

زمین‌ریخت‌شناسی کارست در سنگ‌های کربناته گستره آبگرم، جنوب استان قزوین

پرویز آرمانی^(۱*)، مه‌ری کریمی^(۲) و مهدی تاج‌آبادی^(۳)

۱. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲. کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران

۳. دکترای آب زیرزمینی، شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

چکیده

شناخت پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناسی کارست که در اثر انحلال ایجاد شده‌اند، می‌تواند کمک شایانی به شناخت و گسترش کارست کند. از این رو، همواره زمین‌ریخت‌شناسی نخستین مرحله در بررسی فرایند کارستزایی است. گستره آبگرم در پهنه ساختاری ایران مرکزی قرار دارد و دربرگیرنده سازندهای دوران‌های دیرینه‌زیستی، میان‌زیستی، و نوزیستی است. مهمترین سازندهای کربناته آبگرم سازندهای سلطانیه، روته، الیکا، لار و قم هستند. در این پژوهش، پس از بررسی‌های میدانی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی کربناته و مقایسه آن‌ها از دید گسترش زمیندیس‌های کارستی، توان کارست‌زایی آن‌ها بررسی شد. نمونه‌برداری از چشمه‌های کارستی در دو دوره خشک و تر، همچنین اندازه‌گیری pH، EC، و دما روی زمین صورت پذیرفت. بررسی‌های سنجش از دور به وسیله نرم‌افزار ILWIS بر روی تصاویر ماهواره‌های لندست برای جداسازی، محاسبه مساحت سازندهای کربناته انجام گرفت. برای بررسی و تفسیر یافته‌های واکاوی‌های شیمیایی از نرم‌افزار AqQa و برای مدل‌سازی شیمی‌آب از نرم‌افزار Phree Qc بهره‌گیری شد. مهم‌ترین زمیندیس‌های کارستی در پهنه شامل انواع کارن، غارک، غار و چشمه کارستی هستند. برپایه تلفیق بررسی‌های میدانی و داده‌های سنجش از دور، شدت کارستی‌شدن در پهنه آبگرم به ترتیب از زیاد به کم شامل: سازندهای قم، سلطانیه، لار و کرتاسه می‌باشد. برپایه گسترش کارست، کارست آبگرم، بخشی و کم ژرف؛ و برپایه چرخه کارست، نوجوان تا جوان است.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، جنوب قزوین، زمیندیس‌های، کارست‌زایی، هیدروشیمی.

مقدمه

سنگ‌های رسوبی، مانند سنگ‌های تبخیری، نیز نسبت می‌دهند، نواحی کارستی دارای ویژگی‌ها و زمیندیس‌های ویژه در سطح و زیر سطح زمین هستند. مسیرهایی که در امتداد آنها آب جریان می‌یابد باعث ایجاد این زمیندیس‌ها شده است. این پدیده بیشتر در اثر گسترش تخلخل ثانویه ایجاد می‌شوند. Cvijić (1925) مناطق کارستی را به سه

کارست پدیده‌ای در پوسته زمین است و نشانه‌های آن به صورت پدیده‌های گوناگون مانند حفره‌ها و غارها در سطح و زیر زمین دیده می‌شود. در واژگان فنی به پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربناته (سنگ‌آهک و دولومیت) کارست گفته می‌شود (قبادی، ۱۳۸۸). