

مکان‌یابی بندهای زیرزمینی در شهرستان بن استان چهارمحال و بختیاری

سید نعیم امامی^{۱*}، صالح یوسفی^۲، محمد نکویی‌مهر^۳ و معصومه منصوری^۴

چکیده

بندهای زیرزمینی، سازه‌هایی هستند که جریان طبیعی آب‌های زیرسطحی یا جریان‌های زیر قشری را مسدود کرده و سبب ایجاد ذخایر آبی در زیرزمین می‌شوند. این پژوهش با هدف تعیین معیارهای مناسب مکان‌یابی در جهت احداث بندهای زیرزمینی و به‌صورت موردی در سطح شهرستان بن در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. در این تحقیق از منطق بولین (Boolean) در جهت تعیین محدوده‌های مناسب بهره‌گیری شد و با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای لندست، ۱۰ محور مناسب احداث بند در محدوده‌های شناسایی‌شده مشخص شد. در ادامه و به‌منظور اولویت‌بندی محورها، با استفاده از روش سلسله‌مراتبی (AHP) ابتدا معیارها، زیرمعیارها و شاخص‌های اولویت‌بندی تعیین و سپس محورهای شناسایی‌شده براساس معیارهای منتخب به‌ترتیب از ۱ تا ۱۰ اولویت‌بندی شدند. براساس نتایج حاصل، به‌ترتیب، معیارهای هیدرولوژی با وزن ۵/۰، عوامل اقتصادی-اجتماعی با وزن ۳۰/۰، مخزن با وزن ۱۳/۰ و محور با وزن ۵۸/۰ دارای اولویت اول تا چهارم هستند. در تعیین ارزش شاخص‌ها، کمیت آب (ارتفاع رواناب) با وزن ۸۳۳/۰، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است و به‌عنوان مهم‌ترین شاخص و بعد از آن عمق آبرفت با وزن ۷۴۳/۰ دارای وزن و اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها هستند. براین‌اساس از بین محورهای شناسایی‌شده، دو محور ۱ (با شناسه B) در جاده ابتدای درازدره بن و محور ۲ (با شناسه A) واقع در دره یوقوش به‌عنوان اولویت‌های اول و دوم تعیین و به بخش اجرا معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرقشری، به‌گزینی، منطق بولین، AHP.

ارجاع: امامی س. ن.، یوسفی ص.، نکویی‌مهر م. و منصوری م. ۱۴۰۳. مکان‌یابی بندهای زیرزمینی در شهرستان بن استان چهارمحال و بختیاری. مجله پژوهش آب ایران، ۱۸: ۵۵-۲۰۰۹. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2024.14888.2624>

۱- دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.
۲- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.
۳- مربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.
۴- کارشناس ارشد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.

* نویسنده مسئول: N.emami@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

مقدمه

آب یک منبع طبیعی ضروری برای پایداری حیات است. با وجود این، توزیع نابرابر آب در هر دو مقیاس زمانی و مکانی منجر به وقوع درجات مختلفی از سیل و خشکسالی در سراسر جهان شده و کمبود منابع آب به یک مشکل مهم تبدیل شده است (Ajobade *et al.*, 2020; Emami and momzaei. 2018; Opafola *et al.*, 2019; Ilori *et al.*, 2019; Dai. 2016). کمبود منابع آب زیرزمینی از یک سو و برداشت بی‌رویه و غیرعلمی از سوی دیگر و افزایش روزافزون نیازهای مرتبط با رشد جمعیت، جوامع علمی را به بازنگری و ارائه راهکارهای مناسب در خصوص مدیریت بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی و ایجاد منابع جدید یا مخازن تجدیدشونده در کشور وامی‌دارد (Fazelpour Eghdaei *et al.*, 2012).

در ایران به دلیل شرایط جغرافیایی و اقلیمی، مدیریت منابع آب اولویت بالایی دارد. یکی از روش‌های کنترل و ذخیره آب در دوره‌های مرطوب برای استفاده در دوره‌های خشک، ساخت بندهای زیرزمینی است (Ebrahimi *et al.*, 2021). بندهای زیرزمینی سازه‌هایی با قابلیت مسدودکردن آب در زیر سطح، انحراف آب از سفره‌های زیرزمینی مجاور و آب‌های سطحی هستند (Dortaj *et al.*, 2020; Opafola *et al.*, 2020). اگرچه بند زیرزمینی روش نوپایی برای استحصال آب به شمار می‌رود با این حال نتایج رضایت‌بخشی از اجرای آن در نقاط مختلف جهان گزارش شده است. بندهای زیرزمینی به دلیل تنوع، در صورت اجرای مناسب، می‌توانند نقش مؤثری در مدیریت و توسعه منابع آبی کوچک به‌ویژه در دوران خشکسالی ایفا کنند. قسمت عمده‌ای از سهم ۲/۸ درصدی آب‌های شیرین جهان به‌صورت یخچال‌های قطبی، دور از دسترس است. از مقدار قابل‌دسترس باقی‌مانده نیز ۹۹ درصد را آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند (Mahdavi *et al.*, 2013). به‌علاوه تحقیقات نشان داده است که تجمع آب زیرزمینی در پشت بندهای زیرزمینی تأثیر معنی‌داری بر کیفیت آب به‌ویژه میزان نیترات آب ندارد (Lalehzari and tabatabaei, 2015). ایران در منطقه‌ای از دنیا واقع شده است که متوسط بارندگی سالانه آن کمتر از ۱/۳ متوسط باران سالانه جهان است. علاوه بر کمبود باران، توزیع زمانی و مکانی آن نیز بسیار نامناسب است. با توجه به چگونگی توزیع زمانی و مکانی بارش و نیز رواناب در

