

# ارزیابی منابع و پتانسیل سنجی انرژی برق آبی مقیاس کوچک در استان کردستان

حسین یوسفی<sup>۱\*</sup>، یونس نوراللهی<sup>۱</sup>، سید محمد مهدی موسوی<sup>۲</sup>، آرمان علی محمدی<sup>۲</sup>، مهین ساعدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران  
{hosseinyousefi, noorollahi}@ut.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر - دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران  
{mehdimousavi, armanalimohammadi}@ut.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی - دانشکده صنایع - دانشگاه تهران  
m\_saedi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۸)

## چکیده

توسعه روزافزون صنعت و استانداردهای آن باعث آسایش بیشتر بشر امروزی شده است اما این توسعه در نتیجه افزایش استفاده از انرژی به خصوص انرژی الکتریکی حاصل شده است. یکی از عواقب این افزایش مصرف انرژی، گسترش آلودگی‌های زیست محیطی و از جمله انتشار حجم وسیعی از گازهای گلخانه‌ای است. این افزایش آلودگی‌ها موجب شده است که منابع انرژی پاکتر بیشتر مورد توجه محققان و دانشمندان این عرصه قرار گیرد. شاخص‌ترین و در عین حال قدیمی‌ترین منبع پاک و تجدیدپذیر انرژی، انرژی برقی می‌باشد. بر این اساس در این تحقیق سعی شده است استان کردستان واقع در شمال غربی ایران از حیث وجود این منبع پاک مورد ارزیابی قرار گیرد و میزان انرژی قابل استحصال از این منبع محاسبه گردد. لازم به ذکر است با توجه به این موضوع که استحصال انرژی از طریق انرژی برقی در مقیاس بزرگ نیازمند احداث سد در مسیر رودخانه می‌باشد و با توجه به عواقب زیست محیطی و اجتماعی عمده این گونه طرح‌ها، لذا در این تحقیق انرژی برقی در مقیاس کوچک (رودخانه‌ای) در محدوده مورد مطالعه با توجه به پتانسیل خوب استان کردستان که آن را در زمره غنی‌ترین استان‌های کشور از لحاظ منابع آب رودخانه‌ای قرار می‌دهد، ارزیابی شده است. در ارزیابی انرژی برق آبی در مقیاس کوچک، پس از شناسایی کامل رودخانه‌ها و حوزه‌های آبریز آن از حیث دبی و هد و استخراج نقشه‌های مربوطه، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، و اعمال معیارهای مناسب زیست محیطی، جغرافیایی و فنی - اقتصادی، پتانسیل انرژی برق آبی رودخانه‌های استان برآورد گردید. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که استان کردستان قابلیت تولید حدود ۵۰۰ مگاوات برق تجدیدپذیر از این منابع را داراست.

**واژگان کلیدی:** سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، مکان‌یابی، معیارهای مکان‌یابی، نیروگاه برق آبی کوچک، استان کردستان، انرژی قابل استحصال

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

انرژی برق آبی محبوب‌ترین منبع تولید برق در سراسر جهان به شمار می‌رود. با این‌که سوخت‌های فسیلی تسلط گسترده‌ای بر تولیدات برق سراسر جهان داشته‌اند اما حدود ۶۰ کشور جهان بیش از نیمی از نیازهای برق خود را با استفاده از نیروی برق آبی برآورده می‌کنند. این فناوری به دلایل زیادی از محبوب‌ترین منابع تجدیدپذیر تولید برق به شمار می‌آید. از این دلایل می‌توان به قدرت این صنعت به مدیریت آبی تقاضای (در حال نوسان) برق، مدیریت آب و کنترل سیلاب‌ها اشاره کرد [۱].

تولیدات نیروگاه‌های برق آبی کوچک به دلیل منافع مالی و اجتماعی که در پی داشته‌اند، توانسته‌اند اهمیت بیش‌تری نسبت به نیروگاه‌های بزرگ‌تر پیدا کنند. با توجه به سطح پایین سرمایه‌گذاری و هزینه‌های پایین عملیات و نگهداری، بازگشت سرمایه در این نیروگاه‌های کوچک دارای نرخ بالاتری می‌باشد. ساخت و اجرای آسان تأسیسات نیروگاه‌های کوچک برق آبی به دلیل طراحی ساده تجهیزات توانسته است هزینه‌های احداث آن را پایین نگه دارد. این قبیل نیروگاه‌ها برای تسهیل مشارکت جامعه در زمینه ساخت‌وساز، سرمایه‌گذاری‌های خود را بر روی مهارت‌های داخلی و بومی منطقه متمرکز می‌کند. از سویی تأسیسات نیروگاه‌های برق آبی بزرگ‌تر نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری و تحقیقات بیشتر نسبت به طرح‌های نیروگاه‌های کوچک‌تر می‌باشند. علاوه بر موارد فوق، ساخت نیروگاه‌های کوچک در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ‌تر آسیبی به زیستگاه‌های طبیعی نمی‌زند. در مرحله نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های کوچک نیازی به احداث سدها و مخازن بزرگ نبوده و در نتیجه مشکلاتی از قبیل قطع درختان، استغراق مناطق وسیع و بازپروری زیستگاه‌های طبیعی در آن‌ها به‌وجود نخواهد آمد. علاوه بر این راه‌اندازی این تأسیسات نیاز به زمین و نواحی وسیع نداشته و می‌توان آن‌ها را در مناطقی با جریان‌های کم آب و بر روی رودخانه‌های متوسط نیز ساخت [۱].

مزایای تولید برق از نیروگاه‌های برق آبی کوچک و همچنین افزایش علاقه سرمایه‌گذاران در این بخش که باعث افزایش سیاست‌های حمایتی دولت شده است می‌تواند منجر به نصب و راه‌اندازی تأسیسات در بسیاری از کشورهای دیگر جهان در سال‌های آینده شود. انتظار

می‌رود مجموع ظرفیت راه‌اندازی شده نیروگاه‌های برق آبی کوچک در سال ۲۰۱۵ به ۱۴۰ گیگاوات و در سال ۲۰۲۰ به ۲۰۱ گیگاوات برسد. حفظ امنیت انرژی و محیط زیست با ترویج توسعه نیروگاه‌های برق آبی کوچک امکان‌پذیر خواهد بود [۱].

استان کردستان با توجه به بارندگی نسبتاً زیاد و کوه‌های مرتفع، یکی از استان‌های غنی ایران به لحاظ رودخانه‌های پرآب بشمار می‌آید به طوری که این استان را سرچشمه بسیاری از رودهای پرآب ایران همچون سفیدرود می‌دانند [۲]. بنابراین در این تحقیق سعی شده است استان کردستان در شمال غربی ایران به لحاظ قابلیت تولید برق از منابع برق آبی ارزیابی گردد.

انرژی برق آبی انواع گوناگونی دارد. به طور کلی می‌توان این منبع تولید انرژی را به دو دسته رودخانه‌ای و اقیانوسی تقسیم‌بندی نمود (استان کردستان به دلیل عدم همجواری با آب‌های آزاد و یا دریاها بزرگ، قابلیت استفاده از منابع اقیانوسی را ندارد). انرژی برق آبی رودخانه‌ای نیز به دو دسته برق آبی کوچک و بزرگ تقسیم می‌شود.

انرژی برق آبی بزرگ نیازمند احداث سد در مسیر رودخانه می‌باشد. دریاچه‌های ایجاد شده در پشت سدها غالباً موجب تغییرات آب و هوایی و اقلیمی و در پاره‌ای اوقات نیز تغییرات اجتماعی می‌شوند [۳]. از دیگر معایب این نوع دسته می‌توان به خطرات شکست سد، جابجایی جمعیت، صدمه به محیط زیست از طریق تغییرات در اکوسیستم، تغییراتی زیاد در قسمت‌های بالا و پایین رودخانه، انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر انباشت و پوسیدگی قسمت‌های مختلف گیاهان و زباله‌های رودخانه اشاره کرد. از این رو استفاده از این منبع عظیم انرژی با کمترین میزان صدمه به محیط زیست سر لوحه کار تمام متخصصان این حوزه قرار گرفته است و در همین ارتباط، راهکارهای مفیدی نیز ارائه شده است. در نیروگاه‌های برق آبی کوچک غالباً از انرژی جریان آب در یک مسیر انحرافی و یا در مخازن ذخیره کوچک استفاده خواهد شد (در پاره‌ای موارد در تحلیل انرژی‌های تجدیدپذیر، فقط این نوع کاربرد از انرژی برق آبی به عنوان تجدیدپذیر - به دلیل نو بودن و عدم تأثیرات زیست‌محیطی آشکار - در نظر گرفته می‌شود).

## ۲- ادبیات موضوع

انرژی برق آبی سال‌هاست که در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طوری که می‌توان از آن به عنوان قدیمی‌ترین نوع انرژی‌های تجدیدپذیر یاد کرد که بیشترین سهم را در میان به خود اختصاص داده است [۴]. در رابطه با انرژی برق-آبی تحقیقات متعددی انجام گرفته است و در بسیاری موارد این تحقیقات به صورت عملی نیز به مرحله اجرا درآمده است. به عنوان مثال، کاسری<sup>۱</sup> و همکاران [۵] قسمت کوهستانی حوزه آبریز رودخانه کوپیلی<sup>۲</sup> در آسان<sup>۳</sup> (هند) را با استفاده از نرم‌افزار GIS و مدل SWAT2000 در رابطه با به‌کارگیری نیروگاه برق آبی کوچک (0.5 MW) مورد تحلیل قرار داده و میزان توان تولیدی و مقدار کاهش CO<sub>2</sub> ناشی از این اقدام را بدست آوردند. دودهانی<sup>۴</sup> و همکاران [۶] نیز همین کار را در مورد رودخانه‌های واقع در مناطق کوهستانی غیر قابل دسترس هند اما با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای و روش سنجش از دور به انجام رساندند.

