

# انتخاب بهترین مکان نیروگاه هیبرید تلمبه ذخیره - بادی

## با استفاده از GIS و MCDM

### (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)

مرتضی ابراهیمی<sup>۱</sup>، یونس نوراللهی<sup>۲</sup>، حسین حسینی<sup>۳</sup>، ساسان قنبری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۲/۲۵

#### چکیده:

نیاز روز افزون به انرژی و در نظر گرفتن اهمیت مسائل زیست محیطی موجب گسترش انرژی های تجدید پذیر شده است و در این میان، فناوری توربین های بادی با سرعت بیشتری در حال تکامل است. پیش بینی ظرفیت نصب ۵۳۶ گیگاوات در سال ۲۰۱۷، نشان دهنده جایگاه این انرژی در جهان است و ارزیابی های انجام شده در ایران نیز پتانسیل مناسب در زمینه بادی را نشان می دهد. به دلیل نوسانات ذاتی نیروی باد و 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 تصمیم گیری چند معیاره است که شاخص های ارزیابی آن برای اولین بار در این نوشتار ارائه گردیده که شامل پمپ توربین برگشتی، مخزن پایین دست، ارتفاع مخزن بالادست و مزرعه بادی می باشد. به منظور تعیین درجه اهمیت شاخص ها، 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:

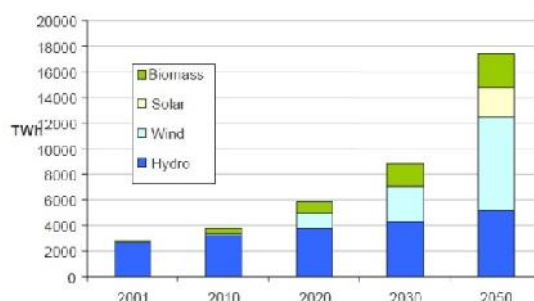
انرژی باد، تلمبه ذخیره، تصمیم گیری چند معیاره، سلسه مراتبی فازی

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 مورد نیاز جوامع بشری و دسترسی به منابع پایدار به عنوان یکی از بزرگترین چالش های بین المللی مطرح بوده است. انتظار می رود تقاضای انرژی در جهان در بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۰ به طور متوسط ۱/۸ درصد در سال افزایش یابد [۱۰]. بخش عمده منابع انرژی سوخت های فسیلی هستند که از تاثیرهای مخرب آنها می توان به افزایش آلاینده ها (به طور عمده شامل گازهای گلخانه ای) اشاره کرد. به عنوان نمونه می توان به افزایش انتشار گاز CO<sub>2</sub> طی دوره ۴۰ سال از ۱۹۹۰ تا ۲۰۳۰، از ۲۱ به ۴۵ گیگا تن اشاره کرد [۱۰]. از همین رو، طبق تخمین ها برای سال ۲۰۵۰، سوخت های فسیلی ۷۰ درصد و انرژی های تجدید پذیر و هسته ای ۳۰ درصد از کل ۲۲ مگاتن (معادل بشکه نفت در سال) نیاز جهان به انرژی را تامین می کنند [۱۱]. بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه در حال اتخاذ سیاست هایی برای حرکت به سمت استفاده از انرژی تجدید پذیر مانند بادی و خورشیدی و کاهش میزان وابستگی به سوخت های فسیلی هستند [۲۰]. با در نظر گرفتن کاهش سهم مصرف سوخت های 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 تجدید پذیر و ۱۳ درصد از کل انرژی الکتریکی تولیدی در دنیا را شامل می شود. برای مشاهده پیش بینی از سهم انرژی های تجدید پذیر می توان به شکل (۱) توجه کرد [۱۱].



