اولویت‌بندی احداث نیروگاه آبی بر روی خطوط انتقال آب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

محمد محمدی[۱]، مهدی یاسی[۲*]، سعید جمالی[۳]؛ هومن حاجی کندی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۳ تاریخ چاپ: ۱۳۹۹-۰۲-۲۲

چکیده

احداث نیروگاه بر روی خطوط انتقال آب با بهره‌گیری از فشـــار مازاد موجود و جایگزینی پمپ به عنوان توربین(PAT) به جای شیر فشارشکن به دلیل آثار مثبتی از قبیل تجدیدپذیر بودن انرژی برق‌آبی، پراکندگی مناسب خطوط انتقال‌آب در مناطق مختلف وکوتاه بودن زمان ســاخت، مورد توجه قرار گرفته اســت. از طرفی در اولویت‌بندی احداث نیروگاه بر روی خطوط انتقال آب، فاکتورهای مختلفی دخیل هســتند، که نیاز به روشــهای تصمیم‌گیری چندمعیاره دارند. در این تحقیق، خطوط انتقال آب، تحت مدیریت شــرکت آب و فاضــلاب اســتان ایلام، مشتمل بر شش موقعیت با در نظر گرفتن پنج شاخص؛ الکتریسته تولیدی، هزینه احداث، فاصــله از محل مصــرف، فاصــله از جاده اصــلی و ســهولت بهره‌برداری با اســتفاده از روشهای چندمعیاره ازجمله: تحلیل ســلســله مراتبی، تحلیل شــبکه‌ای، ســاده وزنی، ویکور و شــباهت به گزینه ایده‌آل و با آنالیز اقتصادی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. براســاس این نتایج، جایگاه ورودی ایســتگاه شــماره یک ســد ایلام (با ظرفیت تولید ســالیانه ۹۸۲۸۰۰ کیلووات-ساعت، هزینــه احــداث ۱۲۱۸ میلیون ریال، نســـبت فایده به هزینه ۳/۷ و واحد انرژی ۴۰۷ ریال) به عنوان گزینه برتر در تولید انرژی برقابی معرفی شده است.

واژه های کلیدی: خطوط انتقال آب، نیروگاه آبی، PAT، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل هزینه

[۱] دانشجوی دکتری عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی
[۲] دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران
[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی
* نویسنده مسئول: Email: m.yasi@ut.ac.ir

مقدمه

محدودیت استفاده از منابع انرژی، افزایش جمعیت و مصرف انرژی، تلفات شبکه‌های انتقال برق و راندمان کم نیروگاه‌های حرارتی، ضرورت یافتن راهکارهای مناسب در جهت تأمین تقاضا برای انرژی و حفاظت از محیط‌زیست را اجتناب ناپذیر می‌سازد. در این راستا، معرفی روش‌های نوین و اقتصادی در استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر برای تأمین نیازهای حال و آینده مورد توجه است.تولید برق از شبکه‌های انتقال و توزیع آب از موضوعات جدید در مدیریت بهینه سامانه‌های آب‌رسانی است. در این شبکه‌ها، به‌منظور جلوگیری از فشار اضافی وارد بر تجهیزات پایین‌دست،اغلب از شیرهای کنترل فشار استفاده می‌شود. با وجود بارآبی اضافی (فشار مازاد آب) می‌توان از "توربین" یا "پمپ به‌عنوان توربین" (Pump As Turbine: PAT) از پتانسیل‌های موجود در تولید برق استفاده کرد. آثار مثبت احداث نیروگاه برروی خطوط انتقال آب عبارتند از: تجدیدپذیر بودن انرژی برق‌آبی، بهره‌برداری از ظرفیت‌های کمتر جریان آب، پراکندگی مناسب شبکه‌های انتقال آب در مناطق مختلف، پایین بودن قیمت تمام‌شده انرژی، کوتاهی زمان ساخت، سادگی فنّاوری و قابلیت سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و کاهش مشکلات اجتماعی و محیط‌زیستی از طریق کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای(خالصی دوست و محمدیان، ۱۳۹۲). در این ارتباط، شناسایی نقاط مناسب احداث نیروگاه و تعیین میزان بهینه انرژی تولیدی ضروری است. اولویت‌بندی احداث نیروگاه آبی بر روی خطوط انتقال آب فاکتورهای مختلفی از قبیل الکتریسیته تولیدی، هزینه احداث، نزدیکی به محل مصرف انرژی و سهولت بهره‌برداری را در بردارد؛ که نیاز به تصمیم‌گیری چندمعیاره دارد. ابریشمچی و همکاران (۲۰۰۵) روش تصمیم‌گیری چندمعیاره را درتأمین آب شهری با توجه به معیارهای هزینه، کیفیت آب، فاکتور بهداشتی، انعطاف‌پذیری، کنترل تقاضای آب، ارزیابی دوره‌های کم آبی، و فاکتور سیاسی-اجتماعی، مورد استفاده قراردادند. بشیرزاده تبریزی و همکاران (۱۳۸۸)، مناطق مستعد به‌کارگیری نیروگاه‌های آبی کوچک بر روی خطوط انتقال آب بجنورد، زاهدان و بیرجند را با توجه به انرژی در دسترس، درآمدکل، سرمایه‌گذاری اولیه، نسبت سود به هزینه و سایر پارامترهای اقتصادی بررسی کردند. ادیکاری و همکاران درسال ۲۰۰۶ انتخاب مکان مناسب نیروگاه آبی کوچک را با استفاده از فرایندهای بهینه‌سازی چندمعیاره، با در نظرگرفتن معیارهای سیاسی-اجتماعی، تکنولوژیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی و با استفاده از روش TOPSIS مورد ارزیابی قراردادند. کوکوکالی (۲۰۱۱) با مطالعه موردی بر روی خطوط انتقال و شبکه توزیع آب ادرمیت در ترکیه، پتانسیل‌های تولید انرژی را بررسی نموده و نتیجه گرفت که ۵۵۹ کیلووات برق با سود سالیانه ۵۶۰۱۱۸ یورو و دوره بازگشت سرمایه دو ساله از خطوط و شبکه توزیع آب ادرمیت ترکیه قابل‌تامین است. دمیرتاش (۲۰۱۳) به ارزیابی بهترین تکنولوژی تامین انرژی تجدیدپذیر برای طرح‌ریزی انرژی پایدار در انرژی‌های باد، خورشیدی، برق‌آبی، زمین گرمایی و زیست‌توده با استفاده از روش سلسله مراتبی (AHP)، فرایند آنالیز شبکه‌ای (ANP) و TOPSIS پرداختند. درینکار و مونکار (۲۰۱۵) عملکرد پروژه‌های نیروگاه برق‌آبی کوچک در ماهاراشترا هندوستان را با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و فرایند سلسله مراتبی (AHP) مورد بررسی قراردادند. در این بررسی تعداد ۱۰ شاخص: ظرفیت نصب، ارتفاع متوسط، دبی متوسط، هزینه انرژی تولیدی، هزینه پروژه، هزینه بهره برداری، هزینه نیروی کار، متوسط توان خروجی، فاکتور ظرفیت بهره‌مندی و نرخ برگشت سرمایه، در عملکرد نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک مورد نظر قرار گرفت. منظور و رحیمی (۱۳۹۴) اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران را با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه بررسی کرده و با در نظر گرفتن معیارهایی مانند هزینه تمام شده، امنیت تأمین منبع ورودی نیروگاه، سرمایه‌گذاری اولیه، حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان پذیر، تنوع بخشی به سیستم عرصه و تأثیرگذاری بر مردم، نتیجه گرفتند که نیروگاه‌های بادی در اولویت اول و سپس نیروگاه‌های برق‌آبی در اولویت قرار دارند. روزبهانی و سحرانی (۱۳۹۵) کاربرد شبیه‌سازهای تصمیم‌گیری چند معیاره در گزینه‌یابی سد و نیروگاه خراسان۱ را بررسی کردند و با در نظر گرفتن معیارهای کمی، کیفی، فنی و اقتصادی را در مدیریت طرح‌های سدسازی تائید نمودند. هیوندونگ و میونگسیک (۲۰۱۷) با ارزیابی سطوح خدمات مدیریت سرمایه در شبکه توزیع آب، با استفاده از AHP پنج سطح خدمات و ۱۵ شاخص را مورد نظر

