

## اولویت‌بندی محورهای مناسب برای احداث سد زیرزمینی در حوضه آبخیز دوست‌بیگلو

اباذر اسمعلی عوری\* - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه محقق اردبیلی  
محمد گلشن - دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
کیوان خرمی - کارشناس ارشد آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۲۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۴/۸

### چکیده

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای تأمین نیاز آبی ساکنان از اهمیت بسیاری برخوردار است. احداث سدهای زیرزمینی در این مناطق یکی از روش‌های مدیریتی است. حوضه آبخیز دوست‌بیگلو در استان اردبیل با دارا بودن مساحت ۷۴۶۱ کیلومتر مربع در اقلیم نیمه‌خشک کشور واقع شده است. در این تحقیق برای تعیین اولیة مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی از روش‌های منطق بولین و منطق فازی استفاده شد. بدین منظور، از معیارهای توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، گسل، و قنات در این روش‌ها استفاده شد. نقشه‌های به‌دست آمده نشان داد مناطق جنوب شرقی و شمال غربی حوضه برای احداث سد زیرزمینی بدون محدودیت‌اند. پس از تعیین مناطق مستعد، با توجه به نقشه‌های تهیه‌شده، ۳۶ محور مناسب برای احداث سد زیرزمینی در تنگه‌های مناسب انتخاب شد و با در نظر گرفتن معیارهای اصلی محور سد، مخزن سد، آب، و اقتصادی - اجتماعی با استفاده از روش AHP محورهای انتخابی اولویت‌بندی شد. نرخ سازگاری برای روش AHP معادل ۰/۰۳ به‌دست آمد که پذیرفتنی است. نتایج اولویت‌بندی سدهای انتخابی در این مناطق نشان داد که معیار اصلی آب به ترتیب با وزن ۰/۱۱ و ۰/۱۰۴ برای زیرمعیارهای کمیّت و کیفیت آب اهمیت فراوانی در اولویت‌بندی محورهای انتخابی دارد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل سلسله‌مراتبی، سد زیرزمینی، مکان‌یابی، منطق بولین، منطق فازی.

### مقدمه

احداث سدهای زیرزمینی و استفاده از رواناب‌های سطحی به منظور تغذیه مصنوعی از جمله راهکارهای مناسب برای تأمین و توسعه منابع آب است (پیرمرادی و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۲). سدهای زیرزمینی امکان ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی را در منافذ لایه‌ها، برای استفاده پایدار از این منابع، فراهم می‌سازند (ایشیدا و همکاران، ۲۰۱۱: ۵۱). معمولاً آب ذخیره‌شده در پشت سدهای زیرزمینی برای تأمین آب شرب و آبیاری به کار می‌رود و به طور موردی برای اهداف صنعتی هم می‌تواند کاربرد داشته باشد. نحوه استفاده از آب نوع سیستم استخراج آب را تعیین می‌کند. ممکن است حفر چاه‌ها و نصب موتور پمپ برای طرح‌های آبیاری از نظر اقتصادی و فنی عملی باشد؛ در صورتی که تأمین آب شرب در مقیاس کوچک با این روش از طریق بهره‌برداری ثقلی یا حداکثر با پمپ‌های دستی امکان‌پذیر است (طباطبایی یزدی و

\* E- mail: esmaliouri@uma.ac.ir

نبی‌پیشکریان، ۱۳۸۲: ۱۰). سدهای زیرزمینی مشکلاتی مانند تجمع رسوبات را ندارند و همچنین باعث کاهش اثرهای زیست‌محیطی، تبخیر، آلودگی، و خطرهای بهداشت و سلامتی می‌شوند (هانسون و نیلسون، ۱۹۸۶: ۴۹۷). یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده همچنین نشان می‌دهد که این نوع سدها تمرکز غلظت مواد شیمیایی و نمک را در آب‌های زیرزمینی کاهش می‌دهند (لویون و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۱۵). سدهای زیرزمینی در واقع روشی مبتکرانه برای ذخیره آب در طی دوره‌های مرطوب برای دوره‌های خشک‌اند (مانند سدهای سطحی)، با این تفاوت که برای جلوگیری از تبخیر آب با شن انباشته شده‌اند (تملر و بست، ۲۰۰۴: ۶۳).

یک سد زیرزمینی روی عمق چند متری از سطح نفوذناپذیر قرار می‌گیرد و دسترسی به منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های جمع‌آوری کننده کم‌عمق صورت می‌گیرد (فورزیری و همکاران، ۲۰۰۸: ۷۵). پروژه‌های مکان‌یابی سد زیرزمینی به دلیل فقدان قطعیت در عوامل تأثیرگذار مشکلی پیچیده است و با توجه به تأثیرگذار بودن پارامترهای مختلف در بیشتر مواقع پاسخ کارشناسان با عدم اطمینان همراه است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۸۸). اما با توجه به اینکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مقدار آب در دسترس با کمبود مواجه است، مکان‌یابی سد زیرزمینی حائز اهمیت فراوانی است. این نوع سد برای اهداف مختلفی ساخته می‌شود، مانند جلوگیری از تداخل آب شور و شیرین (قاراقونیس، ۱۹۸۱: ۱۷۰)، جلوگیری از نفوذ آب زیرزمینی به معادن (گوپتا و همکاران، ۱۹۸۷: ۱)، جلوگیری از نفوذ آب شور دریا به سفره‌های آب شیرین ساحلی (اوندرو و یلماز، ۲۰۰۰: ۳۷)، و ذخیره آب برای بهره‌برداری مدیریت‌شده (نیلسون، ۱۹۸۸: ۳). سد زیرزمینی در مناطق مختلف جهان و به طور مشخص در کشورهای برزیل، هندوستان، امریکا، و کشورهای عربی نظیر تونس، مراکش، و الجزایر، افریقا و موارد دیگر به کار گرفته شده است. در داخل کشور نیز چندین سد زیرزمینی احداث شده است؛ از آن جمله می‌توان به سدهای کوثر دامغان، میمه اصفهان، بهورد سمنان، خرائق یزد، و قره‌خان بیگلر در استان اردبیل اشاره کرد (خرمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۱).

تا کنون پژوهش‌های گوناگونی درباره مکان‌یابی سدهای زیرزمینی انجام شده است؛ می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: قارزی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی، پس از بررسی سدهای زیرزمینی و مزایا و معایب آن‌ها در مناطق خشک، به مسائل اقتصادی و اجتماعی آبخیزنشینان پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد احداث سد زیرزمینی موجب افزایش درآمد و اشتغال‌زایی روستاییان شده و مهم‌تر از همه مشکل عمده مناطق خشک، که کمبود آب است، برطرف شده است. عیسوی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای برای مکان‌یابی اولیه سدهای زیرزمینی در منطقه طالقان به مقایسه دو روش تصمیم‌گیری<sup>۱</sup> AHP و Fuzzy - AHP پرداختند. نتایج نشان داد از مجموع ۵۶ نقطه خروجی زیرحوضه‌ها در روش AHP، ۲۶ نقطه و در روش Fuzzy - AHP، ۱۵ نقطه با مناطق مناسب و قابل دسترس همپوشانی داشتند. خرمی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از تکنیک‌های سامانه اطلاعات زمین- مکانی و منطق بولین مناطق مناسب احداث سد زیرزمینی در حوضه آبخیز قره‌سو را تعیین کردند؛ نتایج بیانگر مناسب بودن حدود ۳۰ درصد از حوضه برای احداث سد زیرزمینی بود. فورزیری و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی نقاط مناسب برای احداث سدهای زیرزمینی کوچک در مناطق خشک مالی را بررسی کردند. انتخاب نقاط مناسب، با تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های بزرگ‌مقیاس، انتخاب کیفی نقاط

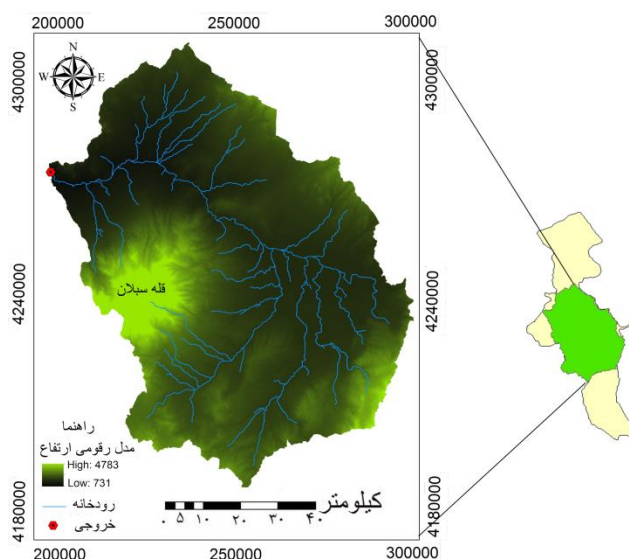
شناسایی شده و اولویت‌بندی آن‌هاست. نتایج نشان داد این روش یک روش کلی برای تعیین نقاط مناسب احداث سدهای زیرزمینی است و تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های بزرگ‌مقیاس ابزارهای مناسبی هستند برای آنالیز زمینی مقدماتی و ویژگی‌های تکنونیک. برخورداری (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از تکنیک‌های سامانه اطلاعات زمین- مکانی و سنجش از دور به مکان‌یابی اولیه سدهای زیرزمینی در حوضه آبخیز اردکان یزد اقدام کرد. نتایج نشان داد ۴۶/۷ درصد از سطح حوضه دارای قابلیت متوسط است و ۲۶/۶ درصد آن قابلیت بسیاری برای احداث سد زیرزمینی دارد.

با توجه به اینکه تغییرات زمانی و مکانی بارش و در نتیجه جریان‌های سطحی در بیشتر مناطق مختلف کشور و از جمله حوضه آبخیز دوست‌بیگلو با زمان نیاز آبی بخش کشاورزی تطابق نداشته است و از طرفی وقوع خشک‌سالی در برخی از سال‌ها در بیشتر مناطق حوضه سبب وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر می‌شود، حفظ و ذخیره آب حاصل از بارندگی در فصول مرطوب ضروری است. اما امکان ذخیره سطحی آب در بیشتر مناطق وجود ندارد و ذخیره آب در سفره‌های آب زیرزمینی و احداث سدهای زیرزمینی می‌تواند یکی از راهکارهای عملی تأمین آب در فصول خشک سال باشد. حوضه آبخیز دوست‌بیگلو با متوسط بارندگی سالانه حدود ۳۰۰ میلی‌متر دارای اقلیم نیمه‌خشک است و با احداث سد زیرزمینی می‌توان به بهبود وضعیت منابع آب در این منطقه کمک کرد. هدف از اجرای این پژوهش نخست شناسایی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی است؛ به گونه‌ای که در این مناطق برای احداث سد زیرزمینی هیچ محدودیتی وجود نداشته باشد و سپس اولویت‌بندی محورهای مناسب در این مناطق.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز ایستگاه هیدرومتری- دوست‌بیگلو (واقع در استان اردبیل) با مساحت ۷۴۶۱ کیلومتر مربع و اقلیم نیمه‌خشک- از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز ارس است. محدوده مورد مطالعه بین ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی

## روش تحقیق

در این پژوهش نخست، با معیارهای در نظر گرفته شده برای مکان‌یابی و با استفاده از تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های منطق بولین و منطق فازی، نقشه مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی تهیه شد و سپس با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی محورهای انتخابی برای احداث سد زیرزمینی اولویت‌بندی شد.

## مدل منطق بولین

منطق بولین به سبب سادگی منطق و محاسبات آن اجرای سریعی دارد و در بسیاری از تحقیقات از آن استفاده شده است. در این مدل اساس وزن‌دهی بر اساس دو حالت صفر (نامناسب) و یک (مناسب) است. برای تولید نقشه نهایی در این مدل، عملگرهای مختلف AND، OR، و NOT وجود دارد. این عملگرهای منطقی اجازه می‌دهند دو یا چند عبارت رابطه‌ای به یک عبارت، که حاصل آن بولین است، تبدیل شود. در این تحقیق با توجه به هدف از عملگر AND استفاده شد.

## مدل منطق فازی

در یک مجموعه فازی به هر عضو درجه عضویتی بین ۰ تا ۱ اختصاص می‌یابد. صفر بیان‌کننده عدم عضویت کامل در مجموعه فازی است و یک عضویت کامل را نشان می‌دهد. اعداد بین صفر تا یک مجموعه پیوسته‌ای از عضویت در مجموعه فازی را بیان می‌کنند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۳۱). درجه عضویت‌پذیری اشتراک، اجتماع، متمم، ضرب، جمع، و گاما توان‌های اساسی منطق فازی‌اند (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۲). در هر مجموعه فازی، مانند A، وابستگی یک عضو (X) از مجموعه مرجع به آن از طریق تابع عضویت آن به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$A = \{\mu_x A(x)\} \quad (1)$$

که X عضوی از مجموعه مرجع و  $\mu A(x)$  درجه وابستگی به مجموعه فازی A است (عبادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۱). با توجه به نتایج مطالعات انجام شده در رابطه با کارایی عملگرهای مختلف در پهنه‌بندی (نادری، ۱۳۹۱: ۷۹)، در این تحقیق از عملگر گامای فازی ۰/۹ برای پهنه‌بندی مکان‌های مستعد احداث سد زیرزمینی استفاده شد. عملگر فازی گاما به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\mu = (\mu \text{ fuzzy sum})^y \times (\mu \text{ fuzzy product})^{1-y} \quad (2)$$

مقدار y بین بازه صفر تا یک قرار دارد و انتخاب آگاهانه مقدار y سبب پدید آمدن ارزش‌هایی در خروجی می‌شود که بیانگر سازگاری قابل انعطاف بین گرایش‌های کاهش ضرب و افزایش جمع است.

### روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

در این روش مسئله تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف، معیارها، زیرمعیارها، و گزینه‌ها تقسیم می‌شود تا تصمیم‌گیرنده بتواند به راحتی در کوچک‌ترین تصمیم‌گیری دقت کند. برای ساختن مدل تصمیم‌گیری در بالاترین سطح هدف و در سطح یا سطوح میانی معیارهای مورد استفاده و در سطح پایین گزینه‌های ممکن قرار داده شد. در ارزیابی اهمیت عناصر و فعالیت‌ها، با توجه به معیارها، برای اینکه نتایج قابل قبولی در شرایط طبیعی حوضه آبخیز به دست آوریم، درجه خاصی از ناسازگاری باید به دست بیاید. روش AHP ناسازگاری کلی قضاوت‌ها را به وسیله نرخ سازگاری محاسبه می‌کند (درفشان و همکاران، ۲۰۱۴: ۸۸). مطالعات انجام شده مشخص کرده‌اند که اگر نرخ سازگاری (C.R) کمتر از ۰/۱۰ باشد، می‌توان سازگار بودن مقایسه‌های انجام شده را پذیرفت و اگر بیشتر از این مقدار باشد، باید در مقایسه‌های در نظر گرفته اصلاحاتی انجام شود. برای به دست آوردن این ضریب لازم است نخست شاخص سازگاری (C.I) تعیین شود. در این رابطه  $n$  بیان‌کننده تعداد گزینه‌های رقیب است:

$$C.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

نرخ سازگاری (C.R) نیز با رابطه ۴ برآورد می‌شود که در آن R.I. نشان‌دهنده مقدار شاخص سازگاری تصادفی است و بر اساس جدول ساعتی و هارکر تهیه شده است (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۷):

$$C.R = \frac{C.I}{R.I.} \quad (4)$$

### معیارهای انتخابی

اطلاعات مورد نیاز برای معیارهای انتخابی در روش منطق بولین و فازی با استفاده از منابع داده‌های مختلف تهیه شدند (جدول ۱). شنکوت (۱۹۹۹)، در گزارش علمی خود درباره پروژه‌های سد زیرزمینی، شیب‌های زیر ۵ درصد را به سبب سرعت کم آب در این مناطق و فرصت کافی برای نفوذ آب و تشکیل مخازن مناسب زیرسطحی برای احداث سد زیرزمینی مناسب می‌داند؛ در بسیاری از مطالعات انجام شده در داخل کشور نیز از این آستانه شیب برای مکان‌یابی سد زیرزمینی استفاده شده است (خرمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۲؛ حاجی‌عزیزی و همکاران، ۱۳۸۹؛ پیرمرادی و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۹). این نوع سدها به تغییر کاربری اراضی و اکوسیستم موجود منجر نمی‌شوند، ولی مناطقی با کاربری مسکونی و صنعتی به سبب احتمال تخریب سازه و آلودگی آب (عشقی‌زاده و نورا، ۱۳۸۹: ۵۱؛ پیرمادیان و همکاران ۱۳۹۲: ۷) نمی‌توانند محل‌های مناسبی باشند. از لحاظ سازندهای زمین‌شناسی، نهشته‌های (پادگانه‌های) آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ها برای احداث سد زیرزمینی در اولویت‌اند. برای معیارهای گسل و قنات به ترتیب بافر (حریم)‌های ۵۰۰ و ۱۰۰ متری تعیین شدند و مناطق داخل حریم محل‌های نامناسب در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. کلاس‌بندی معیارهای مختلف در روش منطق بولین و فازی

| ردیف | معیار         | کلاس منطق بولین  | کلاس منطق فازی                          |
|------|---------------|--|---|
| ۱    | شیب (درصد)    | ۵-۰ (۱) و بیش از ۵ (۰)   | ۲-۰، ۵-۲، ۵-۸، و بیش از ۸               |
| ۲    | نوع سازند     | نهشته‌های آبرفتی، مخروط‌افکنه و کنگلومرا (۱)، سایر سازندها (۰) | اولویت‌بندی سازندهای مناسب              |
| ۳    | گسل           | بافر(متر): ۵۰۰-۰ (۰) بیش از ۵۰۰ (۱)                            | ۲۰۰-۰، ۲۰۰-۵۰۰، ۵۰۰-۱۰۰۰، و بیش از ۱۰۰۰ |
| ۴    | نوع کاربری    | مسکونی و صخره‌ای (۰) سایر کاربری‌ها (۱)                        | اولویت‌بندی کاربری‌های مناسب            |
| ۵    | قنات و چاه‌ها | بافر(متر): ۱۰۰-۰ (۰) بیش از ۱۰۰ (۱)                            | ۱۰۰-۰، ۱۰۰-۳۰۰، ۳۰۰-۵۰۰، و بیش از ۵۰۰   |

### معیارهای انتخابی برای اولویت‌بندی محور سدهای زیرزمینی

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های تهیه‌شده، ۳۶ تنگه مناسب در آبراهه‌های رتبه ۳ به بالا مشخص شد و با استفاده از مدل SWAT<sup>۱</sup> نواحی بالادست هر محور سد مشخص شد. برای اولویت‌بندی این محورها از معیارهای مختلفی استفاده شد که در جدول ۲ آمده است. محدوده هر معیار و زیرمعیار با توجه به بررسی‌های تحقیق، گزارش‌های موجود، آمار و اطلاعات تهیه‌شده از سازمان‌ها (چاه‌های مشاهداتی، جمعیت)، بهره‌گیری از نقشه‌ها، روابط هیدرولوژی (کمیت و کیفیت رواناب)، و مدل رقومی ارتفاع تعیین شد.

جدول ۲. معیارهای مورد استفاده برای اولویت‌بندی محور سد

| معیار     | زیرمعیار                              | محدوده           | معیار             | زیرمعیار   | محدوده   |
|-----------|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------|----------|
| هیدرولوژی | کمیت رواناب (mm)                      | ۲۵۰-۱۵۰          | اقتصادی-اجتماعی   | دسترسی (m) | >۵۰۰-۵۰۰ |
|           | کیفیت                                 | C3S1، C2S3، C2S1 | جمعیت (نفر)       |            | ۴۱۶۵-۱۱۶ |
|           | قابلیت انتقال (m/day/m <sup>2</sup> ) | ۱۵۰۰-۸۰          | نیاز کشاورزی (ha) |            | ۴۰۰۰-۳۰۰ |
| مخزن سد   | سطح مخزن (m <sup>2</sup> )            | ۶۰۰۰۰-۵۰         | طول (m)           |            | ۱۷۹-۸    |
|           | شیب زیرسطحی (m/m)                     | ۱/۷۵-۰/۰۲        | عمق (m)           |            | ۱۰۶-۷    |
|           | شیب سطحی (m/m)                        | ۹/۹۷-۰/۰۰۱       | شکل دره           |            | V-U      |

برای بررسی مقدار رواناب تولیدی منطقه، نخست مقدار بارش رستری و شماره منحنی (CN) حوضه تهیه شد. سپس، از روش سازمان حفاظت آب و خاک (SCS) استفاده شد. در این روابط R مقدار رواناب، P مقدار بارندگی، و S مقدار نگه‌داشت سطحی بر حسب میلی‌متر است.

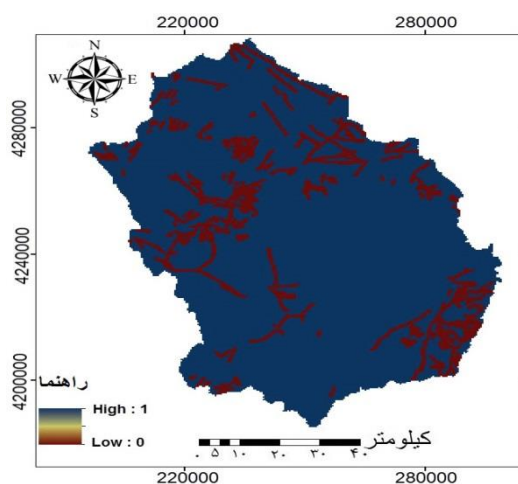
$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P - 0.1S)} \quad (5)$$

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

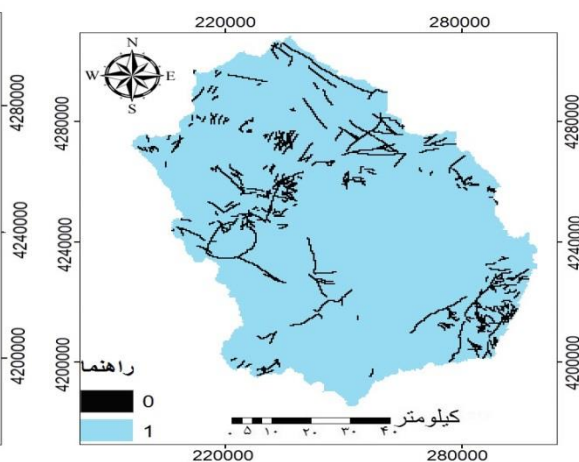
آنالیز کیفیت آب چاه‌های منطقه با روش ویل‌کوکس و فراسنجه‌های SAR، Na، و EC انجام شد و برای بررسی وضعیت سنگ کف و عمق آبرفت از گزارش‌های موجود در این زمینه استفاده شد (مطالعات بیلان و چرخه آب محدوده مطالعاتی اردبیل، ۱۳۸۴).

