

Prioritization of suitable sites for subsurface water harvesting using the data envelopment analysis method (Case study: Kalat and Sarakhs border areas)

Mohammad Rostami Khalaj^{1*}, Hamze Noor^{1*}, Ali Bagheriyan Kalat¹, Mirmasoud Kheirkhah Zarkesh²

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
2. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil conservation and watershed management research institute, Tehran, Iran

*Corresponding author: m.rostamikhaj@areeo.ac.ir

(Received: 03 November 2024

Revised: 18 December 2024

Accepted: 01 March 2025)

Extended Abstract

Introduction: Groundwater resources in border areas have often been overlooked by managers and policymakers due to challenges such as wide geographical spread, and the high costs associated with their study. However, it is crucial to inform decision-makers about the potential of these resources to address water scarcity issues. In the border areas of Razavi Khorasan Province, many farmers and ranchers lack access to sufficient water for agriculture and livestock. Constructing underground dams in these regions can help store significant portions of subsurface water flow in alluvial reservoirs, making it available for use when needed. This study aims to identify and prioritize suitable sites for subsurface water harvesting using underground dams in the border areas of Kalat and Sarakhs in Khorasan Razavi Province.

Materials and methods: In this study, Boolean logic was used to eliminate areas unsuitable for underground dam construction. Five criteria—slope, geology, land use, distance from villages, and distance from roads—were employed to locate potential sites. The Fuzzy-AHP method was then used to weight these factors and identify susceptible areas. To prioritize the proposed sites, the Data Envelopment Analysis (DEA) method was applied. DEA, a linear programming-based technique, categorizes suggested points into effective and ineffective categories based on inputs such as dam construction costs, watershed area, precipitation, water demand, and water supply costs. The output considered was the estimated volume of harvested water.

Results and Discussion: The results indicate that 58.6% of the study area is unsuitable for underground dam construction, demonstrating the effectiveness of Boolean logic in reducing the workload of site selection. The Fuzzy-AHP analysis revealed that geology and slope are the most influential factors, with weights of 0.395 and 0.268, respectively, while land use and distance from roads have the least impact, with weights of 0.07 and 0.097, respectively. Slopes of 0–3% were found to be most suitable due to minimal water flow velocity, which facilitates the creation of effective reservoirs. Pasture land use was identified as ideal for dam construction. Approximately 6.8% of the area has very high potential, and 11.7% has high potential for underground dam construction. Using DEA, seven priority sites were identified for further investigation.

Conclusion: The study concludes that: (1). Farmers and ranchers in the border areas of Khorasan Razavi Province, located on alluvial plains near dry rivers, lack access to sufficient water resources. Constructing underground dams can store significant groundwater flows in alluvial reservoirs, providing a reliable water source for agriculture and livestock. (2). Building underground dams in border areas can create employment opportunities, increase the working population, and enhance regional security. This, in turn, will boost the income and satisfaction of local residents. (3). Eliminating unsuitable areas for dam construction simplifies analysis, reduces fieldwork, and lowers costs. (4). The use of DEA for prioritizing dam construction sites represents a novel approach, offering a new perspective on site selection techniques.

Keywords: Potential detection, Fuzzy-AHP method, underground dam, Linear programming, border areas.

Citation: Rostami Khalaj, M., Noor, H., Bagheriyan Kalat, A., & Kheirkhah Zarkesh, M. (2025). Prioritization of suitable sites for subsurface water harvesting using the data envelopment analysis method (Case study: Kalat and Sarakhs border areas). *Integrated Watershed Management*, 5(3), 87-104. doi=10.22034/iwm.2025.2044609.1183

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



اولویت‌بندی نقاط مناسب برای استحصال آب زیرسطحی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (مطالعه موردی: مناطق مرزی کلات و سرخس)

محمد رستمی خلیج^{۱*}، حمزه نور^۱، علی باقریان کلات^۱، میر مسعود خیرخواه زرکش^۲

۱. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: m.rostamihalaj@areco.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

چکیده مسوط

مقدمه: آب‌های زیرزمینی در مناطق مرزی به دلیل مشکلاتی از جمله گستردگی منطقه و هزینه زیاد مطالعه آن‌ها، کمتر مورد توجه مدیران و سیاستمداران قرار گرفته است و آگاه‌سازی مدیران، سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران کشورها در این زمینه به‌وضوح احساس می‌شود. اغلب کشاورزان و دامداران مناطق مرزی استان خراسان رضوی دسترسی مناسب به منابع آب کافی برای کشاورزی و شرب دام ندارند. در این مناطق، با احداث سد زیرزمینی می‌توان بخش قابل توجهی از جریان آب زیرسطحی را در مخزن آبرفتی موجود در پشت سد زیرزمینی ذخیره نمود تا در مواقع نیاز بهره‌برداری گردد. لذا هدف از این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی مکان‌های مناسب برای برداشت آب زیرزمینی با استفاده از سد زیرزمینی در مناطق مرزی کلات و سرخس در استان خراسان رضوی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق مناطقی که پتانسیل اولیه برای ساخت سد زیرزمینی را ندارند با استفاده از منطق بولین از محدوده مورد مطالعه حذف شدند. برای مکان‌یابی مناطق مستعد برای احداث سد زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه از پنج معیار شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از روستا و فاصله از جاده استفاده شد. سپس با استفاده از روش Fuzzy-AHP، عوامل مؤثر در مکان‌یابی سد زیرزمینی وزن‌دهی و مناطق مستعد شناسایی و با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، نقاط پیشنهادی برای مطالعات بعدی اولویت‌بندی شدند. روش DEA بر اساس تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی ایجاد شده و مبتنی بر یک سری بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی است. در این روش نقاط پیشنهادی به دو دسته کارا و ناکارا تقسیم می‌شوند. ورودی‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل هزینه ساخت سد، مساحت حوضه و میزان بارندگی، تقاضای آب در منطقه مورد مطالعه و هزینه تأمین آب می‌باشد. خروجی استفاده شده نیز مقدار آب برآورد شده برای برداشت در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که بیش از نیمی از محدوده مورد مطالعه (۵۸/۶ درصد) پتانسیل احداث سد زیرزمینی را ندارد و حدود ۴۱/۴ درصد را مناطق مستعد تشکیل می‌دهند. در نتیجه، حجم کاری مکان‌یابی را می‌توان با استفاده از منطق بولین به میزان قابل توجهی کاهش داد. نتایج روش Fuzzy-AHP نشان داد زمین‌شناسی و شیب با وزن‌های به ترتیب ۰/۳۹۵ و ۰/۲۶۸ دارای بیشترین اهمیت و کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب با وزن ۰/۰۹۷ و ۰/۰۷۰ کمترین تأثیر را در مکان‌یابی سد زیرزمینی دارند. همچنین شیب‌های ۳-۰ درصد در بین سایر کلاس‌های شیب بیشترین امتیاز را کسب کرد. زیرا در این شیب‌ها سرعت آب به حداقل می‌رسد و با توجه به نوع آبرفت‌های منطقه، مخازن مناسبی برای ذخیره آب ایجاد می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کاربری مرتع دارای بیشترین امتیاز برای احداث سد زیرزمینی بود و حدود ۶/۸ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل خیلی زیاد و ۱۱/۷ درصد دارای پتانسیل زیاد برای مکان‌یابی سد زیرزمینی هستند. پس از تعیین مقادیر ورودی و خروجی، از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای اولویت‌بندی ۷ نقطه پیشنهادی استفاده شد.

نتیجه‌گیری: دستاوردهای این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد: (۱) اغلب کشاورزان و دامداران در مناطق مرزی استان بر مخروط افکنه‌ها و در مجاورت خشکه‌رودها زندگی می‌کنند و به منابع آب کافی برای کشاورزی و شرب دام دسترسی ندارند. در این مناطق، با احداث سد زیرزمینی می‌توان بخش قابل توجهی از جریان آب زیرسطحی را که بر روی سنگ‌بستر در جریان است و دارای کیفیت مناسب برای کشاورزی و شرب دام است را در مخزن آبرفتی موجود در پشت سد زیرزمینی ذخیره کرد و در مواقع نیاز مورد بهره‌برداری قرار داد. (۲) اجرای پروژه سد زیرزمینی منجر به افزایش درآمد کشاورزان و دامداران برخی از مناطق مرزی استان می‌شود و در واقع به جمعیت فعال و پویای کشاورزان و دامداران این مناطق افزوده می‌گردد. از طرف دیگر، ایجاد اشتغال و افزایش جمعیت بهره‌بردار در مناطق مرزی موجب تأمین امنیت این مناطق می‌شود. لذا با افزایش درآمد ساکنین مناطق مرزی، رضایت‌مندی کشاورزان و دامداران افزایش خواهد یافت. (۳) حذف مناطقی که پتانسیل ساخت سدهای زیرزمینی را ندارند، تأثیر زیادی در ساده‌سازی تحلیل و کاهش میزان کار میدانی دارد و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. (۴) دلیل انتخاب روش تحلیل پوششی داده‌ها برای اولویت‌بندی مکان‌های مناسب برای احداث سد زیرزمینی عدم استفاده از نظر کارشناسان است که این موضوع یک رویکرد جدید از استفاده این تکنیک به حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل‌یابی، روش Fuzzy-AHP، سد زیرزمینی، برنامه‌ریزی خطی، مناطق مرزی

استناد: رستمی خلیج، م.، نور، ح.، باقریان کلات، ع.، خیرخواه زرکش، م. م. (۱۴۰۴). اولویت‌بندی نقاط مناسب برای استحصال آب زیرسطحی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (مطالعه موردی: مناطق مرزی کلات و سرخس). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۳)، ۸۷-۱۰۴.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