شکل (۱) پیش بینی میزان تامین انرژی الکتریکی های تجدید پذیر در جهان تا سال ۲۰۵۰ [۱۱]

با وجود تمامی پیشرفت ها در زمینه کارکرد نیروگاه های بادی، این نیروگاه ها هنوز با چالش های عمده ای مثل نوسانات ولتاژ، فلیکر و هارمونیک ها روبرو هستند که باعث ایجاد ناپایداری در شبکه سراسری برق می شوند [۲۷]. بخش عمده ای از این مشکلات ناشی از تغییرات گریز ناپذیر سرعت باد است که تا این زمان راه حل قطعی برای این مشکل ارائه نشده است. یکی از راهکارهای موثر برای حذف نوسان ها استفاده از توان بادی به صورت هیبرید با دیگر روش های تولید توان یا ذخیره سازی انرژی است. در این زمینه، نیروگاه های تلمبه ذخیره بادی به عنوان یکی از منابع قابل اتکای 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 محرک در اقتصاد انرژی می شود [۳۰].

انرژی باد و همچنین سیستم های خورشیدی شامل سلول های خورشیدی و دوکش های خورشیدی از گزینه های پیشنهادی برای جایگزینی منابع انرژی هستند. از عمده موانع 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 نباید 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<sup>۱</sup> می تواند ابزاری قدرتمند در راستای مکان یابی نیروگاه تلمبه ذخیره بادی باشد. ترکیبی از ابزارهای GIS و MCDM<sup>۲</sup> بیشتر در تحقیقات مشابهی در زمینه مکان یابی 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<sup>۲</sup> 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 مکان یابی و پتانسیل سنجی نیروگاه تلمبه ذخیره ای با ترکیب انرژی بادی وابستگی 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 دشتهای وسیع و منابع دائمی آب از ضروریات مکان یابی 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 قبل 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.

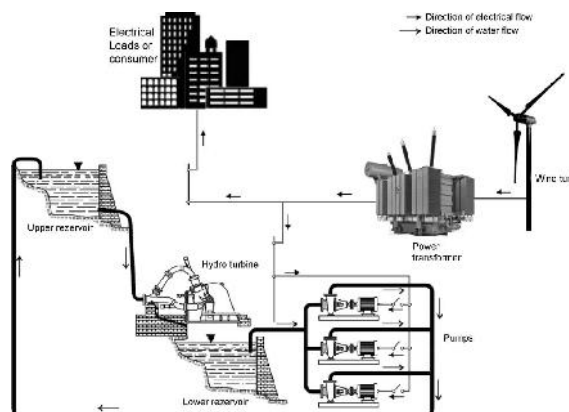
۲- بادی که از جانب اقیانوس هند به طرف جنوب شرقی ایران در تابستان می‌وزد.

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 سایت ها، 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 شده است [۱۳]. در حال حاضر ظرفیت اسمی کل نیروگاه های برق کشور ۶۰۰۰۰ مگاوات است. در سال ۱۳۷۳، اولین توربین بادی مدرن مدل ۵۰۰ کیلو وات 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 می کنند [۴]. متاسفانه علیرغم پتانسیل مناسب انرژی بادی، ظرفیت نیروگاه‌های نصب شده در ایران تنها ۱۰۹ مگاوات می باشد 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 مدل‌سازی 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 عمده‌ای 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، مخازن 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 هیدروالکتریکی، 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 تفاضل 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 جغرافیای
- اقتصادی
- منابع آب