سطح کشور و فقدان رطوبت کافی و جریان‌های سطحی دائمی، همانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، عمده‌ترین منابع تأمین نیازهای آبی کشور را آبخوان‌ها تشکیل می‌دهند. نیمه شرقی استان چهارمحال و بختیاری با میانگین بارش حدود ۳۰۰ میلی‌متر جزو نواحی نیمه‌خشک تلقی می‌شود. کاهش آبدهی و خشک‌شدن آب برخی از منابع آب زیرزمینی سبب تبدیل اراضی آبی به دیم شده و این مسئله موجب کاهش درآمد برخی از روستائیان شده است؛ بنابراین تأمین آب در این مناطق کمک شایانی به افزایش درآمد روستائیان، ممانعت از مهاجرت آنان به شهرهای استان و کاهش مشکلات اجتماعی در این مناطق خواهد داشت. با توجه به اینکه استان چهارمحال و بختیاری و شهرستان بن دارای واحد آبرفت‌های درشت‌دانه بین کوهستانی و مخروط‌افکنه‌ای مناسب برای ذخیره آب است، توسعه بندهای زیرزمینی یکی از روش‌های مهم اقتصادی و بسیار مؤثر در مقابله با خشکسالی و کمبود آب و عواقب آن در این استان است. مهم‌ترین مشکل در توسعه و ایجاد بندهای زیرزمینی، پیچیدگی تعیین مناطق مناسب در جهت احداث آن‌هاست. این مشکلات از آنجا ناشی می‌شود که معیارها و عوامل مختلف زیادی از جنس معیارهای فیزیکی و اقتصادی-اجتماعی در تصمیم‌گیری در مورد تناسب یا عدم‌تناسب محل‌های موردنظر دخیل است و همچنین بررسی و تعیین این عوامل در عرصه‌ها با استفاده از روش‌های سنتی بسیار پرهزینه بوده و نیاز به صرف وقت بسیار دارد؛ بنابراین تعیین مهم‌ترین معیارها برای شناسایی مکان‌های مستعد احداث بندهای زیرزمینی و مناسب‌ترین روش تصمیم‌گیری در تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و رتبه‌بندی مکان‌های مستعد، کمک شایانی به اجرای این سازه‌ها کرده و از طرفی دیگر می‌تواند به‌عنوان یک الگو در سایر نقاط کشور مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات مختلفی در مورد مکان‌یابی بند زیرزمینی انجام شده است که در ذیل به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. Choi *et al.* (2023) روش تحلیل سلسله‌مراتبی را به‌عنوان یک روش کارآمد در جهت مکان‌یابی و مدیریت طرح‌های آبی معرفی کرد. در پژوهش انجام‌شده توسط Ebrahimi *et al.* (2021) به اولویت‌بندی مکان مناسب برای ساخت سد زیرزمینی در جنوب شرق استان بوشهر با استفاده از منطق بولین و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد و مطابق با طبقه‌بندی آمبرژه در اقلیم خشک سرد قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه بن ۳۴۵ میلی‌متر، حداقل دما ۳۲- و حداکثر دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. از لحاظ آب‌وهوا، ریزش‌های جوی در منطقه، عمدتاً تحت‌تأثیر سامانه‌های کم‌فشار مدیترانه‌ای قرار دارد.

روش کار

با این توضیح که بندهای زیرزمینی به‌طور معمول حجمی بین ۱ تا ۲ میلیون مترمکعب آب را ذخیره می‌کنند، مطالعات مکان‌یابی در دو مرحله (الف و ب) و مرحله دوم در سه‌گام انجام پذیرفت (شکل ۲).

الف) مطالعات پایه

مرحله مطالعات پایه شامل مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی منابع، تهیه نقشه‌ها و اطلاعات لازم با مقیاس ترجیحی ۱/۲۵۰۰۰، انجام عملیات صحرایی و رفع نواقص است.

ب) تلفیق داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده براساس منطق بولین در جهت حذف مناطق نامناسب و انتخاب محدوده‌های مناسب و تعیین مناطق و بازه‌های مستعد احداث بند زیرزمینی با استفاده از روش سلسله‌مراتبی به شرح و توالی زیر:

۱- گام اول تشخیص و انتخاب محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی با حذف نواحی نامناسب: با توجه به نتایج مطالعات قبلی، قضاوت کارشناسی براساس بازدیدهای صحرایی و دستورالعمل‌های ارائه‌شده در خصوص شرایط لازم برای تعیین محل احداث براساس منطق بولین با تعریف معیارهای حذفی از کل منطقه کسر شد تا محدوده‌های دارای پتانسیل اولیه احداث سد زیرزمینی مشخص شود. برای اینکه یک بند زیرزمینی از بازدهی مناسب برخوردار باشد، تلفیقی از محل قرارگیری بند و سازه آن لازم است. شرایطی که در حین مکان‌یابی نقاط مناسب برای احداث بند باید در نظر داشت شامل شیب کم بستر آبراهه، وجود جریان‌ات زیرسطحی کم‌عمق و دینامیک در بستر آبراهه، وجود آبخوان با تخلخل مناسب در محل احداث بند زیرزمینی، وجود سنگ بستر با نفوذپذیری کم، وجود قسمت‌های باریک در آبراهه، در دسترس بودن منابع قرضه، نزدیکی به مناطق مصرف آب، کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی است (Emami and Momzaei, 2018).

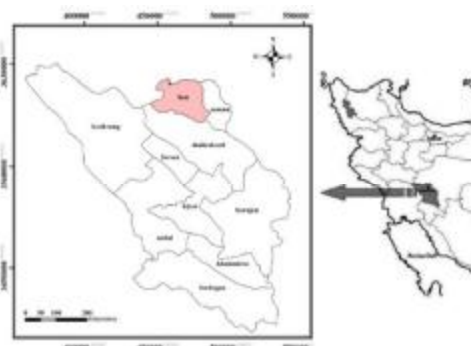
(MCDM) شامل روش‌های AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE III در چهار شهرستان بوشهر، تنگستان، دشتی و جم پرداخته است.

(Chezgi et al., 2019) برای مکان‌یابی بند زیرزمینی در حوزه آبخیز کجبید بالاقلی شهرستان گرمه استان خراسان شمالی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی کمک گرفتند. (Mahdavi et al., 2013) در جهت مکان‌یابی مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی دشت شهرکرد از منطق Boolean و روش فازی در سامانه GIS استفاده کردند. در استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و به‌منظور انتخاب معیارها و زیرمعیارها از تحقیقات محققان مختلف در زمینه مکان‌یابی بندهای زیرزمینی در داخل و خارج استفاده شده است. در این پژوهش‌ها معیارهای اصلی در تمام شرایط زمینی و اقلیمی شامل معیارهای اقتصادی-اجتماعی، محور، مخزن و آب است (Emami., 2024; Emami et al., 2023; Emami and momzaei, 2018; Chezgi et al., 2019).

