اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۷، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۹، ص ۷۹۰-۷۷۵

توسعه و مقایسهٔ مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی برای مکان‌یابی سدهای مخزنی براساس معیارهای توسعهٔ پایدار

محمدابراهیم بنی‌حبیب[1*]، بهمن وزیری[2]، رضا هاشمی[3]، میترا تنهاپور[4]

۱. استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

۲. دکترای گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

۴. دانشجوی دکترای، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۵/۲۷)

چکیده

ساخت غیراصولی سدها سبب عدم تعادل بین منابع آب و پایداری محیط می‌شود. بنابراین، در ساخت سدها به عنوان یکی از روش‌های تأمین آب، رعایت اصول و معیارهای توسعهٔ پایدار اهمیت زیادی دارد. در تحقیق حاضر اولویت محل ساخت سد کندوله در استان کرمانشاه با استفاده از تکنیک‌های مختلف مدل تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی شامل وزن‌دهی ساده، برنامه‌ریزی توافقی و تحلیل سلسله‌مراتبی بررسی شد. به این‌منظور، پس از تعیین معیارهای مناسب به کمک مطالعات و دیدگاه‌های کارشناسان، برای تعیین وزن معیارها از تصمیم‌گیری گروهی با اندازه‌گیری میزان توافق تصمیم‌گیران استفاده شد. سپس، چهار گزینهٔ پیشنهادی برای سد کندوله بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و زیرمعیارهای مربوطه رتبه‌بندی شده و نتایج با هم مقایسه شد. علاوه بر تعیین ساختگاه برتر، ۱۷ زیرمعیار برای انتخاب این ساختگاه نیز رتبه‌بندی شد. در انتها، با آنالیز حساسیت مدل‌ها رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها ارزیابی شد. بر اساس دیدگاه‌های کارشناسان معیار اقتصادی بیشترین اهمیت را در انتخاب ساختگاه دارد. همچنین، نتایج نشان داد رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی مشابه دو روش دیگر است. به این صورت که در کلیهٔ مدل‌ها گزینهٔ چهارم به عنوان بهترین گزینه معرفی شد و گزینه‌های سوم، اول و دوم به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، نتایج تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داد رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اثر تغییر وزن بیشتر معیارها تغییر نمی‌کند. تحقیق حاضر یک رویکرد معتبر و به‌صرفه برای تصمیم‌گیران به منظور شناسایی گزینهٔ برتر ساختگاه سد برای رسیدن به اهداف توسعهٔ پایدار را فراهم می‌سازد.

کلیدواژگان: برنامه‌ریزی توافقی، تحلیل سلسله‌مراتبی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، ساختگاه سد، وزن‌دهی ساده.

* نویسندهٔ مسئول

Email: banihabib@ut.ac.ir

مقدمه

توسعهٔ کشور و رشد روزافزون نیاز به آب در بخش‌های مختلف به همراه مشکلات ناشی از فعالیت انسان در به هم خوردن تعادل بین منابع آب و پایداری محیط، منجر شده است که این امر اهمیت آب را به عنوان رکن اصلی حیات و تولید در کشور بیش از پیش مشخص می‌کند [۱]. در این میان، از قدیمی‌ترین و مؤثرترین راهکارها برای مبارزه با این مشکل ذخیرهٔ آب به کمک احداث سد است. از این‌رو، در ساخت سدها به عنوان یکی از روش‌های تأمین آب رعایت اصول توسعهٔ پایدار اهمیت روزافزونی دارد.

همواره در روند مطالعات احداث سد، ساختگاه‌های متعددی با توجه به عوامل مختلف شامل مسائل فنی (زمین‌شناسی، ژئوتکنیک، منابع آب)، اقتصادی (هزینه‌های طرح و شاخص‌های اقتصادی) و اجتماعی (خسارت مخزن و اسکان مجدد) مطرح است. از این‌رو، با توجه به گستردگی عوامل مؤثر بر انتخاب ساختگاه بهینه، چگونگی تعیین بهترین مکان برای ساخت سد و تصمیم‌گیری در مورد آن را دشوار می‌سازد [۲ و ۳]. علاوه بر این، معیارهای انتخاب ساختگاه برای احداث سد، لزوماً با یکدیگر هم‌جهت نیستند و چه بسا در بسیاری موارد در تضاد با یکدیگر قرار می‌گیرند. یعنی افزایش یک عامل موجب کاهش عامل دیگر می‌شود. بنابراین، تصمیم‌گیری به روش‌های قدیمی مانند تحلیل سود- هزینه و مدل‌های تک‌هدفه دیگر امکان‌پذیر نیستند. در چنین مواقعی، استفاده از شیوه‌های بهینه‌سازی چندمعیاره، امکان دستیابی به بهترین گزینهٔ ممکن برای مسئله را با توجه به هدف تعیین‌شده و قیدهای موجود فراهم می‌کند [۴].

یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی، روش وزن‌دهی ساده است. این روش در سال ۱۹۸۱ توسط هوانگ و یون ارائه شده است [۵]. این روش بر اساس عملکرد طبیعی انسان در تصمیم‌گیری چندمعیاره بنا نهاده شده است و با در نظر گرفتن وزن برای اهداف مختلف آنها را به یک مسئلهٔ تک‌هدفه تبدیل می‌کند [۶]. یکی دیگر از این روش‌ها، روش برنامه‌ریزی توافقی است. این روش در سال ۱۹۷۳ توسط زلنی ارائه شد [۷]. در این روش، فاصلهٔ گزینه‌ها از نقطهٔ ایده‌آل تعیین می‌شود و نزدیک بودن یا دور بودن گزینه‌ها نسبت به نقطهٔ ایده‌آل بررسی می‌شود. یکی دیگر از تکنیک‌های قدرتمند تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است که در سال ۱۹۸۰ توسط محققی به نام توماس ساعتی ارائه شده است [۸]. این روش بر اساس تحلیل مغز انسان برای مسائل پیچیده و فازی پیشنهاد شده [۹] و از آن در مطالعات علوم مختلف از جمله ارزیابی و تصمیم‌گیری دربارهٔ برخی طرح‌های آبی [۱۰]، برنامه‌ریزی‌های منابع آب [۱۱ و ۱۲]، ارزیابی‌های محیط زیستی و زیست‌محیطی-اقتصادی [۱۳]، پروژه‌های تولید انرژی برق‌آبی [۱۴]، مکان‌یابی احداث یک سد به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های شهری [۱۵]، بررسی و ارزیابی امکان اجرای پروژه‌های مهار سیلاب [۱۶] استفاده شده است. کاربرد این روش‌ها در منابع آب از فعالیت‌های مسی و همکاران (۱۹۶۲ تا ۱۹۷۳) آغاز شد که در آن مسائل تصمیم‌گیری به صورت بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی مطرح شدند [۱۷]. سیمنوویک (۱۹۹۶) از مدل برنامه‌ریزی توافقی برای رتبه‌بندی روش‌های برنامه‌ریزی طولانی‌مدت منابع آب استفاده کرده است [۱۸]. مشرام و همکاران (۲۰۲۰) از مدل‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله روش وزن‌دهی ساده، تاپسیس، بوردا و کوپلند برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های حوضهٔ نارمادا در هند از نظر شناسایی مناطق حساس به فرسایش استفاده کردند. به این‌منظور، از ۱۴ پارامتر مورفومتریک استفاده کردند. نتیجهٔ مطالعه آنها بیانگر کارایی مدل‌های وزن‌دهی ساده و تاپسیس برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش بود [۱۹]. عثمان و همکاران (۲۰۲۰) به منظور انتخاب مکان مناسب برای ساخت سد الخابور در عراق، از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تجمیع وزنی استفاده کردند. نتیجهٔ تحقیق آنها نشان داد در بین ۱۱ گزینهٔ مطرح برای ساختگاه سد، دو گزینه واقع در مرکز منطقهٔ مطالعه‌شده نسبت به بقیه مناسب‌تر است. علاوه بر این، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نسبت به روش تجمیع وزنی عملکرد بهتری داشته است [۲۰]. سردار شهرکی و بذرافشان (۱۳۹۸) برای تعیین اولویت منابع آب سد کهیر با رویکردهای مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی در سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده کردند. بر اساس رویکرد اقتصادی، بخش کشاورزی بیشترین اهمیت دارد و بر اساس رویکرد زیست‌محیطی، ابتدا بخش محیط زیست و سپس بخش‌های کشاورزی و شرب به‌ترتیب در اولویت‌های اول، دوم و سوم قرار گرفتند [۲۱]. محمدی

و ملکیان (۱۳۹۶) برای اولویت‌بندی ۹ زیرحوضهٔ منطقهٔ پارچین واقع در استان تهران از نظر خطر بروز سیلاب، از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل ELECTRE، Grey و TOPSIS استفاده کردند. نتایج رتبه‌بندی نشان داد در هر ۳ روش، زیرحوضهٔ هفتم با بیشترین امتیاز در اولویت نخست قرار می‌گیرد و در اولویت‌های بعدی، روش‌های مختلف نتایج مختلفی ارائه می‌دهند. همچنین، نتایج روش‌های Grey و TOPSIS مشابه یکدیگر بوده و نسبت به روش ELECTRE، دقت بیشتری داشتند [۲۲]. خیرخواه و همکاران (۱۳۸۷) از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای اولویت‌بندی مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی در دامنه‌های شمالی کوه‌های کرکس-نطنز استفاده کردند [۲۳]. صادق‌پور و رئیسی (۱۳۸۳) در تحقیقی برای انتخاب ساختگاه بهینهٔ سد علاوه بر معیارهای فنی، معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز دخالت دادند [۲]. تیکونیوین و همکاران (۲۰۰۶) به منظور حل مسئلهٔ مکان‌یابی برای احداث یک سد، از یک مدل ترکیب‌شده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) استفاده کردند [۱۴]. اولی‌پور و همکاران (۱۳۸۶) در تحقیقی بیان داشتند که انتخاب گزینهٔ مناسب برای احداث سد از میان گزینه‌های مطرح، از پیچیده‌ترین موضوعات در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی سدها است که شناسایی پارامترهای مؤثر زمین‌شناسی و آگاهی از میزان تأثیرگذاری آنها، اهمیت زیادی در تصمیم‌گیری برای انتخاب محور برتر دارد [۲۴]. در تحقیقی دیگر، سوپریاسیلپا و همکاران (۲۰۰۹) برای مطالعه روی پتانسیل‌های پروژه‌های توسعهٔ نیروی برق‌آبی، گزینه‌های با انرژی الکتریکی بیشتر از ۱۰۰ کیلووات روی رودخانهٔ Ping در تایلند را در نظر گرفتند. سود و زیان‌های پروژه‌ها با ۵ معیار اصلی تولید الکتریسیته، ملاحظات مهندسی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در ۶۴ مکان مناسب در محدودهٔ مطالعه‌شده در نظر گرفته شدند [۲۵].

یکی از روش‌های مطرح تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی که در تحقیقات قبلی نیز از آن استفاده شده، روش تحلیل سلسله‌مراتبی است. این روش به دلیل نیاز به مقایسات زوجی، نیازمند ارائهٔ اطلاعات در قالب ماتریس مقایسات زوجی است که این امر سبب طولانی شدن مراحل ارائهٔ اطلاعات در این روش می‌شود. به همین دلیل، کارشناسان و مدیران، اغلب تمایلی به مراحل خسته‌کننده و طولانی ارائهٔ اطلاعات در این روش ندارند و این روند سبب افزایش احتمال بروز خطا در ارائهٔ اطلاعات به محقق، توسط کارشناسان و افزایش میزان ناسازگاری در ماتریس مقایسات زوجی می‌شود. بنابراین، در تحقیق حاضر برای حل این مشکل سعی شد تا رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی به کمک قابلیت‌های نرم‌افزار Expert Choice 2000 به گونه‌ای انجام شود که به خلاف روش‌های معمول، مقایسات زوجی بر اساس نتایج ارزیابی گزینه‌ها در هر زیرمعیار توسط نرم‌افزار Expert Choice 2000 انجام شده و فقط برای شناسایی و اولویت‌بندی معیارها از تصمیم‌گیری گروهی استفاده شود. این امر علاوه بر افزایش سهولت استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی در اولویت‌بندی گزینه‌ها، سبب کاهش چشمگیر زمان انجام محاسبات، افزایش دقت و کاهش میزان ناسازگاری می‌شود. در تحقیق حاضر برای حصول اطمینان از صحت محاسبات در این روش، رتبه‌بندی گزینه‌ها به کمک دو روش تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی دیگر یعنی وزن‌دهی ساده و برنامه‌ریزی توافقی نیز انجام شد و در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از این سه مدل با یکدیگر مقایسه شد. مطالعهٔ موردی تحقیق حاضر سد کندوله در استان کرمانشاه است که برای ساخت آن ۴ گزینه مطرح است. تأثیرگذاری عوامل متعدد فنی- اجرایی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی بر انتخاب گزینهٔ مناسب سبب پیچیده شدن فرایند تصمیم‌گیری شده است. به همین دلیل، در تحقیق حاضر ترکیبی از معیارهای کمی و کیفی برای ۴ گزینهٔ مطرح توسط ۳ مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، مدل برنامه‌ریزی توافقی و وزن‌دهی ساده ارزیابی شده تا بهترین گزینه برای ساخت سد شناسایی شود. علاوه بر این، برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌ها و تصمیم نهایی، نتایج مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و برنامه‌ریزی توافقی تحلیل حساسیت شده است.

مواد و روش‌ها

یکی از بخش‌های مهم طرح‌های سدسازی، مکان‌یابی دقیق برای احداث سد است و از آنجا که این مکان‌یابی نیاز به لحاظ معیارهای متعدد و دیدگاه‌های تصمیم‌گیران مختلف

دارد، بنابراین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره یک ماتریس ارزیابی، که به ماتریس تصمیم معروف است، وجود دارد. این ماتریس دارای m گزینه و n معیار است. در این ماتریس عملکرد گزینهٔ i ام روی معیار j ام را با x_{ij} نمایش می‌دهند. اهمیت هر معیار نیز به وسیلهٔ بردار یک‌بعدی وزن‌ها W که شامل n وزن است، نشان داده می‌شود.

فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است به دو صورت فردی یا گروهی باشد. در حالت گروهی دو یا چند تصمیم‌گیر دارد که هریک، اولویت‌ها و نگرش‌های متفاوتی به مسئلهٔ تصمیم‌گیری دارند. در این حالت، هدف از تصمیم‌گیری گروهی، رسیدن به گزینهٔ برتر از میان مجموعه‌ای از گزینه‌هاست به گونه‌ای که بیشترین توافق میان تصمیم‌گیران برقرار شود. در تحقیق حاضر، ابتدا معیارها طراحی و سپس، توسط گروهی از متخصصان ارزیابی شد تا اهمیت و اولویت هر معیار نسبت به دیگری مشخص شود، سپس، برای تشکیل ماتریس تصمیم، عملکرد گزینه‌ها نسبت به هریک از معیارها ارزیابی شد. به این منظور، معیارها به دو دستهٔ کیفی و کمی تقسیم‌بندی شدند. در معیارهای کمی از آنجا که عملکرد گزینه‌ها نسبت به هریک از معیارها، در مقیاس عددی قابل بیان است، بنابراین در تحقیق حاضر برای ارزیابی عملکرد گزینه‌ها نسبت به هریک از معیارهای کمی و جای‌گذاری آن در ماتریس تصمیم، در هر ساختگاه با توجه به شرایط منطقه از مقدار عددی عملکرد آن گزینه در هر زیرمعیار استفاده شد. در معیارهای کیفی نیز ابتدا عملکرد گزینه‌ها به کمک روشی که در ادامه شرح داده می‌شود، به مقادیر کمی تبدیل شد. سپس، همانند معیارهای کمی عمل شد. در نهایت نیز به کمک سه مدل تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ جبرانی (وزن‌دهی ساده، برنامه‌ریزی توافقی و تحلیل سلسله‌مراتبی) گزینهٔ برتر مشخص می‌شود.

پیش از استفاده از هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، باید داده‌های ورودی طی دو مرحلهٔ زیر آماده‌سازی شود:

الف) تبدیل معیارهای کیفی به کمی: در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره، معیارها هم به صورت کمی و هم به صورت کیفی بیان می‌شود. روش‌های مختلفی برای تبدیل معیارهای کیفی به کمی وجود دارد که در تحقیق حاضر از روش مقیاس دوقطبی[1] به عنوان یکی از روش‌های معمول استفاده شده است. بنابراین، روش برای معیارهای با جنبهٔ مثبت، مجموعه اعداد (۱، ۳، ۵، ۷، ۹) معادل مجموعهٔ کیفی (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم) است. ارزش‌های ۲، ۴، ۶، ۸ ارزش‌های واسطه بین دو ارزش دیگر هستند برای معیارهای با جنبهٔ منفی نیز فقط نسبت‌ها در دو مجموعهٔ یادشده برعکس می‌شود.

ب) نرمال‌سازی داده‌ها: ماتریس تصمیم اغلب شاخص‌های مثبت و منفی در کنار همدیگر دارد. علاوه بر این، هر یک از شاخص‌های کمی مقیاس‌های خاصی دارند. به همین دلیل، نیاز است تا قبل از انجام محاسبات در ماتریس تصمیم عمل نرمال‌سازی داده‌ها صورت پذیرد. البته، روش نرمال‌سازی تأثیر بسیار زیادی روی نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دارد [۲۶]. در تحقیق حاضر برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطهٔ ۱ استفاده شد:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} {x_{ij}}^2}} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ یادشده x_{ij} و f_{ij} به‌ترتیب عملکرد گزینهٔ i ام روی معیار j ام و امتیاز نرمال‌شدهٔ گزینهٔ i ام روی معیار j ام، است.

