

Research Paper



Comparison of the effectiveness of AHP and ANP methods in the exploration of karst water resources in South Khorasan Province



Mohsen Rezaei Arefi^{*1}, Mansour Sadeghi², Amir Hasan Jangi³

1. Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. Rezaei.arefi@cfu.ac.ir

2. PhD in Geomorphology and Environmental Management, Kharazmi University, Tehran, Iran. mansadeghi1400@gmail.com

3. Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. amir.h.jangi@cfu.ac.ir

Keywords

Aquifer, Karst Formation, Water Resources Exploration, AHP, ANP, South Khorasan, East Iran.

Receive: 2025/09/08

Accepted: 2025/12/01

Published: 2026/09/23

ABSTRACT

Introduction

Located in the arid and semi-arid belt of the world, including Iran, are facing a water crisis. On the one hand, the decrease in rainfall, high evaporation and irregular distribution of surface water resources, and on the other hand, the rapid growth of population and agricultural development, make the exploitation of groundwater resources increasingly important. The growing trend of South Khorasan Province in recent years on the one hand, and the location of this province in the arid and semi-arid region on the other hand, make it more necessary to adopt sound water resource management strategies in this region. One of the water resource management strategies is to identify water areas with different potentials and exploit them according to their capacity.

Methodology

This research was conducted using field, library and documentary methods. In this research, based on the degree of importance of the parameters affecting the development of karst water resources in South Khorasan Province, 9 important factors were selected, including lithology, distance from the fault, climate (rainfall and temperature), altitude, slope, distance from of river, slope direction and land use. The parameters were evaluated using two AHP and ANP models. Based on field studies and expert opinions, the lithology parameter was considered as the most important factor, followed by distance from the fault, in the exploration of karst water resources in South Khorasan Province.

*Correspondin Author: Mohsen Rezaei arefi Email: Rezaei.arefi@cfu.ac.ir

How to cite this article. Rezaei arefi, mohsen ; Sadeghi, mansour , Jangi, amir hasan (2026). Comparison of the effectiveness of AHP and ANP.

Hydrogeomorphology, 13(48): 44- 68.

Doi: [10.22034/hyd.2025.69062.1813](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.69062.1813)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

The final map of karst water resources potential was obtained using 9 layers by combining the weights obtained with each layer and overlapping them using the Raster Calculator command. Based on the theoretical principles of karst and field observations, the map of karst water resources exploration in the study area Using both the Analytic Hierarchy Process and Network Analysis models was classified into five classes: very high, high, medium, low and very low potential.

Conclusions

The results showed that in the AHP method, 42% were in the very underdeveloped category, 32% in the underdeveloped category, 17% in the medium category, 7% in the high development category, and 2% in the very high development category. In the ANP method, 42% were in the very underdeveloped category, 33% in the low development category, 17% in the medium category, 6.5% in the high development category, and 1.4% in the very high development category. The results of the study showed that by comparing the efficiency of the two methods using the validation with the well and spring layer, the ANP method has a relatively better validity, because after overlapping, using the quantitative method, a greater number of wells and springs were placed on the developed and highly developed karst areas.

مقاله پژوهشی



مقایسه کارایی روش های AHP و ANP در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی



محسن رضائی عارفی^{۱*}، منصور صادقی^۲، امیر حسن جنگی^۳

۱ - استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. Rezaei.arefi@cfu.ac.ir

۲ - دکترای ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. mansadeghi1400@gmail.com

۳ - گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. amir.h.jangi@cfu.ac.ir

چکیده

کلیدواژه‌ها

بحران منابع آب در مناطق خشک در حال حاضر به شدت احساس می شود. پتانسیل یابی منابع آب کارست با توجه به بحران کنونی آب در مناطق خشک و نیمه خشک ایران به شدت ضروری و لازم الاجرا می باشد. هدف از این پژوهش مقایسه کارایی روشهای AHP و ANP در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی جهت اولویت بندی بهره برداری از مناطق کارست توسعه یافته جهت کاهش هزینه ها برای عملیات ژئوفیزیکی و حفاری می باشد. در این پژوهش با روش تحلیل سلسله مراتبی، لایه های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی به عنوان نقشه های عامل در نظر گرفته شدند. همچنین به منظور استخراج مدل اکتشاف منابع آب کارست، شیب فایل ها فراخوانی شدند. لایه های اطلاعاتی متفاوت در قالب پرسشنامه زوجی پارامترها با اعمال نظرات ۱۰ نفر از اساتید ژئومورفولوژی به صورت نقشه های معیار طبقه بندی شدند. در نهایت با توجه به اوزان به دست آمده در هر دو روش AHP و ANP، نقشه نهایی اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی بدست آمد. نتایج حاصله نشان داد که در روش AHP، ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم توسعه یافته، ۳۲ درصد در طبقه کم توسعه یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۷ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۲ درصد در طبقه خیلی زیاد قرار گرفت. در روش ANP، ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم توسعه یافته، ۳۳ درصد در طبقه کم توسعه یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۶/۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۱/۴ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد با مقایسه کارایی دو روش با استفاده از اعتبارسنجی با لایه چاه و چشمه، روش ANP از اعتبار نسبتاً بهتری برخوردار است، زیرا بعد از هم پوشانی، با استفاده از روش کمی، تعداد چاه و چشمه بیشتری بر روی مناطق کارست توسعه یافته و خیلی توسعه یافته قرار گرفت.

آبخوان، سازند کارستی،
اکتشاف منابع آب، AHP،
ANP، خراسان جنوبی، شرق
ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

*نویسنده مسئول: محسن رضائی عارفی Rezaei.arefi@cfu.ac.ir
رایانامه: Rezaei.arefi@cfu.ac.ir
شناسه دیجیتال: 10.22034/hyd.2025.69062.1813



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه خشک جهان، از جمله ایران، با بحران آب مواجه هستند. از یک طرف کاهش بارندگی، تبخیر بالا و پراکندگی نامنظم منابع آب سطحی و از طرف دیگر رشد سریع جمعیت و توسعه کشاورزی باعث شده است، بهره برداری از منابع آب زیرزمینی اهمیت فزاینده ای پیدا کند. یکی از مهمترین منابع آب پایدار، آب های موجود در سازندهای کارستی می باشد. نام کارست، از منطقه ای در یوگسلاوی گرفته شده که در آنجا پوشش های سنگی منطقه عمدتاً از سنگ آهک مستعد به حفره زایی و تشکیل غار است. بدین ترتیب واژه کارست مترادف با خوردگی سنگ های کربناته و دولومیتی توسط آب است که بتدریج با گسترش تحقیقات در این زمینه، واژه کارست امروزه در مورد سنگ های سولفات (ژپس و انیدریت)، سنگ های پریدوتیت، ماسه سنگ و کنگلومرا استفاده می شود (ولایتی، ۱۳۹۵: ۵۲). کارست به هرگونه توپوگرافی یا شکل زمینی که بر روی سنگ های قابل حل تشکیل می شود، اشاره دارد. شکل های زمینی کلاسیک کارست، که شامل فرورفتگی های محصور، نه های فرورونده و غارها می شوند، در درجه اول توسط آب های سطحی و زیرسطحی که سنگ ها را حل می کنند، ایجاد می شوند؛ فرسایش مکانیکی نقش ثانویه ای ایفا می کند (زرگا^۱، ۲۰۲۴: ۲۵۸). سازندهای کارستی می توانند حتی در مناطق کم بارش، مخازن پایداری از آب ایجاد کنند که در زمان خشکسالی قابل استفاده هستند. این منابع به دلیل شرایط خاص زمین شناسی نیازمند اکتشاف دقیق و هدفمند هستند. تجربه نشان می دهد که بسیاری از هیدروژئولوژیست ها به اشتباه فرض می کنند که اگر اشکال زمینی کارست در سطح وجود داشته باشند یا آشکار نباشند، سیستم آب های زیرزمینی کارستی نیز وجود ندارد. این فرض می تواند منجر به خطاهای جدی در مدیریت آب های زیرزمینی و ارزیابی اثرات زیست محیطی شود، زیرا گردش آب های زیرزمینی کارست می تواند حتی بدون آشکار بودن کارست سطحی نیز توسعه یابد. آزمایش های تشخیصی برای روشن شدن وضعیت وجود دارد. وضعیت پیش فرض محتاطانه در زمین های کربناته این است که فرض کنیم کارست وجود دارد، مگر اینکه خلاف آن ثابت شود (فورد و ویلیامز^۲، ۲۰۰۷: ۱۴). اشکال کارستی به دلیل ویژگی های منحصر به فردشان، غنی از منابع طبیعی مانند آب با کیفیت بالا هستند (چن^۳ و همکاران، ۲۰۱۷: ۷۷۵). بارزترین نتیجه کارستی شدن، مورفولوژی خاصی است که مناطق کارستی را از دیگر مناطق جدا می کند (عباسیان ولندر و همکاران، ۲۰۱۴: ۷۲). سفره های آب زیرزمینی ویژگی های پیچیده و خاصی دارند که آنها را از سایر سفره های آب بسیار متفاوت می کند بنابراین شناسایی و پتانسیل یابی آنها نیز متفاوت است (باکالوویچ^۴، ۲۰۰۵: ۱۵۱). منابع آب در سازندهای کربناته کارستی شده یکپارچه مهم ترین منابع آب شیرین در جهان به شمار می روند (ندری و علیزاده، ۲۰۱۴: ۴). از آنجا که توزیع مکانی، گسترش سازندهای کارستی و سازندهای سخت در سطح زمین به طور یکسان نیست، جهت بهره برداری درست از این منابع، شناسایی و پتانسیل یابی آنها بسیار حائز اهمیت می باشد. کمبود اطلاعات، محدودیت هزینه و دسترسی به اطلاعات؛ شناسایی منابع آب زیرزمینی در سازندهای کارستی را با مشکل مواجه می کند. با این حال تکنیک هایی وجود دارد که این امکان را میسر می سازد. بررسی عوامل مرتبط با تشکیل منابع آب و استفاده از روش های مختلف وزن دهی با استفاده از سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده ها ابزار مهمی را برای اکتشاف آب های زیرزمینی فراهم می کنند (واعظی و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۷). مطالعات مختلفی در مورد منابع آب کارست در داخل و خارج کشور انجام شده است که به چند مورد از آنها اشاره می شود: در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطق فازی در استان خراسان جنوبی مشخص گردید که ۴۳ حوضه ی آبی استان بر اساس نقشه پتانسیل آب زیرزمینی کلاس بندی شدند و با نتایج به دست آمده از چاه های اکتشافی تطابق داده شدند و نقشه پتانسیل آبی حوضه های استان تهیه گردید. بر این اساس در حدود ۱۷ درصد از مساحت استان دارای کلاس پتانسیل آبی بالا و بسیار بالایی است که منطبق بر رسوبات دوران چهارم و مناطق دارای تراکم شکستگی بالا است، پهنه پتانسیل خیلی کم نیز منطبق بر ارتفاعات، لیتولوژی متراکم و مناطق بیابانی است (حیدری آقا گل و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۱۱). در بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی نتایجی به دست آمد که نشان می دهد در شمال غربی و قسمتی از جنوب شرق منطقه احتمال

1. Zerga
2. Ford and Williams
3. Chen
4. Bakalowicz

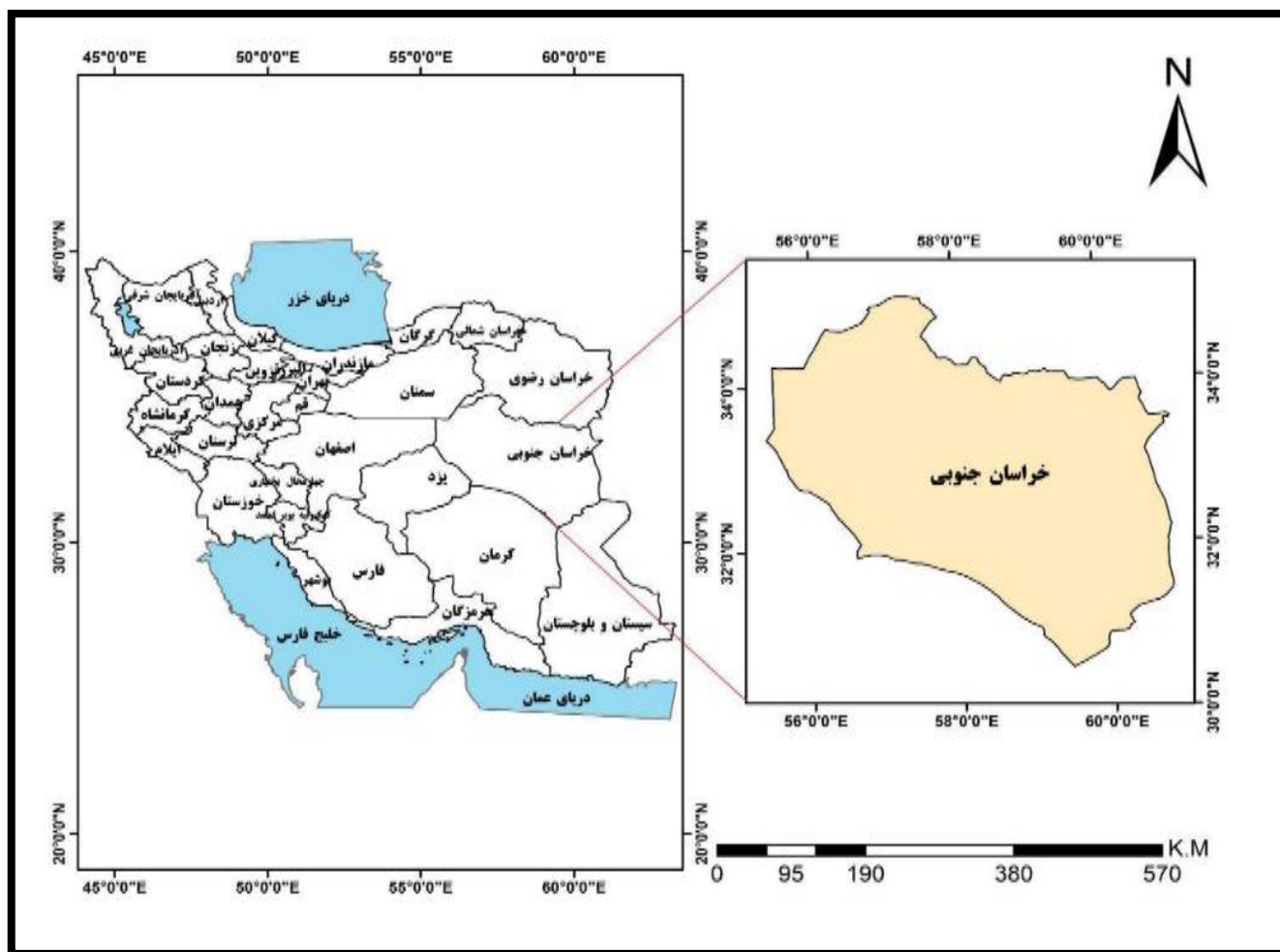
کارست با توجه به نقشه‌ها صددرد است؛ در حالی که مناطق مرکزی کارست کمتری دارند و قسمت‌هایی از حاشیه منطقه در شرق و غرب بدون کارست هستند. به منظور بررسی و تعیین صحت مدل از بعضی نقاط نمونه استفاده و با توجه به نقاط نمونه مشخص شد مدل دقت زیادی برای تعیین مناطق کارستی دارد؛ بنابراین از روش فازی می‌توان به مثابه روشی دقیق برای بررسی پتانسیل کارستی مناطق مختلف استفاده کرد (مکرم و نگهبان، ۱۳۹۸: ۱۲۱). در پی جویی و اکتشاف منابع آب استراتژیک سازند سخت و کارستی، جهت تامین آب شرب شهرستان میانه در شرایط بحرانی با استفاده از روش SUM، AHP و Fuzzy Gamma لایه‌های اطلاعاتی ۹ پارامتر و با به کارگیری نرم افزارهای GIS و ENVI به تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی با منشاء کارستی پرداخته شد. نتیجه پهنه‌بندی مناطق مستعد با بررسی‌های میدانی نشان داد حدود ۸۰ درصد چشمه‌های محدوده مورد مطالعه با مناطق دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد تطابق داشتند (سپهری پور و واعظی، ۱۴۰۰: ۳۳۴). در مقایسه هیدروژئوشیمی و هیدرولوژی سازندهای آسماری و سروک به عنوان مخزن چشمه - ای کارستی بزرگ زاگرس در شمال شرق خورستان از دبی ۸ دهنه چشمه و با به کارگیری پایپر جهت تعیین تیپ، رخساره، نسبت‌های یونی و نمایه‌های اشباع برای شناسایی شدت انحلال سنگ‌های کربناته و زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی استفاده گردید. بر این اساس تیپ‌های غالب آب‌ها بی‌کربنات-کلسیک بوده و برخی چشمه‌های آسماری تغذیه از سازند گچساران موجب تفاوت تیپ گردیده است (فرهادی و همکاران، ۱۴۰۱: ۲۳). ارتباط هیدرولیکی ساختارهای کارستی با روش‌های هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی منابع آب شهرستان ایذه با استفاده از ۳۱ نمونه آب از چشمه‌ها، چاه‌ها و نمونه باران بررسی گردید. نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی نمونه‌ها نشان داد، میزان غلظت یون‌ها تحت تأثیر انحلال سنگ‌های آهکی بوده است (سجادی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۲۱). ارزیابی آسیب‌پذیری و خطرپذیری منابع آب کارستی با تلفیق دو شاخص VESPA و EPIK به بررسی وابستگی مظهر چشمه به عنوان خروجی حوضه آبریز کارستی و حوضه آبریز آن با تلفیق شاخص‌های آسیب‌پذیری انجام گرفت. با استفاده از پارامترهای شوری، دبی و دمای آب چشمه آسیب‌پذیری منابع آب کارستی تعیین گردید. پس از تعیین آسیب‌پذیری، با رتبه‌بندی پارامترهای شیب، سازندهای زمین‌شناسی، عوارض طبیعی و کاربری اراضی، میزان ریسک بهره‌برداری مشخص گردید (کیانی و جوادی، ۱۴۰۱: ۱۸۴). در پژوهشی به ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری مناطق توسعه‌یافته و مستعد آلودگی کارستیک حوضه آبریز روانسر اقدام نمودند. در این پژوهش با استفاده از هفت معیار شامل؛ گسل، ارتفاع، بارش، جهت شیب، درجه شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی و با استفاده از روش OWA و ANP به پهنه‌بندی حوضه مورد مطالعه پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از حوضه مورد مطالعه بخصوص در مناطق شمالی و غربی در کلاس توسعه‌یافتگی کارست، در حد زیاد و نسبتاً زیاد قرار دارد (حجازی و حیدری، ۱۴۰۲: ۲۷). در پیش‌بینی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه در مواقع خشکسالی با استفاده از هندسه فرکتالی وضعیت ۵۹ چشمه کارستی استان به لحاظ زمین‌شناسی، تکتونیک، بارش، آبدی، رفتار هیدرولیکی چشمه‌ها، گنجایش مخزن و زمان خشکسالی چشمه‌ها و عکس‌العمل آنها نسبت به تغییرات بارش به وسیله هندسه فرکتال بررسی گردید (کولانی و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۵۶). در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در واحدهای سازند سخت و کارستی استان آذربایجان غربی از ۹ پارامتر لیتولوژی، تراکم شکستگی، آبراهه، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، ارتفاع با فاکتور، بارش، ارتفاع با سطح گستردگی بارش و شاخص رطوبت به عنوان عوامل موثر در نفوذ آب و تشکیل آبخوان در نظر گرفته شد. آنها همچنین از روش‌های منطق فازی، UM و Weighted Overlay جهت تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منطقه استفاده کردند. بر این اساس ۲۵ درصد از مساحت استان دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد برای تشکیل آبخوان‌های کارستی می‌باشد (واعظی هیر و همکاران، ۱۴۰۳: ۳۳۹) ارزیابی تخریب چشم‌اندازهای کارست در جنوب ایتالیا انجام گرفت. فرایند تکامل چشم‌انداز کارست در یک دوره ۵۰ ساله (۱۹۵۴-۲۰۰۶) با استفاده از تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژیکی و تصاویر چند زمانه بررسی گردید. تغییرات عمده صورت گرفته شامل تغییر پوشش زمین و محو شدن اشکال کارستی در طول زمان بوده است. این تخریب بیشتر در اثر دخالت انسان با تغییر پوشش زمین از مراتع به کشت محصولات دائمی صورت گرفت (پیسانو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۴۸). تحقیقی با عنوان توپوگرافی کارست؛ با یک بررسی سیستماتیک به تشکیل، فرآیندها، ویژگی‌ها، لندهرم‌ها، تخریب و بازسازی تشکیلات کارست پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، عوامل محیطی موثر بر کارست‌زایی عمدتاً خلوص، بافت، ضخامت بستر بوده است. شکل‌گیری کارست محدودیت مکانی ندارد زیرا در هر مکانی که امکان رسوب کربنات کلسیم باشد از

جمله در کوه‌های مرتفع تا بستر دریا‌های عمیق و بیابان‌ها؛ امکان شکل‌گیری دارد (زرگا^۱، ۲۰۲۴: ۲۵۲). تاثیر گردش جهانی جو از طریق بارندگی بر تغییرات جریان رودخانه در حوضه کارست (مطالعه موردی: حوضه کارستی یجی^۲ در چین) انجام گرفت. تغییرات اقلیمی جهانی تأثیر عمیقی بر سیستم‌های گردش جوی داشته است، مکانیسم‌های خاصی که گردش جوی از طریق آنها تغییرپذیری بارندگی را تنظیم می‌کند و متعاقباً بر جریان رودخانه تأثیر می‌گذارد. یافته‌ها نشان می‌دهد همبستگی قوی بین تغییرات اقلیمی در مناطق کارستی و انقباض گرداب قطبی آسیا و جابجایی آن به سمت شمال وجود دارد (یو^۳ و همکاران، ۲۰۲۵: ۳۹). در روند روبه رشد استان خراسان جنوبی در سال‌های اخیر از یک‌سو و قرار داشتن این استان در منطقه خشک و نیمه خشک از سوی دیگر، اتخاذ راهبردهای مدیریت صحیح منابع آب در این منطقه را بیش از پیش ضروری می‌سازد. یکی از راهکارهای مدیریتی منابع آب، شناسایی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف و بهره‌برداری از آنها با توجه به ظرفیت‌شان می‌باشد. با توجه به بحران آب در مناطق خشک و نیمه خشک و به خصوص استان خراسان جنوبی که از نظر آب شرب در وضعیت نامناسبی از نظر کیفیت منابع آب قرار دارد، بنابراین اکتشاف منابع آب کارست که در قالب منابع آب جایگزین مطرح می‌شود می‌تواند راه حلی مناسبی جهت جلوگیری از ایجاد تنش آبی و حتی بحران آب در آینده نزدیک این استان باشد. هدف از پژوهش حاضر مقایسه کارآیی روشهای AHP و ANP در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی می‌باشد. بنابراین جنبه نوآوری و کاربردی و اثرگذاری این پژوهش که می‌تواند مورد استفاده مدیران سازمان آب منطقه ای استان خراسان جنوبی قرار گیرد عدم انجام پژوهش در ارتباط با موضوع اکتشاف منابع آب کارست در این استان می‌باشد. استانی که به شدت درگیر بحران آب و منابع آب جایگزین می‌باشد و به احتمال زیاد در آینده نزدیک دچار تنش آبی گردد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی، شرقی‌ترین استان ایران بین ۵۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این استان با مساحت ۱۵۱۱۹۳ کیلومتر مربع، ۹/۹ درصد از مساحت ایران را شامل می‌شود که از نظر وسعت، سومین استان ایران است. در سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت آن برابر با ۷۶۸۸۹۸ نفر بوده است که از نظر جمعیت، بیست و هشتمین استان کشور است که تراکم جمعیت در آن ۱/۵ نفر در هر کیلومتر مربع می‌باشد. این استان از سمت شرق با کشور افغانستان، ۴۳۰ کیلومتر مرز مشترک دارد. استان خراسان جنوبی بر اساس موقعیت زمین‌شناسی در بخش لوت شمالی قرار دارد. بلوک لوت، با درازایی حدود ۳۴۴ کیلومتر، خاورترین بخش خرده قاره ایران مرکزی است که از نظر فعالیتهای زمین‌شناسی به سه بخش لوت شمالی، لوت میانی و لوت جنوبی تقسیم می‌شود. مرز خاوری آن با گسل نهبندان و حوضه فلیشی خاور ایران و مرز باختری آن با گسل نایبند و بلوک طبس مشخص می‌شود. عمده لیتولوژی استان از واحدهای کواترنری، ائوسن، آهکهای کرتاسه و شیل و ماسه سنگهای ژوراسیک تشکیل شده است (حیدری آقا گل و همکاران، ۱۳۹۶). حداقل ارتفاع استان ۵۱۴ متر در جنوب و غرب استان و حداکثر ارتفاع ۲۹۶۴ در شرق استان می‌باشد. حداقل دما ۱۱ درجه در شمال شرق و حداکثر دما ۲۲ در جنوب و غرب استان می‌باشد. حداقل بارش ۴۹ میلیمتر در غرب و شمال غرب استان و حداکثر بارش ۳۰۴ میلیمتر در شرق و شمال شرق استان می‌باشد. بیشتر مراتع و جنگلهای دست کاشت استان در شرق قرار دارد و جنوب و غرب زمینهای بایر، نمکزار و کویر می‌باشد.

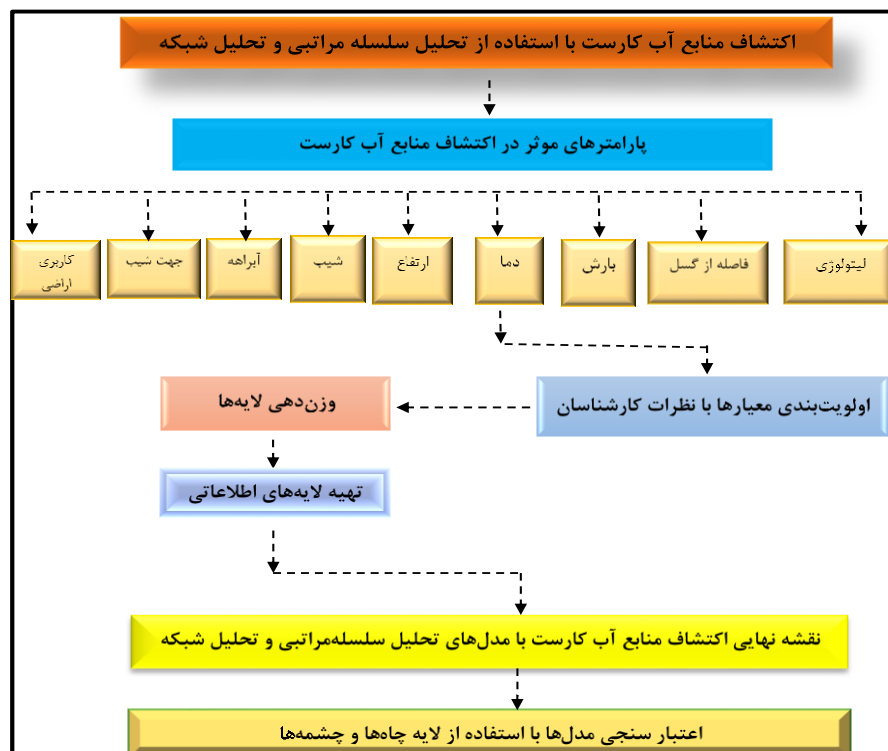


شکل (۱): موقعیت جغرافیایی استان خراسان جنوبی
Figure (1): Geographical location of South Khorasan Province