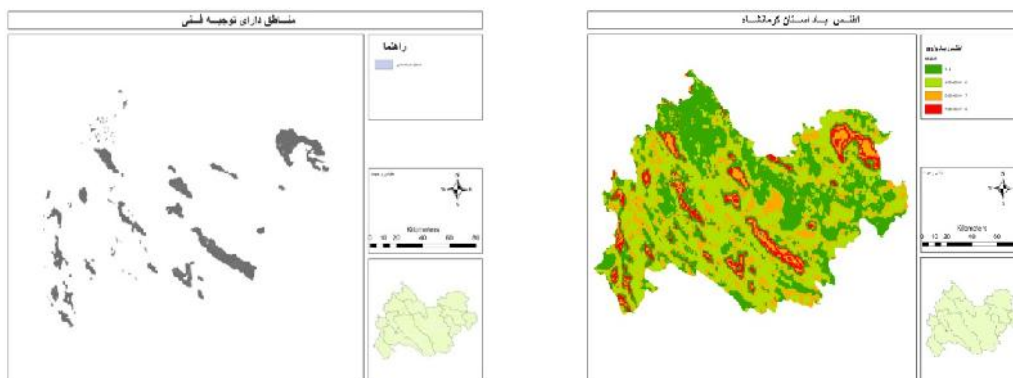
معیارهای استفاده شده در این پروژه عمدتاً از معیارهای جهانی و نیز همفکری با کارشناسان داخلی از شرکت‌های مشاور، قدس نیرو، سانا و آب نیرو تهیه گردیده است. در این مطالعه، میانگین سرعت وزش باد، حداقل ۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و بنابراین، تمام نواحی استان با میانگین سرعت باد ۶ متر بر ثانیه و بالاتر تفکیک شده و در این مرحله به عنوان یک لایه مطلوبیت در نظر گرفته شده اند. 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 تهیه شده از منطقه اعمال می‌گردد و با استفاده از نرم افزار ArcGIS تلفیق آنها انجام می‌شود.

#### برهم نهی لایه‌های مطلوبیت و محدودیت

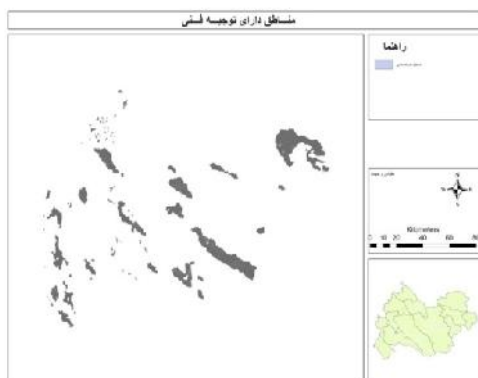
اگر عملیات انجام شده برای به دست آوردن لایه مناطق دارای توجیه فنی به صورت یک رابطه نشان داده شود، رابطه (۱) نشان دهنده این فرایند می‌باشد:

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

که در آن،  $L_1$  لایه مناطق دارای توجیه فنی،  $D$  لایه مناطق دارای مطلوبیت ارتفاع،  $S$  لایه مناطق دارای مطلوبیت شیب،  $W$  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



شکل ۵) نقشه رقومی مناطق دارای توجیه فنی

با توجه به اینکه توجیه اقتصادی یکی از الزامات مکان‌یابی است، از روی هم قرار دادن لایه های خطوط انتقال برق و منابع آب دائمی و بزرگراه و راه آسفالت و راه آهن و اعمال حریم مطلوب آن، لایه رقومی مناطق مستعد اقتصادی به دست آمده و در شکل (۶) نشان داده شده است. این عملیات با رابطه (۲) نشان داده شده است:

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

که در آن،  $L_2$  لایه مناطق دارای توجیه اقتصادی،  $P$  لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ی ۱۰۰۰۰ متری شبکه برق،  $W_{ai}$  لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ی ۵۰۰۰ متری از منابع دائمی آب و  $R$  لایه مناطق قرار گرفته در محدوده ی ۱۰۰۰۰ متری از راه آهن و راه آسفالت و بزرگراه می باشد. همچنین رابطه (۳) نشان دهنده برهم پوشانی مجموعه لایه های مختلف جغرافیایی است که ارضاکنده همه شاخص های مورد مطالعه در این پژوهش است، می باشد:

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

$L_1$  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 می باشند. حاصل رابطه (۳) در شکل (۷) مشاهده می شود.