روش وزن‌دهی ساده[2]

در این روش پس از نرمال کردن داده‌ها توسط رابطهٔ ۱، با استفاده از ضرایب وزنی معیارها، ماتریس تصمیم بی‌مقیاس‌شدهٔ وزن‌دار به دست می‌آید. ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب ماتریس تصمیم در ماتریس وزن معیارها حاصل می‌شود. سپس، با توجه به این ماتریس، امتیاز هر گزینه از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$A_i = \sum_{j=1}^{m} w_j f_{ij} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ یادشده f_{ij}، w_j و A_i به‌ترتیب امتیاز نرمال‌شدهٔ گزینهٔ i ام روی معیار j ام، وزن معیار j ام و شاخص مجموع امتیاز وزن‌دار شدهٔ گزینهٔ i ام است. در نهایت نیز گزینه‌ها بر اساس امتیازهای به‌دست‌آمده از رابطهٔ یادشده رتبه‌بندی می‌شوند. گزینه‌ای به عنوان گزینهٔ برتر شناخته

1. Bipolar Scale
2. Simple Additive Weighting: SAW

می‌شود که شاخص مجموع امتیاز وزن‌دارشدهٔ آن گزینه، از سایر گزینه‌ها بیشتر باشد.

روش برنامه‌ریزی توافقی[1]

در این روش اولویت‌بندی و امتیازدهی به گزینه‌ها، بر اساس فاصلهٔ آنها از جواب ایده‌آل انجام می‌گیرد. گزینه‌ای که فاصلهٔ کمتری نسبت به جواب ایده‌آل داشته باشد، اولویت بیشتری نسبت به سایر گزینه‌ها خواهد داشت. فاصله از جواب ایده‌آل ($L_p(A_i)$) برای هر گزینه طبق رابطهٔ ۳ قابل محاسبه است:

$$L_p(A_i) = \left[\sum_{j=1}^{n}\left(u_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}\right)^p\right]^{1/p} \quad (۳)$$

در رابطهٔ یادشده f_j^*، f_j^- و u_j به‌ترتیب جواب ایده‌آل، جواب ضد ایده‌آل و شکل استانداردشده وزن معیار j ام هستند که از روابط ۴ـ ۶ به دست آمده است. f_{ij} نیز بیانگر امتیاز نرمال‌شدهٔ گزینهٔ i ام روی معیار j ام است.

$$f_j^* = max\ f_{ij} \quad (۴)$$

$$f_j^- = min\ f_{ij} \quad (۵)$$

$$u_j = \frac{w_j}{\sum w_j} \quad (۶)$$

در مدل برنامه‌ریزی توافقی P پارامتری است که از یک تا ∞ تغییر می‌کند و به نظر تصمیم‌گیرنده و حساسیت او نسبت به حداکثر انحراف قابل قبول در محاسبات بستگی دارد. هرچه مقدار آن بیشتر باشد، حساسیت بیشتر خواهد بود. در تحقیق حاضر با انتخاب مقادیر مختلف برای پارامتر P، نتایج روش برنامه‌ریزی توافقی بر اثر این تغییرات، تحلیل حساسیت شده است.

روش تحلیل سلسله‌مراتبی[2]

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از تکنیک‌های قدرتمند تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با تجزیهٔ مسائل مشکل و پیچیده، آنها را به شکلی ساده تبدیل می‌کند و به حل آنها می‌پردازد. حل یک مسئله به روش تحلیل سلسله‌مراتبی طی سه مرحله انجام می‌شود: اول ساختن مدل سلسله‌مراتبی، دوم محاسبهٔ وزن و سوم سازگاری سیستم [۲۷]. نخستین قدم در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ساختن نمودار سلسله‌مراتبی مسئله است، که معمولاً به‌ترتیب در آن هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. نمودار سلسله‌مراتبی در تحقیق حاضر، چهار سطح دارد: سطح نخست مربوط به هدف است که انتخاب بهینهٔ ساختگاه احداث سد است. در دومین سطح، معیارهای اصلی مؤثر بر انتخاب ساختگاه احداث سد، در سومین سطح، معیارهای فرعی و درنهایت، در چهارمین سطح گزینه‌های مختلف احداث سد قرار دارند. در مرحلهٔ بعد عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسهٔ زوجی به دست می‌آید. در این مقایسه‌ها، برای ترجیح یک معیار یا گزینه به معیار یا گزینهٔ دیگر ارزش‌هایی بین ۱ تا ۹ تعلق می‌گیرد. با استفاده از ماتریس مقایسهٔ زوجی، وزن عناصر هر سطح محاسبه می‌شود. این وزن‌ها را وزن نسبی[3] می‌نامند. در نهایت نیز با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌شود. وزن معیارها، منعکس‌کنندهٔ اهمیت آنها در تعیین هدف است. وزن هر گزینه نسبت به معیارها، سهم آن گزینه در معیار مربوط است. بنابراین، وزن نهایی[4] هر گزینه از مجموع حاصل ضرب وزن هر معیار در وزن گزینه‌ها به دست می‌آید [۲۸]. روش‌های مختلفی برای محاسبهٔ وزن نسبی بر اساس ماتریس مقایسهٔ زوجی وجود دارد که از بین آنها روش بردار ویژه[5] که در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده شده دقیق‌تر است.

در روش بردار ویژه W_iها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که روابط ۷ تا ۹ صادق باشند. در این روابط a_{ij} ترجیح عنصر i ام بر j ام است و W_i وزن عنصر i ام و λ یک عدد ثابت است.

$$\begin{aligned} &a_{11}W_1 + a_{12}W_2 + \cdots + a_{1n}W_n = \lambda . W_1 \\ &a_{21}W_1 + a_{22}W_2 + \cdots + a_{2n}W_n = \lambda . W_2 \\ &\vdots \\ &a_{n1}W_1 + a_{n2}W_2 + \cdots + a_{nn}W_n = \lambda . W_n \end{aligned} \quad (۷)$$

این روش نیز نوعی میانگین‌گیری است، زیرا در این روش وزن عنصر i ام طبق تعریف برابر است با:

1. Compromise Programming: CP
2. Analytical Hierarchy Process: AHP
3. Local Priority
4. Overall Priority
5. Eigenvector Method

$$W_i = \frac{1}{\lambda}\sum_{i=1}^{n} a_{ij}\, W_j \qquad i=1,2,\ldots,n \qquad (۸)$$

دستگاه معادلات یادشده را می‌توان به صورت رابطهٔ ۹ نوشت:

$$A \times W = \lambda . W \qquad (۹)$$

که A همان ماتریس مقایسهٔ زوجی (یعنی $A = [a_{ij}]$) و W بردار وزن و λ یک اسکالر (عدد) است.

یکی از مزایای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی کنترل سازگاری تصمیم است. به بیان دیگر، همواره در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی می‌توان میزان سازگاری تصمیم را محاسبه کرد و نسبت به قابل قبول یا مردود بودن آن قضاوت کرد. در حالت کلی می‌توان گفت که میزان قابل قبول سازگاری یک ماتریس بسته به نظر تصمیم‌گیرنده دارد. اما ساعتی، عدد ۰/۱ را به عنوان حد قابل قبول ارائه می‌کند و معتقد است چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد بهتر است در قضاوت‌ها تجدید نظر شود [۲۹]، که در تحقیق حاضر نیز همین مقدار به عنوان حد قابل قبول لحاظ شده است.

در تحقیق حاضر برای استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، نرم‌افزار Expert Choice 2000 به کار گرفته شد. این نرم‌افزار یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس مدل تحلیل سلسله‌مراتبی است که علاوه بر امکان طراحی نمودار سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری، تعیین ترجیحات و اولویت‌ها و محاسبهٔ وزن نهایی، قابلیت تحلیل حساسیت تصمیم‌گیری نسبت به تغییرات در معیارها را نیز دارد [۳۰].

یکی دیگر از قابلیت‌های این نرم‌افزار که در تحقیق حاضر به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است، دریافت داده‌های مربوط به اولویت‌های معیارها و عملکرد گزینه‌ها در هر زیرمعیار و انجام مقایسات زوجی توسط خود نرم‌افزار است. بزرگ‌ترین مشکل در فرایند حل یک مسئله تحلیل سلسله‌مراتبی به‌ویژه در حالت تصمیم‌گیری گروهی، ارائهٔ اطلاعات در قالب ماتریس مقایسات زوجی است. چرا که همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، به دلیل طولانی بودن ارائهٔ اطلاعات در ماتریس مقایسات زوجی، کارشناسان اغلب تمایلی به مراحل خسته‌کننده و طولانی ارائهٔ اطلاعات در این روش‌ها نداشته که این روند سبب افزایش احتمال بروز خطا و میزان ناسازگاری در ارائهٔ اطلاعات به محقق، توسط کارشناسان می‌شود. در تحقیق حاضر برای حل این مشکل و کاهش خطای احتمالی، سعی شد تا از قابلیت‌های نرم‌افزار Expert Choice استفاده شود. به همین منظور، روش کار به صورتی تغییر داده شد که انجام مقایسات زوجی توسط نرم‌افزار انجام شده و نتیجه برای حصول اطمینان از صحت و دقت آن با روش‌های معمول مقایسه شد.