آب یکی از منابع موجود در جهان است که با توجه به رشد روزافزون جمعیت، پیشرفت و توسعه صنایع و افزایش نیاز به فرآورده‌های کشاورزی روزبه‌روز با کاهش شدید آن روبه‌رو هستیم (Kumar *et al.*, 2023). امروزه مسئله کمبود آب و درواقع بحران آب دارای چنان اهمیتی است که عمده‌ی تحلیلگران بر این عقیده‌اند که در دهه‌های آینده آب به‌عنوان یک کالای کمیاب و گران‌قیمت به‌جای نفت در کانون رویارویی‌ها و آشتی‌ها قرار خواهد گرفت (Sadeghi, 2017). از طرف دیگر خشکسالی‌های پی‌درپی و تغییرات اقلیمی باعث کاهش این منبع باارزش به‌صورت طبیعی شده است. به گزارش کمیته امور خارجه سنای آمریکا، تا زمانی که افزایش تقاضا برای آب و در مقابل کاهش منابع آب در دسترس وجود داشته باشد، به مسئله آب باید با دید امنیت ملی نگریده شود و در نتیجه روابط بین کشورهای وابسته به آب بسیار پیچیده خواهد بود. این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک که اغلب مناطق کشور را شامل می‌شود، تأثیر بیشتری داشته است. برای مثال، در مناطق مرزی استان خراسان رضوی به دلیل کمبود منابع آب سطحی و شرایط آب و هوایی این مناطق توجه به آب‌های زیرقشری که از کشور خارج می‌شود، بسیار مهم است. سد زیرزمینی می‌تواند راه‌حل مناسبی برای استحصال آب‌های زیرقشری در خشک‌رودها باشند. قدمت اولین سد زیرزمینی ساده به قرن ۱۸ برمی‌گردد (Nilsson, 1988). در گذشته مطالعه، مکان‌یابی و احداث سد زیرزمینی بیشتر بر پایه تجارب علمی و بومی مناطق بوده است؛ اما به دلیل اینکه متغیرهای زیادی در انتخاب محل مناسب برای احداث سد زیرزمینی دخالت دارند باید در این زمینه مطالعاتی صورت گیرد. در این زمینه مطالعات زیادی در سراسر جهان و ایران صورت گرفته است که در ادامه برخی از این مطالعات ارائه شده است.

Peyrowan و همکاران (۲۰۱۸) برای تعیین عرصه‌های مناسب برای احداث سدهای زیرزمینی در حوزه خشک‌رود استان مرکزی از روش سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری (DSS¹) استفاده کردند. برای انتخاب مناطق مستعد یکسری از معیارها نظیر شیب، گسل، سازندهای نامناسب به‌عنوان معیارهای حذفی در نظر گرفته شد و از منطقه حذف گردید. سپس در مناطق باقیمانده با استفاده از معیارهایی مثل فاصله از قنات، راه‌های دسترسی، محدوده‌های کشاورزی تحت پوشش، کمیت و کیفیت آب و عمق مخزن، سه منطقه برای احداث سد انتخاب و اولویت‌بندی گردید.

Amanian و همکاران (۲۰۱۹) برای مکان‌یابی سدهای زیرزمینی از تلفیق روش‌های سنجش از راه دور و GIS و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP²) در دشت کاشان استفاده کردند. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی منطقه مورد مطالعه از داده‌های مدل رقومی ارتفاع، زمین‌شناسی و داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ استفاده کردند. در نهایت هفت منطقه مناسب برای احداث سد زیرزمینی مناسب شناخته شد.

Maleki و همکاران (۲۰۱۹) در حوزه آبخیز خرم‌آباد از روش AHP برای مکان‌یابی سدهای زیرزمینی استفاده کردند و امکان کاربرد روش AHP را برای مکان‌یابی سدهای زیرزمینی ارزیابی نمودند. با استفاده از GIS معیارهای مکانی از جمله محور آبراهه، مخزن، پوشش، اقلیم و آب تهیه شد. سپس ارزیابی نقطه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها برای ساخت سد زیرزمینی با استفاده از AHP انجام شد. نتایج نشان داد که تحلیل سلسله مراتبی گسترده روشی است که اهمیت معیارهای مؤثر مکان‌یابی را نشان می‌دهد و بر معیارهای کیفی تأکید دارد.

Rosatmi Khalaj و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای ۴۱ مقاله داخلی و خارجی در زمینه مکان‌یابی سد زیرزمینی را مورد بررسی و پارامترهای تأثیرگذار بر مکان‌یابی سدهای زیرزمینی را استخراج و برخی نکات در استفاده

² Analytical Hierarchy Process

¹ Decision Support System

معیارهای تأثیرگذار روی مکان‌یابی سد زیرزمینی با استفاده از روش AHP امتیازدهی و هشت نقطه مناسب تعیین گردید و در مرحله آخر با استفاده از روش TOPSIS³ و EDAS⁴ مکان‌های تعیین‌شده در مرحله قبل را اولویت‌بندی کردند. نقشه نهایی به‌دست‌آمده چهار نقطه را مناسب برای احداث سد زیرزمینی نشان داد.

Talebi و همکاران (۲۰۱۹) معادله بیلان آبی حوزه درونگر را با استفاده از مدل SWAT⁵ شبیه‌سازی و جریان زیرقشری و مسیر حرکت آن را تعیین نمودند. سپس ۱۱ لایه مؤثر در مکان‌یابی سد زیرزمینی را با استفاده از روش ANP⁶ امتیازدهی و مکان‌های مناسب برای احداث سد زیرزمینی را تعیین کردند. نتایج مدل ANP نشان داد برای محاسبه جریان زیرسطحی استفاده از مدل SWAT ضروری است و بیشترین وزن مربوط به لایه‌های حجم مخزن و حجم رواناب است. همچنین نتایج نشان داد آبراه‌های رتبه ۳ و ۴ با شیب کمتر از ۱۵ درصد مکان‌های مناسبی برای احداث سد زیرزمینی هستند.

Webber و همکاران (۲۰۱۹) از آنالیز چندمتغیره در برزیل برای مکان‌یابی سد زیرزمینی استفاده کردند. در این مطالعه متغیرهای توپوگرافی، هیدروگرافی، خاکشناسی و زمین‌شناسی توسط GIS تلفیق گردید و با حذف مناطق نامناسب، لایه مناطق مستعد برای احداث سد زیرزمینی تعیین شد. به این صورت که هر لایه به سه بخش، تناسب بالا، تناسب متوسط و تناسب پایین تقسیم‌بندی گردید. نتایج نشان داد این روش کارایی قابل‌قبولی برای مکان‌یابی سد زیرزمینی دارد.

با توجه به مطالب ذکر شده و اهمیت موضوع بهره‌برداری از منابع آب زیرقشری در مناطق مرزی خراسان رضوی، این مطالعه با هدف پهنه‌بندی مناطق مستعد استحصال آب زیرقشری و اولویت‌بندی نقاط پیشنهادی با استفاده

از این پارامترها را در شرایط و مناطق مختلف ارائه نمودند. نتایج نشان داد متغیرهای مختلفی در مکان‌یابی سد زیرزمینی تأثیرگذار است و باید با توجه به شرایط منطقه از آنها استفاده کرد.

Tavakoli و همکاران (۲۰۱۸) در حوزه آبخیز بیرجند دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (Fuzzy-AHP¹) و روش تحلیل شبکه‌ای فازی (Fuzzy-ANP²) را برای مکان‌یابی سد زیرزمینی با هم مقایسه کردند. لایه‌های استفاده شده عبارت‌اند از فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی، شیب، فاصله از دشت سیلابی، فاصله از روستا، فاصله از چاه و چشمه و قنات، کاربری اراضی، فاصله از گسل و فاصله از جاده. نتایج نشان داد که مکان‌های مناسب برای ساخت سدهای زیرزمینی در مجاورت آبراهه‌های کم شیب قرار دارد و روش FANP نسبت به روش FAHP دقت بیشتری برای مکان‌یابی سد زیرزمینی دارد.

Fathi و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از GIS و سنجش از دور و همچنین بکارگیری روش AHP در منطقه‌ای از حوزه تهران اقدام به مکان‌یابی محل مناسب برای احداث سد زیرزمینی کردند. در این مطالعه از لایه‌های بارندگی، شیب، زمین‌شناسی، مناطق تغذیه، تراز آب زیرزمینی و فاصله از شبکه آبراهه‌ای استفاده شده است. نقشه نهایی به‌دست‌آمده نشان داد ۴۶ درصد دشت تهران-کرج دارای پتانسیل متوسط برای ساخت سد زیرزمینی است و نقشه به‌دست‌آمده دارای اطلاعات مفیدی برای تصمیم‌گیران و مدیران منطقه در مدیریت منابع آب زیرزمینی است.

Kharazi و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مکان مناسب برای احداث سد زیرزمینی را در دشت سمنان تعیین کردند. در مرحله اول مکان‌های دارای زهکشی و ذخیره منابع آب زیرزمینی مناسب تعیین گردید. سپس تعدادی از