قراردادند. آشیلون و گیورکا (۲۰۱۸) با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و نرم افزار Super Decision بهترین راه برای بازسازی شبکه توزیع آب شهر گلای – ناپوکا در رومانی را بررسی کردند. در این بررسی، از معیارهایی همچون قطرلوله، طول لوله، زمان اجرا، هزینه و شرایط نصب استفاده شد. رانا و پتل (۲۰۱۸) انتخاب بهترین مکان برای احداث پروژه برق‌آبی کوچک برروی کانال رانولی در هندوستان، با در نظرگرفتن معیارهایی نظیر توان قابل استحصال، فاصله نیروگاه از جاده، فاصله از روستا و فاصله از شبکه توزیع برق، و با استفاده از روش‌های AHP، WPM و TOPSIS را بررسی کردند. ورکوس و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی بهترین مکان نصب نیروگاه برق‌آبی کوچک در قسمتهای مرکزی یونان پرداختند و با استفاده از روش AHP و بابررسی هفت گزینه با در نظر گرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، فنی و زیست محیطی، مکان مناسب نصب نیروگاه را معرفی نمودند. محمدی و همکاران (۱۳۹۷)با شناسایی پتانسیل‌های موجود جهت احداث نیروگاه برروی خطوط آب‌رسانی شهر ایلام در ایران، گزینه استفاده از پمپ به جای توربین (PAT) را از نظر اقتصادی و فنی توصیه نمودند. در این تحقیق پتانسیل‌های موجود برروی شبکه توزیع آب و خطوط آبرسانی به شهر ایلام شناسایی و استفاده از پمپ به عنوان توربین با توربین از نظر اقتصادی مقایسه شد، ولی سایر پارامترهای مؤثر و اولویت بندی احداث در نظر گرفته نشد. بررسی پیشینه مطالعات در طرح‌های نیروگاه‌های برق آبی برروی خطوط انتقال آب در ایران نشان می دهد که تاکنون تحقیقاتی درزمینه استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور اولویت‌بندی احداث نیروگاه بر روی خطوط انتقال آب منتشر نشده است. از طرفی ارزیابی اقتصادی این‌گونه طرح‌ها با درنظر گرفتن هزینه‌ها و منافع محیط‌زیستی و اجتماعی که تنها بخشی از آن‌ها نیز قابل ارزش‌گذاری مستقیم در طول زمان هستند، نیز می‌تواند مکمل ارزیابی به روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده و منجر به انتخاب بهترین مکان احداث نیروگاه در یک پروژه انتقال آب گردد.

مواد و روش تحقیق

معیارهای مکان‌یابی نیروگاه برق‌آبی

معیارهای زیست‌محیطی

از مهم‌ترین فاکتورهای اجرای پروژه‌های انتقال آب و احداث نیروگاه، پارامترهای زیست‌محیطی می‌باشد؛ مسیرهای خطوط انتقال آب باید کمترین آسیب را به جنگل‌ها، مراتع و زیستگاه‌های طبیعی وارد نماید، تا از نظر زیست‌محیطی قابل قبول باشد. نیروگاه‌های برق‌آبی کوچکی که بر روی خطوط انتقال آب احداث می‌گردند، به دلیل ماهیت تجدیدپذیربودن آنها فاقد اثرات نامطلوب زیست‌محیطی می‌باشند (کوکوکالی،۲۰۱۱).

هزینه

از فاکتورهای موثر در اجرای پروژه‌های مختلف انتقال آب و نیروگاه برق‌آبی کوچک، هزینه احداث پروژه می‌باشد. هزینه‌های نیروگاه برق‌آبی بر روی خطوط انتقال آب شامل هزینه احداث ساختمان، خرید و نصب تاسیسات الکتریکی و مکانیکی (از قبیل الکتروپمپ، اینورتور و...)، انتقال انرژی و خرید زمین می‌باشد (متوانی و همکاران، ۲۰۱۳).

خرید زمین

مباحث حقوقی و موانع قانونی در تملک زمین در مسیر احداث خطوط انتقال آب و نیروگاه برق‌آبی کوچک از پارامترهای تأثیرگذار بوده که ضمن طولانی نمودن زمان احداث پروژه، بعضاً ممکن است به شکست پروژه منجر شود.

تولید انرژی

از فاکتورهای مهم احداث نیروگاه برق‌آبی بر روی خطوط انتقال آب، استفاده حداکثری از پتانسیل‌های موجود، استحصال بیشتر انرژی و تولید الکتریسیته بیشتر است. مقدار انرژی قابل‌تولید در خطوط انتقال آب، از رابطه زیر به دست می‌آید (کوگیاس و همکاران، ۲۰۱۴):

$$P = \rho * g * Q * h * \eta \qquad (۱)$$

$$h = z_{\mathrm{u}} - z_{\mathrm{d}} - h_f - \frac{v_{\mathrm{d}}^2}{2g} \qquad (۲)$$

که در آن: P توان تولیدی برحسب kW؛ ρ چگالی آب برحسب $\frac{kg}{m^3}$؛ g شتاب ثقل برحسب $\frac{m}{s^2}$؛ Q بده جریان برحسب $\frac{m^3}{s}$؛ h ارتفاع معادل فشار خالص (بار آبی) برحسب متر، و η راندمان سامانه است. (عباسپور، ۱۳۹۴):

$$E=P*t \qquad (۳)$$

که در آن: E میزان انرژی سالیانه تولیدی برحسب کیلووات-ساعت، P توان تولیدی برحسب کیلووات و t تعداد ساعت کارکرد نیروگاه درسال است. عوامل z_u و z_d: انرژی پتانسیل در نقاط بالادست و پایین دست برحسب متر، v_dسرعت جریان در ورودی PAT برحسب متر بر ثانیه و h_f اتلاف انرژی در مسیر جریان برحسب متر است. راندمان تئوری سامانه (η) برای هنگام استفاده از PAT برابر ۶۰ درصد است (متوانی و همکاران، ۲۰۱۳).

سهولت بهره برداری

تعداد کمتر ایستگاه‌های کاهش فشار و درنتیجه کمتر بودن نیروگاه، علاوه براینکه هزینه‌های پرسنلی و بهره‌برداری سالیانه را کاهش می‌دهد، بهره‌برداری از نیروگاه‌ها را نیز راحت‌تر می‌کند. علاوه بر تعداد نیروگاه، محل قرارگیری و فاصله نیروگاه از دفتر مرکزی شرکت‌های بهره‌بردار نیز از پارامترهای تأثیرگذار است. بعنوان مثال: نیروگاه‌هایی که در مجاورت و یا داخل تأسیسات مخازن و تصفیه خانه‌ها واقع می‌شوند، نیازی به نفرات مازاد برای بهره‌برداری و مراقبت ندارند.

فاصله از محل مصرف

از پارامترهای موثر در احداث نیروگاه‌های برق آبی، نزدیکی به محل مصرف می‌باشد که درکاهش هزینه‌های انتقال، تملک زمین و قیمت تمام شده انرژی تأثیرگذار است.

فاصله از جاده اصلی (سهولت دسترسی)

قرارگرفتن نیروگاه در نزدیکی جاده‌های اصلی یک پارامتر موثر در مکان‌یابی نیروگاه‌ها می‌باشد.

هدف از این تحقیق، اولویت‌بندی احداث نیروگاه آبی بر روی خطوط انتقال آب، با در نظرگرفتن شاخص‌های الکتریسیته تولیدی، فاکتورهای اقتصادی، هزینه ساخت، سهولت بهره‌برداری، فاصله نیروگاه از محل مصرف و فاصله از جاده با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است.

روش‌های مختلف تصمیم‌گیری

در گذشته جهت تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی تاکید اصلی بر روی مدل‌های کلاسیک بهینه‌سازی بوده است، به‌طوری‌که با داشتن یک معیار مشخص یا یک تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گرفتند. در دهه‌های اخیر توجه محققین معطوف به مدل های چندمعیاره برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده گردیده است. در این تصمیم‌گیری‌ها به جای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی، ممکن است از چندین معیار سنجش استفاده گردد. واضح است که این مسائل به دلیل پیچیدگی‌هایی که دارند، توسط تکنیک‌های قبلی به راحتی قابل بررسی نمی‌باشند. لذا، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پاسخگوی چنین مسائلی خواهند بود. این مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته عمده تقسیم می‌گردند (اصغرپور، ۱۳۹۳):

۱- مدلهای چندهدفه: در این مدل‌های تصمیم‌گیری چندین هدف به طور همزمان برای بهینه شدن، مورد توجه قرار می‌گیرند. مقیاس سنجش برای هر هدف ممکن است با مقیاس سنجش برای بقیه اهداف متفاوت باشد.