روش کار در تحقیق حاضر به این ترتیب است که در مرحلهٔ اول به کمک دیدگاه‌های کارشناسان پس از انتخاب معیارهای مؤثر در انتخاب ساختگاه سد، این معیارها وزن‌دهی و اولویت‌بندی شد. در مرحلهٔ بعد با روشی که در ابتدای بخش مواد و روش‌ها بیان شد معیارهای کیفی به کمی تبدیل شده و عملکرد کلیهٔ گزینه‌ها نسبت به هریک از معیارها مشخص شد. سپس، این اولویت‌بندی‌ها چه در سطح معیارها و چه در سطح عملکرد گزینه‌ها در نرم‌افزار به طور مستقیم وارد شد. سپس، مقایسات زوجی مربوط به این اولویت‌بندی‌ها توسط نرم‌افزار انجام شد و در نهایت نیز و با روش بردار ویژه، وزن نسبی معیارها محاسبه شد. در مرحلهٔ بعد با تلفیق اوزان نسبی، وزن نهایی هر گزینه تعیین شد. درخور یادآوری است که پس از رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل AHP با تغییر وزن معیارها، میزان تأثیر آنها در انتخاب گزینهٔ مطلوب نشان داده شده و نتایج بر اساس شیب نمودار تحلیل حساسیت شده است [۳۱]. توضیحات لازم در این خصوص در بخش نتایج ارائه خواهد شد. از دیگر مزایای انجام مقایسات زوجی توسط نرم‌افزار می‌توان به کاهش میزان ناسازگاری به صفر اشاره کرد. چرا که ناسازگاری در مقایسات زوجی ناشی از خطای انسانی هنگام انجام این مقایسات است و بیشتر به دلایلی اتفاق می‌افتد که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد. به این‌ترتیب، با انجام مقایسات زوجی توسط نرم‌افزار میزان خطا و در نتیجه، میزان ناسازگاری به صفر کاهش می‌یابد.

ارزیابی میزان توافق

یکی از موارد مهم در تصمیم‌گیری گروهی و بررسی پایدار بودن نتایج آن، توافق میان تصمیم‌گیران است. در صورتی که اتفاق نظر در میان افراد تصمیم‌گیر از حد معینی کمتر

باشد، می‌توان با شناسایی معیارهای مورد اختلاف و انجام مذاکرات مؤثر میان ذی‌نفع‌ها، نتایج را بهبود داد و تصمیم‌گیری را پایدار کرد [۳۲]. به همین منظور، در مقالهٔ حاضر برای اندازه‌گیری میزان توافق میان تصمیم‌گیران از رابطهٔ ۱۰ به صورت زیر استفاده می‌شود [۳۳]:

$$C(DM_i) = 1 - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \left|D_i(A_j) - GD(A_j)\right|^{\alpha} \qquad (۱۰)$$

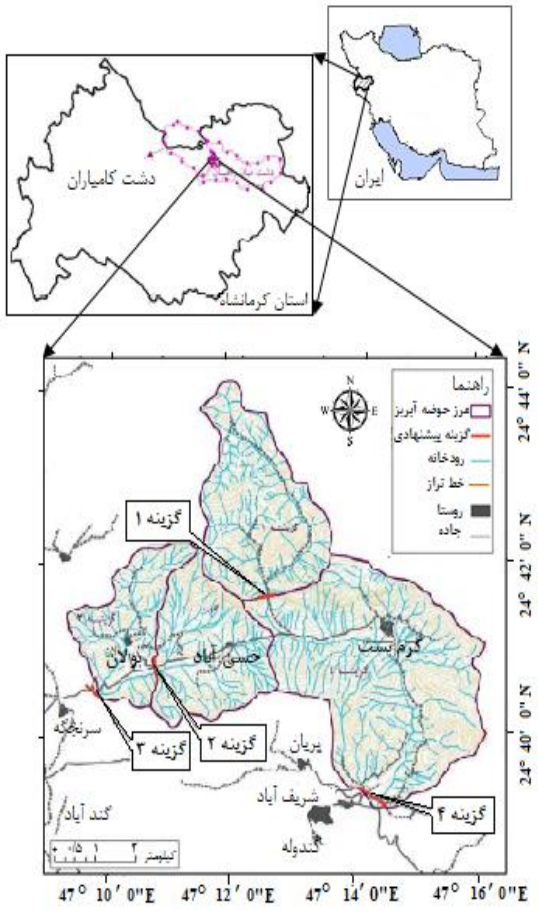
در رابطهٔ یادشده $C(DM_i)$ میزان توافق بین دیدگاه‌های تصمیم‌گیر iام با نظر گروه است. $D_i(A_j)$ نظر تصمیم‌گیر یا ذی‌نفع iام روی مؤلفهٔ jام و $GD(A_j)$ مقدار عددی تصمیم گروه روی مؤلفهٔ jام است. n تعداد مؤلفه‌های ماتریس تصمیم و α نیز پارامتری است که اهمیت میزان اختلاف‌ها را نشان می‌دهد، به طوری که با افزایش آن تأثیر اختلاف‌های بیشتر، زیادتر می‌شود. آستانهٔ حداقل درجهٔ توافق قابل قبول برای نتایج تصمیم‌گیری گروهی، حدود مقدار ۰/۶ است [۳۴].

موقعیت طرح

منطقهٔ مطالعاتی در غرب ایران در استان کرمانشاه و در حد فاصل عرض جغرافیایی ´۳۹،°۳۴ تا ´۴۲، °۳۴ شمالی و طول جغرافیایی ´۹، ° ۴۷ تا ´۱۶، ° ۴۷ شرقی و بین شهرستان‌های سنقر و کامیاران واقع شده است. بر اساس بازدیدهای انجام‌شده، چهار گزینه برای ساختگاه سد کندوله در نظر گرفته شد. منطقهٔ مطالعه‌شده مشتمل بر چهار زیرحوضه است که آبراههٔ اصلی زیرحوضه‌های گزینهٔ ۱ و ۴ به رودخانهٔ نیاور و آبراههٔ اصلی زیرحوضه‌های گزینهٔ ۲ و ۳ به رودخانهٔ رازآور منتهی می‌شود و هر دو از زیرحوضه‌های رودخانهٔ قره‌سو هستند. در شکل ۱ موقعیت تقریبی این چهار ساختگاه ارائه شده است. گزینهٔ ساختگاه ۱ در بالادست روستاهای کرم بست، پریان، شریف‌آباد و کندوله و گزینهٔ ۲و ۳ در بین روستاهای بولان، جذر، درآب و سرنجگه و گزینهٔ ۴ در بالادست روستاهای پریان، شریف‌آباد و کندوله واقع شده‌اند. هر یک از این گزینه‌ها از نظر فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مزایا و معایب مختلفی دارند که در مقالهٔ حاضر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

معیارهای مطرح برای تصمیم‌گیری گروهی

یکی از قسمت‌های مهم پژوهش حاضر، تعیین معیارهای مؤثر برای انتخاب ساختگاه سد است. در تحقیق حاضر نیز برای این منظور با مطالعهٔ طرح‌ها، تحقیقات و مقالات گوناگون در این زمینه و استفاده از دیدگاه‌های کارشناسان امر سدسازی در کشور، مجموعه عوامل مؤثر بر انتخاب ساختگاه سد در چهار گروه معیارهای اصلی توسعهٔ پایدار (فنی-اجرایی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) در قالب ۱۷ زیرمعیار بررسی شدند که در جدول ۱ معرفی شده‌اند [۳۵ـ ۳۷].



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مطالعاتی

جدول ۱. معرفی معیارهای توسعهٔ پایدار و زیرمعیارهای بررسی‌شده در طرح

معیارهای اصلی توسعهٔ پایدار	زیرمعیارها	توضیح
فنی - اجرایی	توپوگرافی و حجم مخزن پشت سد	این زیرمعیار نسبت حجم مخزن به حجم عملیات خاکی یا بتنی را برای گزینه‌ها به منظور مقایسهٔ ساختگاه‌ها استفاده می‌کند.
	زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه و مخزن	در این زیرمعیار (کیفی) ویژگی‌هایی همچون مقاومت پی (از نظر باربری)، آب‌بندی ساختگاه، آب‌بندی مخزن، نبود مخاطرات زمین‌شناسی مانند لغزش زمین در دیواره‌های مخزن، عبور گسل از مخزن، عبور گسل از ساختگاه، برای شیب لایه‌های زمین‌شناسی ساختگاه در پی و دیواره (که به ضعف آب‌بندی منجر می‌شود) و وجود لنزهای ماسه‌ای بررسی شده است.
	هیدرولوژی	در این زیرمعیار نسبت آبدهی رودخانه به حجم مخزن برای مقایسهٔ گزینه‌ها به کار رفته است.
	مدیریت منابع آب	در این زیرمعیار کمی، درصد تأمین آب کشاورزی (میلیون مترمکعب) به تفکیک گزینه‌ها برای تحلیل و مقایسهٔ ساختگاه‌ها از نظر مدیریت نیازها بررسی شده است.
	بار رسوب ورودی به مخزن	نسبت حجم رسوب سالانه (تن در سال) به آبدهی سالانه (میلیون مترمکعب در سال) برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده شده است.
	شرایط سرریز	این زیرمعیار مناسب بودن توپوگرافی گزینه‌ها برای احداث سرریز در کنار سد را به صورت کیفی ارزیابی می‌کند.
	امکان و شرایط انحراف رودخانه	این زیرمعیار امکان انحراف رودخانه هنگام ساخت سد را به صورت کیفی ارزیابی می‌کند.
	دسترسی به خطوط حیاتی	دسترسی آسان گزینه‌ها به آب آشامیدنی، برق، گاز، تلفن و راه‌های آسفالته بررسی شده است.
	امکان مهار سیلاب	زیرمعیاری که در این مورد بررسی می‌شود جمعیت ساکن در پایین‌دست هریک از ساختگاه‌های احداث سدهاست.
	وضعیت آب و هوایی	بارش طولانی و یخبندان جلوی عملیات اجرایی پروژه را می‌گیرد. ساختگاه‌ها از این لحاظ بررسی شده‌اند.
	امکان احداث کارگاه برای ساخت سد	این زیرمعیار نیز از شاخص‌های کیفی است و شرایط هریک از ساختگاه‌ها برای احداث کارگاه را به صورت کیفی ارزیابی می‌کند.
اقتصادی	نسبت فایده به هزینه	برای اطمینان خاطر از اقتصادی بودن پروژه نسبت فایده به هزینه هر ساختگاه استفاده شده است.
	منابع قرضهٔ موجود	در این زیرمعیار دسترسی آسان به منابعی همچون خاک‌های ریزدانه، مخلوط برای بدنه سد، شن و ماسه برای بتن، میل گرد و آب و.. ملاک عمل قرار گرفته است.
	غرقابی شدن اراضی و خسارت مخزن	منظور از خسارت مخزن، ارزش مالی زمین های کشاورزی، جاده، خطوط حیاتی (آب، برق، گاز، تلفن)، آثار باستانی، فرهنگی و مذهبی، منازل مسکونی و... است که در مخزن غرقاب خواهند شد.
اجتماعی	مقبولیت اجتماعی و پذیرش افراد بومی	نسبت اشتغال‌زایی دائم و موقت به تعداد بیکار در مناطق تحت پوشش گزینه‌ها، به عنوان زیرمعیار کمی مقبولیت اجتماعی برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده شده است.
	موقعیت اراضی آبیاری	مساحت اراضی دیم موجود نسبت به اراضی کشاورزی آبی و مساحت اراضی توسعه، برای مقایسهٔ ساختگاه‌ها مد نظر قرار گرفته است.
زیست‌محیطی	آثار زیست‌محیطی و تفرجگاه	این زیرمعیار کیفی است و جاذبهٔ تفرجگاهی و آثار زیست‌محیطی گزینه‌ها را ارزیابی می‌کند.

