Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

# Identification of potential areas for the construction of underground dams in the country

**Amir Saberinasr[1]✉, Majid Dashti Barmaki[2]**

1. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a.saberinasr@scu.ac.ir
2. Expert of Sahel Omid Iranian Consulting Engineers, Tehran, Iran. E-mail: majiddashti24@gmail.com

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received 18 June 2024
Received in revised form 28 August 2024
Accepted 10 september 2024

**Keywords:**
Site Selection, Underground Dam, Analytical Hierarchy Process, Fuzzy Logic.

## ABSTRACT

One of the strategies for water storage in arid and semi-arid areas such as Iran is the construction of underground dams; however, identifying suitable sites for the construction of these structures remains a major challenge. The aim of this paper is to identify the optimal locations for the construction of underground dams using a geographic information system and multi-criteria decision making techniques. Firstly, thematic maps were prepared in ArcGIS environment including geological condition, land use, landslide potential, topography, water stress, aquifer area and distance from dam, village, qanat, stream, fault, airport and road. Hierarchical analysis and fuzzy logic methods were used to weight the prepared maps. By removing unsuitable and restricted areas for the construction of underground dams, a final potential map for this structure was prepared. The results show that the provinces of Razavi and South Khorasan, Kerman, Yazd, Sistan and Baluchistan, Hamedan, Qazvin, Zanjan, Markazi and Qom have greater potential for the construction of underground dams than other provinces in the country. Finally, to validate the results, a comparison was made between the results presented in this study and several successful underground dam projects in the country, showing a relatively close match between the potential map and the implemented structures.

## Introduction

Today, the overexploitation of alluvial aquifers and the decline in groundwater levels in these aquifers, together with their pollution and the limited access of certain population groups to these resources, have led to significant water stress in some regions of the country. It has also led to efforts to find alternative groundwater resources (such as karst water resources, deep and fossil water, etc.) and emphasizes the crucial need for water resources management. One of the common approaches to control, manage and store water during the rainy season for use during the dry season is underground dams, which have attracted the attention of arid and semi-arid countries of the world, especially Iran, in the last two decades. These dams, which are hydraulic structures designed to manage groundwater in areas with subsurface water flow, require a thorough evaluation of various surface and subsurface criteria to determine suitable sites for the construction of underground dams. Unfortunately, despite the favorable topographical and climatic conditions in many regions of Iran, which have significant potential for the construction of dams and underground reservoirs, the construction of underground dams has not been seriously considered and only a few limited cases such as Sadeghiravesh et al. (2023) and Talebi et al. (2023) (among others) have been implemented. A comprehensive, large-scale investigation has yet to be undertaken to pave the way for policymakers, managers and stakeholders to identify priority

**Cite this article:** Saberinasr, A., & Dashti Barmaki, M. (2024). Identification of potential areas for the construction of underground dams in the country. Journal of Engineering Geology, 18 (2), 162-185. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.2.1019551

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.2.1019551

regions for the construction of underground dams. Therefore, the primary objective of this research is to provide an initial assessment for the selection of optimal sites for the construction of these dams throughout the country.

## Materials and Methods

### Subtitle

In this study, criteria such as geology, land use, landslide potential, topography, water stress, aquifer boundaries and distance from features such as dams, villages, qanats, streams, faults, airports and roads were used in the selection of underground dam sites. To achieve this objective, geological maps, SRTM digital elevation models (DEM) and other maps were produced using Arcgis 9.3 software for the decision-making process. These layers were combined and modelled according to the Fuzzy Operator and Analytic Hierarchy Process (AHP) to generate a final map delineating areas vulnerable to underground dam construction. The results obtained were then verified with the location of major underground dams constructed in the country.

## Results and Discussion

In order to select suitable sites for the construction of underground dams in the country, the first step involves the preparation of various layers as follows

**Water stress**: The assessment of water stress in this study is based on the long-term average annual decline in groundwater levels (from 1375 to 1400). According to this analysis, the maximum water stress reaches 2.74 m y-1, which is mainly observed in Khorasan Razavi and Hamadan provinces.

**Slope**: The analysis of slope characteristics, as shown in the slope map, shows that a significant part of Iran has slopes of less than 10%, with some areas even below 5%. Such categories are considered highly favorable for the construction of underground dams.

**Distance from streams**: This layer, obtained by mapping Iran's river network, shows that shorter distances are prioritized for the construction of underground dams.

**Lithology**: Examination of the surface lithology map of Iran shows that most of Iran consists of Quaternary sediments, which are considered most suitable for underground dam construction. Conversely, hard rocks and evaporative sediments such as salt and gypsum are considered unsuitable for site selection due to their destructive effect on water quality and inability to form a suitable reservoir.

**Distance from faults**: The map of distance from faults was prepared using the map of faults in Iran, which indicates that shorter distances are not suitable. Such distances pose potential hazards, including water leakage, which increases the cost of sealing, and the possibility of earthquakes causing structural damage.

**Land use**: Owning land in agricultural areas is a challenge. Residential and industrial land uses are unsuitable for underground dam construction due to the potential for structural damage and water pollution and should be excluded from the decision-making process.

Unsuitable areas for underground dam construction include rocky, salty, desert and swamp regions.

Distance from villages: Constructing a dam near villages offers advantages such as use local workforce, ensuring effective maintenance by locals, and reducing transfer and pumping costs. Consequently, shorter distances of the dam to the village is a key factor to consider.

**Distance from roads**: The significant pollution along main country roads, caused by high vehicular traffic, necessitates prioritizing distance from these roads during underground dam construction .

**Distance from the Qanats**: Minimizing negative impacts on downstream water sources

like the Qanats is essential when planning the axis of an underground dam .

**Landslide potential**: Potential landslides can have damaging effects on underground dams, including reservoir displacement, destruction of upstream structures, reduced land permeability, and altered stream routes. Hence, selecting locations for underground dams away from high landslide risk areas is crucial.

**Distance from dams**: The more distance from the surface dams and their permanent reseviors, the more favorable it is for the construction of the underground dam.

**Distance from airports**: Longer distances are more desirable due to less pollution.

**Aquifer boundary:** the main alluvial aquifers of the country, considering the fact that they do not have a problem in terms of water supply for wet and dry seasons, also considering the great depth of sediments in such areas, the construction of an underground dam does not have a logical and economic justification. Consequently, these areas should be excluded from the localization process.The results of the final map show that although all provinces in the country have the necessary potential for the construction of underground dams, the provinces of Razavi and South Khorasan, Kerman, Yazd, Sistan and Baluchistan, Hamedan, Qazvin, Zanjan, Markazi and Qom have a greater potential for the construction of underground dams compared to other provinces in the country. Finally, to validate the results, a comparison was made between the results presented in this study and several successful underground dam projects in the country, showing a relatively close match between the potential map and the implemented structures.

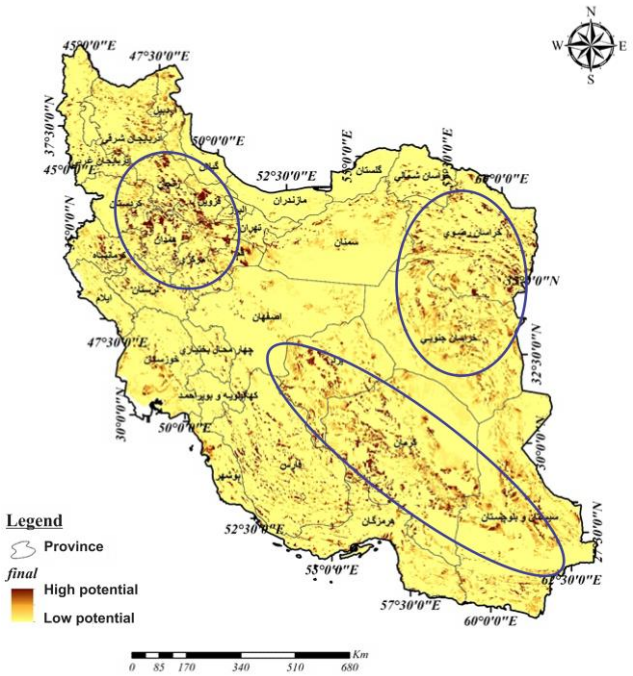



Fig 1. The final map of prone areas for underground dam construction along with the borders of provinces and areas with higher potential compared to other regions

## Conclusions

In arid and low rainfall areas, such as our country, the high evaporation rates due to unique atmospheric conditions pose a challenge to the feasibility of small-scale surface water storage, often rendering it impractical and uneconomical. In addition, the construction of surface reservoirs in desert areas can have a negative impact on the environment. In areas characterized by limited rainfall and the presence of subsurface flows

where extraction is technically feasible, the use of underground dams is proving to be a highly effective method. In this study, 14 factors were considered in order to select the most suitable locations for the construction of underground dams. According to the weighting conducted, water stress stands out as the most important criterion in the selection of the underground dam site, followed by distance from streams and slope. An evaluation of the final map of underground dam siting along the national provincial boundaries shows that provinces such as Razavi and South Khorasan, Kerman, Yazd, Sistan and Baluchistan, Hamedan, Qazvin, Zanjan, Markazi and Qom have greater potential for such structures than other provinces.

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

# پتانسیل‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی در سطح کشور

امیر صابری‌نصر[۱]✉، مجید دشتی برمکی[۲]

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a.saberinasr@scu.ac.ir
۲. کارشناس شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران .رایانامه: majiddashti24@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۳/۲۹
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۰۶/۰۷
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

**کلیدواژه‌ها:**
مکان‌یابی، سد زیرزمینی، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی.

**چکیده**

از جمله روش‌های حفظ منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، ساخت سدهای زیرزمینی است، اما یافتن مکان‌های مناسب برای ساخت این سازه‌های آبی همچنان یک چالش است. هدف این مقاله مکان‌یابی ساخت سد زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری است. در ابتدا نقشه‌های موضوعی مشتمل بر وضعیت زمین‌شناسی، کاربری اراضی، پتانسیل زمین‌لغزش، توپوگرافی، تنش آبی، محدوده آبخوان‌ها و فاصله از سد، روستا، قنات، آبراهه، گسل، فرودگاه و جاده در محیط ArcGIS تهیه شدند و امتیازدهی آن‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی انجام گرفت. در نهایت، با حذف مناطق نامناسب و ممنوعه در ایجاد سد زیرزمینی، نقشه نهایی پتانسیل این سازه تهیه گردید. نتایج نشان می‌دهد که استان‌های خراسان رضوی و جنوبی، کرمان، یزد، سیستان و بلوچستان، همدان، قزوین، زنجان و تا حدودی استان‌های مرکزی و قم از پتانسیل بالاتری نسبت به سایر استان‌های کشور برای احداث سدهای زیرزمینی برخوردارند. در نهایت، نتایج ارائه شده جهت صحت‌سنجی با چندین پروژه موفق سد زیرزمینی در کشور تطبیق داده شد که حاکی از تطابق نسبتاً خوب نقشه پتانسیل با سازه‌های اجرا شده بود.