روش تحقیق

این پژوهش با استفاده از روش‌های میدانی، کتابخانه‌ای و اسنادی صورت گرفت. در ابتدا با استفاده از DEM ۱۲/۵ متر از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) محدوده مورد مطالعه طبق شیپ فایل محدوده استان خراسان جنوبی مرزبندی و مشخص گردید. با استخراج DEM محدوده، تمام نقشه‌های پایه تهیه گردید. با استفاده از نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی ۱:۱۰۰۰۰۰ اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی، نقشه‌های لیتولوژی و کاربری اراضی تولید شدند. با استفاده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان جنوبی و با کمک نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های هم بارش و هم‌دما تهیه گردید. جهت مقایسه زوجی پارامترهای مهم و تاثیرگذار در اکتشاف منابع آب کارست از دو روش AHP و ANP استفاده شد. در این پژوهش، با توجه به نقش عوامل مختلف در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی و نیز با عنایت به مطالعه زیاد مقالات مرتبط و میزان اثرگذاری پارامترهای پرتکرار در مقالات، ۹ لایه انتخاب شدند. با استفاده از روش AHP، لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، بارش، دما و کاربری اراضی به عنوان نقشه‌های عامل انتخاب شدند. لایه‌های اطلاعاتی متفاوت در قالب پرسشنامه زوجی پارامترها با اعمال نظرات ۱۰ نفر از اساتید ژئومورفولوژی انتخاب و طبق نظرات متخصصان در پرسشنامه بررسی و مقایسه زوجی پارامترها صورت گرفت و اولویت بندی و وزنها و نمودارها با استفاده از نرم افزار Expert choice استخراج گردید. طبق نظرات متخصصان و نتایج به دست آمده مشخص گردید که پارامتر لیتولوژی مهمترین عامل تاثیرگذار در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی می باشد و پارامتر کاربری اراضی کمترین پارامتر تاثیرگذار می باشد. در روش ANP پرسشنامه در محیط نرم

افزار Super decision منتقل گردید و وزنهای و اولویت بندی پارامترها انجام گرفت و مشخص گردید که لایه لیتولوژی مهمترین و لایه بارش کمترین اثر را در اکتشاف منابع آب کارست دارند. در مرحله بعد، با استفاده از نرم افزار Arc GIS تمام ۹ لایه اطلاعاتی در قالب شیپ فایلها به صورت رستری طبقه بندی شدند و با توجه به امتیازات داده شده در هر پارامتر از طیف خیلی توسعه یافته تا توسعه خیلی کم به صورت نقشه های کمی و کیفی تولید شدند. سپس، جهت تولید نقشه های نهایی با استفاده از دستور Raster calculator و وزنهای به دست آمده در دو روش تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل شبکه در لایه مورد نظر ضرب گردید و سپس تمام لایه ها با هم جمع شدند و نقشه خروجی نهایی در هر دو روش به دست آمد. در مرحله آخر جهت صحت سنجی با هم پوشانی لایه چاه و چشمه استان خراسان جنوبی با لایه های اکتشاف منابع آب کارست کارها به اتمام رسید (شکل ۲).



شکل (۲): فلوچارت مراحل انجام تحقیق

Figure (2): Flowchart of research steps

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از پرکاربردترین روش های تصمیم گیری چند معیاره است که توسط توماس ال ساعتی در دهه ۸۰ ارائه شد. این روش به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا در شرایطی که معیارهای مختلف (کمی و کیفی) در انتخاب گزینه ها دخیل هستند، بتوانند تصمیمی منطقی و ساختاریافته اتخاذ کنند. در AHP مسئله تصمیم گیری ابتدا به صورت یک ساختار سلسله مراتبی تعریف می شود که شامل سه سطح اصلی؛ هدف کلی، معیارها و زیرمعیارها (گزینه ها) (آلترناتیوها) می باشد.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی به طور خلاصه شامل مراحل زیر است:

الف. تشکیل سلسله مراتب: تعریف، هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه ها

ب. مقایسه زوجی: هر یک از عناصر در سلسله مراتب، به صورت دوبه دو نسبت به یکدیگر مقایسه می شوند و اهمیت نسبی آنها با استفاده از مقیاس ۹ درجه ای ساعتی تعیین می گردد (جدول ۱).

ج. محاسبه وزن ها: نتایج مقایسه زوجی به صورت ماتریسی تنظیم شده و با استفاده از روش های ریاضی، وزن نسبی معیارها و گزینه ها استخراج می شود.

د. بررسی سازگاری: نرخ ناسازگاری محاسبات بررسی می شود تا اطمینان حاصل شود که قضاوت ها منطقی و قابل اتکا هستند (نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ قابل قبول است).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

در این رابطه CR نرخ سازگاری، CI شاخص ثبات است RI شاخص سازگاری تصادفی است. شاخص سازگاری، معیاری است برای سنجش سازگاری که می توان با استفاده از رابطه (۲) تخمین زد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

ه. ترکیب وزن ها و انتخاب بهترین وزن: در نهایت، وزن معیارها و گزینه ها ترکیب شده و گزینه ای با بیشترین وزن به عنوان بهترین انتخاب معرفی می شود. AHP یک چارچوب غیر خطی برای انجام تفکر قیاسی و استقرایی بدون استفاده از قیاس است. این امر با در نظر گرفتن چندین عامل به طور همزمان و امکان وابستگی و بازخورد فراهم می شود و مبادلات عددی برای رسیدن به یک ترکیب یا نتیجه گیری امکان پذیر می شود (ساعتی و وارگاس^۱، ۲۰۰۶).

جدول (۱): مقایسات زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به روش (ساعتی، ۱۹۸۰)

Table (1): Paired comparisons in the analytic hierarchy process (Saaty, 1980)

مقیاس	قضاوت
۱	برابر
۲	بین برابر تا متوسط
۳	متوسط
۴	بین متوسط تا زیاد
۵	زیاد
۶	بین زیاد تا خیلی زیاد
۷	خیلی زیاد
۸	بین خیلی زیاد تا فوق العاده زیاد
۹	فوق العاده زیاد

روش تحلیل شبکه (ANP)

روش تحلیل شبکه (ANP) گسترش یافته ی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است که توسط توماس ال ساعتی معرفی شد. در حالی که AHP بر پایه یک ساختار سلسله مراتبی خطی (هدف - معیارها - گزینه ها) استوار است، روش ANP امکان مدل سازی و روابط متقابل و وابستگی درونی میان معیارها و گزینه ها را فراهم می سازد. به عبارت دیگر اگر در یک مسئله تصمیم گیری معیارها مستقل از هم نباشند یا گزینه ها بر یکدیگر اثر بگذارند، استفاده از ANP ضروری است. مراحل اصلی روش تحلیل شبکه ای به شرح زیر است:

الف. مدل سازی مسئله به صورت شبکه: شناسایی خوشه ها؛ شامل معیارها، زیرمعیارها و گزینه ها، و ترسیم روابط متقابل میان آنها.
 ب. مقایسه زوجی: مشابه AHP، اما این بار مقایسه ها هم در درون یک خوشه و هم بین خوشه ها انجام می شود تا شدت اثر هر عنصر بر عنصر دیگر مشخص شود.
 ج. تشکیل ابرماتریس: نتایج مقایسه های زوجی در قالب یک ماتریس بزرگ که ارتباط تمام عناصر شبکه را نشان می دهد، تنظیم می گردد.

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

د. وزن دهی و نرمال سازی ابرماتریس: ابرماتریس اولیه به ابرماتریس وزنی سپس به ابرماتریس حد تبدیل می شود تا نشان دهنده وزن نهایی هر عنصر است.

نتیجه W^∞ نشان دهنده وزن نهایی هر گزینه در شبکه است.

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (4)$$

ه. انتخاب گزینه برتر: در نهایت، وزن نهایی گزینه ها محاسبه و بهترین گزینه بر اساس بالاترین وزن انتخاب می شود. این تکنیک، فرآیند روش تصمیم گیری تحلیل شبکه ای ANP را به عنوان یک ابزار تصمیم گیری چند معیاره به وسیله جایگزینی شبکه به جای سلسله مراتب بهبود می بخشد (داس و چاکرابورتی، ۲۰۱۱). در این پژوهش برای انجام تحلیل های روش ANP از نرم افزار Super Decisions طراحی شده توسط ساعتی و همکاران (۲۰۰۶) استفاده گردید. بعد از محاسبه وزن هر شاخص لایه مربوطه تهیه و با تلفیق لایه ها نقشه نهایی اکتشاف منابع آب کارست برای تمام حوضه ها تهیه گردید.

یافته های تحقیق

نتایج روش AHP

در ابتدا پرسشنامه مقایسه زوجی پارامترهای موثر بر اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی در اختیار ۱۰ نفر از متخصصان ژئومورفولوژی کارست قرار گرفت. بعد از انجام مرحله مقایسه زوجی پارامترها با یکدیگر، وزن های مربوطه وارد نرم افزار (Expert Choice) شد و وزن هر یک از معیارها مشخص گردید (جدول ۲) و (جدول ۳). نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی موثر در اکتشاف منابع آب کارست طبق روش تحلیل سلسله مراتبی در نرم افزار مذکور با مقدار شاخص ناسازگاری ۰/۰۸ محاسبه گردید (نمودار ۱). بعد از تعیین وزن هر معیار با استفاده از نرم افزار ArcGis10.8 با استفاده از دستور Raster calculator وزن هر معیار در لایه مربوطه ضرب گردید و لایه های مربوط به هر معیار با یکدیگر ادغام گردید و نقشه اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی بر اساس روش AHP تهیه گردید.

جدول (۲): پرسشنامه وزن دهی عوامل موثر بر اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی

Table (2): Questionnaire on weighing factors affecting the exploration of karst water resources in South Khorasan Province

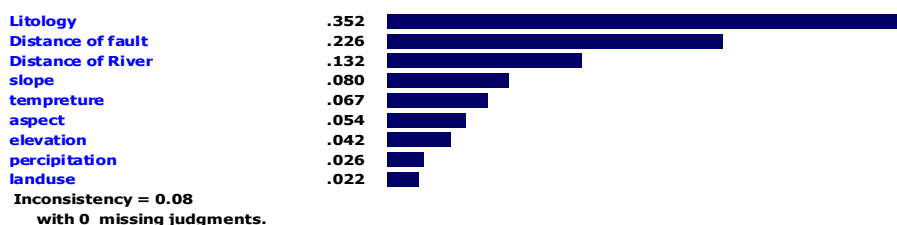
ردیف	نام	لیتولوژی	فاصله از گسل	فاصله از آبراهه	شیب	جهت شیب	ارتفاع	بارش	دما	کاربری اراضی
۱	لیتولوژی	۱	۳	۵	۶	۹	۷	۵	۵	۹
۲	فاصله از گسل		۱	۳	۴	۷	۴	۵	۶	۸
۳	فاصله از آبراهه			۱	۲	۶	۴	۳	۴	۶
۴	شیب				۱	۴	۵	۱/۲	۱	۶
۵	بارندگی					۱	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۲
۶	ارتفاع						۱	۱/۲	۱/۳	۴
۷	دما							۱	۴	۵
۸	جهت شیب								۱	۴
۹	کاربری اراضی									۱

جدول (۳): وزن لایه های اطلاعاتی به روش AHP و اعمال نظر کارشناسی

Table (3): Weighting of information layers using the AHP method and applying expert

نام لایه	وزن نهایی
لیتولوژی	.۳۵
فاصله از گسل	.۲۲
فاصله از رودخانه	.۱۳
دما	.۸۰
شیب	.۶۷
جهت شیب	.۵۴
ارتفاع	.۴۲
بارندگی	.۲۶
کاربری اراضی	.۲۲
جمع	۱

Priorities with respect to:
Explore of karst water resources



شکل (۳): ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی موثر در پتانسیل یابی منابع آب کارست طبق فرایند تحلیل سلسله مراتبی

Figure (3): Coefficients resulting from pairwise comparison of the main criteria effective in determining the potential of karst water resources according to the analytic hierarchy process.

نتایج روش ANP

در روش ANP جهت مقایسه پارامترها به صورت شبکه ای در نرم افزار Super Decision ابتدا سلولی تحت عنوان اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی ایجاد شد. در مرحله بعد، خوشه ها که همان پارامترهای زمین شناسی، هیدرواقليم، توپوگرافی و کاربری اراضی می باشند را تولید نمودیم و سپس در داخل خوشه ها پارامترهای لیتولوژی و گسل (زمین شناسی)، بارندگی، دما و فاصله از رودخانه (هیدرولوژی)، ارتفاع، شیب و جهت شیب (توپوگرافی) و نهایتاً کاربری اراضی به هر یک قرارداد شد. سپس با استفاده از دستور pairwise comparison در قالب شبکه ای با Make node connection، خوشه ها و معیارها فعال گردیدند و سپس با استفاده از دستور priority در هر یک از معیارها به صورت نرمال شده محاسبه گردید که در جدول شماره ۴ آورده شده است. طبق محاسبات صورت گرفته، معیار لیتولوژی با وزن ۰/۲۰ با اهمیت ترین و معیار بارش با وزن ۰/۴۴ کم اهمیت ترین معیار شناخته شد.

جدول (۴): وزن لایه های اطلاعاتی به روش ANP و اعمال نظر کارشناسی در منطقه مورد مطالعه

Table (4): Weighting of information layers using the ANP method and applying expert opinion in the study area

نام لایه	وزن نهایی	نام خوشه ها	وزن خوشه ها
لیتولوژی	۰/۲۰	زمین شناسی	۰/۳۹
فاصله از گسل	۰/۱۹		
فاصله از رودخانه	۰/۱۲	هیدرواقليم	۰/۲۷
بارش	۰/۴۴		
دما	۰/۱۰		
ارتفاع	۰/۱۰	توپوگرافی	۰/۲۲
شیب	۰/۷۷		
جهت شیب	۰/۴۸		
کاربری اراضی		کاربری اراضی	۰/۱۳
جمع	۱		۱

عوامل موثر در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی

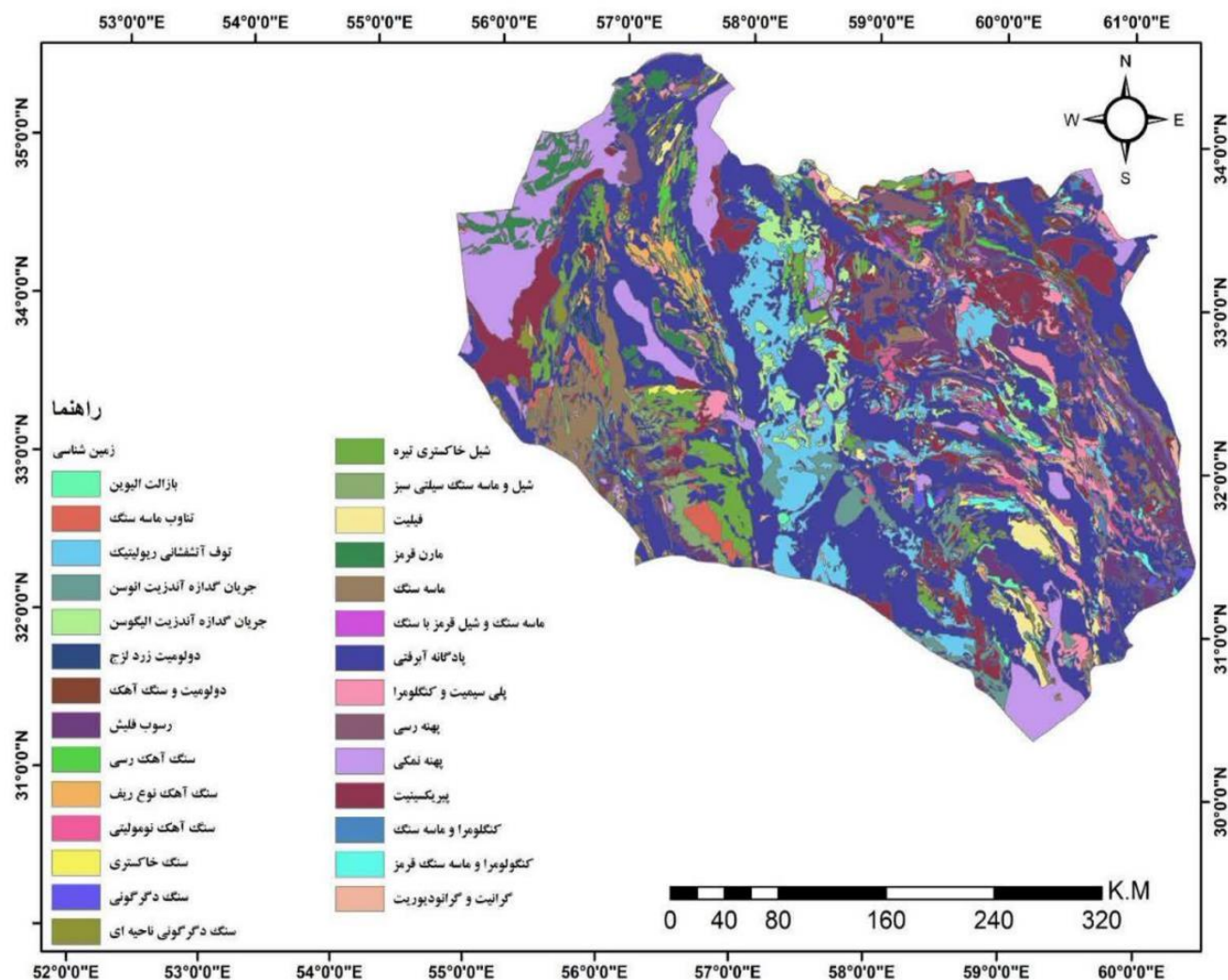
لیتولوژی

لیتولوژی (سنگ شناسی) نقش اساسی در تشکیل آب های کارستی دارد. نوع سنگ، ساختار و ویژگی های فیزیکی آن، به ویژه انحلال پذیری و نفوذپذیری، تعیین کننده میزان و نوع توسعه ی فرآیندهای کارستی و در نتیجه، شکل گیری آب های کارستی است. مشخصات سنگ-شناسی نقش تعیین کننده ای در مقدار تغذیه، قابلیت ذخیره آب و توسعه کارست دارد (ضیاء و همکاران، ۱۳۹۸). واحدهای زمین شناسی استان با توجه به خواص هیدرولیکی، مورد ارزیابی و طبقه بندی قرار گرفتند. بنابراین به سازندهای آهکی بالاترین امتیاز و به سازندهای غیر آهکی با توجه به جنس و خواص هیدرولیکی امتیازات کمتری داده شد (واعظی هیر و همکاران، ۱۴۰۳). عامل زمین شناسی به صورت نمایه لیتولوژی در اکتشاف منابع آب کارست اعمال شده است. به دلیل تأثیرگذاری زیاد نوع سازند بر نفوذ آب و قابلیت متفاوت حفظ آب در سازندهای مختلف و همچنین امکان حفاری، این نمایه انتخاب گردید (دشتی برمکی و همکاران، ۱۳۹۴). ویژگیهای متفاوتی مانند میزان رخنمون، ضخامت و خصوصیات لیتولوژیکی سنگ های کارستی و ارتباط با لیتولوژی های دیگر در مقیاس ناحیه ای، کنترل کننده های زمین شناسی توسعه ی کارست را تشکیل می دهند (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). از نظر توسعه کارست، هر چه سازندهای زمین شناسی کارستی خلوص بالاتری داشته باشند شرایط توسعه کارست فراهم تر می باشد (زنگنه تبار و محمدخان، ۱۴۰۳). استان خراسان

جنوبی بر اساس موقعیت زمین‌شناسی در بخش لوت شمالی قرار دارد. بلوک لوت، با طول حدود ۳۴۴ کیلومتر، شرقی‌ترین بخش خرده قاره ایران مرکزی است که از نظر فعالیت‌های زمین‌شناسی به سه بخش لوت شمالی، لوت میانی و لوت جنوبی تقسیم می‌شود. مرز شرقی آن با گسل نه‌بندان و حوضه فلیشی شرق ایران و مرز غربی آن با گسل نایبند و بلوک طبس مشخص می‌شود (آقانبانی، ۱۳۸۱). عمده لیتولوژی منطقه مورد مطالعه از واحدهای کواترنری، ائوسن، آهک‌های کرتاسه و شیل و ماسه سنگ‌های ژوراسیک تشکیل شده است (شکل ۱). بیشترین مساحت لیتولوژی استان طبق جدول شماره ۱ و نقشه زمین‌شناسی، پادگانه‌های آبرفتی می‌باشد که حدود ۳۹ درصد را شامل شده‌اند و بعد از آن پیروکسینیت با ۹ درصد و سپس پهنه نمکی با ۸.۵ و ریولیت‌ها با ۸ درصد بیشترین مساحت لیتولوژی استان را دربرگرفته‌اند. جهت طبقه‌بندی و اولویت‌بندی لایه لیتولوژی، بیشترین امتیاز به سنگ‌های آهکی و دولومیتی (۵) و کمترین امتیاز به سنگ‌های آذرین (۱) داده شد و به همین صورت طبقه‌بندی سایر واحدهای سنگی صورت گرفت.

جدول (۵): مساحت واحدهای لیتولوژی به درصد و کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی
Table (5): Area of rock units in percent and square kilometers in South Khorasan Province

نام واحد لیتولوژی	مساحت به درصد	مساحت به کیلومتر مربع
پهنه نمکی	۸/۵۵	۱۲۷۵۵/۲
پادگانه آبرفتی	۳۸/۴	۵۷۳۶۶/۶
مارن قرمز	۲/۲	۳۲۸۸/۵
فیلیت	۱/۵	۲۲۹۶/۵
شیل خاکستری تیره	۳/۶۲	۵۳۹۹/۱
شیل خاکستری	۰/۲۶	۳۹۷/۸
سنگ دگرگونی	۰/۷۴	۱۱۰۷/۶
پلی‌سیمیت و کنگلومر	۴/۲	۶۲۹۵/۸
دولومیت و سنگ آهک	۱	۱۴۹۹/۰۱
کنگلومرا و ماسه سنگ	۰/۳۹	۱۱۱۱/۶
سنگ آهک نوع ریف	۱/۱	۱۶۷۲/۱
سنگ دگرگونی ناحیه ای	۰/۴۲	۶۳۵/۱
سنگ آهک نومولیتی	۰/۷۵	۱۱۲۱/۸
گرانیت و گرانودیوریت پیش از کامبرین	۰/۰۴۳	۱۶۶۴/۵
سنگ آهک رسی	۰/۷۲	۱۰۴۸/۵
پهنه رسی	۱/۳	۲۰۵۳/۳
ماسه سنگ	۳/۲	۴۸۵۰/۱
شیل و ماسه سنگ سیلتی سبز کمرنگ	۱/۳	۲۰۰۵/۶
توف آتشفشانی ریولیتیک تا ریوداسیتیک	۷/۰۱	۱۰۴۶۰/۸
جریان گدازه آندزیت الیگوسن	۲/۳	۳۵۶۸/۳
دولومیت زرد لزج	۰/۷۵	۱۱۲۳/۵
تناوب ماسه‌سنگ	۰/۹۷	۱۴۵۰/۴
کنگلومرای قرمز و ماسه سنگ	۰/۵۱	۱۴۷۶/۳
رسوب فلیش	۴/۶	۶۹۷۸/۰۴
ماسه سنگ و شیل قرمز با سنگ آهک فرعی	۰/۵۶	۸۴۴/۰۰۸
بازالت الیوین	۰/۱۹	۵۳۳/۸
پیروکسینیت	۸/۹	۱۳۴۱۶/۸
جریان گدازه آندزیت ائوسن و الیگوسن	۱/۷	۲۶۲۲/۸

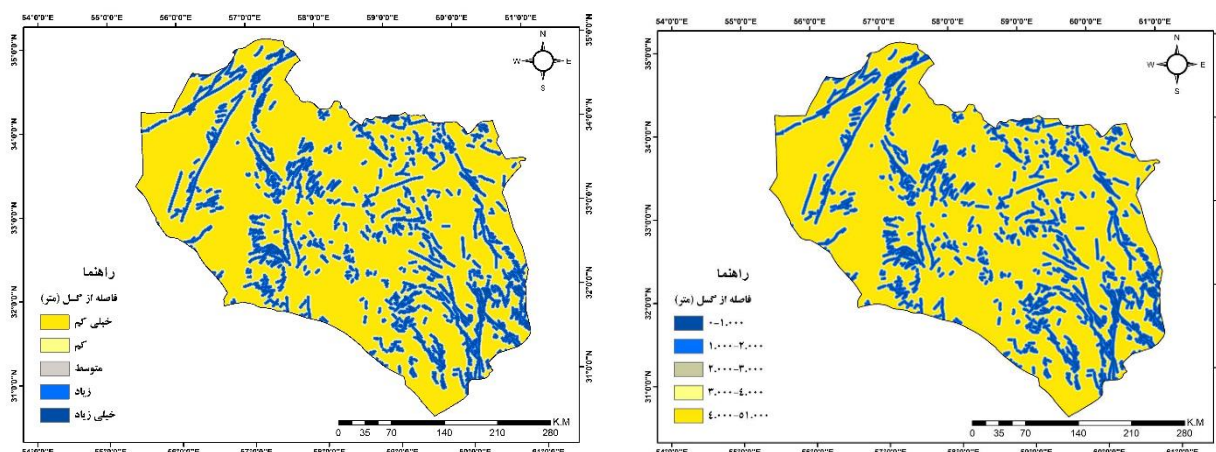


شکل (۴): نقشه لیتولوژی استان خراسان جنوبی
Figure (4): Geological map of South Khorasan Province

فاصله از گسل

گسل‌ها که معمولاً با شکستگی‌ها و ترک‌های زیاد همراه هستند، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر تشکیل و توزیع آب‌های کارستی داشته باشند. گسل‌ها به عنوان مسیرهای نفوذپذیری برای آب عمل می‌کنند و می‌توانند جریان آب زیرزمینی را هدایت و توزیع کنند. این امر می‌تواند به تشکیل چشمه‌های کارستی، غارها و همچنین بر تخلیه و زهکشی اثرگذار باشد. درز و شکاف‌ها مهمترین عوامل مهم در نفوذ آب به داخل سنگ‌های کربناته محسوب می‌شوند (ویسی و همکاران، ۱۴۰۱). وجود ویژگی‌های تکتونیکی، مانند گسل‌ها، عامل مهمی در توسعه مناطق کارستی است. این ساختارهای زمین‌شناسی با تشکیل شکستگی‌ها، تخلخل ثانویه ایجاد می‌کنند و در نتیجه، سازندهای زمین‌شناسی را در معرض فرآیندهای فرسایشی قرار می‌دهند (کیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). بر اثر عملکرد فرآیندهای تکتونیکی، درزو شکاف‌ها در جهت‌های عمودی، افقی و مایل در توده‌های سنگی ایجاد و توسعه پیدا می‌کنند. پارامتر فاصله از گسل رابطه معکوس با توسعه کارست دارد. چون در این مناطق به علت تکتونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر بوده و در نتیجه میزان کارست‌زایی افزایش می‌یابد (زنگنه‌تبار و محمدخان، ۱۴۰۳). بنابراین عامل حریم گسل به عنوان پارامتر مثبتی جهت اکتشاف منابع آب

کارست مد نظر قرار می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه در یکی از نواحی نسبتاً فعال تکتونیکی شرق کشور قرار گرفته که به تبع آن گسل‌هایی با امتداد تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی به وجود آمده‌اند. به همین ترتیب، سیستم‌های درزه‌ای متعددی در سازندهای سنگی کربناته در این منطقه در نتیجه حرکات شدید تکتونیکی و کوهزایی ایجاد شده است و این سیستم‌ها در نفوذ مقدار قابل توجهی از بارندگی به لایه‌های عمیق‌تر مؤثر هستند. در وزن دهی به لایه گسل، فرض اصلی بر این است که میزان توسعه‌یافتگی کارست در مناطق نزدیک به گسل بیشتر است و وزن بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد و مناطق دور از خطوط گسل وزن کمتری را به خود اختصاص داده است (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). فاصله از گسل در پنج طبقه برای محدوده مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۵) که تا حریم ۱۰۰۰ متری که پتانسیل بالاتری جهت اکتشاف منابع آب کارست دارد بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و حدود ۱۲ درصد از مساحت استان را شامل گردید و حریم بیشتر از ۴۰۰۰ متر کمترین وزن را شامل شد و ۶۰ درصد از مساحت را به خود اختصاص داد.

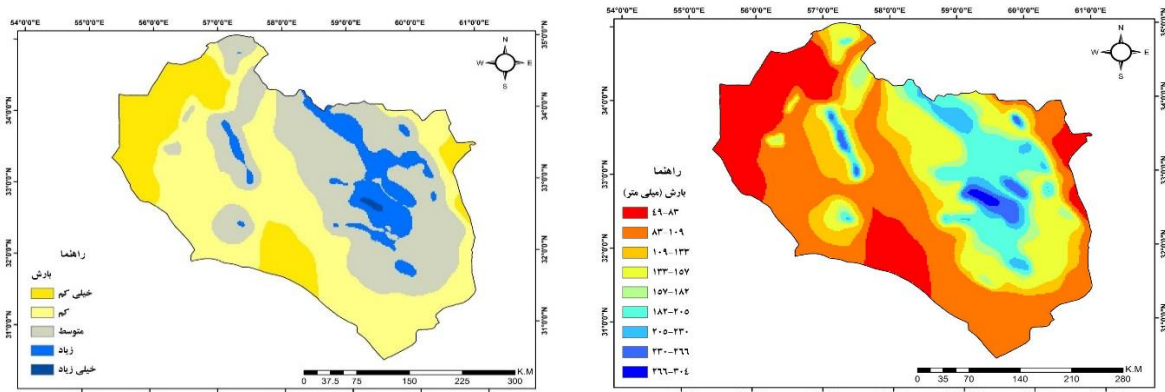


شکل (۵): نقشه استاندارد شده گسل‌های استان خراسان جنوبی. سمت چپ- کیفی و سمت راست- کمی

Figure (5): Standardized map of faults in South Khorasan Province. Left side - qualitative and right side - quantitative.

