

انتخاب بهترین مکان نیروگاه هیبرید تلمبه ذخیره – بادی با استفاده از MCDM و GIS (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)

مرتضی ابراهیمی^۱، یونس نوراللهی^۲، حسین حسینی^۳، ساسان قنبری^۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۲/۲۵

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۱۰/۱۵

چکیده:

نیاز روز افزون به انرژی و در نظر گرفتن اهمیت مسائل زیست محیطی موجب گسترش انرژی‌های تجدید پذیر شده است و در این میان، فناوری توربین‌های بادی با سرعت پیشرفتی در حال تکامل است. پیش‌بینی طرفت نصب ۵۳۶ گیگاوات در سال ۲۰۱۷ نشان دهنده جایگاه این انرژی در جهان است و ارزیابی‌های انجام شده در ایران نیز پتانسیل مناسب در زمینه بادی را نشان می‌دهد. به دلیل نوسانات ذاتی نیروی باد وجود عوامل متعددی که باید برای ایجاد یک نیروگاه بادی در نظر گرفته شوند، انتخاب مکان نیروگاه بادی و روش ذخیره آن از اهمیت جدی برخوردار است. هدف پژوهش حاضر، انتخاب بهترین مکان نیروگاه هیبرید تلمبه ذخیره – بادی با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره است که شاخص‌های ارزیابی آن برای اولین بار در این نوشتار ارائه گردیده که شامل یمپ توربین برگشتی، مخزن پایین دست، ارتفاع مخزن بالادست و مزرعه بادی می‌باشد. به منظور تعیین درجه اهمیت شاخص‌ها از تکنیک سلسه مراتبی فازی استفاده شده که پس از تجزیه و تحلیل، مخزن پایین دست مهمترین شاخص و منطقه ۱ (گیلان غرب) بهترین مکان در منطقه مورد مطالعه (کرمانشاه) تعیین گردید.

کلمات کلیدی:

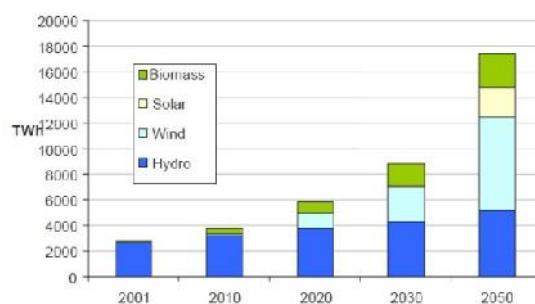
انرژی باد، تلمبه ذخیره، تصمیم‌گیری چند معیاره، سلسه مراتبی فازی

mo.ebrahimi@ut.ac.ir
noorollahi@ut.ac.ir
h.hosseiny@ut.ac.ir
sasan.ghanbari@ut.ac.ir

(۱) استادیار گروه علوم شبکه و فناوری، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
(۲) استادیار گروه انرژی و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی تکنولوژی انرژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
(۴) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی تکنولوژی انرژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

مقدمه

در دهه های اخیر، تامین انرژی موردنیاز جوامع بشری و دسترسی به منابع پایدار به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های بین المللی مطرح بوده است. انتظار می‌رود تقاضای انرژی در جهان در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۰ به طور متوسط ۱/۸ درصد در سال افزایش یابد [۱۰]. بخش عمده منابع انرژی سوخت‌های فسیلی هستند که از تاثیرهای مخرب آنها می‌توان به افزایش آلاینده‌ها (به طور عمده شامل گازهای گلخانه‌ای) اشاره کرد. به عنوان نمونه می‌توان به افزایش انتشار گاز CO₂ طی دوره ۴۰ سال از ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۰، از ۲۱ به ۴۵ گیگا تن اشاره کرد [۱۰]. از همین‌رو، طبق تخمین‌ها برای سال ۲۰۵۰، سوخت‌های فسیلی ۷۰ درصد و انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای ۳۰ درصد از کل ۲۲ مگاتن (معادل بشکه نفت در سال) نیاز جهان به انرژی را تامین می‌کنند [۱۱]. بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه در حال اتخاذ سیاست‌هایی برای حرکت به سمت استفاده از انرژی تجدیدپذیر بادی و خوشیدی و کاهش میزان وابستگی به سوخت‌های فسیلی هستند [۲۰]. با در نظر گرفتن کاهش سهم مصرف سوخت‌های فسیلی در آینده، نقش انرژی تجدیدپذیر در تامین تقاضای جهانی انرژی بیشتر خواهد شد که طبق برآوردها، این میزان تاثیر گذاری برای انرژی بادی در سال ۲۰۵۰، تولید ۴۳ درصد انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و ۱۳ درصد از کل انرژی الکتریکی تولیدی در دنیا را شامل می‌شود. برای مشاهده پیش‌بینی از سهم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به شکل (۱) توجه کرد [۱۱].



شکل (۱) پیش‌بینی میزان تامین انرژی الکتریکی انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان تا سال ۲۰۵۰ [۱۱]

با وجود تمامی پیشرفت‌ها در زمینه کارکرد نیروگاه‌های بادی، این نیروگاه‌ها هنوز با چالش‌های عمدۀ ای مثل نوسانات و لثاء، فلیکر و هارمونیک‌ها روبرو هستند که باعث ایجاد ناپایداری در شبکه سراسری برق می‌شوند [۲۷]. بخش عمدۀ ای از این مشکلات ناشی از تغییرات گریز ناپذیر سرعت باد است که تا این زمان راه حل قطعی برای این مشکل ارایه نشده است. یکی از راهکارهای موثر برای حذف نوسان‌ها استفاده از توان بادی به صورت هیبرید با دیگر روش‌های تولید توان یا ذخیره سازی انرژی است. در این زمینه، نیروگاه‌های تلمبه ذخیره بادی به عنوان یکی از منابع اتكای تامین توان الکتریکی بخصوص تامین بار اوج مصرف مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲۴]. جانگ و همکاران [۲۹] در

یک شبیه سازی آزمایشی به این نتیجه رسیدند که نیروگاه تلمبه ذخیره بادی باعث کاهش هزینه های عملیاتی و تعداد توربین های مورد نیاز برای تامین بار در شرایط برابر می شود. همچنین دینگلین و همکارانش در یک برآورد اقتصادی نتیجه گرفتند که نیروگاه های تلمبه ذخیره بادی باعث افزایش کارایی اقتصادی و ایجاد محرك در اقتصاد انرژی می شود [۳۰].