### یافته‌های پژوهش

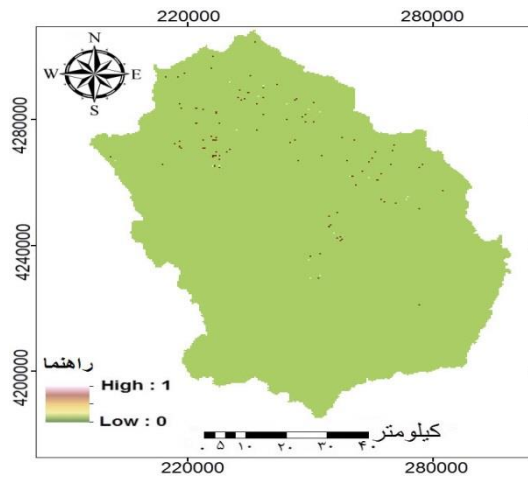
بیشترین مساحت طبقات شیب تشکیل‌دهنده حوضه آبخیز دوست‌بیگلو مربوط به شیب‌های زیر پنج درصد است که شیب مناسب برای احداث سد زیرزمینی است و حدود ۵۶/۳ درصد از کل حوضه را تشکیل می‌دهد. بخش عمده توزیع سطوح ارتفاعی در طبقات اول و دوم (ارتفاعات زیر ۲۰۰۰ متر) انجام می‌شود و در بخش‌های مرکزی دیده می‌شود. مساحت کاربری‌های مختلف بیانگر آن است که بیشترین کاربری منطقه مربوط به بخش کشاورزی (۶۵ درصد) و مرتع (۲۹ درصد) است و مابقی مربوط است به سایر کاربری‌ها. همچنین، از لحاظ خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه، حدود ۳۰۸۱ کیلومتر مربع از سطح حوضه (۴۱ درصد) برای احداث سد زیرزمینی محدودیتی ندارند. نتایج حاصل از معیارهای انتخابی برای منطق بولین و منطق فازی در قالب شکل ارائه شده‌اند.