## مقدمه

با توجه به محدودیت در مقدار آب در دسترس از یک سو و رشد جمعیت، افزایش سطح رفاه و توسعه صنعت و کشاورزی از سوی دیگر و به دنبال آن افزایش نیازهای آبی، ضرورت و اهمیت منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب، بیش از پیش آشکار می‌شود. لزوم شناخت آب‌های زیرزمینی از آنجا ناشی می‌شود که این منابع درصد قابل‌توجهی از کل آب‌های شیرین قابل استفاده را تشکیل می‌دهند. آسان‌ترین راه استفاده از آب‌های زیرزمینی بهره‌برداری از آبخوان‌های آبرفتی می‌باشد. اما امروزه استفاده روزافزون و بی‌رویه از آبخوان‌های آبرفتی و افت سطح آب در این آبخوان‌ها، متعاقباً آلودگی آن‌ها و نیز عدم دسترسی برخی از افراد به این منابع باعث تنش‌های شدید آب در برخی از مناطق کشور شده و علاوه بر آن موجب شده که جستجو برای یافتن سایر منابع آب زیرزمینی (نظیر آب‌های کارستی، ژرف و ...) بیشتر مورد توجه قرار گیرد. پراکنش نامناسب بارش و عدم تطابق زمان مصرف با زمان بارش نزولات جوی، ابعاد این تنش را سنگین‌تر و گسترده‌تر می‌نماید. کل بارش‌های دریافتی در همه حوضه‌های آبریز کشور به‌طور میانگین حدود ۴۰۰ میلیارد مترمکعب است (Golkarami and Kaviani, 2017; Pakzad et al., 2018) که این میزان در ترسالی‌ها به حدود ۵۳۰ میلیارد مترمکعب و در خشک‌سالی‌ها به کمتر از ۲۹۰ میلیارد مترمکعب می‌رسد. از متوسط ۴۰۰ میلیارد مترمکعب آبی که از بارش‌ها به دست می‌آید، حدود ۲۷۰ میلیارد مترمکعب تبخیر شده و از دست می‌رود و حدود ۱۳۰ میلیارد مترمکعب

**استناد:** صابری نصر، ا.، دشتی برمکی، م. (۱۴۰۳). پتانسیل‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی در سطح کشور. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۲)، ۱۶۲-۱۸۵.
https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.2.1019551

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

آب باقی می‌ماند که البته در خشک‌سالی‌ها و در مناطق کم آب و خشک وضعیت بدتر است. از طرفی در بسیاری از مناطق کشور شرایط موسمی وجود دارد. در مناطق با اقلیم موسمی، مجموع مقادیر بارندگی سالانه جهت رفع نیاز مردم و کشاورزی کافی است، اما به دلیل موسمی بودن، آب ناشی از بارش در بازه‌ای از سال در دسترس نیست. به بیان دیگر، در مناطق خشک و نیمه‌خشک یا مناطقی که به علل گوناگون از جمله تبخیر زیاد (تبخیر سالانه در کشور از ۷۰۰ میلی‌متر در کناره‌های دریای خزر تا ۴۰۰۰ میلی‌متر در کویر و جنوب شرق استان خوزستان متغیر است) و نفوذپذیری بالای خاک‌های سطحی جریان‌های محدودی دارند، اهمیت مدیریت آب بیش از پیش به چشم می‌آید. به دلیل اهمیت فوق‌العاده آب در مناطق مذکور، ارائه راهکارهای علمی و نو جهت استفاده بهینه از منابع آب ضرورت پیدا می‌کند. برای مقابله با بحران کم‌آبی و کاهش تنش‌های احتمالی، اولویت نخست در کشور، مدیریت صحیح منابع آب و به‌روزرسانی شیوه‌های ذخیره‌سازی و سپس اکتشاف و استحصال منابع جدید خواهد بود. به عبارت دیگر، می‌بایست از کلیه امکانات و ظرفیت‌ها جهت استفاده بهینه از منابع آب موجود، بهره گرفت. یکی از روش‌های متداول کنترل، مدیریت و ذخیره‌سازی آب از دوره‌های مرطوب برای استفاده در دوره‌های خشک، سدهای زیرزمینی است که در دو دهه اخیر بیشتر مورد توجه کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌ویژه ایران، قرار گرفته است. سد زیرزمینی از جمله روش‌هایی است که به کمک آن می‌توان از طریق مدیریت منابع آب موجود، بهره‌وری از آن‌ها را افزایش داد. با کمک چنین روشی می‌توان با جمع‌آوری و جلوگیری از خروج بدون استفاده آب قابل مصرف و استحصال آن‌ها به هنگام کاهش منابع سطحی و حتی زیرزمینی موجود، به مقابله با بحران کم‌آبی پرداخت و میزان هدررفت آب را تا حدود زیادی کاهش داد. سد زیرزمینی سازه هیدرولیکی است که برای ذخیره‌سازی و کنترل آب زیرزمینی، در مناطقی که جریان‌های آب زیرسطحی وجود داشته باشد، احداث می‌شود. طرح‌های شماتیک و اصول اجرای چنین سدهایی در منابع مختلف ارائه شده است برای مثال می‌توان به گومز و همکاران (Gomes et al., 2017) مراجعه نمود. هدف از احداث سدهای زیرزمینی در شرایط گوناگون، متفاوت است. این سدها گاهی برای تغذیه سفره‌های زیرزمینی، افزایش تعادل در تراز سطح ایستابی و در دسترس قرار دادن جریان‌های زیرسطحی برای کشاورزان (Nilsson, 1988)، گاهی در سواحل دریا برای جلوگیری از ورود آب زیرسطحی شیرین به دریا (Chang et al., 2019)، در حواشی کویر نیز برای جلوگیری از ورود آب شیرین به سفره‌های آب شور کویری و یا در مناطقی برای جلوگیری از نشت آب زیرسطحی (Yilmaz, 2003) و یا پیشگیری از نفوذ فاضلاب و آلودگی‌های زیرسطحی از طریق جریانات آب زیرزمینی مطالعه و اجرا می‌گردند (Nilsson, 1988). از مزایای سدهای زیرزمینی در مقایسه با سدهای سطحی می‌توان به کاهش تلفات ناشی از تبخیر، احتمال پایین‌تر آلودگی و هزینه ساخت ارزان‌تر آن‌ها اشاره نمود (Apaydin, 2009). برای احداث سدهای زیرزمینی در مناطق مختلف، ابتدا باید ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی - هیدروژئولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قبل و بعد از احداث سدها انجام شود و در صورت وجود مشکل برطرف گردد. با این حال، احداث سد زیرزمینی به‌دلیل اثرات پایین نامطلوب زیست‌محیطی و اجتماعی یک پتانسیل فوق‌العاده در حل مشکل کمبود آب است.

به‌منظور بررسی رخداد آب زیرزمینی قابل استحصال در نواحی مختلف و همچنین مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی یا مخازن آب شیرین زیرزمینی، معیارها یا پارامترهای سطحی و زیرزمینی متعددی باید مورد ارزیابی قرار گیرند که همین امر سبب دشوار بودن مکان‌یابی

می‌گردد. جهت اکتشاف اولیه مناطق دارای پتانسیل زیاد در کل کشور می‌بایست از نمایانگرهای سطحی و پارامترهای کمی و کیفی مؤثر بر ایجاد مخازن آب زیرزمینی استفاده نمود. استخراج این پارامترها در سطح با چشم غیرمسلح ممکن نیست، اما به‌آسانی با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای امکان‌پذیر می‌باشد. به بیان دیگر اگرچه مطالعات صحرایی و ژئوفیزیکی روش‌های دقیق‌تر و مطمئن‌تری در پتانسیل‌یابی و مکان‌یابی هستند اما کاربرد آن‌ها در گستره‌های وسیع دارای محدودیت است. بنابراین باید از سایر ابزارها در این زمینه استفاده نمود، ازاین‌رو تمایل کارشناسان به استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی با داشتن امتیازات مکانی، طیفی و زمانی و بکار بردن داده‌های با وسعت زیاد و پوشش دادن مکان‌های غیرقابل‌دسترس در یک زمان کوتاه، وسیله‌ای مناسب در ارزیابی، مدیریت و بررسی منابع آب زیرزمینی به شمار می‌روند. این مدل‌های تصمیم‌گیری اغلب با توجه به معیارهای متناقض متعدد و پیچیده (کمی – کیفی، اقتصادی – اجتماعی، سیاسی – نظامی و ...) به بررسی گزینه‌های مختلف پرداخته و در نهایت برای انتخاب بهترین گزینه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تحقیقات زیادی در سطح بین‌المللی به‌منظور مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی صورت گرفته است( Forzieri et al., 2008; Antonella et al., 2008; Apaydin, 2009; Ishida et al, 2011; Imran et al., 2013; Jamali et al., 2014; Gomes et al., 2018; Al-Ruzouq et al., 2019; Sahin and Tayfur, 2023; Sadeghiravesh et al., 2023; Talebi et al., 2023). مطالعات متعددی نیز در این زمینه در سطح کشور انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات چزگی و همکاران ( Chezgi et al., 2017) در منطقه کریان استان هرمزگان، کردی و همکاران (Kordi et al., 2016) در منطقه مهران، عبدخدایی و همکاران (Abdekhodaei et al., 2018) در زیر حوضه حرمک استان کرمان، عرب عامری و همکاران ( Arabameri et al., 2018) در اردستان استان اصفهان، کشاورز و همکاران (Keshavarz et al., 2019) در آبخیز صادق‌آباد استان فارس، بهاروند و همکاران ( Baharvand et al., 2020) در دشت کوهدشت استان لرستان، حبیب‌زاده و همکاران (Habibzadeh et al., 2021) در رودخانه فصلی مشنق چای، طالبی و همکاران (Talebi et al., 2023) در مهریز یزد، صادقی روش و همکاران ( Sadeghiravesh et al., 2023) در خضرآباد یزد و امامی و همکاران ( Emami et al., 2023) در دشت شهرکرد اشاره نمود. علیرغم آن‌که شرایط توپوگرافی و اقلیمی در بسیاری از مناطق ایران، پتانسیل بالای احداث سدها و مخازن زیرزمینی را نشان می‌دهد و سابقه و اهمیت دیرینه استفاده از آب به صورت‌های مختلف از جمله قنات‌ها و کاریزها دیده می‌شود، اما متأسفانه هنوز هم احداث سد زیرزمینی جدی گرفته نشده است و تنها موارد محدودی نظیر مطالعات اشاره شده در بالا، و به‌صورت پراکنده انجام شده است. تمامی این مطالعات بر اساس یکسری معیارهای مشخص و در یک منطقه محدود صورت گرفته است. هنوز مطالعه‌ای جامع در سطح کشور که بتواند راهگشای مدیران بالادستی بوده و مناطق دارای اولویت احداث سد زیرزمینی را مشخص نماید صورت نگرفته است؛ بنابراین هدف از این مطالعه مکان‌یابی اولیه احداث این سدها در کل کشور است.