۲- مدل‌های چندشاخصه: این مدل‌ها به منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین گزینه‌های موجود به کار می روند، تصمیم‌گیری‌های چند شاخصه اغلب در مواردی به کار می‌روند که در مساله‌ای خاص با چند شاخص مختلف از جمله شاخص‌های کمی و کیفی مانند: هزینه، درجه اهمیت، ظرفیت، طول عمر، وجهه ملی و غیره به طور همزمان روبرو بوده و مطلوبیت هدف مساله در نظر گرفتن تمامی این شاخص‌ها به طور همزمان و یافتن گزینه‌ای است که در آن برآیند مطلوبیت این شاخص‌ها، بیشینه گردد. اغلب مسائلی که در محیط عمل با آنها روبرو می‌گردیم مسائل چند شاخصه می‌باشند. مدل‌های چندهدفه به منظور طراحی و مدل‌های چندشاخصه به منظورانتخاب گزینه برتر استفاده می شوند (اصغرپور،۱۳۹۳). از جمله مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه عبارتند از:

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

در این روش، معیارهای کمی و کیفی مورد نظر قرار گرفته؛ و با تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم، گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (ساعتی، ۲۰۱۲). فرآیند مدل‌سازی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) شامل مراحل زیر است.

الف) مدل‌سازی (ترسیم درخت سلسله مراتبی): عناصر تصمیم شامل «شاخص‌های تصمیم‌گیری» و «گزینه‌های تصمیم» می‌باشد. بالاترین سطح، بیانگر هدف اصلی فرایند تصمیم‌گیری است. سطح دوم، نشان دهنده شاخص‌های عمده و اساسی که ممکن است به شاخص‌های فرعی و جزئی‌تر در سطح بعدی شکسته شود، می‌باشد. سطح آخر گزینه‌های تصمیم را ارائه می‌کند (وارگاس، ۲۰۱۰).

ب) قضاوت ترجیحی (مقایسات زوجی): مقایسه بین گزینه‌های مختلف تصمیم، بر اساس اهمیت هر شاخص و با انجام مقایسات زوجی صورت می یابد. برای انجام این کار معمولا از مقایسه گزینه‌ها با شاخص‌های iام نسبت به گزینه‌ها، یا شاخص‌های j ام استفاده می‌شود. این مقایسات با ارزش ترجیحی۱ تا ۹ متغیر می‌باشد که: ۱ (اهمیت برابر)، ۳ (نسبتاً مهم‌تر)، ۵ (مهم‌تر)، ۷ (خیلی مهم‌تر) و ۹ (کاملاً مهم) می‌باشد و اعداد ۲، ۴، ۶ و ۸ ارزش‌های میانی را بین ارزش‌های ترجیحی دارند، مثلا ۸، بیانگر اهمیتی زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ است (ساعتی، ۲۰۰۸).

ج) محاسبات وزن‌های نسبی: محاسبات لازم برای تعیین اولویت هر یک از عناصر تصمیم با استفاده از اطلاعات ماتریس‌های مقایسات زوجی می‌باشد. در این مرحله، مجموع اعداد هر ستون از ماتریس مقایسات زوجی را محاسبه کرده، سپس هر عنصر ستون را بر مجموع اعداد آن ستون تقسیم می‌کنیم. ماتریس جدیدی که بدین صورت بدست می‌آید، «ماتریس مقایسات نرمال شده» نامیده می‌شود. میانگین اعداد هر سطر از ماتریس مقایسات نرمال شده را محاسبه می‌کنیم. این میانگین وزن نسبی عناصر تصمیم با سطرهای ماتریس را ارائه می‌کند.

د) ادغام وزنهای نسبی: به منظور رتبه‌بندی گزینه‌های تصمیم، وزن نسبی هرعنصر را در وزن عناصر بالاتر ضرب کرده تا وزن نهایی آن بدست آید.

ه) سازگاری در قضاوت‌ها: سازگاری در قضاوت‌ها با شاخصی به نام نرخ ناسازگاری بیان می‌شود. نرخ ناسازگاری نشان می‌دهد که تا چه حد می‌توان به اولویت‌های حاصل از مقایسات اعتماد کرد. اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد، سازگاری مقایسات قابل قبول بوده و در غیراین‌صورت مقایسه‌ها باید تجدید نظر شود (قدسی پور، ۱۳۹۵). ساعتی (۱۹۸۰) علاوه بر معرفی روش AHP، نرم افزار Expert Choice را برای اجرای مراحل فوق ارائه نمود (مومنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۰).

روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)

یکی از روشهای پرکاربرد در تصمیمگیری چندمعیاره فرایند تحلیل شبکهای است که در واقع گسترش یافته روش تحلیل سلسله مراتبی میباشد که در سال ۱۹۹۶ توسط ساعتی ارائه شده‌است (عطائی، ۱۳۹۵). در این روش، بعد از مشخص شدن عوامل اصلی و فرعی موثر و دسته‌بندی آن‌ها به همراه تعیین ارتباط درونی آنها از روش گروه اسمی، با هدف اولویت‌بندی فاکتورهای شناسایی شده و تعیین ارزش و وزن هرکدام از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده می‌شود (ونگویون ۱۹۸۱). در این روش، ارتباط درونی و بیرونی معیارهای اصلی و فرعی در نظر گرفته می‌شود که این مسئله نتایج قابل اطمینان‌تری در اولویت‌بندی پارامترهای موثر و رتبه‌بندی طرح‌ها ارائه می‌کند. فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) را می‌توان در چهار مرحله خلاصه کرد (عطایی، ۱۳۹۵):

۱- ساخت مدل و تبدیل مسئله به یک ساختار

۲- تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و تعیین بردارهای اولویت

۳- تشکیل سوپر ماتریس و تبدیل آن به سوپر ماتریس حد: برای دستیابی به اولویت‌های کلی در یک سیستم با تاثیرات متقابل، بردارهای اولویت‌های داخلی (wهای محاسبه شده) در ستون‌های مناسب یک ماتریس وارد می‌شوند. در نتیجه، یک سوپر ماتریس (در واقع یک ماتریس تقسیم‌بندی شده) که هر بخش از این ماتریس ارتباط بین دو خوشه در یک سیستم را نشان می‌دهد، به‌دست می‌آید.

۴- انتخاب گزینه برتر: اگر سوپر ماتریس تشکیل شده در مرحله سوم، کل شبکه را در نظر گرفته باشد، یعنی گزینه‌ها نیز در سوپر ماتریس لحاظ شده باشند، اولویت کلی گزینه‌ها از ستون مربوط به گزینه‌ها در سوپر ماتریس حد نرمالیزه شده، قابل حصول است.

۵- بعد از مشخص شدن نتایج حاصل از اولویت‌بندی پارامترها، رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف ارائه می‌شود.

ساعتی (۲۰۰۸) برای انجام مراحل فوق نرم‌افزار Super Decisions را ارائه نمود (مومنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۰).

روش وزن دهی ساده (SAW)

ساده‌ترین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش در سال ۱۹۸۱ توسط هدانگ و یون ارائه شده است. در این روش که با نام روش ترکیب خطی وزن‌دار نیز شناخته می‌شود، پس از بی‌مقیاس‌کردن ماتریس تصمیم، با استفاده از ضرایب وزنی معیارها، ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزن‌دار به دست آمده و با توجه به این ماتریس، امتیاز هر گزینه محاسبه می‌شود. مراحل روش وزن‌دهی ساده (عطایی، ۱۳۸۹):

۱- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم این روش شامل جدولی است که ستون‌های آن را معیارها یا زیرمعیارها و سطرهای آن را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند. برای بی‌مقیاس‌کردن ماتریس تصمیم در روش Saw اگر معیار مثبت باشد: تک تک اعداد آن ستون را بر ماکزیمم مقدار آن ستون تقسیم می‌کنیم و اگر معیار منفی باشد: مینیمم آن ستون تقسیم بر تک تک اعداد می شود.

۲- تشکیل ماتریس وزن‌دار: در این گام با توجه به وزن‌های محاسبه شده از روشهای دیگر و ضرب کردن آن در ماتریس بی‌وزن، ماتریس وزن‌دار بدست می آید.

۳- انتخاب گزینه برتر: با جمع سطری ماتریس وزن‌ها، امتیاز هر گزینه محاسبه می‌شود. بر اساس آن، گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند، و مناسب ترین گزینه (A*) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$A^* = A_1 | Max \frac{\sum_j w_j r_{ij}}{\sum_j w_j} \qquad (۴)$$

روش ویکور (Vikor)

این روش در سال ۱۹۸۸ توسط اپریکوویک و تزنگ ارایه و در سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ توسعه داده شده است، مراحل انجام این روش به صورت زیر می باشد (عطایی، ۱۳۹۵):

۱- تشکیل ماتریس تصمیم

۲- نرمال‌سازی داده‌ها: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری از فرمول زیر استفاده می‌شود :

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad (۵)$$

که در آن: x_{ij} مقادیر هر معیار برای هر گزینه می‌باشد.