هفت منطقه به عنوان گزینه های مساله تصمیم گیری چند شاخصه جهت مکان‌یابی 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

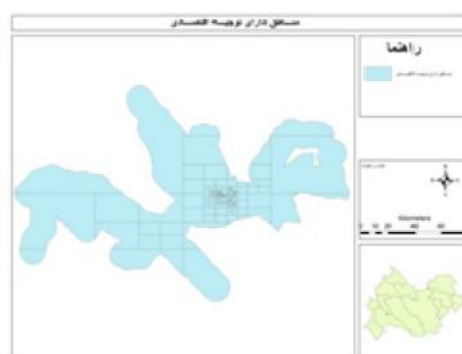
(۲) منبع به صورت دریاچه و بسیار پر آب است. بنابراین، مشکل دبی لحظه ای برطرف شده است

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

هفت منطقه مورد نظر در شکل (۸) نشان داده شده اند. این هفت منطقه حداقل دارای یک دریاچه دایمی (طبیعی یا مصنوعی) می باشند. حداکثر فاصله مزرعه بادی از محل احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، ۱۰۰۰۰ متر و حداکثر فاصله محل مورد نظر برای احداث دریاچه بالادست از دریاچه پایین دست ۵۰۰۰ متر تعیین شده است. دریاچه بالادست نیز می بایست 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

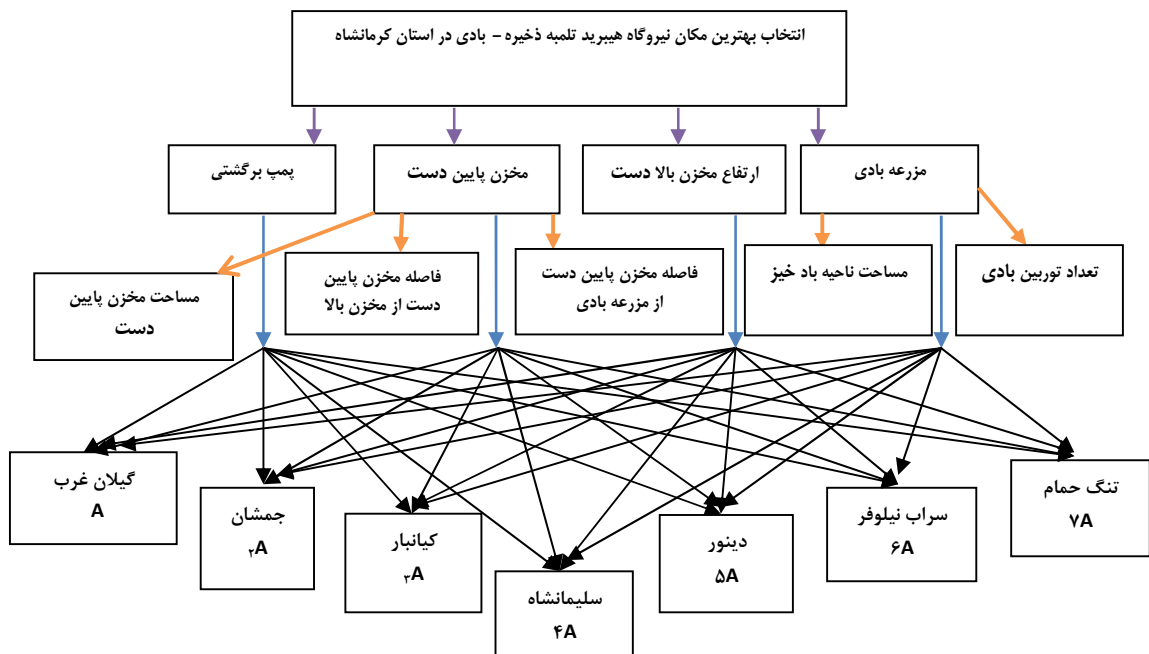
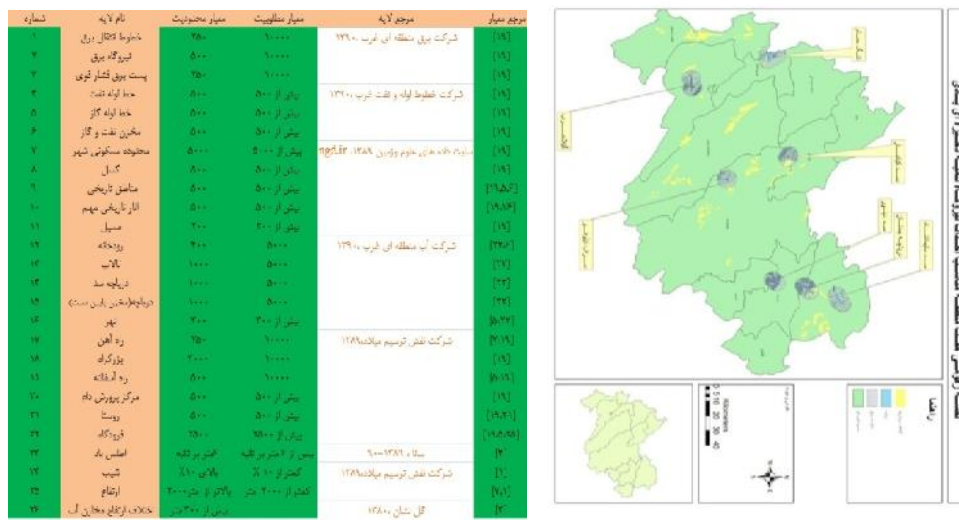