نتایج و بحث

تصمیم‌گیری گروهی و ارزیابی میزان توافق

در تحقیق حاضر برای تعیین وزن هریک از زیرمعیارها از ۳۰ نفر از کارشناسان بخش آب در سطوح مختلف نظرخواهی شد. شایان یادآوری است دیدگاه‌های این افراد به عنوان قضاوت مهندسی بوده و مبتنی بر اطلاع از شرایط تصمیم‌گیری در این مسئله است. سپس، میزان توافق هر یک از آنها محاسبه شد. در نهایت نیز وزن معیارها با استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی (محاسبهٔ میانگین دیدگاه‌های تصمیم‌گیرندگان) به دست آمد. نتیجهٔ دیدگاه‌های کارشناسان در جدول ۲ نشان داده شده است.

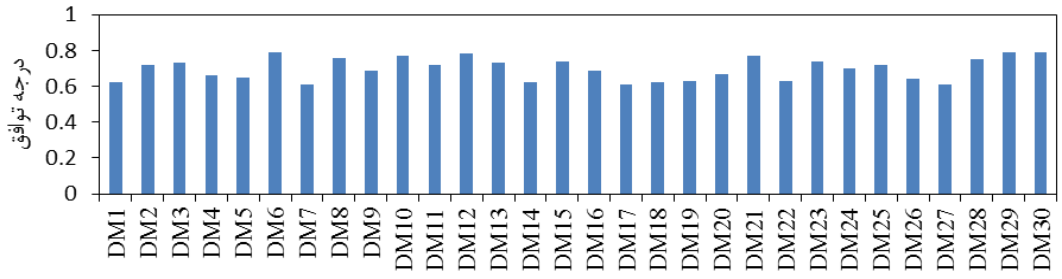
سپس، در مرحلهٔ بعد میزان توافق تصمیم‌گیران با نظر گروهی ارزیابی شد. در شکل ۲ میزان توافق هریک از تصمیم‌گیران با تصمیم گروهی با فرض $\alpha=1$ و با استفاده از رابطهٔ ۱۲ نمایش داده شده است. همان طور که پیش‌تر نیز بیان شد، آستانهٔ حداقل درجهٔ توافق قابل قبول برای نتایج تصمیم‌گیری گروهی، حدود ۰/۶ است. با توجه به شکل ۲ نتایج محاسبات نشان می‌دهد اجماع کافی بین هر یک از تصمیم‌گیران با تصمیم گروهی وجود دارد. بنابراین، نتایج تصمیم‌گیری گروهی در رابطه با مقادیر وزن معیارها (جدول ۲) قابل قبول است.

اولویت‌بندی ساختگاه‌ها

در این قسمت چهار گزینهٔ پیشنهادی برای ساختگاه سد، به وسیلهٔ روش‌های معرفی‌شده در بخش‌های قبلی تحلیل شد. ابتدا در جدول ۳ مقادیر ارزیابی ساختگاه‌ها در هر زیرمعیار نمایش داده شده است. در ستون دوم این جدول، معیار و در ستون سوم شاخص ارزیابی مربوط به آن معیار نشان داده شده است. شاخص ارزیابی در معیارهای کیفی، شامل مجموعه‌ای از عوامل مؤثر در ارزیابی آن معیار بوده که در جدول ۱ بیان شده است. ارزیابی در این معیارها با توجه به مطالب یادشده و دیدگاه‌های کارشناسی به صورت متغیرهای بیانی صورت گرفته است. درخور یادآوری است در معیار هفتم، فاصلهٔ حمل لحاظ‌شده برای منابع قرضه شامل میانگین وزنی فواصل منابع قرضه مورد نیاز در طرح، با ضرایب وزنی به شرح درشت‌دانه ۰/۶، ریزدانه ۰/۲۵، سنگ ۰/۰۵، فولاد ۰/۰۵ و سیمان ۰/۰۵ است.

جدول ۲. مقادیر نرمال‌شدهٔ وزن معیارها حاصل از تصمیم‌گیری گروهی

ردیف	معیار	وزن معیار	ردیف	معیار	وزن معیار
۱	توپوگرافی و حجم مخزن پشت سد	۰/۰۷۲	۱۰	امکان مهار سیلاب	۰/۰۶۰
۲	زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه و مخزن	۰/۰۷۴	۱۱	موقعیت اراضی آبیاری	۰/۰۵۷
۳	هیدرولوژی	۰/۰۷۱	۱۲	امکان احداث کارگاه برای ساخت سد	۰/۰۴۷
۴	مدیریت منابع آب	۰/۰۶۱	۱۳	وضعیت آب و هوایی	۰/۰۴۶
۵	بار رسوب ورودی به مخزن	۰/۰۶۱	۱۴	دسترسی به خطوط حیاتی	۰/۰۴۷
۶	شرایط و محل سرریز	۰/۰۵۳	۱۵	آثار زیست‌محیطی و تفرجگاه	۰/۰۴۸
۷	منابع قرضه موجود	۰/۰۵۸	۱۶	مقبولیت اجتماعی و پذیرش افراد بومی	۰/۰۵۵
۸	امکان و شرایط انحراف رودخانه	۰/۰۵۶	۱۷	نسبت فایده به هزینه	۰/۰۷۵
۹	غرقابی شدن اراضی و خسارت مخزن	۰/۰۵۹			



شکل ۲. میزان توافق هریک از تصمیم‌گیران با تصمیم گروهی

جدول ۳. مقادیر ارزیابی ساختگاه‌ها بر اساس معیارهای بررسی‌شده در طرح

ردیف	معیار	شاخص ارزیابی	گزینه‌ها			
			ساختگاه ۱	ساختگاه ۲	ساختگاه ۳	ساختگاه ۴
۱	توپوگرافی و حجم مخزن پشت سد	نسبت حجم مخزن به حجم عملیات خاکی	۳/۸	۳/۱۵	۳/۹۸	۳/۸۲
۲	زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه و مخزن	معیار کیفی با توجه به مطالب جدول ۱	متوسط	مطلوب	مطلوب	مطلوب
۳	هیدرولوژی	نسبت آبدهی رودخانه به حجم مخزن	۱/۴	۲/۸	۲/۷۸	۱/۴۵
۴	مدیریت منابع آب	حجم تنظیم آب (میلیون مترمکعب)	۲	۱/۱۸	۱/۹۵	۵/۸۲
۵	بار رسوب ورودی به مخزن	نسبت بار رسوب کل به آبدهی رودخانه (یک‌هزارم)	۱/۶۵	۵/۴۸	۶/۵۰	۲/۲۴
۶	شرایط و محل سرریز	معیار کیفی با توجه به مطالب جدول ۱	نسبتا مناسب	نسبتا مناسب	مناسب	مناسب
۷	منابع قرضهٔ موجود	فاصلهٔ حمل برای منابع قرضه (کیلومتر)	۵۸/۲۷	۵۵/۲۷	۵۶/۹۵	۶۳/۷
۸	امکان و شرایط انحراف رودخانه	معیار کیفی با توجه به مطالب جدول ۱	آسان	متوسط	متوسط	کمی‌سخت
۹	غرقابی شدن اراضی و خسارت مخزن	هزینه کل خسارت مخزن (میلیون ریال)	۷۸۲	۲۷۸۸	۲۹۶۷	۱۳۷۷۱
۱۰	امکان مهار سیلاب	جمعیت تحت پوشش	۲۰۳۸	۸۷۸	۶۳۱	۱۴۰۰
۱۱	موقعیت اراضی آبیاری	مساحت اراضی کشاورزی (هکتار)	۲۱۹	۲۳۹	۴۰۹	۷۱۰
۱۲	امکان احداث کارگاه برای ساخت سد	معیار کیفی با توجه به مطالب جدول ۱	کمی‌سخت	آسان	آسان	متوسط
۱۳	وضعیت آب‌وهوایی	دمای متوسط ماهانه (درجهٔ سانتی‌گراد)	۱۰	۱۲	۱۲	۱۲
۱۴	دسترسی به خطوط حیاتی	فاصله تا نزدیک‌ترین روستا (کیلومتر)	۳/۶	۱	۰/۱۳	۰/۶
۱۵	آثار زیست‌محیطی و تفرجگاه	معیار کیفی با توجه به مطالب جدول ۱	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
۱۶	مقبولیت اجتماعی و پذیرش افراد بومی	ایجاد اشتغال در اراضی آبی	۳۸	۱۱۶	۲۰۳	۱۲۴
۱۷	نسبت فایده به هزینه	نسبت فایده به هزینه با نرخ بهره ۷ ٪	۲/۵۵	۱/۰۹	۱/۲	۲/۲۶