۳- تعیین نقطه ایده‌آل مثبت و منفی: برای هر معیار، بهترین و بدترینِ هریک را در میان همه گزینه‌ها تعیین کرده و به ترتیب f^+ و f^- می‌نامیم. اگر معیار از نوع سودمندی باشد، خواهیم داشت:

$f^+ = \text{Max } f_{ij}$ و $f^- = \text{Min } f_{ij}$

۴- تعیین سودمندی و تاسف: مقدار سودمندی (S) بیانگر فاصله نسبی گزینهi ام از نقطه ایده‌آل و مقدار تأسف R بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری از نقطه ایده‌آل می‌باشد.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} W_J . \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \qquad (۶)$$

$$R_i = \max \left[w_j . \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right] \qquad (۷)$$

۵-محاسبه شاخص ویکور: محاسبه شاخص ویکور (Q) برای هرگزینه به صورت زیر است:

$$Q_i = v \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1 - v) [\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \qquad (۸)$$

که در آن: $R^* = \text{Max } R_i$ ،$R^- = \text{Min } R_i$ ،$S^* = \text{Max } S_i$ ،$S^- = \text{Min } S_i$ و V پارامتری است که براساس توافق بین گروه تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود و مقدار آن معمولاً ۰/۵ در نظر می‌گیرند.

۱- گزینه‌ها براساس مقادیر Q, R, S در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. بهترین گزینه آن است که کوچکترین Q را داشته باشد به شرط آنکه دو شرط زیر برقرار باشد:

شـــرط یک: اگر گزینه A1 و A2 در میان n گزینه رتبه اول و دوم را داشـــته باشـــند، باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{n-1} \quad (۹)$$

شـــرط دو: گزینـه A1 بـایـد حـداقـل در یکی از گروه‌های R و S به عنوان رتبه برتر شـــناخته شـــود. اگر شـــرط نخســـت برقرار نباشـــد هر دو گزینه بهترین گزینه خواهند بود. اگر شـرط دوم برقرار نباشد گزینه A1 و A2 هر دو به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شوند.

روش شباهت به گزینه ایده ال (TOPSIS):

این مـدل توســـط هوانـگ و یون در ســـال ۱۹۸۱ پیشـــنهاد شـــد. در این روش m گزینه بوسـیله n شـاخص ارزیابی می‌شـود. منطق اصـولی این مدل راه حل ایده‌آل (مثبت) و راه حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. راه حل ایده آل (مثبت) راه حلی است که معیار مثبت مانند سود را افزایش و معیـار منفی مـانـنـد هزینه را کاهش می‌دهد. گزینه بهینه، گزینه‌ای اسـت که کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصـــله از راه حل ایده‌آل منفی دارد. بـه عبـارتی در رتبـه‌بنـدی گزینه‌ها به روش TOPSIS گزینه‌هایی که بیشـــترین تشـــابه را با راه حل ایده‌آل داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند. مراحل روش تاپسیس به صورت زیر است (عطایی،۱۳۹۵):

۱ - تشکیل ماتریس تصمیم

۲ - نرمال‌کردن ماتریس تصـمیم: برای نرمال‌سـازی مقادیر از روش زیر استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (۱۰)$$

تشکیل ماتریس تصمیم نرمال موزون

گام بعدی تشـکیل ماتریس نرمال موزون بر اسـاس وزن معیارها اسـت. بنابراین، باید از پیش اوزان معیارها با اسـتفاده از تکنیکی مانند AHP یا انتروپی شانون محاسبه شـده باشد. موزون‌کردن بسیار ساده است و وزن هر معیار در درایه‌های مربوط به آن معیار ضرب می‌شود.

۴ - محاســـبه ایده‌آل‌های مثبت و منفی: در این گام برای هر شـــاخص یک ایده‌آل مثبت (A+) و یک ایده‌آل منفی محاســـبه می‌شـــود. برای معیارهایی که بار مثبت دارند ایده‌آل مثبت بزرگترین مقدار آن معیار اسـت؛ برای معیـارهـایی کـه بار مثبت دارند ایده‌آل منفی کوچکترین مقدار آن معیار اســت؛ برای معیارهایی که بار منفی دارند ایـده‌آل مثبـت کوچکترین مقدار آن معیار اســـت و برای معیـارهـایی کـه بـار منفی دارنـد ایده‌آل منفی بزرگترین مقدار آن معیار است.

۵ - فاصـــله از ایده‌آل‌های مثبت و منفی و محاســـبه راه حل ایده‌آل: در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه حل ایده‌آل حسـاب می‌شـود. فاصـله اقلیدسـی هر گزینـه از ایـده‌آل مثبـت و منفی با فرمول زیر محاســـبه خواهد شـد.گام نهائی محاسـبه راه حل ایده‌آل اسـت. در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه حل ایده‌آل حساب می‌شود. برای این کار از فرمول زیر سود می‌بریم:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (۱۱)$$

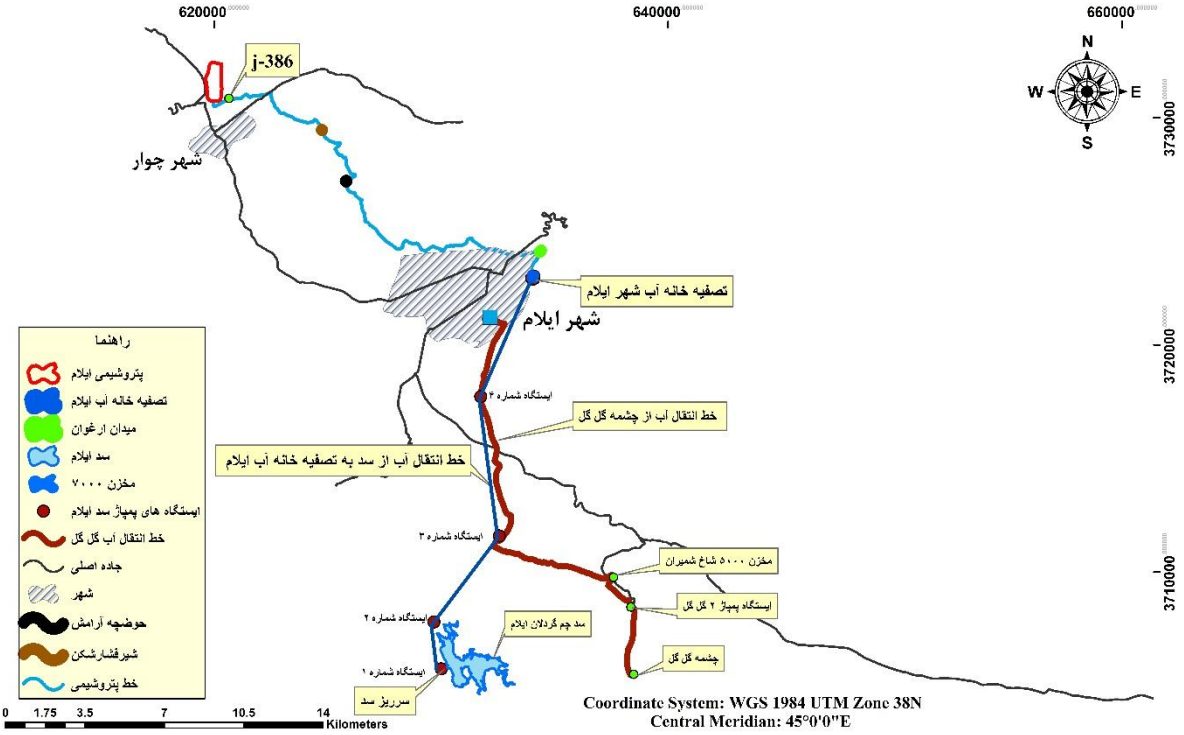
$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (۱۲)$$