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی شامل محدوده جغرافیایی شهرستان بن به مساحت ۱۴۳۲۷ هکتار است. این شهرستان در شمال تا شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی ملاحظه می‌شود. در این محدوده شهرهای بن، وردنجان و یان‌چشمه قرار دارند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان بن و استان چهارمحال و بختیاری در کشور

براساس طبقه‌بندی اقلیمی استان (Karimi, 1988)، شهرستان بن در زیر اقلیم بن با آب‌وهوای نیمه‌مرطوب با



شکل ۲- مراحل انتخاب مکان‌های مناسب برای احداث بندهای زیرزمینی

پس از مشخص کردن محورها در مرحله اول مکان‌یابی و تعیین معیارها و ارزش آن‌ها، در این مرحله با استفاده از روش MADM و بر مبنای روش تصمیم‌گیری AHP نقاط مناسب در جهت احداث بند زیرزمینی اولویت‌بندی می‌شوند. در این تحقیق با توجه به موقعیت منطقه مورد مطالعه و آمار و اطلاعات موجود از ۴ معیار اصلی و ۳ زیر معیار و ۱۷ شاخص در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد (شکل ۴). برای مقایسه نظرهای تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی و در مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ استفاده شد. در ادامه با استفاده از ارزش‌های نسبی تعیین‌شده به روش مقایسه دودویی (Saaty, 2001) برای این شاخص‌ها و معیارها و با استفاده از معادله (۱) برای هر کدام از محورها شاخص تناسب محاسبه شد.

$$Si = Ri.A1 * \sum_{i=1}^m Ri.Bi * Ri.KBi +$$

$$Ri.A2 * \sum_{y=1}^L Ri.Cy + \dots Ri.An * \sum_{z=1}^j Ri.Dz * Ri.KDz \quad (1)$$

SI = شاخص تناسب

N = تعداد معیارهای اصلی A

$Ri.A1, Ri.A2, \dots, Ri.An$ = اهمیت نسبی معیارهای $A_1, A_2, \dots, A_N$

m, j, L و N

M, L و j = تعداد معیارهای فرعی مرتبط با معیارهای

اصلی $A_1, A_2, \dots, A_N$

۲- گام دوم شناسایی نقاط مناسب موجود در این محدوده‌ها با استفاده از معیارهای انتخاب مکان مناسب بند زیرزمینی و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP: در این مرحله مناسب‌ترین محورها در عرض آبراهه‌های واقع در محدوده‌های پتانسیل‌دار مشخص می‌شود. با استفاده از نقشه توپوگرافی و بازدیدهای صحرایی، همه تنگه‌های موجود در محدوده‌های مناسب مورد بازدید دقیق قرار گرفته و مشخصات آن‌ها شامل عرض تنگه یا محور، عمق احتمالی رسوبات محور تا دستیابی به سنگ مخزن، عمق تقریبی آبرفت در بالادست تنگه، سنگ‌شناسی تکیه‌گاه و کف مخزن و آبراهه اصلی ثبت شد (جدول ۱). محور منتخب در هر محدوده علاوه بر داشتن کمترین عرض در جهت حجم کار سازه‌ای، باید دارای حجم مخزن مناسب نیز باشد. از طرفی بایستی وجود منابع آبی حساس مانند قنات در این محدوده‌ها بررسی شوند. مناسب‌ترین محورها آن‌هایی‌اند هستند که علاوه بر طول کم دارای گسترش سطحی زیاد مخزن در بالادست محور باشند. برای تهیه نقشه پراکندگی قنات، از نقشه قنات در سازمان آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. یک حریم با فاصله ۱۰۰ متر از محور قنات تعریف شد و مناطق درون این محدوده، برای ایجاد بند زیرزمینی، نامناسب در نظر گرفته شد. مراحل مختلف انتخاب نقاط یا محورهای مناسب احداث بندهای زیرزمینی در داخل محدوده‌های شناسایی‌شده اولیه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

۳- گام سوم ارزیابی نقاط نسبت به یکدیگر و اولویت‌بندی آن‌ها در جهت احداث بند زیرزمینی:

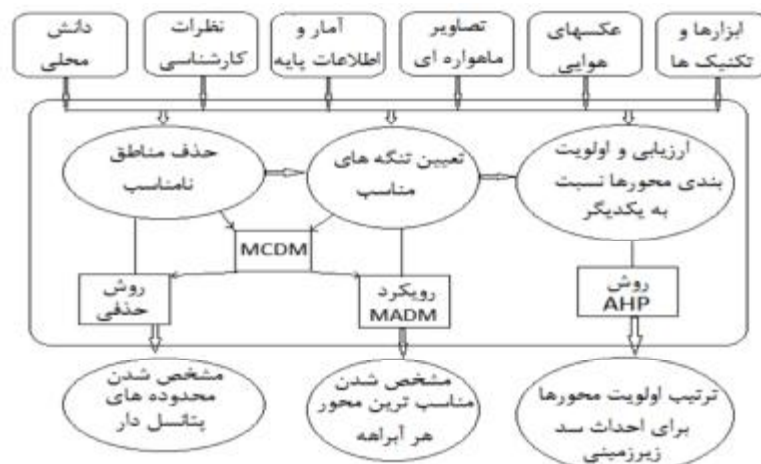
در انتخاب مکان مناسب احداث سد زیرزمینی عوامل زیادی مؤثرند که بعضی از آن‌ها مثل اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی کیفی بوده و برخی دیگر مثل حجم آب و هزینه، کمی هستند. همچنین همه عوامل کمی دارای یک مقیاس نیستند و حتی مقادیر مختلف یک معیار کمی مانند شیب از درجات اهمیت متفاوتی برخوردارند و میزان و اهمیت هر معیار در تصمیم‌گیری متفاوت است؛ بنابراین ماهیت مسئله، تصمیم‌گیری چندمعیاره همگانی است که تا حدودی مشکل و پیچیده است (Khodadadi and Hemmati, 2018). برای حل مسئله و رسیدن به هدف نهایی (مکان‌یابی) مطابق با شکل ۳ یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری توسعه داده شده است.

RiB, RiC, RiD = اهمیت نسبی معیارهای B, C و D که در ارتباط با معیارهای اصلی A1, A2, ..., An هستند.