در این مرحله ابتدا برای حل مسئله به روش‌های وزن‌دهی ساده و برنامه‌ریزی توافقی با توجه به مطالب بخش مواد و روش‌ها مقادیر کیفی در جدول یادشده کمی‌سازی شد و سپس، برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطهٔ ۱ استفاده شد. برای ورود داده‌ها به این مدل‌ها ماتریس تصمیم نرمال‌شدهٔ وزن‌دار تشکیل شد. ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب ماتریس تصمیم در ماتریس وزن معیارها حاصل می‌شود. جدول ۴ ماتریس تصمیم نرمال‌شدهٔ وزن‌دار را نشان می‌دهد. که در آن A۱ تا A۱۷ به‌ترتیب نمایندهٔ معیارهای ۱ تا ۱۷ از جدول ۲ هستند. برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش سلسله‌مراتبی نیز با توجه به مقادیر جدول‌های ۲ و ۳، اولویت‌بندی معیارها و عملکرد گزینه‌ها در هر معیار مشخص شده و در این مرحله به کمک این داده‌ها و روشی که در بخش مدل تحلیل سلسله‌مراتبی تشریح شد، داده‌ها پس از آماده‌سازی، توسط نرم‌افزار Expert Choice 2000 برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش سلسله‌مراتبی تجزیه‌وتحلیل شد.

پس از انجام محاسبات، نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در جدول ۵ در ستون‌های دوم و ششم، به‌ترتیب امتیاز و وزن نهایی گزینه‌ها در مدل‌های وزن‌دهی ساده و تحلیل سلسله‌مراتبی مشخص شده و در ستون‌های مجاور آنها، رتبهٔ متناظر با آن امتیاز درج شده است. واضح است که امتیاز و وزن بیشتر، نشان‌دهندهٔ اولویت بیشتر است و موجب کسب رتبهٔ کمتر می‌شود. همچنین، در ستون چهارم جدول یادشده نیز برای هریک از گزینه‌ها فاصله از جواب ایده‌آل در مدل برنامه‌ریزی توافقی به ازای p برابر با ∞ مشخص شده و در کنار آن رتبهٔ متناظر با آن امتیاز درج شده است. در اینجا به دلیل آنکه فاصله از جواب ایده‌آل مد نظر است، فاصلهٔ کمتر نشان‌دهندهٔ اولویت بیشتر و در نتیجه، رتبه کمتر است. با توجه به جدول ۵ نتایج زیر حاصل می‌شود:

- در مدل وزن‌دهی ساده گزینهٔ چهارم با کسب امتیاز ۰/۵۱۶ بهترین گزینه و گزینهٔ دوم با کسب امتیاز ۰/۴۲۲ بدترین گزینه شناخته شده است. گزینه‌های سوم و اول

نیز به‌ترتیب با کسب امتیازهای ۰/۴۶۵ و ۰/۴۲۶ در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند.

- در مدل برنامه‌ریزی توافقی نیز به ازای مقدار پارامتر p معادل بی‌نهایت (با اعمال بیشترین حساسیت به حداکثر انحراف قابل قبول در محاسبات) رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها مشابه مدل وزن‌دهی ساده به دست آمده است و گزینه‌های چهارم، سوم، اول و دوم به‌ترتیب در اولویت‌های اول، دوم، سوم و چهارم برای ساخت سد قرار گرفتند.

- در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی گزینهٔ چهارم به عنوان گزینهٔ برتر شناخته شده و گزینه‌های سوم، اول و دوم نیز به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. این امر نشان‌دهندهٔ تطبیق نتایج به‌دست‌آمده از این مدل با مدل‌های وزن‌دهی ساده و برنامه‌ریزی توافقی است و بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روش به کار گرفته‌شده در تحقیق حاضر برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش تحلیل سلسله‌مراتبی نتیجه قابل قبولی داشته است.

جدول ۴. ماتریس تصمیم نرمال‌شدهٔ وزن‌دار

معیارها	گزینه‌ها				معیارها	گزینه‌ها			
	ساختگاه ۱	ساختگاه ۲	ساختگاه ۳	ساختگاه ۴		ساختگاه ۱	ساختگاه ۲	ساختگاه ۳	ساختگاه ۴
A1	۰/۰۳۷	۰/۰۳۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	A10	۰/۰۴۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۰/۰۳۱
A2	۰/۰۲۷	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	A11	۰/۰۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	۰/۰۴۶
A3	۰/۰۱۷	۰/۰۴۶	۰/۰۴۵	۰/۰۲۴	A12	۰/۰۰۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۰/۰۱۵
A4	۰/۰۱۹	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸	۰/۰۵۴	A13	۰/۰۲۰	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴
A5	۰/۰۱۱	۰/۰۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۱۵	A14	۰/۰۴۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷
A6	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	A15	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴
A7	۰/۰۲۹	۰/۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۰۳۲	A16	۰/۰۰۸	۰/۰۲۴	۰/۰۴۲	۰/۰۲۶
A8	۰/۰۴۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۰/۰۱۱	A17	۰/۰۵۰	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۴۵
A9	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۰۵۷					

جدول ۵. رتبهٔ نهایی گزینه‌ها در مدل‌های SAW،CP و AHP

گزینه‌ها	مدل‌ها					
	SAW		CP		AHP	
	امتیاز نهایی	رتبه	فاصلهٔ نهایی	رتبه	وزن نهایی	رتبه
گزینهٔ اول	۰/۴۲۶	۳	۰/۰۷۴	۳	۰/۲۵۱	۳
گزینهٔ دوم	۰/۴۲۲	۴	۰/۰۷۵	۴	۰/۲۲۶	۴
گزینهٔ سوم	۰/۴۶۵	۲	۰/۰۶۹	۲	۰/۲۵۹	۲
گزینهٔ چهارم	۰/۵۱۶	۱	۰/۰۵۹	۱	۰/۲۶۱	۱

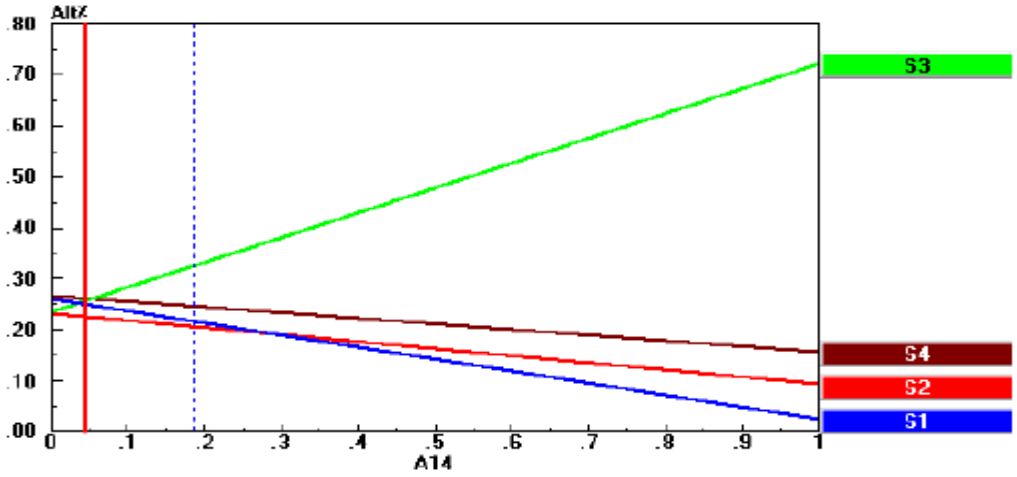
با توجه به اینکه در روش برنامه‌ریزی توافقی پارامتر p به نظر تصمیم‌گیرنده و حساسیت او نسبت به حداکثر انحراف قابل قبول در محاسبات بستگی دارد، به این منظور نتایج مدل برنامه‌ریزی توافقی نسبت به تغییرات پارامتر p برابر با ۲،۱ و ∞ تحلیل حساسیت شد و نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت در مدل برنامه‌ریزی توافقی نسبت به تغییرات پارامتر p نشان می‌دهد به ازای p برابر با ۱، رتبه‌بندی یادشده تغییر کرده و گزینهٔ سوم به جای گزینهٔ چهارم در اولویت اول قرار گرفته و گزینهٔ چهارم در اولویت دوم قرار می‌گیرد. این مسئله برای گزینه‌های اول و دوم نیز تکرار شده و اولویت این دو گزینه نیز نسبت به حالت قبل در مدل وزن‌دهی ساده جابه‌جا می‌شود. اما با افزایش مقدار p به ۲، دوباره گزینهٔ چهارم به اولویت اول و گزینهٔ سوم به اولویت دوم باز می‌گردد، ولی همچنان گزینه‌های اول و دوم به‌ترتیب در رتبه‌های چهارم و سوم باقی می‌مانند. در حالت p برابر با بی‌نهایت، اولویت گزینه‌های اول و دوم نیز به حالت اولیه در مدل وزن‌دهی ساده باز می‌گردد و در نهایت، اولویت‌بندی همهٔ گزینه‌ها