شکل ۷) مناطق دارای توجیه اقتصادی و پرآب

### ساختار 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 زمینه های مختلف کمی و کیفی داراست. این فرایند به دلیل نبود صراحت مربوط به نگاهت ادراکهای تصمیم‌گیرندگان با اعداد دقیق، مورد نقد است [۸]. با توجه به اینکه ارایه قضاوت ها به صورت کلامی برای تصمیم‌گیرندگان آسان تر از ارایه یک پاسخ به طور قطعی است، استفاده از مفاهیم فازی در تصمیم‌گیری ها از اهمیت بسیاری برخوردار شده است. عدم اطمینان موجود در قضاوت‌های ترجیحی، عدم اطمینان اولویت بندی گزینه ها را افزایش می دهد و به همان نسبت، تعیین توافق (ثبات منطقی) اولویتها را مشکل می سازد [۱۶]. در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای مقایسه زوجی گزینه ها، از اعداد فازی و برای به دست آوردن وزن ها و برتری ها از روش میانگین هندسی استفاده می‌شود، چرا که این روش به سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و جواب یگانه ای برای ماتریس مقایسات زوجی تعیین می کند. 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 نقشه های GIS می باشد.

شکل ۸) نتیجه مکان یابی جغرافیایی (هفت منطقه) (جدول ۱) معیارهای مکان یابی نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره



شکل ۹) طراحی فرایند سلسله مراتبی

## توصیف شاخص ها

شاخص ها و زیر شاخص های مورد مطالعه در این مقاله عبارتند از:

### **C<sub>1</sub>**: پمپ برگشتی

در یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای، پمپ در حالتی که شبکه خارج از ساعت اوج مصرف است پمپاژ را انجام می دهد 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.

### **C<sub>2</sub>**: مخزن پایین دست

هفت منطقه مورد مطالعه مخزن پایین دست آنها به صورت سد یا دریاچه طبیعی می باشد. 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.

### **C<sub>3</sub>**: ارتفاع از مخزن بالا دست

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

### **C<sub>4</sub>**: مزرعه بادی

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

در جهت باد ۱۰ برابر قطر پره (معادل ۵۲۹ متر مطابق مشخصات فنی توربین انرکون E53) 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 E53 برابر ۱۴۰۱۸۵ متر مربع خواهد بود. از زیرشاخص مورد اهمیت می توان به تعداد توربین و مساحت ناحیه با باد مناسب اشاره کرد [۲].