## مواد و روش‌ها

### معرفی معیارهای اثرگذار بر پتانسیل احداث سد زیرزمینی

اولین گام در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی این است که بایستی یک بانک اطلاعاتی در اختیار باشد. با این حال، در این مطالعه که در مقیاس کل ایران صورت گرفته است، تعیین بسیاری از این معیارها زمان‌بر، مشکل و حتی

غیرممکن است، بنابراین در این مطالعه از معیارهایی نظیر وضعیت زمین‌شناسی، کاربری اراضی، پتانسیل زمین‌لغزش، توپوگرافی، تنش آبی، محدوده آبخوان‌ها و فاصله از سد، روستا، قنات، آبراهه، گسل، فرودگاه و جاده در مکان‌یابی سد زیرزمینی استفاده شده است (شکل ۱). در ادامه اثر هر یک از پارامترهای معرفی شده در مکان‌یابی سد زیرزمینی ارائه شده است:

**تنش آبی:** تنش آبی (water stress) می‌تواند به‌عنوان یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی سد زیرزمینی درنظر گرفته شود. این واژه یک مفهوم متفاوت از خشک‌سالی است. خشک‌سالی یک پدیده معمول و طبیعی است که در هر شرایط اقلیمی و به شکل دوره‌ای به دلیل تغییر در الگوهای گردش جو و به‌طور معمول در یک مقیاس مکانی گسترده و پیوسته رخ می‌دهد. اما تنش آبی زمانی رخ می‌دهد که تقاضای آب در یک دوره معین بیش از مقادیر آب در دسترس باشد و یا زمانی که استفاده از آب به دلیل کیفیت بد آن دارای محدودیت مصرف باشد. در مقایسه با کمبود آب، تنش آبی مفهومی جامع‌تر و گسترده‌تر دارد. این مفهوم، چندین جنبه فیزیکی مرتبط با منابع آب، شامل نه‌تنها کمبود آب، بلکه حتی کیفیت آب، جریان‌های محیطی، و توانایی دسترسی به آب را نیز دربر می‌گیرد. عوامل کمی و کیفی متعددی موجب تنش آبی در یک منطقه می‌شوند که از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به بهره‌برداری بیش از حد آبخوان، خشک‌سالی، وجود ریزمغذی‌های بیش از حد در یک منبع آب (اتروفیکاسیون (Eutrophication))، آلودگی‌های ناشی از مواد آلی و معدنی مختلف، نفوذ آب شور یا شورابه و ... اشاره نمود.

**شیب:** توپوگرافی و به‌طور ویژه معیار شیب از جمله عوامل تأثیرگذار در حجم مخزن سد زیرزمینی و همچنین مناسب بودن یک محور به‌منظور احداث سد می‌باشد. درصورتی‌که شیب در یک منطقه بالا باشد، علاوه بر فرسایش زیاد و کاهش حجم مخزن، مانع از نفوذ آب به زمین شده و از تغذیه سد زیرزمینی جلوگیری می‌نماید. شیب‌های زیر ۵ درصد به دلیل سرعت کم آب، فرصت کافی برای نفوذ و تشکیل مخازن مناسب زیرسطحی را فراهم می‌نماید (Khorrami et al., 2014).

**فاصله از آبراهه:** معمولاً احداث سدهای زیرزمینی در بستر رودخانه‌ها و آبراهه‌های فصلی صورت می‌گیرد. بدین منظور، مقدار رواناب از ویژگی‌های مهمی است که با درجه آبراهه‌ها رابطه‌ای مستقیم دارد. هرچه درجه آبراهه‌ها بالاتر باشد، حجم رواناب ایجاد شده، بیشتر و برای احداث سد از اولویت بالاتری برخوردار است. این پارامتر حاکی از این است که کمیت نسبت به کیفیت، درجه اهمیت بیشتری دارد. یعنی باید ابتدا حجم و مقدار کافی از آب وجود داشته باشد که بتوان آن را در پشت سد ذخیره نمود و سپس به سایر معیارها پرداخت. به همین دلیل فاصله از آبراهه‌ها عامل مهمی در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی محسوب می‌شود.

**سنگ‌شناسی (لیتولوژی):** یکی از عامل‌های بسیار مهم در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. سازندهای زمین‌شناسی و تأثیر آن‌ها بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی از عوامل مهمی است که باید در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی مدنظر قرار گیرد (Laa et al., 2005). مناسب‌ترین مکان برای احداث سد زیرزمینی آبرفت‌های ضخیم‌لایه با تخلخل و نفوذپذیری زیاد و همچنین مخروط‌افکنه‌ها هستند. لایه‌های سنگی و همچنین لایه‌هایی که حاوی گنبدهای نمکی، رسوبات تبخیری (گچ و ژیپس) و سایر لیتولوژی‌های کاهنده کیفیت آب در بالادست سد هستند، باید از نقشه پتانسیل نهایی حذف گردند.

**فاصله از گسل‌ها:** سدهای زیرزمینی نباید در مناطق فعال تکتونیکی و یا مناطق لرزه‌خیز احداث شوند. احداث سدها در این مناطق، به‌ویژه در مجاورت گسل‌های فعال، به دلیل

احتمال فرار آب، افزایش هزینه برای جلوگیری از نشت آب و آب‌بندی، و همچنین امکان لرزه‌زایی و تخریب سازه مناسب نیست.

**کاربری اراضی:** ازآنجایی‌که در سدهای زیرزمینی، آب در سطح زمین ذخیره نمی‌گردد، پس وجود این سدها لزوماً منجر به تغییر کاربری اراضی و اکوسامانه‌های موجود نمی‌شود؛ درنتیجه، احداث این سدها در مناطق با کاربری اراضی مختلف امکان‌پذیر است (Pirmoradi et al., 2010). حتی به دلیل افزایش تراز سطح ایستابی در بالادست سد، رطوبت خاک منطقه تا حد زیادی افزایش می‌یابد، گیاهان زیادی می‌توانند بدون آبیاری رشد کنند که در بهبود شرایط آبیاری و کشاورزی منطقه نقش مهمی ایفا می‌کند. با این حال، مشکل تملک اراضی در زمین‌های کشاورزی وجود خواهد داشت. مناطقی با کاربری مسکونی و صنعتی به سبب احتمال تخریب سازه و آلودگی آب (Pirmoradian et al., 2014) نمی‌توانند محل‌های مناسبی برای احداث سد زیرزمینی باشند. این مناطق باید از مراحل تصمیم‌گیری حذف گردند. در مناطق سنگی، نمکی، بیابانی و باتلاقی نیز امکان احداث سد زیرزمینی وجود ندارد.

**فاصله از روستا:** دوری و نزدیکی به محل سکونت و مسئله دسترسی کاربران نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از معیارها، در مکان‌یابی مناسب برای احداث سد مطرح باشد. استفاده از کارگران و نیروهای محلی، حفاظت و نگهداری مؤثر از سازه توسط محلی‌ها و هزینه‌های پایین انتقال و پمپاژ از مهم‌ترین مزایای احداث سد در مجاورت روستاها است؛ لذا فواصل کمتر سد تا روستا از امتیاز بیشتری برخوردار می‌باشند. بنابراین با توجه به شبکه ارتباطی، حریم‌هایی با فواصل مختلف از هر روستا ایجاد شد تا نقاط مناسب نسبت به این فواصل ارزیابی شوند.

**فاصله از جاده:** اگرچه وجود جاده دسترسی در محل احداث سد زیرزمینی باعث افزایش سرعت دسترسی و کاهش هزینه‌های مرتبط با ساخت و نگهداری سازه می‌گردد. بااین‌حال، جاده‌های اصلی کشور به دلیل تردد زیاد وسایل نقلیه، دارای آلودگی زیاد بوده و آب‌های مجاور آن‌ها از کیفیت نامطلوبی برخوردار خواهند بود. بنابراین فاصله بیشتر از جاده‌های اصلی کشور در احداث سد از اولویت بالاتری برخوردار خواهند بود.

**فاصله از قنات:** چون قنات از جمله ابتکارات ایرانیان می‌باشد و کم‌وبیش در اکثر مناطق کشور وجود دارد، از این‌رو مسئله تأثیر بر قنوات پایین‌دست در احداث سدهای زیرزمینی در ایران به‌عنوان یکی از عوامل اقتصادی-اجتماعی مطرح می‌باشد. محور سد زیرزمینی باید تا حد امکان تأثیر منفی کمی بر منابع آبی پایین‌دست نظیر قنات داشته باشد.

**پتانسیل زمین‌لغزش:** زمین‌لغزش یا رانش زمین عبارت است از حرکت توده‌ای از سنگ یا خاک که معمولاً به‌طور طبیعی و تحت عوامل مختلفی به‌خصوص نیروی جاذبه زمین در دامنه‌های شیب‌دار رخ می‌دهد. این پدیده یکی از اصلی‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی تهدیدکننده سد زیرزمینی می‌باشد و می‌تواند منجر به تخریب کامل یا بخشی از سد زیرزمینی شود، به‌طوری‌که عملیات بهسازی آن می‌تواند گهگاه از ساخت سد هزینه بیشتری را متحمل نماید. آثار خسارتی و تخریبی این پدیده بر روی سد زیرزمینی را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

- جابه‌جا شدن بخشی یا کل مخزن سد زیرزمینی و سازه‌های وابسته به آن
- تخریب سازه‌های بالادست مخزن
- کاهش نفوذپذیری زمین و تغییر در مسیر آبراهه‌های تغذیه‌کننده سد

از این‌رو سد زیرزمینی باید در محدوده‌های دورتر از خطر بالای زمین‌لغزش جانمایی شود.

**فاصله از سد:** سدهای سطحی با توجه به مخزن ذخیره آب در سطح و نوع رودخانه دائمی که در آن‌ها جاری است امکان احداث سد زیرزمینی ندارند. بنابراین هرچه از چنین سدهایی و مخزن ذخیره آن‌ها فاصله گرفته شود، برای ساخت سد زیرزمینی مطلوب‌تر است.

**فاصله از فرودگاه:** محدوده‌های فرودگاهی با توجه به نوع کاربری‌شان و همچنین آلودگی‌هایی که ایجاد می‌کنند، مکان‌های مناسبی برای احداث سد زیرزمینی نیستند. بنابراین فواصل دورتر از آن‌ها برای احداث چنین سازه‌هایی مطلوب‌ترند.

**محدوده آبخوان:** محدوده آبخوان‌های اصلی کشور با توجه به این‌که مشکلی از نظر تأمین آب برای فصول تر و خشک ندارند، همچنین با توجه به عمق زیاد رسوبات در چنین مناطقی، احداث سد زیرزمینی توجیه منطقی و اقتصادی ندارد. در نتیجه، این مناطق باید از فرآیند مکان‌یابی حذف گردند.

**محدوده شهر**: با توجه به این‌که حفر سد زیرزمینی در نواحی با کاربری شهری امکان‌پذیر نیست و همچنین با توجه به آلودگی‌های متعدد و متنوع در این نواحی، اراضی با این کاربری باید از مطالعات مکان‌یابی حذف گردند.

