علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره پانزدهم، شماره دو، تابستان ۹۲

تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل AHPو SAW در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

حمیدرضا جعفری[۱]

علی عزیزی[۲*]

Aliazizi89@ut.ac.ir

حسین نصیری[۳]

سپیده عابدی[٤]

تاریخ دریافت:۹۰/۶/۵ **تاریخ پذیرش:۹۰/۱۲/۲۴**

چکیده

مکان‌یابی محل مناسب جهت احداث مزارع بادی مانند هر پروژه مهندسی دیگر، به اطلاعات پایه و برنامه‌ریزی دقیق نیازمند است. در فرآیند بهره‌برداری از انرژی باد پس از تأیید پتانسیل باد، مسئله‌ای که مهم می‌نماید مکان گزینی مزارع بادی با توجه به معیارهای متعدد فنی، اقتصادی-اجتماعی و طبیعی است. پژوهش حاضر به تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار مزارع بادی در استان اردبیل با در نظر گرفتن عواملی چون پتانسیل باد، نقشه کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از فرودگاه، فاصله از پهنه‌های آبی و فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی می‌پردازد. بدین منظور ابتدا داده‌های ۹ پارامتر تأثیرگذار منطقه مورد مطالعه در محیط GIS[۵] آماده‌سازی گردید و با استفاده از روش‌های AHP[۶]و SAW[۷] وزن هر معیار و وزن کلاس‌های هر معیار محاسبه شد. در مرحله بعد، نواحی دارای محدودیت برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی حذف گردید. سپس با استفاده از توابع تحلیلی GIS، کل محدوده برای هر یک از معیارهای تعیین شده پهنه بندی شد. در نهایت با تلفیق نقشه‌های پهنه بندی شده بر اساس وزن اکتسابی از روش‌های AHP و SAW، نقشه نهایی هر دو روش در پنج کلاس از کاملاً مناسب تا نامناسب تهیه شد. مقایسه نتایج بیانگر این مطلب می‌باشد که AHP نسبت به SAW نتایج محتاطانه‌تری را ارایه می‌کند. همچنین طبقه کاملاً مناسب حاصل از دو روش مورد استفاده با

۱- دانشیار گروه برنامه‌ریزی محیط زیست دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه ریزی محیط زیست دانشگاه تهران* (مسئول مکاتبات)

۳- دانشجوی دکترای برنامه ریزی روستایی دانشگاه تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های نو و تجدید پذیر دانشگاه تهران

5- Geographic Information System
6 - Analytic Hierarchy Process
7 - Simple Additive Weighting

وجود تفاوت در مقدار مساحت، نشان دهنده این موضوع است که دشت اردبیل و دامنه‌های کوه سبلان می‌تواند به عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌گیری از انرژی باد مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه بادی، GIS، AHP، SAW، استان اردبیل.

مقدمه

بی‌تردید انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل در پیشرفت و توسعه جوامع بشری است. انفجار جمعیت و رشد روز افزون تقاضای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، خطر گرم شدن کره زمین ناشی از پدیده گلخانه‌ای، ریزش بارش‌های اسیدی، مشکلات زیست‌محیطی و تهدید سلامت انسان‌ها و در نهایت کمبود منابع انرژی فسیلی از جمله مسایلی است که توجه کشورهای جهان را به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر جلب می‌نماید. به طوری که در برنامه‌ریزی‌های خود تأمین درصدی از انرژی‌های مورد نیاز کشورشان را از این طریق (توربین‌های بادی، انرژی‌های خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و ...) منظور می‌نمایند. برای مثال در دسامبر ۲۰۰۸ اتحادیه اروپا بر اساس طرح به اصطلاح ۲۰:۲۰:۲۰ با تولید ۲۰٪ از کل انرژی مصرفی این قاره تا سال ۲۰۲۰ از طریق انرژی‌های نو و کاهش ۲۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای موافقت کرد (۱).

از ابتدای دهه ۱۹۸۰ بررسی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در جهان آغاز شده است. بهره‌برداری از این منابع انرژی به دلیل ضرورت‌های زیست‌محیطی و تنوع بخشیدن به منابع انرژی مورد استفاده، در مقیاس‌های کوچک شروع شده و به طور روز افزون در حال گسترش است. در آینده‌ای نزدیک، انرژی‌های نو و تجدید شونده سهم بیشتری را در تأمین انرژی جهان به خود اختصاص خواهند داد. تجدیدپذیری، عدم آلودگی، گسترش این منابع در تمام جهان و سادگی بهره‌برداری، انرژی‌های تجدیدپذیر را به ویژه برای کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار کرده است. از این رو در برنامه‌ها و سیاست‌های ملی و بین‌المللی کشورها، نقش ویژه‌ای به منابع تجدیدپذیر انرژی محول شده است (۲). کشورهای دانمارک، آلمان و فنلاند نشان داده‌اند که استفاده از انرژی باد از نظر تکنیکی و اقتصادی انجام پذیر است. در این راستا راهبرد انجمن جهانی انرژی باد بر این مبنا است که تا سال ۲۰۲۰ حدود ۱۰٪ از انرژی مصرفی جهان را از انرژی باد تأمین کند (۳).

بررسی ۱۰ ساله وزش باد در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور نشان داد که بسیاری از نواحی ایران از جمله نواحی ساحلی دریای عمان و جزایر خلیج‌فارس، نواحی ساحلی استان خوزستان و نواحی شرقی کشور به همراه چند نقطه پراکنده مانند منجیل، رفسنجان، اردبیل و بیجار بادخیز هستند و در آن‌ها توان تولید برق بادی به ویژه در فصل تابستان وجود دارد. البته در بسیاری از نقاط دیگر کشور هم در زمان‌های محدودی از سال توان تولید برق بادی وجود دارد (۳). همچنین مطالعات و محاسبات انجام یافته در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده که تنها در ۲۶ منطقه از کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک بازده کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می‌باشد. ضمن آن که با برنامه‌ریزی مناسب دستیابی به توان ۱۰ GW نیز امکان‌پذیر می‌باشد و این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور (در حال حاضر) ۳۴۰۰۰ مگاوات می‌باشد. اولین اقدام در زمینه استفاده از انرژی باد در سال ۱۳۴۸ هجری با خرید یک دستگاه پمپ بادی از کشور استرالیا توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع آغاز گردید؛ اما خرید دو دستگاه توربین بادی در سال ۱۳۷۲ هجری توسط سازمان انرژی اتمی و نصب آن در منجیل را می توانیم سر آغاز استفاده از انرژی باد در کشور بدانیم (۴).

به نظر می‌رسد علاوه بر تأمین انرژی، بعد مهمی که استفاده از انرژی‌های نو را ضروری نشان می‌دهد، تأثیرات منفی استفاده از سوخت‌های فسیلی بر محیط‌زیست است و یکی از اصلی‌ترین مزایای استفاده از انرژی‌های نو به واسطه کاهش

انتشار گاز دی اکسید کربن است (۵). به طوری که به ازای هر یک کیلووات ساعت برق بادی در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی از انتشار حدود یک کیلوگرم co_2 جلوگیری می‌شود (۶) که این می‌تواند به کاهش گازهای گلخانه‌ای و جلوگیری از روند گرم شدن زمین منجر شود. از طرفی دیگر بررسی‌های اطلس باد کشور ظرفیت ۴۰ هزار مگاوات نصب توربین بادی را نشان می‌دهد که از این ظرفیت حداقل ۱۰ هزار مگاوات آن واقعی خواهد بود. برای تأمین ظرفیت فوق به فعال‌سازی یک بازار ۵۰۰ مگاواتی در سال نیاز است. به علاوه تأمین بازار کشورهایی همچون آذربایجان، ارمنستان، ترکمنستان، افغانستان، عراق، سوریه و ونزوئلا و نیز ساخت توربین باد با سایزهای مختلف در داخل کشور تصمیمی راهبردی برای استفاده از منبع باد برای تولید الکتریسته در کشور و کسب سهم در بازار صنعت باد است (۶)؛ اما مجموع ظرفیت‌های نصب شده تاکنون کمتر از ۲٪ میزان تخمین پتانسیل باد در سطح کشور است (۴). با توجه به مطالب فوق به منظور بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل‌های موجود، ضروری است کشور ما نیز تلاش‌های جدی و موثری را در جهت توسعه بهره‌برداری از پتانسیل انرژی باد در کاربردهای مختلف آغاز نماید.

