



نخستین شماره از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال یازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.11, No. 3, Autumn 2019

۷۸-۵۹

## ارزیابی تناسب اراضی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان خراسان رضوی

معین مولوی گنابادی<sup>۱</sup>، محمد طالعی<sup>۲\*</sup>، قاسم جوادی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. دانشجوی دکتری سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۸

### چکیده

تعیین تناسب اراضی، برای استقرار توربین‌های بادی به منظور بهره‌برداری مناسب از پتانسیل‌های موجود و بالقوه انرژی بادی، به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، در مناطق مختلف کشور دارای اهمیت است. تعیین مناطق با تناسب بالا جهت استقرار توربین‌های بادی تأثیر زیادی در کارایی تجهیزات و وسایل تولید برق بادی دارد. تاکنون تحقیقات صورت گرفته در منطقه خراسان رضوی، تنها به تحلیل آماری داده‌های سرعت و جهت باد بسنده کرده و معیارهای مکانی تأثیرگذار در محل احداث نیروگاه بادی را کمتر مدنظر قرار داده است. این تحقیق به دنبال تحلیل تناسب اراضی، برای احداث نیروگاه بادی با استفاده از معیارهای محیطی (شامل شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از مناطق حفاظت‌شده)، فنی (شامل متوسط سرعت باد، پیوستگی باد و تراکم باد) و اقتصادی (شامل فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از فرودگاه، فاصله از منابع طبیعی و فاصله از جاده) و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ANP، ANP-OWA و ANP-DEMATEL است. هدف، ارزیابی نتایج هر یک از مدل‌ها و تولید نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری است. بر این اساس، ابتدا با استفاده از توابع تحلیلی سامانه اطلاعات مکانی، کل محدوده برای هر یک از معیارها پهنه‌بندی شده و سپس نقشه تناسب اراضی با استفاده از هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ذکر شده، تولید و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با بررسی نقشه‌های تناسب اراضی مشخص شد که در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری، ناحیه جنوب شرقی استان دارای بیشترین پتانسیل برای احداث نیروگاه بادی است. نتایج این تحقیق، ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری درباره انتخاب مکان مناسب، به‌منظور احداث نیروگاه بادی در اختیار این صنعت قرار می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** نیروگاه بادی، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA)، آزمون تصمیم‌گیری و آزمایش ارزیابی (DEMATEL)

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تلفن:

۸۸۷۸۶۲۱۲

Email: taleai@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

انرژی خورشیدی، آبی، زیست‌توده، زیست‌گاز و انرژی‌های زمین‌گرمایی از عمده‌ترین منابع انرژی‌های پاک به‌شمار می‌آید (صادقی و همکاران، ۱۳۹۲) و به‌منظور تحقق توسعه پایدار، تأمین زمینه‌ای برای برآورده کردن انرژی موردنیاز از طریق بررسی پتانسیل طبیعی هر منطقه، ضروری است. انرژی باد به علت بازدهی بالا، اقتصادی بودن، تجزیه‌پذیری، عدم آلودگی، سادگی بهره‌برداری و اینکه در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر در ابعاد وسیع‌تری قابل بهره‌برداری است، عملاً از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (مرشدی و همکاران، ۱۳۸۹) و آن را به منبعی مناسب برای تأمین انرژی تبدیل ساخته است (ناصری، ۲۰۱۶؛ Zaim, 2014). از این‌رو در برنامه‌ها و سیاست‌های ملی و بین‌المللی کشورها، نقش ویژه‌ای به این منبع انرژی تجدیدپذیر محول شده است (صلاحی، ۱۳۸۳).

در زمینه توسعه پایدار و گسترش استفاده از انرژی‌های نو، تحقیقات گسترده‌ای به مطالعه پتانسیل انرژی باد پرداخته‌اند (صلاحی، ۱۳۸۳؛ علوی، ۲۰۱۵؛ گندمکار، ۱۳۸۸؛ صالحی، ۲۰۱۵؛ زاهدی، ۱۳۸۴؛ زینالی، ۱۳۹۵). در این تحقیقات، با استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد در یک بازه زمانی مشخص و انجام تحلیل‌های آماری، مکان‌های دارای پتانسیل بالا انرژی باد شناسایی شده‌اند. در این راستا، گندم‌کار (۱۳۸۸) با استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد، به ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کل کشور ایران در یک بازه ۱۰ ساله (۱۹۹۴-۲۰۰۳)، پرداخت و کل کشور را در چهار کلاس بسیار مناسب، مناسب در بعضی ماه‌های سال، مناسب در زمان محدودی از سال و نامناسب طبقه‌بندی کرد. در این تحقیق و تحقیقات مشابه دیگر، تنها بر اساس داده‌های سرعت و جهت باد، مکان‌های مناسب شناسایی شده است، درحالی‌که وجود عوامل متعدد در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و تأثیر مکان در عملکرد و بازدهی نیروگاه‌های بادی، به‌کارگیری ابزار تحلیل و مدل‌سازی مناسب را ضروری می‌نماید. امروزه

سیستم اطلاعات مکانی (GIS<sup>۱</sup>) و ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM<sup>۲</sup>)، به‌طور گسترده، قابلیت به‌کارگیری در برنامه‌ریزی‌های مکانی و مباحث مربوط به مکان‌یابی را دارا است. در زمینه تحلیل تناسب اراضی برای نیروگاه‌های بادی بنوئی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۷) در کشور تایلند با تلفیق تحلیل سلسله مراتبی (AHP<sup>۴</sup>) و GIS و با در نظر گرفتن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی بزرگراه‌ها، مناطق استراتژیک، رودخانه‌ها و کانال‌ها مناطق مستعد برای نصب توربین‌های بادی را شناسایی کردند. آیدین و همکاران (۲۰۱۰) از تلفیق سیستم اطلاعات مکانی و منطق فازی و با استفاده از معیارهای پتانسیل باد، فاصله از شهرهای بزرگ، رودخانه، فرودگاه، مناطق حفاظت‌شده و سکونتگاه پرنده‌ها و شاخص آلودگی صوتی، مناطق مناسب برای نیروگاه بادی به‌منظور بهره‌گیری در برنامه‌ریزی فضایی را تعیین کردند. اسلیز کلینیارز<sup>۵</sup> و فوگت<sup>۶</sup> (۲۰۱۱) در لهستان، با در نظر گرفتن سه معیار اقتصادی، اکولوژیکی و فنی، اقدام به ارزیابی پراکنش پتانسیل باد با استفاده از GIS را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن عواملی مانند ارتفاع، مناطق شهری، پهنه‌های آبی، مناطق جنگلی، مناطق حفاظت‌شده، شیب، راه‌های ارتباطی و شبکه انتقال نیرو، پهنه‌های مناسب برای سرمایه‌گذاری در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی را مشخص کردند.

در این راستا، تحقیقاتی از تلفیق GIS و روش AHP به‌عنوان ساده‌ترین روش MCDM، برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در ایران بهره برده‌اند و توانایی سیستم اطلاعات مکانی و تصمیم‌گیری چندمعیاره در مکان‌یابی نیروگاه بادی را نمایان

1. Geospatial Information System
2. Multi Criteria Decision Making
3. Benui
4. Analytic Hierarchy Process
5. Sliz-Szkliniarz
6. Vogt

چندمعیاره ANP، DEMATEL و OWA<sup>۲</sup> با GIS است. در راستای این هدف، یک مدل ترکیبی (DEMATEL-ANP)، به منظور تعیین دقیق تر وابستگی‌ها میان معیارها در روش ANP با استفاده از روش DEMATEL ارائه شده است و علاوه بر آن از روش OWA به جای روش‌های ساده تلفیق معیارها - نظیر WLC<sup>۳</sup> که در اکثر مقالات گذشته مورد استفاده قرار گرفته است - برای تلفیق معیارها و ارائه نتایج در سناریوهای مختلف ریسک‌پذیری استفاده شده است.

تحقیق حاضر، از ۵ بخش تشکیل شده است. در قسمت اول، مقدمه شامل ضرورت و اهمیت تحقیق و پیشینه تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بیان شده است. در بخش دوم، به توضیح مبانی نظری تحقیق و معرفی روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است. بخش‌های سوم و چهارم نیز به بیان روش تحقیق و پیاده‌سازی آن می‌پردازد. در انتها در بخش پنجم، نتایج حاصل از تحقیق بیان شده و ارزیابی آن‌ها نیز صورت گرفته است.

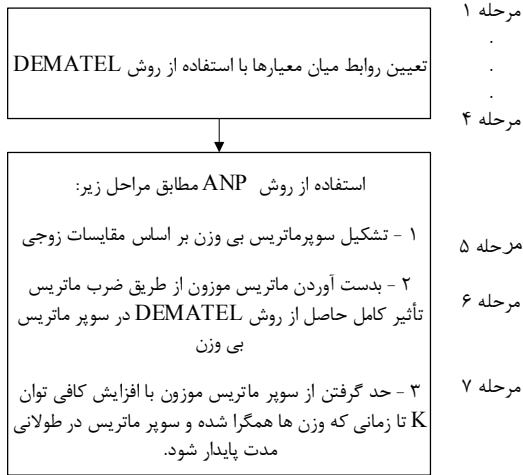
## ۲- مبانی نظری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، مدل توسعه‌یافته فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است که در سال ۱۹۹۶ توسط Saaty ارائه شد (Saaty, 1996). روش AHP، با فرض استقلال معیارها از یکدیگر و ارتباط یک‌طرفه میان معیارها مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره را ساده می‌کند. روش ANP، با وارد کردن اثرات متقابل و بازخوردهای میان معیارها در مدل تصمیم‌گیری می‌تواند پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به AHP را مدل‌سازی کند (Saaty, 1990). مزیت اصلی روش ANP نسبت به روش AHP، توانایی برآورد دقیق تر وزن معیارها، با تشکیل یک شبکه از معیارهای وابسته است. این روش می‌تواند مسائلی را که به روش سلسله مراتبی