انرژی باد و همچنین سیستم های خورشیدی شامل سلول های خورشیدی و دوکش های خورشیدی از گزینه های پیشتاز برای جایگزینی منابع انرژی هستند. از عده موافع پیش رو در سیستم های خورشیدی، قیمت تمام شده این فناوری است که نسبت به انرژی باد گران تر می باشد. در این میان، یک بحث قابل توجه یافتن مکانی مناسب برای ایجاد نیروگاه تلمبه ذخیره بادی است. مکان نیروگاه باید دارای ویژگی هایی مثل شرایط باد مناسب و منابع قابل استفاده آب باشد و در عین حال باید مشکلی برای زیست بوم محلی و تاسیسات مجاور ایجاد کند. در این زمینه، ترکیبی از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و ابزارهای تصمیم گیری چند معیاره^۱ می تواند ابزاری قدرتمند در راستای مکانیابی نیروگاه تلمبه ذخیره بادی باشد. ترکیبی از ابزارهای GIS و MCDM پیشتر در تحقیقات مشابهی در زمینه مکانیابی تصمیم گیری مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۴، ۱۵، ۲۴]. هدف نهایی در این پژوهش دستیابی به بهترین مکان نیروگاه هیبرید تلمبه ذخیره- بادی در استان کرمانشاه با استفاده از سیستم GIS و ابزارهای تصمیم گیری چند معیاره و تکنیک سلسه مراتبی فازی^۲ است. لازم به ذکر است که شاخص و زیرشاخص های ارائه شده در این پژوهش برای اولین بار و با نظر متخصصان در زمینه انرژی بادی ارائه شده است.

مطالعه منطقه مورد نظر: استان کرمانشاه

نظر به اینکه مکانیابی و پتانسیل سنگی نیروگاه تلمبه ذخیره ای با ترکیب انرژی بادی و استگی کاملی به عوامل جغرافیایی و توسعه اقتصادی صنعتی و فنی منطقه دارد، شناخت هر چه بهتر منطقه مورد مطالعه دقت تصمیم گیری را بهبود خواهد بخشید. استان کرمانشاه در غرب ایران واقع شده است و به طور میانگین ۱۴۱۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. در شکل (۲) مشاهده می شود که استان کرمانشاه از شمال با استان کردستان، از شرق با استان همدان، از جنوب شرقی با استان لرستان، از جنوب با استان ایلام و از غرب با کشور عراق هم مرز است. بیش از نیمی از وسعت استان را کوه های مرتفع پوشانده است. گستره ارتفاع این استان از سطح دریا از ۱۱۷ متر تا ۳۳۹۰ متر می باشد. با توجه به اینکه وجود ارتفاعات در کنار دشتی های وسیع و منابع دائمی آب از ضروریات مکانیابی نیروگاه تلمبه ذخیره ای تعیین شده است، کوهستانی بودن استان مزیت نسبی در این زمینه ایجاد کرده است [۲].

1) Multi Criteria Decision Making (MCDM)

2) Fuzzy Analytical Hierarchical Process (FAHP)



شکل ۲) موقعیت و محدوده استان کرمانشاه

وضعیت انرژی باد در ایران

براساس شواهد تاریخی قابل استناد، وجود اولین آسیاب بادی تاریخی به سال ۶۴۴ قبیل از میلاد مسیح در مرز ایران و افغانستان بر می‌گردد [۱۲]. این موضوع نشان دهنده بستر مناسب جهت بهره برداری از انرژی باد در منطقه است. به لحاظ جغرافیایی، ایران در منطقه کم فشار قرار دارد که باعث ایجاد هوایی متراکم در برخی مناطق در فصول تابستان و زمستان می‌شود. ایران تحت تاثیر دو جریان بادی عمده قرار دارد [۱۸]:

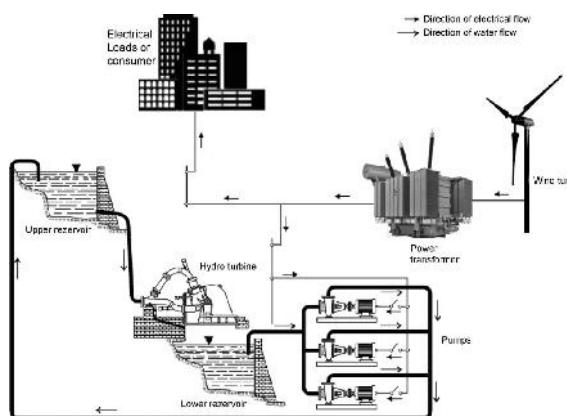
- ۱- بادی که از جانب اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه به طرف شمال غربی ایران می‌وزد.
- ۲- بادی که از جانب اقیانوس هند به طرف جنوب شرقی ایران در تابستان می‌وزد.

مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد نشان داده اند که تنها در ۲۶ منطقه کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن متوسط بازدهی ۳۳ درصد، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است [۴] که در مطالعات دیگر این رقم تا ۱۵۰۰۰ مگاوات نیز تخمین زده است [۱۳]. در حال حاضر ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور ۶۰۰۰۰ مگاوات است. در سال ۱۳۷۳، اولین توربین بادی مدرن مدل ۵۰۰ کیلووات Nord-Tank در شهر منجیل نصب شد که تا سال ۱۳۸۳، این تعداد به ۵۶ و در پایان سال ۱۳۹۱، به ۱۸۰ توربین رسید که در مجموع ۶۸۷۴۶۲۵۷۹ کیلووات ساعت برق تولید می‌کنند [۴]. متساقن این ظرفیت نیز پتانسیل مناسب انرژی بادی، ظرفیت نیروگاه‌های نصب شده در ایران تنها ۱۰۹ مگاوات می‌باشد که با رقم ۴۵۰۰ مگاوات مندرج در برنامه پنجم توسعه فاصله زیادی دارد. برای رسیدن به جایگاه مناسب در تولید انرژی بادی تصمیم گیری در زمینه مکان احداث نیروگاه بادی و

نحوه ذخیره آن و انتقال به شبکه برق سراسری یکی از چالش‌های اساسی می‌باشد که نیازمند بررسی‌های بیشتری از جمله استفاده از مدل سازی ریاضی به صورت مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره، جهت مکان‌یابی بهینه محل نیروگاه است.