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (۱۳)$$

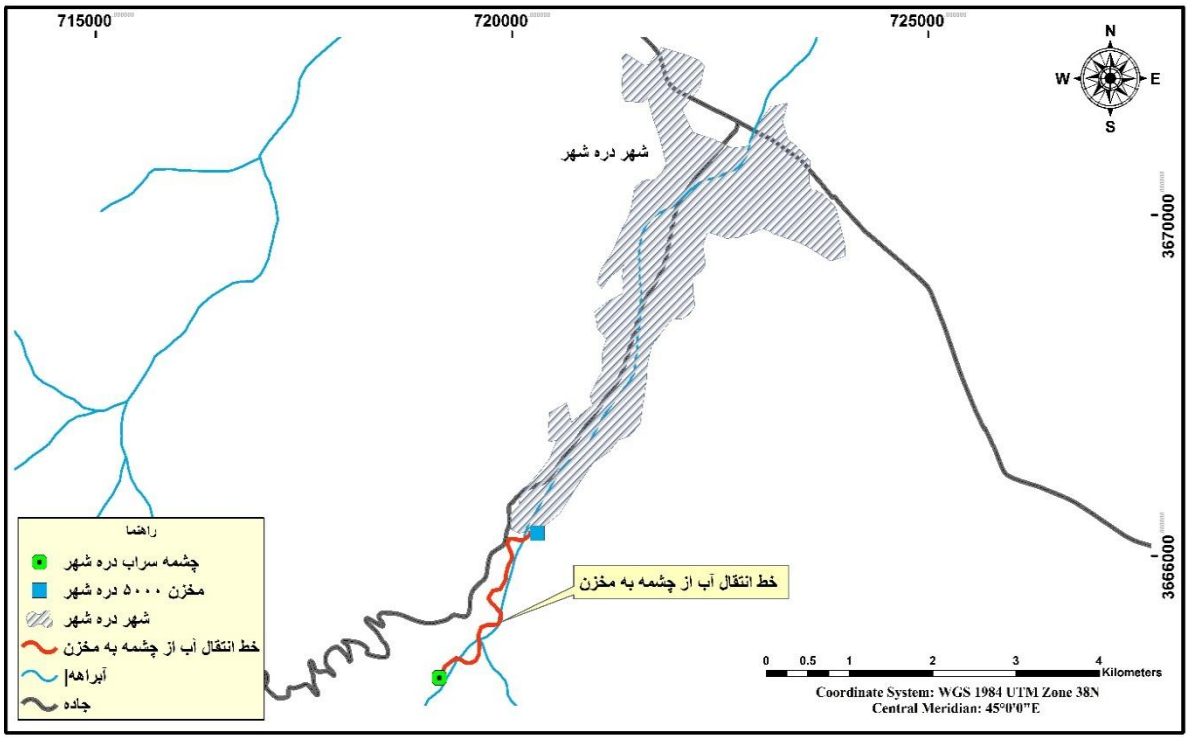
d_i^+ فاصله از ایده‌آل مثبت، d_i^- فاصله از ایده‌آل منفی، V_{ij} ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده وزن دار، V_j^+ بهترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه‌ها، V_j^- بدترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه‌ها و CL مقدار شاخص شباهت که مقدار آن بین صفر و یک است. هرچه این مقدار به یک نزدیکتر باشد راه‌کار به جواب ایده‌آل نزدیکتر و راه‌کار بهتری است.

منطقه طرح

تحقیق حاضر برای اولویت‌بندی اجرای پتانسیل‌های موجود بر روی خطوط انتقال آب، تحت مدیریت شـــرکت آب و فاضـلاب اسـتان ایلام صـورت گرفته اسـت و ضمن شناسایی پتانسیل‌های نصب نیروگاه موقعیت آنها براساس مطالعات میدانی و اطلاعات جغرافیایی مشخص شده است که در شـکل‌های شـماره (۱) و (۲) آورده شـده اسـت و شامل موارد ذیل می‌باشد:



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی نیروگاه‌های مورد بررسی بر روی خطوط انتقال آب شهر ایلام و خط انتقال آب به پتروشیمی



شکل (۲): موقعیت جغرافیایی خط انتقال آب به شهر دره‌شهر

ورودی ایستگاه یک سد ایلام (A1)

این ایستگاه در فاصله ۲۰ کیلومتری شهر ایلام و ۲۵ کیلومتری شرکت آب و فاضلاب ایلام واقع است. آب از دهانه آبگیر سد به ایستگاه شماره یک به صورت ثقلی انتقال می‌یابد. با توجه به اختلاف ارتفاع ۶۰ متری بین دهانه آبگیر و ایستگاه، در ورودی مخزن شیر کنترل فشار

تعبیه گردیده است. براساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، حداقل و حداکثر فشار در ورودی شیر فشار شکن در فصول مختلف سال از ۵۰ تا ۸۰ متر متغیر می‌باشد. شیر کنترل فشار به صورت ثابت، فشار خروجی را بر روی سه متر تنظیم می‌نماید. پس از ورود به مخزن، آب به سمت شهر ایلام پمپاژ می‌گردد. با توجه وجود فشار مازاد و بده مناسب از ۵۵۰ تا ۷۰۰ لیتر بر ثانیه، ورودی این ایستگاه به عنوان گزینه‌ای مناسب مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱).

ورودی مخزن ۷۰۰۰ متر مکعبی آزمایشگاه (A2)

این مخزن بر روی تپه‌ای در داخل شهر و در کنار مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی قرار دارد. آب چشمه گل گل پس از دو مرحله پمپاژ با یک لوله فولادی به قطر ۶۰۰ میلی متر و طول ۴۹۵۰ متر به مخزن شاخ شمیران انتقال می یابد. از مخزن شاخ شمیران با توجه به داشتن ارتفاع مناسب، جریان آب به صورت ثقلی به مخازن ۷۰۰۰ متر مکعبی آزمایشگاه انتقال می یابد.اختلاف ارتفاع مخزن شاخ شمیران با مخزن ۷۰۰۰ برابر ۱۰۰ متر می باشد. طول خط انتقال از مخزن شاخ شمیران تا مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی برابر ۱۷/۳ کیلو متر می باشد. قرار گرفتن مخزن ۷۰۰۰ در کد پایین تر باعث گردیده جهت کنترل بده از شیر سوزنی قبل از ورود جریان به مخزن استفاده گردد. با توجه به داشتن فشار مناسب و مشکلات زیاد بهره برداری، می توان از ظرفیت موجود جهت تولید انرژی و کاهش فشار استفاده نمود. لذا این ایستگاه به عنوان یکی از ظرفیت های موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱).

خط انتقال آب دره‌شهر (A3)

این خط آب را از سراب دره شهر با ارتفاع ۸۲۲ متر به مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی به ارتفاع ۷۴۶متر واقع در ۳ کیلومتری شهرانتقال میدهد. طول خط ۲۷۰۰ متر و با دو لوله فولادی با قطر ۳۰۰ میلی متر به داخل مخزن انتقال می یابد که در داخل مخزن تبدیل به یک لوله ۴۰۰ میلی متری میگردد که دبی ۱۴۰ لیتر برثانیه را انتقال میدهند.اختلاف ارتفاع ۷۶ متری ابتدا و انتهای خط باعث شده به عنوان یک گزینه مناسب جهت تولید برق در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل۲).

خط انتقال آب

از تصفیه خانه به مجتمع پتروشیمی ایلام به طول ۲۴ کیلومتر با اقطار ۶۰۰ میلی متر، ۵۰۰ میلی متر، ۴۰۰ میلی متر و ۳۰۰ میلی متر واز جنس فولاد، برای دبی ۲۵۰ لیتر بر ثانیه طراحی و اجرا گردیده است. هدف اولیه طراحی علاوه بر تأمین آب مجتمع پتروشیمی، تأمین آب شرب شهر چوار و روستاهای مسیر بوده است. در حال حاضر صرفاً آب مجتمع پتروشیمی با ظرفیت ۱۰۰ لیتر در ثانیه وبه مدت ۱۰ ساعت از این خط تأمین میگردد. اختلاف ارتفاع زیاد ابتدا وانتهای خط به دلیل توپوگرافی منطقه وکوهستانی بودن مسیر(۴۳۰ متر اختلاف ارتفاع) باعث شده تا در طول مسیر از حوضچه آرامش و شیر فشارشکن جهت کاهش فشار مازاد استفاده گردد. که حوضچه آرامش در نقطه (A4)، شیر فشارشکن در (A5) و نقطه پایانی (A6) می‌باشد. ضخامت لوله‌های استفاده شده بصورتی است که خط ظرفیت فشار۲۰ بار (۲۰۰متر) را دارد. وجود فشار مازاد در طول مسیر باعث شده که خط انتقال مذکور پتانسیل لازم برای استحصال انرژی و تبدیل به الکتریسیته را داشته باشد. لذا، خط مذکور به عنوان مطالعه موردی در تحقیق حاضر مورد نظر قرار گرفت (شکل۱). سایر اطلاعات ازجمله ظرفیت نیروگاه، فاصله از جاده، فاصله از مراکز مصرف و هزینه احداث برای نقاط مختلف و سناریوهای مختلف محاسبه گردید، که نتایج آن در جدول شماره (۱) آورده شده است.

شاخص‌های مؤثر

۱- تولید انرژی (C1): میزان تولید انرژی در نقاط مختلف، با توجه به توان نیروگاه و با در نظر گرفتن ساعت انتقال آب و تولید انرژی در طول سال واز رابطه (۷) محاسبه گردیده است و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

۲- زیست‌محیطی: پارامتر زیست‌محیطی در مسیریابی خطوط انتقال آب پارامتر موثری می‌باشد. با توجه به اینکه خط مورد مطالعه قبلاً احداث شده و در حال حاضر موجود می‌باشد و نظر به ماهیت تجدیدپذیر بودن نیروگاه‌های برق‌آبی و اینکه اثرات زیست‌محیطی سویی ندارند. لذا، شاخص مذکور در فرایند تحلیل در نظرگرفته نشده است.