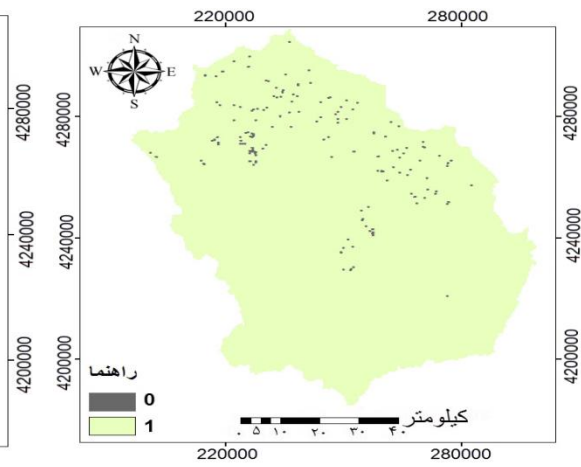
شکل ۳. نقشه گسل منطق بولین



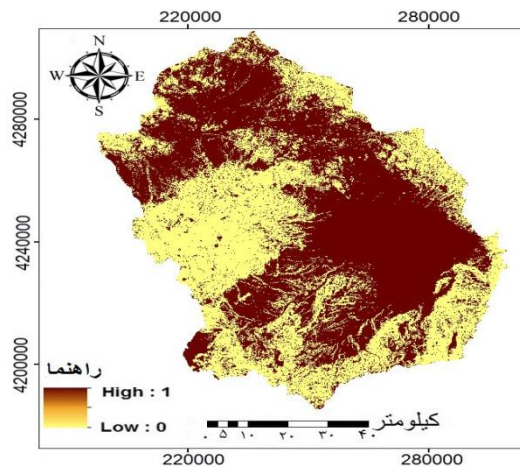
شکل ۲. نقشه گسل منطق بولین



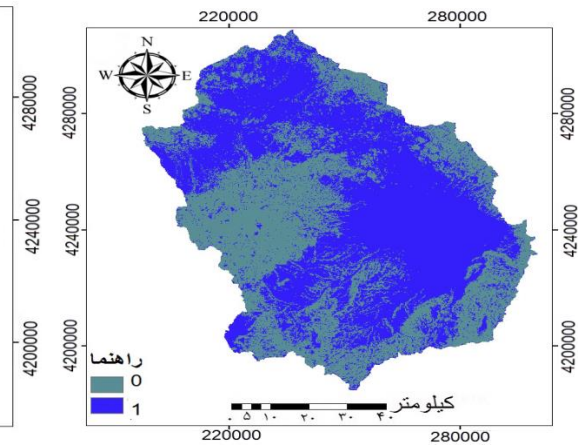
شکل ۵. نقشه قنات‌های منطقه فازی



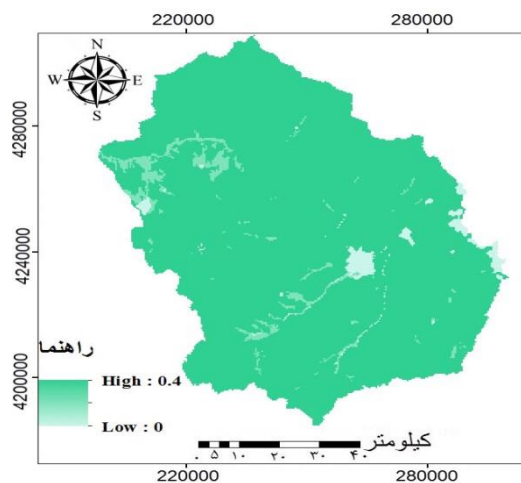
شکل ۴. نقشه قنات‌های منطقه بولین



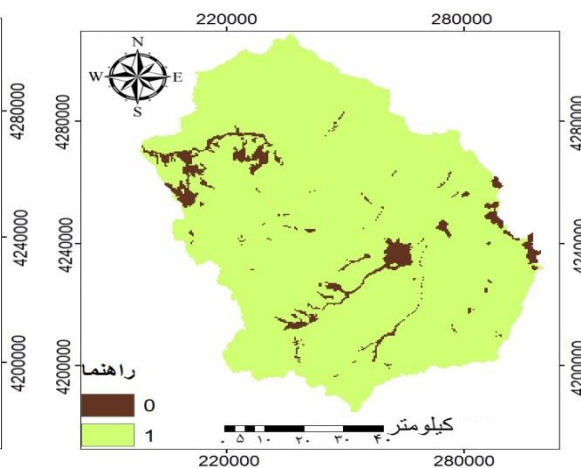
شکل ۷. نقشه شیب منطقه فازی



شکل ۶. نقشه شیب منطقه بولین

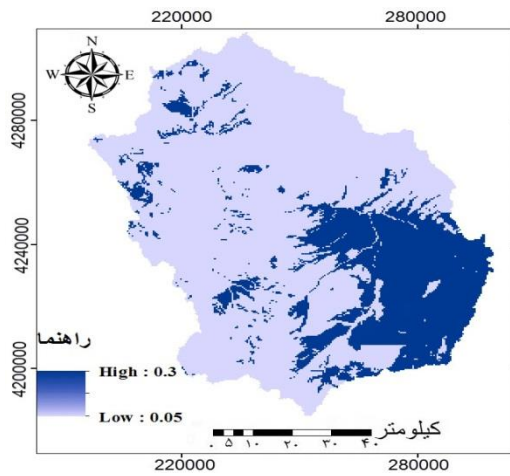


شکل ۹. نقشه کاربری منطقه فازی

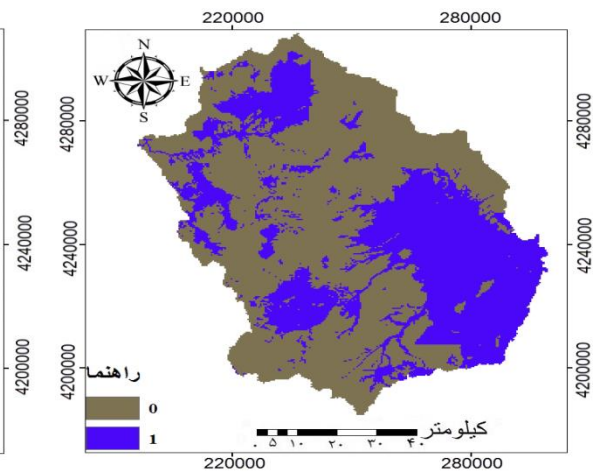


شکل ۸. نقشه کاربری منطقه بولین

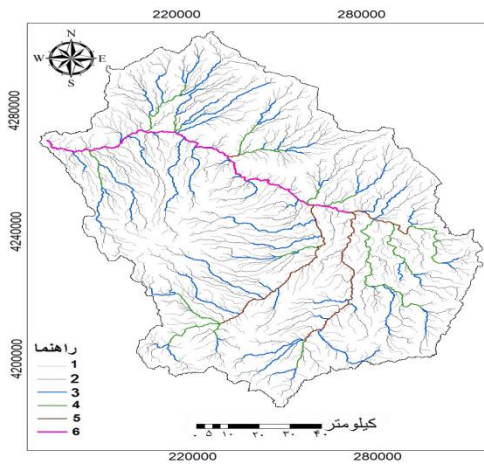




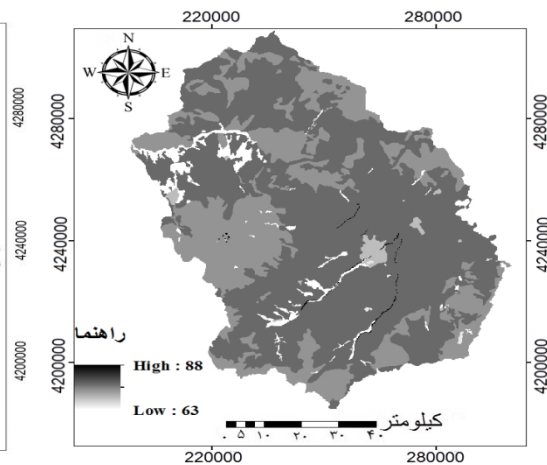
شکل ۱۱. نقشه سازند منطق فازی



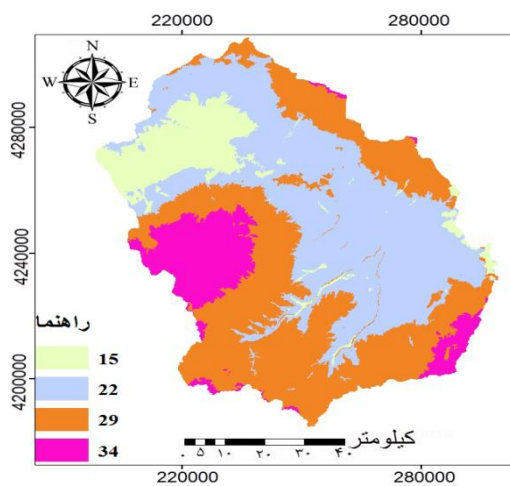
شکل ۱۰. نقشه سازند منطق بولین



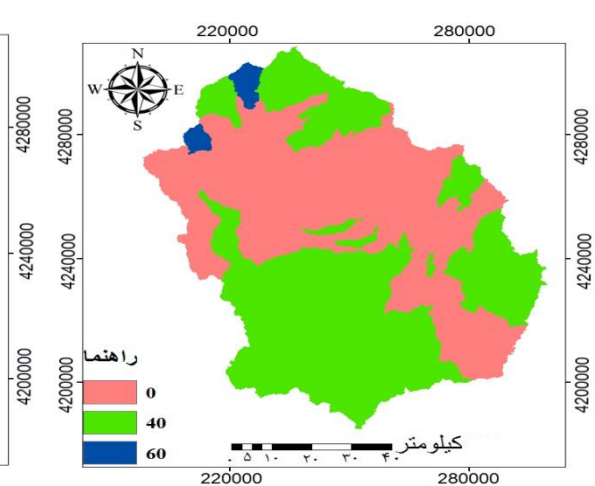
شکل ۱۳. نقشه رتبه‌بندی آبراه



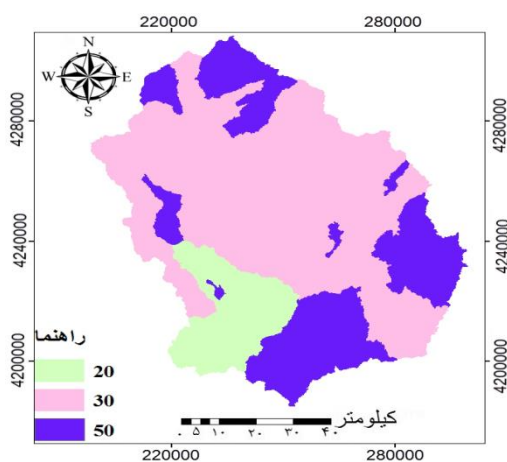
شکل ۱۲. نقشه شماره منحنی



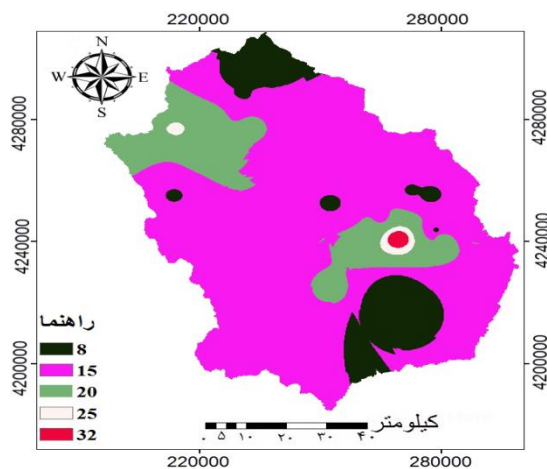
شکل ۱۵. نقشه امتیازبندی رواناب حوضه



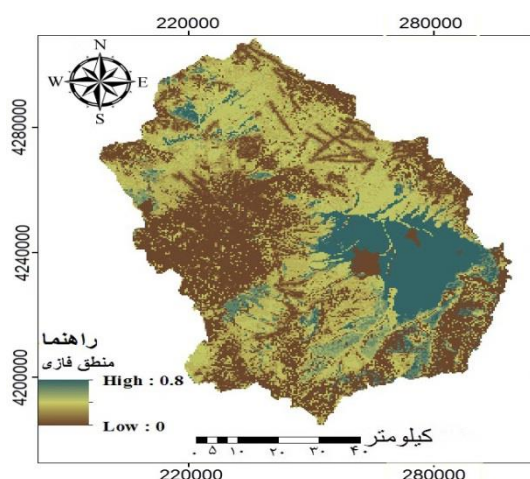
شکل ۱۴. نقشه نیاز آبی کشاورزی در حوضه



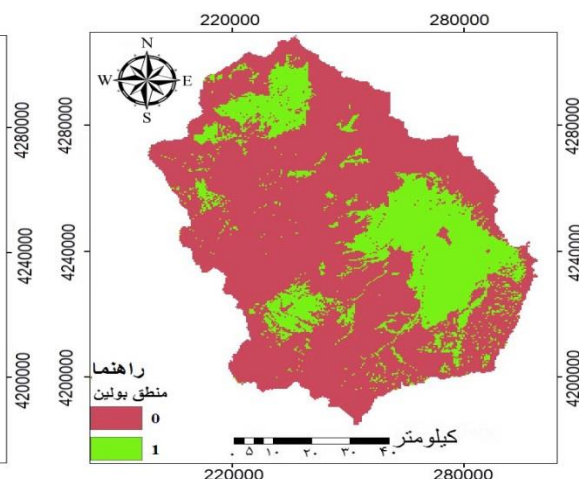
شکل ۱۷. نقشه امتیازبندی محورهای لحاظ کیفیت آب



شکل ۱۶. نقشه قابلیت انتقال آب در حوضه



شکل ۱۹. نقشه مناطق مناسب سد زیرزمینی (منطق فازی)



شکل ۱۸. نقشه مناطق مناسب سد زیرزمینی (منطق بولین)

نقشه‌های تهیه‌شده در روش حذفی نشان می‌دهد که بخشی از سطح حوضه از لحاظ معیارهای اولیه برای احداث سد زیرزمینی وضعیت مناسبی ندارند. بنابراین، باید از بررسی بیشتر کنار گذاشته شوند تا بررسی‌ها در سایر مناطق حوضه، که دارای همه شرایط اولیه‌اند، با دقت بسیاری انجام شود. حدود ۲۵ درصد از سطح حوضه برای احداث سد زیرزمینی بدون محدودیت است که سطح وسیعی را در بر گرفته و بخش اعظم آن در دشت اردبیل واقع شده است. بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی منطقه در بخش‌های مختلف برای احداث سد زیرزمینی مناسب است و با مطالعات بیلان و چرخه آب منطقه اردبیل (۱۳۸۴) مطابقت دارد (جدول ۳).