مکان‌یابی محل مناسب برای استقرار توربین‌های بزرگ بادی موسوم به مزارع بادی مانند هر پروژه مهندسی دیگر، به اطلاعات پایه و برنامه‌ریزی دقیق نیازمند است. انتخاب عوامل متعدد سبب تعدد لایه‌های اطلاعاتی شده و کوشش‌ها برای یافتن راه‌حلی مناسب برای تحلیل لایه‌های اطلاعاتی و اخذ نتیجه صحیح، تصمیم گیران را به سمت و سوی استفاده از سیستمی سوق می‌دهد که علاوه بر دقت بالا از نظر سرعت عمل و سهولت انجام عملیات در حد بالایی قرار داشته باشد. امروزه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در تلفیق با مدل‌های تصمیم‌گیری به طور گسترده قابلیت به‌کارگیری در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی و مسایل مهندسی را دارد.

هدف از این مقاله بررسی امکان استقرار توربین‌های بزرگ بادی در استان اردبیل و تعیین مناطقی که برای این منظور مناسب هستند با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به همراه مدل تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. مطالعات متعددی در کشورهای مختلف برای استفاده از انرژی بادی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های تصمیم‌گیری صورت گرفته که منجر به شناسایی پتانسیل و پهنه‌های مناسب برای نصب و ایجاد نیروگاه‌های بزرگ بادی شده است.

در سال ۲۰۰۷ ادول بنیو (Adul Bennui) و همکاران در مقاله‌ای در کشور تایلند تحت حمایت سازمان‌های مربوطه و با تلفیق AHP و GIS با در نظر گرفتن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی، بزرگراه‌ها، مناطق راهبردی، رودخانه‌ها و کانال اقدام به شناسایی مناطق مستعد برای نصب توربین‌های بزرگ بادی کرده و مناطق مناسب برای این منظور را شناسایی کردند (۷).

در کشور ترکیه نیز در سال ۲۰۱۰ نازلی یونجا آیدین (Nazli Yonca Aydin) و همکاران با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل fuzzy و با استفاده از معیارهای پتانسیل باد، فاصله از شهره‌های بزرگ، رود، شهرک، فرودگاه، مناطق حفاظت شده و سکونتگاه پرنده‌ها و اثرات منفی توربین‌های بادی همچون آلودگی صوتی اقدام به ارزیابی محیطی سیستم‌های انرژی باد و تعیین مناطق مناسب برای مزارع بادی به منظور بهره‌گیری در برنامه‌ریزی فضایی کردند (۵).

همچنین در سال ۲۰۱۱ Sliz-Szkliniarza و همکاران در لهستان اقدام به ارزیابی پراکنش پتانسیل باد با استفاده از رویکرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و در نظر گرفتن ۳ معیار اقتصادی، اکولوژیکی و تکنیکی و با در نظر گرفتن عواملی چون ارتفاع، مناطق شهری، پهنه‌های آبی، مناطق جنگلی، مناطق حفاظت شده، شیب، راه‌های ارتباطی، شبکه انتقال نیرو به منظور معرفی مناطق و پهنه‌های مناسب برای سرمایه‌گذاری در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی کرده‌اند (۸).

تقی‌لو (۱۳۸۹) جهت ارزیابی پتانسیل‌های نیروی بادی برای احداث توربین‌های بادی در استان زنجان از سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (روش همپوشانی

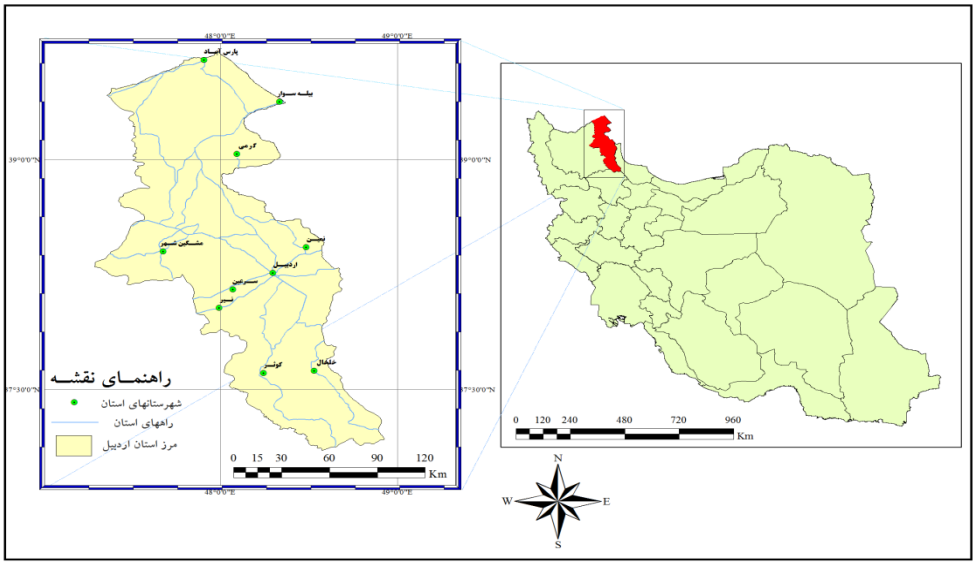
شاخص، روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش Topsis[1]، روش Topsis فازی) و با به‌کارگیری معیارهای چون سرعت باد، کاربری اراضی، توپوگرافی، شیب زمین، آب و هوا، بارندگی، پوشش گیاهی، فاصله از شهر، فاصله از روستاها، دسترس به راه‌ها و خطوط ریلی، فاصله از رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، فاصله از خطوط گسل، جنس زمین، مناطق مناسب برای احداث مزارع بادی را تعیین و مدل Topsis را برای این منظور مناسب معرفی می‌نماید (۹). ایجاد نیروگاه‌های بادی در ابتدا مستلزم تأیید بادخیز بودن منطقه و مناسب بودن چگالی باد در منطقه مورد مطالعه است که این امر با مطالعه سرعت، جهت و فراوانی وزش باد در منطقه قابل دست‌یابی است. در ایران کاویانی (۱۳۷۴)، ضمن بررسی انواع توربین‌های بادی و میزان انرژی باد و سرعت لازم برای تولید برق بادی، با استفاده از آمار پنج ساله باد (۱۹۸۵-۱۹۸۱) در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، به ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران پرداخته و نتیجه گرفته است که در کل کشور، ایستگاه زابل (منطقه سیستان) بهترین شرایط را برای احداث مزارع بادی دارد و پس از آن سواحل و جزایر جنوبی ایران برای این امر مناسب می‌باشد (۱۰). گندمکار (۱۳۸۸) در مقاله‌ای به ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کل کشور در دوره آماری ده ساله (۲۰۰۳-۱۹۹۴) در ۱۲۰ ایستگاه سینوپتیک کشور پرداخته و کل ایران را از نظر سرعت وزش باد به چهار گروه تقسیم کرده که استان اردبیل را از نظر توان باد در گروه دوم قرار داده است (۳). زاهدی و همکاران (۱۳۸۴) به نتایج مشابهی دست یافته و مناطق اطراف فرودگاه اردبیل را برای ایجاد نیروگاه‌های باد بسیار مناسب تشخیص داده‌اند؛ و با استفاده از آمار بادهای ساعتی و روزانه ده ساله (۱۹۹۹-۱۹۹۰) از ایستگاه سینوپتیک اردبیل، میانگین سرعت باد را ۶/۳۷ متر در ثانیه، چگالی توان باد ۳۰۲/۶۴ وات در مترمربع، ضریب تغییرات باد ۵۶/۵ درصد و ضریب ثبات باد ۴۶ درصد به دست آورده است (۱۱). صلاحی و همکاران (۱۳۸۳) در مقاله‌ای وضعیت سمت و سرعت باد ایستگاه سینوپتیک مشگین‌شهر را مورد بررسی قرار داده و مقادیر احتمال وقوع آن‌ها را با استفاده از مدل ریاضی رایله تعیین کرده‌اند که به ترتیب میانگین سرعت جریان هوا و متوسط سرعت باد را ۱/۵ و ۷ متر بر ثانیه اعلام داشتند (۱۲).