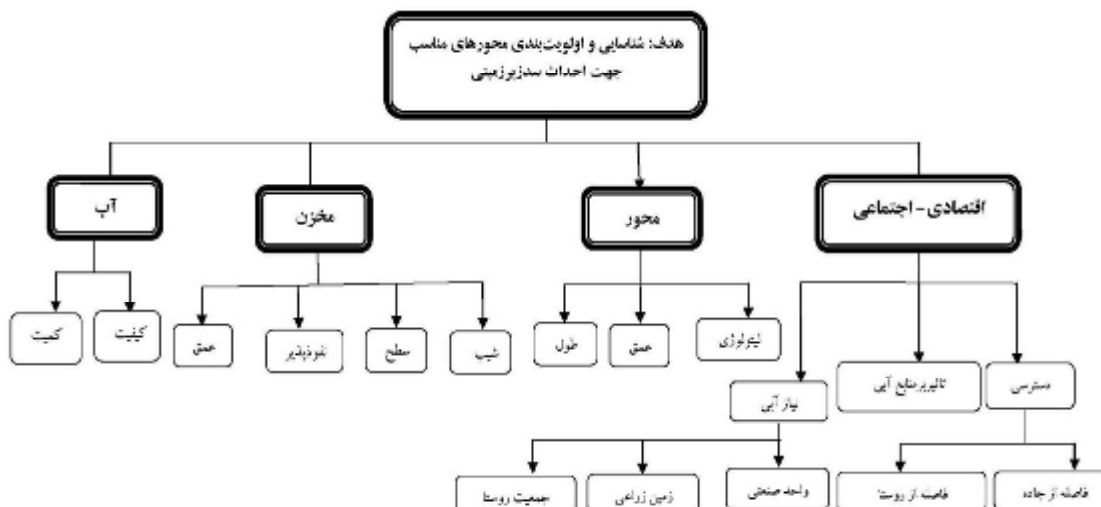
RiKB, RiKC, RiKD = اهمیت نسبی شاخص‌های مربوط به معیارهای فرعی B, C و D که در ارتباط با معیارهای اصلی A1, A2, ..., An هستند.

جدول ۱- مشخصات فنی محورهای شناسایی شده اولیه

شماره محور	نام محلی	عرض تنگه (متر)	عمق تقریبی سنگ کف (متر)	زمین‌شناسی	چینه	توضیحات
۱	جاده ابتدای دراز درهٔ بن	۵۰	۱۵	تکیه‌گاه چپ و راست متشکل از کالک شیبست‌های ژوراسیک	سیلاب‌های فصلی بالادست حوزه	منابع تأمین آب ناپایدار
۲	درهٔ یوقوش	۱۰۰	۱۵	تکیه‌گاه چپ و راست متشکل از کالک شیبست‌های ژوراسیک	چشمه و سیلاب‌های بالادست	بدون محدودیت خاص
۳	شمال درازدره	۸۰	۱۰	تکیه‌گاه چپ آندزیت‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	هرزآب‌ها و رواناب‌های فصلی	وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و بستر
۴	شمال درازدره	۴۰	۱۵	تکیه‌گاه چپ آندزیت‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	هرزآب‌ها و رواناب‌های فصلی	وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و قطع آبراههٔ اصلی منتهی به زاینده‌رود
۵	غرب درازدره	۷۰	۲۰	تکیه‌گاه راست آندزیت‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	سیلاب‌ها و چشمه‌های فصلی ابتدای درازدره	وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و قطع آبراههٔ اصلی منتهی به زاینده‌رود
۶	مرکز درازدره	۳۰	۱۵	تکیه‌گاه راست آندزیت‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	سیلاب‌ها و چشمه‌های فصلی ابتدای درازدره	وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و قطع آبراههٔ اصلی منتهی به زاینده‌رود
۷	مرکز درازدره	۵۰	۱۵	تکیه‌گاه راست آندزیت‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	سیلاب‌ها و چشمه‌های فصلی ابتدای درازدره	وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و قطع آبراههٔ اصلی منتهی به زاینده‌رود
۸	شمال درازدره بن	۴۰	۱۰	تکیه‌گاه چپ آندزیت‌ها و توف‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	هرزآب‌ها و رواناب‌های فصلی	منابع آب کم، عمق کم آبرفت و حجم کم مخزن
۹	شمال درازدره بن	۳۰	۱۰	تکیه‌گاه چپ آندزیت‌ها و توف‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	هرزآب‌ها و رواناب‌های فصلی	منابع آب کم، عمق کم آبرفت و حجم کم مخزن
۱۰	شمال درازدره بن	۳۰	۱۰	تکیه‌گاه چپ آندزیت‌ها و توف‌های فرسوده و هوازده و تکیه‌گاه چپ رسوبات کواترن	هرزآب‌ها و رواناب‌های فصلی	منابع آب کم، وجود باغات متراکم در تکیه‌گاه و بستر



شکل ۳- ساختار DSS برای مکان‌یابی سد زیرزمینی (Khodadadi and Hemmati, 2018)



شکل ۴- ساختار جریان تصمیم‌گیری AHP مورد استفاده در اولویت‌بندی احداث بند زیرزمینی

در مناطق دارای کد ۱۱۰ عوامل زمین‌شناسی و کاربری منطبق با استانداردهای تعریف‌شده در جهت احداث بند بوده، اما شیب کمتر از ۲ درصد است که براین اساس می‌توان این مناطق را نیز نسبتاً مناسب برای احداث بند زیرزمینی در نظر گرفت.

شناسایی و تعیین مناطق (تنگه‌های) مستعد اولیه احداث بند زیرزمینی

بعد از تهیه نقشه محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی با استفاده از منطق بولین، این محدوده‌ها با نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های آبراهه‌ها، نقشه پراکندگی قنات در سطح حوزه مورد مطالعه و بررسی‌های میدانی صورت پذیرفته تطبیق داده شد و در نهایت ۱۰ محور مناسب برای احداث بند زیرزمینی در شهرستان بن شناسایی شد (شکل ۶- الف). در شکل ۶- ب موقعیت مکانی گزینه‌های منتخب همراه با قنات حوزه آبخیز بن بر تصویر ماهواره‌ای لندست نشان داده شده است. براین اساس هیچ‌یک از محوره‌های شناسایی‌شده، قنات موجود در منطقه را قطع نمی‌کنند.

اولویت‌بندی محورها، تجزیه و تحلیل حساسیت عوامل
هرچه شاخص تناسب برای هریک از معیارهای اصلی و فرعی موجود از مقدار بیشتری برخوردار باشد، محور مورد نظر دارای ارزش بیشتری برای احداث بند زیرزمینی است.