جدول ۳. وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از دیاگرام ویلکوکس

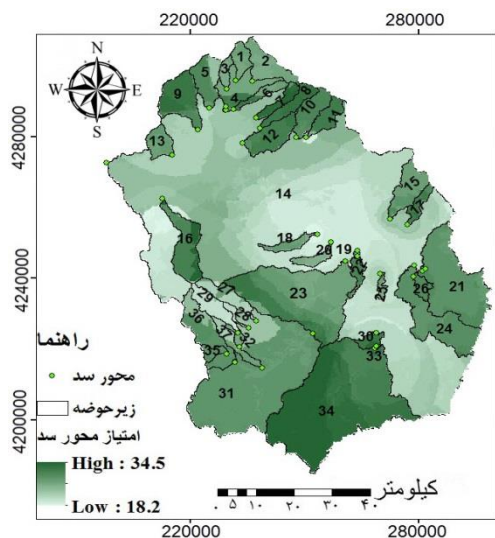
| کلاس کیفی | وضعیت | درصد  |
|-----------|-------|-------|
| C2S1      | خوب   | ۴۱٫۰۷ |
| C3S1      | متوسط | ۴۸٫۷۱ |
| C3S2      | ضعیف  | ۱۰٫۲۲ |

### اولویت‌بندی محور سدها

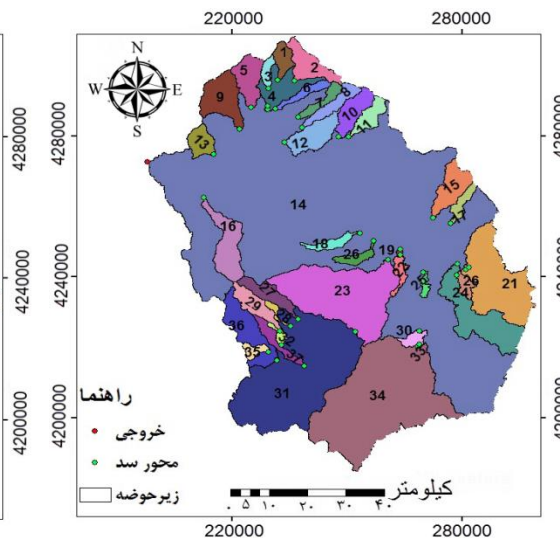
پس از مشخص شدن امتیاز مربوط به هر کلاس و معیارهای تأثیرگذار در انتخاب محل محور سد زیرزمینی (جدول ۴)، نقشه اولویت‌بندی محورهای احداث سد زیرزمینی به‌دست آمد (شکل ۲۱). شاخص سازگاری بین معیارهای انتخابی ۰٫۰۳ به‌دست آمد که کمتر از حد آستانه ۰٫۱ است. بنابراین، معیارهای انتخابی قابلیت مقایسه دو به دو را دارند. نتایج اولویت‌بندی نشان دادند که معیارهای نیاز آبی، کمیت آب، کیفیت آب، و قابلیت انتقال دارای وزن بیشتری در تعیین محورهای مناسب‌اند.

جدول ۴. نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارهای اولویت‌بندی سدهای زیرزمینی

| معیار         | امتیاز | معیار       | امتیاز | معیار          | امتیاز | معیار       | امتیاز |
|---------------|--------|-------------|--------|----------------|--------|-------------|--------|
| قابلیت انتقال | ۰٫۱۱۳  | طول محور سد | ۰٫۰۸۴  | نیاز آبی       | ۰٫۰۴۶  | کیفیت آب    | ۰٫۱۱   |
| سطح مخزن      | ۰٫۰۹۸  | شکل دره     | ۰٫۰۶۳  | جمعیت          | ۰٫۰۸۸  | کمیت آب     | ۰٫۱۰۴  |
| شیب سطحی      | ۰٫۰۶۲  | عمق محور سد | ۰٫۰۹۵  | فاصله از روستا | ۰٫۰۵   | عمق محور سد | ۰٫۰۹۵  |
| شیب زیرسطحی   | ۰٫۰۸۷  |             |        |                |        |             |        |



شکل ۲۱. نقشه اولویت‌بندی محورهای انتخابی برای احداث سد زیرزمینی



شکل ۲۰. نقشه موقعیت محورهای انتخابی سد زیرزمینی

با توجه به نقشه اولویت‌بندی، محور ۹ واقع در دشت مشکین‌شهر و محورهای ۳۰، ۳۳، و ۳۴ واقع در دشت اردبیل اولویت بیشتری برای احداث سد زیرزمینی دارند.