بارش

بارندگی تأثیر قابل توجهی بر تشکیل و توسعه فرآیندهای کارستی دارند. بارندگی، به عنوان منبع اصلی آب‌های زیرزمینی، نقش مهمی در انحلال سنگ‌های کربناتی، ایجاد اشکال کارستی و تغذیه آبخوان‌ها ایفا می‌کند. تغییرات فصلی در بارش و نوع سنگ نیز بر سرعت و میزان این فرآیندها تأثیر می‌گذارد. دلیل انتخاب پارامتر بارش تأثیرگذاری آن در حجم آب نفوذی به داخل زمین است. مناطقی که بارندگی بیشتری داشته باشند آب بیشتری برای نفوذ در اختیار خواهند داشت (زنگنه تبار و قدیمی، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، شرط اولیه برای نفوذ بارندگی به هر سازند سنگی، وجود سیستم ترک است که حرکات و فشارهای ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی و کوهزایی زمینه را برای آن فراهم می‌کند (زارعی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به اینکه حجم بارش در توسعه کارست و پتانسیل آب‌های کارستی نقش مهمی ایفا می‌کند، اقدام به تهیه لایه اطلاعاتی بارش گردید. هرچه بارندگی بیشتر باشد شرایط برای توسعه کارست مستعدتر می‌باشد (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). به عبارتی بارندگی بالای ۳۰۰ میلی‌متر شرایط مساعدی را برای توسعه کارست در یک منطقه فراهم می‌کند. در منطقه مورد مطالعه لایه بارندگی به ۵ طبقه تقسیم شده است. جهت وزن دهی بالاترین امتیاز به بارندگی بین ۳۰۰-۲۵۰ میلیمتر و کمترین امتیاز به مناطقی با بارش ۱۵۰-۱۰۰ میلیمتر اختصاص داده شد. کمترین مساحت بارشی از ۴۹ تا ۸۳ میلیمتر با ۱ درصد و بیشترین مساحت بارشی از ۱۰۹ تا ۱۳۳ میلیمتری ۳۳ درصد را شامل گردید. (شکل ۶).

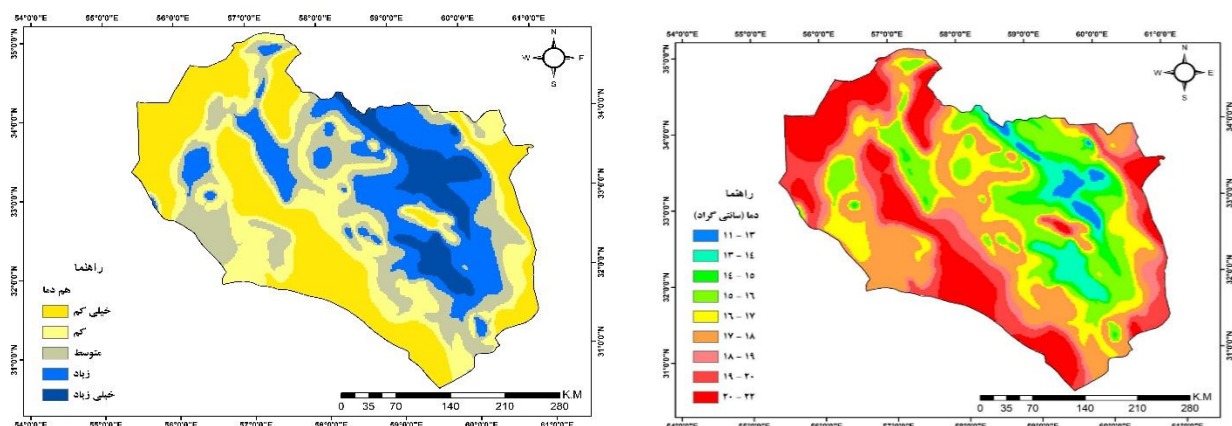


شکل (۶): نقشه استاندارد شده هم‌بارش استان. سمت چپ-کیفی و سمت راست-کمی

Figure (6): Standardized map of the province's rainfall. Left side - qualitative and right side - quantitative.

دما

دما یکی از عوامل مهم در تشکیل آب‌های کارستی است. تغییرات دما می‌تواند بر فرآیندهای انحلال سنگ‌های کربناتی و در نتیجه شکل‌گیری عوارض کارستی تأثیر بگذارد. آب‌های زیرزمینی معمولاً حاوی مقادیری از دی‌اکسید کربن هستند که با سنگ‌های کربناتی مانند سنگ آهک واکنش داده و آنها را حل می‌کنند. دمای پایین‌تر باعث افزایش حلالیت CO_2 در آب می‌شود، به این معنی که آب سردتر می‌تواند مقدار بیشتری CO_2 را در خود حل کند و در نتیجه، فرایند انحلال سنگ‌های کربناتی را تسریع کند. کارستی فیکاسیون متأثر از عوامل مختلفی است؛ در شرایط مساوی، محیطی با دمای پایین‌تر شرایط مناسب‌تری برای انحلال خواهد داشت. دمای بالاتر از صفر درجه در صورت وجود آب و سنگ‌های کربناته تسریع کننده عمل انحلال است. در مناطق کوهستانی با افزایش ارتفاع، دما کاهش و مقدار بارش افزایش می‌یابد و دو عامل مؤثر بر انحلال شرایط مطلوب‌تری خواهد یافت و انتظار می‌رود این تغییرات با خصوصیات مورفومتری امکان ردیابی داشته باشد (جعفری و همکاران، ۱۴۰۰). هر چه دما کمتر و پایین‌تر باشد امتیاز بالاتری در توسعه منابع آب کارست به خود اختصاص می‌دهد (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). لایه دما در استان خراسان جنوبی به پنج طبقه تقسیم شده است که بر اساس محاسبه میانگین دمای ایستگاه‌های سینوپتیک استان صورت گرفته است. بیشترین امتیاز به دمای ۱۱-۱۳ درجه سانتیگراد و کمترین امتیاز به دمای ۲۰-۲۲ درجه سانتیگراد اختصاص یافت. بیشترین مساحت دمایی بین ۱۷ تا ۱۸ درجه سانتیگراد با ۲۳ درصد و کمترین مساحت دمایی بین ۱۱ تا ۱۳ درجه سانتیگراد با ۲ درصد را شامل گردید (شکل ۷).

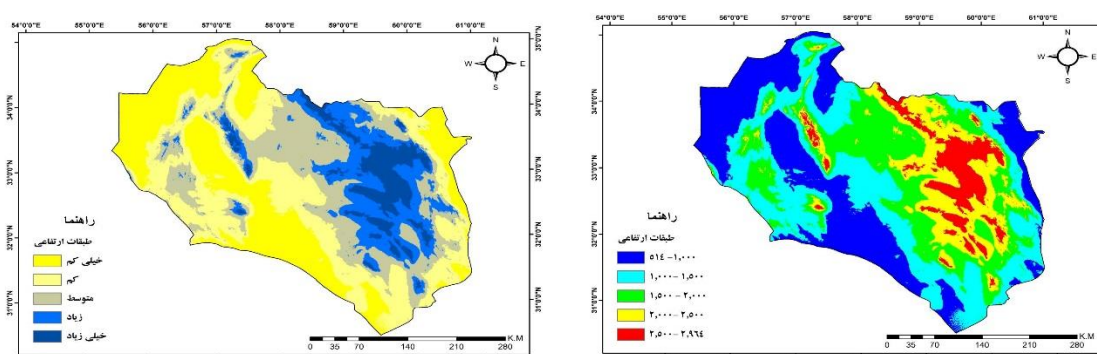


شکل (۷): نقشه استاندارد شده هم‌دمای استان. سمت چپ-کیفی و سمت راست-کمی

Figure (7): Standardized isotherm map of the province. Left side - qualitative and right side - quantitative

ارتفاع

ارتفاع در تشکیل آب‌های کارستی تأثیر زیادی دارد. به طور کلی، با افزایش ارتفاع، میزان بارندگی و رطوبت معمولاً افزایش و دمای هوا کاهش می‌یابد. این امر به نوبه خود می‌تواند باعث افزایش انحلال سنگ‌های کربناته و در نتیجه تشکیل آب‌های کارستی شود. عامل ارتفاع به عنوان یکی از پارامترهای ژئومورفولوژیکی تأثیرگذار در نوع اقلیم و میزان بارش می‌باشد. به طوری که مناطق ارتفاعی بالاتر دارای میزان بارش بیشتر و اقلیم مرطوب‌تری می‌باشد. از این رو میزان توسعه‌یافتگی فرایندهای کارستی این مناطق نسبت به مناطق پست‌تر بیشتر خواهد بود. افزون بر این ارتفاع از سطح آبخوان، شرایط را برای جریان بیشتر سیال فراهم می‌کند و انحلال را تشدید می‌نماید (ویسی و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین با افزایش ارتفاع، باعث باران بیشتر و تبخیر و تعرق پایین می‌رود و به برف اجازه می‌دهد تا در فصول گرم به تدریج ذوب شده و آبهای زیرزمینی را تغذیه کند (واعظی هیر و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین یکی از پارامترهای فیزیکی موثر که نقش مهمی در میزان بارش، تبخیر و تعرق، درجه حرارت و پوشش گیاهی دارد، ارتفاع می‌باشد. به طور کلی عامل ارتفاع نقش زیادی در تغذیه و تخلیه و برونزد چشمه‌های کارستی در یک محدوده را دارا می‌باشد. با افزایش ارتفاع در یک منطقه پتانسیل توسعه منابع آب کارست افزایش می‌یابد (زروش و همکاران، ۱۳۹۳). نقشه رستری طبقات ارتفاعی حوضه مورد مطالعه با استفاده از دستور Reclassify در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 در ۵ طبقه به دست آمد (شکل ۸). بیشترین مساحت استان در طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰ الی ۱۵۰۰ متر با ۲۸/۳ درصد و کمترین آن با ۷/۶ درصد مربوط به طبقه ارتفاعی ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر می‌باشد. بیشترین امتیاز به طبقه ارتفاعی ۲۹۶۴-۲۵۰۰ متر و کمترین امتیاز به طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۵۱۴ متر اختصاص یافت.



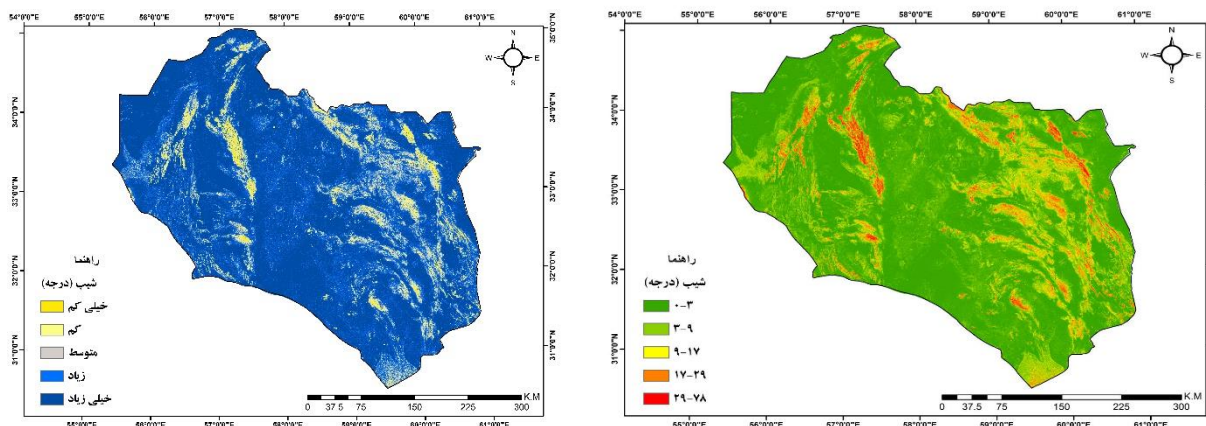
شکل (۸): نقشه استاندارد شده طبقات ارتفاعی استان. سمت چپ - کیفی و سمت راست - کمی

Figure (8): Standardized map of the province's elevation classes. Left side - qualitative and right side - quantitative.

شیب

شیب زمین به طور مستقیم بر تشکیل و توسعه مناطق کارستی تأثیر می‌گذارد. شیب زمین، به ویژه در مناطق با سازندهای کربناته، در تعیین میزان نفوذ آب، تجمع آب و سرعت جریان آب زیرزمینی نقش دارد. این عوامل به نوبه خود بر فرآیندهای فرسایش و انحلال سنگ‌های کربناته که منجر به ایجاد عوارض کارستی می‌شود، تأثیر می‌گذارند. رواناب‌های سطحی در مناطقی که شیب کمتر و ملایم باشد، بهترین شرایط را جهت نفوذ پیدا می‌کنند (سپهری پور و واعظی هیر، ۱۴۰۰). در مناطق دارای شیب زیاد، امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و همچنین رویش گیاه فراهم نیست. بنابراین آب باران به سرعت جاری می‌شود و فرصت نفوذ نخواهد داشت (زنگنه تبار و قدیمی، ۱۳۹۸). شیب نقش مهمی در سرعت جریان آب ایفا می‌کند. این عامل نفوذ آب به درون زمین را کنترل می‌کند. در مناطقی که شیب ملایم است، رواناب سطحی فرصت بیشتری جهت تماس با محیط و نفوذ را دارد، در حالی که در مناطق با شیب زیاد جریان رواناب راحت‌تر صورت می‌گیرد و این امر باعث کاهش نفوذ آب باران می‌شود (پورا کبری و همکاران، ۱۳۹۹). رواناب‌های سطحی در مناطقی که شیب کمتر و ملایم‌تری باشد، بهترین شرایط را جهت نفوذ پیدا می‌کنند. در شیب‌های کمتر، تغذیه آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در مناطقی با شیب زیاد، رواناب سطحی فرصت نفوذ و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را ندارد (واعظی هیر و همکاران، ۱۴۰۳).