⁴ Evaluation Based on Distance from Average Solution

⁵ Soil and Water Assessment Tools

⁶ Analytical Network Process

¹ Fuzzy Analytical Hierarchy Process

² Fuzzy Analytical Network Process

³ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

روش تحقیق

با بررسی منابع، معیارها و پارامترهای مؤثر در مکان‌یابی و اولویت‌بندی مکان‌های مناسب برای احداث سد زیرزمینی مشخص گردید. سپس نقشه‌ها و لایه‌های اطلاعاتی پایه این پارامترها تهیه و با انجام عملیات صحرایی برخی از نواقص موجود در داده‌ها برطرف و داده‌ها به‌روز گردید. مناطقی که پتانسیل اولیه احداث سد زیرزمینی را نداشتند، با استفاده از منطق بولین از محدوده مطالعاتی حذف شد. این محدوده‌ها بر اساس نتایج مطالعات قبلی و نظرات کارشناسان خبره شناسایی گردید. به‌طور کلی معیارهای حذفی در این فاز شامل ۱- حریم آبراهه‌ها با بافر ۳۰۰ متری (Rezaei Moghaddam et al., 2016)، ۲- آبراهه‌هایی که در مناطق دشتی قرار دارند، ۳- لایه مناطق مرتفع مثل کوهستان‌ها و تپه‌ها با شیب بالای ۲۵ درصد، ۴- لایه محدوده گسل‌ها و خطواره‌ها با بافر ۵۰۰ متر (Rezaei Moghaddam et al., 2016; Esmali Ouri et al., 2019)، ۵- لایه کاربری‌های نامناسب شامل اراضی صخره‌ای، اراضی شور و مخازن آب موجود در منطقه، ۶- لایه حریم چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوت با بافر ۱۰۰ متر (Esmali Ouri et al., 2016; Chezgi et al., 2018; Peyrowan et al., 2018; Esmali et al., 2019)، ۷- لایه رودخانه‌های دائمی دارای دبی پایه، سازندهای تخریب‌کننده گچی و نمکی و نیز حوضه‌های بالادست سدهای منطقه می‌باشند. پس از تهیه لایه‌های موردنیاز، این لایه‌ها با استفاده از منطق بولین تلفیق گردید. در روش بولین مناطقی که پتانسیل اولیه احداث سد زیرزمینی را ندارند امتیاز صفر و مناطق دارای پتانسیل اولیه امتیاز یک اختصاص می‌یابد. پس از حذف مناطق نامناسب اولیه برای احداث سد زیرزمینی مناطق دارای پتانسیل اولیه احداث سد زیرزمینی با استفاده از روش Fuzzy-AHP وزن‌دهی شد. برای این منظور از معیارهای زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده و فاصله از روستا استفاده

از روش تحلیل پوششی داده‌ها^۱ (DEA) انجام شد. روش تحلیل پوششی داده‌ها پیش‌تر در زمینه ارزیابی کارایی سیستم‌ها استفاده شده است. از آنجایی که سد زیرزمینی مانند یک سیستم عمل می‌کند در این مطالعه با رویکردی جدید این روش برای اولویت‌بندی نقاط پیشنهادی احداث سد زیرزمینی برای مطالعات تکمیلی استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

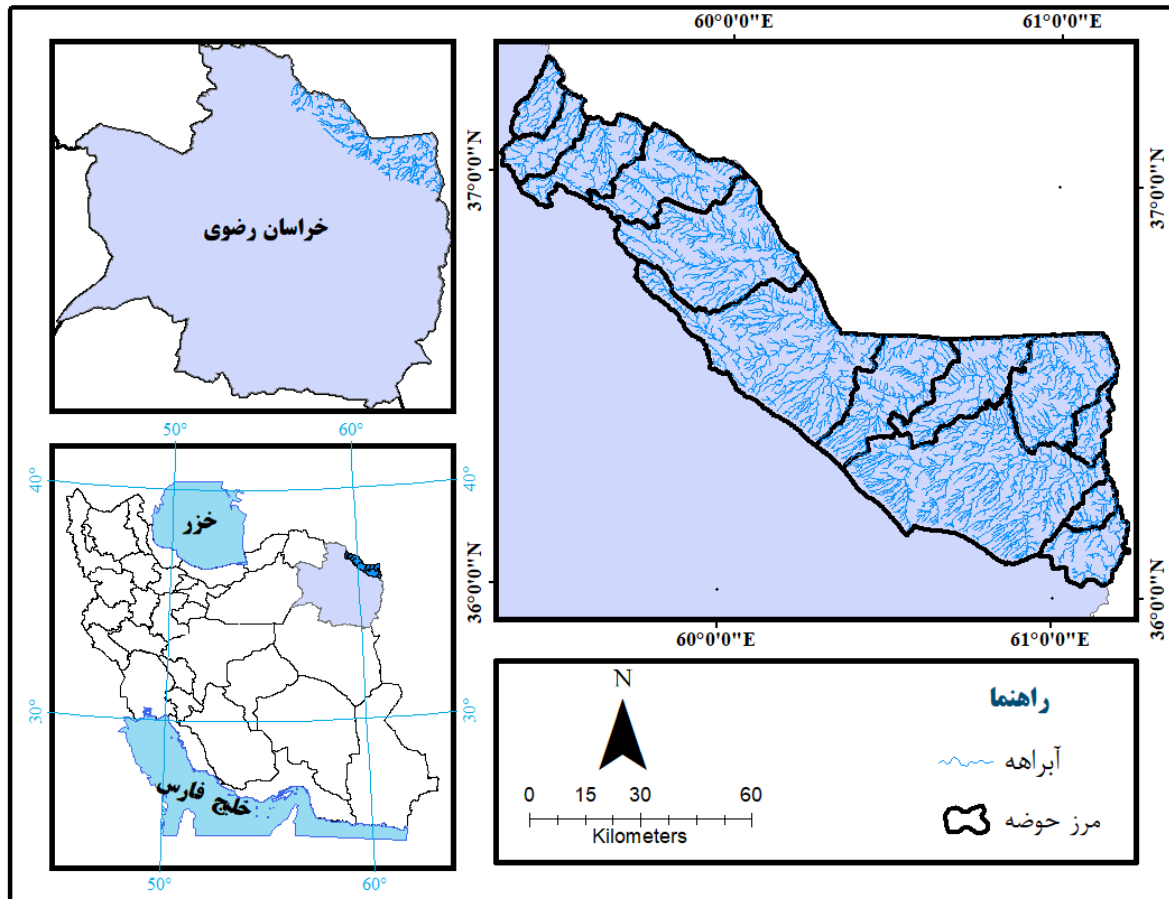
منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی با وسعتی حدود ۱۱۷۷۶۹ کیلومترمربع در شمال شرق کشور قرار گرفته است و از شمال و شمال شرق به جمهوری ترکمنستان با مرز مشترک حدود ۵۳۱ کیلومتر، از شرق به افغانستان با مرز مشترک حدود ۳۰۲ کیلومتر، از غرب به استان سمنان و از جنوب به استان خراسان جنوبی محدود است. شهرستان سرخس با مساحتی حدود ۵۳۹۶/۸ کیلومترمربع در شرق استان خراسان رضوی قرار دارد. میانگین سالانه بارندگی در شهرستان سرخس ۱۸۷/۳ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۸/۲ درجه سانتی‌گراد است و بر اساس روش دومارتین جزء مناطق خشک بیابانی معتدل است. شهرستان کلات در شمال شرق استان قرار دارد و مساحتی حدود ۳۵۰۲/۸ کیلومترمربع دارد. این شهرستان بر اساس شاخص دومارتین دارای اقلیم نیمه‌خشک معتدل است و میانگین سالانه بارندگی در شهرستان کلات ۲۷۶/۵ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد است (Agriculture Organization of Khorasan, Razavi, 2019). برای تعیین مناطق مرزی سرخس و کلات، از مرز حوزه‌های آبخیز منطقه استفاده شد. برای این منظور حوزه‌های آبخیز مرزی استان که در این مناطق قرار دارند و آب آن‌ها به خارج از کشور می‌ریزد به‌عنوان محدوده مطالعاتی تعیین می‌شود (شکل ۱).

¹ Data Envelopment Analysis

علی‌رغم محبوبیت زیاد روش AHP، به دلیل اینکه برای گزینه‌ها ارزش نسبی در نظر گرفته می‌شود و ممکن است اعمال سلیقه در آن تاثیر داشته باشد انتقاداتی بر آن وارد است (Esavi et al., 2012).

شد. با این روش مناطقی که پتانسیل بالایی برای احداث سد زیرزمینی دارند مشخص می‌شود. البته باید توجه داشت که پارامترهای دیگری مثل حجم مخزن، خصوصیات حوزه بالادست و غیره وجود دارند که در مرحله بعدی برای اولویت‌بندی استفاده می‌شوند.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مناطق مرزی کلات و سرخس در استان خراسان رضوی و ایران

Figure 1- Location of border areas of Kalat and Sarkhas Watershed in Khorasan Razavi Province, Iran

روش Fuzzy-AHP نوع تعمیم‌یافته روش AHP است. توابع عضویت کلاسیک معمولاً به صورت $(x_A(x))$ بیان می‌شوند که مجموعه دو عضوی صفر و یک بوده است ولی برد توابع فازی $(\mu_A(x))$ است که نشان‌دهنده بازه صفر و یک است. در این پژوهش برای مقایسه زوجی معیارها از تابع فازی دوزنقه‌ای استفاده شد (جدول ۱) و درنهایت از روش میانگین‌گیری هندسی برای فازی‌زدایی استفاده گردید. زیرا این روش به‌سادگی به حالت فازی قابل تعمیم است و جواب یگانه‌ای برای ماتریس مقایسه زوجی تعیین می‌کند.

تئوری فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطیفی‌زاده ارائه شد که برای لحاظ کردن عدم اطمینان و ابهام در حل مسائل مختلف استفاده می‌شود (Rostamzadeh & Sofian, 2011). روش فازی که در مقابل روش کلاسیک مطرح شد، ابزاری قوی برای حل مسائل پیچیده مربوط به مشکلات وابسته به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری به شمار می‌رود. در عملیات فازی‌سازی، ورودی‌ها با استفاده از توابع عضویت یک درجه مناسب می‌گیرند. معمولاً این توابع میزان فازی بودن یک مجموعه فازی را نشان می‌دهند.

جدول ۱- حالات مختلف برای مقایسه زوجی و مقادیر عددی آن

Table 1- Different situations for pairwise comparison and its numerical values

امتیاز فازی	مقدار عددی	اهمیت (قضاوت شفاهی)	اهمیت یکسان
(1, 1, 1)	1	Equal importance	اهمیت یکسان
($\frac{3}{2}, \frac{5}{2}, 3$)	2	Equal to moderate importance	اهمیت یکسان تا کمی مهم‌تر
($\frac{5}{2}, \frac{7}{2}, 4$)	3	Moderate importance	کمی مهم‌تر
($\frac{7}{2}, \frac{9}{2}, 5$)	4	Moderate to strong importance	اهمیت کمی مهم‌تر تا زیاد
($\frac{9}{2}, \frac{11}{2}, 6$)	5	Strong importance	اهمیت زیاد
($\frac{11}{2}, \frac{13}{2}, 7$)	6	Strong to very strong importance	اهمیت زیاد تا بسیار زیاد
($\frac{13}{2}, \frac{15}{2}, 8$)	7	Very strong importance	اهمیت بسیار زیاد
($\frac{15}{2}, \frac{17}{2}, 9$)	8	Very to extremely strong importance	اهمیت بسیار زیاد تا کاملاً مهم‌تر
($\frac{17}{2}, 9, 9$)	9	Extreme importance	اهمیت کاملاً مهم‌تر

وزن نهایی مربوطه ضرب و سپس لایه‌ها باهم جمع می‌شوند و نقشه نهایی مربوط به پتانسیل احداث سد زیرزمینی تهیه می‌شود.

پس از تعیین مناطق مستعد و دارای پتانسیل احداث سد زیرزمینی با استفاده از روش Fuzzy-AHP در این مرحله نقاط مناسب برای احداث سد زیرزمینی تعیین می‌گردد. محل تنگ‌شدگی آبراهه‌ها درجه ۳ و ۴ و خروجی آبراهه‌های فرعی نقاط مناسب برای محورهای پیشنهادی هستند که با بازدید میدانی از محدوده‌های مناسب محل‌های تنگ‌شدگی در آبراهه‌ها مشخص می‌شود. تعداد ۷ نقطه برای انجام مطالعات اولیه احداث سد زیرزمینی تعیین گردید. از آنجایی که هزینه مطالعات اولیه برای احداث سد زیرزمینی زیاد است و اگر بخواهیم از بین هفت گزینه پیشنهادی کارآمدترین و بهترین گزینه را انتخاب کنیم باید این نقاط اولویت‌بندی شوند. برای اولویت‌بندی این نقاط از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) استفاده شد.

معیارها و زیرمعیارها برای مقایسه زوجی توسط کارشناسان در یک پرسشنامه گردآمده و سپس برای هر منطقه ۵۰ پرسشنامه و در مجموع ۱۰۰ پرسشنامه (رابطه کوکران)، توسط متخصصین اداره‌های منابع طبیعی و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی و برخی خبرگان محلی امتیازدهی گردید. سپس با استفاده از روش فازی‌سازی ذکرشده، معیارها و زیرمعیارها فازی شدند. سپس وزن فازی معیارها و زیرمعیارهای تعیین‌شده به لایه‌های تک‌تک معیارها در نرم‌افزار ArcGIS وارد شدند. از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC^1) برای تهیه نقشه نهایی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی استفاده شد. روش ترکیب خطی وزن‌دار یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی چندمعیاره مکانی است و میزان مطلوبیت آن بر اساس اهمیت نسبی معیارها در فرآیند مکان‌یابی تعیین می‌شود و ارزش‌های بالاتر دارای مطلوبیت بالاتری برای انتخاب مکان موردنظر است (Rezaei & Jamshidi, 2017). در این روش هر فاکتور فازی شده در

¹ Weighted Linear Combination

خروجی‌ها با u_1, u_2, \dots, u_s و وزن تخصیص داده‌شده به ورودی‌ها با v_1, v_2, \dots, v_m نشان داده شود، آنگاه مدل ریاضی آن به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_0 &= \sum_{r=1}^s y_{r0} u_r \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m x_{i0} v_i = 1, \\ & \sum_{r=1}^s y_{ri} u_r - \sum_{i=1}^m x_{ij} v_{ij} \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (1)$$

در این مدل برای هر واحد یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود و تعداد محدودیت‌ها بیشتر از تعداد متغیرها است. از آنجایی که حجم عملیات در حل معادله یک بخشی بیشتر وابسته به تعداد محدودیت‌ها است تا متغیرها، از این رو برای حل مسئله از مدل ثانویه که به مدل پوششی معروف است استفاده می‌شود.

مدل پوششی به صورتی است که اگر متغیر متناظر با محدودیت $\sum_{i=1}^m x_{i0} v_i = 1$ را در مسئله ثانویه با θ و متغیرهای متناظر با محدودیت‌های $\sum_{r=1}^s y_{rj} v_r - \sum_{i=1}^m x_{ij} v_i \leq 0$ با λ_j و متغیرهای متناظر $V_i \geq \varepsilon$ به ترتیب S_i^-, S_i^+ بیان گردد، مدل پوششی CCR آن به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \min Y_0 &= \theta - \varepsilon \left(\sum_{r=1}^s S_r^+ + \sum_{i=1}^m S_r^- \right) \\ \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n Y_{rj} \lambda_j - S_r^+ = Y_{r0} \\ & \sum_{j=1}^n X_{rj} \lambda_j + S_r^- = \theta X_{r0} \\ & \lambda_j, S_i^+, S_i^- \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (i = 1, 2, \dots, s) \end{aligned} \quad (2)$$

در این رابطه مقدار θ آزاد در علامت است و کارایی نسبی را نشان می‌دهد و λ_j وزن واحد تصمیم‌گیری j ام را نشان می‌دهد. روش تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس مقادیر ورودی و خروجی نقاط را به کارا و ناکارا تقسیم می‌کند که مقدار کارایی بین صفر و یک است. نقاط ناکارا امتیازی کمتر از یک می‌گیرند؛ بنابراین می‌توان آن‌ها را رتبه‌بندی کرد، اما نقاط کارا همه با

روش DEA بر اساس تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی ایجاد شده و مبتنی بر یک سری بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی است که توسط Charnes و همکاران (۱۹۷۸) ارائه شده است. در این روش، منحنی مرزهای کارا از یکسری نقاط که به وسیله برنامه‌ریزی خطی تعیین می‌شود، ایجاد می‌گردد که مطابق تئوری اقتصادی مربوطه، به تعیین کارایی به روش ناپارامتری می‌پردازد. از این نظر پیش‌فرض‌ها و محدودیت‌های کمتری دارد. نقاط پیشنهادی در این روش به دو دسته کارا و ناکارا تقسیم می‌شود که نقاط کارا در اولویت اول و نقاط ناکارا در اولویت آخر قرار می‌گیرند. به منظور تحلیل کارایی واحدهای تصمیم‌گیری با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها باید ورودی‌ها و خروجی‌ها (نهادها و ستاده‌ها) را مدنظر قرارداد. ورودی‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل هزینه احداث سد، سطح حوضه بالادست سد و میزان بارش، نیاز به آب در منطقه و هزینه تأمین آب در منطقه می‌باشد. خروجی مورد استفاده نیز میزان آب برآورد شده قابل استحصال در نظر گرفته شد.

روش تحلیل پوششی داده‌ها را می‌توان به دو صورت ورودی‌گرا (نهادمحور) و خروجی‌گرا (ستاده‌محور) به کاربرد. در مدل ورودی‌گرا هدف رسانیدن یک واحد ناکارا به مرز کارایی از طریق ثابت نگهداشتن ورودی و افزایش خروجی است و در مقابل مدل خروجی‌گرا معطوف به حداقل‌سازی ورودی‌ها با فرض ثابت ماندن خروجی‌ها می‌باشد. از آنجایی که در مبحث سد زیرزمینی مقدار آب قابل استحصال اهمیت زیادی دارد لذا از مدل ورودی‌گرا استفاده و نقاط پیشنهادی اولویت‌بندی گردید.

در مدل ارائه شده توسط Charnes و همکاران (۱۹۷۸) که به اختصار (CCR^1) نامیده می‌شود، فرض می‌شود n واحد تصمیم‌گیری (DMU^2) موجود است و ورودی‌ها X_1, X_2, \dots, X_m و خروجی‌ها Y_1, Y_2, \dots, Y_s می‌باشند. در صورتی که وزن تخصیص داده‌شده به

² Decision making units

¹ Charnes, Cooper, and Rhodes

می‌شود (Forzieri et al., 2008). می‌توان حجم تقریبی خاک‌برداری را از رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$V_h = ((2.m.p.L)p.\frac{1}{3}) + V = \frac{2.m.p^2.L}{3} + V \quad (7)$$

$$= (p^2.L) + V$$

در این رابطه V_h : حجم خاک‌برداری، m : شیب پایداری خاک در هنگام خاک‌برداری است که در اینجا ۱/۵ در نظر گرفته شده است. اگر در رابطه فوق حجم سد (V) در نظر گرفته نشود، حجم خاک‌ریزی تعیین می‌شود. هزینه‌های موردنیاز برای خاک‌برداری، خاک‌ریزی و احداث سد از جداول فهرست‌بهای سازمان برنامه‌بودجه مربوط به سال ۱۴۰۰ به دست آمد و ضرایب منطقه‌ای، ضریب بالاسری، ضریب تأسیس و برچیدن کارگاه و ارزش‌افزوده نیز در آن محاسبه گردید.

با بررسی‌های انجام‌شده از اداره عشایری استان خراسان رضوی و محله‌های عشایری موجود در منطقه و همچنین تعداد روستاهای اطراف محدوده سد می‌توان میزان نیاز آب در منطقه را برآورد کرد. برای این منظور با بازدید صحرایی و مراجعه به اداره عشایری تعداد دام‌های موجود در منطقه مشخص گردید و با توجه به میانگین نیاز آب برای دام در روز مقدار آب موردنیاز برای شرب دام محاسبه گردید. علاوه بر این با مصاحبه با دهیاری‌ها و دامداران روستاهای اطراف، میزان دام روستاها مشخص و به نیاز دام عشایر اضافه گردید.

برای تأمین آب شرب برای دام‌های موجود در منطقه معمولاً از تانکر استفاده می‌شود. هزینه تأمین آب با توجه به فاصله از محل تأمین آب متفاوت است. از این رو با مصاحبه با افراد محلی هزینه هر تانکر آب محاسبه و قیمت واحد هر مترمکعب آب محاسبه شد.