در تحقیقی کوسا<sup>۵</sup> و همکاران [۷] امکان احداث طرح‌های برق آبی کوچک (۱۰ تا ۵۰ مگاوات) در استان ناخن راتچاسیما<sup>۶</sup> در تایلند را بررسی کردند. بر این اساس شش مکان مناسب جهت استفاده از مخزن و یازده مکان مناسب جهت استفاده از بند انحرافی در این استان تعیین گردید.

اوهاناکین<sup>۷</sup> و همکاران [۸] در نیجریه و کوچوکالی<sup>۸</sup> و باریس<sup>۹</sup> [۹] در ترکیه، وضعیت فعلی تولید انرژی برق آبی کوچک، پتانسیل و آینده استفاده از آن را مورد بررسی قرار دادند. با این تفاوت که در ترکیه، وضعیت کشورهای اروپایی و قیمت‌های آنجا ملاک عمل قرار گرفت اما در نیجریه قوانین داخلی و کشورهای آفریقایی ملاک عمل قرار گرفته است.

کوسینک<sup>۱۰</sup> [۱۰] نیز در آمریکا پتانسیل تولید برق آبی کوچک را ارزیابی نمود. با این تفاوت که در این تحقیق مکان‌های مناسب به لحاظ بازدهی اقتصادی بیشتر،

انتخاب گردیدند. اما شاید بتوان اظهار کرد که جامع‌ترین پتانسیل‌سنجی انرژی برق آبی، توسط دپارتمان انرژی آمریکا صورت گرفته است [۱۱-۱۳]. در این تحقیق کشور آمریکا به بیست منطقه هیدرولوژیکی تقسیم شده و در هر منطقه، با تخمین دبی در کل رودخانه‌های منطقه سعی شده است پتانسیل تولید انرژی از طریق طرح‌های برق آبی کوچک تعیین گردد.

در این تحقیق عواملی که در پتانسیل‌سنجی، مکان‌یابی و اولویت‌بندی مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه‌های برق آبی کوچک موثر هستند، مورد تصمیم‌گیری واقع می‌شوند. بدیهی است که با توجه به اینکه عوامل زیادی در تصمیم‌گیری یا انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه‌های برق آبی کوچک دخیل‌اند، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با توجه به قابلیت خود در مدیریت حجم زیاد داده‌های مکانی از منابع مختلف، مطلوب می‌باشد. استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) برای ارزش‌گذاری معیارهای موثر در تصمیم‌گیری و انتخاب مکان مناسب یکی از راهکارهای مفیدی است که در این تحقیق از آن بخوبی استفاده شده است. هدف این تحقیق با استفاده از تلفیق فازی در محیط GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، انتخاب و اولویت‌گذاری مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های برق آبی کوچک در استان کردستان واقع در شمال غربی ایران است.

## ۳- محدوده مورد مطالعه

استان کردستان در شمال غربی ایران و در حد فاصل ۴۴° ۳۴' تا ۳۶° ۳۰' عرض شمالی و ۴۵° ۳۱' تا ۴۸° ۱۶' طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان با مساحت ۲۹،۱۳۶ کیلومتر مربعی، معادل ۱،۷٪ از مساحت کل کشور ایران را دارا می‌باشد [۱۴]. این استان که در دامنه‌ها و دشت‌های پراکنده سلسله جبال زاگرس میانی قرار گرفته است، از شمال به استان‌های آذربایجان غربی و زنجان، از شرق به همدان و زنجان، از جنوب به استان کرمانشاه و از غرب به کشور عراق محدود شده است.

استان کردستان بر اساس آخرین تقسیمات کشوری در سال ۱۳۹۰، دارای ۱۰ شهرستان، ۲۹ شهر، ۳۱ بخش، ۸۶ دهستان و ۱۷۰۲ آبادی دارای سکنه و ۱۸۷ آبادی خالی از

<sup>۱</sup> Kusre

<sup>۲</sup> Kopili

<sup>۳</sup> Assam

<sup>۴</sup> Dudhani

<sup>۵</sup> Kosa

<sup>۶</sup> Nakhon Ratchasima

<sup>۷</sup> Ohunakin

<sup>۸</sup> Kukulkali

<sup>۹</sup> Baris

<sup>۱۰</sup> Kosnik

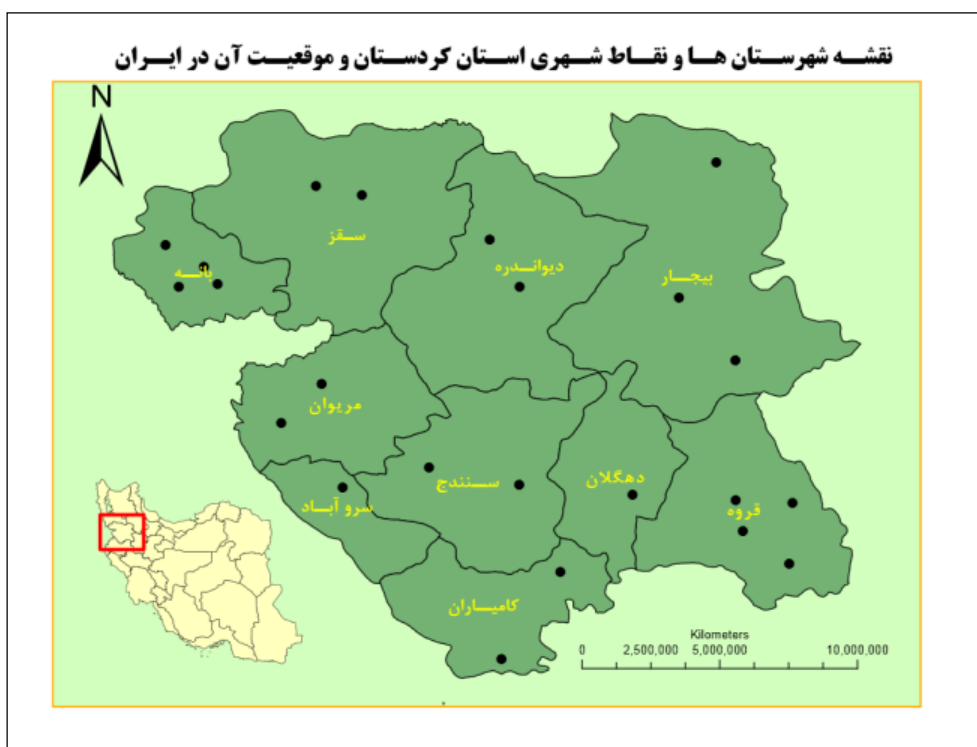
سکنه بوده است [۱۴]. شهرستان‌های این استان عبارتند از بانه، بیجار، دهگلان، دیواندره، سروآباد، سقز، سنندج، قروه، کامیاران و مریوان. بر پایه سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰، استان کردستان ۱۴۹۳۶۴۵ نفر جمعیت دارد که ۶۶ درصد شهری و ۳۴ درصد را جمعیت روستایی تشکیل می‌دهد. تراکم نسبی جمعیت معادل ۵۱٫۲ نفر در کیلومتر مربع است [۱۴].

این استان به دلیل قرار گرفتن در دو اقلیم مختلف در مجاورت هم (کوه‌های بلند زاگروس و دشت‌های وسیع مجاور آن) محل وزش بادهای پرسرعت و نسبتاً دائمی می‌باشد. این واقعیت را می‌توان از نقشه سرعت باد ایران تهیه شده توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)

مشاهده کرد [۱۴]. بنابراین استفاده از انرژی بادی در این استان می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از انرژی‌های پاک در چند سال اخیر گسترش زیادی یافته است. یکی از انرژی‌های پاک، انرژی تجدیدپذیر بادی می‌باشد. در این باره در ایران این واقعیت را می‌توان از طرح‌های در دست مطالعه و اجرا دریافت [۱۵].

با توجه به دلایل ذکر شده و همچنین تنوع بخشیدن به سبد انرژی منطقه و ارتقاء بخشیدن به امنیت انرژی در منطقه، در این تحقیق سعی شده است پتانسیل انرژی بادی در استان کردستان بررسی گردد و مناطق مستعد معرفی گردند و میزان انرژی قابل استحصال تعیین گردد.



شکل ۱- شهرستان‌ها و نقاط شهری استان کردستان

#### ۴- روش کار

در تحقیق پیش‌رو، ضمن بررسی معیارهای مورد استفاده در دنیا در این زمینه، این معیارها مورد ارزیابی، تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در ادامه با توجه به پراکندگی زیاد رودخانه‌ها و زیرحوضه آبریز آن‌ها، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، و با توجه به قابلیت‌های این نرم‌افزار در ذخیره‌سازی، بازیابی، بهنگام‌سازی، پردازش، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات

مکانی، اقدام به اجرای دستورات لازم برای انجام فرآیند مکان‌یابی سایت‌های مناسب بر روی رودخانه‌ها و زیرحوضه‌های آنها می‌گردد. در نهایت سایت‌یابی دقیق مناطق دارای پتانسیل در این استان انجام شده و میزان پتانسیل قابل استحصال از طریق انرژی برق آبی کوچک در استان برآورد می‌شود و اطلس انرژی‌های برق آبی کوچک در استان تدوین می‌گردد.

