

Research Paper



The role of lithological, geochemical and hydrochemical characteristics on the karstification process

Case study: Kalat watershed in northeastern Iran



Mohsen Rezaei Arefi*¹, Mansour Sadeghi ²

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

Keywords

**Lime purity
karstification
calcimetric test, ICP
test, kalat
watershed, Northeast
Iran.**

Received: 2025/06/03

Accepted: 2025/09/09

Published: 2026/01/12

A B S T R A C T

Introduction

Considering the current water crisis in Iran, especially in arid and semi-arid regions, the exploration of karst water resources is very vital. The aim of the present study is to determine the role of lithological, geochemical and hydrochemical characteristics on the karstification process of the Kalat watershed in northeastern Iran. Therefore, it is necessary for local managers to pay attention to the environmental management program in karst areas for the sustainable management of the region's water resources.

Methodology

The research method in this study is field and laboratory type. First, the study area was determined using the base and base maps, namely the topography of 1:100,000 Kelat and the geology of 1:100,000 Kelat. Using the 10.8 ARC GIS software, all software work such as preparing shape files, specifying the study area, etc. was carried out. In the geological map of the Kelat watershed, the type of karst and non-karst formations was determined, and the area and percentage of carbonate and non-carbonate formations were given in the form of a table. In the field survey of the study basin, various photographs of various karst formations were taken. Photographs were taken of the formations to examine the lithological characteristics, and in this part, lithological interpretation was made using field observations and geological maps. In areas of the studied basin such as the Chaman Bid layered formation, the karst formations were of layered type and no karst landforms were observed. In the geochemistry of the basin rocks, using two calcimetric techniques or rock volume and ICP, the amount of calcite or calcium present in the rocks on the karst formations of the region was determined and it was shown that the higher the amount of impurities in the rock such as clay and iron, the lower the level of karstification and vice versa.

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

How to cite this article: Rezaei arefi, mohsen ; Sadeghi, mansour ; (2026). The role of lithological, geochemical and hydrochemical characteristics on the karstification process Case study: Kalat watershed in northeastern Iran). *Hydrogeomorphology*, 12(45): 80 – 99.

DOI: [10.22034/hyd.2025.67607.1797](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.67607.1797)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

The role of lithology and impurities in limestone in karstification The amount of impurities such as iron and magnesium in carbonate formations is lower than in other formations. Therefore, the lower the amount of impurities in the formations, the higher their degree of karstification, and vice versa, the higher the amount of impurities in karstifying formations, the lower their degree of karstification. The role of mechanical resistance in karstification

In the study area, some layers such as Tirgan and Mozduran are in a mass state, and the presence of seams provides suitable conditions for water to penetrate between the layers of rocks, and rainwater can use these seams and cracks and carry out the dissolution process better and faster. The high thickness of limestone, which is in a mass form in most places, is a positive factor for the development of karst forms. In some formations, such as the Chaman Bid Formation, where the layers are in a layered form, the dissolution process takes place more slowly. In the karst formations of Tirgan, Mozduran, and Kalat, as can be seen in the images, the limestone is in a mass form and significant karst landforms such as ravines, karst corridors, and canyons are created on these formations.

Laboratory techniques for calculating the rate of lime dissolution

Measuring lime in sediment by calcimetry (volumetric measurement)

According to the calcimetric table, the highest degree of lime purity is observed in the calcareous and thick layer of Mozduran formation, followed by Tirgan, then Kalat, and finally Chaman Bid, which has the lowest level of lime purity.

ICP (plasma-induced X-ray) method:

According to the ICP table, the highest degree of lime purity is observed in the thick limestone formation of the Tirgan layer, followed by Mozduran 2, then Kelat, and finally Chamanbid, which has the lowest degree of lime purity.

The importance of electrical conductivity (EC) on karstification

The lowest degree of electrical conductivity is observed on the rivers of Zharf, Hamam Qale, and Qara Su. Therefore, the higher the electrical conductivity, which indicates the concentration of the solution in the water, the lower the susceptibility to karstification, and conversely, the lower the electrical conductivity in the water, the higher the susceptibility to karstification.

Calcium to magnesium ratio

The calcium to magnesium ratio in the Qara Su River in the northwest of the basin on the thick, massive formation of the Tirgan layer shows the number 1.77, which is a correct indicator for showing the ratio of calcium to magnesium ion concentrations in karst formations.

Conclusions

Due to the water crisis in the country, especially in arid and semi-arid regions, the need to pay attention to karst areas is becoming more and more apparent. The aim of the present study is to determine the importance of the role of lithological, geochemical and hydrochemical characteristics on the karstification process in the Kalat basin in northeastern Iran. More than 25% of the Kalat basin area consists of carbonate formations, which can be used by environmental managers in any research in this basin. The research method relies on laboratory and field techniques. The results of the calcimetric test in the limestone formations of the Kalat basin showed that the average percentage of calcite in these formations is 39%, which indicates the average purity of lime in the basin formations. The ICP test, which determines the amount of elements present in the rock, showed that the percentage of calcium in the four limestone formations of Kalat, Mozduran, Tirgan and Chamanbid is 38%. In the weight method, the average calcite in the four formations shows the number 56.3. In relation to lithological characteristics, the amount of impurities in limestone is very important. Because the higher the amount of impurities in these rocks, the less the karstification

process and vice versa. Also, in the Tirgan and Mozduran karst formations, where the limestones are massive, significant karst forms such as canyons, narrows and karst.

corridors are formed, and in the Chamanbid karst formation, which is layered, significant karst forms are not formed and only karsts are formed. The quality of surface and groundwater in the basin was analyzed and showed that there is an inverse relationship between waters in karst areas and electrical conductivity, which indicates the potential for karstification in the Kalat watershed. Also, the ratio of calcium to magnesium in the water resources of the basin, especially in the Qarasu River in the northwest of the basin on the thick and massive formation of the Tirgan layer, shows a number of 1.77, which is a very close indicator for karstification in karst formations. Therefore, environmental management in karst areas should be considered by environmental managers for alternative water sources.



مقاله پژوهشی



نقش ویژگی‌های لیتولوژیکی، ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی بر فرایند کارست‌زایی، مطالعه موردی: حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران

محسن رضائی عارفی^۱، منصور صادقی^۲۱- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. Rezaei.arefi@cfu.ac.ir۲- دکترای ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. mansadeghi1400@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

با توجه به بحران کنونی آب در ایران به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک اکتشاف منابع آب کارست بسیار حیاتی است. هدف از پژوهش حاضر مشخص نمودن نقش ویژگی‌های لیتولوژیکی، ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی بر فرایند کارست‌زایی حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران می‌باشد. این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های میدانی و آزمایشگاهی انجام شده است. در روش‌های میدانی، نمونه برداری سنگ از سازندهای کربناته جهت آزمایش کلسیمتری و آی سی پی و نمونه برداری آب جهت آنالیز هیدروشیمیایی از قبیل سختی کل، هدایت الکتریکی و نسبت کلسیم به منیزیم انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد در ارتباط با ویژگی‌های لیتولوژیکی، سازندهای کربناته تیرگان و مزدوران با آهک‌های توده‌ای، اشکال کارست قابل توجه مانند کانیون‌ها، تنگ‌ها و کریدور کارستی را شکل داده‌اند و در سازند لایه‌ای چمن بید، فقط کارنها شکل گرفته‌اند. آزمایش کلسیمتری سازندهای آهکی حوضه کلات نشان داد که میانگین درصد کلسیت در این سازندها ۳۹ درصد می‌باشد که نشانگر خلوص متوسط آهک در سازندهای مذکور است. نتایج آزمایش آی سی پی در سازندهای کارستی حوضه نشان داد، میزان درصد کلسیم در چهار سازند آهکی کلات، مزدوران، تیرگان و چمن بید ۳۸ درصد می‌باشد. کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه آنالیز شد که بر این اساس مشخص شد بین آب‌های مناطق کارستی و هدایت الکتریکی رابطه عکس وجود دارد که حاکی از استعداد کارست‌زایی در حوضه آبریز کلات می‌باشد. نسبت کلسیم به منیزیم در منابع آب حوضه و به‌خصوص رودخانه قره‌سو در شمال غرب حوضه بر روی سازند توده‌ای و ضخیم لایه تیرگان عدد ۱.۷۷ را نشان می‌دهد که این عدد بیانگر فرایند کارستیفیکاسیون در سازندهای کارستی حوضه می‌باشد. بنابراین لازم است برنامه آمایش محیطی در مناطق کارستی جهت مدیریت پایدار منابع آب منطقه، مورد توجه مدیران محلی قرار گیرد.

خلوص آهک،

کارست‌زایی،

آزمایش کلسیمتری،

آزمایش آی سی پی. حوضه آبریز کلات، شمال شرق ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

ارجاع به این مقاله: رضائی عارفی، محسن، صادقی، منصور (۱۴۰۴). نقش ویژگی‌های لیتولوژیکی، ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی بر فرایند کارست‌زایی مطالعه موردی: حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۲ (۴۵): ۸۰-۹۹.