ساخته‌اند. (مرشدی، ۱۳۸۹؛ اصغری، ۱۳۹۰؛ جعفری، ۱۳۹۲؛ اسدی، ۱۳۹۴؛ یوسفی ۱۳۹۵). ناصحی و همکاران (۲۰۱۶) از تلفیق منطق فازی و روش فرآیند تحلیل شبکه (ANP)<sup>۱</sup> برای شناسایی مناطق مستعد احداث نیروگاه بادی در استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. عزیزی و همکاران (۲۰۱۴)، از روش‌های ANP و Fuzzy-AHP در ترکیب با GIS برای شناسایی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه بادی استان اردبیل استفاده کردند. در این تحقیق، مقایسه نتایج خروجی دو روش، نشانگر دقت و حساسیت بیشتر روش Fuzzy-AHP نسبت به روش ANP در رتبه‌بندی معیارها است. نیارکی و حاجیلو (۲۰۱۶) از مدل تصمیم‌گیری ANP در ترکیب با GIS برای ارزیابی تناسب اراضی به‌منظور احداث نیروگاه بادی بر مبنای ۱۳ زیرمعیار فنی-زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی بهره‌گرفتند. این تحقیق نشان داد استفاده از روش ANP با توجه به در نظر گرفتن بازخوردهای میان معیارها در هر سطح و میان معیارهای مختلف در سطوح مختلف، منجر به ارائه نتایج دقیق تری می‌شود. در ادامه مطالعات صورت‌گرفته در زمینه مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی، برخی از تحقیقات از ترکیب روش‌های DEMATEL و ANP برای ارزیابی تناسب اراضی استفاده کرده‌اند (Azizi et al, 2014; Büyüközkan and Güleriyüz, 2016; Gigović et al, 2017). این تحقیقات، توانایی روش DEMATEL در تعیین وابستگی و ارزیابی ارتباطات پیچیده میان معیارها را آشکار کرد.

در منطقه استان خراسان رضوی، تاکنون مطالعاتی مبنی بر پتانسیل‌سنجی انرژی باد صورت گرفته است که تماماً از داده‌های سرعت و جهت باد و تحلیل آماری آن‌ها استفاده کرده‌اند (گندمکار، ۱۳۸۸؛ زنده‌دل رودی و همکاران ۱۳۹۴؛ قائمی و اصیلی، ۱۳۹۳). با این وجود، از سیستم اطلاعات مکانی و تحلیل معیارهای مکانی تأثیرگذار بر احداث نیروگاه بادی، غفلت شده است. تحقیق حاضر به دنبال ارزیابی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری

1. Analytical Network Process
2. Ordered Weighted Average
3. Weighted Linear Combination



شکل ۱. روند مدل ترکیبی DEMATEL-ANP

مرحله ۲- محاسبه ماتریس اولیه:

ماتریس تأثیر مستقیم اولیه  $X = [x_{ij}]_{nm}$  از طریق نرمال‌سازی ماتریس میانگین  $A$  به دست می‌آید. به‌طور خاص، ماتریس  $X$  با استفاده از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید؛ به صورتی که تمام المان‌های قطر اصلی برابر صفر می‌شود.

$$X = s \times A \quad \text{رابطه (۲)}$$

رابطه (۳)

$$s = \min \left[ \frac{1}{\max_i \sum_{j=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}|} \right]$$

مرحله ۳- به دست آوردن ماتریس تأثیر مستقیم/غیرمستقیم کامل:

ماتریس تأثیر کامل  $T$  مطابق رابطه ۴، به دست می‌آید.

رابطه (۴)

$$T = X + X^2 + \dots + X^k = X (I + X + X^2 + \dots + X^{k-1}) (I - X)^{-1} \\ = X (I - X^k) (I - X)^{-1}, \quad T = X (I - X)^{-1} \\ \lim_{k \rightarrow \infty} X^k = [0]_{n \times n}$$

1. Fontela
2. Gabus

قابلیت مدل‌سازی ندارند، با در نظر گرفتن وابستگی میان معیارهای سطح بالا با معیارهای سطح پایین در یک شبکه مسئله تصمیم‌گیری، حل کند (Pak, 2011). به‌منظور استخراج روابط متقابل و شدت همبستگی میان معیارها، روش آزمون تصمیم‌گیری و آزمایش ارزیابی (DEMATEL) توسط فونتلا<sup>۱</sup> و گابوس<sup>۲</sup> (۱۹۷۲) ارائه شده است. روش‌های DEMATEL و ANP نیز برای تعیین درجه وابستگی میان معیارها و استفاده از این درجات برای نرمال‌سازی سوپرماتریس بی‌وزن در ANP در برخی تحقیقات با یکدیگر تلفیق شده‌اند (Chen and Yu, 2008; Liou et al, 2007; Tsai et al, 2013; Vujanović et al, 2012, Wang and Tzeng, 2012). روند ترکیب مدل‌های DEMATEL و ANP در مدل ترکیبی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

## ۲-۱- روش آزمون تصمیم‌گیری و آزمایش ارزیابی (DEMATEL)

روش DEMATEL به‌منظور تهیه ارتباط متقابل میان معیارها مورداستفاده قرار می‌گیرد؛ که شامل چهار مرحله می‌شود (Tseng, M.L., 2009).

مرحله ۱- محاسبه ماتریس میانگین اولیه با استفاده از امتیازات:

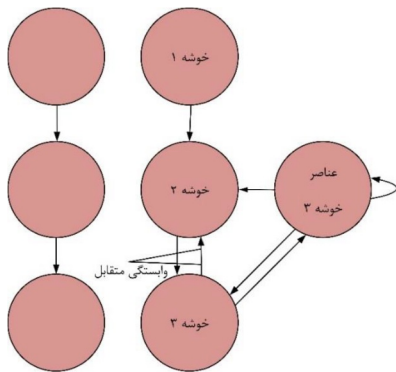
در این مرحله درجه تأثیر مستقیم معیار  $i$  بر معیار  $j$  مشخص می‌شود؛ که به‌صورت  $a_{ij}$  نمایش داده می‌شود. برای این منظور مقیاس‌های ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ بازه «هیچ تأثیر» تا «تأثیر خیلی زیاد» مورداستفاده قرار می‌گیرد. ماتریس میانگین  $A$  مطابق رابطه ۱ نمایش داده می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

رابطه (۱)

روش ANP

مدل تحلیل شبکه‌ای، نمایش‌دهنده تصمیم‌سازی بر اساس شبکه‌ای از معیارها و گزینه‌ها به صورت گروه‌بندی در خوشه‌ها است. تمام عناصر در شبکه می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند. بازخورد و وابستگی بین هر دو عنصر خوشه‌ها و بین خود خوشه‌ها امکان‌پذیر است. ارتباط در شبکه به وسیله کمان‌ها نمایش داده می‌شود. به این طریق که جهت کمان نشان‌دهنده مسیر وابستگی است. روابط بیرونی بین خوشه‌ها توسط فلش دوطرفه مشخص می‌شود؛ درحالی‌که روابط درونی بین عناصر یک خوشه توسط کمان بسته، نمایش داده می‌شود. مدل ANP از دو بخش که بخش اول آن شامل کنترل سلسله مراتبی یا شبکه‌ای از معیارها و زیر معیارها و بخش دوم شامل شبکه‌ای از تأثیرات متقابل بین عناصر و خوشه‌ها است، تشکیل می‌شود. شکل (۲)، تفاوت ساختار شبکه‌ای و سلسله مراتبی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تفاوت ساختاری مدل سلسله مراتبی و مدل شبکه (Chang et al, 2005)

سوپر ماتریس اصلی، از مقایسه زوجی ماتریس‌های نسبی معیارها به دست می‌آید. هر درایه در این ماتریس، میزان تأثیر و اهمیت هر معیار در مقایسه با سایر معیارها را با توجه به ترجیحات و هدف اصلی بیان می‌کند. در روش ANP، مقدار اهمیت نسبی، توسط مقیاس ۹-تایی ساعتی بیان می‌شود؛ که ۱ اهمیت برابر

در ادامه، مطابق روابط ۵ و ۶ بردارهای  $r$  و  $c$ ، به ترتیب مجموع سطری و ستونی ماتریس  $T$  را در اختیار قرار می‌دهند. بردار  $I_i$ ، مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم معیار  $i$  بر سایر معیارها را نشان می‌دهد؛ درحالی‌که بردار  $C_j$  مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم سایر معیارها بر معیار  $j$  را در اختیار قرار می‌دهد. به علاوه، در حالت  $i = j$  (تلفیق مجموع سطری و ستونی)  $(I_i + C_j)$  یک شاخص از قدرت نفوذ دریافتی و گذاشته‌شده معیار  $i$  است. به عبارت دیگر،  $I_i + C_j$  درجه نقش مرکزی معیار  $i$  را که در مسئله بازی می‌کند، مشخص می‌کند. اگر  $(I_i + C_j)$  مثبت باشد، معیار  $i$  بر روی سایر معیارها تأثیرگذار است و اگر  $(I_i + C_j)$  منفی باشد، معیار  $i$  از سایر معیارها تأثیرپذیر است.

$$r = (r_i)_{n \times 1} = \left[ \sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$c = (c_j)_{n \times 1} = (c_j)_{1 \times n}^T = \left[ \sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n}^T \quad \text{رابطه (۶)}$$

مرحله ۴- تعیین یک مقدار حد آستانه و به دست آوردن نقشه رابطه-تأثیر (IRM)

تعیین یک مقدار حد آستانه  $\alpha$  برای فیلتر کردن اثرات جزئی فاکتورهای ماتریس  $T$  برای تهیه ساختار رابطه معیارها ضروری است. بر مبنای ماتریس  $T$ ، هر آرایه  $t_{ij}$ ، اطلاعاتی در مورد چگونگی تأثیر معیار  $i$  بر معیار  $j$  فراهم می‌کند. در عمل، اگر تمام اطلاعات از ماتریس  $T$  به IRM تبدیل شود، نقشه برای نمایش اطلاعات ضروری به تصمیم‌گیرندگان بسیار پیچیده خواهد بود. تصمیم‌گیرندگان به منظور کاهش پیچیدگی IRM، یک مقدار حد آستانه برای سطح تأثیر تعیین می‌کنند. تنها معیارهایی که مقدار تأثیر آن‌ها در ماتریس  $T$  بیش‌تر از حد آستانه باشد به IRM تبدیل می‌شوند.