با توجه به پراکندگی زیاد رودخانه‌ها و زیرحوضه آبریز آن‌ها تحلیل جغرافیایی نقش بسیار مهمی را در این بخش

می‌یابد. این لایه دو استفاده مفید خواهد داشت. با تبدیل آن به لایه نقطه‌ای، لایه مدنظر در قسمت قبل به وجود می‌آید. و همچنین با استفاده از این لایه می‌توان دبی در هر نقطه از رودخانه را تخمین زد.

در لایه جریان تجمعی حاصله، می‌توان به کمک مقدار معادل جریان تجمعی (بزرگترین مقدار جریان تجمعی در هر حوزه)، دبی هر نقطه از رودخانه را برآورد کرد.

با این توضیحات مشخص می‌گردد که چرا از لایه نقطه‌ای به جای لایه خطی جهت نمایش رودخانه‌ها در این تحقیق استفاده می‌شود.

جهت محاسبه هد نقاط مختلف رودخانه، از میزان شیب در هر نقطه از رودخانه استفاده شده است. بدین منظور ابتدا نقشه DEM توسط نرم‌افزار ArcGIS اصلاح شده<sup>۳</sup> و سپس نقشه شیب بواسطه این نقشه ارتفاعی ساخته شده است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد واحدهای برقی‌آبی کوچک نیازمند ایجاد بند انحرافی هستند. بنابراین بایستی معلوم شود که در چه فاصله‌ای بند انحرافی لازم است احداث شود تا براساس آن بتوان اختلاف هد در آن فاصله را ملاک عمل قرار داد. با تعیین این فاصله و شیب به دست آمده در قسمت قبل می‌توان اختلاف هد با استفاده از معادله (۲) محاسبه نمود.

$$H = \tan(\theta) \times L \quad (2)$$

در معادله (۲)، H اختلاف هد بر حسب متر،  $\theta$  شیب بر حسب درجه و L طول متوسط بند انحرافی بر حسب متر می‌باشد. برای محاسبه این طول مدل پیشنهادی هال و همکاران<sup>۴</sup> [۱۰] در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با توجه به شرایط کوهستانی و شیب‌های زیاد استان کردستان، عدد ۱۵۰۰ متر برای طول متوسط بند انحرافی در نظر گرفته شده است.

با محاسبه میزان هد و دبی در هر نقطه از رودخانه‌های استان کردستان، می‌توان حداکثر توان هر نقطه از رودخانه را با استفاده از معادله (۳) محاسبه نمود.

۳ این اصلاح به دلیل تطابق لایه خطی رودخانه و لایه DEM ارتفاعی و نیز پر نمودن گودی‌ها (جهت جلوگیری از اشتباه در نرم‌افزار) یک حوزه صورت می‌پذیرد.

۴ D. Hall

ایفا می‌کند. بنابراین در این قسمت از نرم‌افزار ArcMap و ابزار قدرتمند ArcHydro استفاده می‌شود که قابلیت تحلیل‌های مختلف از شرایط جغرافیایی رودخانه و زیرحوضه را دارد.

در ارتباط با نیروگاه‌های برقی‌آبی کوچک دو عنصر دبی و هد در نقاط مختلف رودخانه دارای اهمیت به‌سزایی هستند. لذا در کنار استفاده از نرم‌افزار ArcGIS لازم است تا مدل مناسبی نیز جهت تخمین دبی و هد به ارائه شود. جهت تخمین دبی از مدل‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. در این تحقیق مدل توسعه داده شده توسط دپارتمان انرژی آمریکا<sup>۱</sup> [۱۱-۱۳] اساس کار قرار گرفته شده است. در این مدل ایالات متحده به ۲۰ منطقه هیدرولوژیکی تقسیم شده است و در هر منطقه بر اساس دبی ثبت شده در داده‌های ایستگاه‌های هیدرولوژی موجود، مطابق با رابطه (۱)، میزان دبی به متوسط بارش در حوضه آبریز آن ایستگاه (P)، متوسط دما در حوضه آبریز آن ایستگاه (T) و مساحت حوضه آبریز آن ایستگاه (A) ارتباط داده شده است.

$$Q = e^a \times A^b \times P^c \times T^d \quad (1)$$

در معادله (۱)، e عدد نپر و a، b، c و d هر کدام، توان‌هایی هستند که در هر منطقه به دست خواهند آمد تا با استفاده از آن‌ها، دبی نقاطی که فاقد داده دبی می‌باشند، برآورد گردد.

پس از تعیین دبی خروجی هر حوزه، گام بعدی مشخص نمودن دبی هر نقطه از رودخانه است. بدین منظور اقدامات ذیل صورت پذیرفته است.

۱- با توجه به نقشه DEM<sup>۲</sup>، کل رودخانه را بایستی در نرم‌افزار ArcGIS مدل کرد که بدین منظور، نقاط مختلفی در درون رودخانه ایجاد کرده که با به هم پیوستن این نقاط به هم، کل رودخانه مدل می‌گردد.

۲- لایه جریان تجمعی در رودخانه ایجاد شده است. این لایه نمایانگر مقدار مساحت حوزه آبریز هر نقطه می‌باشد. با پیشروی در طول رودخانه و به سمت نقطه خروجی حوزه مقدار آن افزایش

۱ DOE

۲ Digital Elevation Model

(۳)

$$P = Q \times H \times \eta_p \times \eta_L$$

در این معادله،  $H$  اختلاف همد محاسبه شده بر حسب متر،  $Q$  دبی محاسبه شده بر حسب  $m^3/s$  توان آبی آن نقطه بر حسب کیلووات است.

$\eta_p$  بازده این نوع از سیستم‌ها (متوسط ۸۰ درصد [۱۰]) و  $\eta_L$  بازده کانال‌های انحرافی (دبی عبوری از کانال) در طرح‌های برق آبی کوچک (متوسط ۵۰ درصد، جهت حفظ اکوسیستم رودخانه و برداشت‌های احتمالی آب بعد از بند انحرافی [۱۰]) می‌باشند.

واضح است که منابع انرژی برق آبی کوچک را می‌توان به صورت نقطه‌ای در نظر گرفت اما تمامی این نقاط جهت احداث این قبیل نیروگاه‌های کوچک مناسب نیستند. لذا لازم است تا ضمن بررسی معیارهای مورد استفاده در این زمینه در دنیا، این معیارها مورد ارزیابی، تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پس از بومی سازی و اعمال معیارهای مناسب زیست محیطی، جغرافیایی و فنی - اقتصادی در منطقه مورد مطالعه، میزان انرژی برق آبی قابل استحصال از رودخانه‌های استان را حاصل برآورد نمود و اطلس انرژی‌های برق آبی کوچک در استان تدوین کرد.

از آنجا که احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌ها نیازمند اختصاص هزینه‌های کلان و صرف زمان طولانی می‌باشد، دقت در تعیین بهترین مکان برای آن می‌تواند تا حد زیادی از هزینه‌های غیر ضروری بکاهد. مکان انتخابی باید به گونه‌ای باشد که دسترسی به معیارهای مورد نیاز در مرحله ساخت و بهره‌برداری با حداقل هزینه امکان پذیر باشد. و همچنین سایت‌ها علاوه بر توان زیست محیطی، بازدهی بالایی نیز داشته باشند. علاوه بر این زمین انتخابی باید از استحکام کافی جهت ساخت چنین سازه‌هایی برخوردار باشد. به عنوان نمونه، از ساخت نیروگاه بر روی گسل، باتلاق و نظیر آن، بایستی خودداری گردد. همچنین لازم است مکانی انتخاب گردد که سایت تا حد ممکن از گزند حوادث طبیعی نظیر سیل و زلزله مصون بماند. همچنین مکان انتخابی باید به گونه‌ای باشد که با احداث و بهره‌برداری از آن، بهداشت عمومی، منابع طبیعی، زندگی جانداران مختلف و غیره در معرض خطر قرار نگیرند. به همین دلیل اثرات مختلف ناشی از احداث و بهره‌برداری از این سایت‌ها و همچنین عواملی که باید از آنها در مقابل اثرات منفی ناشی از احداث سایت‌ها محافظت نمود مورد

بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این ساخت نیروگاه اثرات اجتماعی و فرهنگی نیز به دنبال دارد که این اثرات می‌توانند مثبت یا منفی باشند. بهتر است در انتخاب مکان تا جایی که ممکن است، این اثرات را نیز مورد توجه قرار دارد. به عنوان نمونه، احداث نیروگاه، چرخ صنایع بزرگ و کوچک زیادی را به حرکت در می‌آورد و برای مدت زمان طولانی فرصت‌های شغلی فراوانی ایجاد می‌نماید. با توجه به این مسئله معیارهایی نظیر میزان بیکاری نیز می‌تواند در انتخاب مکان نیروگاه مدنظر قرار گیرد. لیکن باید توجه داشت که چنین معیارهایی در مقایسه با عوامل زیر بنایی مانند نزدیکی به خطوط شبکه و راه‌های ارتباطی چندان حائز اهمیت نیستند [۱۶].

