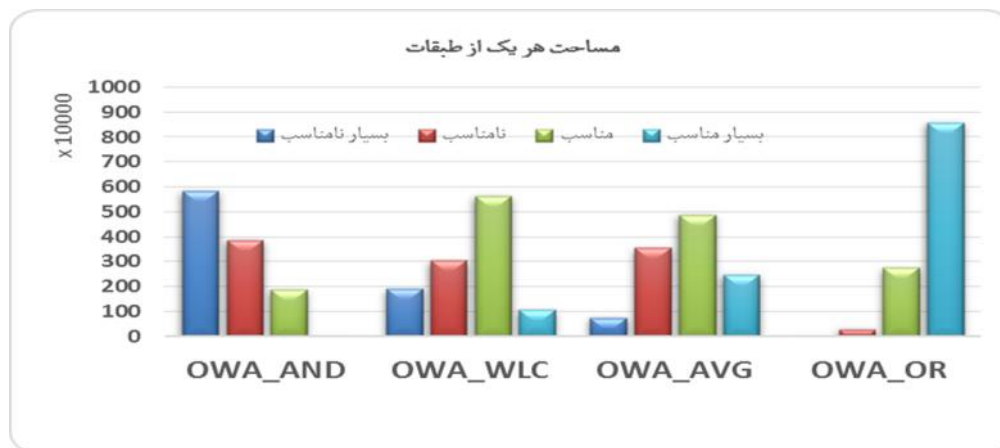
گزینه تصمیم‌گیری OWA\_AND با عملگر AND مرتبط است و یک جواب ریسک‌گریزی تولید می‌کند. طبق این گزینه، مناسبترین نواحی در غرب و جنوب خراسان واقع شده‌اند. محدوده تربت جام تا خواف، رشتخوار، بجستان و سپس سبزواری و جوین بر اساس این عملگر جزء مناسبترین مناطق جهت نصب و راه‌اندازی سیستم تولید برق بادی می‌باشند.

جواب‌ها با گزینه‌های تصمیم‌گیری WLC و OWA\_AVG به ترتیب با عملگرهای WLC و AVG مرتبط بوده و در وسط ریسک پیوسته قرار می‌گیرند و آنها نه جواب‌های مخالف ریسک‌اند و نه ریسک‌پذیر هستند. با این حال، جواب AVG کمی متفاوت از WLC است، زیرا تقریباً جبران‌پذیری را با این جواب اجازه می‌دهد. مقایسه نقشه‌های متناظر در شکل (۳) نشان می‌دهد که گزینه AVG ناحیه وسیع‌تری برای مکان‌یابی تولید می‌کند.

عملگر OR در نهایت تضاد از جواب AND است. نواحی مناسب برای مکان‌یابی با این گزینه وسعت فضایی زیادی را در بر می‌گیرد و شامل انواع کاربری زمین می‌شود. در نهایت، در آخر این زنجیره جواب OR است که بیشتر نواحی ورودی را به عنوان مکان مناسب برای مکان‌یابی توربین‌های بادی با حداکثر ریسک توصیه می‌کند.

جدول ۳) طبقه‌بندی مقادیر OWA جهت شناسایی مکان‌های مناسب توربین‌های بادی

OWA_OR	OWA_AVG	OWA_WLC	OWA_AND	مساحت گروه (هکتار)
1319.0	749184.7	1901753.8	5841657.1	بسیار نامناسب
300657.2	3542042.3	3037743.9	3872348.2	نامناسب
2763109.5	4872577.5	5641130.9	1872477.8	مناسب
8583775.1	2484898.6	1068028.1	62094.7	بسیار مناسب



شکل ۴) نمودار ستونی مقادیر OWA جهت شناسایی مکان‌های مناسب توربین‌های بادی

بر اساس جدول (۲)، در عملگر AND، بیشترین سطح در گروه بسیار نامناسب قرار می‌گیرد که با حرکت به سمت عملگر OR از میزان آن کاسته شده و در عوض بر سطح گروه بسیار مناسب افزوده می‌گردد (آستانه افزایش در عملگر OR در نمودار فوق، کاملاً مشهود است).