منطبق با حالت اول در مدل وزن‌دهی ساده می‌شود. همان طور که در روش برنامه‌ریزی توافقی شرح داده شد، پارامتر p در مدل برنامه‌ریزی توافقی به نظر تصمیم‌گیرنده و حساسیت او نسبت به حداکثر انحراف قابل قبول در محاسبات بستگی دارد و هر چه مقدار آن بیشتر باشد، حساسیت بیشتر خواهد بود. به بیان دیگر، به ازای p برابر با بی‌نهایت، بیشترین حساسیت به حداکثر انحراف قابل قبول در محاسبات وجود دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در مدل برنامه‌ریزی توافقی با افزایش مقدار پارامتر p و در نتیجه، افزایش حساسیت نسبت به حداکثر انحراف قابل قبول، نتایج به واقعیت نزدیک‌تر شده و نتایج به‌دست آمده به دلیل انطباق با نتایج سایر مدل‌ها دقیق‌تر است.

پس از تعیین رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها توسط مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، تحلیل حساسیت نتایج بر اساس شیب نمودار صورت گرفت. در این حالت برای هر یک از معیارها یک نمودار ارائه می‌شود. این نمودارها اولویت‌های مربوط به گزینه‌ها و تغییرات آن‌ها را با توجه به یک معیار خاص نشان می‌دهند. در این نمودار، وزن معیار توسط یک خط عمودی ممتد پررنگ نشان داده شده است (شکل ۳). وزن این معیار در هر یک از گزینه‌ها در محل تلاقی خط شیب‌دار مربوط به هر گزینه با این خط عمودی، از روی محور سمت چپ خوانده می‌شود. برای مشاهدهٔ حساسیت گزینه‌ها روی معیار مد نظر، می‌توان خط عمودی را جابه‌جا کرد که شرایط جدید به صورت خط‌چین عمودی در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از اعمال تغییرات افزایشی و یا کاهشی در وزن معیارها مشاهده شد که با تغییر وزن بیشتر معیارها تغییر معناداری در رتبه‌بندی ساختگاه‌ها ایجاد نمی‌شود. تغییر وزن معیار چهاردهم یعنی دسترسی به خطوط حیاتی رتبه‌بندی ساختگاه‌ها را تغییر داده که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۶. تحلیل حساسیت نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل برنامه‌ریزی توافقی به ازای تغییر مقادیر پارامتر P

گزینه‌ها	مدل برنامه‌ریزی توافقی					
	$p=1$		$p=2$		$p=\infty$	
	فاصلهٔ نهایی	رتبه	فاصلهٔ نهایی	رتبه	فاصلهٔ نهایی	رتبه
گزینهٔ اول	۰/۵۸۴	۴	۰/۱۷۸	۴	۰/۰۷۴	۳
گزینهٔ دوم	۰/۵۰۰	۳	۰/۱۶۶	۳	۰/۰۷۵	۴
گزینهٔ سوم	۰/۳۳۶	۱	۰/۱۳۲	۲	۰/۰۶۹	۲
گزینهٔ چهارم	۰/۳۵۵	۲	۰/۱۲۶	۱	۰/۰۵۹	۱



شکل ۳. نمایش گرافیکی تحلیل حساسیت مدل تحلیل سلسله‌مراتبی بر اساس شیب نمودار

بر اساس شکل ۳ مشاهده می‌شود شیب نمودار گزینهٔ سوم مثبت است. به این معنا که گزینهٔ سوم نسبت به معیار دسترسی به خطوط حیاتی بیشترین حساسیت را دارد که با افزایش وزن این معیار، گزینهٔ سوم به رتبهٔ اول و گزینهٔ چهارم را به رتبهٔ دوم انتقال می‌دهد. در حالی که گزینه‌های اول و دوم نسبت به تغییرات وزن این معیار حساس نیستند و همچنان در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند. شیب منفی در ساختگاه‌های چهارم، دوم و اول نشان‌دهندهٔ کاهش وزن نهایی این گزینه‌ها در صورت افزایش وزن این معیار است.

بر اساس تحقیقات قبل، بسیاری از محققان کارایی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را در مسائل مدیریت منابع آب [۳۸ و ۳۹]، مسائل زیست‌محیطی [۴۰ــ ۴۲]، مدیریت پسماند [۴۳]، مدیریت اراضی و زمین‌شناسی [۴۴] و مدیریت جنگل‌داری [۴۵] در شرایطی که مسئلهٔ تصمیم‌گیری متأثر از مجموعه عوامل متعدد است، نشان دادند. علاوه بر این، قابلیت روش تحلیل سلسله‌مراتبی توسط محققان مختلف در مسائل مختلف مکان‌یابی از جمله مکان‌یابی تغذیهٔ مصنوعی [۴۶]، مکان‌یابی سدهای زیرزمینی [۴۷]، مکان‌یابی زمین‌لغزش [۴۸]، مکان‌یابی مزارع خورشیدی در ترکیه [۴۹]، و مکان‌یابی سد [۵۰ و ۵۱]، نشان داده شده است. بنابراین، با توجه به وسعت مطالعات انجام‌شده توسط روش‌های مختلف مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره در زمینه‌های مختلف مدیریتی، زیست‌محیطی و علوم طبیعی، در تحقیق حاضر نیز علاوه بر روش تحلیل سلسله‌مراتبی، کارایی دیگر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند مدل برنامه‌ریزی توافقی و مدل وزن‌دهی ساده برای شناسایی بهترین گزینهٔ ساختگاه سد ارزیابی و تأیید شده است.

نتیجه‌گیری

در مقالهٔ حاضر اهمیت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب ساختگاه برتر از بین ۴ ساختگاه پیشنهادی برای سد کندوله براساس معیارهای توسعهٔ پایدار بررسی شد. سپس، با توجه به تأثیر معیارهای مختلف در انتخاب ساختگاه بهینهٔ سد و نیز لحاظ تصمیم‌گیرانی با نگرش‌های مختلف، ابتدا برای استخراج وزن معیارها از تصمیم‌گیری گروهی استفاده شد. سپس، برای اولویت‌بندی گزینه‌ها از سه روش مطرح تصمیم‌گیری چندمعیاره وزن‌دهی ساده، برنامه‌ریزی توافقی و تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. در تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار Expert Choice 2000 برای سهولت انجام مقایسات زوجی و همچنین، کاهش میزان ناسازگاری و افزایش دقت در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شود. نتایج نشان داد گزینهٔ چهارم، با کسب رتبهٔ اول در همهٔ روش‌ها گزینهٔ برتر است. گزینه‌های سوم، اول و دوم نیز به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی با روش به کار گرفته‌شده در تحقیق حاضر با نتایج سایر مدل‌ها مطابقت دارد و با تغییر وزن بیشتر معیارها، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها نسبت به حالت اولیه تغییر نکرد. به علاوه، نتایج تحلیل حساسیت در مدل برنامه‌ریزی توافقی نشان داد جواب‌ها با افزایش مقدار پارامتر p و در نتیجه، افزایش حساسیت نسبت به حداکثر انحراف قابل قبول، به واقعیت نزدیک‌تر شده و نتایج حاصل به دلیل انطباق با نتایج سایر مدل‌ها دقیق‌تر است. نتایج حاصل از تصمیم‌گیری گروهی نیز مبین این مطلب است که با توجه به دیدگاه‌های کارشناسان در انتخاب ساختگاه سد، بیشترین امتیاز در بین معیارهای توسعهٔ پایدار سدسازی از نظر متخصصان به معیار اقتصادی تعلق دارد. پس از آن، اهمیت معیارهای توسعهٔ پایدار در انتخاب ساختگاه سد به‌ترتیب زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه و مخزن، توپوگرافی و حجم مخزن پشت سد، هیدرولوژی، مدیریت منابع آب، بار رسوب مخزن، امکان مهار سیلاب، غرقابی شدن اراضی و خسارت مخزن، منابع قرضهٔ موجود، موقعیت اراضی آبیاری، امکان انحراف رودخانه، مقبولیت اجتماعی و پذیرش افراد بومی، شرایط و محل سرریز، آثار زیست‌محیطی و تفرجگاه، امکان احداث کارگاه، دسترسی به خطوط حیاتی و وضعیت آب‌وهوایی است. روش و معیارهای ارائه‌شده در این مقاله می‌توانند در ارزیابی ساختگاه‌های سدها براساس اهداف توسعهٔ پایدار استفاده شود.