۳- هزینه (C2): هزینه احداث نیروگاه در نقاط مختلف و با توجه به سناریوهای در نظر گرفته شده در جدول شماره (۱) آورده شده است، این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ساختمانی، پمپ و تجهیزات و نیز هزینه انتقال انرژی می‌باشد (محمدی و همکاران ۱۳۹۷).

۴- خرید زمین: تملک زمین علاوه برمباحث مالی و هزینه‌های وارد بر پروژه مشکلات قانونی و حقوقی خاص خود را دارد که در خیلی از موارد منجر به طولانی شدن و بعضاً شکست پروژه می‌گردد. در پروژه مورد مطالعه با توجه به اینکه مسیر خط انتقال پیشتر تملک گردیده است. لذا، فاکتور مذکور در نظر گرفته نشده است.

۵- فاصله از محل مصرف (C3): فاصله از محل مصرف با توجه به اطلاعات جغرافیایی (GIS) و محاسبه فاصله نقاط از روستاها، مراکز صنعتی و شهرهای مسیر انتقال برای سناریوهای مختلف محاسبه گردیده است که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

۶- فاصله از جاده اصلی (C4): فاصله از جاده اصلی به عنوان یک پارامتر موثر و با توجه به اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فاصله نقاط از جاده اصلی محاسبه گردیده است که نتایج آن برای نقاط مختلف در جدول شماره (۱) آورده شده است.

۷- سهولت بهره برداری (C5): با درنظر گرفتن فاکتورهایی مانند تعداد نقاط، نزدیکی به سایت‌های آغازین و پایانی ، نزدیکی نقاط نسبت به هم، واقع شدن در داخل سایت‌های آغازین و پایانی به عنوان یک فاکتور کیفی برای سناریوهای مختلف و با انجام مقایسات زوجی در نظر گرفته شده است.

جدول۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه و شاخص‌های مربوطه

ردیف	نام ایستگاه	توان تولیدی (کیلووات)	تولید انرژی سالیانه (کیلووات ساعت در سال) (C1)	هزینه احداث (ریال) (C2)	فاصله از محل مصرف (متر) (C3)	فاصله از جاده اصلی (متر) (C4)
۱	ایستگاه ۱ سد ایلام (A1)	۱۳۰	۹۸۲۸۰۰	۱۲۱۸۰۰۰۰۰۰	۵۰	۱۰۰۰۰
۲	ورودی مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی (A2)	۱۶	۱۲۰۹۶۰	۵۴۰۰۰۰۰۰۰	۳۰۰	۲۰۰
۳	خط انتقال دره شهر (A3)	۴۲	۳۱۷۵۲۰	۷۵۱۰۰۰۰۰۰	۱۵۰	۱۰۰
۴	خط پتروشیمی ورودی حوضچه آرامش (A4)	۸۴	۳۰۲۴۰۰	۳۴۲۱۰۰۰۰۰۰	۴۲۵۰	۴۹۳۰
۵	خط پتروشیمی شیر فشارشکن (A5)	۱۰۲	۳۶۷۲۰۰	۳۰۲۸۰۰۰۰۰۰	۴۰۷۰	۴۷۱۰
۶	خط پتروشیمی ورودی سایت (A6)	۶۱	۲۱۹۶۰۰	۷۵۸۰۰۰۰۰۰	۴۰	۵۰

محاسبه پارامترهای اقتصادی

نسبت فایده به هزینه سالیانه (B/C): نسبت فایده به هزینه سالیانه یکی از روش‌های مرسوم برای ارزیابی پروژه‌های دولتی و ملی است. در این روش، نسبت معادل زمان حاضر، یا معادل سالانه منافع به معادل زمان حاضر یا معادل سالانه هزینه‌ها محاسبه و ملاک ارزیابی، مطابق رابطه زیر قرار می‌گیرد (مسعودی، ۱۳۹۵).

$$\frac{B}{C} = \frac{AE}{AC} = \frac{Ba}{C_R + (O + M)} \qquad (۱۴)$$

$$C_R = C_O \times CRF = C_O \times \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1} \qquad (۱۵)$$

$$ALCC = C_R + (O + M \qquad (۱۶)$$

$$C = \frac{ALCC}{E} \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه: AE= معادل سالانه منافع خالص استفاده‌کننده (منافع خالص منهای هزینه‌ها)؛ AC= معادل سالانه هزینه خالص مجری؛ Ba= منافع سالانه

خالص استفاده‌کننده؛ C_R= هزینه برگشت سرمایه یا معادل سالانه هزینه سرمایه‌ای بامنظور نمودن ارزش اسقاط؛ و O+M= معادل سالانه هزینه خالص بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری است. هزینه دوره عمر سالیانه به فاکتور برگشت سرمایه (CRF)، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (C_O) و هزینه‌های سالیانه (O+M) بستگی دارد. فاکتور برگشت سرمایه (CRF) که به طول عمر تجهیزات (L) برحسب سال و نرخ تنزیل (d) بستگی دارد و هزینه واحد انرژی تولیدی (C) که از تقسیم هزینه دوره عمر سالیانه (ALCC) بر میزان انرژی تولیدی به دست می‌آید (متوانی و همکاران، ۲۰۱۳). هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (C_O) شامل هزینه‌های ساختمانی، هزینه تجهیزات و سایر هزینه‌های متفرقه می‌باشد. هزینه‌های سالیانه (O+M) شامل هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری، سوخت، نیروی انسانی و هزینه‌های متفرقه در طول فعالیت سالیانه نیروگاه می‌باشد، هزینه بهره برداری و تعمیرات ۱۵ درصد هزینه اولیه در سال در نظر گرفته شده است (وسنتاکومار و همکاران، ۲۰۱۵).

نتایج و بحث

تحقیق حاضر با مطالعه برروی خطوط انتقال آب تحت مدیریت شرکت آب و فاضلاب استان ایلام که قابلیت احداث نیروگاه برق‌آبی دارند، با درنظرگرفتن شاخص‌های مختلفی از قبیل؛ تولید انرژی، هزینه احداث، فاصله از مصرف، فاصله از جاده اصلی و سهولت بهره برداری صورت گرفته است و از روشهای مختلف تصمیم گیری چندشاخصه ازقبیل روشAHP، ANP، SAW، VIKOR و TOPSIS برای اولویت بندی احداث نیروگاه بر روی خطوط مذکور استفاده شده است. وزن شاخص‌ها بر اساس نظرسنجی از کارشناسان خبره (۱۳نفر) شاغل در مهندسین مشاور تهران سحاب، دز آب، ری‌آب، طرح و تحقیقات، و شرکت آب و فاضلاب که از مدیران و کارشناسان باسابقه بخش‌های طراحی و نظارت خطوط انتقال آب و نیروگاه بوده‌اند، استفاده شده است، و سپس با میانگین‌گیری، وزن هر شاخص مشخص شده است. نتایج بررسی روش‌های مختلف به شرح ذیل می‌باشد:

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

جدول مقایسات زوجی بین شاخص‌ها براساس نظرات کارشناسان مطابق جدول شماره (۲) می‌باشد. همچنین، مقایسات زوجی بین گزینه ها بر اساس موقعیت هر گزینه در جدول شماره (۳) آورده شده است. بر اساس محاسبات صورت گرفته توسط نرم افزار Expert Choice وزن شاخص‌های C1 تا C5 به ترتیب برابر۰/۳۷۸، ۰/۲۴۶، ۰/۱۶۳، ۰/۱۳۳ و ۰/۰۷۹ می‌باشد. همچنین، مقدار شاخص ناسازگاری در مقایسات زوجی بین شاخص‌ها برابر۰/۰۳ و در مقایسات زوجی گزینه‌ها بر اساس سهولت بهره برداری ۰/۰۱ و شاخص ناسازگاری کل برابر۰/۰۲ بدست آمده است که چون از مقدار مجاز۰/۱ کمتر است نشان دهنده درست بودن مقایسات زوجی می‌باشد. برای سایر شاخص‌ها چون مقادیر عددی می‌باشند، شاخص ناسازگاری صفر بدست آمده است (جدول۴). نتایج اولویت بندی گزینه ها مطابق این روش عبارت است از: A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4که بر این اساس مناسب‌ترین روش احداث نیروگاه گزینه A1 واقع در ایستگاه یک سد می‌باشد و بدترین گزینه A4 واقع در ورودی حوضچه آرامش برروی خط انتقال پتروشیمی می‌باشد.