نتایج و بحث

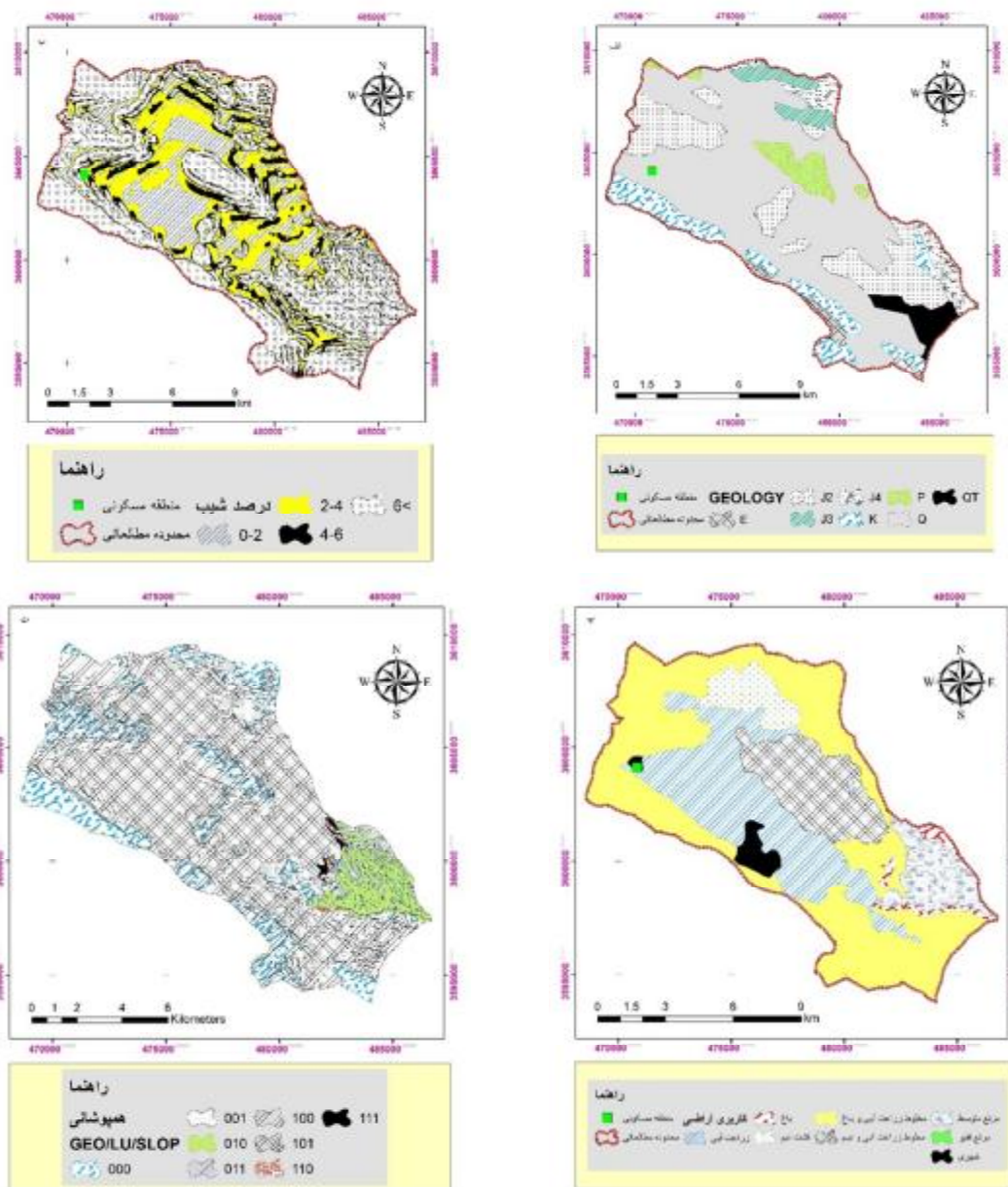
تشخیص و انتخاب محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی

با هدف تعیین محدوده‌های مناسب احداث بند زیرزمینی در شهرستان بن، نقشه‌های پایه زمین‌شناسی، شیب و کاربری اراضی با استفاده از منطق بولین تهیه و به مناطق مستعد احداث بند ارزش یک و مناطق دارای محدودیت احداث ارزش صفر داده شد. مناطق مناسب شامل بستر آبرفتی رودخانه‌هایی است (آبرفت‌های کواترنر در نقشه زمین‌شناسی) که دارای شیب‌های حداکثر ۵ تا ۶ درصد هستند و زمین‌های کشاورزی، صنعتی، مسکونی و کوره قنات در آنجا وجود ندارد. علاوه بر شرایط بالا، این بسترهای آبرفتی نباید منطبق بر ساختارهای خطی مانند گسل‌ها و دارای آبگذری باشند. پس از تهیه سه نقشه اساسی شیب، زمین‌شناسی و کاربری اراضی، با انطباق و روی هم اندازی این سه نقشه، نقشه محدوده‌های مناسب در جهت انتخاب تنگه‌های مناسب احداث بند زیرزمینی استخراج شد. شکل‌های ۵- الف تا ۵- ت، به ترتیب مناطق مستعد از نظر زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی و پس از تلفیق این نقشه‌ها با استفاده از بولین را نشان می‌دهند. مناطق دارای ارزش عددی ۱۱۱ دارای اولویت اول و ۱۱۰ دارای اولویت دوم و سایر مناطق نامناسب تشخیص داده شده‌اند. کد ۱۱۱ بدان معناست که آن محدوده از هر سه عامل تصمیم‌گیری در منطق بولین شامل زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شیب دارای شرایط مناسب و ایده‌آل است.

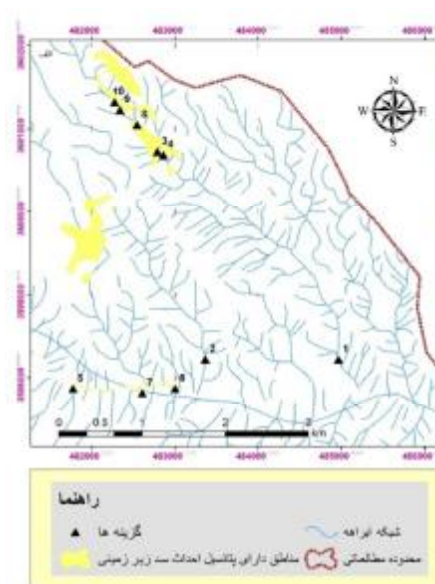
مهم‌ترین شاخص به شمار می‌رود. همچنین بعد از آن عمق آبرفت با وزن ۰/۷۴ دارای وزن و اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها است.

