ارزیابی احداث نیروگاه بادی در پنج کلان‌شهر ایران با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

■ **جعفر رزمی** [*+]
دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران
تهران، خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
■ **علیرضا حکیمی اصل** [1]
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران
■ **میثم نصرالهی** [2]
دانشجوی دکترای دانشگاه تهران
■ **مهدی حکیمی اصل** [3]
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران
تهران، خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: 1394/1/23 و تاریخ پذیرش: 1394/3/16

چکیده

انرژی یک عامل مهم در توسعه اقتصادی- اجتماعی کشورهاست که امروزه تقاضای آن به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. انرژی باد از جمله انرژی‌های تجدیدپذیری است که به علت پاک بودن، فراوانی در همه جای جهان، قدرت بازدهی بالا و اقتصادی بودن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به این‌که محل قرارگرفتن نیروگاه بادی تاثیر بسیار زیادی بر میزان تولید و بازدهی آن دارد، تعیین محل‌های مناسب برای احداث نیروگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، پتانسیل احداث نیروگاه بادی در پنج کلان‌شهر کشور شامل: تهران، مشهد، شیراز، تبریز و اصفهان مورد ارزیابی قرار گرفته است. معیارهای اصلی این ارزیابی کارآیی فنی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه نگهداری و تعمیرات، میزان مقبولیت اجتماعی، تولید آلودگی صوتی و میزان تاثیر بر روی زیست‌بوم هستند که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مدنظر قرار می‌گیرند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شهر مشهد دارای بالاترین پتانسیل برای احداث نیروگاه بادی است. روش ارایه شده در این مقاله می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی مورد استفاده مدیران و سیاستگذاران حوزه انرژی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی قرار گیرد.

واژگان کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی، مکان‌یابی، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP)

* عهده دار مکاتبات
+ شماره نمابر: 021-61114273 و آدرس پست الکترونیکی سازمانی: jrazmi@ut.ac.ir
۱ شماره نمابر: 021-61114273 و آدرس پست الکترونیکی سازمانی: a_haraf.ie@ut.ac.ir
۲ شماره نمابر: 021-61114273 و آدرس پست الکترونیکی سازمانی: m_nasrollahi@ut.ac.ir
۳ شماره نمابر: 021-61114273 و آدرس پست الکترونیکی سازمانی: m_haraf@ut.ac.ir

1- مقدمه

انرژی یک عامل مهم در توسعه پایدار جوامع انسانی است. رشد تقاضا برای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، خطر گرم شدن کره زمین و کمبود منابع سوخت‌های فسیلی باعث شده تا توجه جهانی بر روی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز شود[1]. ایران نیز یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان از لحاظ منابع مختلف انرژی است؛ چراکه از یک سو دارای منابع عظیم سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز طبیعی است و از سوی دیگر دارای پتانسیل فراوان انرژی‌های تجدیدپذیر بخصوص باد است. یک تحقیق 10 ساله از بررسی باد در ایران نشان می‌دهد که بسیاری از مناطق کشور بادخیز و مناسب برای تولید برق با استفاده از این انرژی، به‌ویژه در فصل تابستان است. این نواحی شامل مناطق ساحلی دریای عمان و استان خوزستان، مناطق شرقی، جزایر خلیج فارس، منجیل، رفسنجان، اردبیل و بیجار است[2]. در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی باد به دلیل فراوانی، تجدیدپذیری، اقتصادی و پاک بودن در حال افزایش است[3]. یکی از مزیت‌های اصلی استفاده از انرژی باد، کاهش چشم‌گیر تولید گازهای گلخانه‌ای CO_2 است[4]. پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که یک کیلووات ساعت برق تولید شده توسط نیروگاه‌های بادی، انتشار در حدود یک کیلوگرم از گازهای گلخانه‌ای CO_2 که توسط نیروگاه‌های فسیلی تولید می‌شود را کاهش می‌دهد[5].

اولین گام اساسی در استفاده از انرژی باد، تبدیل آن به حامل‌های انرژی قابل استفاده در ماشین‌های امروزی است که متداول‌ترین شیوه، تبدیل آنها به انرژی الکتریکی است. برای انجام این تبدیل، ابتدا می‌بایست سایت مناسب برای استقرار توربین‌های بادی به‌درستی انتخاب و مکان‌یابی شود.

تعیین اولویت مکان‌های مختلف برای استفاده از سیستم‌های بادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. به همین دلیل، در این مقاله قصد داریم بهترین محل برای احداث نیروگاه بادی را از بین مکان‌های کاندید، انتخاب کنیم.

به‌طور کلی، تصمیمات مربوط به مکان‌یابی در بسیاری از زمینه‌های استقرار تسهیلات استفاده شده است. در واقع فرآیند مکان‌یابی شامل مدل‌سازی، فرموله کردن و حل مجموعه‌ای خاص از مسایل است که معمولا، می‌تواند بهترین حالت را برای قرار گرفتن تسهیلات در فضای در نظر گرفته شده نشان دهد[6]. دامسچک و درکسل بسیاری از مسایل مرتبط با مکان‌یابی و چیدمان تسهیلات را مورد بررسی قرار داده‌اند[7]. چهار دسته اصلی که در مسایل مکان‌یابی مطرح می‌شوند عبارتند از: 1- تسهیلاتی که قرار است در آینده استقرار یابند؛ 2- مشتری‌ها، افرادی که احتمال داده می‌شود از قبل در آن نقطه یا مسیر مستقر شده باشند؛ 3- فضایی که بین تسهیلات و مشتری‌ها وجود دارد؛ 4- شاخص و پارامتری که نشان‌دهنده فاصله یا زمان بین تسهیلات و مشتری‌ها است[8]. بسیاری از کاربردهای مکان‌یابی در مراجع 9 و 10 آورده شده است.

استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره(MCDM)[4] و تصمیم‌گیری چند شاخصه(MADM)[5] به‌منظور درنظرگرفتن شاخص‌های مختلف برای انتخاب بهینه مکان‌ها افزایش یافته است. مانند: خانکه و همکاران ابتدا عوامل مهم در جایابی نیروگاه خورشیدی را شناسایی نمودند[11]. سپس با استفاده از روش پرومتی(PROMETHEE)[6] بهترین گزینه را از بین چند گزینه پیشنهادی انتخاب کردند. انوت و همکاران از فرآیند تحلیل شبکه‌ای(ANP)[7] برای حل مساله انتخاب منابع انرژیِ مورد نیازِ یک کارخانه تولیدی استفاده کردند[12]. برای انتخاب بهترین فناوری انرژی از میان فناوری‌های کاندید، کایا و کاهرامان در سال 2011، روش فازی تاپسیس(Fuzzy TOPSIS)[8] را مورد استفاده قرار دادند[13].

حیدر ارس و همکاران[14] برای تعیین محل مناسبِ احداث ایستگاه بادی از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی استفاده کردند. همچنین تیگو و همکارانش[15] یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی مکان‌های کاندیدِ نیروگاه بادی توسعه دادند. آنها در مقاله خود از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی(AHP)[9] و روش سیستم اطلاعات جغرافیایی(GIS)[10] برای رتبه‌بندی مکان‌های کاندید، به‌طور یک‌پارچه استفاده کردند. هملاینن و کارجالاینن نیز، برای تعیین وزن نسبی معیارهای ارزیابیِ سیاست‌های انرژی در کشور فنلاند از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی استفاده نمودند[16].

مرور ادبیاتی که وانگ و همکارانش درباره استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسایل مربوط به انرژی در سطوح مختلف تصمیم‌گیری مانند: انتخاب بهترین معیار،

4 Multiple Criteria Decision Making
5 Multiple Attribute Decision Making
6Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
7 Analytic Network Process
8 Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
9 Fuzzy Analytic Hierarchy Process
10 Geographic Information System

ارزیابی و وزن‌دهی معیار انجام دادند، نشان می‌دهد که معیارهای ارزیابی برای انتخاب سایت بهینه احداث نیروگاه را می‌توان به چهار دسته اصلی فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی تقسیم‌بندی کرد[17]. کاوالارو و سیرالو در سال 2005 معیارهای ارزیابی دیگری برای بررسی امکان‌سنجی احداث توربین‌های بادی در ایتالیا با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره ارایه نمودند[18].

در این مقاله، با استفاده از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی(در حالت فازی)، که یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، مکان‌های کاندید بر اساس معیارهای در نظر گرفته شده، اولویت‌بندی و بهترین مکان برای احداث نیروگاه بادی انتخاب شده است.

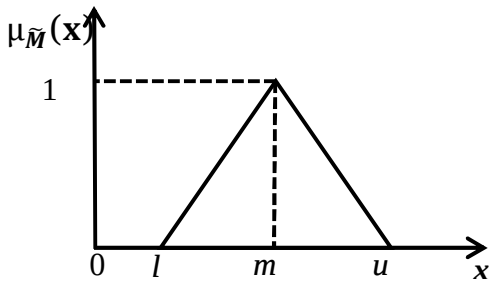
2- روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی فازی

روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی اولین بار توسط توماس ساعتی در سال 1980 معرفی شد و به سرعت به یکی از پرکاربردترین روش های تصمیم‌گیری چند معیاره تبدیل گردید[19]. از آنجایی که در روش تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک، قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان به‌صورت اعداد قطعی نمایش داده می‌شود و این موضوع که، اعداد قطعی نمی‌توانند عدم قطعیت همراه با ادراک انسانی را به درستی در نظر بگیرند[20]، در این مقاله، با توجه به شرایط فازی حاکم بر معیارهای مورداستفاده جهت سنجش گزینه‌ها، از روش سلسله مراتبی فازی استفاده شده است. بایستی توجه داشت که، منظور از شرایط فازی، وجود عدم قطعیت و دامنه تغییرات برای رتبه‌دهی به یک معیار است[21]. چندین روش برای تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد شده است[22] اما از آنجایی‌که روش توسعه یافته چانگ[23] دارای مراحل ساده‌تری در مقایسه با بقیه روش‌هاست، در این مقاله از این روش استفاده شده است.