مرحله ۵- تشکیل سوپر ماتریس مقایسه معیارها به

نرمال‌سازی می‌شود.

$$d_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}^{\alpha} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$T_s = \begin{bmatrix} \frac{t_{11}^{\alpha}}{d_1} & \dots & \frac{t_{1n}^{\alpha}}{d_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{t_{n1}^{\alpha}}{d_n} & \dots & \frac{t_{nn}^{\alpha}}{d_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^s & \dots & t_{1n}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1}^s & \dots & t_{nn}^s \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

با استفاده از ماتریس نرمال شده  $T_s$  و سوپر ماتریس بی‌وزن  $W$  مطابق رابطه ۱۱ سوپر ماتریس  $W_w$  به دست می‌آید. رابطه ۱۱، سطح تأثیر را مبنای نرمال‌سازی برای تشکیل سوپر ماتریس وزن‌دار نشان می‌دهد.

$$W_w = \begin{bmatrix} t_{11}^s \times W_{11} & t_{21}^s \times W_{12} & \dots & t_{n1}^s \times W_{1n} \\ t_{12}^s \times W_{21} & t_{22}^s \times W_{22} & \dots & t_{n2}^s \times W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{1n}^s \times W_{n1} & t_{2n}^s \times W_{n2} & \dots & t_{nn}^s \times W_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

مطابق رابطه ۱۲، سوپر ماتریس وزن‌دار  $W_w$  به توان  $k$  (عدد اختیاری بزرگ) رسیده تا همگرا شده و در درازمدت پایدار شود.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_w^k \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

### ۲-۲- روش عملگر وزنی مرتب‌شده (OWA)

عملگر وزنی مرتب‌شده (OWA) یک رده از روش‌های MCDM برای تلفیق معیارها است که توسط یانگر<sup>۱</sup> (۱۹۸۸) توسعه داده شده و یک ابزار برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. OWA شامل دو مجموعه وزن ۱- وزن اهمیت معیارها و ۲- وزن‌های ترتیبی است. وزن‌های ترتیبی OWA رفتار این عملگر را در دو بعد ریسک‌پذیری و جبران‌شدگی را مشخص می‌کند (شکل ۳). این دو بعد فضای تصمیم‌گیری را شکل می‌دهند. عملگر OWA

و ۹ بیشترین اهمیت را نشان می‌دهد (Saaty, 1990). شکل کلی سوپر ماتریس، مطابق رابطه ۷ است. در رابطه ۷  $C_n$  خوشه  $n$  ام،  $e_{nm}$  معیار  $m$  ام در خوشه  $n$  ام و  $W_{ij}$  ماتریس مقایسه اهمیت معیارهای خوشه  $j$  ام در مقایسه با خوشه  $i$  ام است. اگر خوشه  $j$  ام هیچ تأثیری بر خوشه  $i$  ام نداشته باشد خواهیم داشت:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & \dots & C_n \\ e_{11} & L & e_{1m_1} & \dots & e_{n1} & L & e_{nm_n} \end{matrix} \\ \begin{matrix} e_{11} \\ C_1 M \\ e_{1m_1} \\ \vdots \\ e_{n1} \\ C_n M \\ e_{nm_n} \end{matrix} & \begin{bmatrix} W_{11} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{رابطه (۷)}$$

مرحله ۶- به دست آوردن سوپر ماتریس وزن‌دار از طریق ضرب در ماتریس نرمال

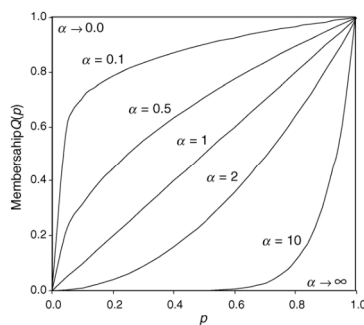
در روش متداول، با تبدیل هر ستون به ستونی که جمع عناصر آن یک شود؛ سوپر ماتریس وزن‌دار به دست می‌آید. هر المان در یک ستون بر تعداد خوشه‌ها تقسیم‌شده تا مجموع عناصر هر ستون برابر یک شود. استفاده از این روش نرمال‌سازی، سبب می‌شود هر خوشه، وزن یکسانی داشته باشد. با این‌وجود، ممکن است تأثیر هر خوشه بر سایر خوشه‌ها، متفاوت باشد؛ بنابراین؛ فرض وزن برابر، برای هر خوشه جهت به دست آوردن سوپر ماتریس وزن‌دار، غیرمنطقی است. برای حل این مشکل از روش DEMATEL استفاده می‌کنیم. در وهله اول، از ماتریس تأثیر کامل  $T$  و مقدار حد آستانه  $\alpha$  برای تولید ماتریس جدید استفاده می‌شود. ماتریس تأثیر کامل با برش  $\alpha$  مطابق رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$T_{\alpha} = \begin{bmatrix} t_{11}^{\alpha} & \dots & t_{1n}^{\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1}^{\alpha} & \dots & t_{nn}^{\alpha} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۸)}$$

ماتریس  $T_{\alpha}$  با استفاده از روابط ۹ و ۱۰

1 - Yager

زاده (۱۹۸۳)، مفهوم کمیت سنج زبانی فازی را با استفاده از واژه‌هایی نظیر «اکثر»، «زیاد»، «برخی»، «حداقل یکی» و «همه» و مجموعه‌های فازی ارائه داد. رابطه (۱۳)  $Q(p) = p^\alpha$  ,  $\alpha > 0$  شکل ۴، مجموعه‌ای از کمیت سنج‌های تولیدشده را با استفاده از رابطه ۱۳ نشان می‌دهد. با تغییر پارامتر  $\alpha$ ، می‌توان کمیت سنج‌های زبانی مختلف و وزن‌های ترتیبی متناسب با آن‌ها را میان ۲ حالت کمیت سنج «همه» و «حداقل یکی» تولید کرد. با مجموعه‌های مختلفی از وزن‌های ترتیبی، می‌توان بازه وسیعی از عملگرهای OWA را تولید کرد به گونه‌ای که هر کدام درجه ریسک‌پذیری متفاوتی داشته باشند.



شکل ۴. مجموعه‌ای از کمیت سنج‌های تولیدشده با استفاده از رابطه ۱۳ (مالکفسکی، ۲۰۰۶)

مرحله ۳- تولید وزن‌ها ترتیبی متناسب با Q

وزن ترتیبی  $V_j$  متعلق به معیار با وزن  $W_j$  بر مبنای کمیت سنج زبانی Q با استفاده از رابطه ۱۴ به دست می‌آید.

رابطه (۱۴)

$$V_i = \left(\frac{i}{n}\right)^\alpha - \left(\frac{i-1}{n}\right)^\alpha, i = 1, 2, \dots, n$$

در رابطه ۱۴،  $i$  موقعیت معیار در بردار ترتیبی نزولی در هر موقعیت از نقشه و  $n$  تعداد کل معیارها را مشخص می‌کند.

1. Malczewski

مرحله ۴- محاسبه ارزیابی کلی برای هر گزینه با

می‌تواند مجموعه وسیعی از معیارها را در برگیرد و در استفاده از این عملگر رفتار تصمیم گیران، محدوده «تمام معیارها برقرار شوند» تا «حداقل یکی از معیارها برقرار شود» را در برمی‌گیرد. در ادامه یاگر (۱۹۹۶)، عملگر OWA را با استفاده از کمیت‌سنج‌های زبانی فازی، اصلاح کرد. مالکفسکی<sup>۱</sup> (۲۰۰۶)، عملگر فازی OWA را برای مسائل تصمیم‌گیری مبتنی بر GIS مورد استفاده قرار داد. برای این منظور،  $W_j$  را وزن اهمیت معیارها و  $V_j$  را وزن ترتیبی OWA در نظر گرفت. وزن  $W_j$  به تمام نقاط نقشه معیار زام تعلق می‌گیرد و بیانگر اهمیت نسبی معیار زام نسبت به سایر معیارها است. وزن‌های ترتیبی، در هر نقشه معیار بر مبنای مقدار نقشه، در هر نقطه مشخص می‌شود و از یک موقعیت به موقعیت دیگر در یک نقشه تغییر می‌کند. در هر موقعیت، مقادیر نقشه‌های معیار به صورت نزولی مرتب‌شده و وزن ترتیبی  $V_j$  به زامین نقشه در این موقعیت تعلق می‌گیرد. محاسبه وزن‌های عملگر فازی OWA در محیط GIS شامل ۴ مرحله است.



شکل ۳. مثلث استراتژی تصمیم‌گیری

مرحله ۱- تخمین وزن معیار

برای تخمین وزن معیارها روش‌های متعددی وجود دارد که هر کدام با توجه به شرایط مسئله می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، وزن معیارها با استفاده از روش ANP تعیین خواهد شد. پس از تعیین وزن معیارها  $W_j$ ، مقادیر مرتب‌شده معیارها به صورت نزولی  $Z_{j1} \geq Z_{j2} \geq \dots \geq Z_{jn}$  به طوریکه  $Z_{j1} \geq Z_{j2} \geq \dots \geq Z_{jn}$  شود، به دست می‌آید.

مرحله ۲- تعیین کمیت سنج زبانی فازی Q

ناحیه مورد مطالعه، سعی شده است که مؤثرترین و ضروری‌ترین عوامل فنی، اقتصادی و محیطی در نظر گرفته شود.

- اطلاعات باد: محاسبه پتانسیل باد در یک منطقه جغرافیایی، اولین و مهم‌ترین پایه و اساس، برای استفاده از انرژی باد، ارزیابی و سایر مشخصات آن است. متوسط سالانه سرعت باد، تراکم قدرت باد و درصد روزهای بادی از مهم‌ترین ویژگی‌ها برای انتخاب یک مکان مناسب برای احداث نیروگاه بادی است.