منابع

[1]. Zarghami M, Ardakanian R, Modarres Yazdi M. Ranking the inter-basin water transfers using induced ordered weighted averaging operator. 2007; 23(37): 99-109. [Persian]

[2]. Sadeghpour A.H, Raeisy A.A. Using the Multi-Criteria Evaluation Method (AHP) in selecting the optimal site of dam (case study Qarachai dam). The first international project management conference, Tehran, 2004. pp. 1-8. [Persian]

[3]. Yousefi M, Farokhzadeh B, Basati S. Prioritization of potential areas for construction of underground dam using geometric average method in geographical information system. Iranian journal of Ecohydrology. 2017; 4(3): 663-672.

[4]. Bagherzadeh M, Mohammadi Saeid A, Jabari E. Optimal ranking water resource development projects using multi-criteria decision making models, The Second Iranian Water Resources Management Conference, Iran University of Science and Technology. 2006. pp. 1-8. [Persian]

[5]. Hwang CL, Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making. Springer, Berlin: Heidelberg; 1981.

[6]. Szidaroszky F, Gershon M, Duckstein L. Hydropower development priority using MCDM method. 1986. Elsevier, Amsterdam.

[7]. Zeleny M. Compromise Programming. In: Cochrane, j.L. and M. Zeleny (eds.), Multiple Criteria Decision Making, University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina; 1973.p.263-301.

[8]. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource, Allocation. RWS publication, New York: McGraw-Hill; 1980.

[9]. Bashiri M. multi-criteria decision making. 1nd ed. University of Shahed; 2011. [Persian]

[10]. Lund JR. Derived estimation of willingness to pay to avoid probabilistic shortage. Water Resources Research. 1995; 31(5):1367-72.

[11]. Anagnostopoulos K, Petalas C, Pisinaras V. Water resources planning using the ahp and promethee multicriteria methods: The case of nestos river-Greece. The 7th Balkan Conference on Operational Research, Constanta, Romania; 2005. pp. 1-10.

[12]. Özelkan EC, Duckstein L. Analysing water resources alternatives and handling criteria by multi criterion decision techniques. Journal of environmental management. 1996; 48(1): 69-96.

[13]. Ramanathan R. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. Journal of environmental management. 2001; 63(1): 27-35.

[14].Nigim K, Munier N, Green J. Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. Renewable energy. 2004; 29(11): 1775-91.

[15]. Tiknioune A, Elfazziki A, Agouti T. An hybrid model of MCDA for the GIS: application to the localization of a site for the implantation of a dam. WSEAS Transactions on Computers. 2006; 5(3):515-20.

[16]. Willett K, Sharda R. Using the analytic hierarchy process in water resources planning: Selection of flood control projects. Socio-Economic Planning Sciences. 1991; 25(2): 103-12.

[17]. Mass A, Hufschmidt MM, Dorfman R, Thomas Jr HA, Marglin SA, Fair GM. Design of water resources systems. Pub. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts. 1962.

[18]. Simonovic SI. Decision support systems for sustainable management of water resources: 1. General principles. Water International. 1996; 21(4): 223-32.

[19]. Meshram SG, Alvandi E, Meshram C, Kahya E, Al-Quraishi AM. Application of SAW and TOPSIS in Prioritizing Watersheds. Water Resources Management. 2020; 2:1-18.

[20]. Othman AA, Al-Maamar AF, Al-Manmi DA, Liesenberg V, Hasan SE, Obaid AK, Al-Quraishi AM. GIS-Based Modeling for Selection of Dam Sites in the Kurdistan Region, Iraq. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020; 9(4): 1-34.

[21]. Sardar Shahraki A, Bazrafshan O. Integrated Water Resources Management with Emphasis on the Economic-Environmental Aspects of the Kahir Dam. Iranian journal of Ecohydrology. 2019; 6(2): 267-279.

[22]. Mohammadi P, Malekian A. Prioritization of flood risk based on multi-criteria decision-making models (Gray systems theory-ELECTRE-TOPSIS). Iranian journal of Ecohydrology. 2017; 4(2): 499-508.

[23]. Kheirkhah M, Naseri H. Use of Analytical Hierarchy Process method in ranking suitable locations for underground dam construction. Research and construction in natural resources. 2008; 79: 93-101. [Persian]

[24]. Olapour M, Ghobadi M.H, Morvaridi A, Mousavi S. Prioritization of dam options in the recognition stage from the perspective of engineering geology using AHP method (case study), The fifth Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, Tehran, 2007, pp. 1-10. [Persian]

[25]. Supriyasilp T, Pongput K, Boonyasirikul T. Hydropower development priority using MCDM method. Energy Policy. 2009; 37(5): 1866-75.

[26]. Perez EH, Garcia Cascales M.S, Lamat MT. THE USE OF DIFFERENT NORMS IN THE TOPSIS DECISION MAKING METHOD. Of the 8th International FLINS Conference on Computational Intelligence in Decision and Control; 2008. Madrid, Spain, pp. 501-506.

[27]. Ghodsipour S. H. Analytical hierarchy process. 6nd ed. Amir Kabir University of Technology (Tehran Polytechnic). 2008. [Persian]

[28]. Ataei M. Multi-Criteria Evaluation Method. 1nd ed. Shahroud University of Technology. 2010. [Persian]

[29]. Saaty TL, Vargas LG. Decision making in economic, political, social, and technological environments with the analytic hierarchy process. Rws Pubns; 1994.

[30]. Mowrer HT. Decision support systems for ecosystem management: an evaluation of existing systems. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station; 1997.

[31]. Godsipour SH, Analytical hierarchy process. 9nd ed. Tehran: Amirkabir University of Technology; 2008. [Persian].

[32]. Zarghami M, Ehsani, I. Evaluation of different Group Multi-Criteria Decision Making Methods in Selection of Water Transfer Projects to Urmia Lake Basin. Iran Water Resources Research, 2011; 7(2): 1-14. [Persian]

[33]. Kuncheva LI. Pattern recognition with a model of fuzzy neuron using degree of consensus. Fuzzy Sets and Systems. 1994; 66(2): 241-50.

[34]. Ashton RH. Effects of justification and a mechanical aid on judgment performance. Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1992; 52(2): 292-306.

[35]. Bureau of Reclamation. Design of small dams. United States. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation; 1987.

[36]. Njiru FM. Hydrological information for Dam site selection by Integrating Geographic Information System (GIS) and Analytical Hierarchical Process (AHP), 2015, (Doctoral dissertation, University of Nairobi).

[37]. Nik, MSA, Esfahani, HK. Using the AHP and Fuzzy-AHP Decision Making Methods to Optimize the Dam Site Selection in illustrative basin in the center of Iran. International Journal of Advanced Research. 2015, 3(9):31-41.

[38]. Banihabib ME, Chitsaz N, Randhir TO. Non-compensatory decision model for incorporating the sustainable development criteria in flood risk management plans. SN Applied Sciences. 2020; 2 (1):6.

[39]. Simon U, Brüggemann R, Pudenz S. Aspects of decision support in water management—example Berlin and Potsdam (Germany) I—spatially differentiated evaluation. Water Research. 2004, 38 (7):1809-16.

[40]. Kiker GA, Bridges TS, Varghese A, Seager TP, Linkov I. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal. 2005, 1(2):95-108.

[41]. Jozi A, Malmir M. Environmental risk assessment of dams by using multi-criteria decision-making methods: A case study of the Polrood Dam, Guilan Province, Iran. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2014, 20(1):69-85.

[42]. Chang CL. Evaluation of basin environmental vulnerability: the weighted method compared to the compromise method. International Journal of Environmental Science and Technology. 2013, 10 (5):1051-6.

[43]. Kabir G. Selection of hazardous industrial waste transportation firm using extended VIKOR method under fuzzy environment. International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies. 2015, 7(1):40-58.

[44]. Azimi R, Yazdani-Chamzini A, Fooladgar MM, Basiri MH. Evaluating the strategies of the Iranian mining sector using a integrated model. International Journal of Management Science and Engineering Management. 2011, 6 (6):459-66.

[45]. Kaya T, Kahraman C. Fuzzy multiple criteria forestry decision making based on an integrated VIKOR and AHP approach. Expert Systems with Applications. 2011, 38(6):7326-33.

[46]. Singh LK, Jha MK, Chowdary VM. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. Journal of Cleaner Production. 2017, 142:1436-56.

[47]. Chezgi J. Application of SWAT and MCDM Models for Identifying and Ranking Suitable Sites for Subsurface Dams. InSpatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences 2019, (pp. 189-211). Elsevier.

[48]. Van NT, Van Son P, Khanh NH, Binh LT. Landslide susceptibility mapping by combining the analytical hierarchy process and weighted linear combination methods: a case study in the upper Lo River catchment (Vietnam). Landslides. 2016, 13(5):1285-301.

[49]. Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, 28:11-7.

[50]. Jozaghi A, Alizadeh B, Hatami M, Flood I, Khorrami M, Khodaei N, Ghasemi Tousi E. A comparative study of the AHP and TOPSIS techniques for dam site selection using GIS: A case study of Sistan and Baluchestan Province, Iran. Geosciences. 2018, 8(12):494.

[51]. Yasser M, Jahangir K, Mohmmad A. Earth dam site selection using the analytic hierarchy process (AHP): a case study in the west of Iran. Arabian Journal of Geosciences. 2013, 6(9):3417-26.