نیروگاه تلمبه ذخیره

انرژی تولیدی توربین‌های بادی به دلیل نوسان و عدم پیوستگی در متصل بودن به شبکه سراسری برق دارای چالش‌های فنی عمدۀ ای است. یکی از تکنیک‌های رفع این چالش‌ها، ذخیره انرژی بادی به روش تلمبه ذخیره آبی و تزریق برق مورد نیاز در زمان اوج مصرف به شبکه است. در این سیستم ساده، مخزن آب، ژنراتور، پمپ – توربین برگشتی و توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند که توربین‌های بادی به عنوان عامل تبدیل انرژی جنبشی باد به توان لازم برای پمپ آب عمل می‌کنند. ابتدا انرژی تولیدی توسط توربین بادی به پمپ آب منتقل شده و سپس آب از مخزن پایین دست به مخزن بالا دست پمپ می‌شود و در زمان اوج مصرف با رها سازی آب از مخزن بالا و عبور آب از توربین برگشتی، انرژی الکتریکی تولید می‌شود. مدل هیبرید تلمبه ذخیره – بادی در شکل (۳) مشاهده می‌شود. یکی از برتری‌های روش هیبرید تلمبه ذخیره، صرفه جویی در هزینه‌هاست. در واقع، به جای ایجاد نیروگاه جدید به منظور رفع نیازهای اوج مصرف می‌توان با به کار بردن روش ذخیره سازی، انرژی مورد نیاز را تولید کرد [۹].



شکل (۳) طرح شماتیک نیروگاه هیبرید تلمبه ذخیره-بادی [۹]

روش تحلیل

در ابتدا، عوامل موثر در تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی و پتانسیل سنجی منابع بادی و تلمبه – ذخیره ای تعیین می‌شود و این عوامل به عنوان معیارهای تصمیم‌گیری در مراحل بعدی به کار می‌رود. سپس با استفاده از فرایند تحلیل سیستمی و بهره‌گیری از نرم افزارهای ArcGIS، پس از تهیه نقشه‌های رقومی با اعمال محدودیت‌ها و مطلوبیت‌های مکان‌یابی به لایه نقشه رقومی استان، پتانسیل انرژی بادی و تلمبه-ذخیره ای مشخص می‌شود. در مرحله بعدی، بر اساس نظر

متخصصان انرژی بادی و هیدرولکتریکی، شاخص و زیرشاخص‌های مناسب با این پژوهش برگزیده شده و مکان‌یابی موردنظر با استفاده از تکنیک سلسه مراتبی فازی انجام می‌گیرد.

مکان‌یابی منابع باد و تلمبه - ذخیره ای

معیارهای مکان‌یابی

می‌توان لایه‌های رقومی مختلف را در دو گروه لایه‌های محدودیت و لایه‌های مطلوبیت قرار داد و از تفاصل حاصل از کسر لایه محدودیت از لایه مطلوبیت، مکان‌یابی را انجام داد. به دلیل هم پوشانی بعضی از این گروه‌ها و جامعیت برخی نسبت به سایرین و نیز ارایه بهتر مطلب جهت ترسیم و بررسی معیارها در این مطالعه، معیارها در سه گروه زیر دسته بندی شده‌اند:

- فنی و جغرافیایی
- اقتصادی
- منابع آب

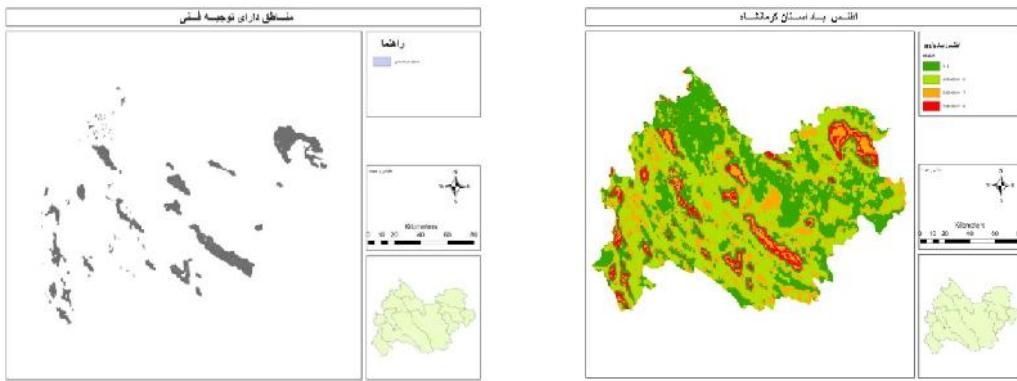
معیارهای استفاده شده در این پژوهه عمدتاً از معیارهای جهانی و نیز همفکری با کارشناسان داخلی از شرکت‌های مشانیر، قدس نیرو، سانا و آب نیرو تهییه گردیده است. در این مطالعه، میانگین سرعت وزش باد، حداقل ۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و بنابراین، تمام نواحی استان با میانگین سرعت باد ۶ متر بر ثانیه و بالاتر تفکیک شده و در این مرحله به عنوان یک لایه مطلوبیت در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۴) طبقه‌بندی باد منطقه را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۱) معیارهای بکار رفته را با ذکر منبع نشان می‌دهد. این ۲۶ معیار بدست آمده بر ۳۳ لایه رقومی تهییه شده از منطقه اعمال می‌گردد و با استفاده از نرم افزار ArcGIS تلفیق آنها انجام می‌شود.