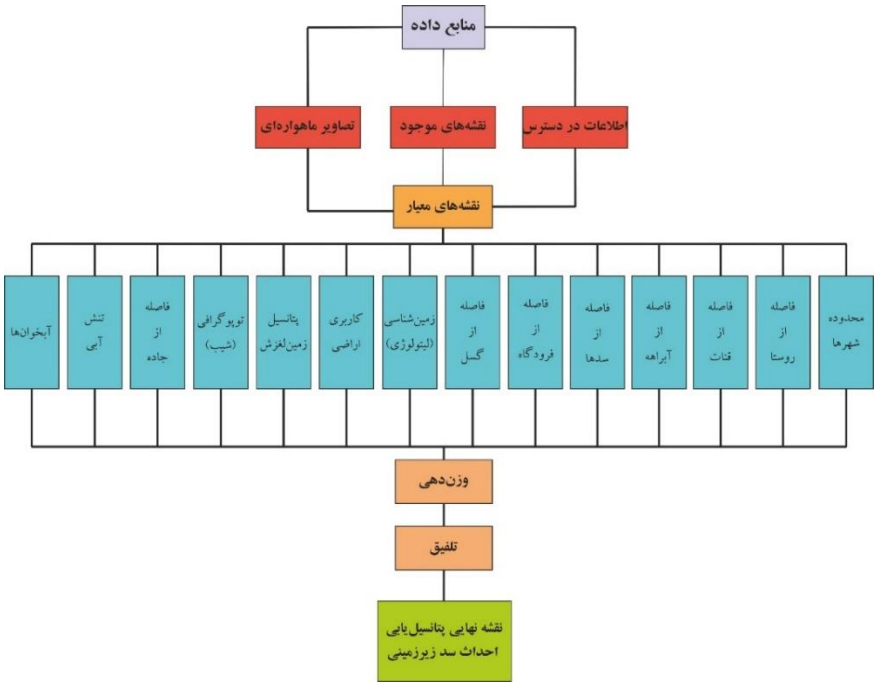
## روش تهیه نقشه‌های اثرگذار بر پتانسیل احداث سد زیرزمینی

در گام اول، نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱/۰۰۰/۰۰۰: ۱)، مدل رقومی ارتفاعی SRTM (DEM) (با قدرت تفکیک مکانی ۸۳ متر) و سایر نقشه‌ها تهیه و از نرم‌افزار Arc gis 9.3 برای تصمیم‌گیری استفاده شد. به عبارت دیگر، تحلیل‌های فضایی بر روی لایه‌ها انجام شد و برای استخراج نقشه نهایی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی، این لایه‌ها با توجه به عملگر فازی و سلسله مراتب زوجی وزن‌دار، تلفیق و مدل شدند. در نهایت مدل به دست آمده با اطلاعات محل سدهای زیرزمینی مهم اجرا شده در کشور صحت‌سنجی گردید.

در استفاده از عملگرهای مختلف فازی، لازم است از وزن‌های بالای پیکسل چشم‌پوشی شده و یک نتیجه بسیار محافظه‌کارانه ارائه گردد چرا که با توجه به مقیاس وسیع محدوده مورد نظر (کل کشور) بایستی از جزئیات پرهیز نمود و نگرش کلی بر وسعت بالای منطقه داشت. در این راستا، انتخاب محققین، استفاده از عملگر Fuzzy AND (اشتراک فازی) می‌باشد که همه معیارهای مؤثر بر مکان بهینه سد زیرزمینی را برآورده سازد. در این عملگر، اشتراک دو یا چند مجموعه فازی A و B با استفاده از کوچک‌ترین مقدار درجه تعلق از بین تمام معیارها تعیین می‌شود.

$$\min\left(\mu A(x).\mu B(x)\right) = \mu A \cap B(x) \qquad (۱)$$

که در آن $\mu A\cap B(x)$ درجه تعلق x به اشتراک فازی مجموعه‌های A و B، $\mu A(x)$ درجه تعلق x به مجموعه فازی A و $\mu B(x)$ درجه تعلق x به مجموعه فازی B است.




شکل ۱. نمودار مراحل پتانسیل‌یابی مناطق مناسب جهت احداث سد زیرزمینی در این پژوهش

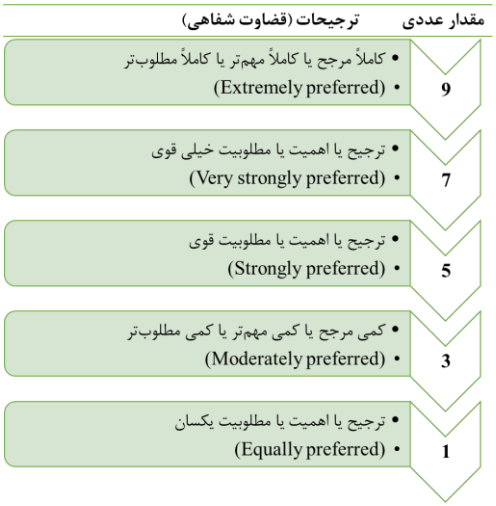
Fig. 1. Schematic diagram of the study stages for prone areas of underground dam construction

**وزن‌دهی به معیارها به روش تحلیل سلسله مراتبی**

با توجه به این‌که میزان تأثیر هر نمایه در پتانسیل احداث سد یا مخازن زیرزمینی متفاوت می‌باشد، بنابراین یکی از مراحل مهم پیش از تلفیق نقشه‌های معیار، تعیین اهمیت نسبی هر یک از نمایه‌های مؤثر و اختصاص وزن به هر کدام از آن‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی به معیارهای مختلف تصمیم‌ساز توسط محققین مختلف بیان شده است که از جمله می‌توان به فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Saaty, 1980) اشاره کرد. این روش بر مقایسه زوجی معیارها و تشکیل ماتریس مقایسه استوار است و وزن‌های نهایی را به‌صورت عددی ارائه می‌کند. نمودار جریانی این فرآیند در شکل ۲ ارائه شده است. وزن‌دهی نسبی به معیارهای مختلف بر اساس ترجیحات امتیازبندی شده (شکل ۳) انجام شده است.

شکل ۲. نمودار جریانی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

Fig. 2. Flowchart of the Analytical Hierarchy Process




شکل ۳. نحوه مقایسه گزینه‌ها و امتیازدهی به آن‌ها

Fig. 3. AHP paired comparison and their numerical Ranks

ماتریس وزن‌دهی به نمایه‌های مؤثر در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی در جدول ۱ ارائه شده است. این ماتریس، با استفاده از مقایسه زوجی پارامترها ارائه شده است. درجه ناسازگاری نشان‌دهنده میزان صحت ماتریس مقایسه و جهت پذیرش نتیجه‌های پذیرفتنی در شرایط طبیعی محاسبه می‌گردد. در صورتی‌که شاخص ناسازگاری محاسبات بیش از ده درصد باشد، محاسبات مجدد صورت می‌گیرد تا سازگاری مناسب (کمتر از ۱۰ درصد) استحصال شود. در نرخ سازگاری (CR) از تقسیم شاخص سازگاری (CI) بر شاخص تصادفی (RI) و به‌صورت زیر (معادله ۲) بدست می‌آید (Shao et al., 2020).

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (۲)$$

شاخص سازگاری نیز به‌صورت زیر بدست می‌آید:

$$CI=\lambda max-n/n-1 \qquad (۳)$$

که در این معادله λ عنصر بردار ویژه و n تعداد معیارهاست. مقدار λmax نیز از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\lambda max = \text{ستون وزن‌ها} \times \text{معیار وزن/ سطر ماتریس ارزش‌گذاری} \qquad (۴)$$

شاخص سازگاری در ماتریس تهیه شده (جدول ۱) کمتر از حد استاندارد و برابر با ۰/۰۰۱ برآورد شده است. در نهایت وزن هر پارامتر تعیین شد (جدول ۲). در این جدول، سه پارامتر لیتولوژی، محدوده شهر و محدوده آبخوان به‌صورت صفر و یک (بولین) و مابقی به روش AHP وزن‌دهی شده است.

جدول ۱- ماتریس مقایسه‌ای AHP برای نمایه‌های مؤثر در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی

Table 1. AHP Comparison matrix for each effective criterion in underground dam site selection

| | تنش آبی | فاصله از جاده | توپوگرافی (شیب) | پتانسیل زمین‌لغزش | کاربری اراضی | فاصله از گسل | فاصله از فرودگاه | فاصله از سدها | فاصله از آبراهه | فاصله از قنات | فاصله از روستا |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تنش آبی | 1 | 9 | 2 | 3 | 5 | 2.5 | 8 | 5 | 1.5 | 3.6 | 3.6 |
| فاصله از جاده | | 1 | 0.167 | 0.25 | 0.4 | 0.2 | 0.67 | 0.4 | 0.125 | 0.286 | 0.286 |
| توپوگرافی (شیب) | | | 1 | 1.5 | 2.4 | 1.2 | 4 | 2.4 | 0.75 | 1.7 | 1.7 |
| پتانسیل زمین‌لغزش | | | | 1 | 1.6 | 0.8 | 2.7 | 1.6 | 0.5 | 1.14 | 1.14 |
| کاربری اراضی | | | | | 1 | 0.5 | 1.7 | 1 | 0.3 | 0.7 | 0.7 |
| فاصله از گسل | | | | | | 1 | 3.3 | 2 | 0.625 | 1.4 | 1.4 |
| فاصله از فرودگاه | | | | | | | 1 | 0.6 | 0.19 | 0.4 | 0.4 |
| فاصله از سدها | | | | | | | | 1 | 0.3 | 0.7 | 0.7 |
| فاصله از آبراهه | | | | | | | | | 1 | 2.3 | 2.3 |
| فاصله از قنات | | | | | | | | | | 1 | 1 |
| فاصله از روستا | | | | | | | | | | | 1 |

Maximum Eigen Value =9.007
C.I.=0.001

جدول ۲. وزن‌دهی نهایی به نمایه‌های مؤثر در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی

Table 2. final weighting for each effective criterion in underground dam site selection

| نام نمایه | فاصله از روستا | فاصله از قنات | فاصله از آبراهه | فاصله از سدها | فاصله از فرودگاه | فاصله از گسل | زمین‌شناسی (لیتولوژی) | کاربری اراضی | پتانسیل زمین‌لغزش | توپوگرافی (شیب) | فاصله از جاده | تنش آبی | محدوده شهرها | محدوده آبخوان‌های اصلی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| وزن | 0.07 | 0.07 | 0.16 | 0.05 | 0.03 | 0.1 | 1 | 0.05 | 0.08 | 0.12 | 0.02 | 0.25 | 1 | 1 |

## نتایج و بحث

### تهیه نقشه‌های معیار برای مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، برای مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی به پارامترها و معیارهای متعددی نیاز است. در این بخش نحوه تهیه لایه‌ها و نقشه‌های معیار مذکور ارائه شده است.

**تنش آبی:** با توجه به مفاهیم تنش آبی ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، در مناطقی که تنش آبی شدیدتری وجود دارد، بررسی پتانسیل احداث مخازن آب شیرین با کیفیت نظیر سد زیرزمینی از اولویت بالاتری برخوردار است. در شکل ۴i نقشه شاخص تنش آبی محاسبه شده برای کل کشور ارائه شده است. در مطالعه حاضر، این شاخص بر اساس متوسط افت سالانه بلندمدت (دوره زمانی ۱۴۰۰- ۱۳۷۵) محاسبه شده است. حداکثر تنش آبی بر این اساس، به ۲/۷۴ متر بر سال می‌رسد که مربوط به استان‌های خراسان رضوی و همدان است.

**شیب:** به‌منظور تهیه نقشه شیب منطقه از نقشه مدل رقومی ارتفاعی SRTM (DEM) (با قدرت تفکیک مکانی ۸۳ متر) در محیط نرم‌افزار ArcMap استفاده شده است. این نقشه نیز با استفاده از مدل ارتفاع رقومی منطقه و به‌کارگیری توابع تحلیل سطح به دست آمد که ارزش هر پیکسل در آن نشان‌دهنده مقدار شیب آن برحسب درصد بود (شکل ۴a). ابتدا از روی DEM ساخته شده، نقشه TIN ایجاد و از آنجا با استفاده از Spatial Analysis در Arc MAP نقشه شیب تهیه شد. بررسی نقشه شیب (شکل ۴a) نشان می‌دهد که

اغلب مساحت ایران دارای شیب کمتر از ۱۰ و حتی کمتر از ۵ درصد بوده که در این رده بیشترین احتمال برای تشکیل مخزن مناسب زیرسطحی وجود دارد.