میزان آب قابل استحصال را می‌توان با برآورد حجم مخزن محاسبه کرد. برای برآورد حجم مخزن فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ۱- حجم ذخیره پتانسیل (V_s) با محدوده آبرفت بالادست سد (A_{all}) که آب در آن ذخیره می‌شود بستگی دارد، ۲- متوسط عرض مقطع آبرفت بالادست (L_m) برابر نسبت مساحت اشغال‌شده در بالادست (A_{all}) به طول آبراهه در این

امتیاز یک نمایش داده می‌شوند؛ بنابراین نمی‌توان آن‌ها را اولویت‌بندی کرد. برای اولویت‌بندی نقاط کارا از مدل Andersen و Petersen (۱۹۹۳) استفاده شد. این مدل به مدل فوق کارایی (ابر کارایی) معروف است و با استفاده از آن می‌توان کاراترین نقطه را تعیین کرد. در این روش امتیاز واحدهای کارا می‌تواند بیشتر از یک باشد که به این ترتیب نقاط کارا نیز مانند نقاط ناکارا قابل رتبه‌بندی خواهند بود. مدل اندرسون-پیترسون (AP) مطابق رابطه (۳) است:

$$\min Y_0 = \theta - \varepsilon \left(\sum_{r=1}^s S_r^+ + \sum_{i=1}^m S_i^- \right)$$

$$s. t. \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j Y_{rj} - S_r^+ = Y_{rk} \quad (3)$$

$$\lambda_j, S_i^+, S_i^-$$

$$\geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (i = 1, 2, \dots, s)$$

$$(r = 1, 2, \dots, s)$$

در این رابطه مقدار θ آزاد در علامت است. برای اجرای مدل تحلیل پوششی داده‌ها از نرم‌افزار متلب و Data Envelopment Analysis Toolbox استفاده شد (Álvarez et al., 2020).

برآورد هزینه احداث سد زیرزمینی با توجه به حجم خاک‌برداری، خاک‌ریزی و هزینه احداث سد محاسبه می‌شود. برای این منظور فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ۱- شکل سد زیرزمینی به صورت منشوری با مقطع عرضی مثلثی شکل است، ۲- جنس سازه از نوع رسی است. برای محاسبه هزینه احداث سد محاسبه حجم ناخالص سازه لازم است. حجم ناخالص سازه بر اساس روابط (۴، ۵ و ۶) محاسبه می‌شود (Forzieri et al., 2008):

$$(4)$$

$$V = \frac{L.p.s}{2}$$

$$s = \frac{L}{40} \quad (5)$$

$$V = \frac{L^2.p}{80} \quad (6)$$

در این رابطه V : حجم ناخالص سازه، L : عرض دره یا فاصله تکیه‌گاه‌ها، p : عمق آبرفت در محل، s : ضخامت کف سد است که در اینجا به اندازه $L/40$ در نظر گرفته

می‌کنند. در محدوده مورد مطالعه ۵ سد وجود دارد که نقشه موقعیت آن‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان تهیه و حوزه بالادست آن‌ها از منطقه مورد مطالعه حذف شد. سپس لایه‌های مختلفی که قابلیت احداث سد زیرزمینی را ندارند باهم تلفیق شد و نقشه مناطق حذفی تهیه گردید (شکل ۲). این مناطق در نقشه نهایی وزن صفر را به خود اختصاص دادند و سایر مناطق با استفاده از روش Fuzzy-AHP وزن‌دهی گردید. در شکل ۳ موقعیت مناطق حذفی از منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به این شکل بیش از نیمی از منطقه مورد مطالعه (۵۸/۶ درصد) را مناطق فاقد پتانسیل تشکیل داده است و حدود ۴۱/۴ درصد جزء مناطق دارای پتانسیل هستند. نتایج نشان می‌دهد به‌سادگی و با استفاده از منطق بولین می‌توان حجم کار مکان‌یابی را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد.

مناطق که دارای پتانسیل اولیه احداث سد زیرزمینی هستند با استفاده از روش Fuzzy-AHP وزن‌دهی گردید. در بین معیارهای بررسی شده زمین‌شناسی و شیب با وزن‌های ۰/۳۹۵ و ۰/۲۶۸ بیشترین اهمیت را در بین پارامترهای دیگر دارند. سازندهای زمین‌شناسی با توجه به نوع و کیفیت سازندها و همچنین آبرفت‌های حاصل از آن‌ها می‌توانند نقش مؤثر در مکان‌یابی سد زیرزمینی ایفا کنند که این نتایج با نتایج (Archwichai et al., 2005; Amanian et al., 2019) مطابقت دارد. شیب زمین نقش به‌سزایی در میزان رواناب و نفوذ آب در خاک دارد به‌طوری‌که در شیب‌های کم، تقریباً حرکت رواناب مختل شده و باعث افزایش نگهداشت سطحی آب می‌شود. از طرف دیگر بالا بودن شیب باعث افزایش فرسایش و کاهش شدید عمق خاک در مناطق با شیب بالا می‌شود که عامل نامطلوبی در مکان‌یابی سد زیرزمینی می‌باشد. کاربری اراضی و فاصله از جاده در بین سایر پارامترها با وزن‌های ۰/۰۷ و ۰/۰۹۷ کمترین تأثیر را در مکان‌یابی سد زیرزمینی داشتند. در این مطالعه کاربری اراضی از این جهت مورد ارزیابی قرار گرفت که نقش مهمی در داشتن معارض

محدوده (Loured) است، ۳- حجم ذخیره پتانسیل به‌صورت حجم منشور با مقطع مثلثی محاسبه می‌شود (Forzieri et al., 2008). بنا بر فرضیات فوق محاسبه حجم مخزن را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد:

$$V_s = \frac{Loured \cdot p_m \cdot L_m}{2} = \frac{Loured \cdot p_m \cdot \left(\frac{A_{all}}{Loured}\right)}{2} = \frac{p_m \cdot A_{all}}{2} \quad (8)$$

با توجه به اینکه نوع خاک در تمامی نقاط از نوع شنی قله‌سنگی است، میزان تخلخل (n) در تمامی نقاط ۳۰ درصد در نظر گرفته شد؛ بنابراین میزان آب قابل استحصال از رابطه (۹) محاسبه شد:

$$V_s(eff) = V_s \cdot n \quad (9)$$

نتایج و بحث

در ابتدا، مناطق مرتفع مثل کوهستان‌ها و تپه‌ها از مناطقی بودند که به دلیل شیب زیاد و عمق کم خاک به عنوان فاقد پتانسیل اولیه به منظور احداث سد زیرزمینی از محدوده مورد مطالعه حذف گردید. محدوده گسل‌ها یکی دیگر از محدوده‌های حذفی است که با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه محدوده گسل‌ها تعیین گردید. سپس بافر ۱۰۰ متر اطراف آن جزء مناطق حذفی قرار گرفت. امکان شکستگی در بدنه سد زیرزمینی و تخلیه مخزن از دلایل اصلی حذف این مناطق بوده است که با نتایج (Abdekhodayi et al., 2017) مطابقت دارد. برخی از کاربری‌ها مانند اراضی با کاربری مناطق مسکونی، مناطق صخره‌ای، اراضی شور، مخازن آب موجود در منطقه و اراضی حاشیه دریاچه نمک کاربری مناسبی برای احداث سد زیرزمینی ندارند. در نتیجه در ابتدای کار از منطقه حذف می‌شوند. سازندهای زمین‌شناسی یکی از مؤثرترین پارامترها در تعیین مکان مناسب برای احداث سد زیرزمینی هستند. سازندهای گچی و نمکی سازندهایی هستند که در گام نخست از منطقه مورد مطالعه حذف گردید. سدهای احداث شده و در دست احداث و حوزه‌های بالادست آن‌ها در منطقه مورد مطالعه جزء مناطق حذفی می‌باشند، زیرا آب موردنیاز برای آبیگری سدها را فراهم

رستمی خلیج و همکاران

در مکان‌های انتخابی دارد. این پارامتر کمترین امتیاز را طبق نظر کارشناسان و روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دریافت کرده است که با نظر Kheyrkhah و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. فاصله از جاده که امکان دسترسی به محل احداث سد را چه در زمان احداث سد و چه در زمان بعد از احداث سد برای انجام بررسی‌ها و تعمیر و نگهداری فراهم می‌کند طبق نظر خبرگان و کارشناسان وزن کمی را به خود اختصاص داده که با نتایج Abdekhodayi و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.

شیب‌های ۳-۰ درصد در بین سایر کلاس‌های شیب بیشترین امتیاز را کسب کرد. زیرا در این شیب‌ها سرعت آب به حداقل رسیده است و با توجه به نوع آبرفت‌های منطقه می‌تواند مخازن مناسبی را ایجاد کند (Talebi & Zahedi, 2015; Kordi et al., 2016; Maleki et al., 2019; Amanian et al., 2019).

کاربری‌هایی که در این فاز امتیازدهی گردیدند شامل کشاورزی آبی، باغات، اراضی فاقد پوشش، اراضی دیم، جنگل، مرتع و بیشه‌زارها می‌شوند و سایر کاربری‌ها در فاز قبلی امتیاز صفر به آن‌ها تعلق گرفته است. سپس با استفاده از روش Fuzzy-AHP وزن‌های زیرمعیارهای کاربری اراضی تعیین گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کاربری مرتع بیشترین امتیاز را کسب کرده است که نشان می‌دهد طبق نظر کارشناسان این کاربری، مناطق مناسبی برای احداث سد زیرزمینی هستند که با نتایج Kordi و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

پس از تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها برای محاسبه وزن نهایی از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) استفاده شد. وزن هر معیار در وزن‌های زیرمعیارها ضرب و نهایتاً وزن‌ها باهم جمع گردید و وزن‌های نهایی به دست آمد. سپس وزن‌ها با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی^۱ (De Smith et al., 2007) به ۵ طبقه فاقد پتانسیل، پتانسیل کم، پتانسیل متوسط،

پتانسیل زیاد و پتانسیل خیلی زیاد تقسیم‌بندی گردید. نقشه مناطق مستعد برای احداث سد زیرزمینی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل حدود ۶/۸ درصد از منطقه دارای پتانسیل خیلی زیاد و ۱۱/۷ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل زیاد است که نشان‌دهنده مناطق مناسب برای مکان‌یابی سد زیرزمینی هستند و در این مناطق با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و بازدید صحرایی اقدام به تعیین نقاط مناسب شد.