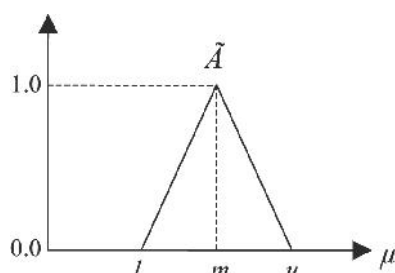
پس از تعریف شاخص ها و ارائه زیرشاخص های مناسب برای ارزیابی شاخص ها با بهره گیری از نظر متخصصان زمینه انرژی بادی متغیر های توصیفی انتخاب می شوند. سپس گزینه های منتخب با استفاده از مقیاس های جدول (۲) که شامل اعداد فازی مثلثی است، تبدیل شده [۱۷] و برای انجام محاسبات و تحلیل نتایج، تعمیم داده می شوند.

جدول (۲) متغیر های بیانی و اعداد فازی متناظر

اعداد فازی مثلثی	مقادیر مقیاس های بیانی
به یک اندازه مهم	$\bar{1} = (1,1,1)$
ارزش بینابین ارزش های $\bar{1}$ و $\bar{2}$	$\bar{2} = (3,2,1)$
کمی مهم تر	$\bar{3} = (4,3,2)$
ارزش بینابین ارزش های $\bar{2}$ و $\bar{5}$	$\bar{4} = (5,4,3)$
نسبتاً مهم تر	$\bar{5} = (6,5,4)$
ارزش بینابین ارزش های $\bar{5}$ و $\bar{7}$	$\bar{6} = (7,6,5)$
بسیار مهم تر	$\bar{7} = (8,7,6)$
ارزش بینابین ارزش های $\bar{7}$ و $\bar{9}$	$\bar{8} = (9,8,7)$
مطلقاً مهم تر	$\bar{9} = (9,9,9)$

#### 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

شکل  $\mu_x(X)$  تابع عضویت است که میزان عضویت هر  $x$  در این عدد فازی را نشان می دهد. با توجه به تابع عضویت، شکل عدد فازی نیز تغییر می کند. مقایسات زوجی با استفاده از داده های مرجع [۲] انجام پذیرفت. (در پیوست ۲) جداول مقایسات دودویی آمده است.)

### الگوریتم روش AHP فازی

گام ۱): ارزش دهی هر یک از شاخص ها بر اساس جدولی از معیارهای زبانی (جدول ۲) به صورت مقایسات دودویی انجام شده و ماتریس  $R$  تشکیل می شود. ارزش دهی به هر یک از گزینه ها با در نظر گرفتن هر شاخص نیز به همین صورت انجام می گیرد. در محاسبات مقایسات زوجی گزینه ها نسبت به هم، در هر ماتریس ابتدا میانگین هندسی سطری و سپس میانگین ستونی انجام می گیرد. نتیجه برای گزینه ها یک ماتریس  $m \times m$  است که  $m$  تعداد گزینه ها و  $n$  تعداد شاخص هاست.

گام ۲): مقادیر میانگین هندسی در هر سطر از ماتریس مقایسات زوجی با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

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

گام ۳): وزن هریک از شاخص ها توسط رابطه زیر حاصل می شود:

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

گام ۴): ارزش نهایی هر یک از گزینه ها از حاصلضرب وزن های حاصل شده  $\bar{w}_i$  برای هر شاخص، در وزن بدست آمده برای هر گزینه از ماتریس مقایسات زوجی گزینه ها بدست می آید.