- ارتفاع: متناسب با توپوگرافی و ارتفاع منطقه، سرعت باد و جهت باد تغییر می‌کند. همچنین افزایش ارتفاع، امکان ساخت تأسیسات را دشوار می‌کند و هزینه ساخت را افزایش می‌دهد.

- شیب: شیب و جهت شیب از شاخص‌های محیطی است که در انتخاب مکان مناسب برای ساخت نیروگاه، تأثیرگذار است. با افزایش شیب، هزینه انتقال و تجهیزات برای ساخت و ساز نیروگاه بادی افزایش می‌یابد.

- فاصله از مناطق شهری و روستایی: احداث توربین‌های بادی در نزدیکی مناطق شهری و روستایی، به علت ایجاد سروصدای حاصل از آن‌ها، دارای محدودیت است. در این راستا، در مطالعات مختلف، فواصلی برای حفاظت از مناطق مسکونی در نظر گرفته شده است.

- فاصله از فرودگاه: توربین‌های بادی به منظور رعایت نکات ایمنی نیازمند یک حداقل قابل توجه از مناطقی مانند فرودگاه‌ها هستند. توربین‌های بادی می‌توانند با سیگنال‌های رادارهای هوایی مقابله کنند. به همین منظور، فاصله از فرودگاه‌ها حائز اهمیت است.

- فاصله از رودخانه: دوری مزارع بادی از رودخانه‌ها، ریسک قرار گرفتن تأسیسات نیروگاه در مسیر سیلاب را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، منابع آبی نظیر رودخانه‌ها، زیستگاه گونه‌هایی از پرندگان است؛ بنابراین نزدیکی توربین‌های بادی به منابع آبی می‌تواند بر روی پرندگان اثر گذاشته و احتمال

استفاده از تابع ترکیب OWA

برای هر موقعیت، در نقشه با در نظر گرفتن وزن‌های معیار  $W_j$  و وزن‌های ترتیبی  $V_j$ ، مقدار نهایی نقشه حاصل از تلفیق معیارها با استفاده از روش OWA مطابق رابطه ۱۵، به دست می‌آید.

$$OWA_{(i)} = \sum_{j=1}^n w_j Z_{ij} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

### ۳- روش انجام تحقیق

روند انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه بادی در شکل ۵، نمایش داده شده است. در مرحله اول شاخص‌های تناسب اراضی با نیروگاه بادی با انجام مطالعات کتابخانه‌ای جمع‌آوری و تلاش شده است که پارامترهای تأثیرگذار فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شود. در همین راستا، سیزده شاخص مهم برای تحلیل تناسب اراضی برای نیروگاه بادی در نظر گرفته شده است که در شکل ۵ قابل مشاهده است. این لایه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 پردازش و در قالب فرمت رستر به منظور مکان‌یابی در پایگاه داده، ذخیره‌سازی شده است. در مرحله دوم، مدل DEMATEL برای شناسایی ارتباط میان شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفته و از مدل ANP برای تعیین وزن شاخص‌ها استفاده شده است. همچنین با استفاده از مدل OWA، وزن ترتیبی شاخص‌ها تعیین شده است. در نهایت، نقشه تناسب اراضی برای هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد نظر، تولید و در آخرین قدم، نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

### ۳-۱- معیارهای انتخابی برای تحلیل تناسب اراضی

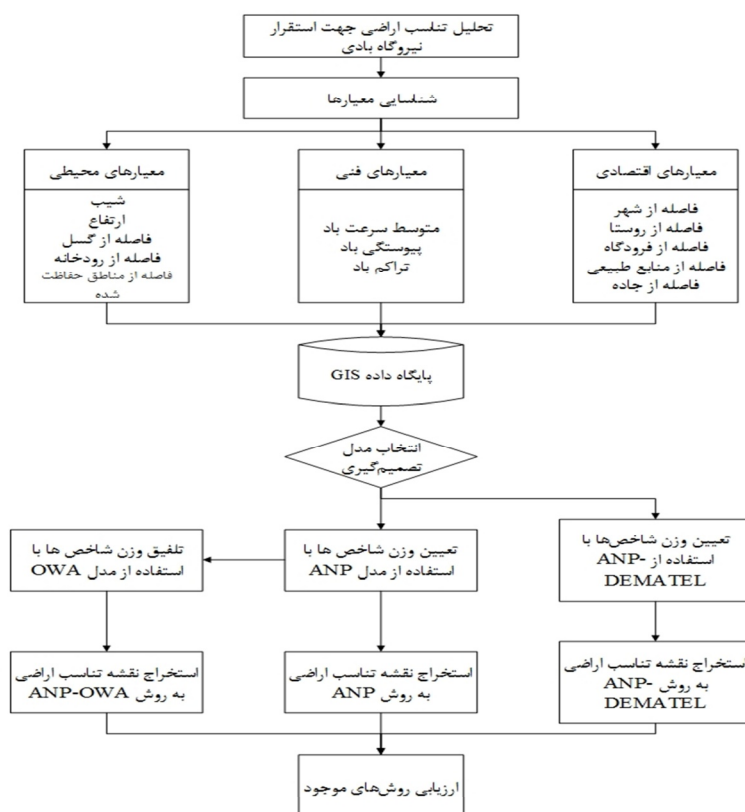
#### جهت استقرار نیروگاه‌های بادی

در ارزیابی تناسب اراضی با هدف احداث نیروگاه بادی، معیارهای متعددی را می‌توان دخالت داد. معمولاً هرچقدر عوامل بیشتری در مدل دخالت کند، خروجی دقیق‌تری خواهد داشت؛ اما با توجه به عدم دسترسی به تمامی اطلاعات دخیل در مکان‌یابی این مراکز در



در این مطالعه، بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای، معیارهای شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از فرودگاه، فاصله از منابع طبیعی و فاصله از جاده، انتخاب شده‌اند. با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های پتانسیل باد با استفاده از روش درون‌یابی IDW، برای منطقه مورد مطالعه تولید شده است. به منظور ایجاد امکان تلفیق لایه‌ها، معیارها بر اساس تأثیر مثبت یا منفی که در هدف نهایی دارند به دو گروه سود و هزینه دسته‌بندی شدند. سپس به منظور قابل مقایسه بودن معیارها، نقشه‌های هر یک از معیارها نسبت به بیشترین مقدار نرمال شده است. نقشه معیار در شکل ۸ نمایش داده شده است. برای بصری سازی، نقشه‌ها به روش هم‌فاصله در پنج کلاس طبقه‌بندی شده‌اند.

برخورد پرنندگان با توربین‌ها را افزایش دهد. - فاصله از منابع طبیعی: مزارع بادی می‌بایست تا حد امکان از جنگل‌ها، مزارع، مراتع و غیره فاصله داشته باشند تا طبیعت بکر این مناطق را مورد تهدید قرار ندهند. همچنین به دلیل وجود زیستگاه جانوران در این مناطق، نزدیکی به مزارع بادی، خطرات احتمالی برای جانوران و همچنین تأسیسات نیروگاه را افزایش می‌دهد. - فاصله از جاده: نزدیکی مزارع بادی به شبکه حمل‌ونقل، در کاهش هزینه حمل‌ونقل تجهیزات و همچنین بهبود چشم‌انداز منطقه مؤثر است. - فاصله از گسل: به منظور جلوگیری از خطرات احتمالی برای نیروگاه و همین‌طور جلوگیری از سقوط دکل‌های بسیار بزرگ توربین‌های بادی، رعایت فاصله از گسل‌ها ضروری است.



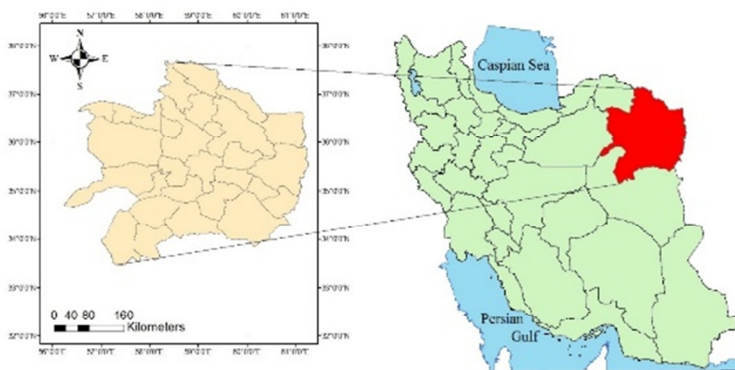
شکل ۵. روش انجام تحقیق

#### ۴- پیاده‌سازی و نتایج

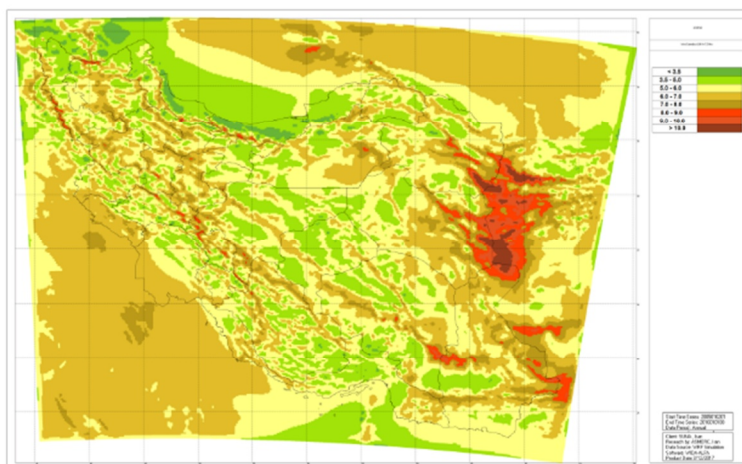
##### ۴-۱- محدود مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران به مرکزیت مشهد قرار دارد. این استان، وسعتی بیش از ۱۲۷ هزار کیلومترمربع داشته که از این منظر، چهارمین استان بزرگ کشور است؛ و بین مدار جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی از طول شرقی از نصف النهار گرینویچ واقع شده است (شکل ۶). خراسان رضوی، از تنوع اقلیمی برخوردار است؛ اما به‌طور کلی، جزو مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود.