اعداد فازی مثلثی به‌صورت $\left(m_1/m_2, m_2/m_3\right)$ یا (m_1, m_2, m_3) نمایش داده می‌شوند که m_3, m_2, m_1 به ترتیب نشان‌دهنده کوچکترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بزرگ‌ترین مقدار ممکن هستند و همواره $m_1 \le m_2 \le m_3$.

یک عدد فازی مثلثی $\tilde{M} = (l, m, u)$ در شکل شماره 1 نشان داده شده است. همچنین تابع عضویت این عدد فازی را می‌توان به‌صورت رابطه (1) تعریف کرد. مفهوم پایه عملیات جبریِ استفاده شده در این مقاله برای اعداد فازی در مراجع شماره 24 و 25 بیان شده است.

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l \text{ or } x > u \\ (x-l)/(m-l) & l \le x \le m \\ (x-u)/(m-u) & m \le x \le u \end{cases} \quad (1)$$



شکل (1) یک عدد فازی مثلثی

در روش توسعه یافته چانگ، اعداد ماتریس مقایسه‌های زوجی از نوع فازی مثلثی است. در این روش مقدار $\tilde{S}_j$ هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه‌های زوجی با استفاده از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$\tilde{S}_j = \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} \right]^{-1} \quad (2)$$

در این رابطه $\tilde{M}_j \left(j = 1, 2, \mathbf{L}, n\right)$ و $\tilde{S}_j$ نیز اعداد فازی مثلثی هستند.

$\sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i}$، $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i}$ و $\left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} \right]^{-1}$ با استفاده از روابط (3)، (4) و (5) به‌دست می‌آیند.

$$\sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} = \left(\sum_{j=1}^{m} l_j, \sum_{j=1}^{m} m_j, \sum_{j=1}^{m} u_j \right) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i, \sum_{i=1}^{n} m_i, \sum_{i=1}^{n} u_i \right) \quad (4)$$

$$Inv \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M^{j}_{g_i} \right] = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i} \right) \quad (5)$$

در مرحله بعد بایستی درجه بزرگی $\tilde{S}_j$ها نسبت به هم محاسبه شود. اگر $\tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ باشد، آنگاه درجه بزرگی $\tilde{M}_2$ بر $\tilde{M}_1$ به‌صورت رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$V\left(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1\right) = hgt\left(\tilde{M}_1 \cap \tilde{M}_2\right) = \begin{cases} 0 & if\ m_2 \geq m_1 \\ 1 & if\ \ l_1 \geq u_2 \\ \dfrac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & o.w \end{cases} \quad (6)$$

برای مقایسه $\tilde{M}_2$ و $\tilde{M}_1$ بایستی هر دو مقدار $V\left(\tilde{M}_1 \geq \tilde{M}_2\right)$ و $V\left(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1\right)$ محاسبه شوند. با استفاده از معادله (7) میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از N عدد فازی مثلثی دیگر، بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \tilde{M}_N \geq \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \tilde{M}_{N-1}, \tilde{M}_n) = V\left(\tilde{M}_N \geq \tilde{M}_1\right), \mathbf{K}, V\left(\tilde{M}_N \geq \tilde{M}_n\right) \\ = MinV\left(\tilde{M}_N \geq \tilde{M}_j\right) = d'\left(c_j\right) \ \&\ j \neq N \end{aligned} \quad (7)$$

بنابراین بردار وزن شاخص‌ها به‌صورت رابطه (8) خواهد بود.

$$W' = \left(d'\left(c_1\right), d'\left(c_2\right), \mathbf{L}\ , d'\left(c_n\right)\right)^T \quad (8)$$

در نهایت بردار وزن نرمال شده شاخص‌ها (W) که یک عدد غیر فازی است با استفاده از معادله (9) بدست می‌آید.

$$W = \left(\frac{d'(c_1)}{\sum d'(c_j)}, \frac{d'(c_2)}{\sum d'(c_j)}, \mathbf{K} \frac{d'(c_n)}{\sum d'(c_j)}\right) \quad (9)$$

3- تقسیمات پیاده‌سازی روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و اولویت‌بندی گزینه‌ها

اولین گام برای امکان‌سنجی محل‌های پیشنهادی برای احداث نیروگاه بادی، یافتن معیارهای ارزیابی است. برای یافتن این معیارها به ادبیات مساله مراجعه شده است. پژوهش‌های متعددی معیارهای ارزیابی محل‌های پیشنهادی برای احداث نیروگاه بادی را ارایه نموده‌اند[26، 27 و 28].

کاوالارو و سیرالو این معیارها را جمع‌بندی نموده و برای مکان‌یابی نیروگاه بادی در کشور ایتالیا از آنها بهره جستند[18]. وانگ و همکاران نیز در یک پژوهش مروری به این نتیجه رسیدند که معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اصلی‌ترین معیارهای ارزیابی هستند[17]. یه و هوانگ نیز دو معیار سیاست و ایمنی- کیفیت را به این مجموعه افزودند[29]. بنابراین در این پژوهش مجموعه جامعی از این معیارها مورد استفاده قرار گرفت. این معیارها عبارتند از:

کارآیی فنی: ابزارهای کارآیی نشان می‌دهند که چه مقدار انرژی مفید را می‌توان از منبع انرژی بدست آورد. ضریب کارایی، که یکی از ابزارهای مهم اندازه‌گیری کارایی است، به‌صورت نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی تعریف می‌شود. استفاده از یک انرژی کارآمد برای کاهش رشد تقاضایِ انرژی، ضروری است. این معیار، فنی‌ترین شاخص برای ارزیابی سیستم‌های انرژی است[17، 29، 30 و 31].

هزینه سرمایه‌گذاری: هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل: هزینه خرید تجهیزات مکانیکی، فن‌آوری ساخت، احداث جاده‌ها، خدمات مهندسی، حفاری و غیره. سرمایه‌گذاران باید سودها و هزینه‌های حاصل از سرمایه گذاری‌های‌شان را در نظر بگیرند. این معیار، بیشتر برای ارزیابی سیستم‌های انرژی از لحاظ اقتصادی استفاده می‌شود[17، 18، 31 و 32].

هزینه نگهداری و تعمیرات: به‌طور کلی، هزینه نگهداری و تعمیرات شامل دستمزد و بودجه صرف شده برای نگهداری و تعمیراتِ تجهیزات است، به نحوی که آنها همیشه در سطح بهینه قرار گیرند[17، 18، 29، 30 و 31].

هزینه‌های نگهداری و تعمیرات به دو زیر شاخه تقسیم می‌شوند: 1- هزینه‌های ثابت 2- هزینه‌های متغیر

میزان مقبولیت اجتماعی: معیار مقبولیت اجتماعی که یک معیار کیفی است، نشان‌دهنده دیدگاه‌های افراد بومی یک منطقه، در ارتباط با سیستم‌های انرژی است. بایستی توجه داشت که مقبولیت اجتماعی یک پروژه انرژی می‌تواند به شدت روی زمان تکمیل آن تاثیر گذارد[18 و 35].

تولید آلودگی صوتی: به‌طور کلی، آلودگی صوتی بر اساس دو منبع اصلی آیرودینامیکی[11] و مکانیکی ایجاد می‌شود. آلودگی صوتی آیرودینامیک زمانی که تیغه‌های توربین، با آشفتگی جوی تداخل پیدا می‌کنند، ایجاد می شود. آلودگی صوتی مکانیکی توسط ماشین‌آلات از جمله موتور، گیربکس و ژنراتور تولید می‌شود. آلودگی صوتی را می‌توان با بهتر طراحی کردن پره‌های توربین کاهش داد. این معیار سطح سر و صدای تولید شده توسط توربین و فاصله از مناطق مسکونی را در نظر می‌گیرد[18، 29، 31 و 36].

میزان تاثیر بر روی زیست‌بوم: این معیار، ریسک‌های بالقوه‌ای که در احداث یک نیروگاه بادی وجود دارد و می‌تواند زیست‌بوم را تهدید کند از لحاظ کیفی ارزیابی می‌نماید. درخت سلسله مراتبی برای انتخاب بهترین گزینه احداث نیروگاه بادی با توجه به شش معیار در نظر گرفته شده، در شکل شماره 2 نمایش داده شده است[17، 18 و 36].

11 Aerodynamic

ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفته شده در این پژوهش، یک ساختار سه سطحی شامل هدف(سطح اول)، معیارها(سطح دوم) و گزینه‌های کاندید مساله دارد. برای بدست آوردن رتبه هر کدام از گزینه‌ها ابتدا ماتریس تصمیم[12]، که شامل امتیازات مکان کاندید iام نسبت به شاخص j ام است، تشکیل می‌گردد. امتیازدهی این مکان‌ها با استفاده از نظر خبرگان انجام شده است. بعضی از معیارها مطلوب و برخی دیگر نامطلوب هستند. برای هم‌راستا کردن امتیاز هر محل در هر معیار، امتیازات باید بی‌بعد و در مقیاس [1و0] محاسبه شوند.

نحوه بی‌بعدسازی و نرمال‌سازی بدین صورت است که محل‌های پیشنهادی در ستون قرار می‌گیرند و معیارهای مورد ارزیابی در سطرها. به ازای معیارهای مطلوب در یک سطر ماکزیمم مقادیر در هر ستون مشخص شده و تمامی مقادیر آن ستون بر مقدار بیشینه تقسیم می‌شود. در حالت کلی باید به ازای یک معیار تمامی مقادیر موجود در ستون بر مقدار حد بالا تقسیم شود.

به ازای زیرمعیارهای نامطلوب، در یک سطر کمینه مقدار در هر ستون مشخص می‌شود و مقدار کمینه بر تمامی عناصر ستون تقسیم می‌گردد. در حالت کلی باید حد پایین بر تمامی مقادیر موجود در ستون به ازای هر معیار تقسیم شود. با این کار علاوه بر یک‌سوسازی، مقادیر عددی معیارها بین [1و0] خواهد شد.

برای تعیین وزن محلی[13] معیار از ماتریس مقایسات زوجی استفاده می‌شود. برای این منظور از پرسشنامه‌هایی برای مقایسه زوجی بین معیارها استفاده می‌شود و از خبرگان درخواست می‌گردد تا برای تعیین اهمیت در مقایسات زوجی از جدول شماره 1 که کهرمان و همکارانش در سال 2006 ارایه کرده‌اند، استفاده نمایند.

نحوه پر کردن پرسشنامه‌ها توسط خبرگان بدین صورت خواهد بود که هر معیار در هر سطر با معیارها در ستون‌ها مقایسه می‌شود. در واقع خبره باید به این سوال جواب دهد که به‌عنوان مثال معیار 1 در مقایسه با معیار 2 چقدر مهم‌تر است. میزان اهمیت معیار 1 در مقایسه با معیار 2 چقدر است. این مقایسه نسبی با استفاده از جدول شماره 1 صورت می‌گیرد.

استفاده از اعداد فازی در این قسمت از طرفی باعث می‌شود خبرگان بتوانند از الفاظ زبانی برای مقایسات زوجی استفاده کنند، و از سوی دیگر می‌توان عدم قطعیت و ابهام را نیز در مساله وارد نمود. نتایج حاصل از مقایسات زوجی در جدول شماره 2 آمده است. بعد از پر شدن پرسشنامه‌ها و استخراج ماتریس مقایسات زوجی، وزن محلی هریک از فاکتورها از طریق یک مدل غیرخطی که توسط داگدورین و یوکسل در سال2010 ارایه شده است، به‌دست می‌آید[37].

$$\max \lambda \quad s.t: \tag{9}$$

$$(m_{ij} - l_{ij}) \times \lambda w_j - w_i + l_{ij} w_j \leq 0 \tag{10}$$

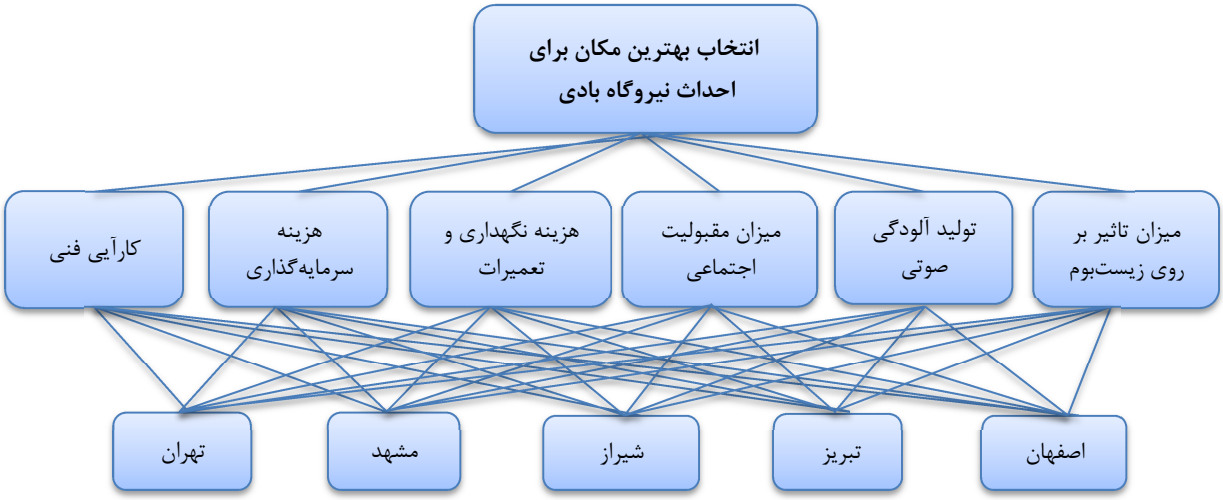
$$(u_{ij} - m_{ij}) \times \lambda w_j + w_i - u_{ij} w_j \leq 0 \tag{11}$$

$$\sum_{k=1}^{n} w_k = 1, w_k > 0, k = 1,2,\dots,n \quad i = 1,2,\dots,n-1 \ , j = 2,3,\dots,n \ , j > i \tag{12}$$

در این مدل غیرخطی (l, m, u) نشان‌دهنده 3 عدد فازی مثلثی در مقایسات زوجی هستند و w_k نشان دهنده وزن معیار kام است.