مواد و روش‌ها

۱- معرفی محدوده مورد مطالعه

استان اردبیل در شمال غربی فلات ایران با مساحتی بالغ بر ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع که تقریباً ۱٪ از کل مساحت کشور را در بر می‌گیرد در مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است (شکل ۱). این استان از شمال با جمهوری آذربایجان همسایه بوده و حدود ۴۰۰ کیلومتر با این کشور مرز مشترک دارد و از غرب به استان آذربایجان شرقی، از جنوب به استان زنجان و از شرق به استان گیلان محدود شده است. کوهستان سبلان در جنوب شرقی مشگین‌شهر و در فاصله ۲۵ کیلومتری آن واقع شده. این کوه یکی از آتش‌فشان‌های خاموش کشور محسوب می‌شود و ارتفاع بلندترین قله این کوه که سلطان ساوالان نام دارد، ۴۸۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد و مرتفع‌ترین نقطه استان محسوب می‌شود. جمعیت آن بر اساس سرشماری سال ۱۳۸۵ یک میلیون و ۲۲۸ هزار نفر می‌باشد. مرکز این استان شهر اردبیل است و بر طبق آخرین تقسیمات کشوری، شامل ۹ شهرستان، ۲۵ بخش، ۲۱ شهر و ۶۶ دهستان می‌شود. ناهمواری‌های استان اردبیل که حدود دو سوم نواحی کوهستانی آذربایجان را شامل می‌شود از نقطه نظر تأثیرگذاری بر وزش بادهای محلی فوق‌العاده حائز اهمیت می‌باشد. ناهمواری‌ها با ایجاد اختلاف ارتفاع و به تبع آن اختلاف فشار هوا در فصول مختلف سال و به خصوص در فصل گرم سال، شرایط را برای وزش بادهای محلی فراهم می‌آورد.

1- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان اردبیل در ایران

۲- معیارهای انتخابی برای تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی

در مکان‌یابی نیروگاه بادی معیارهای متعددی را می‌توان دخالت داد. معمولاً هر چقدر عوامل بیشتری در مدل دخالت کند، خروجی دقیق‌تری خواهد داشت؛ اما با توجه به عدم دسترسی به کلیه اطلاعات دخیل در مکان‌یابی این مراکز در ناحیه مورد مطالعه، سعی شده است که مؤثرترین و ضروری‌ترین عوامل فنی، اقتصادی و محیطی در نظر گرفته شود. در این مطالعه از نظرات گروه کارشناسان خبره متشکل از برنامه‌ریزان شهری و روستایی، کارشناسان توسعه انرژی‌های نو، متخصصان حوزه محیط‌زیست و متخصصان GIS استفاده گردید. بر اساس نظرات گروه کارشناسان خبره، مطالعات کتابخانه‌ای، منابع علمی در این زمینه و اطلاعات موجود و در دسترس، عوامل پتانسیل باد، نقشه کاربری اراضی، ارتفاع، شیب، فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از فرودگاه، فاصله از پهنه‌های آبی و فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی به عنوان مهم‌ترین معیارها جهت تعیین پهنه‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی انتخاب شدند که در ادامه به اهمیت هر یک از آن‌ها اشاره خواهد شد.

پتانسیل باد: محاسبه چگالی باد در یک ناحیه جغرافیایی، اولین و اساس‌ترین مسئله برای استفاده از انرژی باد و برآورد پتانسیل آن و دیگر مشخصه‌های باد می‌باشد؛ لذا آگاهی از سرعت میانگین سالانه و نیز چگالی توان باد در انتخاب یک محل برای نیروگاه بادی از اهمیت خاصی برخوردار است (۱۱). پتانسیل انرژی باد در یک مزرعه بادی به وسیله سه پارامتر اصلی سرعت باد، توزیع فراوانی و ویژگی‌های منحنی قدرت توربین بادی تعیین می‌شود (۸). برای تاکید بر اهمیت پتانسیل باد باید عنوان کرد که نقشه پتانسیل باد نقشی اساسی در انتخاب مناطق پیشنهادی برای مزارع بادی ایفا کرده و مهم‌ترین سند در حمایت از ارزیابی اقتصادی تأسیسات می‌باشد (۱۳).

به منظور برآورد پتانسیل باد منطقه باید از ایستگاه‌های بادسنجی استفاده نمود. این ایستگاه‌ها دارای حسگرهایی جهت اندازه‌گیری سرعت و دما می‌باشد. به دلیل این که توربین‌های بادی متوسط، دارای ارتفاع، لذا جهت مطالعه رژیم باد منطقه در سطح زمین، سرعت باد در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری و حداقل یک حسگر جهت در ارتفاع ۲۰ متری استفاده می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها حداقل برای یک سال انجام می‌گیرد و نهایتاً پس از تحلیل داده‌ها، گلباد و نمودارهای سرعت و جهت باد ارایه می‌گردد (۱۴). از لحاظ بین‌المللی سرعت مطلوب باد (برای

راه‌اندازی نیروگاه بادی) بالای ۶/۵ متر بر ثانیه می‌باشد، اما پیشرفت‌های فن آوری فرصت بهره‌برداری از سرعت‌های پایین‌تر باد را نیز امکان‌پذیر ساخته است (۱). باید اشاره کرد که در بسیاری از مقالات حداقل میانگین سرعت باد سالیانه مناسب جهت نصب نیروگاه بادی را چهار تا پنج متر بر ثانیه ذکر می‌کنند (۱۵). برای مثال از نظر سازمان انرژی‌های نو (سانا) استفاده فنی از انرژی باد وقتی ممکن است که متوسط سرعت باد در محدوده ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه باشد (۱۶). به نظر می‌رسد دلیل عدم توافق کلی در حداقل میانگین سرعت را باید در سرعت راه‌اندازی مختلف توربین‌های بادی دانست. در این زمینه قابل ذکر است که توربین‌های بادی مختلف برای شرایط بادی مختلف طراحی شده‌اند و برای رسیدن به انرژی خروجی بیشینه در یک مزرعه بادی، انتخاب توربین مناسب بسیار مهم است. این توربین‌ها طوری طراحی شده‌اند که در یک سرعت حداقلی شروع به کار کرده (cut-in) و در سرعت‌های زیاد برای جلوگیری از صدمه به دستگاه از کار باز می‌ایستند (cut-off). برای مثال توربین‌هایی که در جدول ۱ ارایه شده میزان سرعت باد را برای راه‌اندازی و توقف چند نمونه توربین نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فنی چند توربین بادی

مدل	توان نامی	ارتفاع hub	قطر روتور	سرعت شروع به کار	سرعت توقف توربین
Bonus600	۶۰۰	۵۰	۴۴	۴	۲۵
Vestas82	۱۶۵۰	۸۰	۸۲	۳/۵	۲۵
NordexN80	۲۵۰۰	۱۰۰	۸۰	۳	۲۵

منبع: (۸)

کاربری اراضی: مطالعه آمایش سرزمین به نظم نوینی از سازمان‌دهی منطقی و معتدل فضای موجود حیاتی برای هر گونه تجمع فعالیت انسانی می‌پردازد (۱۷). نقشه کاربری زمین بیانگر چگونگی استفاده از یک قطعه زمین می‌باشد. بایستی حتی‌الامکان مکان‌یابی توربین‌های بادی با توجه به کاربری اراضی صورت گیرد تا به محیط‌زیست آسیبی وارد نشود و از طرف دیگر، برای احداث توربین‌های بادی بایستی مکان‌هایی که کم‌ترین هزینه۹). در این راستا حداکثر تلاش به منظوری جلوگیری از ساخت‌وساز بی‌مورد در اراضی حاصلخیز بایستی صورت گیرد. از منظر کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه شامل اراضی مسکونی، کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، جنگل و مرتع می‌باشد.

ارتفاع: شکل زمین و ارتفاع آن در استقرار و ایجاد تأسیسات و حتی کشت و زرع مؤثر است. این قاعده کلی که با افزایش ارتفاع امکان ایجاد تأسیسات و کشاورزی با مشکل مواجه می‌شود در اینجا نیز صادق است (۱۸). همچنین در انتخاب سایت مناسب برای نیروگاه بادی مجبور به اجتناب از مناطق مرتفع می‌باشیم چرا که افزایش ارتفاع هزینه‌های سرمایه‌گذاری را بالا می‌برد (۷).

شیب: از جمله عوامل طبیعی که تأثیر بسیاری در تعیین مکان‌های بهینه برای ایجاد تأسیسات و زیرساخت‌ها دارد، شیب زمین می‌باشد. زیرا نحوه کاربری اراضی با توجه به جهت و درصد شیب آن می‌تواند بر بسیاری از هزینه‌های عمرانی (زهکشی آب‌های سطحی، تسطیح اراضی و ...) تأثیرگذار باشد (۱۸).