برهم نهی لایه‌های مطلوبیت و محدودیت

اگر عملیات انجام شده برای به دست آوردن لایه مناطق دارای توجیه فنی به صورت یک رابطه نشان داده شود، رابطه (۱) نشان دهنده این فرایند می‌باشد:

$$S \ W) - C \quad L_1 = (D \quad (1)$$

که در آن، L_1 لایه مناطق دارای توجیه فنی، D لایه مناطق دارای مطلوبیت ارتفاع، S لایه مناطق دارای مطلوبیت شب، W لایه مناطق دارای مطلوبیت باد و C لایه مجموعه محدودیت‌ها می‌باشد که نتیجه کلی در شکل (۵) مشاهده می‌شود.



شکل ۴) اطلس باد استان کرمانشاه در ارتفاع ۶۰ متری

با توجه به اینکه توجیه اقتصادی یکی از الزامات مکان‌بایی است، از روی هم قرار دادن لایه‌های خطوط انتقال برق و منابع آب دائمی و بزرگراه و راه آسفالته و راه آهن و اعمال حربی مطلوب آن، لایه رقومی مناطق مستعد اقتصادی به دست آمده و در شکل (۵) نشان داده شده است. این عملیات با رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$P \quad W_{al} \quad R \quad L_2 = \quad (2)$$

که در آن، L_2 لایه مناطق دارای توجیه اقتصادی، P لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ۱۰۰۰۰ متری شبکه برق، W_{al} لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ۵۰۰۰ متری از منابع دائمی آب و R لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ۱۰۰۰۰ متری از راه آهن و راه آسفالته و بزرگراه می‌باشد. همچنین رابطه (۳) نشان دهنده برهم پوشانی مجموعه لایه‌های مختلف جغرافیایی است که ارضاکننده همه شاخص‌های مورد مطالعه در این پژوهش است، می‌باشد:

$$L_2 \quad L_3 \quad L_4 = L_1 \quad (3)$$

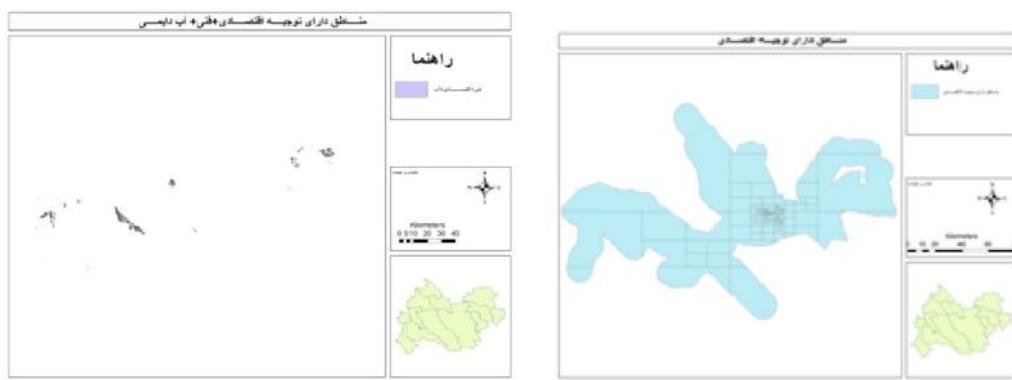
لایه مناطق دارای توجیه فنی، L_2 لایه مناطق دارای توجیه اقتصادی، L_3 لایه مناطق دارای منابع آب دائمی و L_4 لایه مناطق دارای توجیه اقتصادی و فنی و دارای آب دائمی می‌باشند. حاصل رابطه (۳) در شکل (۷) مشاهده می‌شود. هفت منطقه به عنوان گزینه‌های مساله تصمیم‌گیری چند شاخصه جهت مکان‌بایی بهینه تعیین شده است. ویژگی بارز این مناطق داشتن منبع آب مخزنی با شرایط زیر است:

(۱) منبع آب جاری نیست و کمتر تابع نزولات جوی است

(۲) منبع به صورت دریاچه و بسیار پر آب است. بنابراین، مشکل دبی لحظه‌ای برطرف شده است

(۳) منبع آب به صورت دریاچه طبیعی پایین دست عمل کرده و هزینه پیک سایی کاهش می‌یابد.

هفت منطقه مورد نظر در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. این هفت منطقه حداقل دارای یک دریاچه دائمی (طبیعی یا مصنوعی) می‌باشند. حداقل فاصله مزرعه بادی از محل احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، ۱۰۰۰۰ متر و حداقل فاصله محل مورد نظر برای احداث دریاچه بالادست از دریاچه پایین دست ۵۰۰۰ متر تعیین شده است. دریاچه بالادست نیز می‌بایست در حداقل ارتفاع ۳۰۰ متر باشد. نام گذاری این مناطق بر اساس نام سد و یا دریاچه انجام شده است.



شکل ۶) نقشه رقومی مناطق دارای توجیه اقتصادی

شکل ۷) مناطق دارای توجیه اقتصادی و پرآب

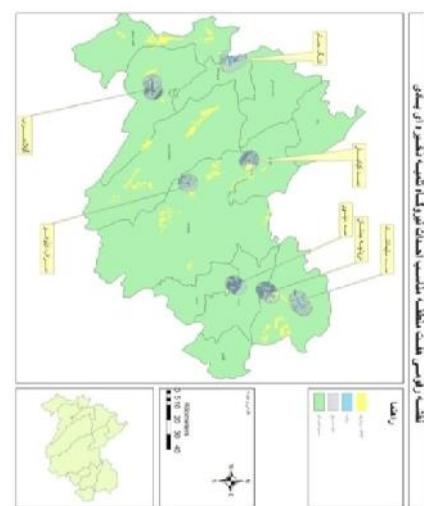
ساختمار تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر فازی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که اولین بار توسط توماس.ال ساعتی ابداع شد [۲۳]، توانایی حل مسایل پیچیده را در زمینه‌های مختلف کمی و کیفی دارد. این فرایند به دلیل نبود صراحت مربوط به نگاشت ادراکهای تصمیم‌گیرندگان با اعداد دقیق، مورد نقد است [۸]. با توجه به اینکه ارایه قضاوت‌ها به صورت کلامی برای تصمیم‌گیرندگان آسان‌تر از ارایه یک پاسخ به طور قطعی است، استفاده از مفاهیم فازی در تصمیم‌گیری‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار شده است. عدم اطمینان موجود در قضاوت‌های ترجیحی، عدم اطمینان اولویت‌بندی گزینه‌ها را افزایش می‌دهد و به همان نسبت، تعیین توافق (ثبات منطقی) اولویتها را مشکل می‌سازد [۱۶]. در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای مقایسه زوجی گزینه‌ها، از اعداد فازی و برای به دست آوردن وزن‌ها و برتری‌ها از روش میانگین هندسی استفاده می‌شود، چرا که این روش به سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و جواب یگانه‌ای برای ماتریس مقایسات زوجی تعیین می‌کند. در شکل (۹) طراحی فرایند سلسله مراتبی برای پیدا کردن بهترین مکان برای ذخیره انرژی بادی به روش تلمبه ذخیره مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که هفت گزینه در شکل (۹) همان هفت منطقه بدست آمده از نقشه‌های GIS می‌باشد.