در منابع علمی مختلف، معیارها و پارامترهای مؤثر جهت استقرار نیروگاه‌های برق آبی کوچک، عموماً در قالب گروه‌های مختلفی مانند زیست محیطی، جغرافیایی، بوم‌شناختی، جمعیتی، کاربری زمین، هیدرولوژیکی، امنیتی، فنی و... مورد مطالعه قرار می‌گرفته‌اند. اما به دلیل هم‌پوشانی بعضی از این گروه‌ها و جامعیت برخی نسبت به سایرین، در این مطالعه جهت ترسیم و بررسی و طبقه‌بندی موضوعی معیارها، کلیه معیارهای دخیل، در ۳ گروه معیارهای زیست محیطی، معیارهای فنی - اقتصادی و معیارهای جغرافیایی طبقه‌بندی خواهند شد [۱۷].

معیارهای زیست محیطی شامل حداقل فاصله از مناطق حفاظت شده سازمان حفاظت محیط زیست کشور، شهرها و مراکز جمعیتی، سواحل، تالاب‌ها، جنگل‌ها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها می‌باشند. معیارهای فنی و اقتصادی مورد بررسی در استقرار این نوع از نیروگاه‌ها، عبارتند از انتخاب نوع سیستم مناسب بر اساس رودخانه موجود مطابق با استاندارد IEC-61850، فاصله از راه‌ها، اعم از جاده‌های فرعی، بزرگراه‌ها و آزاد راه‌ها، راه آهن و فاصله از خطوط انتقال برق منطقه می‌باشند [۱۶ و ۱۷].

معیارهای جغرافیایی مورد بررسی شامل حداکثر ارتفاع از سطح دریا و حداکثر درصد شیب زمین می‌باشند. در جدول ۱ کلیه معیارهای مؤثر در فرآیند مکانیابی نیروگاه‌های برق آبی کوچک درج شده است. در این جدول پس از تقسیم‌بندی معیارها به سه گروه ذکر شده، بزرگی هر معیار نیز در مقابل آن نوشته شده است [۱۶ و ۱۷].

جدول ۱- معیارهای مطلوبیت مرتبط با انرژی برق آبی کوچک

| نوع معیار     | نام معیار                      | بزرگی معیار                                              | مراجع            |
|---------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------|
| فنی - اقتصادی | فاصله از راه‌های ارتباطی       | حداقل ۲۵۰ متر                                            | [۱۶، ۱۷]         |
|               |                                | حداکثر ۴۰ کیلومتر                                        | [۱۸، ۱۷، ۱۶]     |
|               | فاصله از خطوط انتقال برق       | حداقل ۲۵۰ متر                                            | [۱۹، ۱۸، ۱۷]     |
|               |                                | حداکثر ۴۰ کیلومتر                                        | [۲۰، ۱۷، ۱۶]     |
|               | فاصله از مراکز جمعیتی          | حداقل فاصله از شهرها ۲۰۰۰ متر و فاصله از روستاها ۵۰۰ متر | [۲۲، ۲۱]         |
|               |                                | حداکثر ۱۶۰ کیلومتر                                       | [۲۳]             |
|               | محدوده توان نیروگاه            | حداقل ۱۰ کیلووات                                         | [۲۳]             |
|               |                                | حداکثر ۳۰ مگاوات                                         | [۲۳]             |
|               | ارتفاع از سطح زمین             | حداکثر ۲۰۰۰ متر                                          | [۱۶، ۱۷]         |
|               |                                | حداکثر ۱۵ درصد                                           | [۲۲، ۲۰، ۱۸]     |
| زیست محیطی    | فاصله از مناطق حفاظت شده       | حداقل ۲۰۰۰ متر                                           | [۲۲، ۲۱]         |
|               | فاصله از مناطق آبی             | حداقل ۵۰۰ متر                                            | [۲۲، ۲۰، ۱۸]     |
|               | فاصله از جنگل‌ها               | حداقل ۲۰۰ متر                                            | [۱۶، ۱۷]         |
|               | فاصله از گسل‌های اصلی و فرعی   | حداقل ۱۰۰۰ متر                                           | [۲۲، ۲۰، ۱۸]     |
|               | فاصله از گسل‌های معکوس         | حداقل ۲۰۰۰ متر                                           | [۲۰، ۱۹]         |
|               | فاصله از مناطق تاریخی          | حداقل ۱۰۰۰ متر                                           | [۲۲، ۱۸]         |
|               | فاصله از مسیرهای عبور سیلاب    | حداقل ۵۰۰ متر                                            | [۲۲، ۲۰، ۱۸]     |
|               | فاصله از باغستان‌ها            | حداقل ۵۰ متر                                             | [۲۳، ۲۱، ۱۹، ۱۷] |
|               | فاصله از خطوط انتقال نفت و گاز | حداقل ۵۰۰ متر                                            | [۱۶، ۲۲]         |
|               | فاصله از خطوط مخابرات          | حداقل ۵۰۰ متر                                            | [۲۲، ۲۰، ۱۸]     |
|               | فاصله از مناطق صنعتی           | حداقل ۲۵۰ متر                                            | [۱۶، ۱۷]         |

اطلاعات دبی ایستگاه‌های هیدرومتری از سازمان منابع آب منطقه‌ای استان کردستان [۲۴] و اطلاعات رودخانه‌های استان و حوزه‌های آبریز آنها از شرکت سازمان ملی نقشه-برداری کشور [۲۵]، تهیه شده‌اند.

استان کردستان در چند حوزه آبریز اصلی مطابق با شکل (۲) قرار گرفته است. در این شکل موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری که دارای داده‌های بلند مدت می‌باشند نیز نشان داده شده است.



شکل ۲- حوزه‌های آبریز استان کردستان و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری موجود [۱۴]

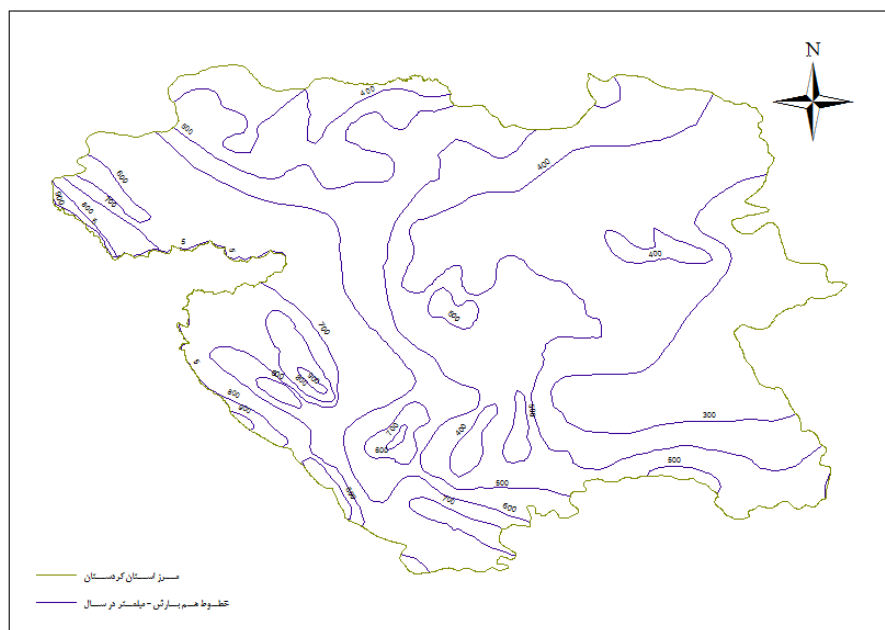
لازم به ذکر است که محدوده توان در این نوع از سیستم‌ها حتماً باید بیشتر از ۱۰ کیلووات باشد تا صرفه اقتصادی لازم را داشته باشند. در ضمن جهت جلوگیری از احداث سد و یا آبراهه با هزینه‌های زیاد، توان باید از ۳۰ مگاوات کمتر باشد [۲۳]. این نیروگاه‌ها، نباید در مناطقی احداث گردند که به لحاظ قانونی و یا زیست محیطی و... دارای محدودیت‌هایی هستند. جهت جلوگیری از افزایش غیر قابل قبول هزینه‌های ساخت جاده‌های ارتباطی و خطوط انتقال برق نیز، این نیروگاه‌ها بایستی در محدوده معقولی از خطوط ارتباطی و خطوط انتقال برق باشند و در نهایت به منظور کاهش هزینه-های انتقال برق به مراکز جمعیتی، این نیروگاه‌ها باید در محدوده مناسبی از مراکز جمعیتی احداث گردند.