فاصله از نواحی مسکونی (شهر و روستا): محیط مصنوع ممکن است تغییر قابل توجهی در خرد اقلیم ایجاد کند. به طور کلی در نواحی دارای ساخت‌وساز سرعت باد ۲۵٪ کم‌تر است. شاید مهم‌ترین علل محدود کننده نصب توربین‌های بادی در مجاورت نواحی مسکونی صدای آن‌ها باشد، شامل: الف -صدای مکانیکی ب -صدای آیرودینامیکی، به طوری که صدای حاصل از حرکت مکانیکی پره‌های توربین و جریان هوای بین آن بر روی مردم تأثیر منفی دارد (۱). البته در خصوص فاصله از نواحی مسکونی باید عنوان کرد که توسعه فیزیکی شهر، فرآیندی پویا و مداوم است که طی آن محدوده شهر و فضای کالبدی آن در جهات عمودی و افقی از حیث کمی و کیفی افزایش می‌یابد (۱۹)؛ بنابراین زمین‌های اطراف بایستی برای گسترش آتی نواحی مسکونی در نظر گرفته شود.

فاصله از فرودگاه: مناطق امنیتی ملی یا عملیاتی که نیازمند مناطق توسعه نیافته مجاور به منظور ایجاد منطقه‌ای حفاظتی که محدودیت دفاعی خوانده می‌شود، می‌باشد. توربین‌های بادی می‌تواند با سیگنال رادارهای هوانوردی تداخل داشته باشد و لذا نیازمند یک حریم قابل توجه در اطراف مناطقی همچون فرودگاه است (۱). توربین‌های بادی برای امواج الکترومغناطیسی در محیط ایجاد مزاحمت می‌نماید و آن‌ها را منعکس، پخش و یا می‌شکند و برای ارتباطات مخابراتی راه دور ایجاد تداخل می‌کند.

فاصله از پهنه‌های آبی: سواحل و رودخانه‌ها سکونتگاه‌هایی ویژه و مکان‌هایی برای تفریح هستند. ردپای اکولوژیکی برج‌ها (دکل توربین)، جاده‌ها و ساخت و سازهای مربوط به آن‌ها بر هم زننده پوشش گیاهی و مناطق زیستگاهی هستند. توربین‌های بادی همچنین به وجود آورنده خطر تصادم برای پرندگان با دکل‌ها می‌باشد که ممکن است تأثیری منفی بر روی جمعیت پرندگان به خصوص پرندگان مهاجر داشته باشد (۱). به همین خاطر نیاز هست تا توربین‌های بادی از این پهنه‌های آبی فاصله لازم را داشته باشد.

فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی: شبکه حمل‌ونقل در احداث توربین‌های بادی از دو جنبه حائز اهمیت می‌باشد: الف- نزدیکی توربین‌های بادی به راه‌ها موجب می‌شود تا آلودگی صوتی ناشی از توربین‌های بادی، حمل‌ونقل جاده‌ای را تحت تأثیر قرار دهد و از طرفی علاوه بر تأثیر بر چشم‌انداز جاده‌ای، حرکت پره‌های توربین‌ها موجب قرار گرفتن جاده‌ها در سایه. ب- به دلیل وزن بسیار زیاد تجهیزات احداث توربین‌های بادی و پره‌ها و پایه‌های توربین‌های بادی قرار گرفتن مزارع بادی در نزدیکی جاده‌ها از اهمیت زیادی در کاهش هزینه برخوردار است. چرا که یکی از هزینه‌های قابل توجه احداث، هزینه۹).

۳- جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها

در این پژوهش، مجموعه داده‌های ۹ معیار انتخابی برای استان اردبیل، از منابع مختلف گردآوری شد.

۱- پتانسیل باد: از مرور مقالات پیشین و با استناد به نقشه‌های پتانسیل و سرعت باد که در مرکز انرژی‌های نو تهیه شده و نیز از طریق درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان، لایه پتانسیل باد تهیه شد. نظر به این که اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین انجام می‌شود و معمولاً از توربین‌های با ارتفاع حدوداً ۵۰ متر استفاده می‌شود، سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری برای احداث توربین‌های بادی مورد نیاز است. به وسیله محاسبه سرعت باد در ارتفاع مجهول، سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری به دست آمد. برای تهیه سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از معادله زیر استفاده شد:

$$\frac{V}{V_r}=\left(\frac{H}{H}\right)^{0.2}$$ **معادله ۱**:

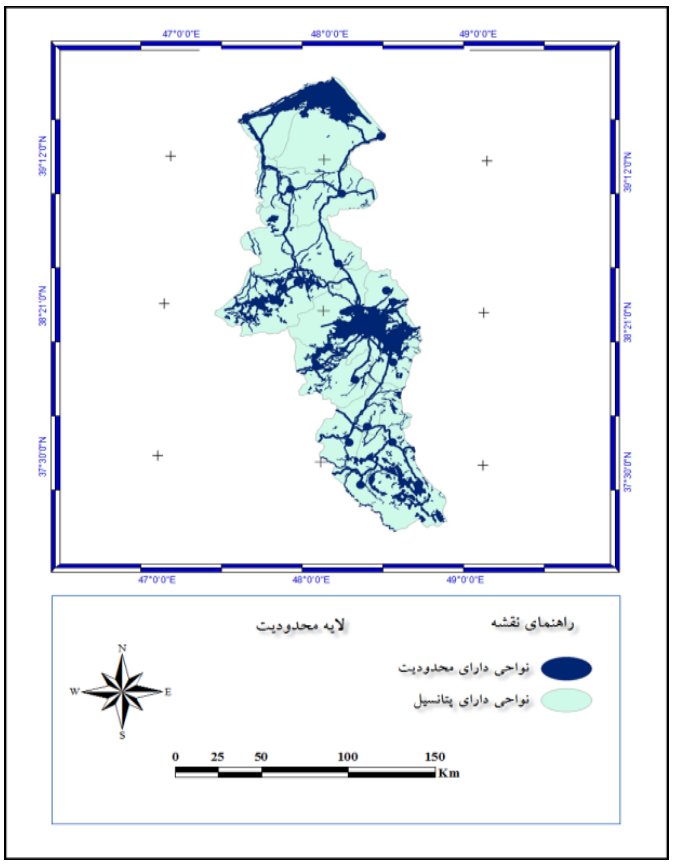
V - سرعت باد در ارتفاع H (مورد نظر) و V_r سرعت باد در ارتفاع H_r (مبنا) می‌باشد.

۲- نقشه کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از طریق طبقه‌بندی و تفسیر تصاویر چند طیفی سال ۲۰۱۰ سنجنده TM ماهواره لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج گردید. ۳- لایه ارتفاع، ۴- شیب، ۵- فاصله از شهر، ۶- فاصله از روستا، ۷- فاصله از فرودگاه، ۸- فاصله از پهنه‌های آبی (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، سدهای آبی موجود در

استان) و ۹- فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری تهیه گردید.

۴- شناسایی نواحی دارای محدودیت

لایه محدودیت جهت احداث نیروگاه‌های بادی بیانگر مناطقی است که برای این منظور نامناسب هستند و برای احداث نیروگاه‌های بادی نباید از آن‌ها استفاده کرد. در مطالعه حاضر، بر اساس تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و شرایط محلی منطقه، لایه‌های فاصله از فرودگاه (۳۰۰۰ متر)، فاصله از شهر (۲۵۰۰ متر)، فاصله از راه اصلی (۵۰۰ متر)، فاصله از پهنه‌های آبی (۲۵۰ متر)، کاربری اراضی (اراضی جنگلی، اراضی آبی، اراضی شهری)، دارای محدودیت شناسایی گردید و به این شیوه اراضی نامناسب برای استقرار نیروگاه‌های بزرگ بادی حذف شد. شکل ۲ نواحی دارای محدودیت را در استان اردبیل نشان می‌دهد.



شکل ۲- نواحی دارای محدودیت و پتانسیل برای ایجاد نیروگاه بادی در استان اردبیل

۵- مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی که اولین بار توسط توماس ال ساعتی (SAATY) در دهه ۱۹۸۰ مطرح شد، یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند. همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران در مسئله می‌دهد. این فرایند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت بر روی معیارها و زیر معیارها را دارد. علاوه بر این بر مبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده است.