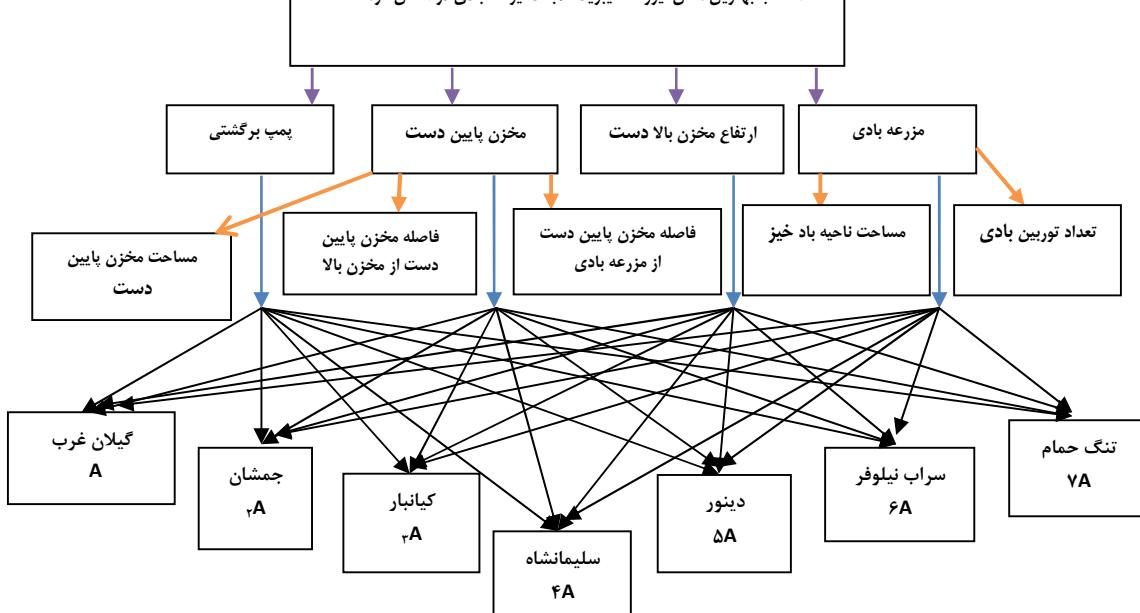
جدول ۱) معیارهای مکان‌یابی نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره

ردیف	نام لایه	میزان مخزن	میزان مخزن پیش	میزان مخزن پیش	میزان مخزن
۱	خانه‌خواهی دلی	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۲	نیروگاه برق	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۳	پست برقی خانه	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۴	خط برقی	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
۵	خانه آبیه	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۶	سخن نفت و گاز	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۷	سد مهدویت سهیل	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۸	گل	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۹	مانع تاریخی	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۱۰	الارتخایی هم	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۱۱	سبز	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۲	روزگار	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۳	نیا	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۴	زیر پل سد	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۵	(دیگر مخزن های دلی)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۶	پل	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۷	ره	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۸	ره اهن	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۹	پل راه	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۰	ره آلات	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۱	مرکز پژوهش داد	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۲	رسان	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۳	فرودگاه	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۴	اصول داد	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۵	شیب	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۶	ارتفاع	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۷	چکان، فوجان، چنان	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۸	چکان، فوجان، چنان	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰

شکل ۸) نتیجه مکان‌یابی جغرافیایی (هفت منطقه)



انتخاب بهترین مکان نیروگاه همیرید تلمبه ذخیره - بادی در استان کرمانشاه



شکل ۹) طراحی فرایند سلسله مراتبی

توصیف شاخص‌ها

شاخص‌ها و زیر‌شاخص‌های مورد مطالعه در این مقاله عبارتند از:

C₁: پمپ برگشتی

در یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، پمپ در حالتی که شبکه خارج از ساعت اوج مصرف است پمپاژ را انجام می‌دهد و در اوج مصرف شبکه، تولید برق اتفاق خواهد افتاد. آنچه مهم است، به دست آوردن ارتفاعی است که با ذخیره هیدرولیکی در آن ارتفاع بیشترین راندمان کسب شود.

C₂: مخزن پایین دست

هفت منطقه مورد مطالعه مخزن پایین دست آنها به صورت سد یا دریاچه طبیعی می‌باشد. سه زیرشاخص مساحت مخزن، ارتفاع آن از مزرعه بادی برای انتقال شبکه برق و ارتفاع از مخزن بالادست به صورت کیفی و با نظر صاحب نظران این زمینه مشخص شده است.

C₃: ارتفاع از مخزن بالا دست

روش تلمبه ذخیره از پر بازده ترین روش‌ها با ملاحظه هزینه آن است. اما باید در باره هزینه سرمایه و انتخاب مناسب ترین جغرافیا دقیق نمود. همان طور که گفته شد، لازم است مخازن بالایی و پایینی حتی امکان بزرگ و فاصله آنها از یکدیگر زیاد باشد. به همین دلیل، ارتفاع مخزن بالادست اهمیت زیادی دارد.