*نویسنده مسئول: محسن رضائی عارفی

رایانامه: Rezaei.arefi@cfu.ac.irشناسه دیجیتال مقاله: [10.22034/hyd.2025.67607.1797](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.67607.1797)

Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

سازندهای کربناته، سنگ‌هایی مانند آهک و دولومیت هستند که به دلیل وجود ترکیبات کربناتی، قابلیت انحلال در آب دارند (چاسچکو و پرون^۱، ۲۰۲۱: ۱۶). مناطق کارستی، اهمیت زیادی از دیدگاه‌های مختلف علمی، محیطی و کاربردی دارند. تقریباً ۲۰ درصد از وسعت خشکی‌های دنیا را سازندهای کربناته در بر گرفته‌اند که هر نوع ساخت‌وساز بر روی این سرزمین‌ها، مستلزم شناخت جامع از ژئومورفولوژی کارست می‌باشد (بهنیاfer و قنبرزاده، ۱۳۹۸: ۲۱). منابع آب کارست، منابع ارزشمند آب شیرین برای حدود ۱۰ درصد از جمعیت جهان هستند (کالی و همکاران، ۲۰۲۵؛ کلهر و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰۴). در ۱۵۰ کشور، منابع آب کارستی، آب آشامیدنی ۹ درصد از جمعیت جهان را تأمین می‌کنند (استوانویچ، ۲۰۲۴: ۱۴۵). ۱۳ درصد از وسعت کشورمان را سازندهای کربناته تشکیل می‌دهد که ۹۰ درصد این سازندها در ارتفاعات زاگرس قرار گرفته‌اند و در تأمین آب شرب ایران نقش بسیار عمده‌ای دارند (بهنیاfer و قنبرزاده، ۱۳۹۸: ۱۵). ژئوشیمی کارست به مطالعه فرآیندهای شیمیایی و ژئوشیمیایی مرتبط با انحلال، انتقال و رسوب‌گذاری مواد معدنی در سیستم‌های کارستی اطلاق می‌شود. از نظر ژئوشیمیایی، مهم‌ترین فرآیند در تشکیل کارست، انحلال کربنات کلسیم توسط آب‌های اسیدی است. آب باران، به واسطه جذب دی‌اکسید کربن از جو و خاک، به اسید کربنیک ضعیف تبدیل می‌شود که می‌تواند سنگ‌آهک را حل کند (کلهر و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۰۴). وجود درصد کمی از تشکیل دهندهای غیر قابل حل، مانند کانی‌های رسی و سیلیکاته به میزان قابل ملاحظه‌ای قابلیت کارستی شدن سنگ‌های کربناته را کاهش می‌دهند. اگر مقدار رس و سیلت از ۲۰ الی ۳۰ درصد فراتر رود، از پیشرفت انحلال جلوگیری می‌نماید. کربنات‌های با خلوص بیش از ۷۰ درصد مناسب‌ترین سنگ‌ها برای توسعه کارست می‌باشند. سنگ‌های آهکی در آب حاوی گاز کربنیک حل می‌شوند و شبکه آب‌های زیرزمینی آهکی (کارستی) را به وجود می‌آورند (اشرف و همکاران، ۱۳۹۲: ۴). بنابراین می‌توان گفت که اکثر شبکه‌های کارستی بزرگ در سازندهای آهکی تقریباً خالص که مقدار کربنات کلسیم ۹۹ درصد است توسعه می‌یابند و هر چه درصد آهک‌های سنگ بیشتر باشد، امکان پیشرفت پدیده کارست بیشتر است (اکبری نوجوش و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰۹). در فرایند شکل‌گیری و توسعه آبخوان‌های کارستی عوامل مختلفی دخیل می‌باشند. ساختار زمین‌شناسی (مانند شکستگی‌ها و گسل‌ها)، سنگ‌شناسی (ضخامت سنگ کربناته، ترکیب شیمیایی کانی‌ها)، آب و هوا (دما، نوع و میزان بارش)، شرایط هیدرولوژیکی (میدان جریان، ویژگی‌های هیدروشیمیایی)، توپوگرافی، پوشش گیاهی و غیره مهم‌ترین عوامل در تعیین درجه توسعه کارست هستند (بنیشک و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۷). ماهیت و ترکیب سنگ بستر، عامل اصلی کنترل کانی‌سازی آب‌های زیرزمینی منطقه‌ای است. ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های حوضه آبخیز آنها قرار دارد. عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی سنگ بستر، خواص خاک و فعالیت‌های انسانی بر جریان آب و وضعیت کلی کیفیت آن تأثیر می‌گذارند (جنینیا و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۲۰۸). هیدروژئوشیمی آبخوان‌های کربناته توسط چندین فرآیند پیچیده تعیین می‌شود مهم‌ترین آنها انحلال و رسوب مواد معدنی، نفوذ آب‌های سطحی، فرآیندهای بیوژئوشیمیایی و فعل و انفعالات آب‌سنگ مانند تبادل کاتیونی است که همگی ترکیب آب‌های زیرزمینی را تغییر می‌دهند (جبرین و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۶۱). با توجه به افزایش جمعیت، بحران کم‌آبی، یکی از مشکلات جوامع امروزی است. برای عبور از این بحران علاوه بر مدیریت صحیح و جامع منابع آب موجود، دستیابی به منابع آبی جدید از ضروریات است. یکی از این منابع، ذخایر آب کارستی می‌باشد (حبیبی نیا و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۲۱). در بررسی پیشرفت کارست با توجه به خصوصیات شیمی آب حوضه‌های کارستی، نقش ساختارهای زمین‌شناسی حائز اهمیت می‌باشد (کورک ماز، ۱۹۹۰، لوپز-چیکانو^۳ و همکاران، ۲۰۰۱، کوماک^۴، ۲۰۰۶، اوزلر^۵، ۲۰۱۰، شیزن و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۱۲). ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی در ناحیه کارست در جنوب غربی کشور چین برای آنالیز شیمی سنگ، عناصر اصلی آب شامل SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} (راگووهمکاران، ۲۰۱۷: ۴۵) اندازه‌گیری نمودند، که منشا آنها بیشتر از سنگ‌های کربناته بوده است. در مقایسه با نواحی روستایی، مقدار کل بار محلول در آب در مناطق شهری بالاتر می‌باشد. مکانیسم انحلال و توسعه کارست سنگ‌های کربناته در منطقه کارستی شهرستان ژن‌فنگ -

¹-Jasechko and perrone

²- Calli et al

³- Lopez- Chicano et al

⁴- Komac

⁵- Ozler

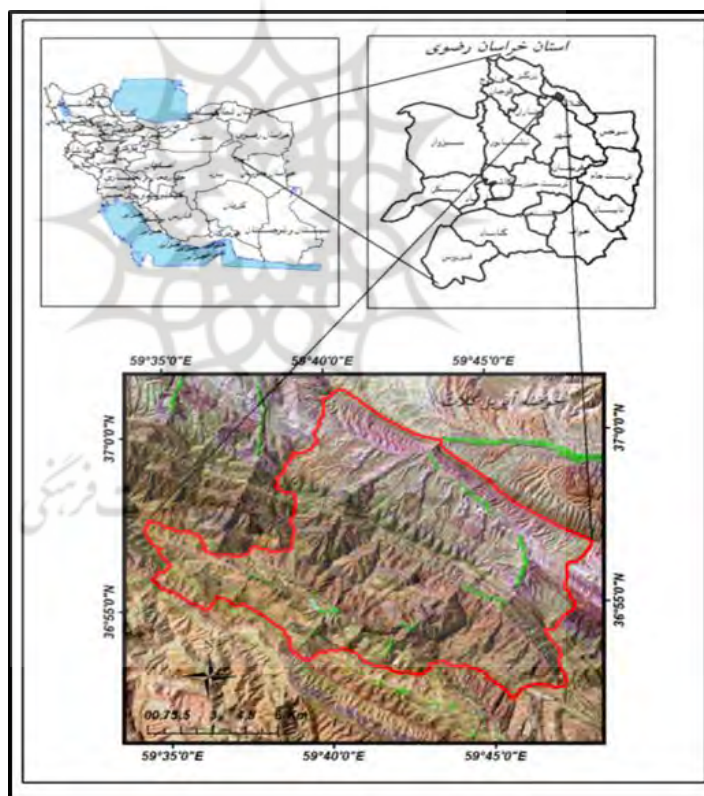
هواجیانگ، گوئیژو، چین مورد بررسی قرار گرفتند. در این ارتباط انحلال و ویژگی‌های کارست سنگ‌های کربناته ارتباط نزدیکی با ساختار زمین‌شناسی، شرایط هیدروژئولوژیکی و سنگ‌شناسی دارد (بای‌و و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۲). ترکیب شیمیایی، تخلخل و ویژگی کانی‌ها بیشترین تأثیر را بر سرعت انحلال دارند. در بررسی تجربی پیشرفت کارست کلکریست و آنالیز فرایند انحلال حائز اهمیت می‌باشد و در نتیجه در این منطقه کارست کلکریست در درجه اول در نزدیکی رودخانه با مقیاس کوچک توزیع شده است و ۸۵.۹۶٪ از غارها با شن و رس پر شده‌اند. نتایج آزمایش انحلال نشان داد که انحلال سیمان کلسیت، بافت سنگ را از بین می‌برد (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۳). در ارتباط با تأثیر واحدهای رسوبی در ترکیب و کیفیت آب در حوضه آبریز کارده در شمال شرق مشهد ایران مطالعاتی انجام گرفت که مطابقت آنها با استانداردهای بهداشت جهانی و ایران و استفاده از نمودارهای شولر، ویلکاکس و پاپیر، وجود مقدار یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات و همچنین میزان اسیدیته، مواد جامد محلول در آب و سختی کل، سبب گردیده که آب حوضه آبریز کارده به دلیل خورندگی و رسوب‌گذار بودن جهت مصارف صنعتی مناسب نباشد. همچنین برخی نمونه‌های آبی، گرچه از نظر وجود کاتیون‌های سدیم و منیزیم و آنیون سولفات خوب تا قابل قبول بوده، اما به دلیل وجود TDS و TH بالا از نظر شرب انسانی نامناسب هستند. از سویی، عمده آب‌های حوضه آبریز کارده دارای کیفیت خوبی بوده و به طور عمده سولفات و کلسیم یون‌های غالب محسوب می‌گردند. لذا نوع آب به طور عمده سولفاته کلسیک است. در نهایت عمده نمونه‌های آب حوضه آبریز کارده در کلاس C2S1 طبقه‌بندی شده که جهت استفاده کشاورزی مناسب هستند (پورسلطانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۵). در ارتباط با نقش اقلیم بر تنوع و تکامل مورفولوژیکی کارنهای کارست کربناته با استفاده از تکنیک ژئومورفومتری در پهنه‌های اقلیمی حوضه کلات، شرق کپه‌داغ این نتایج به دست آمده است که اقلیم مرطوب‌تر باعث تنوع مورفولوژیکی و ژنتیکی بیشتر در کارن‌ها می‌گردد و تعداد کارن‌ها را در واحد سطح افزایش می‌دهد (نژاد سلیمانی و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۹). در بررسی توسعه کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدروشیمی چشمه‌ها در حوضه روئین در استان خراسان شمالی آب‌نمود چشمه‌ها در حوضه مورد مطالعه نشانگر تأخیر اوج بارش و اوج دبی چشمه‌ها می‌باشد معتمدی‌راد و همکاران، ۱۴۰۲: ۶۱). در ارزیابی نقش پارامترهای ساختاری در شناسایی منابع آب کارستی در پهنه ساختاری کپه‌داغ بین شاخص تعداد چشمه‌ها و فاصله از گسل‌ها ارتباط بسیار نزدیکی وجود دارد، به گونه‌ای که بیشترین تعداد چشمه‌های مورد بررسی در مجاورت خطوط گسلی قرار دارند، اما میزان آبدهی چشمه ارتباطی با فاصله با گسل ندارد و بیشتر به سازندهای زمین‌شناسی ارتباط دارد (ندری و علیزاده، ۱۴۰۴: ۱۲).