اختلاف دمای زیاد، میان تابستان و زمستان و وجود رشته‌کوه بینالود موجب شده؛ در این منطقه باد محلی مناسبی وجود داشته باشد که از آن به‌عنوان یک باد اقتصادی یاد می‌شود. در این استان، دو نیروگاه بادی بینالود و خواف با ظرفیت تولید ۲۸۳۸۰ و ۱۴۰۰۰ کیلووات وجود دارد. این امر، بیانگر پتانسیل و اهمیت انرژی باد و نیروگاه بادی در استان خراسان رضوی است. در اطلس‌های بادی تولیدشده توسط سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، استان خراسان رضوی جزو مناطق با پتانسیل بالای انرژی بادی نشان داده شده است (شکل ۷).



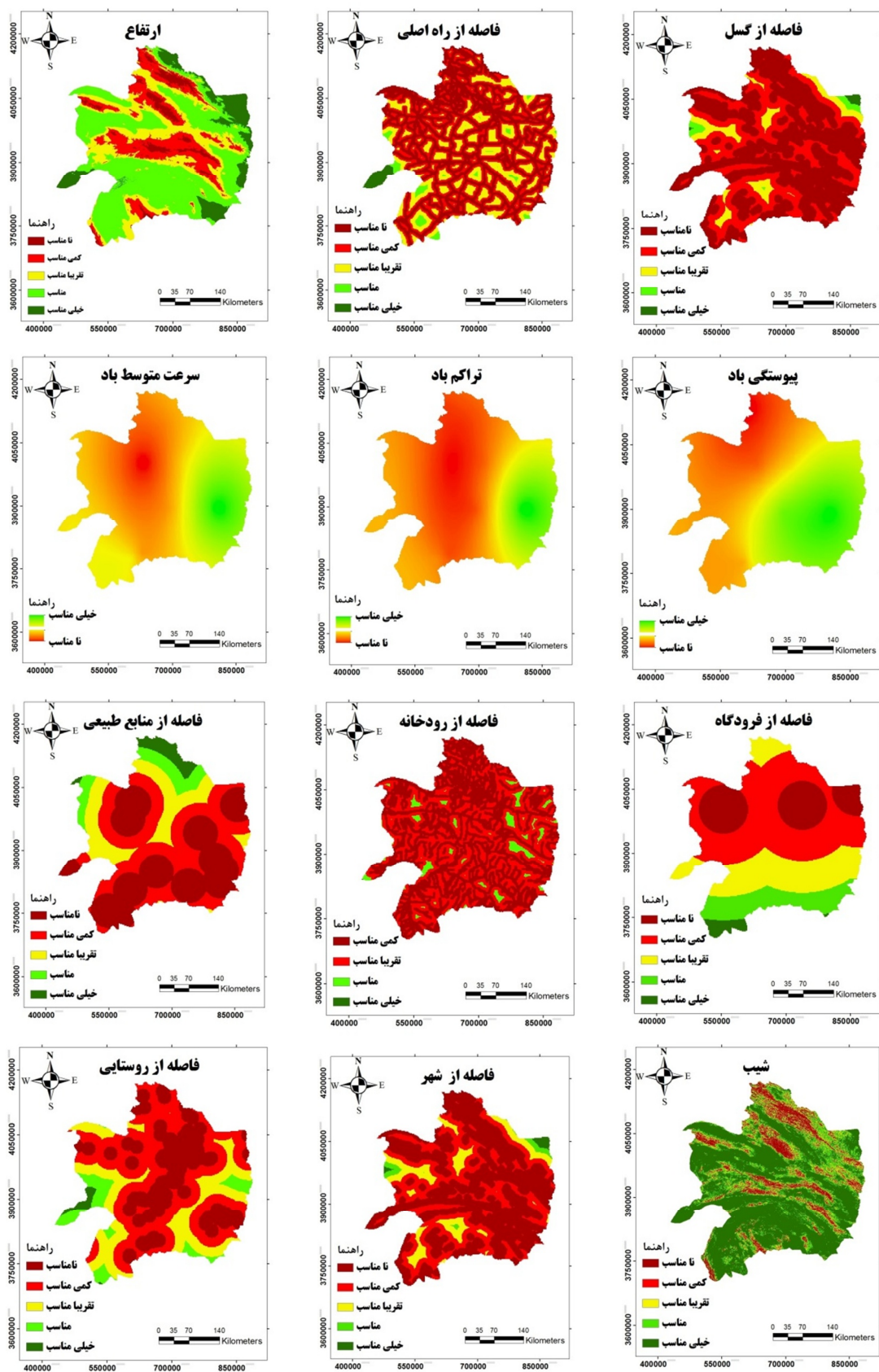
شکل ۶. موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی در ایران



شکل ۷. اطلس بادی کشور

(سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق)

معین مولوی گنابادی و همکاران



شکل ۸. نقشه‌های معیار ورودی مدل تصمیم‌گیری

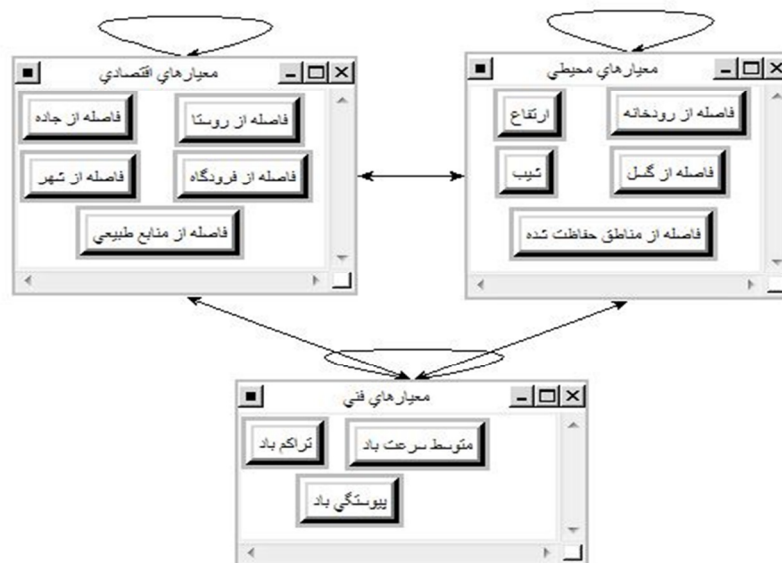
سنجش از دور و GIS ایران  
 سال یازدهم = شماره سوم = پاییز ۱۳۹۸

نمایش می‌دهد. به‌منظور بصری سازی نتایج ارزیابی، این نقشه در پنج کلاس به روش هم فاصله، طبقه‌بندی شده است.

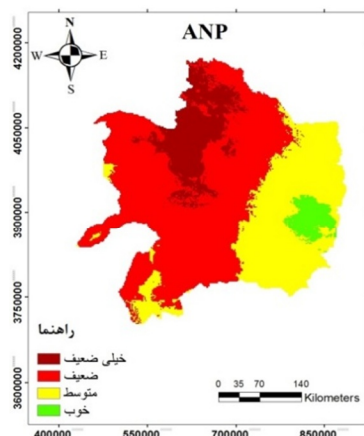
**۴-۴- وزن دهی و تلفیق معیارهای به روش ANP-OWA**  
در این مرحله، ابتدا با استفاده از روش OWA وزن‌های ترتیبی را به دست آورده و سپس با استفاده از وزن معیارهای به‌دست‌آمده از روش ANP با استفاده از روش ANP-OWA، نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی تولید می‌شود. برای این منظور، با در نظر گرفتن ۵ سناریو مختلف با توجه به استراتژی‌های مختلف سهلگیرانه/سختگیرانه در فضای تصمیم‌گیری (شکل ۳)، وزن‌های ترتیبی و میزان ریسک برای هر سناریو مطابق جدول ۳ به‌دست‌آمده است. استراتژی سختگیرانه (سناریو all) معادل عملگر منطقی AND بوده که منجر به تصمیم‌گیری با ریسک پایین ( $ORness = 0$ ) خواهد شد. درحالی‌که استراتژی سهلگیرانه (سناریو at least one)، معادل عملگر منطقی OR بوده و منجر به تصمیم‌گیری با ریسک زیاد ( $ORness = 1$ ) می‌شود. پس از تعیین وزن‌های ترتیبی، برای هر یک از سناریوهای مدنظر، نقشه تناسب اراضی با استفاده از نرم‌افزار IDRISI تولید شده است (شکل ۱۲).

**۴-۲- وزن دهی و تلفیق شاخص‌ها به روش ANP**  
برای ارزیابی تناسب اراضی به روش ANP، سیزده شاخص در نظر گرفته شده است. در اولین مرحله، ساختار شبکه‌ای برای حل مسئله تصمیم‌گیری، مطابق شکل ۹ در نرم‌افزار super decision طراحی شده است. سپس با انجام مقایسه‌های زوجی بین معیارها و تشکیل سوپر ماتریس اولیه و سوپر ماتریس حدی، وزن هر یک از معیارها، مطابق جدول ۱، به‌دست‌آمده است. شکل ۱۰، نقشه تناسب اراضی حاصل از مدل ANP و تلفیق به روش WLC را نشان می‌دهد. برای بصری سازی نتایج این ارزیابی، این نقشه در پنج کلاس به روش هم فاصله، طبقه‌بندی شده است.