نقشه نهایی رستری شیب منطقه مورد مطالعه در ۵ طبقه به دست آمد (شکل ۹). باتوجه به مبانی نظری، شیبهای کم و مناطق مسطح بیشترین پتانسیل در کارستی شدن را دارا می باشند. گسترش پدیده کارست در شیبهای کم به دلیل تماس بیشتر آب با آهک بیشتر بوده و پدیده انحلال در این شیبها بیشتر می شود (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). بیشترین مساحت استان در بین شیبهای ۰ تا ۳ درجه با ۶۳ درصد و کمترین مساحت نیز در شیب بیش از ۲۹ درجه با ۱/۴ درصد قرار دارد. بیشترین امتیاز به شیبهای ۰-۳ درصد و کمترین امتیاز به شیبهای ۲۹-۷۸ درصد اختصاص یافت.

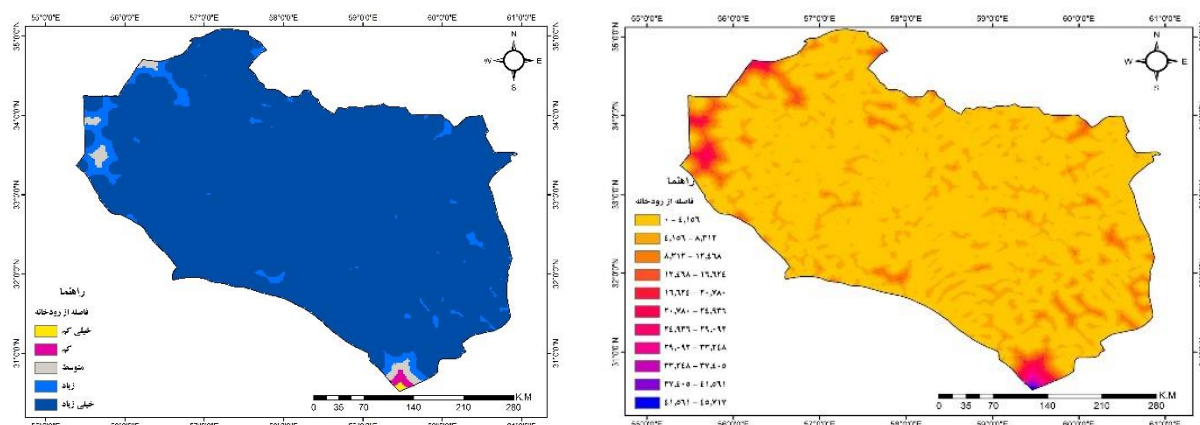


شکل (۹): نقشه استاندارد شده شیب استان. سمت چپ- کیفی و سمت راست- کمی

Figure (9): Standardized map of the province's slope. Left side - qualitative and right side - quantitative.

فاصله از آبراهه

فاصله از آبراهه ها تأثیر مستقیمی بر تشکیل آب های کارستی ندارد، اما می تواند بر میزان و نحوه تأمین آب کارست تأثیر بگذارد. به طور کلی، هرچه به آبراهه ها نزدیک تر باشیم، نفوذ آب به داخل زمین و تأمین سفره های آب زیرزمینی کارستی بیشتر می شود. نوع شبکه زهکشی هر منطقه توسط لیتولوژی واحدهای زمین شناسی، توپوگرافی و ساختارهای تکتونیکی و زمین شناسی منطقه کنترل می شود. از عوامل مهم در اکتشاف منابع آب کارست، هیدرولوژی، تراکم آبراهه ها و فاصله از آنهاست که هرچه فاصله از آبراهه کمتر باشد میزان توسعه منابع آب کارست بیشتر خواهد بود (رضائی عارفی و همکاران، ۱۳۹۹). شکل شماره (۱۰) فاصله از آبراهه در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. فاصله از آبراهه برای منطقه مورد مطالعه به پنج طبقه تقسیم بندی شده که هرچه فاصله از آبراهه کمتر، وزن بیشتری به خود اختصاص داده است. فاصله از آبراهه تا ۴۰۰ متری بیشترین وزن را دارد و بیشتر مستعد توسعه کارست می باشد زیرا آبراهه ها دارای نفوذپذیری خوبی برای تغذیه منابع آب کارست می باشند. فاصله بیشتر از ۴۰۰۰ متر کمترین وزن را دارا می باشد و کمترین پتانسیل را برای توسعه منابع آب کارست دارد. (شکل ۱۰).

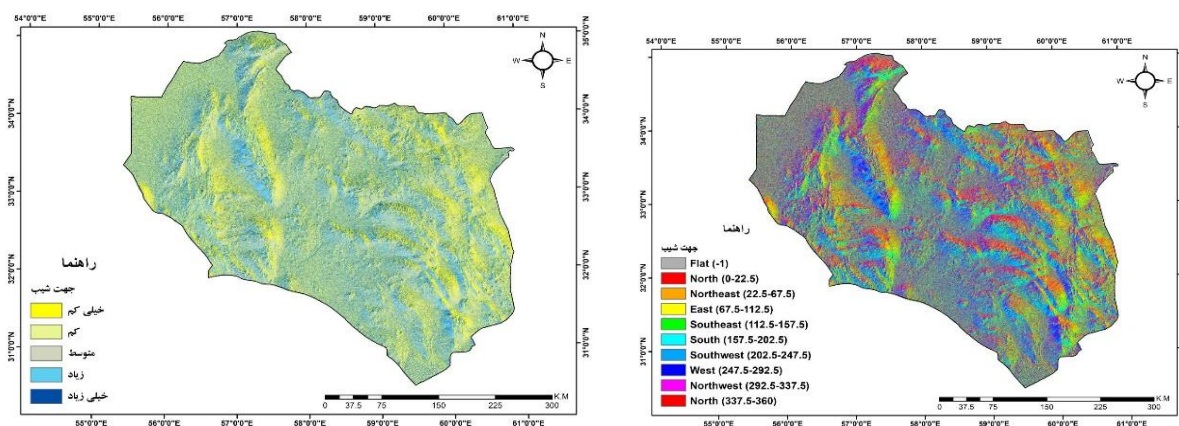


شکل (۱۰): نقشه استاندارد شده آبراهه های استان. سمت چپ- کیفی و سمت راست- کمی

Figure (10): Standardized map of the province's waterways. Left side - qualitative and right side - quantitative

جهت شیب

تأثیر جهت شیب بر تشکیل منابع آب کارست را می‌توان از چند جنبه بررسی کرد زیرا در سیستم‌های کارستی، جهت شیب نه تنها بر نحوه جریان آب سطحی و نفوذ آن به داخل زمین اثر می‌گذارد، بلکه بر شرایط میکروکلیمایی محلی و در نتیجه میزان تغذیه آبخوان هم موثر است. در جهات شیب شمالی به دلیل این که کمتر در معرض نور آفتاب هستند و بیشتر اوقات روز دارای سایه می‌باشند تبخیر کمتر است و همچنین برف‌های باریده شده روی آنها دیرتر ذوب می‌شود و فرصت کافی برای نفوذ را در اختیار دارد. بنابراین جهات شیب شمالی، آب بیشتری برای انحلال و توسعه کارست در اختیار دارند (زنگنه‌تبار و قدیمی، ۱۴۰۳). با توجه به اهمیت کیفیت تابش نور خورشید در تأمین انرژی مورد نیاز مناطق، جهت‌گیری دامنه‌ها نقش مهمی در این ارتباط دارد. به طور کلی، مناطق هموار بیشترین اهمیت را در اکتشاف منابع آب کارست را دارد. مناطق با جهات شمالی، شرقی و شمال‌شرقی به دلیل تبخیر کمتر و ماندگاری بیشتر برف بیشترین امتیاز را به خود اختصاص دادند و مناسب‌ترین جهات به منظور توسعه یافتگی منابع آب کارست هستند (رضائی عارفی و همکاران، ۱۴۰۳). کمترین امتیاز به جهات جنوبی، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی تخصیص یافت زیرا در این جهات، نور آفتاب و تبخیر بیشتر و ماندگاری برف هم کمتر است. جهات جنوبی و جنوب‌غربی با ۲۳ درصد بیشترین مساحت را شامل شدند (شکل ۱۱).

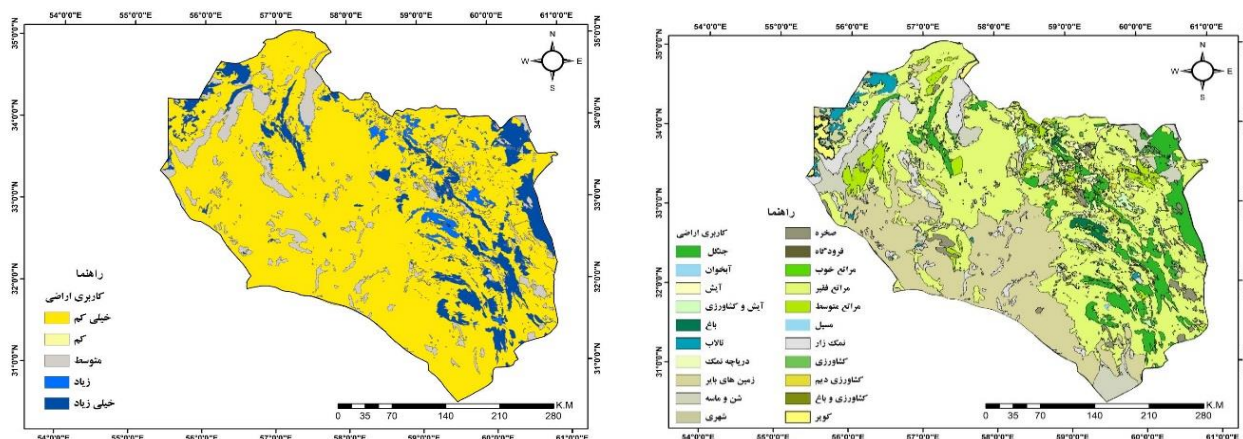


شکل (۱۱): نقشه استاندارد شده جهت شیب استان. سمت چپ- کیفی و سمت راست- کمی

Figure (11): Standardized map of the province's slope direction. Left side - qualitative and right side - quantitative.

کاربری اراضی

پوشش زمین و کاربری اراضی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تشکیل و پویایی سیستم‌های کارستی و به ویژه آب‌های زیرزمینی کارستی داشته باشد. پوشش گیاهی سطح کارست اگر متراکم باشد، موجب جذب بارش و رطوبت شده و از طریق ریشه خود، این رطوبت و گاز کربنیک را همراه مقادیری اسید به سنگ آهک وارد می‌کند. همچنین بقایای گیاهان پوسیده شده، جانوران خاک‌زی و قارچ‌ها در تولید گاز کربنیک و ترکیبات ارگانیکی بسیار مفید هستند و باعث تولید اسید هیومیک می‌شوند و در انحلال سنگهای کربناته مهم می‌باشند (نخعی و همکاران، ۱۴۰۲). پوشش گیاهی سبب افزایش درز و شکاف‌ها در سازند کارستی می‌شود و مقدار نفوذ را افزایش می‌دهد (به‌نیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵). در لایه (پارامتر) کاربری اراضی با افزایش پوشش گیاهی، میزان کارستی شدن بیشتر می‌شود. جهت بررسی پتانسیل اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی، از نقشه کاربری اراضی استان استفاده شده است. در مناطق جنگلی به علت وجود برگ گیاهان، میزان هوموس خاک افزایش یافته و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. همچنین فشار ریشه گیاهان در این مناطق سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها گردیده که عامل مهمی در افزایش نفوذپذیری می‌باشد. هر چه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد، از میزان رواناب ناشی از بارندگی‌های شدید جلوگیری شده و زمان لازم جهت نفوذ ریزش‌های جوی فراهم می‌گردد (پوراکبری و همکاران، ۱۳۹۹) (شکل ۱۲). بیشترین وزن به جنگل‌ها، درختزارها به دلیل ترشح اسید فولیک از ریشه و بعد از آن به مراتع و کمترین امتیاز به مناطق شهری و بعد از آن به مناطق کشاورزی داده شد. مراتع فقیر با ۴۶ درصد بیشترین و مسیل‌ها با ۰/۰۸ درصد کمترین وسعت از کاربری‌های اراضی استان را تشکیل می‌دهند.

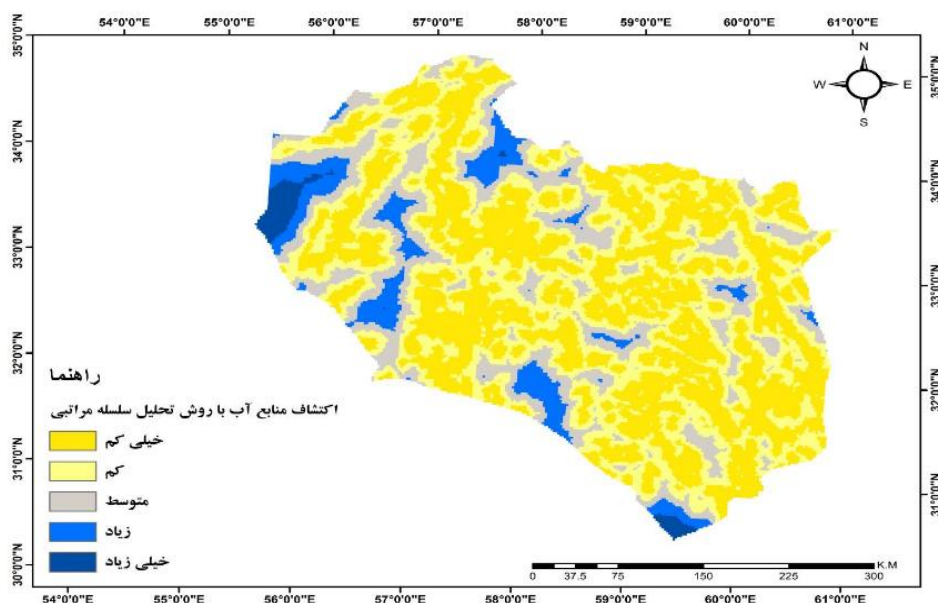


شکل (۱۲): نقشه استاندارد شده کاربری اراضی استان. سمت چپ-کیفی و سمت راست- کمی

Figure (12): Standardized land use map of the province. Left side - qualitative and right side - quantitative.