مهم‌ترین عامل در MCDM[1] اختصاص چگونگی وزن برای یک سری معیار بر اساس اهمیت آن‌ها است (۷). در این روش به هر گزینه با توجه به امتیازهای تخصیص یافته در مقایسه با هم (مقایسه زوجی) و نیز با توجه به ارجحیت شاخص‌ها نسبت به هم، امتیازی داده می‌شود که نشان دهنده قابلیت بهتر آن گزینه با توجه به معیارهای تعریف شده است که قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌نماید. همچنین این تکنیک میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد که از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. به علاوه از یک مبنای نظری قوی برخوردار بوده و بر اساس اصول بدیهی بنا شده است (۲۰). ویژگی اصلی فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت زوجی است. به عبارتی، در این روش ابتدا عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از این ماتریس وزن نسبی عناصر محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده در نتیجه استفاده از این روش برای تعیین وزن لایه‌ها نشان می‌دهد که با توجه به سادگی و انعطاف‌پذیری آن و همچنین محاسبه سازگاری در قضاوت‌ها، می‌تواند در بررسی موضوعات مربوط به مکان‌یابی کاربرد مطلوبی داشته باشد (۲۱ و ۲۲). در مدل AHP معیارها و گزینه‌ها در یک نظام سلسله مراتبی قرار گرفته و با اختصاص وزنی در مقیاس ۱ تا ۹ (جدول ۲) به صورت زوجی مقایسه می‌شود. سپس ارزش نهایی آن‌ها از طریق استانداردسازی بر اساس یکی از روش‌های موجود تعیین می‌شود. استفاده از مقایسات زوجی برای تعیین اهمیت نسبی مؤلفه‌های هر سطح نسبت به سطح بالاتر باعث افزایش دقت و ایجاد امکان مقایسه داده‌ها در هر سطح خواهد شد (۲۳). در این تحقیق پس از مشخص شدن درجه اهمیت هر یک از معیارها نسبت به یکدیگر و همچنین طبقات مختلف یک معیار نسبت به هم به صورت دو دویی با بهره‌گیری از نظرات افراد خبره در این زمینه، مطالعه و مقایسه کارهای مشابه قبلی و در نظر گرفتن شرایط منطقه مطالعاتی، استخراج اوزان با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice صورت گرفت. در نهایت نقشه هر یک از معیارها بر اساس وزن‌های به دست آمده در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

جدول ۲- مقیاس کمی و کیفی در روش AHP

مقدار امتیاز	درجه اهمیت در مقایسه دو به دو
۱	ترجیحاً یکسان
۲	یکسان یا نسبتاً مرجح
۳	نسبتاً مرجح
۴	نسبتاً تا قویاً مرجح
۵	قویاً مرجح
۶	قویاً تا بسیار قوی مرجح
۷	ترجیح بسیار قوی
۸	بسیار تا بی‌اندازه مرجح
۹	بی‌اندازه مرجح

۶- روش وزن دهی تجمعی ساده (SAW)

این روش یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش-های تصمیم‌گیری چند معیاره است (۲۴). اساس روش بر میانگین وزنی است. در این روش امتیاز ارزیابی برای هر معیار به طور مستقیم توسط تصمیم‌گیرنده تخصیص داده می‌شود (۲۵). اولین مرحله روش SAW بر پایه GIS، تعریف وزن معیارهاست. در این مطالعه، ۹ لایه که هر کدام یک معیار لازم برای انتخاب مکان توربین‌های بادی را مشخص می‌کند، آماده-سازی گردید. از آن جا که درجه اهمیت معیارها متفاوت‌اند، لذا باید آن‌ها را به یک واحد استاندارد کرد (۲۶) که به این منظور، از معادله ۲ استفاده شد. جدول ۳ وزن طبقات هر یک از معیارهای موثر در مکان‌یابی توربین‌های بادی را به روش SAW که در آن طبقات نسبت به هم مقایسه نمی‌شوند را نشان می‌دهد.

وزن هر یک از لایه‌ها نیز به همین صورت مشخص و در نهایت با استفاده معادله ۳ استاندارد شد (جدول ۴).

1- Multi-criteria decision making

معادله ۲:

$$X'if = \frac{Xif - X_j^{min}}{X_j^{max} - X_j^{min}}$$

$X'if$ نمره استاندارد شده برای آلترناتیو iام و معیار jام، Xif نمره آلترناتیو iام و معیار jام، X_j^{min} و X_j^{max} به ترتیب نمره کمینه و بیشینه معیار jام هستند.

معادله ۳:

$$X'_j = \frac{X_j}{\sum_{j=1}^{n} X_j}$$

X'_j نمره استاندارد شده معیار jام، X_j نمره معیار jام، n تعداد کل معیاره

جدول ۳- جدول وزن دهی به طبقات معیارهای موثر در مکان‌یابی بر اساس SAW

معیار	طبقات هر معیار	امتیاز
شیب	۰ – ۳	۱۰
	۳ – ۷	۸
	۷ – ۱۱	۶
	۱۱ – ۱۵	۵
	> ۱۵	۲
پتانسیل باد	۲/۵ –۴	۱
	۴ – ۵/۵	۳
	۵/۵ – ۶/۵	۶
	۶/۵ <	۱۰
ارتفاع	۵۰ –۸۰۰	۹
	۸۰۰ –۱۲۰۰	۷
	۱۲۰۰ – ۱۵۰۰	۶
	۱۵۰۰ – ۲۰۰۰	۵
	>۲۰۰۰	۱
فاصله از روستا	۰ – ۱۵۰۰	۱
	۱۵۰۰ - ۲۵۰۰	۳
	۲۵۰۰ - ۳۵۰۰	۶
	۳۵۰۰ – ۴۵۰۰	۸
	>۴۵۰۰	۱۰
فاصله از شهر	۰ – ۲۵۰۰	۰
	۲۵۰۰ - ۴۰۰۰	۲
	۴۰۰۰ - ۵۵۰۰	۵
	۵۵۰۰ - ۷۰۰۰	۷
	> ۷۰۰۰	۱۰
فاصله از راه	۰ – ۵۰۰	۰
	۵۰۰ - ۱۵۰۰	۴
	۱۵۰۰ - ۳۰۰۰	۵

	۳۰۰۰ -۴۵۰۰	۶
	>۴۵۰۰	۸
کاربری اراضی	جنگل	۰
	مناطق مسکونی	۰
	کشاورزی آبی	۰
	کشاورزی دیم	۳
	اراضی مرتعی	۶
	اراضی بایر	۱۰
فاصله از فرودگاه	۰ - ۳۰۰۰	۰
	۳۰۰۰ - ۶۰۰۰	۱
	۶۰۰۰-۹۰۰۰	۴
	۹۰۰۰-۱۲۰۰۰	۶
	۱۲۰۰۰-۱۵۰۰۰	۸
	>۱۵۰۰۰	۱۰
فاصله از پهنه‌های آبی	۰ – ۲۵۰	۰
	۲۵۰ - ۴۰۰	۱
	۴۰۰-۶۰۰	۳
	۶۰۰ - ۸۰۰	۵
	۸۰۰-۱۰۰۰	۸
	>۱۰۰۰	۱۰