C₄: مزرعه بادی

برای تولید برق به مقدار زیاد که بتواند شبکه سراسری برق را تغذیه نماید، نیاز به ایجاد مزرعه یا پارک توربین‌های بادی است که از مجموعه‌ای از توربین‌های بادی تشکیل شده و اصطلاحاً به آن نیروگاه بادی گفته می‌شود. از عوامل تاثیرگذار بر روی شاخص مزرعه بادی، تعداد و نحوه چیدمان توربین‌ها و مساحت ناحیه باد خیز می‌باشد. با توجه به الگوهای رایج برای تحلیل جریان‌های گردبادی و جهت کاهش اثرات توربین‌ها بر روی یکدیگر، روش‌های مختلفی برای چیدمان آنها در مزارع بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این شیوه‌ها، روش بکار گرفته شده توسط لیسامن و همکاران می‌باشد که با تلفات چیدمان کمتر از ۱۰ درصد چیدمان توربین‌های واقع در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق را تشکیل می‌دهد. در این روش بیان شده است که فاصله بین دو توربین در راستای جهت باد ۱۰ برابر قطر پره این توربین‌ها و فاصله توربین‌ها در جهت عمود بر مسیر باد ۵ برابر قطر پره توربین‌ها می‌باشد. بنابراین، مطابق روش لیسامن، فاصله توربین‌ها

در جهت باد ۱۰ برابر قطر پره (معادل ۵۲۹ متر مطابق مشخصات فنی توربین انرکون E5۳) و در جهت عمود بر جهت باد ۵ برابر قطر پره (معادل ۲۶۵ متر) در نظر گرفته می شود. بنابراین، مساحت تقریبی زمین اختصاص یافته به هر توربین مدل انرکون E5۳ برابر ۱۴۰۱۸۵ متر مربع خواهد بود. از زیرشاخص مورد اهمیت می توان به تعداد توربین و مساحت ناحیه با باد مناسب اشاره کرد [۲].

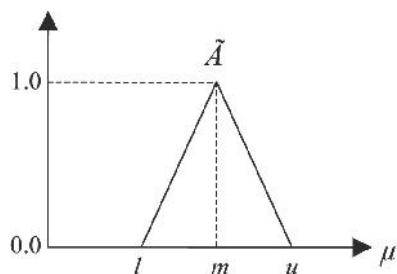
پس از تعریف شاخص ها و ارائه زیرشاخص های مناسب برای ارزیابی شاخص ها با بهره گیری از نظر متخصصان زمینه انرژی بادی متغیر های توصیفی انتخاب می شوند. سپس گزینه های منتخب با استفاده از مقیاس های جدول (۲) که شامل اعداد فازی مثلثی است، تبدیل شده [۱۷] و برای انجام محاسبات و تحلیل نتایج، تعیین داده می شوند.

جدول (۲) متغیر های بیانی و اعداد فازی متناظر

اعداد فازی بیانی	مقادیر مقیاس های بیانی
به یک اندازه مهم	$\text{۱} = (۱,۱,۱)$
ارزش بینایین ارزش های ۱ و ۲	$\text{۲} = (۳,۲,۱)$
کمی مهم تر	$\text{۳} = (۴,۳,۲)$
ارزش بینایین ارزش های ۲ و ۵	$\text{۴} = (۵,۴,۳)$
نسبتاً مهم تر	$\text{۵} = (۶,۵,۴)$
ارزش بینایین ارزش های ۵ و ۷	$\text{۶} = (۷,۶,۵)$
بسیار مهم تر	$\text{۷} = (۸,۷,۶)$
ارزش بینایین ارزش های ۷ و ۹	$\text{۸} = (۹,۸,۷)$
مطلقاً مهم تر	$\text{۹} = (۹,۹,۹)$

روش حل فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی

اعداد فازی مثلثی را می توان به صورت کلی شکل (۱۰) نمایش داد. این عدد به صورت (l,m,u) نمایش داده می شود.



شکل (۱۰) عدد فازی مثلثی

μ_x تابع عضویت است که میزان عضویت هر x در این عدد فازی را نشان می‌دهد. با توجه به تابع عضویت، شکل عدد فازی نیز تغییر می‌کند. مقایسات زوجی با استفاده از داده‌های مرجع [۲] انجام پذیرفت. (در پیوست ۲) جداول مقایسات دودویی آمده است).

الگوریتم روش AHP فازی

گام (۱): ارزش دهی هر یک از شاخص‌ها بر اساس جدولی از معیارهای زیانی (جدول ۲) به صورت مقایسات دودویی انجام شده و ماتریس R تشکیل می‌شود. ارزش دهی به هر یک از گزینه‌ها با در نظر گرفتن هر شاخص نیز به همین صورت انجام می‌گیرد. در محاسبات مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به هم، در هر ماتریس ابتدا میانگین هندسی سط्रی و سپس میانگین ستونی انجام می‌گیرد. نتیجه برای گزینه‌ها یک ماتریس $m \times n$ است که m تعداد گزینه‌ها و n تعداد شاخص‌هاست.

گام (۲): مقادیر میانگین هندسی در هر سطر از ماترس مقایسات زوجی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{r}_i = (\bar{a}_{i1} \odot \bar{a}_{i2} \odot \dots \odot \bar{a}_{in})^{1/n}$$

گام (۳): وزن هریک از شاخص‌ها توسط رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{w}_i = \bar{r}_i \odot (\bar{a}_1 \oplus \bar{a}_2 \oplus \dots \oplus \bar{a}_n)^{-1}$$

گام (۴): ارزش نهایی هر یک از گزینه‌ها از حاصلضرب وزن‌های حاصل شده \bar{w}_i برای هر شاخص، در وزن بدست آمده برای هر گزینه از ماتریس مقایسات زوجی گزینه‌ها بدست می‌آید.

وزن نهایی معیارها پس از آخرین مرحله محاسبات بدست آمده و وزن‌ها و رتبه بندی نهایی در جداول (۳)، (۴) و (۵) قابل مشاهده هستند. (در پیوست ۳ جداول وزن نهایی شاخص‌های اصلی و گزینه‌ها آمده است).