حوضه آبریز کلات در زون کپه‌داغ در شمال شرق ایران یک منطقه نیمه‌خشک طبق طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن می‌باشد و حدود یک‌چهارم از مساحت آن از سازندهای کربناته تشکیل شده است و منطقه‌ای سرشار از جاذبه‌های توریستی می‌باشد و البته شهر کلات در مجاورت حوضه آبریز کلات از نظر مخاطرات محیطی بخصوص سیلاب در رتبه اول و از نظر مخاطرات دامن‌های مانند ریزش و لغزش در رتبه دوم قرار دارد. با توجه به کمبود منابع آب در آینده نزدیک در کلان‌شهرها و به‌خصوص شهر مشهد، اکتشاف منابع آب کارست و بهره‌برداری درست از این منابع می‌تواند راهگشای حل مشکل آب در کلانشهر مشهد و شهرهای اطراف آن باشد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر بررسی نقش ویژگی‌های لیتولوژیکی، ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی بر فرایند کارست‌زایی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران می‌باشد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد پژوهش، حوضه آبریز کلات در زون کپه‌داغ در شمال شرق ایران در استان خراسان رضوی می‌باشد که در ارتفاعات هزار مسجد قرار گرفته است. این حوضه با مساحت ۱۶۸/۳۷ کیلومترمربع در ۱۴۵ کیلومتری شمال شهر مشهد قرار دارد. از نظر موقعیت ریاضی بین ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی، حوضه مورد مطالعه یک حوضه رسوبی از نوع ژئوسنکلینالی می‌باشد. حوضه مورد مطالعه از چینه‌شناسی کپه‌داغ تبعیت می‌کند که پس از کوه‌زایی تریاس میانی و بسته شدن دریای هرسینین، در زمان تصادم و برخورد بین فلات

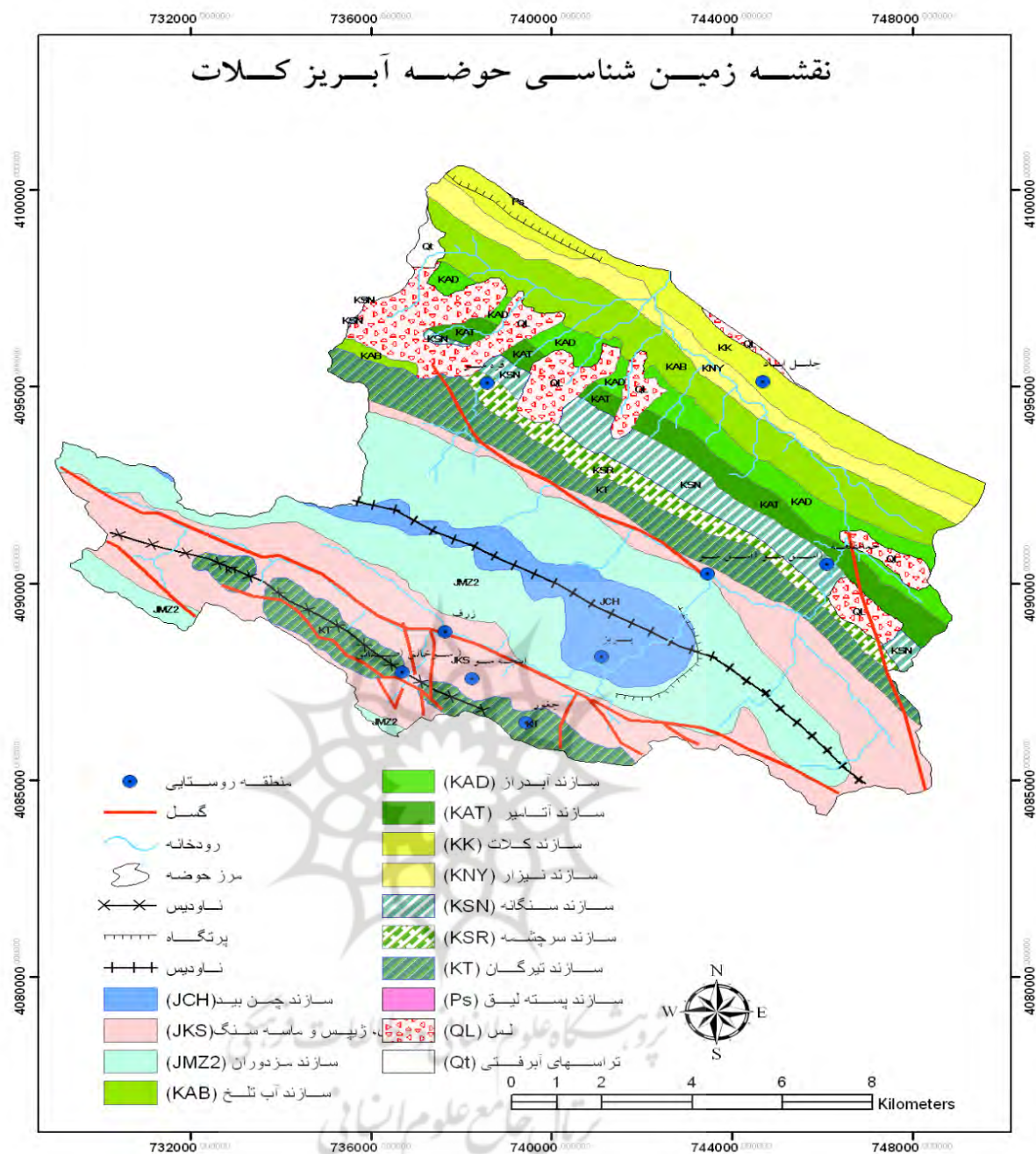
ایران و توده توران، در شمال و شمال شرق ایران تشکیل شده است که واحدهای سنگ چینه‌ای متعددی را شامل می‌شود. واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از رسوبات اوایل دوران دوم و سوم و چهارم زمین‌شناسی تشکیل شده است. در اوایل کرتاسه پیشروی دریا در کپه‌داغ صورت می‌گیرد و در اواخر کرتاسه زیرین به اوج خود می‌رسد و سپس پسروی آغاز می‌شود این پیشروی و پسروی‌ها، سنگ‌بنای سازندهای منطقه را تشکیل می‌دهند و فعالیت بعدی گسل‌ها منجر به ایجاد چین خوردگی‌های به صورت آنتی کلینال و سنگ‌کینال در منطقه می‌شود. قدیمی‌ترین رخنمون‌های این واحدها به دوره ژوراسیک مربوط می‌شود (سازند چمن‌بید) و وسیع‌ترین گسترش رخنمون‌ها متعلق به سازندهای مزدوران و شوربجه می‌باشد. از نظر اقلیم شناسی، براساس طبقه‌بندی آب و هوایی کوپن، اقلیم این حوضه، نیمه خشک است. متوسط درجه حرارت سالانه $16/49$ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی آن، سالانه 314 میلی‌متر می‌باشد. کمینه درجه حرارت متوسط ماهانه حوضه در دی ماه با $3/54$ درجه سانتی‌گراد و بیشینه درجه حرارت میانگین ماهانه در تیر ماه $28/19$ درجه سانتی‌گراد است. همچنین کمینه متوسط درجه حرارت مربوط به دی ماه برابر با $0/4$ درجه سانتی‌گراد و متوسط بیشترین درجه حرارت با $34/2$ درجه سانتی‌گراد مربوط به تیر ماه است. از نظر هیدروژئومورفولوژی مهمترین جریان‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه، رودخانه‌های ارچنگان، ژرف، حمام قلعه و قره‌سو می‌باشند که در شمال غرب، شرق و جنوب حوضه پراکنده شده‌اند. ژئومورفولوژی حوضه مورد مطالعه، همانند زاگرس، تیپ ژورایی دارد؛ یعنی کوه‌ها منطبق بر طاقدیس‌ها و دره‌ها منطبق بر ناودیس‌ها می‌باشند و به این ترتیب سرتاسر حوضه، چین‌خورده‌گی شدیدی را متحمل شده است.