جدول ۴- وزن معیارها و وزن نرمال شده آن‌ها در SAW

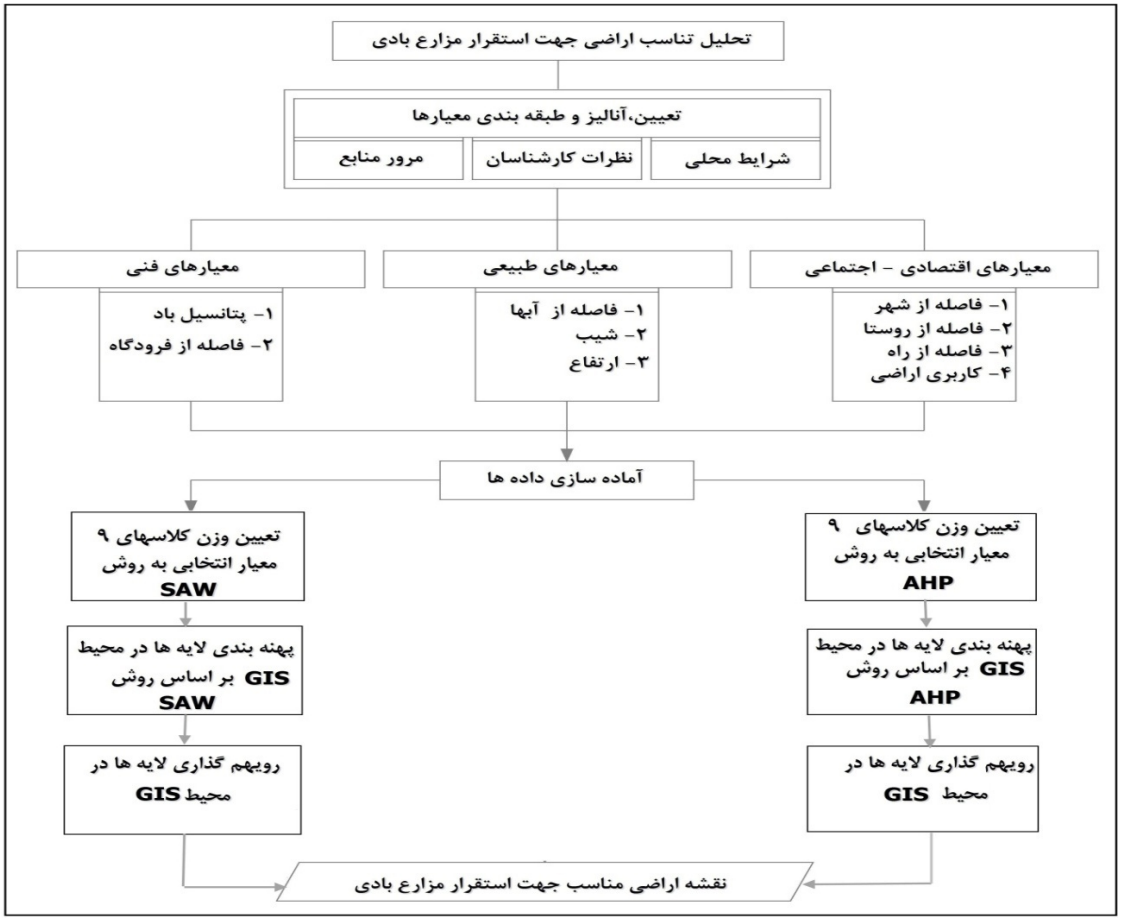
	وزن معیار	وزن نرمال شده
فاصله از شهر	۶	۰/۱۱۳
فاصله از راه‌ها	۵	۰/۰۹۴
شیب	۷	۰/۱۳۲
فاصله از پهنه‌های آبی	۴	۰/۰۷۵
ارتفاع	۵	۰/۰۹۴
پتانسیل باد	۱۰	۰/۱۸۹
کاربری اراضی	۵	۰/۰۹۴
فاصله از روستا	۳	۰/۰۵۷
فاصله از فرودگاه	۸	۰/۱۵۰

۷- تجزیه و تحلیل اطلاعات

پردازش و تحلیل داده‌ها در این پژوهش با توجه به پارامترهای شیب، فاصله از شهر، فاصله از مناطق روستایی، ارتفاع، کاربری اراضی، پتانسیل باد، فاصله از فرودگاه، فاصله از راه‌ها و فاصله از رودخانه‌ها و پهنه‌های آبی صورت گرفت. پس از آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی بر اساس روندنما (شکل ۳)، از روش AHP و SAW برای تعیین وزن کلاس‌های هر لایه و وزن نهایی معیارها استفاده گردید. در روش AHP ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان و متخصصان وزن نسبی هر کدام از معیارها و زیر معیارها مشخص شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice وزن نهایی هر یک از معیارهای نه‌گانه و کلاس آن‌ها استخراج شد. همزمان وزن‌های مربوط به مدل SAW نیز پس از تهیه نظر کارشناسی، با استفاده از معادلات مربوط به مدل، به دست آمد.

جداول ۵ و ۶، به ترتیب مقایسه زوجی کلاس‌های شیب و معیارهای نه‌گانه اصلی را به همراه وزن‌های نهایی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل فراوانی جداول وزن کلاس‌های هر معیار و تشابه موضوعی این جداول از نمایش جداول مقایسه زوجی همه این معیارها خودداری به عمل آمد.

در گام بعد وزن‌های به دست آمده از دو مدل AHP و SAW در محیط GIS در هر یک از نه لایه ضرب شده و همراه با آن تلفیق لایه‌ها صورت گرفت. سپس نقشه نهایی به صورت رستری حاصل گردید. در پایان نقشه نهایی حاصل از دو روش فوق نرمال شده و سپس کلاس‌بندی گردیده و به ۵ کلاس از کاملاً نامناسب تا کاملاً مناسب تقسیم و مناطق مناسب برای استقرار مزارع بادی تعیین گردید. شکل ۴ به صورت شماتیک طبقه‌بندی کلاس‌های نه معیار ورودی حاصل از روش AHP و SAW را نشان می‌دهد.



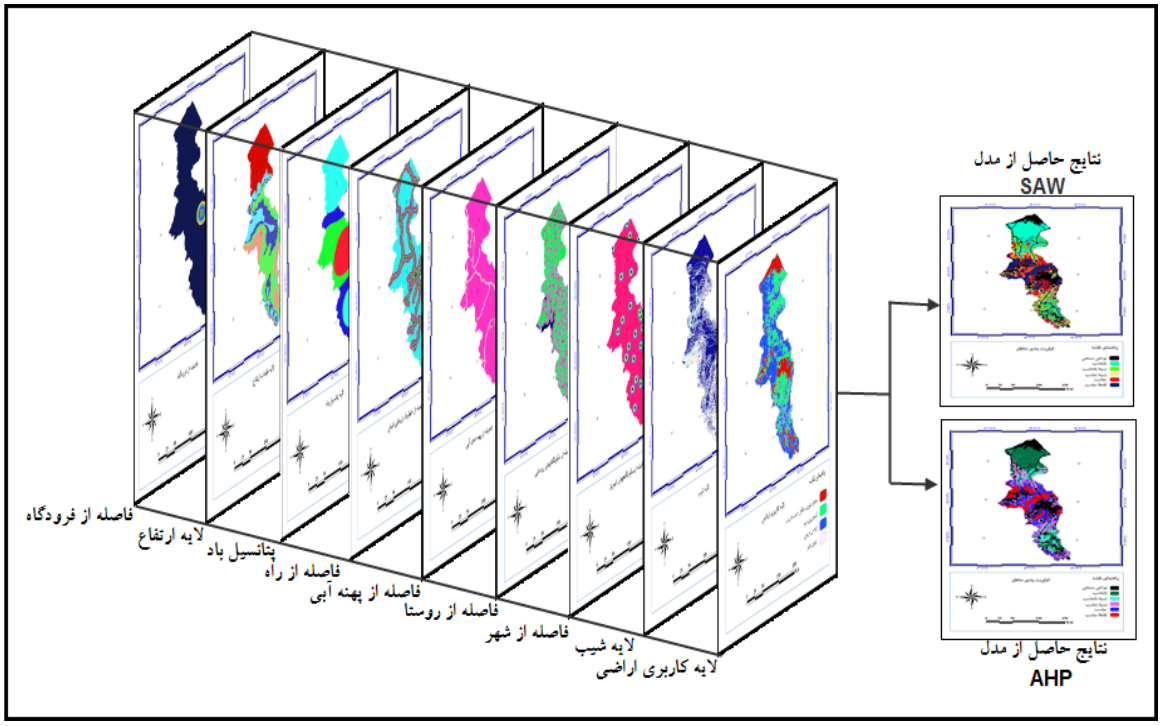
شکل ۳ - فرآیند مکان‌یابی مزارع بادی با استفاده از تلفیق سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با GIS

جدول ۵- جدول مقایسه زوجی طبقات شیب و وزن استاندارد شده آن‌ها در AHP

شیب (درصد)	۳ - ۰	۷ - ۳	۱۱ - ۷	۱۵ - ۱۱	۱۵<	وزن نهایی
۳ - ۰	۱	۲	۳	۵	۷	۰/۴۴۲
۷ - ۳	۱/۲	۱	۲	۳	۵	۰/۲۶۰
۱۱ - ۷	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۰/۱۵۲
۱۵ - ۱۱	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱	۳	۰/۰۹۷
۱۵<	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۰/۰۴۹
نرخ ناسازگاری = ۰/۰۲						

جدول ۶- جدول مقایسه زوجی معیارها و وزن استاندارد شده آن‌ها در AHP

	فاصله از شهر	فاصله از روستا	فاصله از فرودگاه	شیب	ارتفاع	کاربری اراضی	پتانسیل باد	فاصله از پهنه آبی	فاصله از راه اصلی	وزن نهایی
فاصله از شهر	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۱/۲	۳	۲	۰/۱۵۳
فاصله از روستا	۱/۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱/۳	۳	۳	۰/۱۲۴
فاصله از فرودگاه	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۱/۲	۲	۱/۳	۳	۲	۰/۰۹۲
شیب	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۲	۲	۱/۵	۲	۳	۰/۰۷۹
ارتفاع	۱	۱	۲	۲	۱	۳	۱/۲	۳	۳	۰/۱۴۲
کاربری اراضی	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۵	۲	۲	۰/۰۶۰
پتانسیل باد	۲	۳	۳	۵	۲	۵	۱	۳	۲	۰/۲۵۴
فاصله از پهنه آبی	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱	۱/۲	۰/۰۴۱
فاصله از راه اصلی	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۲	۱	۰/۰۵۶
نرخ ناسازگاری = ۰/۰۵										



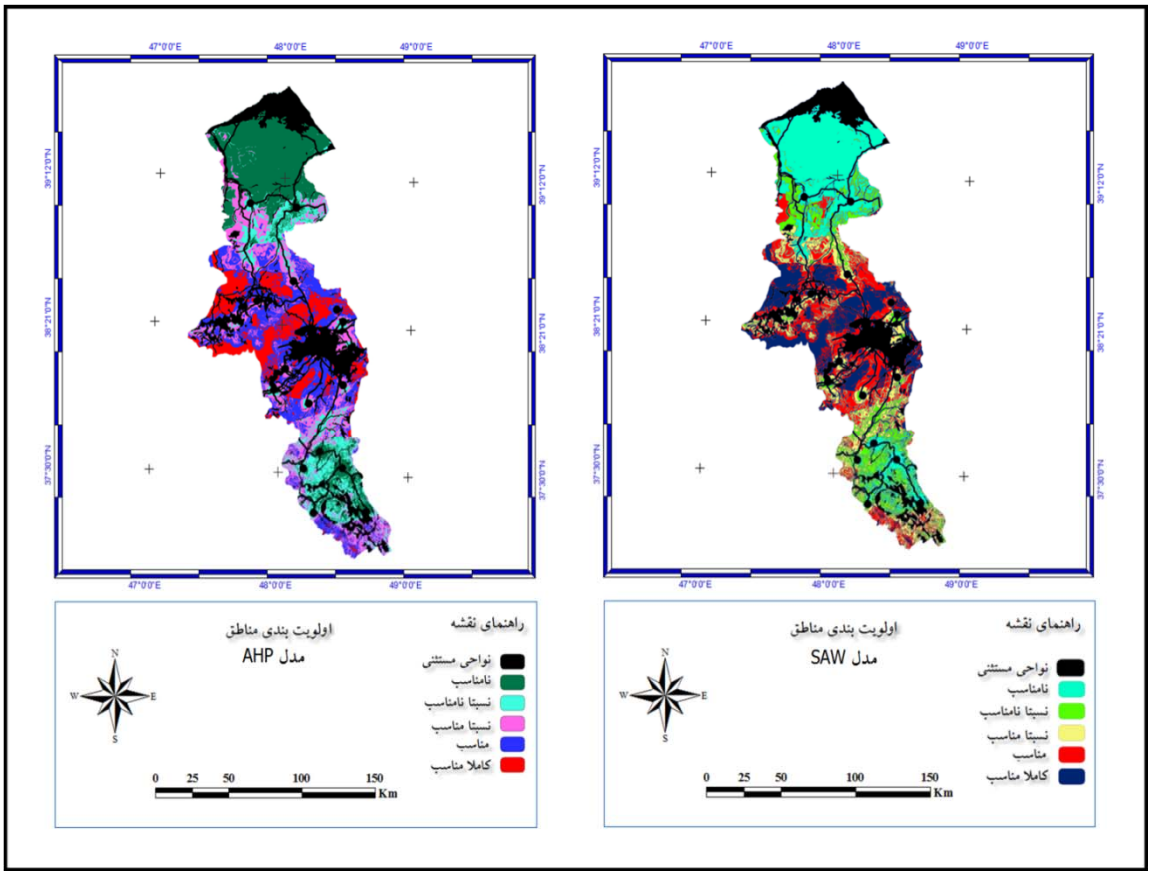
شکل ۴- نمایش شماتیک طبقه‌بندی کلاس‌های نه معیار ورودی حاصل از روش AHP و SAW

نتایج تحقیق

نقشه حاصل از دو روش AHP و SAW به پنج طبقه مرسوم، شامل کاملاً مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، نسبتاً نامناسب و نامناسب طبقه‌بندی شد. از مجموع کل مساحت استان اردبیل، در مدل AHP حدود ۱۶۴۱/۸۱ کیلومترمربع و در مدل SAW حدود ۲۲۷۳/۳۲ کیلومترمربع کاملاً مناسب جهت استقرار توربین‌های بادی تعیین گردید که وجود اختلاف در مساحت زون‌ها به دلیل ماهیت متفاوت دو روش در وزن دهی به معیارها و زیر معیارها می‌باشد. در جدول ۷ مساحت پنج کلاس حاصل از دو مدل بر حسب کیلومترمربع و درصد نشان داده شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بیشتر مناطق کاملاً مناسب و مناسب برای نصب توربین‌های بادی از نظر پتانسیل باد، ارتفاع و کاربری اراضی به ترتیب در دامنه ارتفاعات سبلان و در دشت اردبیل بین ارتفاعات استان قرار گرفته است. دلایل آن می‌تواند قرارگیری این بخش‌ها در حد فاصل ارتفاعات و دشت تلقی گردد که موجب تشدید اختلاف فشار و ایجاد جریانات هوایی از کوه به دشت و برعکس می‌شود. شکل ۵ اولویت‌بندی بخش‌های مختلف منطقه مطالعاتی را از نظر تناسب برای استقرار توربین‌های بادی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این روش با استفاده از کنترل زمینی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که حاکی از برآورده شدن تمامی معیارهای انتخابی در نواحی کاملاً مناسب و رضایت‌بخش بودن به‌کارگیری روش‌های MCDM در تلفیق با GIS در امر مکان‌یابی عرصه‌های مناسب جهت احداث مزارع بادی می‌باشد.

جدول ۷- مساحت کلاس‌ها در دو مدل مورد استفاده

SAW		کلاس	AHP	
مساحت (درصد)	مساحت (کیلومترمربع)		مساحت (کیلومترمربع)	مساحت (درصد)
۲۴/۸۷	۴۴۶۶/۶۹	لایه محدودیت	۴۴۶۶/۶۹	۲۴/۸۷
۱۲/۶۶	۲۲۷۳/۳۲	کاملاً مناسب	۱۶۴۱/۸۱	۹/۱۴
۱۸/۱۸	۳۲۶۴/۵۳	مناسب	۲۹۹۶/۳۲	۱۶/۶۸
۱۲/۱۶	۲۱۸۳/۵۰	نسبتاً مناسب	۲۷۸۰/۱۵	۱۵/۴۸
۱۱/۰۶	۱۹۸۷/۱۹	نسبتاً نامناسب	۲۳۳۷/۶۰	۱۳/۰۱
۲۱/۰۴	۳۷۷۷/۷۷	نامناسب	۳۷۳۰/۴۳	۲۰/۷۷
۱۰۰	۱۷۹۵۳	جمع	۱۷۹۵۳	۱۰۰