مقدار بهینه λ می‌تواند برابر عددی مثبت یا منفی باشد. اگر λ عددی مثبت باشد، بدین معناست که سازگاری در ماتریس مقایسات زوجی وجود داشته و قضاوت درستی در مقایسات انجام شده است و اگر λ مقداری منفی باشد، به معنای ناسازگاری ماتریس موردنظر بوده و باید از خبرگان بخواهیم در قضاوت خود تجدید نظر نمایند. به این ترتیب بعد از حل شدن مدل، وزن محلی هر یک از معیارها بدست می‌آید. با حل معادله با استفاده از نرم افزار lingo 11 بردار وزن معیارها به‌صورت: w*=(0.1950, 0.1373, 0.1270, 0.1946, 0.1413, 0.2049 و λ^*=0.693 بدست می‌آید.

12 Decision Matrix
13 Local Weight



شکل 2: درخت سلسله مراتبی برای انتخاب بهترین مکان برای احداث نیروگاه بادی

جدول 1: مقیاس‌های زبانی برای تعیین اهمیت در مقایسات زوجی

Linguistic scales for difficulty	Linguistic scales for importance	Triangular fuzzy scale	Triangular fuzzy reciprocal scale
Just equal	Just equal	(1 ،1 ،1)	(1 ،1 ،1)
Equally difficult (ED)	Equally importance (EI)	(1/2 ،1 ،3/2)	(2/3 ،1 ،2)
Weakly more difficult (WMD)	Weakly more importance (WMI)	(1 ،3/2 ،2)	(1/2 ،2/3 ،1)
Strongly more difficult (SMD)	Strongly more importance (SMI)	(3/2 ،2 ،5/2)	(2/5 ،1/2 ،2/3)
Very strongly more difficult (VSMD)	Very Strongly more importance(VSMI)	(2 ،5/2 ،3)	(1/3 ،2/5 ،1/2)
Absolutely more difficult (AMD)	Absolutely more importance (AMI)	(5/2 ،3 ،7/2)	(2/7 ،1/3 ،2/5)

جدول2: مقایسه زوجی معیارها نسبت به هدف

	کارآیی فنی	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه نگهداری و تعمیرات	میزان مقبولیت اجتماعی	تولید آلودگی صوتی	میزان تاثیر بر روی زیست‌بوم
کارآیی فنی	(1 ،1 ،1)	(2/5 ،1/2 ،2/3)	(2/3 ،1 ،2)	(3/2 ،2 ،5/2)	(2 ،5/2 ،3)	(1/2 ،1 ،3/2)
هزینه سرمایه‌گذاری	(3/2 ،2 ،5/2)	(1 ،1 ،1)	(2/3 ،1 ،2)	(3/2 ،2 ،5/2)	(1 ،3/2 ،2)	(1/2 ،1 ،3/2)
هزینه نگهداری و تعمیرات	(1/2 ،1 ،3/2)	(1/2 ،1 ،3/2)	(1 ،1 ،1)	(1/2 ،1 ،3/2)	(1/2 ،2/3 ،1)	(1/2 ،1 ،3/2)
میزان مقبولیت اجتماعی	(2/5 ،1/2 ،2/3)	(2/5 ،1/2 ،2/3)	(2/3 ،1 ،2)	(1 ،1 ،1)	(2 ،5/2 ،3)	(2 ،5/2 ،3)
تولید آلودگی صوتی	(1/3 ،2/5 ،1/2)	(1/2 ،2/3 ،1)	(1 ،3/2 ،2)	(1/3 ،2/5 ،1/2)	(1 ،1 ،1)	(1 ،3/2 ،2)
میزان تاثیر بر روی زیست‌بوم	(2/3 ،1 ،2)	(2/3 ،1 ،2)	(2/3 ،1 ،2)	(1/3 ،2/5 ،1/2)	(1/2 ،2/3 ،1)	(1 ،1 ،1)

جدول 3: وزن نهایی معیارها

معیارها	وزن نهایی
کارآیی فنی	0,1950
هزینه سرمایه‌گذاری	0,2049
هزینه نگهداری و تعمیرات	0,1413
میزان مقبولیت اجتماعی	0,1946
تولید آلودگی صوتی	0,1270
میزان تاثیر بر روی زیست‌بوم	0,1373

جدول 4: اولویت نهایی محل‌های پیشنهادی

اولویت	وزن نهایی	شهرهای کاندید
4	0,1733	تهران
1	0,2249	مشهد
3	0,2125	شیراز
2	0,2168	تبریز
5	0,1724	اصفهان