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

Figure (1) : Location of the study area

سازندهای کربناته اصلی حوضه شامل مزدوران، تیرگان، کلات و چمن بید است که به ترتیب درصد انحلال‌پذیری در آنها کم می‌شود. بیشتر از ۲۵ درصد مساحت حوضه کلات با حدود ۴۴ کیلومترمربع، از سازندهای کارستی تشکیل شده است (رضائی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز کلات

Figure (2): Geology map of the Kalat basin

(مأخذ: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلات؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

جدول (۱): توزیع و نسبت سازندهای کربناته و غیرکربناته در حوضه کوهستانی کلات

Table (1): Distribution and ratio of carbonate and non-carbonate formations in the Kalat Mountain Basin

ردیف	نام سازند	مساحت سازند به کیلومتر مربع	نوع سازند	مساحت سازند به درصد
۱	مزدوران ۲ (Jmz2)	۳۵/۷۵	کربناته-آهکی	۲۱/۲۳
۲	تیرگان (KT)	۱۸/۱۸	کربناته-آهکی	۱۰/۷۹
۳	آب تلخ (KAB)	۱۳/۱۵	کربناته-مارن	۷/۸
۴	چمن بید (JCh)	۱۰/۱۰	کربناته-مارن	۵/۹۹
۵	کلات (KK)	۸/۹۷	کربناته-آهکی	۵/۳۲
۶	آبدراز (KAD)	۷/۲۲	کربناته-گل سفید	۴/۲۸
۷	شوریجه (JkS)	۳۶/۶۱	غیر کربناته-ماسه سنگ	۲۱/۷۴
۸	لس (QL)	۱۲/۹۳	غیر کربناته	۷/۶۷
۹	سنگانه (KSN)	۶/۹۵	غیر کربناته-شیل	۴/۱۲
۱۰	نیزار (K لومن NY)	۶/۹۵	غیر کربناته-ماسه سنگ	۴/۱۲
۱۱	آتامیر (KAT)	۶/۰۸	غیر کربناته-ماسه سنگ	۳/۶۱
۱۲	سرچشمه (KSR)	۴/۸۶	غیر کربناته-شیل	۲/۸۸
۱۳	تراس های آبرفتی (Qt)	۰/۶۵	غیر کربناته	۰/۳۶
۱۴	پسته لیک (Ps)	۰/۰۱۹	غیر کربناته-ماسه سنگ و کنگلومرا	۰/۰۱۱

بر اساس جدول (۱) حدود ۵۵/۵ درصد از مساحت حوضه (حدود ۹۴ کیلومتر مربع) را سازندهای کربناته و ۴۴/۵ درصد (حدود ۷۵ کیلومتر مربع) آن را سازندهای بی کربناته تشکیل می دهند.

روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش تلفیقی از روش های میدانی، آزمایشگاهی و کتابخانه ای می باشد. در روش میدانی، نمونه برداری از سنگ ها از هر سازند یک نمونه سنگ از سازندهای کربناته حوضه جهت آزمایش کلسیمتری جهت تعیین میزان خلوص آهک و تعیین کلسیم موجود در سنگ و انجام آزمایش آی سی پی جهت تعیین میزان عناصر موجود در سنگ برای تعیین ناخالصیهای موجود در سنگ و نیز تهیه عکس ها از لندفرم ها و سازندهای حوضه، نمونه برداری از آب های سطحی و زیر سطحی حوضه جهت آنالیز هیدروشیمیایی از قبیل سختی کل، هدایت الکتریکی و نسبت کلسیم به منیزیم صورت گرفت. در روش میدانی از دستگاه GPS جهت ثبت دقیق محل نمونه- برداری ها استفاده شد. در مطالعه کتابخانه ای نیز از نقشه های مبنا یعنی توپوگرافی و زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان کلات و همچنین از پژوهش ها و کتاب های مرتبط با موضوع تحقیق استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار ARC GIS 10.8 تمام عملیات های نرم افزاری از قبیل مشخص کردن محدوده مورد مطالعه، تهیه شیب فایل ها و... انجام گرفت. هدف آزمایش کلسیمتری تعیین خلوص آهک در سنگ می باشد که هر چه میزان خلوص بیشتر باشد، منطقه از نظر کارستزایی غنی تر بوده و بالعکس. هدف از آزمایش آی سی پی تعیین عناصر موجود در سنگ از قبیل کلسیم و منیزیم می باشد. در آزمایش آی سی پی با توجه به اینکه میزان کلسیم سنگ مشخص می گردد هرچه این میزان در سنگ بیشتر باشد نشان دهنده میزان بالای خلوص آهک در سنگ آهک است. در ویژگی های هیدروشیمیایی آب ها بر روی منابع آب زیرزمینی و سطحی تمام پارامترهای مربوط به کیفیت آب مانند سختی کل، هدایت الکتریکی و مقدار جذب کلسیم از رودخانه های حوضه آبریز کلات که از سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی در سال ۱۴۰۳ اخذ گردید نتایج آن در قالب جداول کیفیت آب آورده شده است. با توجه به اینکه حدود ۲۵ درصد از مساحت حوضه آبریز کلات کارستی می باشد بنابراین مطالعه بر روی سازندهای

کارستی جهت اکتشاف منابع آب کارست به عنوان منابع آب جایگزین باید مورد توجه مدیران سازمان آب منطقه‌ای در استان خراسان رضوی قرار گیرد.

بحث و یافته‌ها

نقش لیتولوژی و ناخالصی‌های سنگ آهک در کارست‌زایی

لیتولوژی بوسیله میزان انحلال، زوال‌پذیری، میزان خلوص و یکنواختی در شکل‌گیری اشکال کارستی اثرگذار است. با توجه به این‌که بیشتر سنگ‌های حوضه آبریز کلات از کلسیت تشکیل شده‌اند و مقدار PH آب آن ۷.۶ می‌باشد بنابراین شرایط برای انحلال سنگ‌های حوضه مورد مطالعه مهیا شد است. انحلال سنگ‌ها معمولاً در امتداد درزها، گسل‌ها یا سطوح لایه‌بندی با سهولت بیشتری انجام می‌گیرد. مقاومت پایین، درزهای فراوان و جریان بودن سنگ‌ها، مشخص‌کننده میزان زوال‌پذیری آنها می‌باشد (مقامی مقیم، ۱۳۹۶). در سنگ‌های آهکی مواد ناخالص دیگری از جمله دولومیت نیز وجود دارد که موجب کند شدن فرآیند کارستی فیکاسیون می‌شود. میزان حل‌شدگی دولومیت بسیار کمتر از کانی کلسیت می‌باشد (آپلو و پستما، ۲۰۰۵). بر اساس داده‌های جدول شماره (۲)، به دلیل منیزیم بالای موجود در سازند مزدوران ۲، میزان انحلال در این سازند کمتر از سازند تیرگان به‌عنوان یک سازند آهکی دولومیتی می‌باشد. لازم به ذکر است با استفاده از روش آزمایشگاهی آی سی پی به منظور بررسی تاثیر انحلال سازندها بر توسعه کارست، تعداد ۱۱ نمونه از آب‌های سطحی این حوضه برداشت و با مقادیر عناصر به دست آمده از هر سازند مقایسه گردید.

جدول (۲): میزان عناصر کلسیم، سدیم، منیزیم، آنیون و منگنز در نمونه‌های رسوبات دانه‌ریز حوضه آبریز و متوسط این عناصر در سازندهای اصلی

آن (PPM)

Table (2): Amount of calcium, sodium, magnesium, anion and manganese elements in fine-grained sediment samples of the watershed (and the average of these elements in its main formations (PPM)

Fe	Mn	Mg	Ca	Na	
۰/۱۴۷	N	۵/۱۳	۱۱۰/۴۴	۱۸/۹۴	A1
۰/۱۱۲	N	۳/۲۲	۱۸۲/۷۵	۱۴/۶	A2
۰/۰۳۷	N	۴/۱۲۹	۱۵۰/۴	۲۶/۴۹	A3
۰/۰۵۱۸	N	۲/۳۴۸	۱۶۵	۲۹/۳۲	A4
۰/۰۶۴	۰/۰۰۹۷	۲/۱۴	۴۹۸/۲	۸/۵۶	A5
۰/۱۲	۰/۰۱۴۲	۱/۳۴	۴۴۹/۲	۹/۱۳	A6
۰/۰۸۵	۰/۰۰۳۸	۱/۵۵	۳۳۲/۸۳	۱۶/۶۷	A7
۰/۱۳۸	۰/۰۰۳۴	۲/۳۹	۳۰۷/۵	۱۶/۶۷	A8
۰/۱۱۲	۰/۰۰۷۴	۲/۲۸	۳۰۷/۸۸	۱۴/۶	A9
N	N	۳/۳۳	۸۵/۸۳	۲۲/۹	A10
۰/۱۳	۰/۵۰۷	۶/۷	۱۳۱۴/۱	۱۷/۶۳	A11
۱۹۳/۶۳	۵۲/۱۸	۸۱۲۷/۲	۳۸۹۰۴۵/۴۵	۴۷۸/۸	تیرگان
۱۵۹۶۵/۳	۲۲۵/۲۷	۶۰۵۴	۷۰۳۳/۳۶	۷۴۹/۷۲	شوریجه
۵۳۵	۶۰	۷۸۴۵۰	۳۲۲۶۷۵	۳۸۰۰	مزدوران ۲
۲۰۹۵	۱۴۷/۵	۳۲۰۰	۳۸۴۹۵۰	۸۸۵۰	چمن بید

بر اساس جدول شماره (۲) میزان ناخالصی‌ها مانند آهن و منیزیم در سازندهای کربناته کمتر از سایر سازندها می‌باشد. بنابراین هرچه میزان ناخالصی در سازندها کمتر، درجه کارستی شدن آنها بیشتر می‌باشد و بالعکس هر چه میزان ناخالصی‌ها در سازندهای کارستی بیشتر باشد درجه کارستی شدن در آنها کمتر می‌گردد.

نقش مقاومت مکانیکی در کارست‌زایی

یکی از شرایط مهم در توسعه کارست، ضخامت کافی سنگ‌های آهکی می‌باشند. در منطقه مورد مطالعه، بعضی از لایه‌ها مانند تیرگان و مزدوران حالت توده‌ای داشته و حضور درزها شرایط مناسبی را جهت نفوذ آب در لایه‌لای سنگ‌ها فراهم می‌سازد و آب‌های ناشی از بارش می‌توانند از این درزه‌ها و شکاف‌ها عبور کرده و عمل انحلال را بهتر و سریعتر انجام دهند. ضخامت زیاد سنگ‌های آهکی که در بیشتر نقاط حالت توده‌ای دارد عاملی مثبت در جهت توسعه اشکال کارستی عمل می‌کند. در بعضی از سازندها مانند سازند چمن‌بیدکه رسوبات حالت لایه‌لایه دارند فرایند انحلال کندتر صورت می‌گیرد. در سازندهای کارستی تیرگان و مزدوران و کلات همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شوند سنگ‌های آهکی حالت توده‌ای دارد و لندفرم‌های کارستی قابل توجه مانند تنگ‌ها، کریدور کارستی و کانیون بر روی این سازندها ایجاد گردیده است.



شکل (۳): به ترتیب از بالا سمت راست آهک توده‌ای و ضخیم لایه در سازندهای تیرگان و مزدوران، سمت چپ بالا: آهک توده‌ای و ضخیم لایه در سازند کلات، پایین سمت راست: کانیون بر روی سازند کارستی کلات و پایین سمت چپ: کریدور کارستی در سازند تیرگان

Figure (3): From top right, massive and thick-layered limestone in the Tirgan and Mozduran formations, top left: massive and thick-layered limestone in the Kalat Formation, bottom right: canyon on the Kalat karst formation, and bottom left: karst corridor in the Tirgan Formation, respectively.

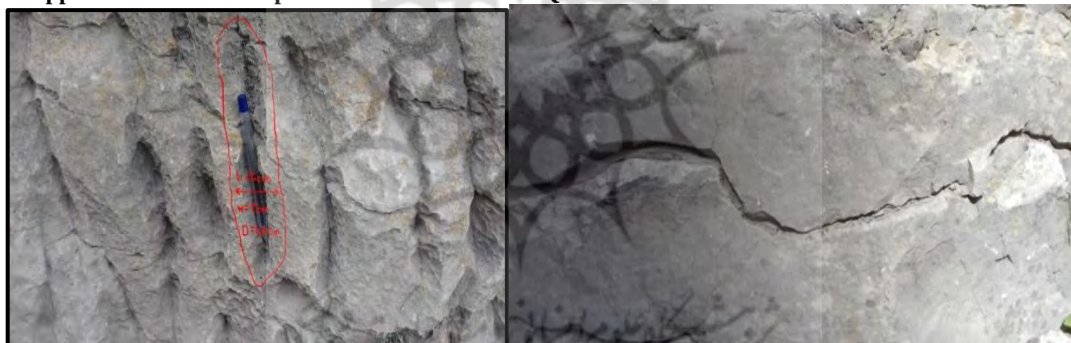
نقش ناخالصی‌های سنگ آهک بر شکل‌گیری اشکال کارستی

هر چه میزان ناخالصی‌ها در سنگ آهک بیشتر باشد اشکال کارستی به صورت میکرو، مانند انواع کارن‌ها شکل می‌گیرد. در حوضه مورد مطالعه اشکال میکروکارست در سازندهای آهکی کلات و تیرگان به تعداد زیاد شکل گرفته است. هر چه میزان ناخالصی‌ها در سنگ آهک کمتر باشد اشکال کارستی قابل توجهی شکل می‌گیرند که در حوضه مورد مطالعه به صورت اشکال تکامل‌یافته کارستی مانند پولیه و غار وجود نیز دیده می‌شوند. همان‌طور که در تصاویر شماره (۴ و ۵ و ۶) مشاهده می‌گردد اشکال میکروکارست از قبیل کارن‌ها، فراوان‌ترین لندهای کارستی در محدوده مورد مطالعه می‌باشند.



شکل (۴): سمت راست: تصویری از کارن‌های حفره‌ای (پیت‌ها) دو وجهی در شمال شرق حوضه بر روی سازند کلات.
شکل (۵): سمت چپ: ریپل کارن یا کارن موجی شکل در محل آبشار قره‌سو در شمال غرب حوضه عکس از نگارندگان

Figure (4): Right: Image of two-sided pit karns in the northeast of the basin on the Kalat Formation
Figure (5): Left: Ripple kar or wave-shaped kar at the site of the Qara Su waterfall in the northwest of the basin. Photo by the author



شکل (۶): سمت راست: کارن ماند در شمال غرب حوضه - سمت چپ: کارن شیاری. شمال غرب حوضه عکس از نگارندگان

Figure (6): Right: Meander kar in the northwest of the basin - Left: Shiari kar. Northwest of the basin Photo by the author

تکنیک‌های آزمایشگاهی جهت محاسبه میزان انحلال آهک

اندازه‌گیری آهک در رسوب به روش کلسیمتری (حجم سنجی)

آزمایش کلسیمتری آهک برای تعیین میزان کربنات کلسیم در یک نمونه سنگ آهک یا سایر مواد حاوی آهک انجام می‌شود. این آزمایش معمولاً بر اساس روش‌های شیمیایی و فیزیکی صورت می‌گیرد که به تعیین درصد کربنات کلسیم در نمونه کمک می‌کند. در این روش، نمونه آهک با اسید کلریدریک واکنش داده و دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند. گاز دی‌اکسیدکربن، سطح آب داخل بورت دستگاه را تغییر می‌دهد و با محاسبه این تغییر سطح، مقدار کربنات کلسیم در نمونه تعیین می‌شود. مزایای آزمایش کلسیمتری آهک، سادگی و سهولت در انجام آزمایش، سرعت بالا در تعیین نتایج، دقت بالا در اندازه‌گیری مقدار کربنات کلسیم و کاربرد وسیع در صنایع

مختلف می باشد. مبنای اندازه گیری کلسیت، فرایند انحلال آن در اسید کلریدریک می باشد و از راه گاز دی اکسید کربن حاصل، طبق رابطه شماره (۱) درصد کلسیت موجود در سنگ را نشان می دهد (یمانی، ۱۳۹۴).



از طریق رابطه شماره (۲) می توان درصد آهک با کلسیت موجود در سنگ پودر شده را محاسبه کرد (رضائی عارفی و همکاران، ۱۳۹۹).

$$\% \text{CO}_3\text{Ca} = V * 100 / N * 224 \quad (۲)$$



شکل (۷): دستگاه کلسیمتر برنارد

Figure (7): Bernard calcimeter device

برای انجام آزمایش با استفاده از روش حجم سنجی، از چهار سازند مهم کارستی حوضه چهار نمونه بردار صورت گرفت و در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج آزمایش مذکور در جدول شماره (۳) آمده است.

جدول (۳): میزان عنصر کلسیم (Ca) در حوضه آبریز کلات به تفکیک چهار سازند بر حسب درصد

Table (3): Amount of calcium (Ca) in the Chelat watershed, divided into four formations, in percentage terms

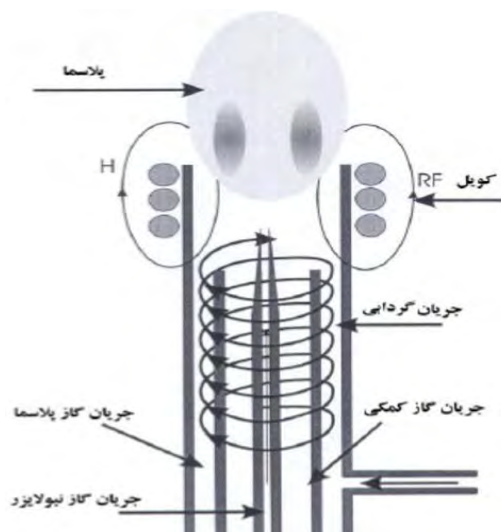
نوع سازند	میزان کلسیم به درصد
تیرگان	۳۹/۵۱
مزدوران ۲	۴۰/۵۰
چمن بید	۳۷/۴۰
کلات	۳۸/۶

با توجه به جدول کلسیمتری، بالاترین درجه خلوص آهک در سازند آهکی و ضخیم لایه مزدوران مشاهده می شود، بعد از آن تیرگان و سپس کلات و در نهایت چمن بید که کمترین میزان خلوص آهک را دارد.

روش ICP (اشعه ایکس برانگیخته با پلاسما)

یکی از پرکاربردترین روش های آنالیز عنصری برای تعیین نوع و غلظت عناصر، آنالیز ICP می باشد. این روش به دلیل مزایایی همچون قابلیت تشخیص تمامی عناصر، تداخل های شیمیایی بسیار کم و حد حساسیت بالا کاربردهای زیادی را در زمینه هایی نظیر مهندسی مواد، محیط زیست و شیمی پیدا کرده و در بعضی موارد جایگزین روش هایی چون طیف سنجی جذب اتمی و طیف سنجی گسیل شعله

شده است. مزایای این روش عبارتند از: قابلیت شناسایی تمامی عناصر، حساسیت بسیار بالا در حد ppb و آماده‌سازی آسان نمونه‌ها می‌باشد. در این روش برای برانگیخته ساختن اتم‌ها از پلاسما به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود.



شکل (۸): روش ICP و اجزاء جانبی آن

Figure (12): ICP method and its accessories

جهت انجام آزمایش با استفاده از تکنیک ICP از سنگ‌های چهار سازند مهم آهکی حوضه نمونه‌برداری شد و در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفت و نتایج آن به شرح جدول (۴) آمده است:

جدول (۴): میزان عنصر کلسیم (Ca) در حوضه کوهستانی کلات به تفکیک چهار سازند برحسب درصد

Table (4): Amount of calcium (Ca) in the Chelat Mountain Basin, divided into four formations, in percentage terms

نوع سازند	میزان کلسیم به درصد
تیرگان	۳۸/۹۰
مزدوران ۲	۳۸/۴۳
کلات	۳۸/۴۱
چمن بید	۳۶.۷۹

با توجه به نتایج حاصله از تکنیک ICP، بالاترین درجه خلوص آهک در سازند آهکی و ضخیم لایه تیرگان مشاهده می‌شود، بعد از آن مزدوران ۲ و سپس کلات و در نهایت سازند چمن‌بید، با کمترین میزان خلوص آهک قرار دارد (جدول ۴). شناخت درجه خلوص آهک و کلسیم جهت مدیریت سرزمین و برنامه‌ریزی محیطی که در راس آن پتانسیل‌یابی منابع آب می‌باشد، اهمیت بالایی دارد.

تکنیک میدانی جهت بررسی انحلال آهک

درز و ترک‌ها

تکنیک‌های میدانی جهت بررسی انحلال آهک متنوع و زیادند که در اینجا فقط به بررسی درزها و ترک‌ها در سازندهای حوضه آبریز کلات بسنده می‌شود. سنگ‌های کربناته به دلیل سختی و شکنندگی زیاد، درز و ترک‌های زیادی دارند، به طوری که شبکه‌ای وسیع از جوینت‌ها در این سنگ‌ها ایجاد می‌شوند که از لحاظ عرضی و سطح مقطع باهم تفاوت دارند. درزه‌های مذکور موجب تشدید فرآیند انحلالی در سنگ بستر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد درزه‌های مایل، افقی و عمودی در ابتدای ورودی آبشار قره‌سو در شمال غرب حوضه بر روی سازند تیرگان ایجاد شده‌اند که موجب تسریع فرایند انحلال در سازندهای کربناته می‌شوند.



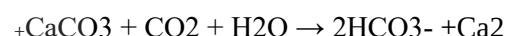
شکل (۹): از سمت راست: درزه‌های مایل، افقی و عمودی. آبشار قره سو. شمال غرب حوضه

Figure (9): From the right: inclined, horizontal and vertical joints. Qara Su waterfall. Northwest of the basin

ویژگی‌های هیدروشیمیایی

ترکیب شیمیایی آب‌های کارستی عموماً وابسته به انحلال کانی‌های کربناته است. کربنات کلسیم طی واکنش زیر (رابطه ۳) انحلال می‌یابد:

(۳)



بر اساس این معادله، انحلال سنگ‌های کربناته وابسته به مقدار CO_2 یا H_2CO_3 موجود در محیط است (کریمی و وردنجانی، ۱۳۸۹). هدایت الکتریکی آب با افزایش مواد محلول در آن افزایش می‌یابد. مقدار هدایت الکتریکی در نمونه‌های منطقه مورد مطالعه به عنوان نمونه جامعه آماری مجموع یون‌های موجود در آب، از حداقل ۳۳۷ تا حداکثر ۱۴۸۵ میکروزیمنس بر سانتیمتر در نوسان می‌باشند. به موازات افزایش میزان هدایت الکتریکی، اکثر یون‌های محلول در آب زیرزمینی نیز افزایش می‌یابند. بیشترین میزان در بین یون‌های اصلی مربوط به یون بی‌کربنات است. این موضوع می‌تواند ناشی از نقش سیستم‌های تعادلی کربناته و انحلال کربنات‌ها به عنوان سنگ مخزن اصلی در منطقه مورد مطالعه باشد (جدول ۵).

اهمیت هدایت الکتریکی (EC) بر کارست‌زایی

بر اساس استانداردهای بهداشت جهانی، حد مجاز هدایت الکتریکی برابر با ۴۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر است و بر اساس استانداردهای آب آشامیدنی ایران ۱۸۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر می‌باشد (پورسلطانی و همکاران، ۱۳۹۸). بیشترین EC در رودخانه‌هایی است که از آبرفت‌ها سرچشمه می‌گیرند و کمترین هدایت الکتریکی نیز به کارست و سازندهای سخت حوضه کلات مربوط است. از نظر تعداد چشمه، بیشترین فراوانی مربوط به واحدهای کارستی است. همان‌طور که در جدول (۵) آمده است کمترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به رودخانه‌های ژرف (۳۳۷)، حمام‌قلعه (۶۵۱) و قره‌سو (۸۶۶) می‌باشد. بنابراین هرچه هدایت الکتریکی (میزان غلظت محلول در آب) بیشتر باشد استعداد کارستی شدن کمتر می‌شود و برعکس هرچه میزان هدایت الکتریکی در آب کمتر باشد استعداد کارستی شدن را افزایش می‌دهد. بنابراین آب‌های زیرزمینی حوضه مورد مطالعه با توجه به هدایت الکتریکی، جهت شرب مناسب می‌باشند.

جدول (۵): نمونه‌برداری داده‌های کیفی آب زیرزمینی، ۱۴۰۳

Table (5): Sampling of groundwater quality data, 2024

محل نمونه‌برداری	utmy	utm x	TDS	EC	PH	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	TH
استی سو آبگرم	۴۰۸۹۵۰۰	۷۴۳۵۰۰	۸۷۵/۰۷	۱۳۸۹	۸	۲/۸	۸/۳	۷/۸	۳/۷	۳	۵۷۵
ژرف	۴۰۸۹۹۷۶	۷۳۶۵۲۴	۲۱۲/۳۱	۳۳۷	۸	۰/۳	۰/۸	۲/۵	۱/۱	۰/۲	۱۸۰
حمام قلعه	۴۰۸۹۹۷۰	۷۴۳۴۹۷	۴۱۰/۱۳	۶۵۱	۸/۱	۱/۶	۱/۷	۳	۲/۳	۱/۵	۲۶۵
استیق سو	۴۰۸۹۶۶۹	۷۴۴۴۱۸	۹۳۵/۵۵	۱۴۸۵	۸	۵	۷	۸/۳	۳/۷	۳	۶۰۰
قره سو	۴۰۹۴۹۳۶	۷۳۸۴۵۸	۵۴۵/۵۸	۸۶۶	۸/۲	۰/۴	۶	۴/۵	۴	۰/۴	۴۲۵

کل مواد جامد محلول در آب

مجموع مقادیر تمام کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی بر حسب میلی گرم بر لیتر را، کل مواد جامد محلول می‌گویند که کاربرد زیادی در کشاورزی، صنعت و شرب دارد. مقادیر کل بار جامد محلول در آب بر اساس نمونه‌برداری از رودهای حوضه آبریز کلات در جدول شماره (۶) آورده شده است.

سختی کل (TH)

سختی کل یا TH ناشی از حضور عناصر کلسیم و منیزیم است و به مجموع غلظت آنها، سختی کل می‌گویند. به دلیل واکنش بین این کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در آب، رسوبات داخل آب ایجاد می‌شود. برای محاسبه سختی کل نمونه‌های آب، از رابطه شماره (۴) استفاده می‌شود:

$$H = 2.5 \times (Ca) + 4.5 \times Mg \quad (4)$$

که در آن H مقدار سختی بر حسب میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم می‌باشد. Ca^{2+} و Mg^{2+} غلظت‌های کلسیم و منیزیم بر حسب میلی گرم در لیتر می‌باشد. با مطابقت با جدول استانداردهای آب آشامیدنی ایران و بهداشت جهانی، حداکثر مجاز سختی کل در آب آشامیدنی ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر است. بر اساس داده‌های جدول شماره (۵)، سختی کل آب رودخانه ژرف، ۱۸۰؛ حمام قلعه، ۲۶۵ و رودخانه قره سو ۴۲۵ میلی گرم در لیتر می‌باشد که همگی برای آب شرب مناسب هستند.