**فاصله از آبراهه:** با توجه به اهمیت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها در این تحقیق سعی شده، لایه فاصله از این معیار با استفاده از نقشه رودخانه‌های ایران استخراج شده و برحسب اهمیت هر لایه وزن‌های متغیر داده شود. نقشه فاصله از آبراهه‌ها با استفاده از تابع فاصله در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. شکل ۴b نقشه فاصله از آبراهه‌ها را نشان داده است.

**سنگ‌شناسی (لیتولوژی):** لایه اطلاعاتی لیتولوژی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی در نرم‌افزار Arc GIS تهیه گردید (شکل ۲). سازندهای مختلف در این نقشه با توجه به لیتولوژی غالب، به چند دسته تقسیم‌بندی شدند و به هر کدام برچسبی داده شد. سپس Geo data base آن‌ها تصحیح گردید. در آخر با استفاده از توابع تبدیل فرمت‌های برداری به فرمت‌های رستری که از توابع پردازشی در Arc GIS می‌باشد، نقشه لیتولوژی به یک لایه رستری تبدیل شد. سپس با استفاده از ابزار weighted overly نقشه لیتولوژی رستری شده فراخوانی شد و به هر لایه با توجه به اهمیتی که در مکان‌یابی احداث سد زیرزمینی می‌تواند داشته باشد رتبه مناسبی داده شد. شکل ۴c نقشه لیتولوژی سطحی کل ایران را نشان می‌دهد. بررسی این نقشه حاکی از این است که عمده مساحت ایران را رسوبات کواترنری عهد حاضر تشکیل می‌دهند که مناسب‌ترین رده برای احداث سد زیرزمینی می‌باشند. رسوبات تبخیری، نمک و گچ نیز به دلیل این‌که نقش مخرب کیفیت آب را دارند و قابلیت تشکیل یک آبخوان با کیفیت مناسب را ندارند، پایین‌ترین رده (رتبه صفر، حذفیات) را در مکان‌یابی سد زیرزمینی دارند.

**فاصله از گسل‌ها:** نقشه فاصله از گسل‌ها با استفاده از نقشه شیپ‌فایل گسل‌های ایران مستخرج از نقشه های با مقیاس ۱/۲۵۰,۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور و همچنین توسط تابع فاصله در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴d نمایش داده شده است.

**کاربری اراضی:** در مطالعه حاضر، سعی شده است مناطقی با کاربری مسکونی و صنعتی، به‌علاوه مناطق سنگی، نمکی، بیابانی و باتلاقی از محل احداث سد زیرزمینی حذف شوند. در زمین‌های کشاورزی نیز مشکل تملک اراضی وجود دارد. در شکل ۴m نقشه کاربری اراضی ایران ارائه شده است.

**فاصله از روستا:** همانطوری که بیان شد، فواصل کوتاه نسبت به روستا به دلیل دسترسی به نیروی کار ارزان‌تر و کاهش هزینه‌های خطوط انتقال از مزایای زیادی بزخوردار است. نقشه فاصله از آبادی با استفاده از نقشه شیپ‌فایل موقعیت آبادی‌های ایران و همچنین توسط تابع فاصله در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴e نمایش داده شده است.

**فاصله از جاده:** نقشه فاصله از جاده با استفاده از نقشه شیپ‌فایل جاده‌های اصلی کشور و همچنین توسط تابع فاصله در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴f نمایش داده شده است.

**فاصله از قنات:** نقشه فاصله از قنات‌ها با استفاده از نقشه شیپ‌فایل موقعیت قنات‌های ایران (برداشت شده در آماربرداری سراسری دور دوم منابع آب کشور) و همچنین توسط تابع فاصله در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴g نمایش داده شده است.

**پتانسیل زمین‌لغزش:** بر اساس مطالعات مختلفی که برای جانمایی سد زیرزمینی انجام شده است فاصله ۷ تا ۱۰ کیلومتری از محدوده دارای خطر بالای زمین‌لغزش برای ساخت یک سد زیرزمینی مناسب می‌باشد (Aghamolaie et al., 2014). در مطالعه حاضر نیز بر اساس اطلاعات نمایش داده شده در جدول ۲، وضعیت طبقه‌بندی پتانسیل زمین‌لغزش در شکل ۴h نمایش داده شده است.

جدول ۲. طبقه‌بندی پتانسیل زمین‌لغزش
Table 2. Landslide potential classification

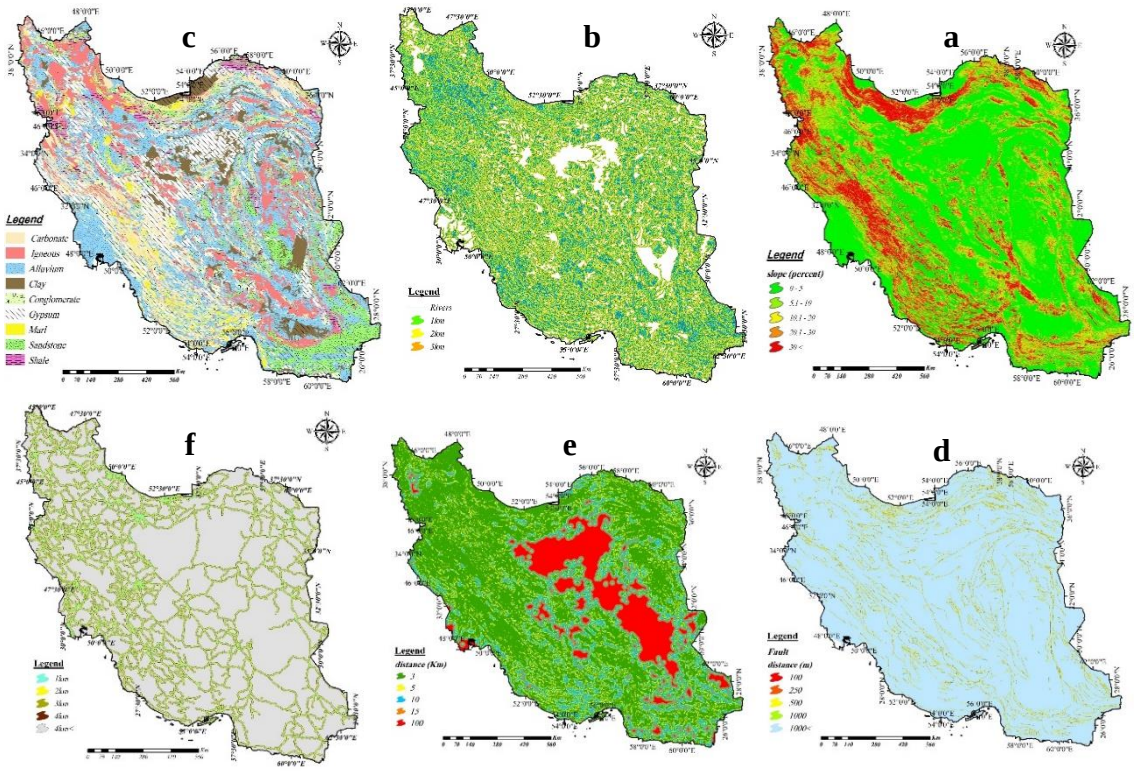
| پتانسیل زمین‌لغزش | مقدار عددی پیکسل |
|---|---|
| خیلی کم | <50 |
| کم | 50-150 |
| متوسط | 150-250 |
| زیاد | 250-350 |
| خیلی زیاد | >350 |

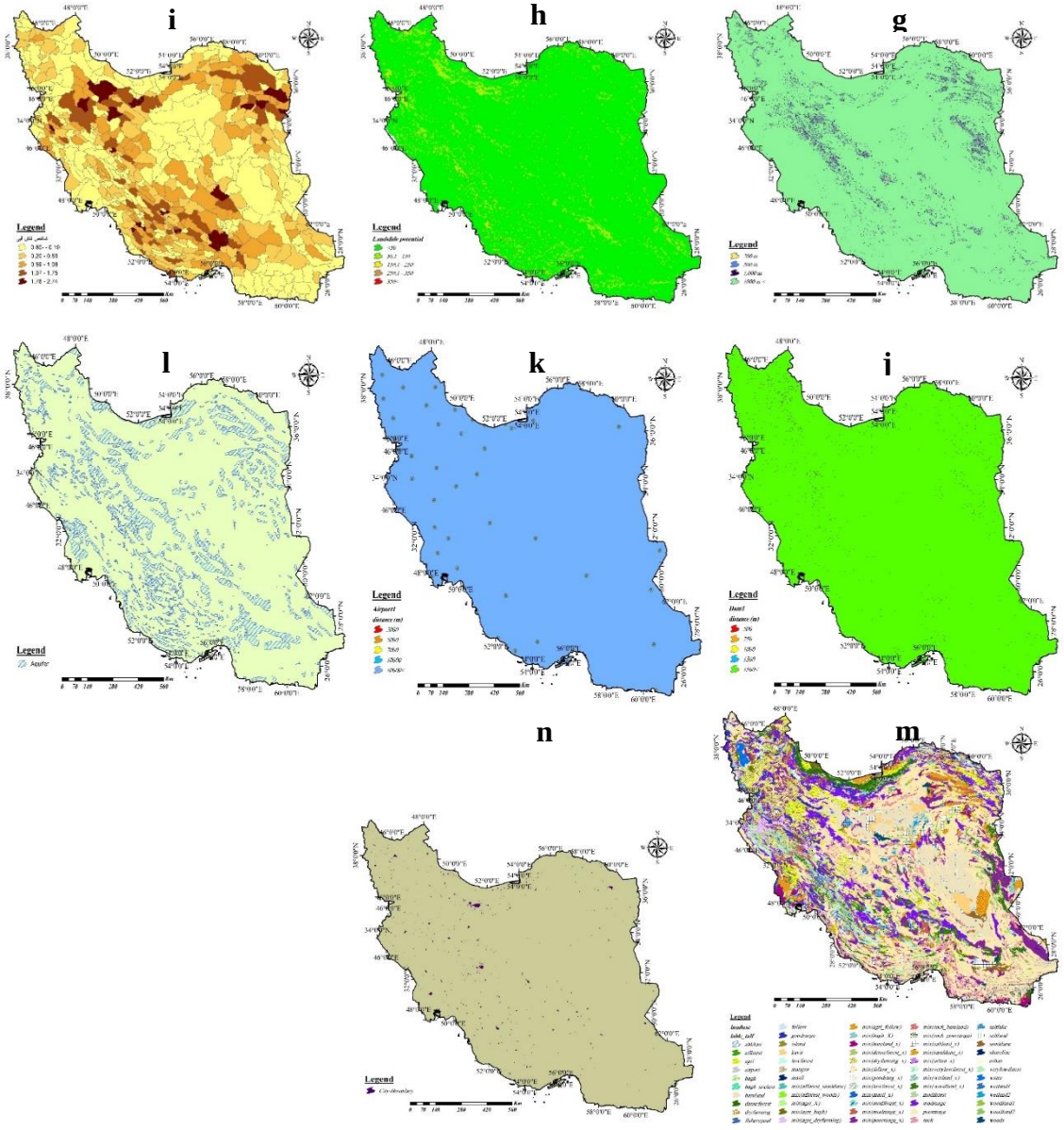
**فاصله از سد:** به‌طور کلی، هرچه از سدهای سطحی و مخزن ذخیره آن‌ها فاصله گرفته شود، برای ساخت سد زیرزمینی مطلوب‌تر است. شکل ۴j نقشه فاصله از سدها را نشان می‌دهد.