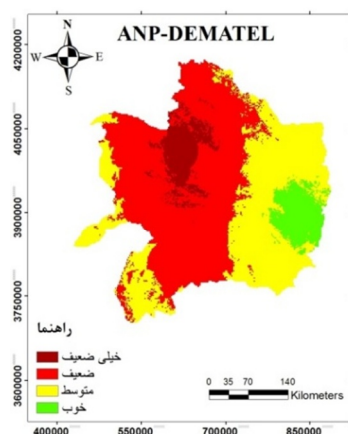
**۴-۳- وزن دهی و تلفیق شاخص‌ها به روش ANP-DEMATEL**  
در این مرحله، در ابتدا با استفاده از مدل DEMATEL میزان استحکام رابطه میان شاخص‌ها محاسبه شده است؛ سپس مجدداً به روش ANP به هر یک از شاخص‌ها، وزن نسبت داده شده است. وزن هر یک از شاخص‌ها به روش ANP-DEMATEL در جدول ۲، مشاهده می‌شود. شکل ۷ نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی به روش ANP-DEMATEL را



شکل ۹. طراحی مسئله تصمیم‌گیری در مدل ANP



شکل ۱۰. نقشه تناسب اراضی حاصل از مدل ANP



شکل ۱۱. نقشه تناسب اراضی به دست آمده از روش ترکیبی ANP-DEMATEL

### ۵- نتایج و ارزیابی

در این تحقیق، از سه روش به منظور ارزیابی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی استفاده شده است. برای ارزیابی تناسب اراضی با هدف احداث نیروگاه بادی، سیزده معیار، انتخاب و نقشه‌های مرتبط با هر یک از آنها تولید شد. پس از ایجاد پایگاه داده، با استفاده از مدل DEMATEL، میزان اثرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از شاخص‌ها نسبت به سایر شاخص‌ها تعیین و با استفاده از مدل ANP، وزن هر یک از شاخص‌ها مشخص شد. در نهایت با استفاده از مدل OWA، در پنج سناریو در سطوح ریسک‌پذیری

جدول ۱. وزن‌های به دست آمده با استفاده از مدل ANP (Azizi et al, 2014)

رتبه	وزن	شاخص
۱	۰/۲۲۸	سرعت متوسط باد
۲	۰/۱۵۳	تراکم باد
۳	۰/۱۴۴	پیوستگی باد
۴	۰/۰۸۸	فاصله از فرودگاه
۵	۰/۰۸۰	فاصله از مناطق شهری
۶	۰/۰۵۹	فاصله از گسل
۷	۰/۰۵۲	شیب
۸	۰/۰۳۹	فاصله از رودخانه
۹	۰/۰۳۸	فاصله از مناطق روستایی
۱۰	۰/۰۳۶	فاصله از منابع طبیعی
۱۱	۰/۰۳۲	فاصله از راه اصلی
۱۲	۰/۰۳۰	فاصله از مناطق حفاظت شده
۱۳	۰/۰۲۱	ارتفاع

جدول ۲. وزن‌های به دست آمده به روش ANP-DEMATEL (Azizi et al, 2014)

رتبه	وزن	شاخص
۱	۰/۳۷۵	سرعت متوسط باد
۲	۰/۱۵۵	فاصله از منابع طبیعی
۳	۰/۱۳۵	تراکم باد
۴	۰/۰۸۸	شیب
۵	۰/۰۵۹	پیوستگی باد
۶	۰/۰۵۰	فاصله از مناطق شهری
۷	۰/۰۳۷	ارتفاع
۸	۰/۰۳۱	فاصله از فرودگاه
۹	۰/۰۲۷	فاصله از مناطق روستایی
۱۰	۰/۰۲۵	فاصله از راه اصلی
۱۱	۰/۰۱۱	فاصله از مناطق حفاظت شده
۱۲	۰/۰۰۶	فاصله از رودخانه
۱۳	۰/۰۰۰	فاصله از گسل

بهمنظور احداث نیروگاه بادی در پنج کلاس تعریف‌شده در جدول ۴، مشاهده می‌شود. بررسی نقشه‌های تناسب اراضی تولیدشده برای هفت سناریو موجود و همچنین آمار ارائه‌شده در جدول ۴، نشان می‌دهد فقط نقشه‌های سناریوهای at least one و a few که به ترتیب دیدگاه کاملاً خوش‌بینانه و تقریباً خوش‌بینانه دارند؛ دارای کلاس پتانسیل خیلی خوب برای احداث نیروگاه بادی هستند. سناریوهای all و most با دیدگاه‌های کاملاً بدبینانه و تقریباً بدبینانه فاقد کلاس‌های خیلی خوب، خوب و متوسط هستند. شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی حاصل از روش‌های تشریحی و در سناریوهای مختلف را نشان داده است. بهم‌نظور اولویت‌بندی مناطق، شکل ۱۳ نقشه تعداد تکرار کلاس پتانسیل خوب در نقشه‌های تناسب اراضی تولیدشده برای هر یک از هفت سناریو موجود را نشان می‌دهد. این نقشه بیانگر میزان تناسب بالا محدود شده شرق استان خراسان رضوی برای احداث نیروگاه بادی در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری است. تولید این نقشه سبب می‌شود مناطقی که در اکثر سناریوها دارای شرایط خوب بوده‌اند شناسایی شود. با انجام این کار، مدلی مبتنی بر آنالیز حساسیت از ترکیب روش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که مناطق مستعدتر جهت استقرار نیروگاه بادی را شناسایی می‌کند. مطابق شکل ۱۳، در محدوده شرقی این استان، چهار سناریو از هفت سناریو موجود، تناسب خوبی برای نیروگاه بادی را نشان می‌دهند.

مختلف، نقشه‌های مرتبط با شاخص‌ها با یکدیگر تلفیق شدند. مطابق جدول ۲، سرعت باد بیشترین وزن و فاصله از گسل کمترین وزن و به ترتیب بیشترین ارتباط و کمترین ارتباط با سایر معیارها را دارا هستند. در روش ANP، معیارها بدون در نظر گرفتن شدت ارتباط میان آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند که این امر سبب می‌شود وزن نهایی به‌درستی میان معیارها توزیع نشود. با مقایسه جدول‌های ۱ و ۲، تفاوت قابل توجهی میان رتبه‌های معیارها در دو مدل ANP و ANP-DEMATEL مشاهده می‌شود. استفاده از روش DEMATEL موجب می‌شود معیارهایی که ارتباط ضعیفی با سایر معیارها دارند، وزن کمتری کسب کنند. همان‌طور که در جدول ۲، قابل‌مشاهده است، معیار فاصله از گسل به دلیل نداشتن ارتباط با سایر معیارها، کمترین وزن را دریافت کرده است. در تلفیق نقشه‌های فاکتور به روش OWA، خروجی سناریو at least one با بیشترین میزان ریسک برای هر پیکسل بالاترین مقدار آن از میان نقشه‌های معیارها را انتخاب کرده و وزن ترتیبی آن برابر یک خواهد بود. درحالی‌که در نقطه مقابل؛ در سناریو all با کمترین میزان ریسک، برای هر پیکسل پایین‌ترین مقدار آن از میان نقشه‌های معیارها را انتخاب کرده و وزن ترتیبی آن برابر یک خواهد بود. بنابراین خروجی تحت تأثیر وزن معیارها و ارزش پیکسل‌ها خواهد بود. مطابق شکل ۱۲، با افزایش ریسک‌پذیری، مساحت کلاس خیلی خوب افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از نقشه‌های تناسب اراضی،

جدول ۳. وزن‌های ترتیبی در سناریوهای مختلف حاصل از روش OWA

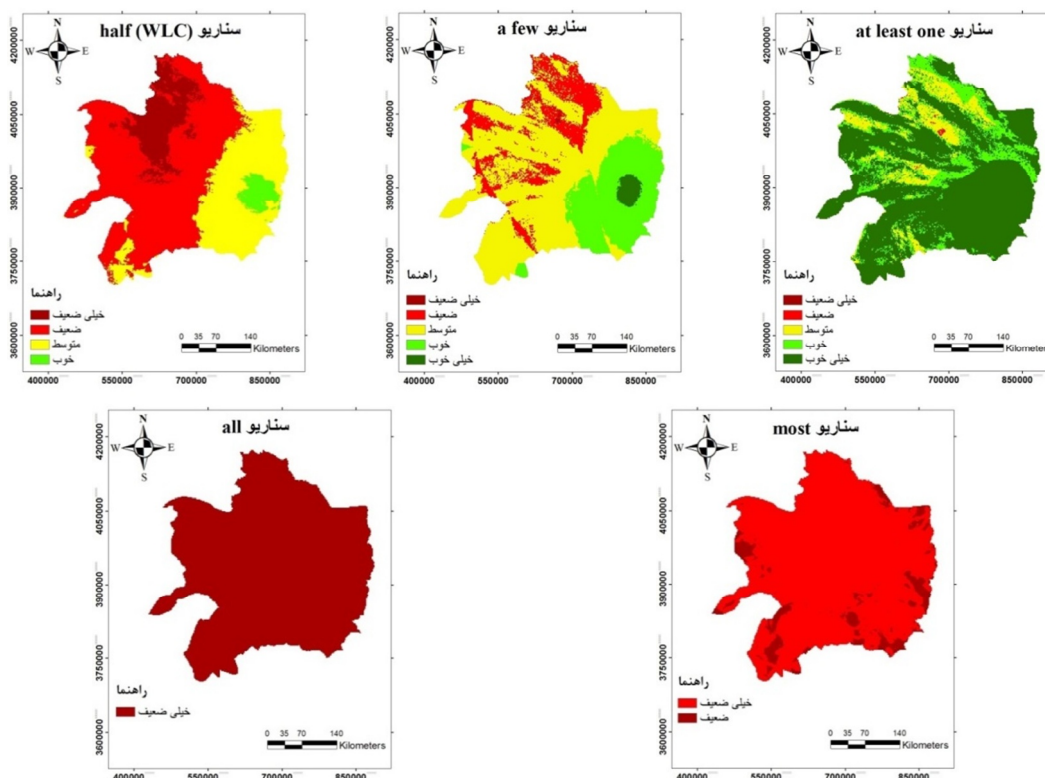
سناریو	وزن‌های ترتیبی												ORness		
سناریو at least on	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
سناریو a few	۰/۰۲۶	۰/۰۲۸	۰/۰۳۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۴۱	۰/۰۴۶	۰/۰۵۲	۰/۰۶۲	۰/۰۷۷	۰/۱۱۰	۰/۴۲۵	۰/۷۶۱	
سناریو half (WLC)	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۰/۵
سناریو most	۰/۲۱۳	۰/۱۸۱	۰/۱۵۱	۰/۱۲۳	۰/۰۹۹	۰/۰۷۷	۰/۰۵۸	۰/۰۴۱	۰/۰۲۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۳۱
سناریو all	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۴. نتایج حاصل از نقشه‌های تناسب اراضی تولیدشده به روش‌های مختلف