جدول (۶): کیفیت شیمیایی آب رودهای حوضه آبریز کلات

Table (6): Chemical quality of water in the rivers of the Kalat watershed

نام رود	g/l T.D.S	Ec x 10 ⁻⁶	(PH) آب	SAR	Na/	درجه مرغوبیت خاک
قره تیکان	۷۲۶	۱۱۶۰	۸/۲	۱/۸۳	۳۱/۲۲	C3 - S1 (خوب)
لایین سو	۳۶۲	۶۱۵	۷/۵	۰/۵۴	۱۴/۰۶	C2 - S1 (متوسط)
چهچه	۱۱۰۰	۱۷۵۰	۷/۹	۲/۷۸	۳۷/۲۵	C3 - S1 (خوب)
قره سو	۸۳۲	۱۳۲۰	۷/۶	۱/۷۷	۲۸/۵۷	C3 - S1 (خوب)
ارچنگان	۵۰۵	۶۸۹	۸/۵	۰/۵۶	۱۳/۷	C2 - S1 (متوسط)

نسبت کلسیم به منیزیم

در آبخوان‌های کارستی افزایش غلظت منیزیم و بالا بودن میزان کلسیم به منیزیم نشانگر توقف طولانی آب در آبخوان می‌باشد که حاکی از حضور آهک دولومیتی در محدوده تغذیه و مخزن ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد (معمدنی راد و همکاران، ۱۴۰۲). نسبت غلظت یون

کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی کربناته معیار مهمی برای تشخیص سفره‌های کارستی آهکی از سفره‌های کارستی دولومیتی می‌باشد. به‌طور کلی نسبت‌های نزدیک به ۱ مربوط به سفره‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های در محدوده ۲ تا ۱۰ مربوط به سفره‌های کارستی آهکی است. میزان نسبت کلسیم به منیزیم (SAR) شاخص مناسبی برای نشان دادن نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سازندهای کارستی می‌باشد که بر اساس داده‌های جدول شماره (۶)، این نسبت برای رودخانه قره‌سو (شمال غرب حوضه) در سازند توده‌ای و ضخیم‌لایه تیرگان ۱.۷۷ و برای رودخانه‌های ارچنگان و لایین‌سو کمتر از ۱ می‌باشد.

به منظور اکتشاف اولیه مناطق کارستی با پتانسیل بالای آب زیرزمینی، از نمایانگرهای سطحی و پارامترهای موثر بر کارست‌شدگی استفاده می‌شود. منابع آب زیرزمینی حوضه کلات بر مبنای آخرین آماربرداری در فروردین ماه سال ۱۴۰۳ شامل ۴۹ حلقه چاه، ۸ رشته قنات و ۳۵۵ دهنه چشمه می‌باشد.

جدول (۷): وضعیت آب‌های زیرزمینی حوضه کلات (تخلیه میلیون مترمکعب)

Table (7): Groundwater status of the Kalat Basin (discharge in million cubic meters)

مجموع تخلیه سالانه	چشمه		قنات		چاه نیمه عمیق		چاه عمیق		آب سال منابع
	تخلیه	تعداد	تخلیه	تعداد	تخلیه	تعداد	تخلیه	تعداد	
۱۰۵/۹۳	۱۰۴/۱۶	۳۵۵	۰/۷۵۶	۸	۰/۲۴۳	۳۹	۰/۷۶۷	۱۰	۱۳۸۲

در مجموع بررسی کیفی منابع آب‌های زیرزمینی نشان‌دهنده کیفیت مناسب آن در کل حوضه است به‌جز در مواردی که دبی چشمه‌ها تحت‌تاثیر سازندهای نامناسب اثرگذار بر کیفیت آب قرار گرفته‌اند. سازندهای آبدراز، آبتلخ و پسته‌لیق به علت دارا بودن کانی‌های قابل حل و لایه‌های گچی سازند چهل‌کمان، بر کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی تأثیرات نامطلوبی گذاشته است. دلیل کیفیت نامطلوب آب چشمه‌های شمال کلات و جنوب شرق روستای چهچه به علت تماس با سازندهای چهل‌کمان و پسته‌لیق می‌باشد. داده‌های جدول شماره (۸) کیفیت منابع آب زیرزمینی و جدول شماره (۹) درجه مرغوبیت آب زیرزمینی به‌لحاظ مصارف کشاورزی و آب‌شرب نشان می‌دهد.

جدول (۸): کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه

Table (8): Quality of groundwater resources in the region

شرح	هدایت الکتریکی (EC x 10 ⁻⁶)	کلر محلول در آب mg/l (CL)
حداکثر	۱۳۵۵	۹۲/۳
میانگین	۱۳۱۵	۹۰/۵
حداقل	۱۲۷۵	۸۸/۷

جدول (۹): درجه مرغوبیت آب زیرزمینی به‌لحاظ مصارف کشاورزی و آب‌شرب در حوضه مورد مطالعه

Table (9): Degree of groundwater quality in terms of agriculture and drinking in the study basin

نوع سازند مصرف	مزدوران	شوریجه	تیرگان	سنگانه	آب دراز	چهل کمان
آبیاری و کشاورزی بر اساس دیاگرام ویلکوکس	C3 -S1 دارای محدودیت	C2 -S1 خوب	C2 -S1 خوب	C3 -S1 دارای محدودیت	C3 -S2 دارای محدودیت زیاد	C4 -S2 دارای محدودیت خیلی زیاد
آب شرب بر اساس دیاگرام شولر	فاقد محدودیت	فاقد محدودیت	فاقد محدودیت	به لحاظ مزه و طعم دارای محدودیت	فاقد محدودیت	دارای محدودیت

نتیجه گیری

بحرانی بودن وضعیت منابع آبی کشور، لزوم توجه به پتانسیل‌های منابع آب کارستی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. با توجه به اینکه در مناطق خشک و نیمه خشک میزان بارندگی پایین است منابع آب‌های سطحی به صورت فصلی یا محدود هستند. منابع آب کارستی که در شکاف‌ها و حفرات سنگ‌های آهکی ذخیره می‌شوند، معمولاً پایدارترین منبع آب شرب و کشاورزی در این مناطق می‌باشند. بنابراین کارست نقش اساسی در ذخیره و انتقال آب‌های زیرزمینی دارد که می‌تواند در مواقع خشکسالی، منبع حیاتی آب، برای ساکنان آن منطقه باشد. در همین راستا جهت شناسایی منابع آب کارستی حوضه آبریز کلات، ویژگی‌های لیتولوژیکی، ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی موثر بر فرایند کارست‌زایی محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه نشان داد حدود ۲۵ درصد از مساحت حوضه را سازندهای کارستی تشکیل می‌دهد. مطالعه نشان داد اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی آب و هوایی کوپن، نیمه خشک محسوب می‌شود و حدود ۲۵ درصد از مساحت حوضه را سازندهای کارستی تشکیل می‌دهد. ویژگی‌ها مذکور موجب می‌شود توجه به امر تامین منابع آب منطقه از طریق اکتشاف منابع آب کارست دو چندان شود. در این پژوهش از روش‌های میدانی، آزمایشگاهی و کتابخانه‌ای استفاده گردید. مطالعات نشان داد حدود ۲۵ درصد از مساحت حوضه آبریز کلات کارستی می‌باشد بنابراین مطالعه بر روی سازندهای کارستی جهت اکتشاف منابع آب کارست به عنوان منابع آب جایگزین باید مورد توجه مدیران سازمان آب منطقه‌ای در استان خراسان رضوی قرار گیرد. وسیع‌ترین گسترش رخنمون‌ها متعلق به سازندهای مزدوران و شورجه می‌باشد. حدود ۵۵/۵ درصد از مساحت حوضه را سازندهای کربناته و ۴۴/۵ درصد آن را سازندهای بی‌کربناته تشکیل می‌دهند. بیشتر سنگ‌های حوضه آبریز کلات از کلسیت تشکیل شده‌اند و مقدار PH آب آن ۷/۶ می‌باشد بنابراین شرایط مساعدی برای انحلال فراهم می‌باشد. آزمایش کلسیمتری نشان داد بالاترین درجه خلوص آهک در سازند آهکی و ضخیم لایه مزدوران قرار دارد. بر اساس آزمایش آی سی پی، بالاترین درجه خلوص آهک در سازند آهکی و ضخیم لایه تیرگان مشاهده می‌شود.

کمترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به رودخانه‌های ژرف (۳۳۷)، حمام قلعه (۶۵۱) و قره‌سو (۸۶۶) می‌باشد. با توجه به پایین بود ES رودخانه‌ای مذکور استعداد کارستی شدن مناطق مذکور بیشتر بوده و بر جهت شرب مناسب می‌باشند. با بررسی سختی کل آب رودخانه‌های منطقه مشخص گردید؛ رودخانه‌های ژرف، ۱۸۰؛ حمام قلعه، ۲۶۵ و رودخانه قره‌سو ۴۲۵ میلی‌گرم در لیتر (با درجه سختی مناسب) همگی برای آب شرب مناسب هستند. میزان نسبت کلسیم به منیزیم (SAR) برای رودخانه قره‌سو ۱/۷۷ و برای رودخانه‌های ارچنگان و لایین‌سو کمتر از ۱ می‌باشد. در پایان پیشنهاد می‌شود اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب کارستی به‌عنوان راهکار راهبردی در تامین پایدار آب شرب و کشاورزی استان خراسان رضوی در دستور کار قرار گیرد. مطالعات تفصیلی هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی (ردیابی جریان، ظرفیت آبدهی، کیفیت فصلی) در زون‌های پتانسیل کارستی به‌ویژه سازندهای مزدوران و تیرگان انجام شود. پایش کمی و کیفی مستمر (TDS, TH, EC) نسبت کلسیم به منیزیم، نیترات و فلزات سنگین در منابع سطحی و کارستی برای تضمین سلامت آب شرب ضروری است. در انتخاب رودخانه‌های مناسب برای تامین آب شرب، رودخانه‌های ژرف و حمام قلعه به دلیل EC پایین و سختی مناسب در اولویت قرار گیرند. برای رودخانه‌های ارچنگان و لایین‌سو که نسبت کلسیم به منیزیم کمتر از ۱ دارند، استفاده از روش اختلاط آب یا فرایندهای اصلاحی پیش از مصرف شرب توصیه می‌شود. در برنامه‌ریزی بلندمدت مدیریت منابع آب منطقه، استفاده از چاه‌های پایلوت کارستی و بررسی دبی پایدار در شرایط خشکسالی مورد توجه قرار گیرد. این مطالعه می‌تواند برای مدیران محلی و تصمیم‌گیران حوزه منابع آب استان خراسان رضوی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آبی مفید واقع شود. نتایج تحقیق حاضر قابلیت تعمیم به سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور را دارد و می‌تواند به عنوان یک الگوی علمی برای اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب کارستی مورد استفاده قرار بگیرد.

References

- Akbari Jonush, R., Ghorashi, M., Babaei, H., Nakhaei, M., & Pourkermani, M. (2018). The effect of tectonic structures on the exploration of karst water resources using the Fuzzy-AHP method, a case study of the Bastam area of Semnan province. *Quarterly Journal of Earth Sciences*, 28(109), 109-120. doi: 10.22071/gsj.2018.80038. (in Persian).
- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Leiden: Balkema, 649 p.
- Bai, Y., Liu, Q., Gu, Z. et al. (2019). The dissolution mechanism and karst development of carbonate rocks in karst rocky desertification area of Zhenfeng-Guanling-Huajiang County, Guizhou, China. *Carbonates Evaporites* 34, 45-51.
- Benischke, R., Goldscheider, N., and Smart, C. (2007). Tracer techniques, In: Editors N. Goldscheider, and D. Drew *Methods in Karst Hydrogeology* (London, United Kingdom: Taylor and Francis Group), 147-170.
- Behniafar, A., & Ghanbarzadeh, H. (2019). *Karst Geomorphology*, Mashhad, Second Edition, Islamic Azad University of Mashhad Publications. (in Persian).
- Çallı, K. Ö., Chiogna, G., Bittner, D., Siville, V., Labat, D., Richieri, B., et al. (2025). Karst water resources in a changing world: Review of solute transport modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, 63, e2023RG000811.
- Choquette, P.W. & Pary, L.C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *A.A.P.G. Bull.*, 54: 207-250.
- Dreiss, S.J. (1982). Linear kernels for karst aquifers. *Water Resources Research*, 18 (4): 865-76.
- Ford, D. & Williams, P. D. (2007). *Karst Hydrogeology And Geomorphology*. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Gu, X., Ma, T., Wu, Y., Wu, X. (2017). Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater in the Karst Region, Southwest China. *Procedia Earth and Planetary Science* (17), 245-248.
- Jeannina, P.Y.; Hessenauer, M.; Malard, A.; Chapuis, V. (2015) Impact of global change on karst groundwater mineralization in the Jura Mountains. *Science of the Total Environ.* Volume 541, 1208-1221. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.10.008.
- Jasechko, S., Perrone, D. (2021) Global groundwater wells at risk of running dry. *Science*, Volume 372, 421-418. DOI: 10.1126/science.abc2755.
- Jebreen, H.; Wohnlich, S.; Banning, A.; Wisotzky, F.; Niedermayr, A.; Ghanem, M. (2018). Recharge, geochemical processes and water quality in karst aquifers: Central West Bank, Palestine. *Environ. Earth Sciences.*, Volume 77, 261. DOI:10.1007/s12665-018-7440-4.
- Habibinia, H., Kord, M., Taheri, K. (2021). The effect of geological formations on the quality and geochemical characteristics of groundwater in the Shian Plain, Kermanshah. *Journal of Hydrogeology*, 6 (1), 114-125. (In Persian).
- Kazemi, R., Ghayoumian, J., & Jalali, N. (2006). Investigating the role of structural factors in the abundance of water resources in the Lar karst region using remote sensing and GIS. *Research and Construction*, 19(3(Supplement 73) in Natural Resources), 33-41. SID. <https://sid.ir/paper/20212/fa>. (in Persian).
- Karimi Vardanjani, H. (2010). *Karst Hydrogeology, Concepts and Methods*, Eram Shiraz Publications, p. 130. (in Persian).
- Korkmaz, N. (1990). The Estimation Of Groundwater Recharge From Spring Hydrographs. *Hydrological Sciences*, 35, 209-217.
- Komac, B. (2006). The Karst Springes Of The Kanin Massif. *Kra[Ki Izvir Pod Kanin Skim Pograje*, [Http://www.Zrc-Sazu.Si/Giam/Zbornik/Komac41](http://www.Zrc-Sazu.Si/Giam/Zbornik/Komac41).
- Kalhor, Koosha (2019) Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 8, pp: 104-121. DOI:10.1016/j.gsd.2018.10.004.
- Maghami Moghim, G. (2017). Investigation of the factors affecting the formation and expansion of karsts in the Parchin catchment area in northeastern Iran. *Journal of Geography and Development*, 15(48), 245-264. doi: 10.22111/gdij.2017.3371. (in Persian).

- Moamedi Rad, M., Goli Mokhtari, L., Bahrami, S., & Zanganeh Asadi, M. (2017). Investigation of Karst Development Using Hydrological and Hydrochemical Characteristics of Springs (Case Study: Roein Basin in North Khorasan Province), *Quarterly Journal of Physical Geography*, Year 15, Issue 61, pp. 59-85. (in Persian).
- Moghimi, E., Mahmoudi, F. (2004). *Research Method in Physical Geography*, Qoms Publications, Tehran. (in Persian).
- Mousavi Harami, R. (2004). *Sedimentology*, Beh Nashr Publications (in Persian).
- Poursoltani, M., Kazemi, N., & Fazel Valipour., M. (2019). The Effect of Sedimentary Units on Water Composition and Quality: An Example from the Kardeh Basin, Northeast Mashhad, Iran. *Sedimentary Facies*, 12(1), 35-52. doi: 10.22067/sed.facies.v12i1.67331. (in Persian).
- Rezaei Arefi, M., Zanganeh Asadi, Mohammad., Behniafar, A., & Javanbakht., M. (2019). Calculating the rate of karst erosion using experimental and laboratory techniques in the Kalat watershed in northeastern Iran. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(3), 64-79. (in Persian).
- Rezaei Arefi, M. (2019). *Karst geomorphology study of the Kalat mountain basin with emphasis on land management*, PhD thesis, Hakim Sabzevari University. (in Persian).
- Lopez- Chicano, M., Bouamama, M., Vallejos, A And Pulido- Bosch, A. (2001). Factors Which Determine The Hydro Geochemical Behavior Of Karstic Springs: A Case Study From Betic Cordilleras, Spain. *Applied Geochemistry*, 16, 1179-1192.
- Maire, R. (1990). La haute montagne calcaire. *Karstologia Mem.* 3: 731 p.
- Ozler, H.M. (2010). Carbonate Weathering And Connate Seawater Influencing Karst. Groundwater's In The Gevas-Gurpinar-Gu"Zelsubasins, Turkey. *Environmental Earth Science*, 61, 323-340.
- Nadari, R and Alizadeh, H. (2025). 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. (in Persian).
- Nejad Soleimani, H., Dostan, R., Velayati, S., Behniafar, A., Jihadi Torghi, M. (2012). The role of climate on the diversity and morphological evolution of carbonate karst karsts using geomorphometric techniques in climatic zones of the Kalat Basin, East of Kopeh Dag, <https://civilica.com/doc/1571128>. (in Persian).
- Stevanović, Z., Gunn, J., Goldscheider, N., & Ravbar, N. (2024). *Karst: Environment and Management of Aquifers*. Groundwater Project.
- Velayati, S. (2015). *Karst Geomorphology*, Mashhad University Jihad Publications. (in Persian).
- Vaezi Hir, A., Jabraeili Andrian, N., & Bakhtiari, Sh. (2019). Investigation of karst development in Kurdistan Province; Formation mechanism of cave geomorphology and hydrogeology of karst springs. *Hydrogeomorphology*, 6(20), 41-56. (in Persian).
- Yamani, M. (2015). *Practical Guide to Field and Laboratory Techniques*, University of Tehran (in Persian).
- Zhang, Kn., Zhu, Kf., He, Y. et al. (2022). Experimental study on karst development characteristics of calcrete and analysis of its dissolution mechanism. *Carbonates Evaporites* 37, 41 <https://doi.org/10.1007/s13146-022-00787-0>.