در گروه مناسب نیز دو عملگر WLC و AVG به ترتیب، بالاترین سطح را شامل شده‌اند و همان‌طور که در مطالب فوق، توضیح داده شد، این دو عملگر در وسط ریسک پیوسته قرار می‌گیرند که از نظر مکان‌یابی، عملگر AVG ناحیه وسیع‌تری برای مکان‌یابی، ایجاد می‌کند.

میزان تغییرات در گروه نامناسب در سه عملگر AND، WLC و AVG چندان محسوس نیست ولیکن در عملگر OR از سطح آن بشدت کاسته شده است. این مطلب گواه بر این امر است که در نهایت، جواب OR ریسک‌پذیر بوده و بیشترین مساحت بسیار مناسب را جهت مکان‌یابی برای نصب توربین‌های بادی ارائه می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

این مقاله روش ارزیابی چند معیاره زیست محیطی در محیط GIS برای تعیین و تخمین پتانسیل مکان‌های مطلوب احداث مزارع توربین‌های بادی در استان خراسان رضوی را ارائه می‌کند. به طور خاص، این مطالعه کاربردی از روش‌های تجمیع AHP/OWA برای تولید طیف گسترده‌ای از گزینه‌های تصمیم‌گیری برای مسائل مکان‌یابی مزارع توربین‌های بادی مناسب ارائه کرده است. روش AHP برای ارزیابی اهمیت معیارها و ایجاد وزن‌های کلی استفاده می‌شود که در ارتباط با وزن‌های محلی در روش OWA برای تولید گزینه‌های تصمیم‌گیری استفاده می‌شوند. از نقاط قوت این روش، توانایی یکی کردن مجموعه داده‌های همگن مانند معیارهای کیفی و کمی با استفاده از دانش تخصصی، انعطاف‌پذیری لازم AHP/OWA شامل عدم قطعیت از طریق تابع عضویت فازی و نظرات کارشناسان است. در مکان‌یابی مکان‌های احداث مزارع توربین‌های بادی باید از وجود بادهای با سرعت و تداوم مناسب و نبود موانع محیطی مطمئن گردید. در این پژوهش از معیارهایی شامل مناطق حفاظت شده، شیب، ارتفاع، پتانسیل سرعت باد (ارتفاع ۶۰ متری از سطح زمین)، مناطق



اسکان، جاده‌ها و گسل در مکان‌یابی مکان‌های احداث مزارع توربین‌های بادی استفاده شده است. با توجه به یافته‌های این تحقیق، توان سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی و همچنین کمک به برنامه‌ریزی محیطی با قابلیت ترکیب معیارهای کمی و کیفی در مقیاس‌های مختلف به خوبی قابل مشاهده است. مکان‌یابی و تحلیل با روش‌های AHP و تصمیم‌گیری چند معیاره به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا بر اساس داده‌های مکانی، تصمیم‌گیری بهتری بویژه در موضوع انرژی‌های تجدیدپذیر در راستای توسعه پایدار داشته باشند.

## منابع

- [۱] تای - چی. و، یوئن.ب، (۱۳۹۲)، برنامه‌ریزی شهر اکولوژیک، سیاست‌ها، تجارب و طراحی، رهنما، محمد رحیم، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد
- [۲] رهنما، محمد رحیم. آقاجانی، حسین. (۱۳۹۰)، مطالعات آمایش خراسان رضوی، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد
- [۳] گندمکار، امیر. (۱۳۸۸)، ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، ۱۰۰-۸۵
- [۴] مرشد، ج. برنا، ر. اصغری پوردشت بزرگ، ا. احمدی، ه. ظاهری عبده‌وند، ز. (۱۳۸۹)، مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS، مجله کاربرد سنجش ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برنامه‌ریزی فصلنامه، سال اول، شماره ۲، زمستان، ۱۱۱-۹۷
- [۵] نوراللهی، ی. اشرف، م.ع. زمانی، م. بهار (۱۳۹۰)، پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴، شماره ۱، ۲۲-۲
- [6] Ackermann T. Soder L. 2000. *Wind Energy Technology and Current Status: a Review*. Renewable and SustainAble energyReviews ,pp. 4:315-74.
- [7] Anthrax: General Information [Online] <http://www.windpowerworks>. Net, available 30.12.08.
- [8] Baban S.M.J, Parry T. Renewable Energy. 2001. "Developing and Applying a GIS-Assisted Approach to Locating Wind arms in the UK"; 24 pp. 59-71.
- [9] Brower M. *Cool energy*. Cambridge, MA:1992. The MIT Press.
- [10] C\_obancioglu, Bekir Turhan. 2009. *Personal Communication*. February 17, 2009, Ankara, Turkey.
- [11] Caralis G. Perivolaris Y. Rados K. Zervos A. 2008. *On the effect of spatial dispersion of wind power plants on the wind energy capacity credit in Greece*. Environmental Research Letter; 3: 3-15.
- [12] Clarke A. 1991. *Wind energy progress and potential*. Energy Policy, 19: 742-55.
- [13] Eastman J.R, Jiang H, Toledano J. 1993. *Multicriteria and multiobjective decision making for land allocation using GIS*. In: Beinat E, Nijkamp P, editors. Multicriteria Analysis for Landuse Management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 227-51.
- [14]. *General Directorate of Civil Navigation*. 2007. Notice of construction criteria around the airports.
- [15] *International Energy Agency*. 2006. *Renewable energy: RD&D priorities insight from IEA technology programs*. Paris, France: IEA.
- [16] *International Energy Agency*. 1987. *Renewable Sources of Energy*. Paris, France: IEA.