	ANP		ANP - DEMATEL		OWA									
	تعداد پیکسل	درصد	تعداد پیکسل	درصد	سناریو all		سناریو most		سناریو half		سناریو a few		سناریو at least one	
خیلی خوب	-	.	-	.	-	.	-	.	-	.	۷۷۲	۲	۲۶۸۳۹	۷۱
خوب	۱۳۴۹	۴	۲۵۹۲	۷	-	.	-	.	۱۳۲۴	۳	۹۰۹۰	۲۴	۶۹۵۲	۱۸
متوسط	۱۱۴۵۳	۳۰	۱۴۰۹۰	۳۷	-	.	-	.	۱۱۲۸۳	۳۰	۲۱۴۸۵	۵۷	۴۱۱۲	۱۱
ضعیف	۲۰۱۶۰	۵۳	۱۸۶۴۳	۴۹	-	.	۳۵۵۳	۹	۲۰۲۰۳	۵۳	۶۵۳۲	۱۷	۷۰	.
خیلی ضعیف	۵۰۱۳	۱۳	۲۶۵۰	۷	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۴۴۲۲	۹۱	۵۱۶۵	۱۴	۹۶	.	۲	.
جمع کل	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰	۳۷۹۷۵	۱۰۰

تولیدشده - برای اعتبارسنجی نتایج، استفاده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود نیروگاه‌های بادی موجود در استان خراسان رضوی، در چهار نقشه در کلاس‌های خوب و متوسط قرار گرفته‌اند. با مقایسه نتایج هفت سناریو مورد استفاده، می‌توان نتایج گرفت نیروگاه‌های بادی موجود در استان خراسان رضوی دارای تناسب خوب و متوسط هستند.

مقایسه نقشه‌های تناسب اراضی با نقشه‌های باد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) نشان می‌دهد، مناطق پیشنهادی برای نیروگاه بادی دارای بیشترین سرعت متوسط باد، تراکم و پیوستگی باد در کل استان هستند. در استان خراسان رضوی تاکنون دو نیروگاه بادی دیزباد نیشابور و خواف احداث شده است. در این تحقیق، از مقایسه موقعیت نیروگاه‌های موجود و نقشه‌های تناسب اراضی



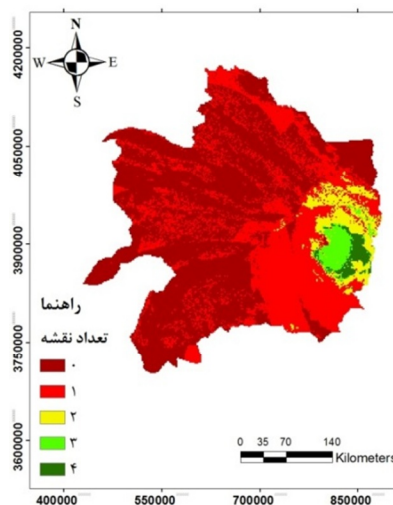
شکل ۱۲. نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی در سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری با استفاده از مدل ANP-OWA

دریافت که نقشه تناسب اراضی بیشترین مطابقت با نقشه‌های سرعت متوسط و تراکم باد را دارد.

### ۶- بحث و نتیجه‌گیری

انرژی باد، یکی از منابع تجدیدپذیر است که به علت گستردگی، قدرت بازدهی بالا و اقتصادی بودن و عدم آلودگی محیط‌زیست در بسیاری از کشورهای جهان مورد استقبال قرار گرفته است. در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی در محدوده استان خراسان رضوی، سیزده معیار در نظر گرفته شده و با استفاده از سه روش ANP، ANP-DEMATEL و ANP-OWA، هفت نقشه تناسب اراضی تولید شده است. با بررسی این نقشه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه جنوب شرقی و قسمتی از محدوده مرکزی استان خراسان رضوی، مستعد احداث نیروگاه بادی است.

با توجه به ماهیت فازی مسائل مکانی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که از منطق فازی در تکمیل روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بیشتر بهره‌گیری شود. همچنین، انتظار می‌رود با انجام مطالعات بیشتر و یافتن معیارهای مؤثر در انرژی باد، علاوه بر سیزده معیار مورد استفاده در این تحقیق، سایر معیارها استخراج شده و در تهیه نقشه تناسب اراضی مورد استفاده قرار گیرد.



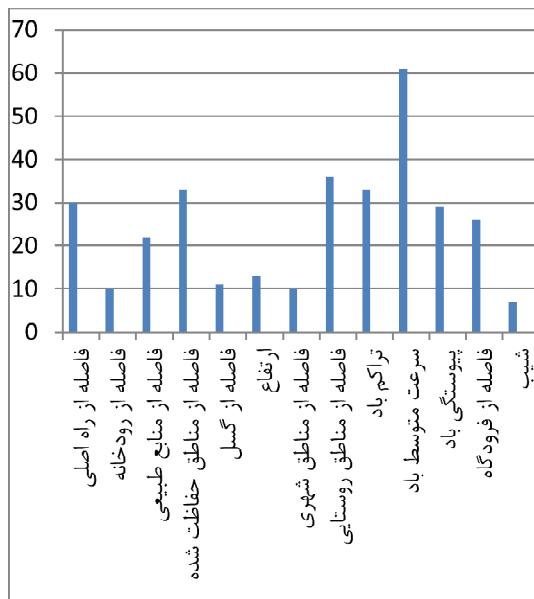
شکل ۱۳. تعداد تکرار کلاس خوب در هفت سناریو موجود

نمودار شکل ۱۴، از بررسی نقشه‌های شاخص‌ها به‌دست‌آمده و میزان تطابق آن‌ها با نقشه تناسب اراضی تولیدشده به روش ANP را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل‌ملاحظه است، نقشه تناسب اراضی با معیارهای سرعت متوسط، تراکم و پیوستگی باد، بیشترین تطابق و با شاخص‌های شیب و ارتفاع کمترین تطابق را دارد. با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع مقدار پارامترهای باد (سرعت و ...) افزایش می‌یابد و از طرفی برای احداث نیروگاه بادی سعی بر آن است که ارتفاع‌های پایین انتخاب شوند، لذا می‌توان میزان تطابق کم نقشه تناسب اراضی با شاخص ارتفاع را ناشی از این عامل دانست. با مشاهده شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نیز می‌توان

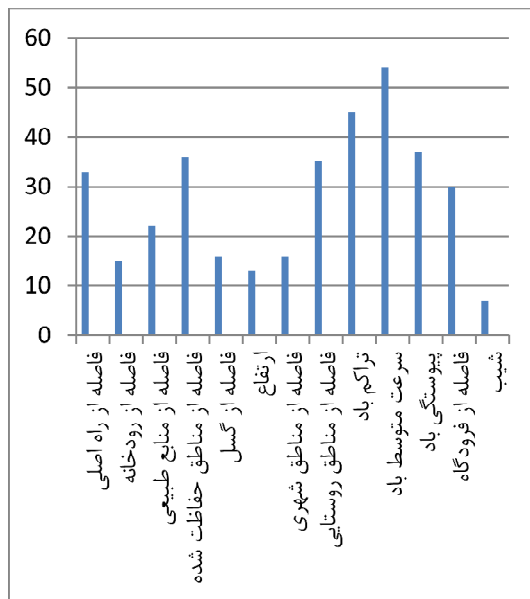
جدول ۵. اعتبارسنجی نتایج تصمیم‌گیری در ۲ نیروگاه موجود در منطقه مطالعه موردی

	ANP	ANP - DEMATEL	سناریو all	سناریو most	سناریو half	سناریو a few	سناریو at least one
خیلی خوب	-	-	-	-	-	-	۲
خوب	۱	۱	-	-	۱	۱	-
متوسط	۱	۱	-	-	۱	۱	-
ضعیف	-	-	-	۱	-	-	-
خیلی ضعیف	-	-	۲	۱	-	-	-

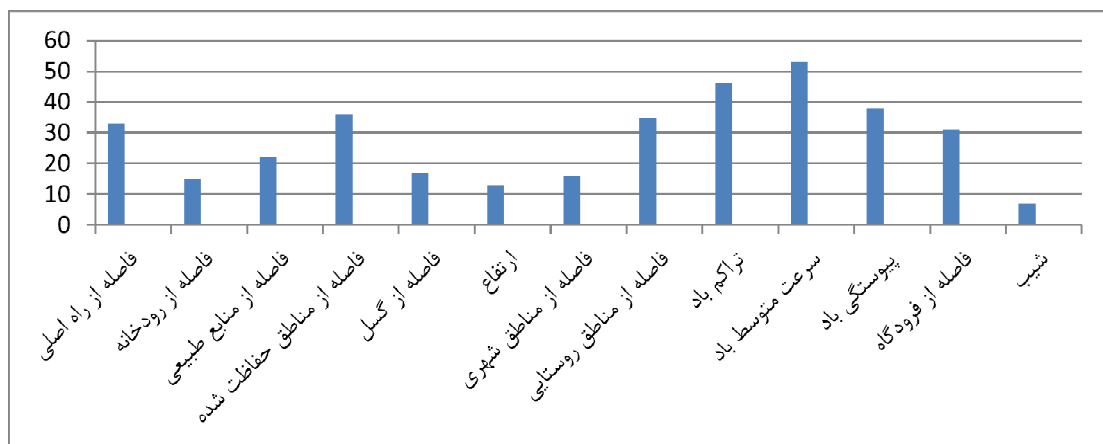




شکل ۱۵. درصد تطابق هر یک از معیارهای موجود با نقشه تناسب اراضی حاصل از مدل ANP-DEMATEL



شکل ۱۴. درصد تطابق هر یک از معیارهای موجود با نقشه تناسب اراضی حاصل از مدل ANP



شکل ۱۶. درصد تطابق نقشه معیارهای موجود با نقشه تناسب اراضی حاصل از سناریو half (WLC)

## ۶- منابع

اصغری پوردشت، ا.، مرشدی، ج. و برنا، ر.، ۱۳۹۰، کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در مکانیابی احداث نیروگاه‌های بادی (مطالعه موردی: استان خوزستان)، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی) دوره ۲، شماره ۳، صص ۷۷-۹۵.