## بحث و نتیجه‌گیری

برای تعیین اولیة محدوده‌های مناسب، با استفاده از معیارهای مؤثر در مکان‌یابی و مدل منطق بولین مناطق مستعد تعیین شد و سپس برای اطمینان از نتایج حاصله و اولویت‌بندی مناطق مستعد از مدل منطق فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از منطق بولین نشان داد که مناطق جنوب شرقی و شمال غربی حوضه بیشترین وسعت مناسب را برای احداث سد زیرزمینی دارند. نقشه مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی نشان می‌دهد که این مناطق بیشتر در آبراهه‌های رتبه ۳ قرار دارند و با نتایج مطالعات چزگی و همکاران (۱۳۸۹: ۶۷) و سلیمانی و همکاران (۱۳۸۷: ۵) مطابقت دارد. با توجه به اینکه سدهای زیرزمینی در مناطقی با پهنه آبرفتی عمیق (۳۰ متر) نتایج مطلوبی ارائه می‌دهند و در محدوده مورد مطالعه این مناطق تحت کشت می‌باشند، می‌توان، با انتخاب تنگه‌های مناسب، آب کشاورزی و مورد نیاز روستائیان را از این سدها تهیه کرد؛ در مطالعات حاجی‌عزیزی و همکاران (۱۳۸۹: ۹۸) به این موضوع اشاره شده است. بستر رودخانه قره‌سو، که یکی از اصلی‌ترین آبراهه‌های منطقه به‌شمار می‌رود، در مناطق مناسب احداث سد زیرزمینی قرار گرفته است و از لحاظ زمین‌شناختی دارای بستر آبرفتی با نفوذپذیری مناسب است و نیز برای احداث سد زیرزمینی مناسب است. نتایج حاصل از منطق فازی نیز نشان داد که بین مناطق مستعد تعیین‌شده به وسیله دو مدل انطباق وجود دارد، ولی مناطق جنوبی دارای اولویت بیشتری برای احداث است. پس از تعیین این مناطق، ۳۶ محور مناسب برای احداث سد زیرزمینی انتخاب شد و برای اولویت‌بندی محورهای انتخابی در روش AHP از معیارهای اصلی محور سد، مخزن سد، آب، و اقتصادی-اجتماعی استفاده شد. با اعمال وزن هر یک از معیارهای انتخابی، محورهای مناسب اولویت‌بندی شد؛ نتایج بیانگر آن است که محورهای ۹، ۳۰، ۳۳، و ۳۴ از امتیاز بسیاری برخوردارند و با احداث سد زیرزمینی در این مناطق تا حد زیادی می‌توان رضایتمندی و نیازهای ذی‌نفعان را فراهم ساخت و از بین محورهای مورد بررسی محورهای ۲۸، ۲۹، و ۱۱ امتیاز کمتری دارند. نتایج اولویت‌بندی سدهای انتخابی در این مناطق نشان داد که معیار اصلی آب به‌ترتیب با وزن ۰/۱۱ و ۰/۱۰۴ برای زیرمعیارهای کمیّت و کیفیت آب اهمیت فراوانی در اولویت‌بندی محورهای انتخابی دارد. مناطق مستعد تعیین‌شده به وسیله منطق فازی و بولین با یکدیگر مطابقت دارند؛ به طوری که در مدل منطق بولین نواحی شمال شرقی و جنوب غربی حوضه آبخیز به عنوان مناطق مناسب انتخاب شدند و در مدل منطق فازی این بخش‌ها به عنوان منطقه‌ای با قابلیت متوسط به بالا تعیین شدند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌های انتخابی در تعیین مناطق مستعد است. می‌توان گفت سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی تأثیر بسزایی دارند، زیرا از نقشه‌هایی که در این مراحل تولید می‌شوند می‌توان در مراحل بعدی استفاده کرد و آن‌ها را به عنوان نقشه راهنمای اجرایی برای احداث سد زیرزمینی در نظر گرفت؛ در مطالعات خرمی و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰۱) و حاجی‌عزیزی و همکاران (۱۳۸۹) این موضوع بیان شده است. سرانجام، پیشنهاد می‌شود مطالعات مکان‌یابی سد زیرزمینی را، علاوه بر تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی، در صورت وجود امکانات، همراه با

مطالعات ژئوفیزیک انجام داد و نقشه‌های اجرایی دقیق‌تر تولید کرد و نتایج حاصل از احداث سد زیرزمینی را با سایر سیستم‌های جمع‌آوری آب در یک حوضه مقایسه کرد و عواید این طرح‌ها را چه به صورت اقتصادی چه به صورت اجتماعی مشخص کرد.

## منابع

- آذر، ع. و رجب‌زاده، ع. (۱۳۸۷). تصمیم‌گیری کاربردی (با رویکرد MADM)، تهران: نگاه دانش.
- پیرمرادی، ر.؛ نخعی، م. و اسدیان، ف. (۱۳۸۹). تعیین مناطق مناسب جهت احداث سد زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و AHP (مطالعه موردی: دشت ملایر در استان همدان)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۳(۸): ۵۱ - ۶۶.
- پیرمرادیان، ر.؛ بهبهانی، س.م.؛ نظری‌فر، م. و ولایتی، س. (۱۳۹۲). پهنه‌بندی اولیه مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی در دشت ایوانکی، اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، دانشگاه آزاد اصفهان.
- چزگی، ج.؛ مرادی، ح.ر. و خیرخواه، م.م. (۱۳۸۹). مکان‌یابی محل‌های مناسب جهت احداث سد زیرزمینی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با تأکید بر منابع آب، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۴(۱۳): ۶۵ - ۶۸.
- حاجی‌عزیزی، ش.؛ خیرخواه زرکش، م. و شریفی، ا. (۱۳۸۹). تعیین آبراهه‌های مناسب احداث سد زیرزمینی به روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و با تکیه بر تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- خرمی، ک.؛ وهاب‌زاده، ق.؛ سلیمانی، ک. و طلایی، ر. (۱۳۹۲). انتخاب محل‌های مناسب سد زیرزمینی در حوضه آبخیز قره‌سو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- خرمی، ک.؛ وهاب‌زاده، ق.؛ سلیمانی، ک. و طلایی، ر. (۱۳۹۳). تعیین مناطق مناسب سد زیرزمینی در حوضه آبخیز قره‌سو، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۶(۲): ۱۳۹ - ۱۵۴.
- سلیمانی، س.؛ نیکودل، م.م.؛ ارومیه‌ای، ع. و بهرامی، ح. (۱۳۸۷). مکان‌یابی گزینه‌های مناسب جهت احداث سدهای زیرزمینی با استفاده از GIS و RS، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.
- طباطبایی یزدی، ج. و نبی‌پی‌لشکریان، س. (۱۳۸۲). سدهای آب زیرزمینی جهت تأمین آب در مقیاس کوچک، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران.
- عابدینی، م.؛ میرزاخانی، ب. و عسگری، آ. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی ژئومورفولوژیکی تناسب زمین در شهرستان اراک با استفاده از مدل منطق فازی، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۵(۱۸): ۵۹ - ۷۲.
- عبادی‌نژاد، سید علی؛ یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران و شادفر، ص. (۱۳۸۶). ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین‌لغزش، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱: ۴۴ - ۹۳.
- عشق‌زاده، م. و نورا، ن. (۱۳۸۹). تعیین محل مناسب احداث سد زیرزمینی بر روی قنات، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۷(۳): ۴۵ - ۶۴.
- عیسوی، و.؛ کرمی، ج.؛ علی‌محمدی، ع. و نیک‌نژاد، ع. (۱۳۹۱). مقایسه دو روش تصمیم‌گیری AHP و Fuzzy - AHP در مکان‌یابی اولیه سدهای زیرزمینی در منطقه طالقان، فصلنامه علوم زمین، ۲۲(۸۵): ۲۷ - ۳۴.
- قارزی، ر.؛ نجفی‌نژاد، ع.؛ نورا، ن.؛ دهقانی، ا.ا. و فیله‌کش، ا. (۱۳۹۱). مسائل اقتصادی - اجتماعی سد زیرزمینی در آبخیز بفره سبزواری، هشتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، خرم‌آباد.
- مهندسیین مشاور قطره باران صحرا (۱۳۸۴). مطالعات بیابان و چرخه آب محدوده مطالعاتی اردبیل، ج ۲، گزارش آب‌های زیرزمینی.