جدول (۳) وزن شاخص های مربوط به هر گزینه

گزینه	پمپ برگشتی	مخزن پایین دست	ارتفاع مخزن بالا دست	مزرعه بادی
گیلان غرب (A _۱)	۰,۳۷	۰,۱۳	۰,۳۲	۰,۳۷
جمشان (A _۲)	۰,۱۳	۰,۲۲	۰,۰۹	۰,۱۳
کیانبار (A _۳)	۰,۲۶	۰,۲۷	۰,۰۹	۰,۲۶
سلیمانشاه (A _۴)	۰,۰۷	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۷
دینور (A _۵)	۰,۰۲	۰,۱۸	۰,۰۹	۰,۰۲
سراب نیلوفر (A _۶)	۰,۱۷	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۱۷
تنگ حمام (A _۷)	۰,۰۷	۰,۱۴	۰,۳۲	۰,۰۷

جدول (۴) وزن شاخص ها

مزرعه بادی	ارتفاع مخزن بالا دست	مخزن پایین دست	پمپ برگشتی	شاخص ها
۰,۲۷	۰,۳۷	۰,۲۷	۰,۰۸	وزن

جدول (۵) نمره و رتبه گزینه ها

گزینه ها	گیلان غرب (A _۱)	جمشان (A _۲)	کیانبار (A _۳)	سلیمانشاه (A _۴)	دینور (A _۵)	سراب نیلوفر (A _۶)	تنگ حمام (A _۷)
نمره	۰,۲۹	۰,۱۴	۰,۲۰	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۱۸
رتبه	۱	۳	۲	۷	۶	۵	۴

نتیجه گیری

هدف مقاله حاضر، استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره با تکیه بر تکنیک سلسه مراتبی فازی برای یافتن بهترین مکان نیروگاه همیرید تلمبه ذخیره - بادی می باشد. با استفاده از داده مقاله های علمی موجود از ۲۶ معیار بدست آمده، ۳۳ لایه رقومی تهیه شده که با استفاده از نرم افزار ArcGIS تلفیق آنها انجام و در نهایت، هفت منطقه به عنوان گزینه های

مساله تصمیم‌گیری مشخص شده است. در بخش تصمیم‌گیری چند معیاره، شاخص‌های در نظر گرفته شده شامل پمپ برگشتی، مخزن پایین دست، ارتفاع مخزن بالا دست و مزرعه بادی می‌باشند. با تکنیک سلسه مراتبی فازی، شاخص مخزن پایین دست مهم‌ترین شاخص انتخاب گردید و شاخص‌های مزرعه بادی، ارتفاع مخزن بالا دست و توربین برگشتی به ترتیب دارای وزن‌های کمتر شدند. همچنین منطقه گیلان غرب به عنوان بهترین مکان انتخاب گردید.

منابع

- [۱] اشرف، علی. (۱۳۸۹)، امکان سنجی و مدلسازی بهینه تولید برق (تجددی پذیر و فسیلی) برق منطقه‌ای باخته برای چشم انداز ۱۴۰۴ با اولویت مصرف بهینه انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی. (پایان نامه کارشناسی ارشد)، دانشکده محیط زیست و انرژی دانشگاه علوم و تحقیقات تهران.
- [۲] حیدری، مسعود. (۱۳۹۰)، پتانسیل سنجی و امکان سنجی پیک سایی در شبکه برق غرب کشور(حدوده استان کرمانشاه) با استفاده از سیستم تلمبه ذخیره ای برق بادی. (پایان نامه کارشناسی ارشد)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- [۳] گل نشان، علی اکبر و فرجاه، ابراهیم. (۱۳۸۰)، تجربیات نیروگاههای پیشرفته، چاپ اول. انتشارات دانشگاه علم و صنعت
- [4] www.suna.org.ir [accessed: 29.03.14].
- [5] 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, 14(1), 364-373.
- [6] Baban, S. M. J., & Parry, T. (2001). *Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK*. Renewable Energy, 24(1), 59-71.
- [7] Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). *Site selection for large wind turbine using GIS*. In: Proceedings of the PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment- ICEE, Phuket
- [8] Deng, H. (1999). *Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison*. International Journal of Approximate Reasoning, 21(3), 215-231
- [9] Dursun, B., & Alboyaci, B. (2010). *The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey's electric energy demand*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 1979-1988.
- [10] Europejska, K. (2003). World energy, technology and climate policy outlook 2030.
- [11] Europejska, K. (2006). World Energy Technology Outlook: 2050 : WETO: Office for Official Publications of the European Communities.

- [12] Hau, E. (2006). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*: Springer.
- [13] Hosseini, S. E., Andwari, A. M., Wahid, M. A., & Bagheri, G. (2013). *A review on green energy potentials in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27(0), 533-545.
- [14] İlhan Talinli, E. T., Egemen Aydin and Sibel Kabakçı. (2011). *A Holistic Approach for Wind Farm Site Selection by Using FAHP*: InTech, Chapters.
- [15] Lee, T. L., Lin, H. M., Jeng, D. S., & Hsu, T. W. (2008). *Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Assess the Potential of Offshore Wind Energy In Taiwan*. International Society of Offshore and Polar Engineers. Vancouver, Canada.
- [16] Leung, L. C., & Cao, D. (2000). *On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP*. European Journal of Operational Research, 124(1), 102-113.
- [17] Lin, H.-F. (2010). *An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality*. Computers & Education, 54(4), 877-888.
- [18] Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (2011). *Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 449-459.
- [19] Moiloa, B. (2010). *Geographical Information Systems for Strategic Wind Energy Site Selection*. Vrije University Amsterdam.
- [20] Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K., & Sedaghat, A. (2014). An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30(0), 641-650.
- [21] Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K., & Sedaghat, A. (2014). An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30(0), 641-650.
- [22] Rojanamon, P., Chaisomphob, T., & Bureekul, T. (2009). *Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering environment / engineering/ economic criteria and social impact*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2336-2348.
- [23] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- [24] Sagbas, A., A. Mazmanoglu, & R. ALP, A Decision Making Model For Selection of Wind Energy Production Farms Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. International Journal of Electronics; Mechanical and Mechatronic .Available from:(www.aydin.edu.tr/ijemme/index.asp?id=33).
- [25] Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Mourelatos, A., & Corominas, J. (1998). *Evaluation of Renewable Energy potential using a GIS decision support system*. Renewable Energy, 13(3), 333-344.