**فاصله از فرودگاه:** نقشه فاصله از فرودگاه‌ها با استفاده از نقشه شیپ‌فایل موقعیت فرودگاه‌های ایران و همچنین توسط تابع فاصله (multiple ring buffer) در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴k نمایش داده شده است.

**محدوده آبخوان:** با توجه به اهمیت محدوده آبخوان، این مناطق باید از فرآیند مکان‌یابی حذف گردند (شکل ۴l). این نقشه به‌صورت یک نقشه صفر و یک به مطالعات افزوده شد. مناطق درون سفره‌های اصلی آب زیرزمینی ارزش صفر و خارج از آن ارزش یک می‌گیرد.

**محدوده شهرها**: ارزش‌گذاری این پارامتر به‌صورت باینری داخل یا خارج از محدوده شهر (صفر و یک) انجام می‌گیرد (شکل ۴n).






شکل ۴. نقشه‌های a) شیب b) فاصله از آبراهه‌ها یا رودخانه‌ها c) زمین‌شناسی d) فاصله از گسل‌ها e) فاصله از آبادی‌ها f) فاصله از جاده‌های اصلی g) فاصله از قنات‌ها h) مناطق مستعد زمین‌لغزش i) شاخص تنش آبی j) فاصله از سد k) فاصله از فرودگاه l) موقعیت سفره‌های آبرفتی اصلی m) کاربری اراضی n) محدوده شهرها

Fig. 4. The map of a) Slope b) Distance from Streams c) Geology d) distance from faults e) distance from villages f) distance from main roads g) distance from Qanats h) prone areas of Landslides i) water stress index j) distance from Dams k) distance from airports l) main alluvial aquifers m) Landuse n) Urban areas

**هم‌مقیاس‌سازی نقشه‌های معیار و اهمیت آن**

با توجه به این‌که نقشه‌های تهیه شده (شکل ۴) دارای مقیاس‌های مختلفی مانند متر برای فاصله‌ها و اختلاف

ارتفاع، درصد برای شیب، و یک‌سری معیارها نظیر کاربری اراضی، تنش آبی بی‌بعد بودند، لذا برای این‌که تلفیق آن‌ها امکان‌پذیر گردد، هم‌مقیاس‌سازی آن‌ها امری ضروری است. در این تحقیق هم‌مقیاس‌سازی به روش قطعی صورت گرفت. در این روش با توجه به دانش کارشناسی و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد (reclassify) همه نقشه‌ها در محدوده ارزش‌های ۰ تا ۹ نرخ‌بندی شدند (شکل ۵)، نرخ‌های انتخاب شده در جدول ۳ مشاهده می‌گردند. مهم‌ترین گزینه در هر معیار ارزش ۹ و به‌همین ترتیب کم‌اهمیت‌ترین گزینه، ارزش صفر گرفت.

جدول ۳. ارزش‌گذاری معیارهای استفاده شده در مکان‌یابی

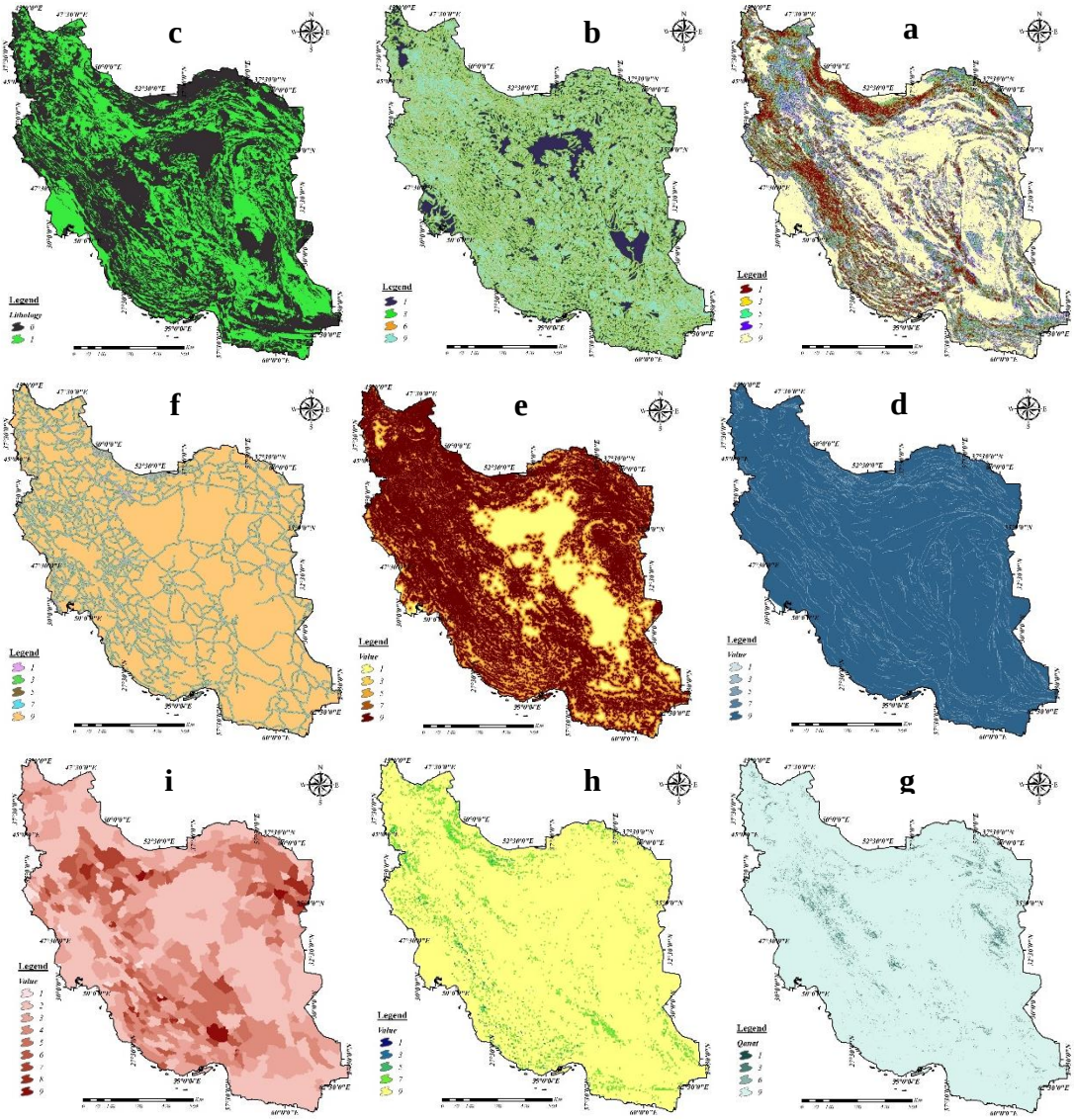
Table 3. Ranking the criteria used in site selection

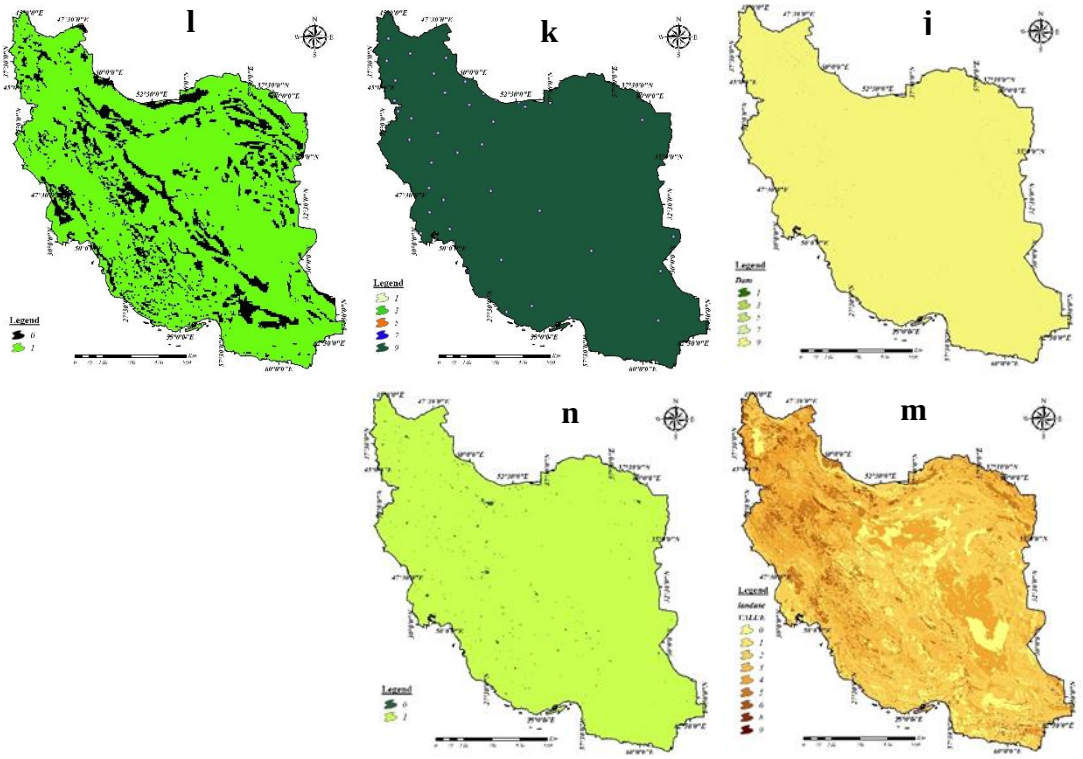
| پارامتر | ارزش |
|---|---|
| **فاصله از آبراهه (کیلومتر)** | **رتبه** |
| <1 | 9 |
| 1-2 | 6 |
| 2-3 | 3 |
| >3 | 1 |
| **شیب (درصد)** | **رتبه** |
| 0-5 | 9 |
| 5-10 | 7 |
| 10-20 | 5 |
| 20-30 | 3 |
| >30 | 1 |
| **سنگ‌شناسی (لیتولوژی)** | **رتبه** |
| آبرفت | 1 |
| غیرآبرفتی و تبخیری‌ها | 0 |
| **فاصله از گسل (متر)** | |
| <100 | 1 |
| 100-250 | 3 |
| 250-500 | 5 |
| 500-1000 | 7 |
| >1000 | 9 |
| **محدوده آبخوان اصلی** | |
| داخل محدوده | 0 |
| خارج از محدوده | 1 |
| **فاصله از فرودگاه‌ها (کیلومتر)** | |
| 0-3 | 1 |
| 3-5 | 3 |
| 5-7 | 5 |
| 7-10 | 7 |
| >10 | 9 |
| **کاربری اراضی** | **رتبه** |
| پرورش ماهی، شوره‌زار، ماسه‌بادی، دریاچه‌ها، جزایر، مناطق جنگل‌کاری شده و حفاظت‌شده، فرودگاه، مرداب، تالاب، مناطق صنعتی | 0 |
| زمین‌های سنگی (سازندی) | 1 |