## ۵- ارزیابی میزان انرژی برق آبی کوچک قابل استحصال از رودخانه‌های استان کردستان

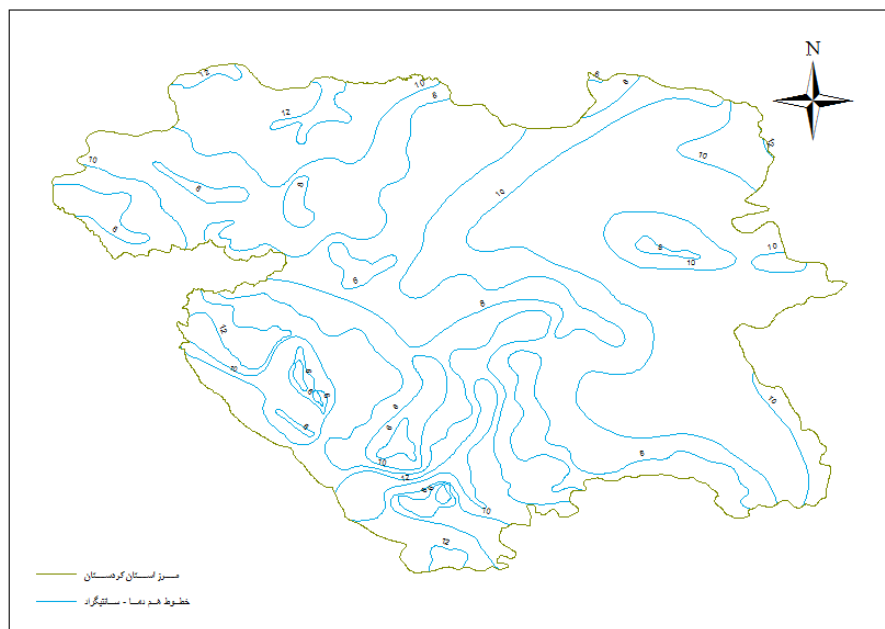
اطلاعات مورد نیاز این تحقیق از سازمان‌های ذی‌ربط در استان و کشور تهیه شده است. به عنوان نمونه،

با توجه به تعداد نسبتاً کم ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه، (خصوصاً در برخی حوزه‌ها) و لزوم دستیابی به اطلاعات دبی در کل استان، لذا سعی شده است تا با اعمال معادله (۱) در کل استان، اطلاعات مناطق فاقد داده، برونمایی شود. بدین منظور، با توجه به مقادیر

Q, A, P و T در ایستگاه‌های با دبی معلوم، توان‌های a, b, c و d محاسبه گردیده. با تعمیم این مقادیر (با لحاظ کردن شرایط جغرافیای رودها و نقشه‌های همبارش و هم‌دما) به کل استان، اطلاعات دبی برای کل استان بدست آمده است.



شکل ۳- نقشه خطوط هم بارش در استان کردستان [۲۵]



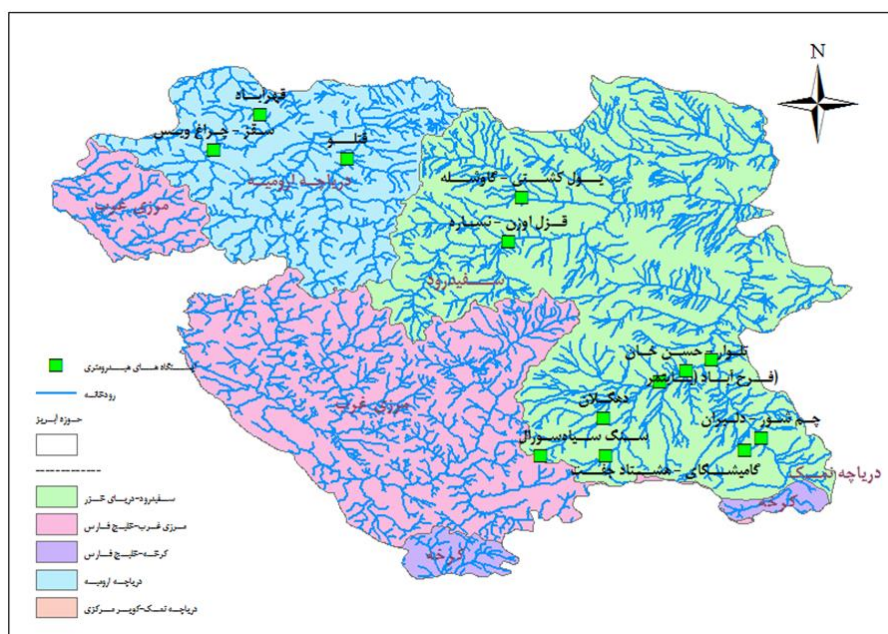
شکل ۴- نقشه خطوط هم دما در استان کردستان [۲۵]

به کمک نرم‌افزار ArcGIS، با ورود داده‌های DEM هر حوزه و لایه خطی رودخانه به نرم‌افزار و انجام اصلاحاتی جهت تطابق لایه رودخانه و DEM، نقطه خروجی رودخانه در حوزه مشخص شده و لایه محدوده‌ای حوزه آبریز تعیین

می‌گردد. با تعیین این لایه و نیز با استفاده از نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما (شکل‌های ۳ و ۴)، متوسط دما و بارش در محدوده هر حوزه آبریز محاسبه می‌شود.

مشخص می‌کند. مساحت هر حوزه (A) نیز تعیین می‌گردیده است. در جدول (۳) نتیجه این محاسبات نشان داده شده است.

شکل (۵) نشان‌دهنده نقشه رودخانه‌ها و آبراهه‌های استان و حوزه‌های آبریز آنهاست. شکل (۶) نیز محدوده حوزه‌های آبریز هر ایستگاه حاصل از نرم‌افزار ArcGIS را



شکل ۵- نقشه رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و حوزه‌های آبریز در استان کردستان

$$Q = e^{12.501} \times A^{0.048} \times P^{-3.235} \times T^{0.115} \quad (4)$$

لازم به ذکر است در تهیه نقشه نهایی، حوزه‌های اصلی و بزرگتر مدنظر قرار گرفته و از برخی حوزه‌های کوچکتر بدلیل دبی کم آن‌ها و این نکته که این حوزه‌های کوچک، ابتدای حوزه‌های آبریز بزرگتر بوده، صرف‌نظر شده است. در نهایت شش حوزه مطابق با شکل (۷) مدنظر قرار گرفته است.

با اعمال رابطه (۱) در هر حوزه و برازش مناسب، متوسط توان‌های a, b, c و d را در این رابطه محاسبه شده است و در جدول (۲) قابل رویت می‌باشند.

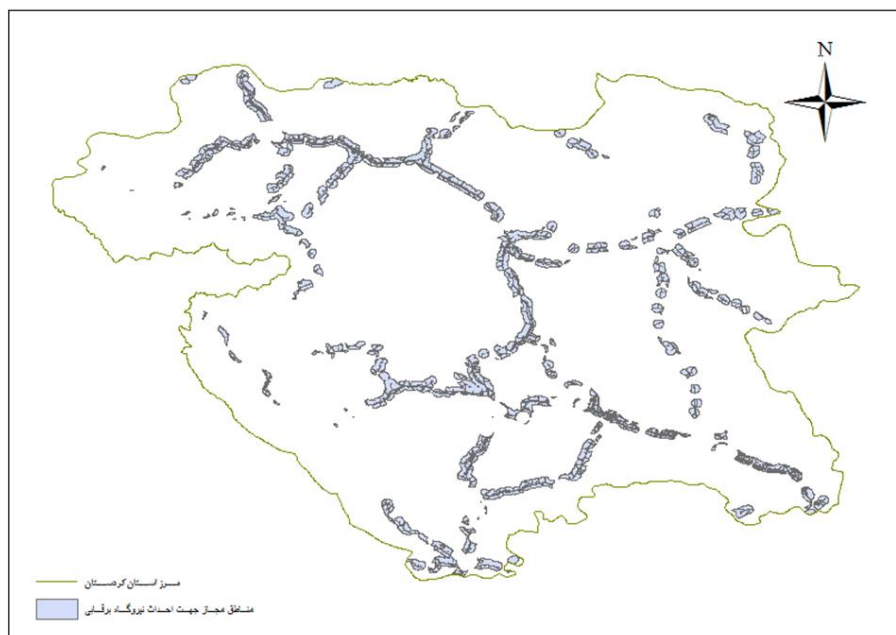
|                                                                        |         |          |         |
|------------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------|
| جدول ۲- برآورد متوسط ضرایب a, b, c و d در فرمول (۱) برای استان کردستان |         |          |         |
| a=۱۲/۵۰۱                                                               | b=۰/۰۴۸ | c=-۳/۲۳۵ | d=۰/۱۱۵ |

بنابراین رابطه (۱) به رابطه (۲) تبدیل شده و در ادامه مبنای محاسبه دبی خروجی هر حوزه قرار می‌گیرد.

جدول ۳- مشخصات حوزه‌های آبریز ایستگاه‌های استان کردستان [۲۶]

| نام ایستگاه | نام رودخانه | دبی سالیانه (m <sup>3</sup> /s) | مساحت حوزه آبریز (km <sup>2</sup> ) | متوسط دما در حوزه آبریز (F) | متوسط بارندگی سالیانه در حوزه آبریز (mm) |
|-------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
| چراغ ویس    | سقز         | ۲/۷۰                            | ۳۵۶/۳۲                              | ۴۶/۹                        | ۳۹۹/۶                                    |
| قهر آباد    | آلتون       | ۱/۷۸                            | ۱۴۴/۲۳                              | ۵۱/۰                        | ۲۸۹/۳                                    |
| قتلو        | خورخوره     | ۲/۵۱                            | ۱۲۱۷/۲۹                             | ۴۵/۴                        | ۳۹۴/۳                                    |
| گاوشله      | یول کشتی    | ۳/۸۷                            | ۸۲۲/۲۲                              | ۴۵/۵                        | ۳۲۷/۴                                    |
| نساره       | فزل اوزن    | ۲/۹۹                            | ۱۶۶۰/۴۴                             | ۴۵/۹                        | ۳۸۹/۹                                    |
| دهگلان      | تلوار       | ۲/۹۶                            | ۲۱۸/۸۵                              | ۴۶/۰                        | ۴۲۸/۲                                    |
| سنگ سیاه    | تلوار       | ۲/۸۲                            | ۹۶/۴۲                               | ۴۵/۸                        | ۴۶۳/۵                                    |
| فرح آباد    | تلوار       | ۳/۰۵                            | ۱۷۳۷/۵۷                             | ۴۷/۳                        | ۴۱۳/۶                                    |
| هشتادجفت    | کامیشگای    | ۳/۰۱                            | ۷۸/۶۶                               | ۴۵/۶                        | ۴۱۴/۸                                    |
| دلبران      | چم شور      | ۲/۶۷                            | ۶۲۰/۱                               | ۴۸/۵                        | ۴۵۰/۴                                    |
| حسن خان     | تلوار       | ۲/۹۱                            | ۲۴۶۳/۶۸                             | ۴۷/۸                        | ۴۰۶/۹                                    |
| شادی آباد   | چم شور      | ۲/۹۱                            | ۱۵۲۹/۱۴                             | ۴۸/۸                        | ۴۰۹/۵                                    |





شکل ۹- مناطق مجاز در استان کردستان جهت احداث نیروگاه برق آبی کوچک (نقشه محدودیت)

## ۶- تلفیق داده‌ها

### ۶-۱- نقشه محدودیت

روش AHP وزن دهی گردد و سپس با تلفیق لایه‌ها، مناطق مستعد و مناسب انتخاب شدند.