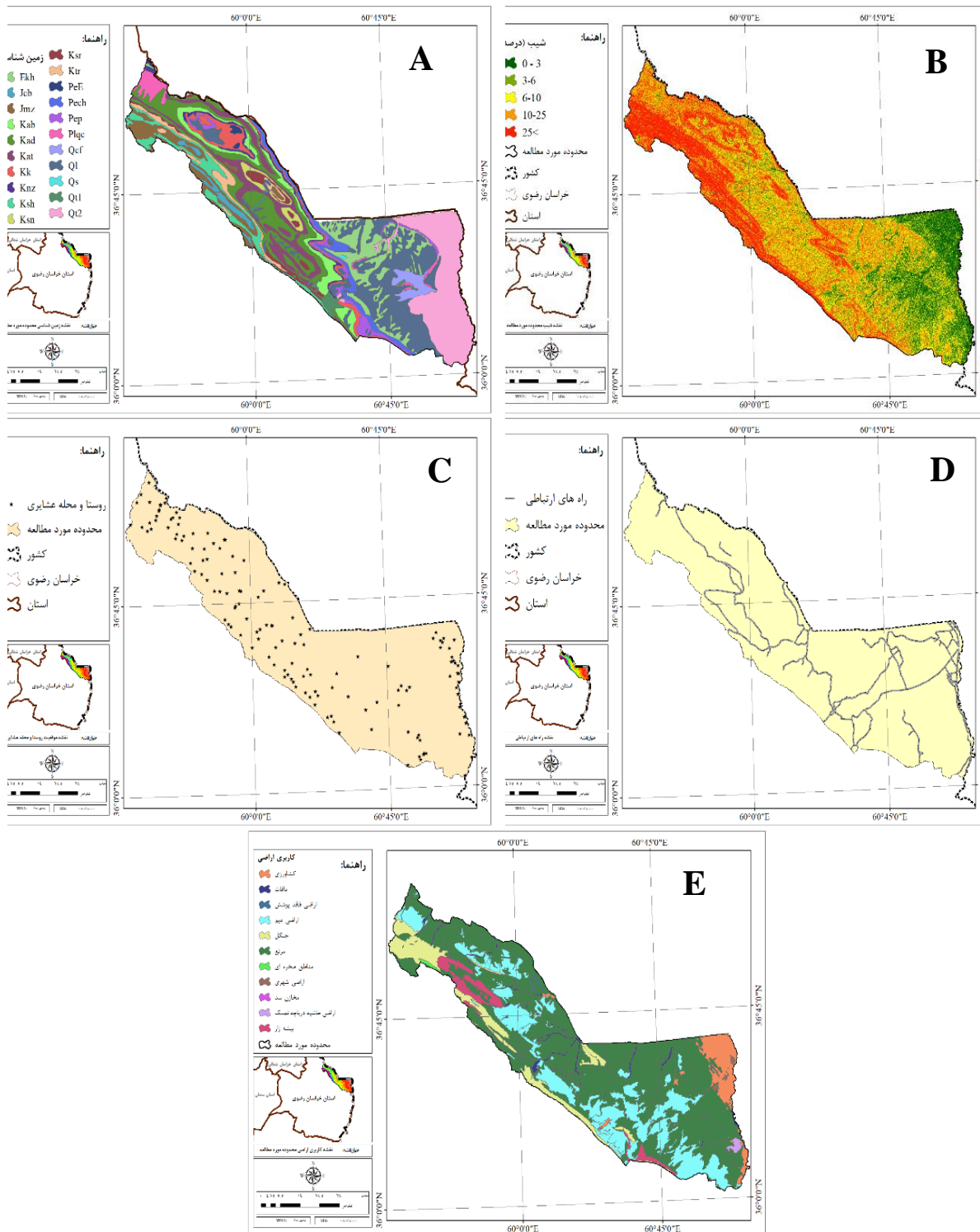
برای تعیین نقاط احداث سد زیرزمینی باید آبراهه دارای تنگ‌شدگی باشد تا دیواره‌های سد به آن ختم شود و طول دیواره سد کم شود تا هم از صرف هزینه زیاد جلوگیری گردد و هم دیواره سد مشکل آبگذری نداشته باشد. برای این منظور آبراهه‌هایی که در مناطق دارای پتانسیل قرار دارند مورد بررسی قرار گرفتند و نقاطی که آبراهه تنگ‌شدگی داشت تعیین گردید در نهایت ۷ نقطه دارای پتانسیل احداث سد تعیین گردید. شکل ۵ موقعیت نقاط احداث سد زیرزمینی را نشان می‌دهد.

پس از تعیین مقادیر ورودی و خروجی برای اولویت‌بندی نقاط پیشنهادی (جدول ۲) از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از رتبه‌بندی نقاط پیشنهادی برای انجام مطالعات تکمیلی در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج، نقطه Sarakhs2 از لحاظ نیاز آبی دچار کمبود است. بهره‌برداران این نقطه یک روستا است که در مجاورت این نقطه قرار دارد. از لحاظ خصوصیات فیزیکی، این نقطه دارای شرایط مناسبی است. محل احداث سد زیرزمینی در این نقطه دارای عرض مقطع ۲۵ متر است و ضخامت آبرفت حدود ۸ متر به دست آمد. شیب طولی آبراهه در این نقطه حدود ۳ درصد است که نشان می‌دهد این نقطه از لحاظ خصوصیات مخزن دارای شرایط نسبتاً مناسبی است. با بررسی‌های میدانی انجام‌شده در منطقه و مصاحبه با اداره امور عشایری استان مشخص شد نقطه

¹ Natural break

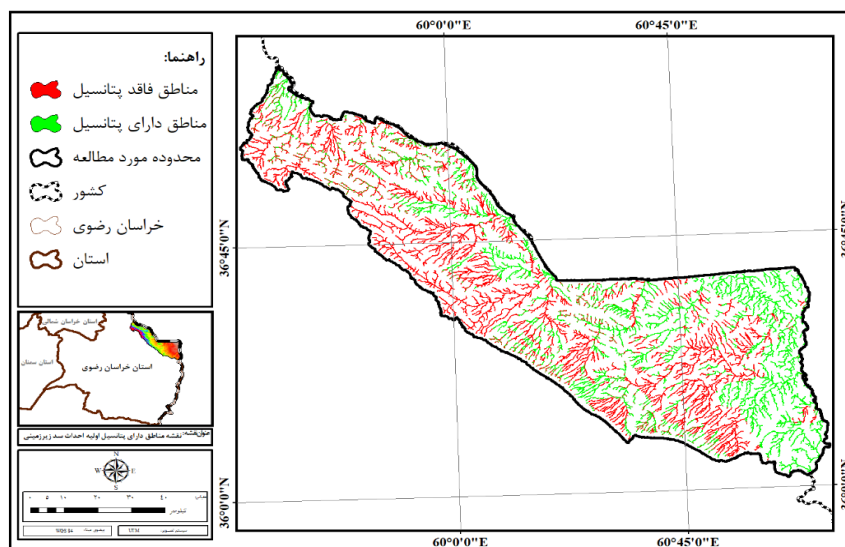
اطراف این نقطه می‌توانند از مزایای این سد استفاده کنند. از این رو این نقطه در اولویت اول جهت انجام مطالعات تکمیلی قرار دارد.

Sarakhs2 در مسیر کوچ عشایر این استان قرار دارد و می‌تواند محل اسکان موقت عشایر این منطقه باشد. علاوه بر این ۱۵ خانوار و ۳۱۰۰ رأس دام ساکن در



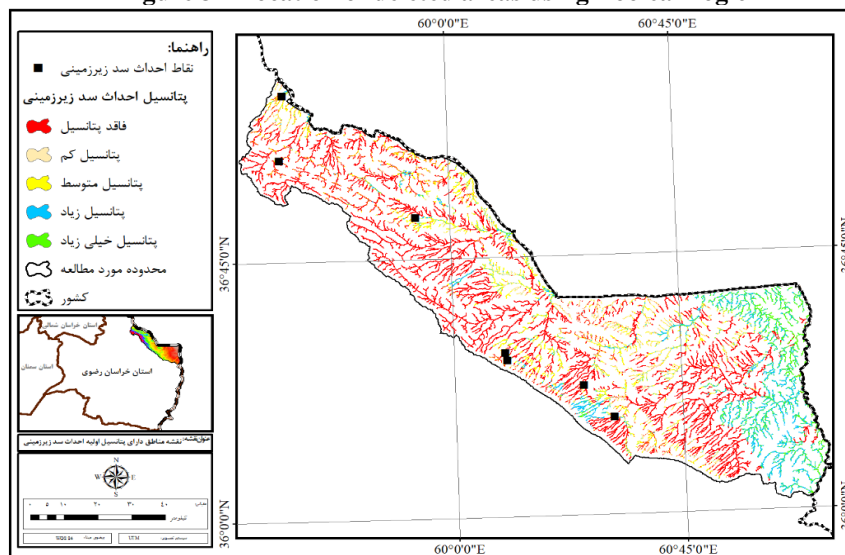
شکل ۲- نقشه نهایی معیارها A: نقشه زمین‌شناسی، B: نقشه شیب، C: نقشه موقعیت روستاها و محله‌های عشایری، D: نقشه راه‌های ارتباطی، E: نقشه کاربری اراضی

Figure 2- The final map of criteria A: geology, B: slope, C: location of villages, D: road, E: land use



شکل ۳- موقعیت مناطق حذف‌شده با استفاده از منطق بولین

Figure 3 - Location of deleted areas using Boolean logic



شکل ۴- نقشه مناطق مستعد برای احداث سد زیرزمینی و نقاط منتخب

Figure 4- Map of suitable areas for underground dam construction and selected points