مثبت بودن λ موید درستی قضاوت خبرگان و سازگاری وزن‌های نهایی است. بنابراین نیازی به تجدیدنظر خبرگان در قضاوت‌های‌شان وجود ندارد. با توجه به نتایج حاصله، معیار «هزینه سرمایه‌گذاری» با وزن 0/2049 مهم‌ترین عامل تصمیم‌گیری و معیار «تولید آلودگی صوتی» با وزن 0/1270 کم اهمیت‌ترین عامل در تصمیم‌گیری در خصوص احداث یک نیروگاه بادی در محل پیشنهادی خواهد بود. سایر نتایج حاصله در جدول شماره 3 آمده است. به همین روش، هر یک از گزینه‌ها بر اساس تک تک معیارها مقایسه می‌شوند. در نهایت حاصل ضرب ماتریس وزن معیارها در ماتریس وزن نهایی گزینه‌ها، اولویت هر یک از گزینه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. براساس این نتایج شهر مشهد دارای بالاترین اولویت برای احداث یک نیروگاه بادی است. نتایج حاصله در جدول شماره 4 آمده است.

4- نتیجه گیری

ویژگی‌های منحصر بفرد انرژی‌های تجدیدپذیر، بخصوص انرژی بادی باعث شده است که کشورهای مختلف جهان بر روی استفاده از این انرژی‌ها متمرکز شوند. در کشور ایران نیز محل‌های بسیاری دارای پتانسیل مناسب برای احداث نیروگاه انرژی بادی هستند. با استفاده از انرژی باد که پاک، اقتصادی و تجدیدپذیر است، می‌توان میزان قابل توجهی از نیاز برق کشور را برآورده نمود. از این رو، وجود یک رویکرد دقیق و قابل اطمینان برای استفاده سیاست‌گذاران حوزه انرژی به‌منظور تعیین بهترین مکان برای احداث نیروگاه‌های بادی لازم و حیاتی است.

در این پژوهش پتانسیل پنج کلان‌شهر کشور برای احداث نیروگاه بادی مورد ارزیابی قرار گرفت. روش مورد استفاده برای این ارزیابی تحلیل سلسله مراتبی فازی است. ارزیابی گزینه‌ها با استفاده از متغیرهای زبانی، سبب سهولت استفاده از روش پیشنهادی شده است. علاوه بر آن امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و ابهامات نیز در این روش فراهم است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که عامل «هزینه سرمایه‌گذاری» مهمترین عامل در خصوص تصمیم‌گیری در زمینه احداث یک نیروگاه بادی است. براساس پژوهش انجام شده شهر مشهد بهترین گزینه برای احداث نیروگاه بادی است. سهولت استفاده از رویکرد ارایه شده در این مقاله، باعث شده است که بتوان از آن به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای کمک به مدیران و سیاست‌گذاران ارشد حوزه انرژی برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهترین محل برای تاسیس نیروگاه بادی، استفاده نمود.

فهرست منابع

[1] Kahraman, C.; Kaya, I.; "*A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives*", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 9, p.p. 6270–6281, 2010.

[2] Gandomkar, A.; "*Wind Energy Potential Estimation in Iran*", Geography and Environmental Planning, Vol. 20, No. 4, p.p. 85-100, 2010.

[3] Bahrami, M.; Abbaszadeh, P.; "*An overview of renewable energies in Iran*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 24, p.p. 198-208, 2013.

[4] Aydin, N. Y;. Kentel, Elcin; Duzgu, Sebnem; "*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.p. 364-373, 2010.

[5] Sana, "Data Collection Guide for Non Government renewable power plant construction," Renewable energy organization of Iran, Tehran, 2010.

[6] Azadeh, A.; Ghaderi, S. F.; Nasrollahi, M. R.; "*Location optimization of wind plants in Iran by an integrated hierarchical Data Envelopment Analysis*", Renewable Energy, Vol. 36, No. 5, p.p. 1621-1631, 2011.

[7] Domschke, W.; Drexl, A.; "*Location and layout planning: an international bibliography*", Lecture notes in economics and mathematical systems, Vol. 238, p.p. 343-8, 1985.