اسدی، م. و جهانبخش اصل، س.، ۱۳۹۴، شناسایی مکان‌های مناسب احداث نیروگاه بادی در استان آذربایجان شرقی با روش فازی-سلسله مراتبی (FAHP)، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، دوره ۶، شماره ۴، صص ۹۵-۱۰۹.

قائمی، خ. و اصیلی، م.، ۱۳۹۳، **ارزیابی پتانسیل انرژی باد در منطقه خواف استان خراسان رضوی**، ارائه شده در چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران گندمکار، ا.، ۱۳۸۸، **ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران**، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، دوره ۲۰، شماره ۴، صص ۱۰۰-۱۸۵.

مرشدی، ج.، برنا، ر.، اصغری پوردشت، ا.، احمدی، ه. و ظاهری، ز.، ۱۳۸۹، **مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS**، کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برنامه ریزی، دوره ۱، شماره ۲، صص ۹۷-۱۱۱.

یوسفی، ح.، موسوی، م. و نوراللهی، ی.، ۱۳۹۵، **ارزیابی منابع و پتانسیل سنجی انرژی بادی به منظور تعیین اولویت‌های مکانی احداث نیروگاه‌های بادی در شهرستان دامغان**، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره ۶، شماره ۳، صص ۳۵-۵۰.

Alavi, O., 2015, **Wind Resource Assessment and Wind Power Potential for the City of Khaf, Iran**, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 5, p. 660-667.

Aydin, N. Y., Kentel, E. & Duzgun, S., 2010, **GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, p. 364-373.

Azizi, A., Jafari, H. R., Malekmohammadi, B. & Khoshakhlagh, F., 2014, **site selection of wind power plants using fuzzy hierarchy analysis and network analysis in Ardabil province**, Journal of Applied researches in Geographical Sciences, vol.14, no. 34, p. 175-194.

جعفری، ر.، عزیزی، ع.، نسربینی، ح. و عابدی، ح.، ۱۳۹۲، **تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل AHP و SAW در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)**، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۱۵، شماره ۲، صص ۲۳-۴۱.

زاهدی، م.، صالحی، ب. و جمیل، م.، ۱۳۸۴، **محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل**، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۸، شماره ۱، صص ۴۱-۵۵.

زنده‌دل رودی، ز.، زرین، آ. و دوستان، ر.، ۱۳۹۴، **پتانسیل سنجی انرژی باد در خراسان رضوی مطالعه موردی (مشهد، نیشابور، خواف)**، ارائه شده در دومین کنفرانس ملی انرژی و توسعه پایدار، مشهد.

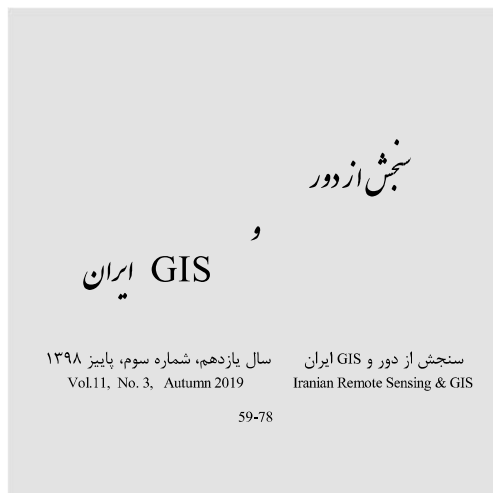
زینالی، ب.، عظیمی، ع.، ۱۳۹۵، **امکان سنجی پتانسیل انرژی بادی در شمال غرب ایران با استفاده از الگوریتم فازی**، فصلنامه علمی پژوهشی برنامه ریزی منطقه ای، دوره ۶، شماره ۲۴، صص ۷۳-۸۸.

صادقی، ز.، دلال‌باشی اصفهانی، ز. و حری، ح.، ۱۳۹۲، **اولویت‌بندی عوامل موثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و انرژی باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره**، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه ریزی انرژی، دوره ۱، شماره ۲، صص ۹۳-۱۱۰.

صلاحی، ب.، ۱۳۸۳، **پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال و بیول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۷۲، شماره ۱۹، صص ۸۷-۱۰۴.

- Azizi, A., Malekmohammadi, B., Jafari, H. R., Nasiri, H. & Parsa, V.A., 2014, **Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran**, Environmental monitoring and assessment, vol. 186, no. 10, p. 6695-6709.
- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P. & Chetpattananondh ,K., 2007, **Site selection for large wind turbine using GIS**, Paper presented at the PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, phuket, THILAND.
- Büyükožkan, G. & Güleriyüz, S., 2016, **An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey**, International Journal of Production Economics, vol. 182, 435-448.
- Chen, H.-C., & Yu, Y.-W., 2008, **Using a strategic approach to analysis the location selection for high-tech firms in Taiwan**, Management Research News, vol. 31, no. 4, p. 228-244.
- Chung, S.-H., Lee, A. H., & Pearn, W.-L., 2005, **Analytic network process (ANP) approach for product mix planning in semiconductor fabricator**, International Journal of Production Economics, vol. 96. No. 1, p. 15-36 .
- Gigović, L., Pamučar, D., Božanić, D. & Ljubojević, S., 2017, **Application of the GIS-DANP-MABAC multi-criteria model for selecting the location of wind farms: A case study of Vojvodina, Serbia**, Renewable Energy, vol. 103, p. 501-521.
- Jelokhani Niyaraki, M. R. & Hajiloo, F., 2016, **Site Selection for Wind Power Plants Using ANP-OWA Model (Case Study of Zanjan Province, Iran)**, Journal of Geomatics Science and Technology, vol.6 , no.1, p. 73-86.
- Liou, J. J., Tzeng, G.-H., & Chang, H.-C., 2007, **Airline safety measurement using a hybrid model**, Journal of air transport management, vol.13, no.4, p. 243-249.
- Malczewski, J., 2006, **Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis**, International journal of applied earth observation and geoinformation, vol. 8, no.4, p. 270-277.
- Nasehi, S., Karimi, S. & Jafari, H., 2016, **Application of Fuzzy GIS and ANP for Wind Power Plant Site Selection in East Azerbaijan Province of Iran**, Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, vol. 2, no. 3, p. 116-124.
- Pak, K., 2011, **Multi-criteria decision making for sustainable energy planning in Turkey**, phd thesis, marmara university, istanbul, turkey .
- Saaty, T.L., 1990, **How to make a decision: the analytic hierarchy process**, European journal of operational research, vol.48, no. 1, p.9-26.
- Saaty, T.L., 1996, **Decision making with dependence and feedback: The analytic network process (Vol. 4922)**, Pittsburgh: RWS publications Pittsburgh.
- Sliz-Szkliniarz, B. & Vogt, J., 2011, **GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 3, p. 1696-1707.
- Tsai, W.H., Chou, Y.W., Lee, K.C., Lin, W.R. & Hwang, E.T., 2013, **Combining decision making trial and evaluation laboratory with analytic network process to perform an investigation of information technology auditing and risk control in an enterprise resource planning environment**, Systems Research and Behavioral Science, vol.30, no. 2, p. 176-193.
- Tseng, M.L., 2009, **Application of ANP and DEMATEL to evaluate the decision-**

- making of municipal solid waste management in Metro Manila**, Environmental monitoring and assessment, vol.156, no.1-4, p.181.
- Vujanović, D., Momčilović, V., Bojović, N. & Papić, V., 2012, **Evaluation of vehicle fleet maintenance management indicators by application of DEMATEL and ANP**, Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 12, p. 10552-10563.
- Wang, Y.-L. & Tzeng, G.-H., 2012, **Brand marketing for creating brand value based on a MCDM model combining DEMATEL with ANP and VIKOR methods**, Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 5, p. 5600-5615.
- Yager, R.R., 1988, **On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking**, IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, vol. 18, no. 1, p. 183-190.
- Yager, R.R., 1996, **Quantifier guided aggregation using OWA operators**, International Journal of Intelligent Systems, vol. 11, no.1, p. 49-73.
- Zadeh, L.A, 1983, **A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages**, Computers & Mathematics with applications, vol. 9, no. 1, p. 149-184.
- Zaim, S., Sevkli, M., Camgöz-Akdağ, H., Demirel, O. F., Yayla, A. Y. & Delen, D., 2014, **Use of ANP weighted crisp and fuzzy QFD for product development**, Expert Systems with Applications, vol. 41, no. 9, p. 4464-4474.



## Land suitability evaluation based on multi-criteria decision-making methods for locating wind farms in Khorasan Razavi province

Molavi, M.<sup>1</sup>, Taleai, M.\*<sup>2</sup>, Javadi, G.<sup>3</sup>

- 1- MSc Student of Geographic Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology  
2- Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology  
3- PhD Student of Geographic Information Systems, K. N. Toosi University of Technology

### Abstract

Finding the optimum location of wind turbines for the proper use of wind energy, as one of the sources of renewable energy, is very important. Determining the location of wind turbines has a great influence on the efficiency of their equipment. So far, research in the Khorasan Razavi area has limited to the statistical analysis of wind speed and directional data while the spatial criteria affecting finding the optimum location of wind turbines was rarely considered. This research seeks to find optimum location for the wind power plant using environmental (including slope, altitude, distance from the fault, distance from the river, distance from protected areas), technical (including average wind speed, wind congestion and wind density), and economic (including distance from the city, the village, the airport, the natural resources and from the road) criteria and using ANP, ANP-DEMATEL and ANP-OWA multi-criteria decision-making methods. The aim is to evaluate the results of each method and produce a land suitability map for the construction of wind power plants in different decision scenarios. Based on this, using the analysis tools of the geospatial information system, the land suitability map is produced based on the aggregation of the mentioned criteria and the results of utilizing the mentioned decision-making methods are compared. By considering land suitability maps, it has been determined that in different scenarios of decision making, the southeastern province has the most potential for wind power plant construction. The results of this research indicate that the proposed method provides a good tool for choosing the right place to build a wind power plant.

**Keywords:** Wind farms, GIS, ANP, OWA, DEMATEL