جدول ۲- مقادیر ورودی و خروجی روش CCR و AP

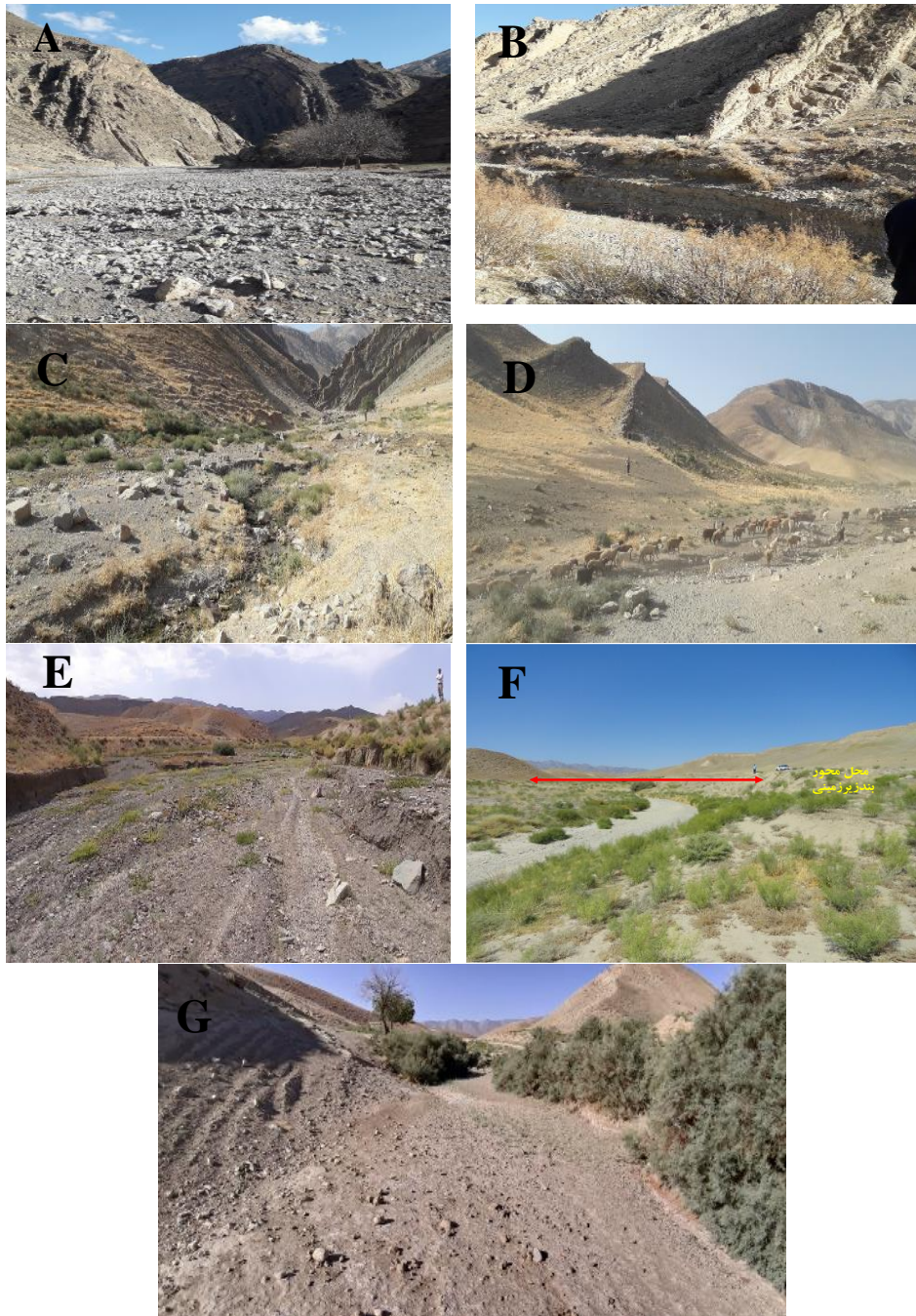
Table 2- Input and output values of CCR and AP methods

خروجی		ورودی‌ها				نقطه
حجم مؤثر مخزن (مترمکعب)	هزینه تأمین آب (ریال)	نیاز آبی منطقه (لیتر در روز)	میزان بارش (میلی‌متر)	مساحت حوضه بالادست سد (هکتار)	هزینه احداث سد (میلیارد ریال)	پیشنهادی
2977.53	1395.55	40500	282.25	8084	29.95	Kalat1
9355.62	1324.44	86500	428.89	3123.85	13.86	Kalat2
1564.94	515.55	50600	310.79	694.33	19.98	Kalat4
1435.72	426.66	56500	308.6	1863.22	23.93	Kalat5
2775.23	595.55	58150	342.91	635.15	18.16	Kalat6
3320.63	62.22	48250	227.49	4222.21	4.95	Sarakhs2
2130.36	231.11	67200	227.8	1738.41	10.97	Sarakhs3

جدول ۳ - رتبه‌بندی نقاط پیشنهادی برای انجام مطالعات تکمیلی

Table 3- Ranking of suggested points for further studies

رتبه‌بندی	اولویت‌بندی به روش AP	اولویت‌بندی به روش CCR	نقطه پیشنهادی	ردیف
5	0.67	0.67	Kalat1	1
2	2.69	1	Kalat2	2
6	0.58	0.58	Kalat4	3
7	0.39	0.39	Kalat5	4
3	1.45	1	Kalat6	5
1	5.78	1	Sarakhs2	6
4	0.86	0.86	Sarakhs3	7



شکل ۵- نمایی از نقاط منتخب A: نقطه Kalat1, B: نقطه Kalat2, C: نقطه Kalat 4, D: نقطه Kalat 5, E: نقطه Kalat6, F: نقطه

Sarakhs2, G: نقطه Sarakhs3

Figure 5- View of selected points A: Kalat1, B: Kalat2, C: Kalat 4, D: Kalat 5, E: Kalat6, F: Sarakhs2, G: Sarakhs3

نتیجه‌گیری کلی

آب‌های زیرزمینی مرزی، به‌عنوان یکی از عناصر مهم توسعه پایدار در حوزه‌های آبریز بین‌المللی، منابع استراتژیکی هستند که می‌توانند در بدترین شرایط به کنترل اوضاع و مدیریت بحران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک شایانی نمایند. نگرانی در زمینه کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در مناطق مرزی، که جریان آب زیرزمینی از مرزهای سیاسی عبور می‌کند، با چالش‌های سیاسی روبرو است. هم‌زمان با افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین در دنیا، کمبود اساسی در زمینه ایجاد چارچوب‌های قانونی در راستای همکاری، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در عرصه بین‌المللی احساس می‌شود.

در اغلب خشک‌رودها و از جمله در سکونتگاه‌های دامداران در مناطق مرزی، جریان آب ضعیف زیرقشری بر روی سنگ‌بستر وجود دارد. میزان آب زیرسطحی آن قدر کم است که نمی‌تواند رسوبات آبرفتی واقع در روی سنگ‌بستر را اشباع کند و از این رو در این گونه مناطق، اغلب چاه‌های دستی خشک و بدون آب می‌باشند. اغلب مناطق زندگی کشاورزان و دامداران در مناطق مرزی استان بر مخروط افکنه‌ها و در مجاورت خشک‌رودها واقع شده است و به منابع آب کافی برای کشاورزی و شرب دام دسترسی ندارند. در این مناطق، با احداث سد زیرزمینی می‌توان بخش قابل توجهی از جریان آب زیرسطحی را که بر روی سنگ‌بستر در جریان بوده و برای کشاورزی و شرب دام نیز دارای کیفیت مناسب است را در مخزن آبرفتی موجود در پشت سد زیرزمینی ذخیره نمود و در مواقع نیاز مورد بهره‌برداری قرارداد. با ساخت سد زیرزمینی در مجاورت برخی از سکونتگاه‌های کشاورزان و دامداران واقع در مناطق مرزی می‌توان جریان ضعیف آب زیرقشری را در داخل نهشته‌های آبرفتی واقع در بستر خشک‌رودها ذخیره نمود. آب ذخیره‌شده دارای کیفیت مناسب برای کشاورزی و شرب دام بوده و به میزان کافی برای فصول مختلف جهت استفاده در دسترس است. در برخی از این مناطق، احداث سد زیرزمینی از نظر فنی امکان‌پذیر

بوده و از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه بوده و بخش قابل توجهی از نیاز آب کشاورزی و شرب دام بهره‌برداران را تأمین می‌کند. در برخی از مناطق مرزی استان، با توجه به نیاز شدید در تأمین آب کشاورزی و آب شرب دام، هزینه‌های اقتصادی تأمین آب پس از احداث سد زیرزمینی طی گذشت چند سال از اجرای احداث سد، مستهلک خواهد شد. اجرای پروژه منجر به افزایش درآمد قابل توجهی برای کشاورزان و دامداران برخی از مناطق مرزی استان شده و در واقع به جمعیت فعال و پویای کشاورزان و دامداران این مناطق افزوده می‌گردد. از طرف دیگر، ایجاد اشتغال و افزایش جمعیت بهره‌بردار در مناطق مرزی موجب تأمین امنیت این مناطق خواهد شد. لذا با افزایش درآمد ساکنین مناطق مرزی، رضایت‌مندی کشاورزان و دامداران مناطق موردتحقیق نیز افزایش خواهد یافت. حذف مناطق فاقد پتانسیل تأثیر زیادی بر ساده‌تر شدن تجزیه‌وتحلیل و کاهش حجم کار میدانی دارد و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه حوزه‌های آبخیز مرزی استان خراسان رضوی با وسعت $7771/84$ کیلومترمربع است با استفاده از منطق بولین و پارامترهای مهم حذفی تأثیرگذار، حدود $58/6$ درصد از منطقه حذف شد و تقریباً حجم کار به نصف تقلیل یافت.