در جدول ۳ شاخص تناسب معیارهای اصلی، شاخص تناسب کلی هریک از محورها که حاصل جمع شاخص تناسب معیارهای اصلی است و همچنین اولویت آن‌ها در جهت‌انداز بند زیرزمینی براساس سناریو منتخب در حوزه آبخیزین آورده شده است.

با توجه به جداول تعیین ارزش معیارهای اصلی و شاخص‌ها (جدول ۲)، معیار هیدرولوژی با وزن ۰/۵۱ مهم‌ترین معیار در مکان‌یابی بند زیرزمینی محسوب می‌شود. بعد از آن معیار عوامل اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۳۰ دومین معیار محسوب می‌شود. همچنین معیارهای مخزن و محور به‌ترتیب با وزن ۰/۱۳ و ۰/۰۵۸ سومین و چهارمین معیار مهم در اولویت‌بندی بند زیرزمینی قرار دارند. در تعیین ارزش شاخص‌ها، کمیت آب (ارتفاع رواناب) با وزن ۰/۸۳، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است و به‌عنوان



شکل ۵- الف - نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز شهرستان بن؛ ب - نقشه شیب حوزه آبخیز شهرستان بن؛ پ - نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز شهرستان بن؛ ت - نقشه لایه همپوشانی براساس منطق بولین در حوزه آبخیز شهرستان بن



شکل ۶- الف - نقشه گزیندهای منتخب بند زیرزمینی بر لایه همپوشانی مناطق مستعد احداث بند زیرزمینی براساس منطق بولین در شهرستان بن (کد ۱۱۱ با رنگ قرمز مناطق با اولویت ۱ و کد ۱۱۰ با رنگ زرد شامل آبراهه‌های مستعد با اولویت ۲)؛ ب - موقعیت مکانی محورهای منتخب در جهت احداث بند زیرزمینی همراه با رشته قنات‌های موجود در منطقه

جدول ۲- تعیین اهمیت و وزن معیارهای مخزن با مقایسه‌های دودویی

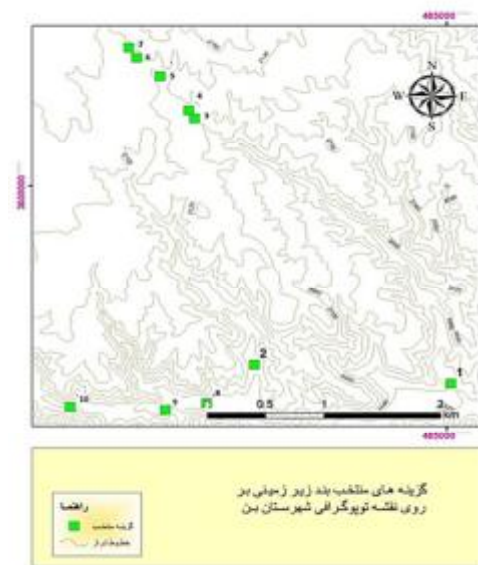
معیارهای فرعی آب	اهمیت نسبی	معیارهای فرعی مخزن	اهمیت نسبی	معیارهای فرعی محور	اهمیت نسبی	معیارهای فرعی اجتماعی-اقتصادی	اهمیت نسبی	معیارهای فرعی دسترسی	اهمیت نسبی
کمیت	۰/۸۳	نفوذپذیری	۰/۵۶	عمق	۰/۷۴	تأثیر بر منابع آبی	۰/۷۳	فاصله از روستا	۰/۸۸
کیفیت	۰/۱۷	شیب	۰/۲۵	طول	۰/۱۹	نیاز آبی	۰/۱۹	فاصله از جاده	۰/۱۲
		سطح	۰/۰۹۵	تکیه‌گاه	۰/۰۶	میزان دسترسی	۰/۰۸		
		عمق	۰/۰۹۵						

جدول ۳- شاخص تناسب معیارهای اصلی در سناریوی انتخابی، شاخص تناسب کلی و اولویت هریک از محورها

شماره محور	آب	مخزن	محور	اقتصادی-اجتماعی	شاخص تناسب کل	اولویت
۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۰۸	۰/۲۷	۸
۳	۰/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۲۸	۴
۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۲۷	۷
۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۳۷	۰/۲۹	۳
۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۰۳۸	۰/۲۶	۱۰
۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۳۹	۰/۳۳	۱
۲	۰/۰۴	۰/۰۰۵	۰/۲۲	۰/۰۳۷	۰/۳۱	۲
۷	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۲۶	۹
۹	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۲۷	۶
۸	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۲۲	۰/۰۱	۰/۲۸	۵

انتخاب و پیشنهاد شدند. محدوده‌های شناسایی شده به ترتیب اولویت بند در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۸ نیز موقعیت و مشخصات فنی این دو ساختگاه برتر نمایش داده شده است.

درجهت اولویت‌بندی محورهای به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن ارزش واحد برای همه معیارهای اصلی براساس جدول ۳ برای ۱۰ محور مشخص شده در نهایت محورهای شماره ۱ و ۲ یا B و A با اولویت محور (1) B



شکل ۷- اولویت‌بندی محورهای شناسایی شده بند زیرزمینی در شهرستان بن و نمایش گزینه‌های A و B روی تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺



شکل ۸- موقعیت توپوگرافیک و مشخصات فنی محور B (گزینه برتر) و محور A (اولویت دوم)

برای احداث بندهای زیرزمینی در شهرستان بن به انجام رسید. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، در مرحله اول با استفاده از منطق بولین و با استفاده از سه معیار حذفی، شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی، مناطق نامناسب

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف تعیین معیارهای مناسب درجهت مکان‌یابی مناطق و محورهای مناسب احداث بند زیرزمینی در نهایت تعیین گزینه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها

حذف شدند. سپس با بررسی صحرایی در محدوده‌های تعیین‌شده به روش بولین درنهایت ۱۰ محور مناسب در جهت احداث بند زیرزمینی انتخاب شد. در ادامه با استفاده از روش MADM و بر مبنای جریان تصمیم‌گیری و با استفاده از روش AHP و تکمیل پرسشنامه به روش دلفی و با استفاده از نظرات کارشناسی، دو گزینه برتر B و A به‌عنوان گزینه‌های برتر و اولویت اول و دوم معرفی شدند. با توجه به تعیین ارزش معیارهای اصلی و شاخص‌ها، معیارهای هیدرولوژی با وزن ۰/۵۱، عوامل اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۳۰ و معیارهای مخزن و محور به‌ترتیب با وزن ۰/۱۳ و ۰/۵۸ به‌ترتیب اولین تا چهارمین معیار هستند. در تعیین ارزش شاخص‌ها، کمیت آب (ارتفاع رواناب) با وزن ۰/۸۳۳، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده و به‌عنوان مهم‌ترین شاخص به شمار می‌رود. همچنین بعد از آن عمق آبرفت با وزن ۰/۷۴۳ دارای وزن و اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها هستند که این نشان‌دهنده اهمیت معیار هیدرولوژی از نظر کارشناسان و خبرگان است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی که در این مطالعه به‌منظور اولویت‌بندی نقاط و تعیین مناطق مناسب در جهت احداث بندهای زیرزمینی استفاده شده است، نشان داد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ابزار مناسبی در جهت فرایند تصمیم‌گیری با معیارهای مختلف است و می‌تواند ابزار مدیریتی مناسبی برای کمک به تصمیم‌گیری‌ها باشد. مخصوصاً در مواقعی که معیارهای کمی و کیفی متعددی بر تصمیم تأثیرگذار هستند، این ابزار می‌تواند بسیار مفید واقع شود و به فرایند تصمیم‌گیری سرعت و دقت بیشتری بخشد؛ علاوه بر این امکان تعیین محل‌های مناسب و اولویت‌بندی نقاط مناسب در جهت احداث بندهای زیرزمینی را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داده که کمیت آب در مقایسه با کیفیت آن از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا در صورت نبود یا کمبود جریان‌ات زیرسطحی، مخزن بند زیرزمینی به‌طور کامل آب‌گیری نشده و مشکلات فراوانی از جمله تأمین نیاز آبی حقایه‌بران بروز خواهد کرد که با نتایج Nilson, 1988 درباره جمع‌آوری آب با استفاده از بند زیرزمینی با تأکید بر کمیت آب در کشورهای آفریقایی همخوانی دارد. مطابق با نتایج حاصل، هرچه کیفیت آب (سختی آب) بالاتر باشد، دارای اهمیت نسبی بیشتری است. در مورد کیفیت آب چنانچه در منطقه مورد

بررسی منابع آلوده‌کننده آب موجود باشد، در مرحله اول مکان‌یابی، مناطق پایین‌دست این منابع به‌عنوان مکان‌های نامناسب در نظر گرفته شده و حذف می‌شود. در مطالعاتی درباره کیفیت آب، عنوان شده که چون آب این سفره‌ها به‌صورت طبیعی به‌وسیله زمین‌های تشکیل‌دهنده تصفیه می‌شود، از نظر کیفیت خیلی خوب است (Mohammadi, 2000). به‌دلیل تشکیل مخزن بند زیرزمینی در زیرزمین و در بین خلل و فرج رسوبات آبرفتی، به‌دست‌آوردن حجم مخزن بسیار دشوار است و این از معایب بند زیرزمینی به‌حساب می‌آید. برای تعیین حجم مخزن از شاخص‌هایی چون عمق، طول و شیب استفاده شد که با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (Salami, 2007; Tabatabai Yazdi et al., 2004; Nilson, 1988). نتایج عامل حجم مخزن نشان می‌دهد که هرچه حجم مخزن بزرگ‌تر باشد، گزینه مناسب‌تری خواهد بود. در بندهای زیرزمینی برخلاف بندهای معمولی که بزرگ‌بودن حجم مخزن به‌دلیل تلفات ناشی از تبخیر یک عیب محسوب می‌شود، بدون در نظر گرفتن سایر فاکتورهای مؤثر در انتخاب مناطق مناسب در جهت احداث بند زیرزمینی، بهترین مکان احداث بند در یک رودخانه تنگه‌هایی هستند که دارای بیشترین سطح مخزن در مناطق بالادست جریان باشند (Tabatabai Yazdi et al., 2004). نتایج عامل عمق مخزن نشان می‌دهد که بهترین مناطق آبرفت‌های با عمق کمتر از ۱۰ متر بوده که با نتایج chezgi et al., 2019 که مناطق دارای عمق آبرفت کمتر را در جهت احداث بند زیرزمینی مناسب می‌داند، مطابقت دارد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در مورد شیب، هرچه شیب کمتر شود، اهمیت نسبی آن بیشتر می‌شود. نتایج بررسی نشان داد که اکثر آبراهه‌های ۳ و ۴ در شیب‌های کمتر از ۵ درصد قرار داشتند که مناطق مناسبی برای احداث بند زیرزمینی هستند، زیرا عامل شیب رابطه معکوس با حجم مخزن و مقدار نفوذپذیری دارد و با نتایج Tabatabai Yazdi et al., 2004; Soleimani, 2008; Nilson, 1988 همخوانی دارد. در بین شاخص‌های محور، عمق آبرفت بند بیشترین اهمیت نسبی را در بین شاخص‌های محور به خود اختصاص داده است، زیرا در اقتصادی‌بودن یک بند زیرزمینی، عمق و طول محور بیشترین اهمیت را دارند و به‌دلیل محدودیتی که در عمق حفاری محور نسبت به طول محور وجود دارد، این معیار در