| پارامتر | ارزش |
|---|---|
| **فاصله از روستا (کیلومتر)** | **رتبه** |
| 0-3 | 9 |
| 3-5 | 7 |
| 5-10 | 5 |
| 10-15 | 3 |
| >15 | 1 |
| **فاصله از جاده (کیلومتر)** | **رتبه** |
| 0-1 | 1 |
| 1-2 | 3 |
| 2-3 | 5 |
| 3-4 | 7 |
| >4 | 9 |
| **تنش آبی** | **رتبه** |
| -0.60-0.19 | 1 |
| 0.20-0.58 | 3 |
| 0.59-1.06 | 5 |
| 1.07-1.75 | 7 |
| 1.76-2.74 | 9 |
| **پتانسیل زمین‌لغزش** | **رتبه** |
| 0-50 | 9 |
| 50-150 | 7 |
| 150-250 | 5 |
| 250-350 | 3 |
| >350 | 1 |
| **محدوده شهرها** | |
| داخل محدوده | 0 |
| خارج از محدوده | 1 |
| **فاصله از سد (متر)** | **رتبه** |
| 0-500 | 1 |
| 500-750 | 3 |
| 750-1000 | 5 |
| 1000-1500 | 7 |

| | |
|---|---|
| زمین‌های لخت، مراتع با پوشش گیاهی کم، مناطق مرطوب | 2 |
| مراتع پوشش گیاهی کم تا متوسط، کشاورزی-بایر، جنگل‌کاری – سنگی | 3 |
| جنگلی، مراتع پوشش گیاهی متوسط | 4 |
| زمین‌های کشاورزی، جنگل با تراکم متوسط، کشاورزی – باغ، کشاورزی دیم | 5 |
| باغ‌ها، مراتع با پوشش گیاهی خوب | 6 |
| مسیل‌ها | 9 |

| فاصله از قنات (متر) | رتبه |
|---|---|
| <200 | 1 |
| 200-500 | 3 |
| 500-1000 | 6 |
| >1000 | 9 |
| >1500 | 9 |



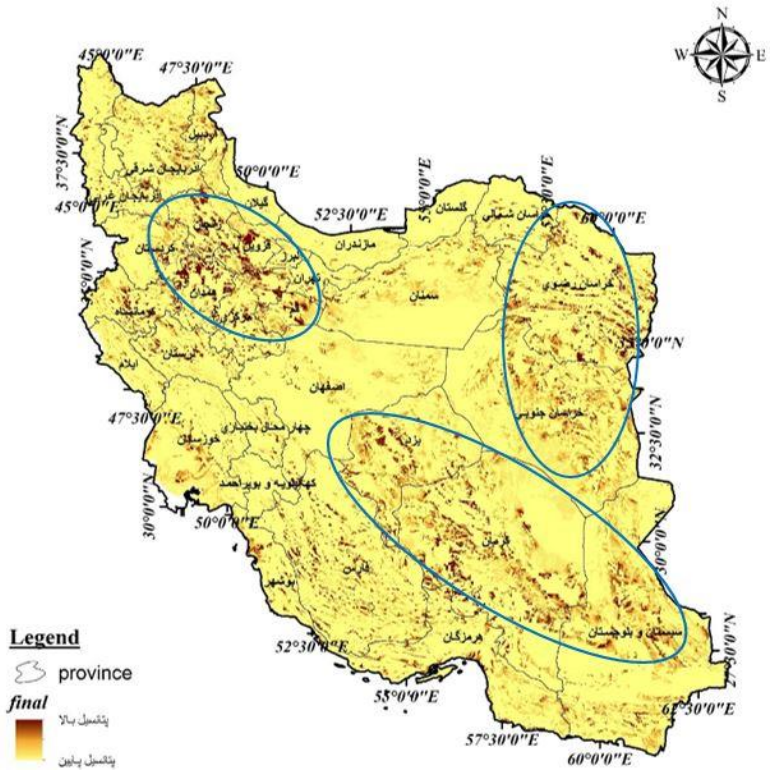



شکل ۵. نقشه‌های ارزش‌گذاری شده a) شیب b) فاصله از آبراهه‌ها یا رودخانه‌ها c) زمین‌شناسی d) فاصله از گسل‌ها e) فاصله از آبادی‌ها f) فاصله از جاده‌های اصلی g) فاصله از قنات‌ها h) مناطق مستعد زمین‌لغزش i) شاخص تنش آبی j) فاصله از سد k) فاصله از فرودگاه l) موقعیت سفره‌های آبرفتی اصلی m) کاربری اراضی n) محدوده شهرها

Fig. 5. The ranked map of a) Slope b) Distance from Streams c) Geology d) distance from faults e) distance from villages f) distance from main roads g) distance from Qanats h) prone areas of Landslides i) water stress index j) distance from Dams k) distance from airports l) main alluvial aquifers m) Landuse n) Urban areas

## پتانسیل‌یابی نهایی

در این تحقیق مدل هم‌پوشانی شاخص با استفاده از نقشه‌های معیار قطعی اعمال گردید. روش مذکور در عین برخورداری از منطقی ساده، به شکل قابل انعطافی ورودی‌ها را با هم ترکیب می‌کند. در این روش، وزن نمایه‌ها و کلاس‌های مربوط به هر یک از آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته و مسئله به‌صورت خطی حل می‌گردد. در شکل ۶ نقشه نهایی مکان‌یابی سد زیرزمینی ارائه شده است. بررسی نقشه نهایی مکان‌یابی جهت احداث سد زیرزمینی و مرز استان‌های کشور (شکل ۶) حاکی از این است که اگرچه همه استان‌های کشور از پتانسیل لازم برای احداث سد زیرزمینی برخوردارند؛ با این حال همان‌گونه که در شکل مذکور مشخص است، استان‌های خراسان رضوی و جنوبی، کرمان، یزد، سیستان و بلوچستان، همدان، قزوین، زنجان و تا حدودی استان‌های مرکزی و قم از پتانسیل بالاتری نسبت به سایر استان‌ها برای احداث چنین سدهایی برخوردارند.




شکل ۶. نقشه نهایی مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی به همراه مرز استان‌ها و مناطق با پتانسیل بالاتر نسبت به مابقی مناطق

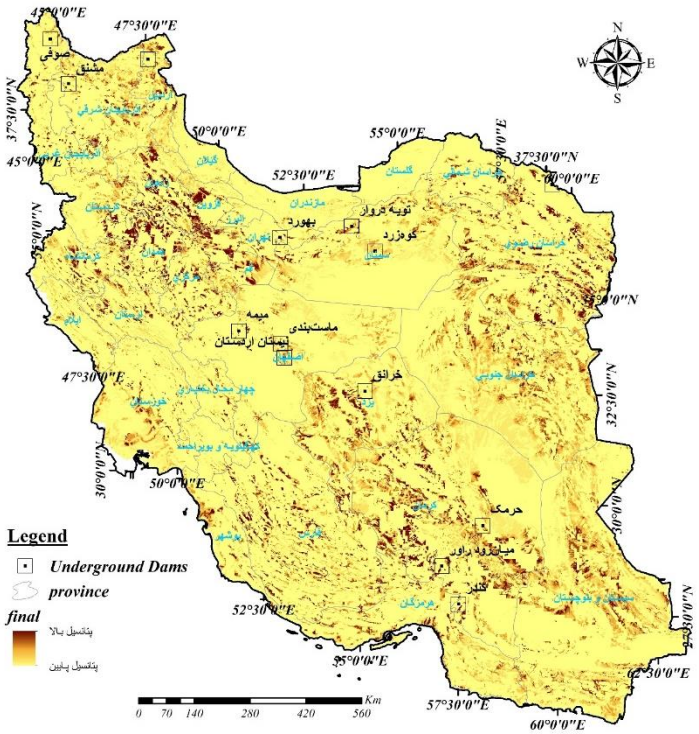
Fig. 6. The final map of prone areas for underground dam construction along with the borders of provinces and areas with higher potential compared to other regions

## صحت‌سنجی مدل (مکان‌یابی) پیشنهادی

پس از انجام هر پروژه پهنه‌بندی (مکان‌یابی)، لازم است که نتایج به‌دست آمده با توجه به واقعیات و اطلاعات موجود پیرامون آن‌ها، مورد بررسی قرار گیرد. به عبارتی باید نقشه پهنه‌بندی به‌دست آمده، صحت‌سنجی گردد. در غیر این صورت، اعتماد به نتایج پهنه‌بندی یا تصمیم‌گیری جهت انجام مراحل بعدی مطالعات، از جمله اکتشافات ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی، از شانس موفقیت کمتری برخوردار گردیده و ریسک سرمایه‌گذاری برای انجام مطالعات مذکور بالا خواهد بود. در چنین شرایطی، نتایج پهنه‌بندی در هاله‌ای از ابهام و عدم اطمینان قرار گرفته و نه‌تنها کمکی به صرفه‌جویی در وقت و هزینه نخواهد نمود، بلکه ممکن است موجب سردرگمی، طولانی شدن مطالعات، افزایش هزینه‌ها و از همه بدتر، اخذ نتایج نامطلوب و عدم بهره‌مندی از منابع آب موجود گردد.

واقعیت آن است که متأسفانه هیچ روش مطلق و دقیقی برای انجام یک ارزیابی مطمئن از میزان صحت خروجی مدل مکان‌یابی خصوصاً در مورد احداث سد زیرزمینی وجود ندارد. اما این امر، مانع از جمع‌آوری شواهد لازم و عدم بررسی مطلق صحت نتایج نخواهد بود. بهترین گزینه برای صحت‌سنجی پتانسیل‌یابی انجام‌شده روش مستقیم یعنی حفاری و احداث سد زیرزمینی است، اما به‌علت بالا بودن هزینه‌ها قبل از حفاری در محل می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی مثل ژئوالکتریک، ژئوتکنیک نظیر حفر گمانه و ... استفاده کرد. علاوه بر این استفاده از اطلاعات سایر سدهای زیرزمینی حفاری و اجرا شده در کشور و موقعیت آن‌ها می‌تواند به تائید صحت نتایج این مطالعه کمک نمایید. پس

از بررسی مقالات و مرور منابع ادبی مختلف، موقعیت سدهای اجرا شده در کشور، استخراج و در شکل ۷ به همراه نتایج مکان‌یابی برای احداث سد زیرزمینی ارائه شده است. موقعیت سدهای اجرا شده انطباق تقریباً مناسبی را با نتایج مکان‌یابی دارد. لازم به ذکر است که مکان‌یابی در این پژوهش در نقشه کوچک‌مقیاس (کل ایران) صورت گرفته و برای مطالعات دقیق‌تر باید از نقشه‌های بزرگ‌مقیاس بهره گرفت.




شکل ۷. نقشه نهایی مکان‌یابی مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی به‌همراه برخی سدهای زیرزمینی اجرا شده در سطح کشور
Fig. 7. The final map of prone areas for underground dam construction along with various implemented successful underground dam projects in the country

## نتیجه‌گیری

در مناطق خشک و کم باران (نظیر کشور ما) به دلیل شرایط خاص جوی، تبخیر بالا می‌باشد و امکان ذخیره‌سازی آب‌های سطحی در مقیاس کوچک مشکل و غیراقتصادی است و گاه ایجاد مخازن سطحی در مناطق کویری اثرات نامطلوب زیست‌محیطی را به همراه خواهد داشت. در این‌گونه مناطق و در جاهایی که جریانات زیرسطحی وجود داشته و به لحاظ فنی امکان استخراج و برداشت آن‌ها وجود دارد، یکی از بهترین شیوه‌ها و مدل‌های برداشت جریان‌های زیرقشری استفاده از سدهای زیرزمینی است. با توجه به مطالعات انجام شده و مرور منابع مختلف، نیاز آبی، شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، گسل، محل مصرف یا دسترسی به مخزن (فاصله از آبادی‌ها) به‌عنوان معیارهای اصلی و طول محور سد، عمق محور، مساحت مخزن و سنگ‌شناسی تکیه‌گاه‌های محور سد از مهم‌ترین معیارهای فرعی در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی و مخازن آب شیرین زیرسطحی هستند. علاوه بر این، در نمونه‌های کوچک سدهای زیرزمینی جهت اجرای دیواره آب‌بند از مصالح بنایی مثل آجر – ملاط ماسه و سیمان و

حتی مواد ژئوتکستایل به‌عنوان عامل آب‌بند کننده استفاده می‌شود. اما جهت اجرای دیواره آب‌بند با ابعاد بزرگ به دستگاه‌ها و ماشین‌آلاتی با قدرت بالا مانند هیدروفرز- کلامشل – گراب باکت – یا اوگرهای قدرتمند – نیاز است و این نکته باید در بررسی‌های امکان‌سنجی و اقتصادی پروژه در مطالعات تکمیلی مورد توجه قرار گیرد. برای مکان‌یابی مناسب‌ترین محل‌ها برای احداث سد زیرزمینی در این مطالعه، ۱۴ عامل تنش آبی، شیب، پتانسیل زمین‌لغزش، کاربری اراضی، لیتولوژی، محدوده آبخوان‌های اصلی، محدوده شهرها و فاصله از عواملی نظیر آبراهه‌ها، قنات‌ها، جاده‌ها، سدها، فرودگاه‌ها، آبادی‌ها و گسل‌ها مدنظر قرار داده شد. به‌منظور اولویت‌بندی عامل‌های استفاده‌شده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. بر اساس وزن‌دهی انجام شده در این مطالعه، تنش آبی مهم‌ترین معیار در مکان‌یابی سد زیرزمینی می‌باشد و پس از آن فاصله از آبراهه و شیب در رتبه بعدی قرار گرفتند. بررسی نقشه نهایی مکان‌یابی جهت احداث سد زیرزمینی و مرز استان‌های کشور حاکی از این است که اگرچه همه استان‌های کشور از پتانسیل لازم برای احداث سد زیرزمینی برخوردارند؛ بااین‌حال، استان‌های خراسان رضوی و جنوبی، کرمان، یزد، سیستان و بلوچستان، همدان، قزوین، زنجان و تا حدودی استان‌های مرکزی و قم از پتانسیل بالاتری نسبت به سایر استان‌ها برای احداث چنین سدهایی برخوردارند. پس از بررسی مقالات و تحقیقات مختلف انجام شده در سطح کشور و تعیین موقعیت برخی سدهای زیرزمینی اجرا شده، نتایج مکان‌یابی انجام شده در این پژوهش همخوانی قابل قبولی را با موقعیت سدهای اجرا شده در کشور نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌گردد در مطالعات تکمیلی بعدی برای تعیین مکان‌های مناسب جهت احداث سد زیرزمینی، میزان نفوذپذیری، عمق آبرفت یا ضخامت رسوبات در محل ساختگاه، عدم وجود چسبندگی میان ذرات خاک، جنس تکیه‌گاه سد، میزان عرض تاج سد، حجم مخزن بالادست، در نقشه‌های بزرگ‌مقیاس مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به روند طبیعی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی که در خروجی آبراهه‌ها قرار دارند و به‌منظور جلوگیری از اثرات سوء بر سفره آب پایین‌دست، اجرای این طرح فقط در مناطقی توصیه می‌شود که آب‌های زیرزمینی در پایین‌دست شور شده و یا به اعماق رفته و از دسترس خارج می‌شوند.

## References

Abdekhodaei, M.M., Zounemat-Kermani, M., & Abkar, A. (2018). Investigating the effective parameters in choosing the location of the underground dam in the Harmak sub-basin in Kerman province. 16 th Iranian Hydraulics Conference, Iranian Hydraulic Association, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (In Persain)

Aghamolaie, I., Lashkaripour, G. R., & Ghafoori, M. (2014). Investigation of effective factors on implementation of underground dams Case study: Meyanrud (Ravar) underground dam in Kerman. Irrigation and Water Engineering. 5(1), 67-82. (In Persain)

Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Yilmaz, A.G., Idris, A., Mukherjee, S., Khalil, M.A., & Gibril, M.B. (2019). Dam site suitability mapping and analysis using an integrated GIS and Machine Learning approach. Water. 11, 1880–1897.

Antonella, Z., Sharifi, A.M., & Andrea, G.F. (2008). Application of Spatial Multi-Criteria Analysis to Site Selection for A Local Park: A Case study in The Birgamo Province, Italy. Journal of Operational Research. 158, 1-5.

Apaydin, A. (2009). Malibogazi groundwater dam: an alternative model for semi-arid regions of Turkey to store and save groundwater. Environmental Earth Sciences. 59, 339–345.

Arabameri, A., sohrabi, M., Rezaei, K., & shirani, K. (2018). Site Selection of Underground Dam Using GIS and AHP Model. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering. 12 (41), 51-60. (In Persain)

Baharvand, S., Amiri Amraei, V., & Soori, S. (2020). An Assessment of the Potential of Underground Dam Construction Using the AHP Fuzzy Methods in the Kouhdasht Plain. Watershed Management Research. 33(4), 142-158. (In Persain)

Chang, Q., Zheng, T., Zheng, X., Zhang, B., Sun, Q., & Walther, M. (2019). Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge. Journal of Hydrology. 576, 508-519.

Chezgi, J., Maleki Nezhad, H., Ekhtesasi, M. R., & Nakhei, M. (2017). Prioritization suitable sites for underground dam's construction using decision-making models in arid and semi-arid. Journal of Arid Biome. 6(2), 83-95. (In Persain)

Emami, S. N., Yousefi, S., & Nekoeimehr, M. (2023). Evaluation of Effective Criteria on Determination of Capable Areas to Construction of Underground Dam in Shahrekord Watershed, Iran. In Surface and Groundwater Resources Development and Management in Semi-arid Region: Strategies and Solutions for Sustainable Water Management (pp. 393-410). Cham: Springer International Publishing.

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. Journal of Physics and Chemistry of the Earth. 33(1–2), 74–85.

Golkarami, A., Kaviani rad, M. (2017). The Effect of Limited Water Resources on Hydropolitic Tensions (Case Study: Iran's Central Catchment with Emphasis on Zayandehrood Basin). Geography and Environmental Planning. 28(1), 113-134. (In Persain)

Gomes, J.L.S., Vieira, F.P., & Hamza, V.M. (2017). Use of geophysical surveys in selection of sites for underground dams in the municipality of Jenipapo de Minas. In: Proceedings of International Congress of the Brazilian Geophysical Society - SBGf. Rio de Janeiro.

Gomes, J.L.S., Vieira, F.P., & Hamza, V.M. (2018). Use of electrical resistivity tomography in selection of sites for underground dams in a semiarid region in southeastern Brazil. Groundwater for Sustainable Development. 7, 232–238.

Habibzadeh, A., Hosainpur, A., & solaimanzadeh, S. (2021). Feasibility study and construction of an underground dam in the Daryan watershed (Case Study Mashnaq Underground Dam). Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems. 8(2), 53-65. (In Persain)

Imran, A.J., Bo, O., & Ulla, M. (2013). Locating suitable sites for the construction of subsurface dams using GIS. Environmental Earth Sciences. 70(6), 2511-2525.

Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., & Imaizumil, M. (2011). Review Sustainable Use of Groundwater with Underground Dams. Japan Agricultural Research Quarterly. 45, 51 – 61.

Jamali, I.A., Mörtberg, U., Olofsson, B., & Shafique, M. (2014). A spatial multi-criteria analysis approach for locating suitable sites for construction of subsurface dams in Northern Pakistan. Water Resource Management. 28, 5157–5174.

Keshavarz, S., Porghasemi, H. R., Afzali, S. F., & Rezaei Moghaddam, K. (2019). Prioritization of Suitable Sites for Underground Dam Construction Using the TOPSIS Multi-Criteria Decision Making Model in the Sadeghabad Watershed, the Province of Fars. Watershed Management Research. 32(2), 19-30. (In Persain)

Khorrami, K., Vahab Zadeh, G., Soleimani, K., & Talaei, R. (2014). Determining the suitable areas of underground dam in Gharasou watershed. Watershed Engineering and Management. 6(2), 139-154. (In Persain)

Kordi, R., Faramarzi, M., Karimi, H., Garaei, 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 Research. 7(13), 164-172. (In Persain)

Laa, A., Kampanart, M., & Kriengsak, S. (2005). Approachability of subsurface dams in Northeast Thailand. International Conference on Geology, Geotechnology, and Mineral Resources of Indochina, Khon Kaen, Thailand 1: 149-155.

Nilsson, A. (1988). Groundwater dams for small-scale water supply. Intermed Technol Publ, London, 78 p.

Pakzad, Z., Ramesht, M. H., & Gandomkar, A. (2018). The Share of Iran's Water Resources from

Atmospheric Systems. Geography and Environmental Planning. 29(1), 153-164. (In Persain)

Pirmoradi, R., Nakhaei, M., & Asadian, F. (2010). Determining of areas suitable for underground dam construction using GIS and AHP, Case study: Malayer Plain in Hamadan. Journal of Physical Geography. 8, 51-66. (In Persain)

Pirmoradian, r., Behbahni, S.M.R., Nazarifar, M.H., & Velayati, S. (2014). Primary zoning of suitable places for the construction of underground dam in Ivanki plain. The First National Conference on Challenges on Water Resources & Agriculture, Iranian Association of Irrigation and Drainage, Islamic Azad University of Isfahan(Khorasgan) Branch, Isfahan, Iran. (In Persain)

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 287 p.

Sadeghiravesh, M. H., Khosravi, H., & Abolhasani, A. (2023). Selecting proper sites for underground dam construction using Multi-Attribute Utility Theory in arid and semi-arid regions. Journal of Mountain Science. 20(1), 197-208.

Sahin, Y., & Tayfur, G. (2023). 3D modelling of surface spreading and underground dam groundwater recharge: Egri Creek Subbasin, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 195, 688.

Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., & Li, Y. (2020). Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China. Environmental Modelling & Software. 134, 104868.

Talebi, A., Mandegar, A. R., Parvizi, S., Poordara, H., & Barkhordari, J. (2023). Underground dam site selection using hydrological modelling and analytic network process. Groundwater for Sustainable Development. 23, 100976.

Yilmaz, M. (2003). Control of Groundwater by Underground Dams. A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, the Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 96p.