مکان‌یابی نوعی تحلیل مکانی است که بخش قابل توجهی از هزینه‌های پروژه را به خود اختصاص می‌دهد. از این رو مورد توجه مدیران و تصمیم‌گیران بوده و انتخاب مناطق مناسب، باعث کاهش هزینه و خسارات می‌شود. لذا استفاده از روش‌هایی که کارایی آن‌ها سنجیده شده و تقریباً اکثر عوامل مؤثر در مکان‌یابی را در نظر بگیرند ضروری است. روش AHP تحت تأثیر نظرات کارشناسان است و برخی از محققان با دید انتقادی به این روش نگاه می‌کنند. برای کاهش یا تعدیل اثر نظرات کارشناسان می‌توان با اضافه کردن روش فازی به آن عدم قطعیت را کاهش داد.

فاکتورها و عوامل بسیاری برای تعیین مکان‌یابی سد زیرزمینی وجود دارد. در بین پارامترهای تأثیرگذار در

می‌شود. در تکنیک DEA، احتیاجی به طرح فرم ریاضی ارتباط بین ورودی و خروجی وجود ندارد و ارتباط بر اساس خود مقادیر ورودی و خروجی تعیین می‌شود به همین دلیل به‌عنوان یک روش ناپارامتری طبقه‌بندی می‌شود.

دلیل انتخاب این روش برای اولویت‌بندی مکان‌های مناسب جهت احداث سد زیرزمینی عدم استفاده از نظر کارشناسان است که این موضوع یک رویکرد جدید از استفاده این تکنیک به حساب می‌آید. نکته‌ای که وجود دارد این است که نتایج این روش به انتخاب ورودی‌ها و خروجی‌ها بسیار وابسته است در نتیجه انتخاب نامناسب هر یک از آن‌ها، نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

سیاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی انجام شده است. لذا نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری‌های این اداره کل در تأمین اطلاعات و حمایت مالی تشکر کنند.

مکان‌یابی سد زیرزمینی، پارامتر زمین‌شناسی به دلیل تأثیر زیادی که روی نوع آبرفت و کیفیت آب قابل استحصال دارد، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. پس از آن، شیب با وزن ۰/۲۶۸ در جایگاه دوم اهمیت قرار گرفت. کلاس شیب ۰-۳ درصد در بین سایر کلاس‌های شیب بیشترین امتیاز را دارد. در شیب‌های کم‌سرعت رواناب کاهش یافته و امکان ایجاد مخزن آب زیرزمینی وجود دارد.

سد زیرزمینی به‌عنوان یک سیستم می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد و یکی از راه‌های ارزیابی هر سیستمی بررسی کارایی آن سیستم است که معمولاً بر اساس مقادیر ورودی و خروجی آن ارزیابی می‌گردد. یکی از روش‌های قدرتمند در زمینه ارزیابی کارایی سیستم‌ها، روش تحلیل پوششی داده‌ها است که هر زمان احتیاج به مقایسه کارایی وجود داشته باشد می‌توان از آن استفاده کرد. این روش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده‌ای (DMU) است که چندین ورودی و چندین خروجی دارند. در واقع تحلیل پوششی داده‌ها مبتنی بر یکسری بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی می‌باشد که به آن روش ناپارامتریک نیز گفته

References

- Agriculture Organization of Khorasan Razavi, (2019). *The appearance of the city of Kalat and Sarkhes*, 1th Edition.
- Álvarez, I., Barbero, J., & Zofio Prieto, J. (2020). A data envelopment analysis toolbox for MATLAB. *Journal of Statistical Software*, 95(3), 1-49. <http://doi.org/10.18637/jss.v095.i03>
- Abdekhodayi, M.M., Zoonenat Kermani, M., & Abkar, A. (2017). *Investigating the effective parameters in choosing the location of the underground dam under the Harmak basin in Kerman province*, 16 th Iranian Hydraulics Conference. (In Persian)
- Amanian, N., Iliati, I., & Mokhtari, M. H. (2019). Site Selection for underground dams using RS and GIS (Case study: Kashan Plain, Iran). *Journal of Arid Biome*, 9(1), 21-37.
- <http://doi.org/10.29252/aridbiom.2019.1541> (In Persian)
- Andersen, P., & Petersen, N.C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science*, 39(10), 1261-1264. <http://doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- Archwichai, L., Mantapan, K., & Srisuk, K. (2005). *Approachability of subsurface dams in the Northeast Thailand*. In International conference on geology, geotechnology and mineral resources of Indochina, GEOINDO pp 28-30.
- Charnes, A., Cooper, WW., & Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [http://doi.org/10.1016/0377-7\(78\)90138-8](http://doi.org/10.1016/0377-7(78)90138-8)
- Chezgi, J., Maleki Nezhad, H., Ekhtesasi, M.R., & Nakhaei, M. (2018). Providing a comprehensive and appropriate strategy for

- the construction of an underground dam using the SWOT model QSPM matrix (A case study: Keriyān Watershed). *Journal of Water and Soil Science*, 22 (1), 187-198. <http://doi.org/10.29252/jstnar.22.1.187> (In Persian)
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., & Longley, P. (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador publishing ltd.
- Esavi, V., Karami, J., Alimohammadi, A., & Niknezhad, S. A. (2012). Comparison the AHP and FUZZY-AHP Decision Making Methods in Underground DAM Site Selection in Taleghan Basin. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(85), 27-34. <http://doi.org/10.22071/gsj.2012.54018> (In Persian)
- Esmali, A., Golshan, M., & Khorrami, K. (2019). Determination of suitable areas for underground dam construction using boolean and fuzzy logics in central areas of Ardebil Province. *Journal of Watershed Management and Research*, 10(20), 225-237. <http://doi.org/10.29252/jwmr.10.20.225> (In Persian)
- Esmali Ouri, A., Golshan, M., & Khorrami, K. (2016). Prioritization of suitable axes for construction of underground dam in the Dooṣtbeiglou watershed. *Physical Geography Research*, 48(4), 645-659. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2016.60834> (In Persian)
- Fathi, A., Lee, T., & Mohebzadeh, H. (2019). Allocating Underground Dam Sites Using Remote Sensing and GIS Case Study on the Southwestern Plain of Tehran Province, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(6), 989-1002. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00961-3>
- Forzieri, G., Gardenti, M., Caparrini, F., & 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. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(1-2), 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.04.014>
- Kharazi, P., Yazdani, M. R., & Khazealpou, P. (2019). Suitable identification of underground dam locations, using decision-making methods in a semi-arid region of Iranian Semnan Plain. *Groundwater for Sustainable Development*, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100240>
- Kheyrkhah, A., Mohammadi, F., & Memarian, H. (2015). Determination of suitable locations for rainwater harvesting using analytic hierarchy process in GIS framework (Case study: Roodsarab watershed, Khooshab, Khorasan Razavi, Iran). *Journal of Rainwater Catchment Systems*; 3(3), 1-14. (In Persian)
- Kordi, R., Faramarzi, M., Karimi, H., Grayi, P., & Yarmohammadi, E. (2016). Mapping underground Dam in Arid and Semi-Arid Area in Western Iran (Case Study: Mehran, Ilam Province). *Journal of Watershed Management and Research*, 7(13), 172-164. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.172> (In Persian)
- Kumar, M., Kumar, R., & Singh, V. P. (Eds.). (2023). *Advances in Water Management Under Climate Change*. CRC Press. <http://doi.org/10.1201/9781003351672>
- Maleki, F., Tahmasebi P., N., Hagizada, A., Zienivand, H., & Ebrahimi, B. (2019). Site Selection for Construction of the Underground Dams in the Khorram Abad Watershed Using the Analytical Network Processes. *Watershed Management Reserches*, 32, 73-83. <http://doi.org/10.22092/wmej.2019.101703.1016> (In Persian)
- Nilsson, Å. (1988). *Groundwater dams for small-scale water supply*. In *Groundwater Dams for Small-Scale Water Supply*, (1-69). Practical Action Publishing. <http://doi.org/full/10.5555/19881859999>
- Peyrowan, H. R., Arab, M. R., & Kheirkhah Zarkesh, M. M. (2018). Site selection for underground dams in selected basins of Markazi province with a Decision Support System of Spatial data. *Extension and Development of Watershed Management*, 6(20), 54-63. (In Persian)
- Rezaei, M., & Jamshidi-Zanjani, A. (2017). Landfill site selection using combination of fuzzy logic and multi criteria decision making method (Case study: Arak, Iran). *Modares Civil Engineering Journal*, 17 (2), 120-130. (In Persian)
- Rezaei, Moghaddam, M. H., Rahimpour, T., & Nakhostinrouhi, M. (2016). Potential detection of the groundwater resources using analytic network process in geographic

- information system (Case study: basins leading to Tabriz Plain). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3(3), 379-389. <http://doi.org/10.22059/ije.2016.60026> (In Persian)
- Rostami khalaj, M., Noor, H., Bagheriyan Kalt, A., & Kheirkhah Zarkesh, M. (2022). Identification of suitable sites for subsurface flow harvesting using underground dam (Case study: Border basins of Torbat-e-Jam County). *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 9(4), 19-32. (In Persian)
- Rostamzadeh, R., & Sofian, S. (2011). Prioritizing effective 7Ms to improve production systems performance using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS, *Expert Systems with Applications*, 31, 5166- 5177. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.10.045>
- Sadeghi, S. H. (2017). Hydropolitics and national security (Case study: Persian Gulf Countries). *Strategy*, 25(4), e124610. (In Persian)
- Talebi, A., & Zahedi, E. (2015). Select Suitable Areas for Underground Dam Using The Theory of Fuzzy Logic And Analytical Hierarchy Process (Case Study: Watershed Doroongar, Dargaz). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9 (30), 41-50. (In Persian)
- Tavakoli, S., Khashei-Siuki, A., Hashemi, S. R., & Khozayme-Nezhad, H. (2018). Comparison of FAHP and FANP Decision-Making Methods in Determining the Appropriate Locations for Constructing an Underground Dam for Water Harvesting. *Water Harvesting Research*, 3(1), 81-91. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2019.1057>
- Webber, D., Marques, F., & de Oliveria Neto, M. B. (2019). Site selection for underground dams using spatial multi-criteria evaluation in the semi-arid region of the state of Alagoas, Brazil. In *Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: *International Symposium On Managed Aquifer Recharge* , 10, 236-244.