جدول ۲: مقایسات زوجی بین شاخص‌های مختلف

گزینه‌ها	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۲	۲	۴	۳
C2	۱/۲	۱	۲	۳	۲
C3	۱/۲	۱/۲	۱	۲	۱/۳
C4	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۱/۲
C5	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۲	۱

جدول ۳: مقایسات زوجی بین گزینه‌های مختلف براساس سهولت بهره‌برداری

گزینه ها	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	۱	۱/۳	۱/۳	۴	۳	۱/۲
A2	۳	۱	۱	۷	۷	۲
A3	۳	۱	۱	۷	۷	۲
A4	۱/۴	۱/۷	۱/۷	۱	۱/۲	۱/۵
A5	۱/۳	۱/۷	۱/۷	۲	۱	۱/۵
A6	۲	۱/۲	۱/۲	۵	۵	۱

جدول۴ : وزن شاخص‌ها،امتیاز و رتبه بندی گزینه‌ها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی

رتبه گزینه‌ها	امتیاز گزینه		گزینه ها	وزن		شاخص
۱	۰/۲۵	A1	ایستگاه۱سد ایلام	۰/۳۷۸	C1	تولید انرژی
۴	۰/۱۶۷	A2	ورودی مخزن ۷۰۰۰مترمکعبی	۰/۲۴۶	C2	هزینه احداث
۳	۰/۱۹۸	A3	خط انتقال دره شهر	۰/۱۳۳	C3	فاصله از مصرف
۶	۰/۰۷	A4	ورودی حوضچه آرامش خط انتقال	۰/۰۷۹	C4	فاصله از جاده
۵	۰/۰۷۵	A5	شیرفشارشکن خط انتقال پتروشیمی	۰/۱۶۳	C5	سهولت بهره‌بردار
۲	۰/۲۴	A6	ورودی خط انتقال پتروشیمی	۰/۰۳		شاخص ناسازگاری
۰/۰۲			شاخص ناسازگاری			

روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)

پس از تشکیل ماتریس تصمیم بین گزینه‌ها و شاخص‌ها، فرآیند انتخاب گزینه برتر با استفاده از نرم‌افزار سوپر دسیژن صورت گرفته است که نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است. براین اساس، گزینه ایستگاه یک سد (A1) به عنوان بهترین گزینه و ورودی حوضچه آرامش خط انتقال پتروشیمی (A4) بدترین گزینه و اولویت‌بندی گزینه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4

جدول ۵: امتیاز و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)

رتبه گزینه	امتیاز گزینه	گزینه
۱	۰/۲۵۸	A1
۴	۰/۱۶۷	A2
۲	۰/۲۰۴	A3
۶	۰/۰۷۸	A4
۵	۰/۰۹۱	A5
۳	۰/۲۰۳	A6

روش وزن دهی ساده (SAW)

در این روش، پس از تعیین ماتریس تصمیم و مشخص نمودن معیارهای مثبت و منفی (تولید انرژی و سهولت بهره برداری معیارهای مثبت؛ هزینه، فاصله از محل مصرف و فاصله از جاده، معیارهای منفی) ماتریس بی‌وزن، ماتریس وزن‌دار (ضرب ماتریس بی‌وزن در وزن شاخص‌ها) گزینه برتر مطابق جدول (۶) مشخص شده است. براین اساس، گزینه ایستگاه یک سد (A1) گزینه برتر و اولویت‌بندی گزینه‌ها به صورت زیر است:

A1 > A6 > A3 > A2 > A5 > A

جدول ۶: ماتریس بی وزن، وزن شاخص‌ها و رتبه بندی براساس روش وزن‌دهی ساده

گزینه‌ها	C1	C2	C3	C4	C5	وزن شاخص‌ها	A^*	رتبه
A1	۱	۰/۴۴۳	۰/۸	۰/۰۰۵	۰/۴۲۹	W	۰/۶۵۲	۱
A2	۰/۱۲۳	۱	۰/۱۳۳	۰/۲۵	۱	۰/۳۷۸	۰/۴۲۷	۴
A3	۰/۳۲۳	۰/۷۱۹	۰/۲۶۷	۰/۵	۰/۷۱۴	۰/۲۴۶	۰/۴۶۵	۳
A4	۰/۳۰۸	۰/۱۵۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۱۴۳	۰/۱۶۳	۰/۱۶۹	۶
A5	۰/۳۷۴	۰/۱۷۸	۰/۰۱	۰/۰۱۱	۰/۲۸۹	۰/۱۳۳	۰/۲۱۱	۵
A6	۰/۲۲۳	۰/۷۱۲	۱	۱	۰/۷۱۴	۰/۰۷۹	۰/۶۱۲	۲

روش ویکور(VIKOR)

در این روش، پس از تشـــکیل ماتریس تصـــمیم و ماتریس نرمال‌شـــده، گزینه f^+ و f^-، شـــاخص‌های ویکور، سـودمندی و تاسـف محاسبه شده و رتبه‌بندی شده است (جدول ۷). بر این اسـاس، گزینه ایستگاه یک سد گزینه برتر می‌باشد. اولویت‌بندی گزینه‌ها در این روش به صورت زیر می‌باشد:

A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4

روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

در این روش، پس از تشکیل ماتریس تصمیم و ایجاد ماتریس نرمال، فاصـــله از ایده‌آل مثبت و منفی، نزدیکی نسـبی به ایده‌آل مثیت محاسـبه و بر اساس آن، گزینه‌ها رتبه‌بندی شده‌اند (جدول ۸). بر این اساس نیز گزینه برتر گزینه ایســـتگاه یک ســـد ایلام می‌باشـــد. اولویت‌بندی گزینه‌ها در این روش نیز به صورت زیر می‌باشد:

A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4

نتایج نشـــان می‌دهد که بجز روش وزن‌دهی ســـاده، ســـایر روش‌ها نتایج یکسانی در زمین اولویت‌بندی اجرای نیروگـاه‌هـای برق‌آبی بدســـت می‌دهند. لذا اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4

بررسی اقتصادی

با در نظر گرفتن ۱۰ سال طول عمر تاسیسات و نرخ تنزیل ۱۲ درصـــد، فاکتور برگشـــت ســـرمایه برابر۰/۱۷۷ بدســـت آمده اســـت. محاســـبات اقتصادی با در نظر گرفتن ۱۵ درصـــد ســـرمـایـه اولیه به عنوان هزینه نگهداری و تعمیرات و بهای واحد مصـــوب۱۵۰۰ ریال برای هر کیلو وات – ســـاعت صـــورت گرفته اســـت. نتایج ارزیابی‌های اقتصـادی که شـامل نسـبت فایده به هزینه و واحد انرژی تولیدی می‌باشـد در جدول (۹) آورده شـده اسـت. نتایج نشـان می‌دهد که گزینه ایسـتگاه یک سد ایلام با نسبت فـایـده بـه هزینـه برابر ۳/۷ و هزینه واحد انرژی تولیدی ۴۰۵ ریـال بـه عنوان گزینه برتر از نظر اقتصـــادی قابل شناسایی است. علاوه بر این، ترتیب اولویت‌بندی گزینه ها از نـظـر اقتصـــادی نیز منطبق بر نتـایج روش‌هـای تصمیم‌گیری چندمعیاره سلسله مراتبی، تحلیل شبکه‌ای، شـــباهت به گزینه ایده‌آل و ویکور می‌باشـــد. اولویت‌بندی گزینه‌ها از نظر اقتصادی به شرح ذیل می‌باشد:

A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4

احداث نیروگاه در نقاط شـیر فشـارشکن و حوضچه آرامش خط انتقال پتروشیمی به دلیل فاصله زیاد از محل مصـرف با نرخ مصـوب ۱۵۰۰ ریال اقتصـادی نمی باشـد. بهـای واحـد انرژی تولیـدی برای این نقـاط بـه ترتیـب برابر۲۶۹۷ و ۳۶۹۹ ریال بدست آمد.