شکل ۵ – نقشه اولویت‌بندی اراضی استان اردبیل از نظر تناسب برای استقرار مزارع بادی

بحث و نتیجه‌گیری

همزمان با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی به واسطه پایان‌پذیر بودن این ذخایر و مصرف بی‌رویه آن، شاهد افزایش دمای کره زمین هستیم که بخش عمده این افزایش به سبب استفاده از سوخت‌های فسیلی است. بدین جهت در طول چند دهه اخیر استفاده از انرژی‌های نو مورد توجه قرار گرفته است که نه تنها پایان‌ناپذیر بلکه به طور فراوان در طبیعت موجود می‌باشد. همچنین افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی در چند دهه اخیر سرمایه‌گذاری در این بخش را نیز توجیه‌پذیر ساخته است. انرژی باد به دلیل فراوانی، اقتصادی بودن و قابلیت بهره‌برداری آسان در میان انرژی‌های نو از اقبال زیادی برخوردار هست. در این میان شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از این انرژی پاک مسئله‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن عوامل بسیاری می‌باشد که تجزیه و تحلیل را مشکل می‌سازد. از آن جا که انتخاب مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از این انرژی پاک مستلزم در نظر گرفتن عوامل متعددی می‌باشد و با توجه به گستردگی و پیچیدگی پارامترهای موثر در مکان‌یابی، ضرورت استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آن با سایر امور مدیریتی و برنامه‌ریزی مطرح می‌گردد. همچنین با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و اغلب با خطا همراه می‌باشد، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند نقش مهمی را در فرآیند مکان‌یابی این مناطق و تسریع در روند برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مناسب از این انرژی پاک در کشور ایفا نماید. هر چند که کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در مکان گزینی محل استقرار نیروگاه بادی در ایران در ابتدای راه خود است، از این رو، در این پژوهش از سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره چون روش AHP و SAW در محیط سیستم، استفاده گردید. برای این منظور با توجه به مطالعات در

این زمینه و شرایط محلی منطقه از تأثیرگذارترین و با اهمیت-ترین عوامل جهت تعیین مکان‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی استفاده شد. به دلیل این که AHP ساختار مسایل تصمیم‌گیری پیچیده را به ساختار ساده‌تری برای تجزیه و تحلیل تبدیل می‌کند و برای تعیین وزن معیارها از مقایسه زوجی استفاده می‌نماید، برای تعیین وزن. در مقایسه زوجی وزن یک معیار با در نظر گرفتن ارجحیت نسبی نسبت به سایر معیارها به دست می‌آید، اما در تعیین مستقیم وزن، وزن‌ها به شدت وابسته به نظر تصمیم‌گیرنده است. بعد از تولید نقشه‌های نهایی هر دو روش و مقایسه آن‌ها، روشن شد که روش AHP نتایج محتاطانه‌تری را نسبت به SAW ارایه می‌کند. نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش‌ها در تلفیق با GIS که حاصل آن نقشه‌های کیفی می‌باشد، بهترین مناطق برای استقرار نیروگاه‌های بادی را مشخص نمود. این مناطق در هر دو روش دارای ویژگی‌هایی چند است، از جمله: در وهله اول این پهنه‌ها دارای پتانسیل باد قابل توجه بوده و در نواحی با شیب و ارتفاع نسبتاً مناسب قرار دارد. همچنین این مناطق در اراضی دیم و مرتعی واقع شده که این امر نه تنها از هزینه خرید زمین می‌کاهد، بلکه باعث دوری این مراکز از زمین‌های حاصلخیز و حفظ این زمین‌ها می‌شود.

همچنین یافته‌های این تحقیق، توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی در الگوسازی و کمک به مکان‌یابی محل‌های استقرار نیروگاه‌های بادی و ترکیب معیارهای مختلف فنی، محیطی، اجتماعی- اقتصادی در مدل‌های مختلف را نشان داد. با توجه به طیف وسیع کلاس‌بندی که در روش‌های AHP و SAW استفاده می‌گردد، قدرت تصمیم‌گیری تصمیم گیران افزایش یافته و می‌توان با نتایج حاصل شده در جهت کاهش هزینه‌ها اعم از هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، اقدامات مناسبی را اعمال نمود. از این رو این مطالعه می‌تواند به عنوان گامی مؤثر برای تحقیقات آتی جهت کاربرد بیشتر و استفاده عملی از سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در تلفیق با GIS برای مکان‌یابی مکان‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی باشد.

منابع

1. Moiloa, B, H, E., 2009. Geographical Information Systems for Strategic Wind Energy Site Selection. Faculty of Earth and Life Sciences. Vrij e Universiteit Amsterdam

۲. صلاحی، برومند، «پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل»، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی،۱۳۸۳، شماره ۷۲، صص ۱۰۴- ۸۷

۳. گندم‌کار، امیر، «ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، زمستان ۱۳۸۸، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، صص ۱۰۰-۸۵

۴. علم‌الهدی، س، ح «انرژی باد، سفیر امید- نشریه علمی، آموزشی و پژوهشی صنعت نفت، گاز و پتروشیمی»، سال اول، ۱۳۸۹، شماره ۴، صص ۶۷-۶۱

5. Aydin, N, Y., kentel, E., Duzgun, S., 2010. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews,Vol. 14,pp. 364–373

۶. نشریه سازمان انرژی نو ایران (پیام سانا). تیر ۱۳۸۹. سال چهارم، شماره شانزدهم، ص ۴

7. Bennui, A., Pattanamanee, P., Puetpaiboon, U., 2007. SITE SELECTION FOR LARGE WIND TURBINE USING GIS. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment (ICEE-2007)

8. Sliz-Szkliniarza, B., Vogt, J., 2011. GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 1696 –1707

۹. تقی لو، علی، «ارزیابی پتانسیل‌های نیروی بادی برای احداث توربین‌های بادی (مطالعه موردی استان زنجان)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی، ۱۳۸۹.

۱۰. کاویانی، محمدرضا، «توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران»، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۳۷۴، شماره ۳۶، صص ۱۴۴-۱۲۷

۱۱. زاهدی، م. صلاحی، ب. جمیل، م، «محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل»، پژوهش‌های جغرافیایی. پاییز ۱۳۸۴. شماره ۵۳، صص ۵۵-۴۱

۱۲. صلاحی، ب. زاهدی، م. ساری صراف، «بررسی رژیم باد در ایستگاه سینوپتیک مشگین شهر و تعیین احتمال وقوع سرعت‌های آن با استفاده از مدل ریاضی رایله»، فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جغرافیایی، بهار ۱۳۸۳، شماره ۷۲، ۱۳۵- ۱۱۷

13. Lee, K, H., Jun, S, O., Pak, K, H., Lee, D, H., Lee, K, W., Park, J, P., 2010. Numerical optimization of site selection for offshore wind turbine installation using genetic algorithm. Current Applied Physics, Vol. 10, pp. 302–306

۱۴. سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، «مجموعه اطلاعات راهنمای احداث نیروگاه‌های برق تجدیدپذیر غیر دولتی»، ویرایش اول، ۱۳۸۵، فصل سوم. ص ۱۰۶

۱۵. حقی فام، م، ر. سلطانی، س، «بررسی تأثیر نیروگاه بادی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت»، هفتمین همایش ملی انرژی، دی ماه ۱۳۸۸. تهران- ایران

۱۶. نشریه سازمان انرژی نو ایران (پیام سانا). مرداد ۱۳۸۶. سال اول، شماره ۱، ص ۵

۱۷. زیاری، کرامت الله «اصول و روش‌های برنامه‌ریزی منطقه‌ای»، انتشارات دانشگاه یزد. ۱۳۸۳

۱۸. فرجی سبکبار، حسنعلی و همکاران، «تحلیل تناسب اراضی به منظور استقرار مراکز خدمات روستایی با استفاده از روش‌های PROMETHEE II و مقایسه زوجی در محیط GIS (مطالعه موردی: بخش سلطانیه، شهرستان ابهر)»، مجله توسعه روستایی، پاییز و زمستان ۱۳۸۹. شماره ۲، صص ۱۱۸- ۹۵.

۱۹. غفاری، س، ر. شفقی، س. صالحی، ن، «ارزیابی سازگاری کاربری اراضی شهری با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره فازی»، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای،۱۳۸۹، سال اول. شماره چهارم. صص ۷۶ - ۵۹

۲۰. پرهیزکار، اکبر، غفاری گیلانده، عطا. (مترجم). «سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری» مالچفسکی، یاچک. (مؤلف) تهران: انتشارات سمت ۱۳۸۵.

21. Hill, M, J., Braaten, R., 2005. Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the assess analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis, Environmental Modeling & Software, Vol. 20, pp. 955–976.

22. Omkarprasad, V., Sushil, K., 2006. Analytic hierarchy process: An overview of applications. European Journal of Operational Research, pp. 1-29

23. Çimren, E., Çatay, B., Budak, E., 2007. Development of a machine tool selection system using AHP. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,Vol. 35, pp. 363–376.

24. Malczewski, J., 1997. Propagation of errors in multicriteria location nalysis. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 154–155

25. Janssen, R., 1992. Multiobjective decision support for environmental management. Kluwer, Dordrecht, p. 232

26. Jian, M.,1999. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights. European Journal of Operational Research, Vol. 112, pp. 397- 404.