### ۶-۲- نقشه نهایی

هدف از تلفیق نقشه‌ها، تعیین مکان‌هایی با مناسب‌ترین برای احداث نیروگاه می‌باشد. نقشه خروجی حاصل از تلفیق نقشه‌ها به گونه‌ای تهیه شده است که مقدار هر واحد مکانی بر روی آن، نشان دهنده میزان مناسب بودن مکان مربوطه برای احداث نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک، با در نظر گرفتن کلیه فاکتورهای موثر است. از بین تمامی مدل‌های معمول تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، مدل فازی، با توجه به قابلیت‌های این مدل در بین دیگر مدل‌ها، جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی ساخته شده، انتخاب گردید. روش منطق فازی همواره برای تلفیق داده‌ها با لایه‌های متعدد در پروژه‌های اجرایی و تحقیقاتی مختلفی به کار گرفته شده است.

پس از تهیه نقشه‌های فاکتور فازی و نقشه محدودیت، تلفیق این نقشه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی انجام می‌گیرد. انتخاب عملگرهای فازی مناسب جهت تلفیق لایه‌های مختلف با توجه به ارتباط و برهم کنش عوامل مربوط به آن لایه‌ها همواره کار دشواری بوده است. انتخاب عملگر فازی وابستگی زیادی به نوع داده‌های مکانی که با یکدیگر تلفیق می‌شوند، دارد. معمولاً نمی‌توان کلیه لایه‌های مورد نظر را تنها با یک نوع عملگر تلفیق نمود. در اغلب موارد

نقشه محدودیت که نشان دهنده مکان‌های ممنوعه برای ساخت و ساز در منطقه مورد مطالعه است (مطابق قوانین و آئین نامه‌های ملی و محلی یا بین‌المللی)، از تلفیق معیارهای ذکر شده در جدول ۱ به روش بولین با ضرایب یکسان بدست آمده است (شکل ۹).

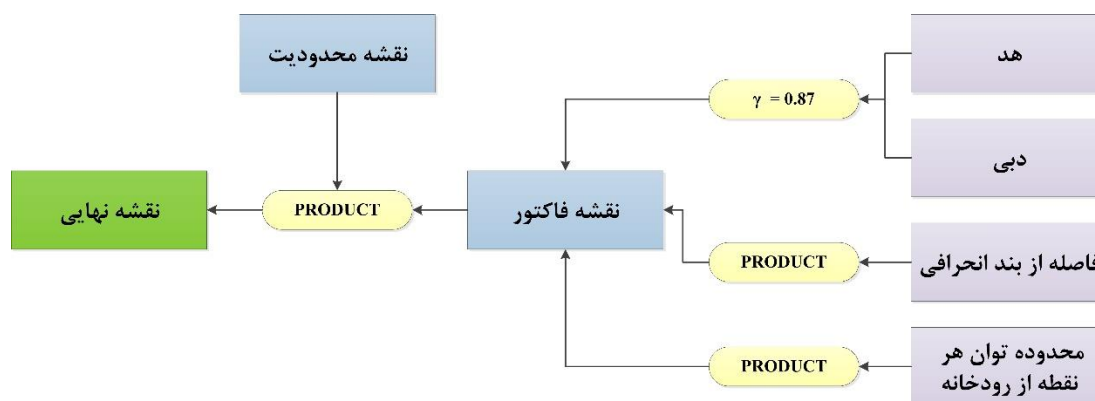
در کل از حدود ۲۹۱۳۶ کیلومتر مربع مساحت استان کردستان، حدود ۲۵۹۳۱ کیلومتر مربع به لحاظ مسائل یاد شده در نقشه محدودیت (شکل ۹)، غیر قابل استفاده جهت احداث نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک تشخیص داده شده است. این مقدار برابر ۸۹٪ از کل مساحت استان کردستان را تشکیل می‌دهد.

در نقشه محدودیت ترسیم شده، مناطق آبی رنگ مناطق هستند که مشکل زیست محیطی و فنی اولیه جهت احداث مزارع بادی را ندارند و مناطق حذف شده که به رنگ سفید در آمده‌اند، مکان‌های ممنوعه برای ساخت و ساز را نمایش می‌دهند (شکل ۹).

مناطق باقی مانده از اهمیت یکسانی به منظور احداث نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک برخوردار نیستند و برخی مناطق مناسب‌تر از مناطق دیگر هستند. لذا در بخش بعد با استفاده از منطق فازی و با در نظر گرفتن لایه‌هایی که در ادامه تشریح می‌شوند، ابتدا هر لایه فازی گردد و از

لازم است تلفیق داده‌ها با استفاده از چندین عملگر به صورت جداگانه و یا ترکیبی از عملگرها که بسته به خصوصیات و ماهیت لایه‌ها انتخاب می‌شوند، انجام گردد. روش فازی نسبت به روش‌های دیگر از انعطاف‌پذیری بیشتری در ترکیب نقشه‌های فاکتور برخوردار است. معمولاً جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در روش فازی به جای استفاده از یک عملگر، شبکه‌های استنتاج فازی با استفاده از عملگرهای مختلف ایجاد می‌شود. در این تحقیق براساس منطق‌های متفاوت، شبکه‌های استنتاجی مختلفی طراحی شده است. و در نهایت، شبکه استنتاج فازی با استفاده از عملگرهای نشان داده شده در شکل ۱۰ جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی انتخاب گردید. در شبکه‌های استنتاجی طراحی شده به جای اینکه کلیه نقشه‌ها در یک مرحله تلفیق شوند، معیارها براساس دانش

کارشناسی، ماهیت و نقش هر یک از آنها در تعیین مکان و ارتباط آنها با یکدیگر، کلاس بندی شده و لایه‌های اطلاعاتی مربوطه در مراحل مختلف تلفیق گردیدند. بدین صورت که یکبار با استفاده از جدول ۱، نقشه محدودیت بدست آمد که این نقشه بیانگر نقاطی هست که امکان احداث نیروگاه برق‌آبی مقیاس کوچک در آنها وجود ندارد. در نقشه محدودیت، نمی‌توان بیان کرد که در مناطق باقیمانده، کدام مکان جهت احداث نیروگاه برق‌آبی، مناسب‌تر است. لذا نقشه فاکتور فازی تهیه می‌شود تا این مسأله اصلاح شود و مکان‌ها از لحاظ ارزشی، وزن داده شوند و بتوان آنها را با یکدیگر مقایسه کرد. در نهایت نیز نقشه نهایی با ترکیب نقشه فاکتور فازی و نقشه محدودیت بدست می‌آید که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- شبکه استنتاجی طراحی شده برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

جدول ۴- وزن دهی به فاکتور فازی در AHP

| محدوده توان | فاصله از بند انحرافی | دبی | هد |                      |
|-------------|----------------------|-----|----|----------------------|
| ۶           | ۵                    | ۳   | ۱  | هد                   |
| ۴           | ۳                    | ۱   |    | دبی                  |
| ۳           | ۱                    |     |    | فاصله از بند انحرافی |
| ۱           |                      |     |    | محدوده توان          |

دیدگاه‌های گروه کارشناسی جمع‌آوری و میانگین حسابی و هندسی معیارها محاسبه گردید و پس از بررسی‌های تعیین درجه اهمیت نسبی معیارها و با در نظر گرفتن ضریب ناسازگاری  $C.I.$ <sup>۱</sup>، جدول (۵) تهیه گردید. در این روش ضریب ناسازگاری برابر  $0/۱۳۸۲۱۷$  بدست آمده است که بسیار مناسب می‌باشد (این مقدار باید کوچکتر از  $0/۱۵$  باشد [۲۷، ۲۸، ۲۹]).