جدول۷: مقادیر وزن نرمال شده،گزینه های مثبت و منفی، شاخص‌های سودمندی، تاسف، ویکور و رتبه بندی گزینه‌ها در روش ویکور

	C1	C2	C3	C4	C5
W	۰/۳۷۸	۰/۲۴۶	۰/۱۶۳	۰/۱۳۳	۰/۰۷۹
f^+	۹۶۳۵/۳	۳۶۰۰۰۰۰۰	۰/۸۵۱	۰/۰۸۹	۲/۴۱۴
f^-	۱۱۸۵/۸۹	۲۸۸۰۶۶۶۶۷	۹۰/۴۹	۱۷/۷۶	۰/۳۴۵

گزینه ها	شاخص ویکور (Q)	شاخص	شاخص تاسف	رتبه
A1	۰	۰/۲۴۴	۰/۱۳۳	۱
A2	۰/۶۲۰	۰/۳۹۰	۰/۳۷۸	۴
A3	۰/۴۰۴	۰/۳۴۱	۰/۲۹۲	۲
A4	۰/۸۳۸	۰/۸۵۲	۰/۲۹۸	۶
A5	۰/۷۱۰	۰/۷۶۶	۰/۲۷۰	۵
A6	۰/۵۲۳	۰/۳۸۰	۰/۳۳۵	۳

جدول ۸: محاسبات رتبه بندی گزینه‌ها براساس روش شباهت به ایده‌آل (TOPSIS)

رتبه	نزدیکی نسبی به ایده‌آل مثبت	فاصله از ایده‌آل منفی d^-	فاصله از ایده‌آل مثبت d^+	گزینه‌ها
۱	۰/۷۳۲	۰/۳۲۳	۰/۱۱۸	A1
۴	۰/۴۳۶	۰/۲۱۶	۰/۲۸۰	A2
۲	۰/۵۰۲	۰/۲۱۹	۰/۲۱۷	A3
۶	۰/۲۱۴	۰/۰۸۱	۰/۲۹۷	A4
۵	۰/۲۷۴	۰/۱۰۱	۰/۲۶۹	A5
۳	۰/۴۶۲	۰/۲۱۳	۰/۲۴۸	A6

جدول۹: پارامترهای اقتصادی نیروگاه‌های پیشنهادی برروی خطوط انتقال آب ایلام

رتبه	بهای واحد انرژی تولیدی(c) (ریال)	B/C	پارامترهای اقتصادی (میلیون ریال) ALCC	Cr	فایده سالیانه(B)	هزینه ساخت	گزینه
۱	۴۰۵	۳/۷	۳۹۸/۳	۲۱۵/۶	۱۴۷۴/۲	۱۲۱۸	A1
۴	۱۴۶۰	۱/۰۳	۱۷۶/۶	۹۵/۶	۱۸۱/۴	۵۴۰	A2
۲	۷۷۳	۱/۹۴	۲۴۵/۶	۱۳۲/۹	۴۷۶/۳	۷۵۱	A3
۶	۳۶۹۹	۰/۴۱	۱۱۱۸/۷	۶۰۵/۵	۴۵۳/۶	۳۴۲۱	A4
۵	۲۶۹۷	۰/۵۶	۹۹۰/۲	۵۳۶	۵۵۰/۸	۳۰۲۸	A5
۳	۱۱۲۹	۱/۳۳	۲۴۷/۹	۱۳۴/۲	۳۲۹/۴	۷۵۸	A6

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱- در اولویت‌بندی انتخاب نیروگاه برق‌آبی، شاخص‌های مختلفی از قبیل تولید انرژی، هزینه احداث، فاصله محل از مصرف، فاصله از جاده اصلی و سهولت بهره‌برداری مؤثر می‌باشند.

۲- با استفاده از روشهای تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توان اولویت‌بندی احداث نیروگاه برق‌آبی بر روی خطوط انتقال آب را مشخص کرد.

۳- روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تحلیل شبکه‌ای، ویکور و شباهت به گزینه ایده‌آل برای اولویت‌بندی احداث نیروگاه بر روی خطوط انتقال آب ایلام موثر بوده و نتایج یکسانی را ارائه نموده است.

۴- فاصله زیاد انتقال انرژی بدلیل افزایش هزینه می‌تواند باعث غیراقتصادی بودن نیروگاه گردد. توصیه میگردد نیروگاه‌های کوچک در نزدیکی محل مصرف ساخته شوند. این نیروگاه‌ها خصوصاً در نواحی دور افتاده توصیه میگردند.

۵- پیشنهاد میگردد در طراحی خطوط انتقال آب، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ضمن در نظرگرفتن معیارهای هیدرولیکی، استحصال انرژی با جایگزینی PAT به جای شیرهای فشارشکن نیز موردنظر قرار گیرد.

منابع

۱) اصغرپور، م. ج، (۱۳۹۳). "تصمیم گیری چند معیاره"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوازدهم.

۲) بشیرزاده تبریزی، ا. گیفانی، ن؛ وفرهمند، ع.(۱۳۸۸).به‌کارگیری نیروگاه برق‌آبی کوچک بر روی خطوط انتقال آب بامطالعه موردی خطوط انتقال آب بجنورد، زاهدان و بیرجند، سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی معرفی) تهران اسفند ۱۳۸۸.

۳) عطایی، م. (۱۳۹۵) "تصمیم گیری چند معیاره"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ چهارم.

۴) خالصی دوست، ع. محمدیان، ع؛ و مرادی، ع.(۱۳۹۲). تحلیل اقتصادینیروگاه برق‌آبی کوچک خط انتقال چشمه روزبه سمنان و مقایسه با نیروگاه گازی.

کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی: دومین کنفرانس انجمن علمی انرژی ایران. تهران.

۵) روزبهانی، ع. شهبازی سحرانی، م. (۱۳۹۵). کاربرد شبیه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در گزینه‌یابی سد و نیروگاه خراسان۱. مجله مهندسی منابع آب. سال نهم. تابستان ۹۵.

۶) مسعودی، ح. (۱۳۹۵). اقتصاد مهندسی (تجزیه‌وتحلیل اقتصادی پروژه‌ها). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۷) محمدی، م. یاسی، م. جمالی، س؛ و حاجی کندی ه. (۱۳۹۷). ارزیابی ظرفیت تولید برق از خطوط آب‌رسانی شهر ایلام، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال پنجم، شماره ۱۶، بهار ۱۳۹۷.

۸) منظور، د. رحیمی، ع. (۱۳۹۴). اولویت بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران. سال چهارم.شماره ۱۴. بهار ۱۳۹۴.

۹) مومنی، م. شریفی سلیم، ع. (۱۳۹۰). مدل‌ها و نرم افزارهای تصمیم‌گیری چند شاخصه. ناشر مؤلفین.

10) Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M., and Miguel A. Marino (2005).Case Study: Aplication of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply. Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE, August, 2005.

11) Adhikry, P., kr Roy, P., and Mazmudar, A. (2015). Selection of Small Hydropower Project Site: A Multi Criteria Optimization Technique Approach. Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 10, No. 8, May 2015.

12) Aschilean, I., and Giurca, I., (2018). Choosing a Water Distribution Pipe Rehabilitation Solution Using the Analytical Network Process Method. Journal Water, MDPI, 2018, 10, 484.

13) Demirtas O. (2013). Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning. International Journal of Energy Economics and Policy, Vol. 3, Special Issue, 2013, PP. 23 – 33.

14) Hyundong L., and Myeongsik K., (2017). Analysis Level of Service for Asset Management in Water Supplt Network. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973 – 4562 Volume 12, Number 20 (2017), PP. 9890 – 9895.

15) Kougias, T. Patsialis, A. Zafirakou and N. Theodossiou. (2014)." Exploring the potential of energy recovery using micro hydropower systems in water supply systems." Water Utility Journal, Vol.7, 25-33.

16) Kucukali, S. (2011)."Water supply lines as a source of small hydropower in Turkey: A case study Edermit." World Renewable Energy Congress-Sweden, 1400-1407, Linkoping, Sweden.

17) Motwani, K. H. Jain, S. V. and Patel, R. N.(2013)." Cost analysis of pump as turbine for Pico hydropower plants- A case study." Procedia Engineering 51, 721 - 726.

18) Rana C., S., and N. Patel, J. (2018). Selection of Best Location for Small Hydropower Project Using AHP, WPM and TOPSIS Methods. ISH Journal of Hydraulic Engineering, ISSN: 0971 – 5010 (Print) 2164 – 3040 (Online).

19) Saaty, T. L. (2012). Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. Third Revised Edition. Pittsburgh: RWS Publications.

20) Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytical Hierarchy Process. Int. j. Services Scinces, Vol. 1, No. 1, 2008.

21) Vargas, R. V. (2010). Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfilio. Paper Presented at PMI® Global Congress 2010 North America, Washington, DC. Newtown Square, PA: Project Management Institue.

22) Vasanthakumar, P. Karthikayan, Dr. S. Kirshnaraj, J. Palanisami, M. and Vinoth, T. (2015). "Power Optimization of Rotodynamic Pump in Turbine Mode Operation for Pico Hydropower Plants ." Advances in Natural and AppliedSciences.9 (17). 291 – 295.

23) Verkos, C. Tzimopoulos, C. Evangelids C. and Arampatzis, G. (2019). Multi Criteria Decision Making Using Alternatives Ratio Method for Locating a Small Hydropower Plant in Central Greece, International Journal of Renewable Energy Sources, Vol.4, 2019. 32-39.