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

جدول (۳) وزن شاخص های مربوط به هر گزینه

مزرعه بادی	ارتفاع مخزن بالا دست	مخزن پایین دست	پمپ برگشتی	گزینه
۰,۳۷	۰,۳۲	۰,۱۳	۰,۳۷	گیلان غرب (A۱)
۰,۱۳	۰,۰۹	۰,۲۲	۰,۱۳	جمشان (A۲)
۰,۲۶	۰,۰۹	۰,۲۷	۰,۲۶	کیانبار (A۳)
۰,۰۷	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۷	سلیمان‌شاه (A۴)
۰,۰۲	۰,۰۹	۰,۱۸	۰,۰۲	دینور (A۵)
۰,۱۷	۰,۰۹	۰,۰۵	۰,۱۷	سراب نیلوفر (A۶)
۰,۰۷	۰,۳۲	۰,۱۴	۰,۰۷	تنگ حمام (A۷)

جدول (۴) وزن شاخص ها

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

جدول (۵) نمره و رتبه گزینه ها

گزینه ها	گیلان غرب (A۱)	جمشان (A۲)	کیانبار (A۳)	سلیمان‌شاه (A۴)	دینور (A۵)	سراب نیلوفر (A۶)	تنگ حمام (A۷)
نمره	۰,۲۹	۰,۱۴	۰,۲۰	۰,۰۵	۰,۰۹	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 هیبرید 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 تصمیم گیری مشخص شده است. در بخش تصمیم گیری چند معیاره، شاخص های در نظر گرفته شده شامل پمپ برگشتی، مخزن پایین دست، ارتفاع مخزن بالا دست و مزرعه بادی می باشند. با تکنیک سلسه مراتبی فازی، شاخص مخزن پایین دست مهم ترین شاخص انتخاب گردید و شاخص های مزرعه بادی، ارتفاع مخزن بالا دست و توربین برگشتی به ترتیب دارای وزن های کمتر شدند. همچنین منطقه گیلان غرب به عنوان بهترین مکان انتخاب گردید.

## منابع

- [۱] اشرف، علی. (۱۳۸۹)، امکان سنجی و مدل سازی بهینه تولید برق (تجدید پذیر و فسیلی) برق منطقه ای باختر 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.
- [ ] حیدری، مسعود. (۱۳۹۰)، پتانسیل سنجی و امکان سنجی پیک سایه در شبکه برق غرب کشور (محدوده استان کرمانشاه) با استفاده از سیستم تلمبه ذخیره ای برق بادی. (پایان نامه کارشناسی ارشد)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- [ ] گل نشان، علی اکبر و فرجاه، ابراهیم. (۱۳۸۰)، تجربیات نیروگاههای پیشرفته، چاپ اول. انتشارات دانشگاه علم و صنعت
- [4] www.sun.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., Rattanamane, 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] Ihan 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](http://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 نفر 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 بروشکی	دانشیار	دانشکده انرژی، دانشگاه شریف
۵	ساسان 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 شاخص های اصلی

## متخصص ۱

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
	۱	۱	۱	۰٫۷۵	۰٫۷۱	۰٫۶۶	۰٫۷۵	۰٫۷۱۴	۰٫۶۶	۱	۱	۱
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

شاخص ها	پمپ برگشتی			مخزن پایین دست			ارتفاع مخزن بالا دست			مزرعه بادی		
	۱	۱	۱	۱٫۲	۱٫۲۵	۱٫۳۳	۱	۱	۱	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸
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		
	۱	۱	۱	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸	۱	۱	۱
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		
	۱	۱	۱	۰٫۴۲	۰٫۳۳	۰٫۲	۰٫۳۳	۰٫۲۵	۰٫۱۴	۰٫۴۲	۰٫۳۳	۰٫۲
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		
	۱	۱	۱	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲	۰,۶	۰,۵	۰,۳۳	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۲
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		
	۱	۱	۱	۰,۵	۰,۴۲	۰,۳۳	۰,۵۷	۰,۵	۰,۴	۰,۵۷	۰,۵	۰,۴
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