[8] Bhatnagar, R.; Sohal, Amrik S.; "*Supply chain competitiveness: measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices*", Technovation, Vol. 25, No. 5, p.p. 443-456, 2005.
[9] Eiselt, H. A.; "*Location modeling in practice*", American Journal of Mathematical and management sciences, Vol. 12, No. 1, p.p. 3-18, 1992.
[10] Current, J.; Daskin, M.; Schilling, D.; "*Discrete network location models*", in Facility location: applications and theory, Berlin, Springer-Verlag, p.p. 81-118, 2002.
[۱۱] خانکه، مریم؛ احسانی فر، محمد؛ صدیقی فراهانی، شیوا؛ **"مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از روش پرومتی"** 1393.
[12] Önüt, S.; Tuzkaya, U. R.; Saadet, N.; "*Multiple criteria evaluation of current energy resources for Turkish manufacturing industry*", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 6, p.p. 1480-1492, 2008.
[13] Kaya, T.; Kahraman, C.; "*Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology*", Expert Systems with Applications, Vol. 38, No. 6, p.p. 6577-6585, 2011.
[14] Aras, H.; Erdoğmuş, Şenol; Koç, Eylem; "*Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process*", Renewable Energy, Vol. 29, No. 8, p.p. 1383-1392, 2004.
[15] Tegou, L.-I.; Polatidis, Heracles; Haralambopoulos, Dias A.; "*Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study*", Journal of environmental management, Vol. 91, No. 11, p.p. 2134-2147, 2010.
[16] Hämäläinen, R. P.; Karjalainen, Risto; "*Decision support for risk analysis in energy policy*", European Journal of Operational Research, Vol. 56, No. 2, p.p. 172-183, 1992.
[17] Wang, J.-J.; Jing, Y.-Y.; Zhang, C.-F.; Zhao, J.-H.; "*Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 9, p.p. 2263–2278, 2009.
[18] Cavallaro, F.; Ciraolo, L.; "*A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island*", Energy Policy, Vol. 33, No. 2, p.p. 235–244, 2005.
[19] Vaidya, O. S.; Kumar, S.; "*Analytic hierarchy process: An overview of applications*", European Journal of operational research, Vol. 169, No. 1, p.p. 1-29, 2006.
[20] Kahraman, C.; Cebeci, U.; Ulukan, Z.; "*Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP*", Logistics Information Management, Vol. 16, No. 6, p.p. 382-394, 2003.
[۲۱] میرزایی، مریم؛ باقری‌نژاد، جعفر؛ **"ارایه مدل سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر به کمک روش Fuzzy-AHP"**، دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، 1391.
[22] Kahraman, C.; "*Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments*", Springer, Vol. 16, 2008.
[23] Chang, D. Y.; "*Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP*", European journal of operational research, Vol. 95, No. 3, p.p. 649-655, 1996.
[24] Kahraman, C.; "*Capital Budgeting Techniques Using Discounted Fuzzy Cash Flows*", Soft Computing for Risk Evaluation and Management, Vol. 76, Physica-Verlag HD, p.p. 375-396, 2001.
[25] Kahraman, C.; Ruan, D.; Tolga, E.; "*Capital budgeting techniques using discounted fuzzy versus probabilistic cash flows*", Information Sciences, Vol. 142, No. 1–4, p.p. 57 - 76, 2002.
[26] Taha, R. A.; Daim, T.; "*Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review*", in Research and Technology Management in the Electricity Industry, Springer, p.p. 17- 30, 2013.
[27] Lozano-Minguez, E.; Kolios, A. J.; Brennan, F. P.; "*Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures*", Renewable Energy, Vol. 36, No. 11, p.p. 2831- 2837, 2011.
[28] Lee, A. H.; Hung, M.-C.; Kang, H.-Y. a.; "*A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment*", Energy Conversion and Management, Vol. 64, p.p. 289- 300, 2012.
[29] Yeh, T.-M.; Huang, Y.-L.; "*Factors in determining wind farm location: Integrating GQM, fuzzy DEMATEL, and ANP*", Renewable Energy, Vol. 66, p.p. 159- 169, 2014.
[30] Şengül, Ü.; Miraç, E.; Shiraz, S. E.; Gezder, V.; Şengül, A. B.; "*Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey*", Renewable Energy, Vol. 75, p.p. 617- 625, 2015.
[31] Afgan, N. H.; Carvalho, M. G.; "*Sustainability assessment of a hybrid energy system*", Energy Policy, Vol. 36, No. 8, p.p. 2903- 2910, 2008.
[32] Diakoulaki, D.; Karangelis, F.; "*Multi-criteria decision analysis and cost--benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, No. 4, p.p. 716-727, 2007.
[33] Mourmouris, J.; Potolias, C.; "*A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece*", Energy Policy, Vol. 52, p.p. 522- 530, 2013.
[34] Løken, E.; Audun, B.; Holen, A. T.; "*Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems*", European Journal of Operational Research, Vol. 197, No. 3, p.p. 1072- 1083, 2009.
[35] Ertay,T.; Kahraman, C.; Kaya, I.; "*Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey*", Technological and Economic Development of Economy, Vol. 19, No.

1, p.p. 38- 62, 2013.
[36] Burton, J.; Hubacek, K.; "*Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments*", Energy Policy, Vol. 35, No. 12, p.p. 6402- 6412, 2007.
[37] Dağdeviren, M.; Yüksel, İ.; "*A fuzzy analytic network process (ANP) model for measurement of the sectoral competititon level (SCL)*", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 2, p.p. 1005- 1014, 2010.