- [17] International Energy Agency. 2003. *Renewables for power generation status and prospects*. Paris, France: IEA.
- [18] Jiang, H., Eastman, R.J. 2000. *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*. International Journal of Geographical Information Systems 14, 173–184.
- [19] Malczewski J. 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis: Evaluation Criteria and Criterion Weighting*. John Wiley & Sons, Inc. 392 pp.
- [20] Malczewski J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc:1999.
- [21] Malczewski J. 2006. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: *GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis*. Applied Earth Observation and Geoinformation; 8:pp. 270-7.
- [22] Malkoc, Yu“ ksel. 2009. *Personal Communication*. February 17, 2009, Ankara, Turkey.
- [23] Ministry of Environment and Forestry.1994. Legislation of Wetland Protection published .
- [24] Ministry of Forestry and Agriculture.1986. Legislation of National Parks.
- [25] Morrison M.L, Sinclair K. 2004. *Wind energy technology, environmental impacts of*. Encyclopedia of Energy 2004; 6: pp.435-48.
- [26] Nguyen K.Q. 2007. *Wind energy in Vietnam: resource assessment, development status and future implications*. Energy Policy 2007; 35: 1405-13.
- [27] Omer AM. *Green energies and the environment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008; 12: pp.1789-821.
- [28] Ramirez-Rosado I.J, Garcia-Garrido E, Fernandez-Jimenez A, Zorzano-Santa-maria P.J, Monteiro C, Miranda V. Renewable Energy. 2008. “Promotion of new wind farms based on a decision support system”;33:pp.558-66.
- [29] Rinner C. Malczewski J. 2002. “Web-enabled spatial decision analysis using Ordered Weighted Averaging (OWA)”. Journal of Geographical Systems 4, pp.385-403.
- [30] Rodriguez-Bachiller A, Glasson J. 2004. *Expert systems and geographical information systems for impact assessment*. New York, NY: Taylor & Francis Inc.
- [31] Tester J.W, Drake E.M, Driscoll M.J, Golay M.W, Peters W.A. 2005. *Sustainable energy; choosing among options*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- [32] Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V. Energy Policy. 2005. “Environmental impacts from the solar energy technologies”; 33: 289-96.
- [33] Voivontas D, Assimacopoulos D, Mourelatos A, Corominas J. Renewable Energy. 1998. “Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system”; 13-3: 333-44.
- [34] Voogd S.H.1983. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. London: Pion.
- [35] Wrixon G.T, Rooney A-ME, Palz W. 1993. *Renewable energy-2000*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- [36] Yager R.R. 1996. *Fuzzy logic in the formulation of decision functions from linguistic specifications*; 25(4): 119-30.
- [37] Yager R.R. 1988. “On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making”. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetic; 18(1): pp. 183-90.
- [38] Yager R.R. 2002 “On the evaluation of uncertain courses of action”. *Fuzzy Optimization and Decision Making*; 1: 13-41.
- [39] Yager, R.R.1996. “Quantifier guided aggregation using OWA operatorsL”. International Journal of Intelligent Systems; 11:pp. 49-73.
- [40] Yue C, Wang S. 2006. “GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan”. Energy Policy 2006; 34:pp. 730-42.