- نادری، ف. (۱۳۹۱). کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام، پژوهش‌های آبخیزداری، ۹۴: ۷۴ - ۸۵.
- یوسفی سنگانی، ک.؛ محمدزاده، ح. و اکبری، م. (۱۳۹۳). ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با روش تلفیق فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، فصلنامه بین‌المللی توسعه منابع آب، ۲(۴): ۱۲۷ - ۱۴۱.
- Abedini, M.; Mirzakhani, B. and Asgari, A. (2015). Geomorphological zoning for determining land suitability in Arak city by using fuzzy logic model, *Journal of Zonal Planning*, 5(18): 59-72.
- Azar, A. and RajabZadeh, A. (2008). Applied Decision (MADM approach), Negahe Danesh publication, Tehran, pp. 230.
- Barkhordari, J. (2015). The pre-selection of suitable sites for small underground dams in arid areas using GIS (A case study in Yazd\_Ardakan watershed), *International Geoinformatics Research and Development Journal*, 6(1): 18-27.
- Chezghi, J.; Moradi, H.M. and KheirkhahZarkesh, M.M. (2012). Selection of suitable sites for underground dams using multi criteria decision making with an emphasis to water resources (Case Study: West of Tehran Province), *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 4(13): 65-68.
- Dorfeshan, F., Heidarnejad, M.; Bordbar, A. and Daneshian, H. (2014). Locating suitable sites for underground dams construction through analytic hierarchy process. *International Conference on Earth, Environment and Life Sciences (EELS-2014)* Dec. 23-24, Dubai (UAE).
- Ebadinejad, A.; Yamani, M.; Maghsoudi, M. and Shadfar, S. (2007). evaluation of fuzzy logic operators in landslide analysis, Case Study: Shirood watershed, *Iraninan Journal of Watershed Management Science*, 2: 39-44.
- Esavi, V.; Karami, J.; Alimohammadi, A. and Niknezhad, S.A. (2013). Comparison of AHP and FUZZY-AHP methods for underground dam site selection in Taleghan basin, *Journal of Geoscience*, 85: 27- 34.
- Eshghizadeh, M. and Noora, N. (2011). Determining the suitable sites for underground dams construction on aqueduct, case study, Dahanchar aqueduct of Kalat watershed in Gonabad, *Journal of Water and Soil Conservation*, 7(17): 45-64.
- Forzieri, G.; Gardenti, M.; Caparrini, F. and Castelli, F. (2008). A methodology for the pre-selection of suitable sites for surface and underground small dams in arid areas: A case study in the region of Kidal, Mali, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 33: 74-85.
- Garagunis, C.N. (1981). Construction of an impervious diaphragm for improvement of a subsurface water reservoir and simultaneous protection from migrating salt water, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 24(1): 169-172.
- Gharzi, R.; Najafinezhad, A.; Noora, N.; Dehghani, A.A. and Filehkesh, E. (2013). Economic-Social issues of underground dam in Bafreh (Sabzehvar) watershed, *8th Iranian National Conference on Sciences and Watershed Management Engineering*, Lorestan University, Khoram Abad, Iran.
- Gupta, R.N.; Mukherjee, K.P. and Singh, B. (1987). Design of artificial underground dams for mine water storage, *Mine Water and the Environment*, 6(2): 1-14.
- Hajiazizi, Sh.; Kheirkhah, M. and Sharifi, A. (2010). Determining appropriate stream for underground dam construction with multi criteria decision making methods based on remote sensing and GIS techniques, Master degree thesis, remote sensing and GIS group, Islamic azad university, science and research branch, Tehran.
- Hanson, G. and Nilsson, A. (1986). Groundwater dams for rural water supplies in developing countries, *Ground Water*, 24(4): 497-506.
- Ishida, S.; Tsuchihara, T.; Yoshimoto, S. and Imaizumi, M. (2011). Sustainable use of groundwater with underground dams, *Review, JARQ*, 45: 51-61.
- Khorrani, k.; Vahhabzadeh, Gh.; Soleimani, K. and Talaei, R. (2013). Selection suitable sites of underground dam in the Gharesou watershed, Mater degree thesis, watershed management group, Sari Agricultural and Natural Resources University, pp. 122.
- Khorrani, k.; Vahhabzadeh, Gh.; Soleimani, K. and Talaei, R. (2014). Determining the suitable areas of underground dam in Gharasou watershed, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(2): 139-154.
- Luyun, R.J.; Momii, K.; Nakagawa, K. and Fujiyama, S. (2008). Salt water dynamics due to cut-off wall installation in coastal unconfined aquifers, Vol. 320. Copenhagen, Denmark, 9-13 September 2007, pp. 214-219.

- Naderi, F. (2012). Applying fuzzy logic to mapping susceptibility of landslide in Chardavel watershed in Ilam province, *Watershed Management Research*, 94: 74-85.
- Nilsson, A. (1988). *Groundwater dams for small scale water supply*, IT publications, pp. 69.
- Onder, H. and Yilmaz, M. (2000). Underground dams: A tool of sustainable development and management of groundwater resources, *European Water*, 11(12): 30-40.
- Pirmoradi, R.; Nakhaei, M. and Asadian, F. (2011). Determining suitable areas for underground dam construction using GIS and AHP, Case study: Malayer plain in Hamedan province, *Natural Geography*, 8: 51-66.
- Pirmoradian, R.; Behbahani, S.; Nazarifar, M. and Velayati, S. (2014). Initial mapping suitable locations for underground dam construction in Eyvanakey plain, *The first national conference on water resources and agricultural challenges*, Islamic azad university, Isfahan branch.
- Rezaei, P.; Rezaei, K.; Nazari-Shirkouhi, S. and Jamalizadeh, M.R. (2013). Application of fuzzy multi criteria decision making analysis for evaluating and selecting the best location for underground dam construction, *Acta Polytechnica Hungarica*, 10(7): 187-205.
- Shenkut, M. (1999). *Design of subsurface dam for BoriVillage*, AddisAbaba, Ethiopia.
- Soleimani, S.; Nikoodel, M.; Oroumiey, A. and Bahrami, H. (2009). Suitable site selection of underground dam Using RS and GIS, *Third Conference of Iran Water Resources Management*, Tabriz university.
- Tabatabaei Yazdi, J. and Nabipey, S. (2004). *Underground water dams for small-scale water supply*, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran, 63 pp.
- Telmer, K. and Best, M. (2004). *Underground dams: A practical solution for the water needs of small communities in semiarid regions*, School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria.
- Yousefi, K.; Mohammadzadeh, H. and Akbari, M. (2014). An evaluation of groundwater potential zones using combined fuzzy-AHP method and GIS/RS techniques A case study of NE Hezarmasjed mountain, Khorasan Razavi province, *International bulletin of water resources and development*, 7: 127-141.