لازم به ذکر است که وزن لایه‌های مختلف فازی در هنگام تلفیق با استفاده از روش AHP و توسط نرم افزار Expert Choise مطابق جدول (۴) تعیین شده‌اند. برای رسیدن به جدول (۴)، ۲۰ پرسش‌نامه تهیه شد و از گروهی کارشناس، شامل استادان دانشگاه، کارشناسان و صاحب‌نظران خواسته شد به طور جداگانه این پرسشنامه‌ها را که در برگیرنده معیارهای حاصل از بررسی ادبیات تحقیق بودند، پر کنند و با توجه به تجارب، دانش و اندوخته‌های علمی، پیشنهادهای خود را ارائه دهند. سپس

<sup>۱</sup> Inconsistency Coefficient

با مشخص شدن وزن هر معیار و با توجه به شبکه استنتاج فازی که با استفاده از عملگرهای نشان داده شده در شکل ۱۰ جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی برگزیده شد، نقشه‌ها با یکدیگر تلفیق شده و نقشه نهایی را بوجود آوردند. نتیجه تلفیق نقشه‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

جدول ۵- وزن لایه‌های مختلف فازی

| فاکتور               | وزن فاکتور |
|----------------------|------------|
| هد                   | ۰/۵۹۸۷۶۳   |
| دبی                  | ۰/۲۷۴۲۰۱   |
| فاصله از بند انحرافی | ۰/۱۸۲۰۵۶   |
| محدوده توان          | ۰/۰۶۹۲۳۱   |

شکل (۱۱) نمایانگر مناطق مطلوب، جهت احداث نیروگاه برق‌آبی کوچک می‌باشد. با اعمال کلیه معیارهای موثر در فرآیند مکانیابی نیروگاه‌های برق‌آبی ذکر شده در جدول ۱، نقشه جامع یا همان اطلس انرژی برق‌آبی کوچک در استان کردستان حاصل می‌گردد (شکل ۱۱). مناطق مناسب جهت احداث نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در این نقشه بخوبی مشخص گردیده‌اند و میزان انرژی قابل استحصال از هر نیروگاه نیز برآورد شده است و به صورت دوایری که بزرگی هر دایه توان آن را نشان می‌دهد، در آن نقشه نشان داده شده است.

با توجه به قرارگیری استان کردستان در شش حوزه آبریز اصلی، جهت مقایسه حوزه‌ها با یکدیگر با حروف انگلیسی A تا F حوزه‌ها آبریز اصلی استان کردستان نام‌گذاری شده‌اند (مطابق با شکل (۷)). همانطور که در جدول (۶) ملاحظه می‌گردد حوزه آبریز A با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی در حال حاضر امکان بهره‌برداری از انرژی برق‌آبی مقیاس کوچک از آن وجود ندارد.

در حوزه آبریز B بیشترین میزان بهره‌گیری از انرژی برق‌آبی مقیاس کوچک در آن وجود دارد. در آن حوزه امکان احداث و بهره‌برداری از ۱۲۲۴ نیروگاه مقیاس کوچک وجود دارد. میانگین توان انرژی قابل استحصال از آن حوزه آبریز حدود ۲۰۰ مگاوات برآورد می‌گردد.

در حوزه آبریز C که چهارمین حوزه از لحاظ پتانسیل (با امکان احداث ۷۵ مگاوات) می‌باشد، امکان راه‌اندازی ۴۶۳ نیروگاه وجود دارد.

در حوزه آبریز D، که کوچکترین حوزه آبریز از حیث انرژی قابل استحصال از آن می‌باشد، تنها امکان نصب و راه‌اندازی ۲۱۰ نیروگاه با توان کل ۵۵ مگاوات وجود دارد. در حوزه آبریز E، که بیشترین پتانسیل را بعد از حوزه آبریز B دارا می‌باشد، امکان احداث ۱۰۹۷ نیروگاه و با مجموع توان ۱۰۳ مگاوات در آن وجود دارد.

در حوزه آبریز F نیز ۴۶۱ نیروگاه برق‌آبی مقیاس کوچک قابل نصب و راه‌اندازی می‌باشد و انرژی قابل استحصال از آن نیروگاه‌ها حدود ۶۰ مگاوات می‌باشد.

جدول (۶) نتایج حاصل در این ارزیابی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مجموع امکان احداث ۳۴۵۵ نیروگاه برق‌آبی کوچک رودخانه‌ای با میانگین توان ۱۶۰ کیلووات در استان کردستان وجود دارد. با توجه به محاسبات انجام پذیرفته، پتانسیل احداث نیروگاه برق‌آبی کوچک در استان در مجموع در حدود ۵۰۰ مگاوات خواهد بود.

جدول ۶- میزان پتانسیل انرژی برق‌آبی مقیاس کوچک در حوزه‌های آبریز اصلی استان کردستان

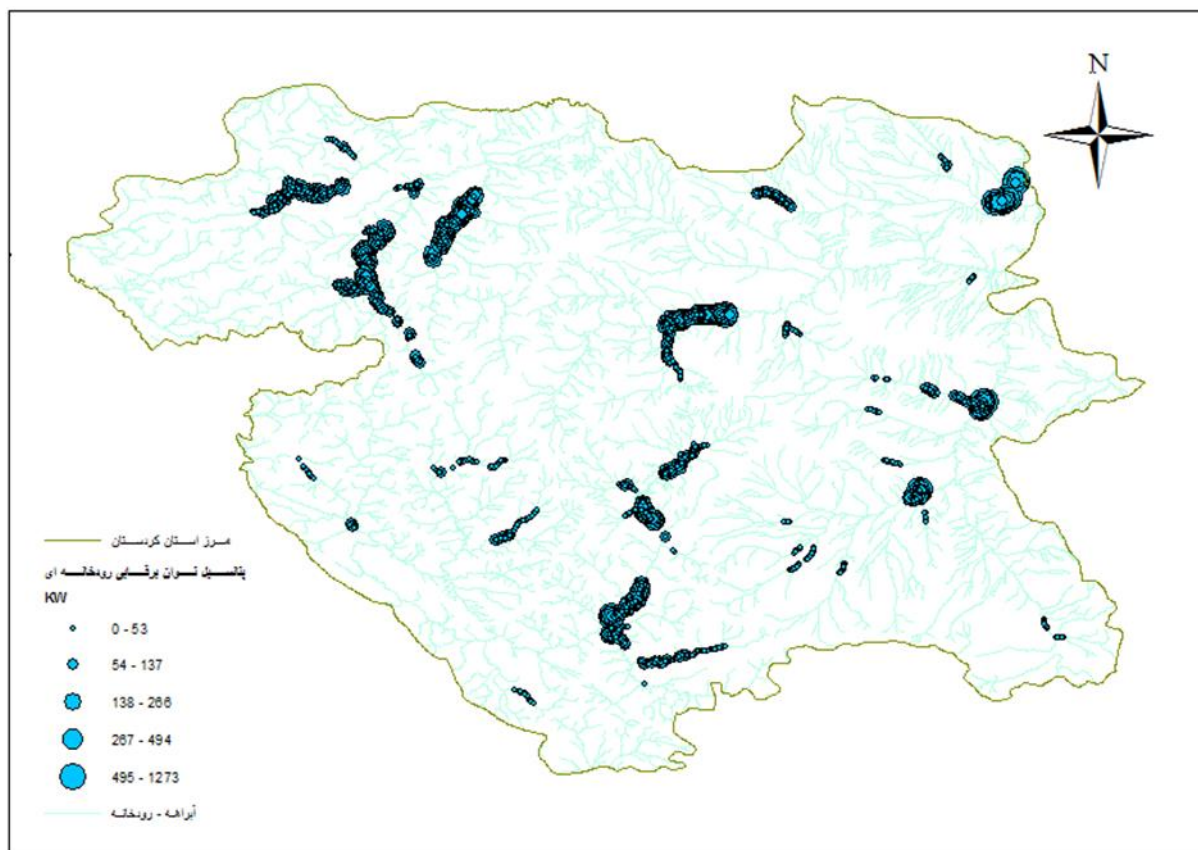
| نام حوزه | تعداد نیروگاه | توان (MW) |
|----------|---------------|-----------|
| A        | .             | .         |
| B        | ۱۲۲۴          | ۱۹۹/۷۱۸   |
| C        | ۴۶۳           | ۷۵/۲۶۲    |
| D        | ۲۱۰           | ۵۴/۴۱۲    |
| E        | ۱۰۹۷          | ۱۰۲/۵۹۱   |
| F        | ۴۶۱           | ۵۹/۶۱۳    |
| جمع      | ۳۴۵۵          | ۴۹۱/۵۹۶   |

با مقایسه نیروگاه حرارتی این استان (نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج)، با ظرفیت ۵۰۰ مگاواتی انرژی قابل استحصال از نیروگاه‌های برق‌آبی مقیاس کوچک استان کردستان ملاحظه می‌شود که در نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج که در عمده سال ظرفیت عملی آن ۵۰۰ مگاوات لحاظ می‌گردد، با مصرف حدود ۷۰۰ میلیون مترمکعب گاز طبیعی و حدود ۲۵۰ میلیون لیتر گازوئیل، برق مورد نیاز مشترکین در این استان را تأمین می‌شود [۲۶]. با مقایسه نتایج این تحقیق با نیروگاه فسیلی مذکور، می‌توان دریافت که در صورت احداث این قبیل طرح‌ها در محدوده استان کردستان، حدود ۳۸۰۰ میلیارد ریال فقط در حوزه مصرف سوخت، صرفه‌جویی خواهد شد.

همچنین در نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج (در محدوده استان)، به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق، ۴۹۳ گرم دی اکسید کربن تولید می‌شود [۳۰]. بنابراین در صورت احداث این قبیل طرح‌ها در محدوده استان کردستان، می‌توان حدود ۲ میلیون تن از میزان انتشار دی اکسید کربن کاهش داد.