- Installation Considering Humanities and Social Factors Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Korea. *Water*, 15(18): p.3296. <https://doi.org/10.3390/w15183296>.
4. Dai X. 2016. Dam site selection using an integrated method of AHP and GIS for decision making support in Bortala, Northwest China (Master's thesis, University of Twente).
 5. Dortaj A. Maghsoudy S. Doulati Ardejani F. and Eskandari Z. 2020. Locating suitable sites for construction of subsurface dams in semiarid region of Iran: using modified ELECTRE III. *Sustainable Water Resources Management*, 6: pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00362-2>.
 6. Ebrahimi J. Moradi H.R. and Chezgi J. 2021. Prioritizing suitable locations for underground dam construction in south-east of Bushehr Province. *Environmental Earth Sciences*, 80(19): 680. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-161525/v1>.
 7. Emami N. & Momzai A. 2018. Selection of the best capable areas for construction of underground dam using Multi-criteria Decision Making (Case study: Marghmalek-Shahrekord Watershed). *Iran Water Research Journal*, 13(4): 83-92. SID. <https://sid.ir/paper/159873/fa>. (InPersian).
 8. Emami N. Yousefi S. & Nekeoimehr M. 2023. Evaluation of effective criteria on determination of capable areas to construction of underground dam in Shahrekord watershed, Iran. A chapter of "Surface and groundwater resources development and management in semi-arid region book. Springer. pp. 393-410..
 9. Emami N. 2024. Assessment of Fuzzy and AHP methods for underground dam site selection in the Ben County (Chaharmahal and Bakhtyari Province). Final Report of Research project. Project code: 24-42-29-009-000208. Agricultural research and ducation organization Soil Conservation and Watershed Management Research Institute griculture and Natural resources research and education center of chaharmahal and Bakhtiari Province. 129 p.
 10. Fazelpour Eghdai M. Dastorani M. T. Talebi A. & Piri Ardakani M. 2012. Underground dam is a suitable solution for water management in droughts (case study of Mill Sefid area of Ardakan city). The 9th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering. <https://civilica.com/doc/246660>. (In Persian).
 11. Ilori B.A. Adewumi J.R. Lasisi K.H. & Ajibade F.O. 2019. Qualitative assessment
- درجه اول اولویت قرار دارد که با نتایج Salami 2007 مبنی بر اینکه مهم‌ترین محدودیت در احداث بند زیرزمینی، مدنظر قرار دادن عمق محور است، همخوانی دارد. همچنین با توجه به اینکه در مرحله اول مکان‌یابی تکیه‌گاه‌های نفوذپذیر حذف شده‌اند سایر لیتولوژی‌ها به عنوان تکیه‌گاه چندان مشکل‌ساز نبوده و نسبت به عمق و طول محور دارای اهمیت کمتری است. محورهای مناسب آن‌هایی هستند که علاوه بر دارا بودن مخزنی مناسب در جهت ذخیره آب در بالادست، دارای کمترین عمق و طول ممکن در جهت اجرای دیواره باشند. محورهای با طول کمتر دارای ارزش و اهمیت بیشتری نسبت به دیگر محورها هستند که با نظرات Tabatabai Yazdi *et al.*, 2004 و Soleimani, 2008 مطابقت دارد. در بین زیرمعیارهای اقتصادی-اجتماعی، عامل تأثیر بر منابع آبی خصوصاً بر قنات‌های پایین‌دست، از اهمیت بیشتری برخوردار است، چون تغییر در آبدهی قنات، باعث چالش‌های محلی می‌شود.
- نتایج نشان داد که شاخص فاصله از روستا از درجه اهمیت بیشتری نسبت به فاصله از جاده برخوردار است. وجود جاده در محل احداث بند زیرزمینی باعث افزایش سرعت دسترسی و کاهش هزینه‌های مرتبط با ساخت و نگهداری سازه می‌شود. محورهایی که به جاده نزدیک‌تر باشند، نسبت به سایر محورها دارای اولویت بیشتری هستند که با نتایج Salami, 2007 و Chezgi *et al.*, 2019 مطابقت دارد.

منابع

1. Ajibade T.F. Nwogwu N.A. Ajibade F.O. Adelodun B. Idowu T.E. Ojo A.O. Iji J.O. Olajire O.O. & Akinmusere O.K. 2020. Potential dam sites selection using integrated techniques of remote sensing and GIS in Imo State, Southeastern, Nigeria. *Sustainable Water Resources Management*, 6: 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00416-5>.
2. Chezgi J. Arabkhazaeli E. and Heshmatpur A. 2019. Determining suitable locations for the construction of underground dams to manage water resources in arid and semi-arid areas. *Desert Management*, Year, 8: 73-84. 10.18869/acadpub.jwmr.7.13.172. InPersian.
3. Choi J.R. Sung J.H. Kang D.H. Choo K.S. and Kim B.S. 2023. A Study on the Priority Selection Method for Underground Dam

- Master's thesis of the engineering geology field of Tarbiat Modares University, 112 p.
22. Tabatabai Yazdi & Nabi-Pi-Lashkarian S. 2004. Underground water dams for small-scale water supply, Publications of Soil Conservation and Watershed Research Institute, 63.
 - of some available water resources in Efon-Alaaye, Ekiti State Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(1): pp.35-40. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i1.5>.
 12. Karimi M. 1988. Climate report of the central region of Iran (Chaharmahal and Bakhtiari provinces, Isfahan province). Publications of Isfahan University of Technology. 87 p.
 13. Khodadadi S. & Hemmati M. 2018. Site Selection and Prioritizing the Subsurface Dam Construction Axis Using Decision Support System (DSS), (Case Study: Daryan and Heris Catchments). *Hydrogeology*, 3: 47-59. 10.22034/HYDRO.2018.6176.
 14. Lalehzari R. & Tabatabaei S.H. 2015. Simulating the Impact of Subsurface Dam Construction on the Change of Nitrate Distribution. *Environmental Earth Sciences Journal* (<http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/geology/journal/12665>) DOI: 10.1007/s12665-015-4362-2.
 15. Mahdavi A. Tabatabaei S.H. Mahdavi R. & Nouri M.R. K. 2013. Application of digital techniques to identify aquifer artificial recharge sites in GIS environment. *International Journal of Digital Earth*, 6(6): 589-609. (<http://www.tandf.co.uk/journals/TJDE>) DOI: 10.1080/17538947.2011.638937.
 16. Mohammadi Fatideh. M. 2000. Extraction of underground water, Gilan University Publications, second edition, 291 p
 17. Nilson A. 1988. Groundwater Dams for Small-Scale Water Supply, Intermediate Technology Publications, London. 78 pp.
 18. Opafola O.T. Oladepo K.T. Ajibade F.O. and David A.O. 2020. Potability assessment of packaged sachet water sold within a tertiary institution in southwestern Nigeria. *Journal of King Saud University-Science*, 32(3): 1999-2004. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.02.004>.
 19. Saaty T. L. 2001. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process (Vol. 6). RWS publications.
 20. Salami H. 2007. Determining suitable areas for the construction of underground dams in Natanz Plain using telemetry, Master's Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University.
 21. Soleimani S. 2008. Examining the engineering geological characteristics of the Mashhad plain in order to zone the potential of constructing underground dams using GIS and RS (Case study: Mashhad plain),