اکتشاف منابع آب کارست با روش تحلیل سلسله مراتبی

نقشه نهایی اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی با استفاده از لایه‌های ۹ گانه با ترکیب وزن‌های به‌دست آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هر لایه و همپوشانی آنها با استفاده از دستور Raster Calculator دست آمد. نقشه نهایی حاصل از اکتشاف منابع آب کارست در محدوده مورد مطالعه به پنج طبقه: از پتانسیل خیلی زیاد تا خیلی کم طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳). در جدول شماره (۵) مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP ارائه شده است. که از کل مساحت استان خراسان جنوبی، ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم توسعه یافته، ۳۲ درصد در طبقه کم توسعه یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۷ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۲ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. بنابراین از کل مساحت استان خراسان جنوبی ۹ درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست را دارا می‌باشند. بنابراین پارامتر لیتولوژی با ارزش ۰/۴۱ بیشترین وزن و مهمترین فاکتور اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی بوده و عامل کاربری اراضی با ارزش ۰/۱۷ کمترین وزن را به خود اختصاص داد که کمترین تأثیر را در اکتشاف منابع آب کارست دارا می‌باشد. نتایج نشانگر آن است که به ترتیب عوامل زمین‌شناسی، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه مهمترین اهمیت را در اکتشاف منابع آب کارست در محدوده مورد مطالعه داشته‌اند. همانطور که از شکل ۱۳ برمی‌آید بیشترین توسعه منابع آب کارست شامل توسعه زیاد و زیاد در غرب و جنوب استان خراسان جنوبی قرار دارند که منطبق با سازندهای آهکی و دولومیتی شهرستان طبس در ارتفاعات شتری می‌باشد که به طور کلی ۹ درصد از مساحت استان را در برمی‌گیرد. کمترین میزان توسعه منابع آب کارست در بخشهای عمده استان در مرکز، شرق و جنوب شرق پراکنده شده است که منطبق با سازندهای آذرین و غیرآهکی می‌باشد.



شکل (۱۳): نقشه اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی با روش تحلیل سلسله مراتبی AHP

Figure (13): Karst water resources exploration map in South Khorasan Province using AHP analytical hierarchy process

جدول (۶): مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP

Table (6): Area and percentage of karst development classes using AHP method

ردیف	طبقه	مساحت به کیلومتر مربع	درصد مساحت طبقات	تعداد چاهها	درصد چاهها
۱	خیلی کم	۶۲۲۳۶/۶۱	۴۲	۱۱۶۰	۳۷
۲	کم	۴۸۲۶۷/۴۶	۳۲	۱۱۶۱	۳۸
۳	متوسط	۲۴۷۷۸/۷۱	۱۷	۶۲۴	۲۰
۴	زیاد	۹۸۶۲/۴۹	۷	۸۸	۳
۵	خیلی زیاد	۲۲۲۰/۶۹	۲	۵۱	۲

اکتشاف منابع آب کارست با روش تحلیل شبکه

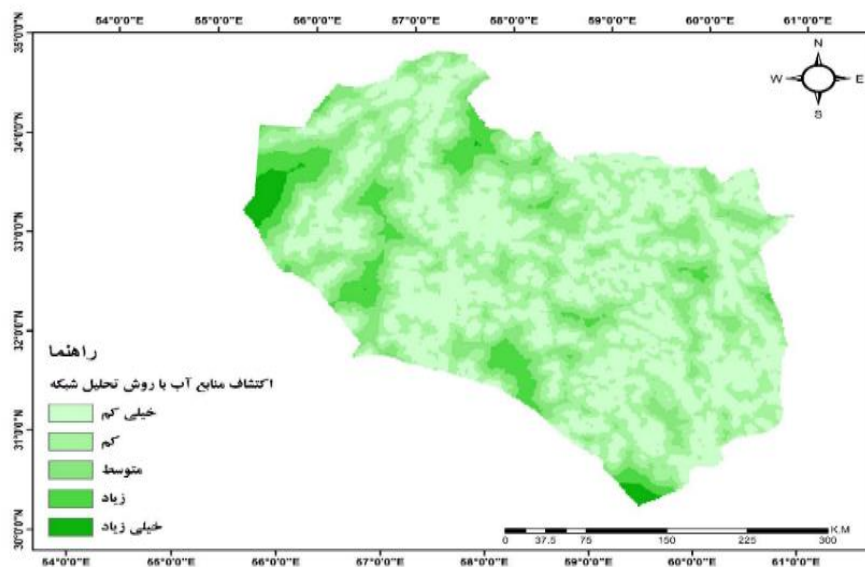
نقشه نهایی اکتشاف منابع آب کارست با استفاده از لایه‌های ۹ گانه با ترکیب وزن‌های به دست آمده از روش تحلیل شبکه با هر لایه و همپوشانی آنها با استفاده از دستور Raster Calculator دست آمد. نقشه نهایی حاصل از اکتشاف منابع آب کارست در محدوده مورد مطالعه به پنج طبقه: پتانسیل خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳). جدول شماره (۶) مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش تحلیل شبکه را نشان می‌دهد که از کل مساحت استان خراسان جنوبی، تقریباً ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم، ۳۳ درصد در طبقه کم توسعه‌یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۶/۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۱/۳۹ درصد در طبقه خیلی زیاد گرفته است. بنابراین از کل مساحت استان تقریباً ۸ درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست واقع شده است. عامل لیتولوژی با ارزش ۰/۲۰ و عامل بارش با ارزش ۰/۴۴ به ترتیب بیشترین و کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج نشانگر آن است که عوامل زمین‌شناسی و فاصله از گسل مهمترین نقش را در توسعه کنونی کارست در محدوده مورد مطالعه داشته‌اند. همانطور که از شکل ۱۴ برمی آید بیشترین توسعه منابع آب کارست شامل توسعه زیاد و زیاد در غرب و جنوب استان خراسان جنوبی قرار دارند که منطبق با سازندهای آهکی ودولومیتی شهرستان طبس در ارتفاعات شتری می باشد که به طور کلی ۹ درصد از مساحت استان را در برمی گیرد. کمترین میزان

توسعه منابع آب کارست در بخشهای عمده استان در مرکز، شرق و جنوب شرق پراکنده شده است که منطبق با سازندهای آذرین و غیرآهکی می باشد.

جدول (۷): مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش ANP

Table (7): Area and percentage of karst development layers using the ANP method

ردیف	طبقه	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت طبقات	تعداد چاهها	درصد چاهها
۱	خیلی کم	۶۱۹۱۸/۲۱	۴۲/۰۱	۱۱۱۰	۳۵/۹
۲	کم	۴۸۸۲۶/۷۲	۳۳/۱۳	۱۱۱۹	۳۶
۳	متوسط	۲۴۹۶۲/۴۱	۱۶/۹۳	۶۹۲	۲۲
۴	زیاد	۹۵۹۷/۱۵	۶/۵۱	۱۲۸	۴
۵	خیلی زیاد	۲۰۶۱/۴۹	۱/۳۹	۳۵	۲/۱



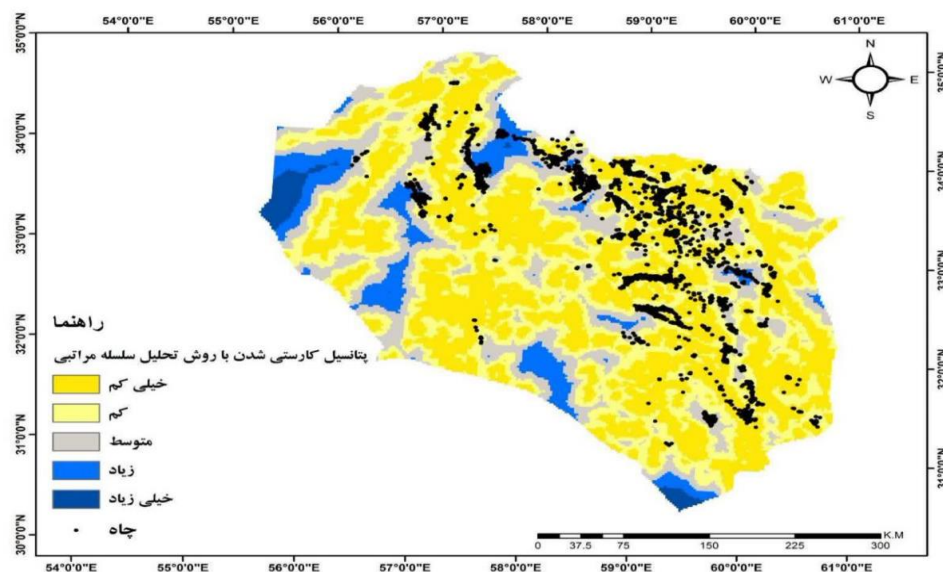
شکل (۱۳): نقشه اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی با روش تحلیل شبکه

Figure (13): Karst water resources exploration map in South Khorasan Province using network analysis method

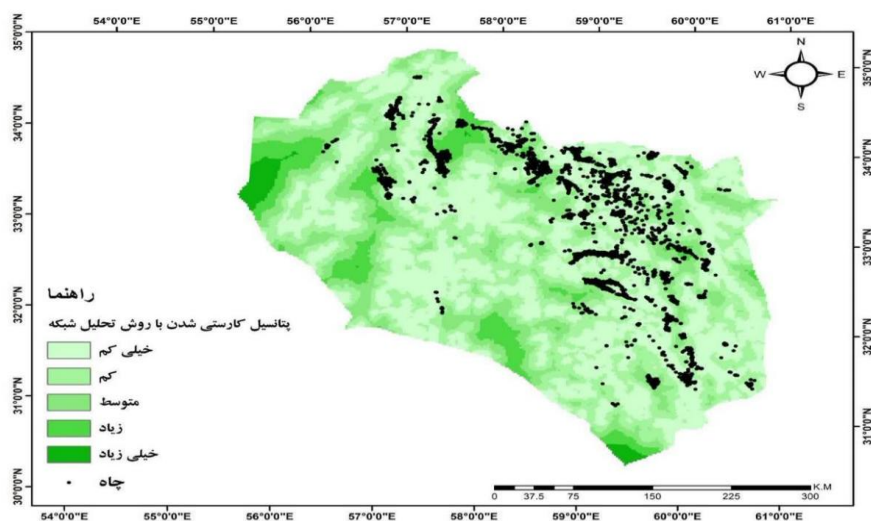
صحت سنجی و اعتبار سنجی نقشه اکتشاف منابع آب کارست با لایه چاهها و چشمه ها در روش AHP و ANP

پس از انجام هر پروژه اکتشاف منابع آب کارست، لازم است که نتایج به دست آمده با توجه به واقعیتها و اطلاعات موجود پیرامون آنها، مورد بررسی قرار گیرد (دشتی برمکی، ۱۳۹۴). جهت صحت سنجی نقشه نهایی، لایه پوینت چاهها و چشمه های استان خراسان جنوبی بر روی نقشه نهایی فراخوانی گردید. در روش AHP در طبقات توسعه خیلی کم و کم در مجموع تعداد ۲۳۲۱ چاه و چشمه یعنی ۷۵ درصد بر روی این مناطق قرار گرفتند. در طبقه متوسط تعداد ۶۲۴ چاه و چشمه یعنی ۲۰ درصد و در طبقه توسعه زیاد ۸۸ چاه با ۳ درصد و در طبقه توسعه خیلی زیاد ۵۱ چاه و چشمه با ۲ درصد قرار گرفتند (شکل ۱۴) و جدول (۶). در روش ANP در طبقات توسعه خیلی کم و کم در مجموع تعداد ۲۲۲۹ چاه و چشمه یعنی ۷۱.۹ درصد بر روی این مناطق قرار گرفتند. در طبقه متوسط تعداد ۶۹۲ چاه و چشمه یعنی ۲۲ درصد و در طبقه توسعه زیاد ۱۲۸ چاه با ۴ درصد و در طبقه توسعه خیلی زیاد ۳۵ چاه و چشمه با ۲.۱ درصد قرار گرفتند (شکل ۱۵) و جدول (۷). با توجه به اینکه در صحت سنجی چاه و چشمه درصد بیشتری بر روی مناطق توسعه کم و خیلی کم در هر دو مدل قرار گرفت نشان دهنده این است که به طور کلی از تعداد ۳۰۸۴ حلقه چاه و چشمه حفر شده با استفاده های مختلف

در بخشهای کشاورزی، صنعت، شرب تعداد چاه کمتری در مناطق توسعه زیاد و خیلی زیاد حفر گردیده اند و با مشاهده دقیق در جدول اطلاعات توصیفی لایه چاههای استان مشاهده می شود که بیشتر این چاهها بر روی سازندهای نرم آبرفتی، مخروطه افکنه ها و تراسهای آبرفتی حفاری شده اند که در عمق کمتری قرار دارد ولی بر روی سازندهای کارستی عملیات حفاری خیلی کمتر انجام گرفته است.



شکل (۱۴): (سمت راست): تلفیق و اعتبار سنجی لایه آبخوان های شهرستان بیرجند و لایه پتانسیل کارستی شدن در محدوده مورد مطالعه در روش AHP
Figure (14): (Right): Integration and validation of the Birjand city aquifer layer and the karstification potential layer in the study area using the AHP method.