با توجه به بعد اقتصادی و زیست محیطی استفاده از انرژی برق آبی کوچک، احداث این قبیل نیروگاه‌ها نه تنها

در استان کردستان امری واجب و ضروری است، بلکه می‌بایست با انجام مطالعات دقیق در دیگر نقاط کشور نیز از مزایای این قبیل نیروگاه‌ها بهره جست تا علاوه بر تأمین نیاز انرژی کشور، امنیت انرژی در سطح منطقه و کشور افزایش پیدا کرده و سبد انرژی نیز متنوع گردد. از سوی دیگر مشکلات و هزینه‌های ناشی از انتقال انرژی به استان، هزینه‌های اجتماعی و آلودگی‌های زیست محیطی استفاده از منابع فسیلی در این استان نیز کاهش یابد.



شکل ۱۱- نقشه ارزیابی توان برق آبی کوچک رودخانه های استان کردستان شکل واضح شود دایره‌ها

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق ضمن شناسایی پارامترهای مهم در مکان‌یابی نیروگاه‌های برق آبی مقیاس کوچک، نقش و میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل نیز مشخص گردیده است و براساس نقش و تأثیر متفاوت فاکتورهای مختلف، و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های متعددی از استان کردستان واقع در این باره تهیه گردیدند. در این تحقیق شش حوزه آبریز اصلی از اراضی استان کردستان جهت احداث نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک مناسب تشخیص داده شده‌اند. میزان انرژی قابل استحصال

از نیروگاه‌های برق آبی مقیاس کوچک استان کردستان با در نظر گرفتن کلیه معیارهای یاد شده و رعایت فواصل مناسب مابین نیروگاه‌ها، حدود ۵۰۰ مگاوات برآورد شد. با مقایسه نیروگاه حرارتی این استان (نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج) با ظرفیت ۵۰۰ مگاواتی انرژی قابل استحصال از نیروگاه‌های برق آبی مقیاس کوچک استان کردستان ملاحظه می‌شود که در نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج که در عمده سال ظرفیت عملی آن ۵۰۰ مگاوات لحاظ می‌گردد، با مصرف حدود ۷۰۰ میلیون مترمکعب گاز طبیعی و حدود ۲۵۰ میلیون لیتر گازوئیل، برق مورد نیاز مشترکین در این استان را تأمین می‌شود [۳۱].

با توجه به بعد اقتصادی و زیست محیطی استفاده از انرژی برق آبی کوچک، احداث این قبیل نیروگاه‌ها نه تنها در استان کردستان امری واجب و ضروری است، بلکه می‌بایست با انجام مطالعات دقیق در دیگر نقاط کشور نیز از مزایای این قبیل نیروگاه‌ها بهره جست تا علاوه بر تأمین نیاز انرژی کشور، امنیت انرژی در سطح منطقه و کشور افزایش پیدا کرده و سید انرژی نیز متنوع گردد. از سوی دیگر مشکلات و هزینه‌های ناشی از انتقال انرژی به استان، هزینه‌های اجتماعی و آلودگی‌های زیست محیطی استفاده از منابع فسیلی در این استان نیز کاهش یابد.

مقایسه نتایج این تحقیق با نیروگاه فسیلی مذکور، می‌توان دریافت که در صورت احداث این قبیل طرح‌ها در محدوده استان کردستان، حدود ۳۸۰۰ میلیارد ریال فقط در حوزه مصرف سوخت، صرفه‌جویی خواهد شد.

همچنین در نیروگاه سیکل ترکیبی سنندج (در محدوده استان)، به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق، ۴۹۳ گرم دی اکسید کربن تولید می‌شود [۳۰]. بنابراین در صورت احداث این قبیل طرح‌ها در محدوده استان کردستان، می‌توان حدود ۲ میلیون تن از میزان انتشار دی اکسید کربن کاست.

## مراجع

- [1] Hejr A., Hydro Energy, Energy Economy in Iran, <http://www.eeii.ir>, [Accessed date Dec. 2016].
- [2] Clover I., Neidlein H .C, Iran Reveals 5 GW Plans for Solar and Wind, Asre Energy, <http://www.asreenergy.ir>, [Accessed date Sep. 2016].
- [3] Rau.J.Wooten David, C. (1980)."Environmental Impact Analysis Handbook", McGraw Hill.
- [4] The international energy agency.2013, "Key World Energy Statistics "Prepared for the 9 rue de la Federation, 75739 Paris Cedex 15, France.
- [5] B. C. Kusre, D. C. Baruah, P. K. Bordoloi, S. C. Patra, Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India), Applied Energy, Vol. 87, No. 1, pp. 298-309, 1/08/, 2010.
- [6] S. Dudhani, A. K. Sinha, S. S. Inamdar, Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India, Energy Policy, Vol. 34, No. 17, pp. 3195-3205, 28/07/, 2006.
- [7] P. Kosa, T. Kulworawanichpong, R. Srivoramas, A. Chinkulkijniwat, S. Horpibulsuk, N. Teaumroong, The potential micro-hydropower projects in Nakhon Ratchasima province, Thailand, Renewable Energy, Vol. 36, No. 3, pp. 1133-1137, 14/10/, 2010.
- [8] O. S. Ohunakin, S. J. Ojolo, O. O. Ajayi, Small hydropower (SHP) development in Nigeria: An assessment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 4, pp. 2006-2013, 14/01/, 2011.
- [9] S. Kucukali, K. Baris, Assessment of small hydropower (SHP) development in Turkey: Laws, regulations and EU policy perspective, Energy Policy, Vol. 37, No. 10, pp. 3872-3879, 26/06/, 2009.
- [10] L. Kosnik, The potential for small scale hydropower development in the US, Energy Policy, Vol. 38, No. 10, pp. 5512-5519, 1/06/, 2010.
- [11] D. Hall, K. Reeves, J. Brizzee, R. Lee, G. Carroll, G. Sommers, Feasibility assessment of the water energy resources of the United States for new low power and small hydro classes of hydroelectric plants, Idaho National Laboratory, published January 2006.
- [12] D. Hall, S. Cherry, K. Reeves, R. Lee, G. Carroll, G. Sommers, K. Verdin, Water energy resources of the United States with emphasis on low head/ low power resources, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Published by April 2004.
- [13] Wind & Hydropower Technologies Program Harnessing America's abundant natural resources for clean power generation, By the National Renewable Energy Laboratory, a DOE National Laboratory, DOE/GO-102004-1981, July 2004.
- [14] Kurdistan Government, 2015, Kurdistan province at a glance, Governmnet of Kurdistan, <http://www.ostan-kd.ir>, [Accessed date Dec. 2016].
- [15] SUNA, National wind energy atlas of Iran, Renewable Energy Organization of Iran, [www.suna.org.ir](http://www.suna.org.ir) [Accessed date May. 2014].
- [16] Younes Noorollahi, Seyed Mohammad Mahdi Mousavi, Hossein Yousefi, GIS-Based Spatial Planning of Wind Energy Development and Resources Assesment, Sustainable Energy Technologies and Assessments 13 (2016) 38–50.

- [17] Hossein Yousefi, Seyed Mohammad Mahdi Mousavi, Younes Noorollahi, GIS-Based Wind Energy Potential and Resources Assessment and Wind Farm Selection in Damghan County- Northeast- Iran, Town & Country Planning, Thesis, University of Tehran, Faculty of New Science and Technology, Autumn & Winter 2016-2017.
- [18] Noorollahi Y., Yousefi H., Mohammadi M., Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS, Sustainable Energy Technologies and Assessments 13 (2016) 38–50.
- [19] Satkin M., Noorollahi Y., Abbaspour M., Yousefi H., Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran, Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014).
- [20] Yousefi H., Noorollahi Y., Ehara S., Itoi R., Yousefi A., Fujimitsua Y., Nishijimaa J., Sasaki K., Developing the Geothermal Resources Map of Iran, Geothermics 39, (2010) pp 140–151.
- [21] Noorollahi Y., Yousefi H., Mohammadi M., Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS, Sustainable Energy Technologies and Assessments 13 (2016) 38–50.
- [22] Satkin M., Noorollahi Y., Abbaspour M., Yousefi H., Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran, Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014).
- [23] D. Hall, K. Reeves, J. Brizzee, R. Lee, G. Carroll, G. Sommers, Feasibility assessment of the water energy resources of the United States for new low power and small hydro classes of hydroelectric plants, Idaho National Laboratory, published January 2006.
- [24] Kurdistan Regional Water Office, 2016, Kurdistan Province Statistics, Kurdistan Regional Water Organization, <http://www.kdrw.ir>, [Accessed date Dec. 2016].
- [25] National Geoscience Database of Iran, geological survey and mineral explorations Office, 2016, Kurdistan Province Statistics, <http://www.ngdir.ir>, [Accessed date Dec. 2016].
- [26] Tavanir, 2013, Iran Energy Balance Report, Ministry of energy, Energy and Electricity Deputy.
- [27] [81] Beheshti Far S., Using fuzzy logic in GIS environment to locate gas plants, Journal of Civil Engineering and Mapping, Faculty of Engineering, Vol. 44, No. 4, (2010) p. 583-595.
- [28] Karam A., Analysis of the Land Suitability for Structure Development in the Northwest Shiraz Using Multi-criteria in the GIS Environment, Geographic Research, No. 54, (2004) pp. 93-106.
- [29] [83] PSC.1999.common power plant siting Criteria .Public service commission of Wisconsin .US department of Energy. <Http://www.PSC.wi.Gov/consumerinfo/brokures/electric>
- [30] Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012.
- [31] Iran Statistic Office, 2013, Kurdistan Province Statistics, Iran Statistic office publishing co.