- [26] Yue, C.-D., & Wang, S.-S. (2006). *GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan*. Energy Policy, 34(6), 730-742.
- [27] Shafiullah, G.M., et al., *Potential challenges of integrating large-scale wind energy into the power grid–A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 20(0): p. 306-321.
- [28] Anastasladls, A., et al. *Benefits of hybrid wind - Pumped storage unit in A non-interconnected power system using optimal power flow*. in *Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on*. 2010.
- [29] Ning, Z., et al., *Planning Pumped Storage Capacity for Wind Power Integration*. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2013. 4(2): p. 393-401.
- [30] Dinglin, L., et al., *Economic evaluation of wind-powered pumped storage system*. Systems Engineering Procedia, 2012. 4(0): p. 107-115.

پیوست ۱) رتبه علمی کارشناسان

در جامعه آماری اولیه ۳۰ کارشناس برای نظرسنجی انتخاب شدند که از این میان، ۶ نظر از دیدگاه های مختلف برای جامعه نهایی و انجام محاسبات انتخاب شد. نام کارشناسان و رتبه علمی در جدول زیر ارایه شده است.

ردیف	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	موسسه
۱	حسین یوسفی	استادیار	گروه انرژی های نو، دانشگاه تهران
۲	احمد حاجی نژاد	استادیار	گروه انرژی های نو، دانشگاه تهران
۳	یونس نوراللهی	استادیار	گروه انرژی های نو، دانشگاه تهران
۴	مهرداد بروشكی	دانسیار	دانشکده انرژی، دانشگاه شریف
۵	سasan قنبری	دانشجوی کارشناسی ارشد	گروه انرژی های نو، دانشگاه تهران
۶	حسین حسینی	دانشجوی کارشناسی ارشد	گروه انرژی های نو، دانشگاه تهران

پیوست ۲) جدول مقایسات دودویی شاخص‌های اصلی

متخصص ۱

شاخص‌ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۰,۷۵	۰,۷۱	۰,۶۶	۰,۷۵	۰,۷۱۴	۰,۶۶	۱	۱	۱
مخزن پایین دست	۱,۵	۱,۴	۱,۳۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱,۳۳	۱,۴	۱,۵
ارتفاع مخزن بالا دست	۱,۵	۱,۴	۱,۳۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱,۳۳	۱,۴	۱,۵
مزرعه بادی	۱	۱	۱	۰,۶۶	۰,۷۱	۰,۷۵	۰,۶۶	۰,۷۱	۰,۷۵	۱	۱	۱

متخصص ۲

شاخص‌ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۱,۲	۱,۲۵	۱,۳۳	۱	۱	۱	۰,۸۵	۰,۸۳	۰,۸
مخزن پایین دست	۰,۷۵	۰,۸	۰,۸۳	۱	۱	۱	۰,۸۳	۰,۸	۰,۷۵	۰,۷۱	۱,۲	۱,۲۵
ارتفاع مخزن بالا دست	۱	۱	۱	۱,۳۳	۱,۲۵	۱,۲	۱	۱	۱	۰,۸۶	۰,۸۳	۰,۸
مزرعه بادی	۱,۲۵	۱,۲	۱,۱۶	۰,۸	۰,۸۳	۱,۴	۱,۲۵	۱,۲	۱,۱۶	۱	۱	۱

متخصص ۳

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۰,۸۵	۰,۸۳	۰,۸	۰,۸۵	۰,۸۳	۰,۸	۱	۱	۱
مخزن پایین دست	۱,۲۵	۱,۲	۱,۱۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱,۱۷	۱,۲	۱,۲۵
ارتفاع مخزن بالا دست	۱,۲۵	۱,۲	۱,۱۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱,۱۷	۱,۲	۱,۲۵
مزرعه بادی	۱	۱	۱	۰,۸	۰,۸۳	۰,۸۵	۰,۸	۰,۸۳	۰,۸۵	۱	۱	۱

متخصص ۴

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۱۴	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲
مخزن پایین دست	۵	۳	۲,۳	۱	۱	۱	۰,۷۷	۰,۷۵	۰,۷۱	۱	۱	۱
ارتفاع مخزن بالا دست	۷	۴	۳	۱,۴	۱,۳۳	۱,۲۸	۱	۱	۱	۱,۲۹	۱,۳۳	۱,۴
مزرعه بادی	۵	۳	۲,۳	۱	۱	۱	۰,۷۱	۰,۷۵	۰,۷۷	۱	۱	۱

متخصص ۵

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲	۰,۶	۰,۵	۰,۳۳	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲
مخزن پایین دست	۵	۳	۲,۳	۱	۱	۱	۱,۴	۱,۵	۱,۶۶	۱	۱	۱
ارتفاع مخزن بالا دست	۳	۲	۱,۶	۰,۶	۰,۶۶	۰,۷۱	۱	۱	۱	۰,۷۱	۰,۶۷	۰,۶
مزرعه بادی	۵	۳	۲,۳	۱	۱	۱	۱,۶۶	۱,۵	۱,۴	۱	۱	۱

متخصص ۶

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
پمپ برگشتی	۱	۱	۱	۰,۵	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۵۷	۰,۵	۰,۴	۰,۵۷	۰,۵	۰,۴
مخزن پایین دست	۳	۲,۳	۲	۱	۱	۱	۱,۱۴	۱,۱۶	۱,۲	۱,۱۴	۱,۱۶	۱,۲
ارتفاع مخزن بالا دست	۲,۵	۲	۱,۷۵	۰,۸۳	۰,۸۵	۰,۸۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱
مزرعه بادی	۲,۵	۲	۱,۷۵	۰,۸۳	۰,۸۵	۰,۸۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