شکل (۱۵): (سمت چپ) تلفیق و اعتبار سنجی لایه آبخوان های شهرستان بیرجند و لایه پتانسیل کارستی شدن در محدوده مورد مطالعه در روش ANP
Figure (15): (Left) Integration and validation of the Birjand city aquifer layer and the karstification potential layer in the study area using the ANP method

نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر مقایسه کارآیی روش های AHP و ANP در اکتشاف منابع آب کارست در استان خراسان جنوبی می باشد. بر اساس مطالعه مقالات متعدد ۹ پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی به عنوان نقشه های عامل در نظر گرفته شدند به عنوان عوامل مؤثر و پرتکرار بر اکتشاف منابع آب کارست در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که در روش AHP از کل مساحت استان خراسان جنوبی، ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم توسعه یافته، ۳۲ درصد در طبقه کم توسعه یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۷ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۲ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. در روش ANP از کل مساحت استان خراسان جنوبی، ۴۲ درصد در طبقه خیلی کم توسعه یافته، ۳۳ درصد در طبقه کم توسعه یافته، ۱۷ درصد در طبقه متوسط، ۶/۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۱/۴ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. جهت اعتبار سنجی در روش AHP، لایه چاه و چشمه استان بر روی نقشه اکتشاف منابع آب کارست فراخوانی شد و مشخص گردید، در طبقات توسعه خیلی کم و کم در مجموع تعداد ۲۳۲۱ چاه و چشمه یعنی ۷۵ درصد بر روی این مناطق قرار گرفتند. در طبقه متوسط تعداد ۶۲۴ چاه و چشمه یعنی ۲۰ درصد و در طبقه توسعه زیاد ۸۸ چاه با ۳ درصد و در طبقه توسعه خیلی زیاد ۵۱ چاه و چشمه با ۲ درصد قرار گرفتند. جهت اعتبار سنجی در روش ANP، لایه چاه و چشمه استان بر روی نقشه اکتشاف منابع آب کارست فراخوانی شد و مشخص گردید در طبقات توسعه خیلی کم و کم در مجموع تعداد ۲۲۲۹ چاه و چشمه یعنی ۷۱.۹ درصد بر روی این مناطق قرار گرفتند. در طبقه متوسط تعداد ۶۹۲ چاه و چشمه یعنی ۲۲ درصد و در طبقه توسعه زیاد ۱۲۸ چاه با ۴ درصد و در طبقه توسعه خیلی زیاد ۳۵ چاه و چشمه با ۲.۱ درصد قرار گرفتند. با توجه به اینکه در صحت سنجی چاه و چشمه درصد بیشتری بر روی مناطق توسعه کم و خیلی کم در هر دو مدل قرار گرفت نشان دهنده این است که به طور کلی از تعداد ۳۰۸۴ حلقه چاه و چشمه حفر شده با استفاده های مختلف در بخشهای کشاورزی، صنعت و شرب تعداد چاه کمتری در مناطق توسعه زیاد و خیلی زیاد حفر گردیده اند و با مشاهده دقیق در جدول اطلاعات توصیفی لایه چاههای استان مشاهده می شود که بیشتر این چاهها بر روی سازندهای نرم آبرفتی، مخروطه افکنه ها و تراسهای آبرفتی حفاری شده اند که در عمق کمتری قرار دارد ولی بر روی سازندهای کارستی عملیات حفاری خیلی کمتر انجام گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد در کارآیی دو مدل جهت اعتبارسنجی با لایه چاه و چشمه، روش ANP از اعتبار نسبتاً بهتری برخوردار است زیرا بعد از هم پوشانی، به روش کمی لایه چاهها و چشمه ها تعداد و درصد بیشتری از کارست توسعه یافته و خیلی توسعه یافته را به خود اختصاص دادند که با نتایج تحقیقات واعظی هیر و همکاران (۱۳۹۷ و ۱۴۰۳)، سعیدی و همکاران (۱۴۰۰)، سپهری پور و همکاران (۱۴۰۰)، مفیدی فر و همکاران (۱۳۹۴) و دشتی برمکی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. نتایج نشانگر آن است که عوامل لیتولوژی و فاصله از گسل مهمترین نقش را در اکتشاف منابع آب کارست در این استان داشته اند که با نتایج تحقیقات رضائی و همکاران (۱۴۰۳)، نخعی و همکاران (۱۴۰۲) و خضری و همکاران (۱۳۹۶) مشابهت دارد. لازم به ذکر است با توجه به موضوع پژوهش که به مقایسه کارآیی دو مدل تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل شبکه در اکتشاف منابع آب کارست می پردازد و نیز با توجه به انطباق کم چاهها و چشمه ها با مناطق توسعه کارست، پژوهش از اعتبار نسبی برخوردار می باشد زیرا تمام لایه چاهها بر روی این مناطق قرار نگرفت که دلیل آن می تواند عدم بهره برداری آب زیرزمینی در غرب و شمال غرب استان در شهرستان طبس باشد که با نتایج سپهری پور و همکاران (۱۴۰۱) مشابهت دارد. با توجه به هم پوشانی لایه با توجه به تهیه نقشه های نهایی و اعتبارسنجی نقشه های مذکور به روش کمی، می بایست مدیران سازمان آب منطقه ای خراسان جنوبی اقدام به اکتشاف منابع آب جایگزین در مناطق مذکور نمایند. شایسته است مدیران محلی از نتایج این پژوهش در جهت بهره برداری پایدار از منابع آب کارستی و تامین آب استان استفاده نمایند. بنابراین پیشنهاد می گردد؛ با توجه به اینکه منابع آب شرب شهر بیرجند از شهرستان های اطراف بخصوص سربیشه تامین می گردد، جهت افزایش کیفیت منابع آب و جلوگیری از بحران منابع آب در سال های آتی، اکتشاف منابع آب کارست در مناطق جنوبی (ارتفاعات باقران) و مناطق شمال غربی شهرستان صورت پذیرد. شایان ذکر است پهنه بندی یک سازند کارستی به محدوده های رده بندی شده با ارزش های متفاوت، به این معنا نیست که به طور

یقین در محدوده‌های دارای ارزش پتانسیلی بالا هرگونه حفاری چاه، موفقیت‌آمیز خواهد بود و یا برعکس. بنابراین نتایج این مطالعات فقط درصد احتمال و میزان شانس موفقیت در وجود منابع آبی را بیان می‌دارد. برای مشخص کردن مناسب‌ترین مناطق، انجام بررسی‌های دقیق‌تر همچون اکتشافات ژئوفیزیکی و سپس حفاری‌های اکتشافی لازم و ضروری می‌باشد.

References

- Abbasian-Velander, R, Roustaei, S and Mokhtari, D. (2023). Evaluation and zoning of karst development in the Tamtman-Nazlu-Chay region of Urmia using the Analytic Hierarchy Process. *Hydrogeomorphology*, 9(31), 93-71. doi: [10.22034/hyd.2022.49982.1623](https://doi.org/10.22034/hyd.2022.49982.1623). (in Persian).
- Behniafar, A., Ghanbarzadeh, H., (2016). *Karst Geomorphology*, Mashhad, Negaran Sabz Publications. (in Persian).
- Bakalowicz, M (2005) Karst groundwater : A challenge for new resources, *Hydrogeology Journal*, Volume 13, issue 1, pp:148-160. DOI:[10.1007/s10040-004-0402-9](https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9).
- Chen, Z.; et al.(2017) The World Karst Aquifer Mapping project: Concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeol. J*, Volume 25, 771–785. DOI: [10.1007/s10040-016-1519-3](https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3).
- Dashti Barmaki, M., Rezaei, M., and Ashjari, J. (2015). Karst groundwater potential in Davan and Shapour Mountains based on Multiple Criteria Decision Making. *Iranian Water Research*, 9(16), 89-100. https://iwrij.sku.ac.ir/article_11036.html. (in Persian).
- Farhadi, S., Alijani, F., & Naseri, H. (2022). Comparison of hydrogeochemistry and hydrology of Asmari and Sarvak formations as reservoirs of large Zagros karst springs in northeastern Khuzestan, *Hydrogeology*, 7(2). 143-159. DOI:[10.22034/hydro.2023.14136](https://doi.org/10.22034/hydro.2023.14136). (in Persian).
- Ford, Derek., Williams(2007) *karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons. Geomorphology. DOI:[10.1002/9781118684986](https://doi.org/10.1002/9781118684986).
- Hejazi, A., & Heidari, Z. (2023). Vulnerability assessment and zoning of developed and susceptible contaminated karstic (Case study: Ravenscar watershed). *Journal of Geographical sciences*, 23(68), 313-326. <https://sid.ir/paper/966984/en>. DOI:[10.52547/jgs.23.68.313](https://doi.org/10.52547/jgs.23.68.313). (in Persian).
- Heydari Aghagol, M, Gholami, E and Rostami Barani, H. (2017). Potential assessment of groundwater resources using fuzzy logic method (case study: South Khorasan province). *Iranian Water Resources Research*, 13(1), 211-215. (in Persian).
- Kolani, T; Nakhaei, M; & Arian, M. (2014). Forecasting karst spring discharge during droughts using fractal geometry (case study of Kermanshah province), *Hydrogeology*, 9(2). 44-54. DOI:[10.22034/hydro.2024.56741.1291](https://doi.org/10.22034/hydro.2024.56741.1291). (in Persian).
- Kiani, M and Javadi, S. (2022). Vulnerability and risk assessment of karst water resources by combining two indices: VESPA and EPIK, *Hydrogeology*, 7(1). 151-164. DOI:[10.22034/hydro.2022.12227](https://doi.org/10.22034/hydro.2022.12227). (in Persian).
- Motamedi Rad, M., Goli Mokhtari, L., & Bahrami, Sh.(2021). Assessment of the quality of water resources in terms of drinking, agriculture and industry in the Ruin Esfarayen karst aquifer of North Khorasan Province. *Applied Research in Geographical Sciences*, 21(62), 74-93. DOI: [10.52547/jgs.21.62.73](https://doi.org/10.52547/jgs.21.62.73). (in Persian).
- Makram, M and Negahban, S. (2019). Investigation and identification of areas with karstification potential using fuzzy method and analytic hierarchy process model. *Geography and Environmental Planning*, 30(2), 121-134. doi: [10.22108/gep.2019.118017.1171](https://doi.org/10.22108/gep.2019.118017.1171). (in Persian).
- Nakhaie, A., Zangane Asadi, M., Behniafar, A., & Mokhtari, L.(2023). Zoning Karst Development By Using Fuzzy Logic Model_ ANP in Baqamch basin of Kashaf Rod. , *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 230-255. DOI:[10.22034/gmpj.2023.346563.1362](https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.346563.1362). (in Persian).
- Nedri, R and Alizadeh, H. (1404). Evaluation of the role of structural parameters in identifying karst water resources: Case study: Kopehdagh structural zone. *Hydrogeomorphology*, 12(43), 16-1. doi:[10.22034/hyd.2025.63495.1755](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.63495.1755). (in Persian).

- Pisano, L and et al(2022). Assessing Karst Landscape Degradation: A Case Study in Southern Italy, Land, Volume 11, Issue 10, 1842. <https://doi.org/10.3390/land11101842>.
- Pourakbari, S., Kalantari, N., Aghdaki, Y., & Mosleh, A. (2020). Potential of Karstic Water Resources Using RS, GIS and AHP (Case Study: Lilly and Kenno Anticlines in the North East of Khuzestan). *WaterResources Engineering*, 13(45), 99-112. DOI:20.1001.1.20086377.1399.13.45.8.1. (inPersian).
- Qu, X., Shi, L, Gao, W., Qiu M (2020) Characteristics of faults in the Liangzhuang mining area and their control on karst development in Ordovician limestones. *Carbonate and Evaporites*, Volume 35 (118). <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00656-8>.
- Rezaei Arefi, M., Motamedi Rad, M., Taghavi Moghaddam, A., & Sadeghi, M. (2024). Potentialization of karst water resources in Birjand city using the analytic hierarchy process model and geographic informationsystem. *Larestan Physical Geography*, 17(64), 17-38. <https://sanad.iau.ir/journal/jopg/Article/1184401>. . (inPersian).
- Rezaei arefi M, zanganeh asadi M A, behniyafar A, javanbakht M.(2020). Identification of the Karsticity of the Kalat Mountain Basin in the North East of Iran. *Geographic space*, 20(71), 49-74. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3408-fa.html>. (in Persian).
- Sepehripour, A., Vaezihir, A., (2021). Exploration of strategic karstic and hard rock groundwater in order to supply drinking water for Miyaneh City in critical water shortage conditions. *Adv. Appl. Geol.* 11(2), 332-348. DOI:10.22055/AAG.2020.33531.2121. (in Persian).
- Sajjadi, Z., Kalantari, N., & Cherchi, Abbas. (2022). Investigation of the hydraulic relationship of karst structures with hydrogeochemical and isotopic methods of water resources in the Izeh region of northern Khuzestan province, *Hydrogeology*, 7(2). 121-142. DOI:10.22034/hydro.2022.48953.1254. (in Persian).
- Sepehripour, A and Vaezihir, A. (1400). Investigation and exploration of strategic water resources of hard and karst formations to provide drinking water to Mianeh County in critical conditions. *Advanced Applied Geology*, 11(2), 332-348. doi: 10.22055/aag.2020.33531.2121. (in Persian).
- Vaezihir, A., Khalkhali, M., & Tabarmayeh, M. (2024). Determination of groundwater resources potential in fractured and karstic formations of West Azerbaijan province. *Journal of Water and Soil*, 38(3), 337-350. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87603.1402>. (in Persian).
- Vaisi, A., Moghimi, A., Maghsoudi, M., Yamani, M., and Hosseini, M. (2022). Assessment of Shahu's karst evolution by generalized additive model. *Quantitative Geomorphological, Research*, 11(3), 39-56. DOI:10.22034/gmpj.2021.141034. (in Persian).
- Velayati, S. (2016). *Karst Geomorphology*, Sahra Sharq Kimia Publications. (in Persian).
- Yu, Benjin., et al (2025) How Global Atmospheric Circulation Indirectly Influences Streamflow Variations in Karst Basin Through Rainfall, *Water Resources Research*, Volume 61, Issue 6. <https://doi.org/10.1029/2024WR039655>.
- Zanganeh Tabar, S., & Gadimi, M. (2019). Evaluation of the Potential of the Water Resources of Parao-Bisetoun's Karst as the Stable Water Suppliers for Zagros's Ecosystems. *Ecohydrology*, 6(1), 111-123. DOI:10.22059/ije.2018.266517.958. (in Persian).
- Zanganeh Tabar, S., & Mohammad Khan, Sh. (2024). Comparing the development potential of karst sinkholes in parts of high and folded Zagros Case study: Parao-Biston and Kabirkoh. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(1), 176-191. DOI:10.22034/gmpj.2024.408100.144. (in Persian).
- Zaree, M., Javadi, S., Neshat, A. (2019) Potential detection of water resources in karst formations using APLIS model and modification with AHP and TOPSIS, *Jounal of Earth System*, 128 (4). DOI:10.1007/s12040-019-1119-4. (in Persian).
- Zarroush, N., Vaezi, A., & Karimi, H. (2015). Assessing the potential for karst development in the Great - Mountain Anticline of Ilam Province using fuzzy integration and AHP analytic hierarchy process, remote sensing and GIS. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(3), 144-157. DOI:20.1001.1.22519424.1393.3.3.10.0. (in Persian).
- Zerga, B. (2024) Karst topography: Formation, processes, characteristics, landforms, degradation and restoration: A systematic review, *Watershed Ecology and the Environment*, Volume 6, 252-269. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2024.10.003> (in Persian).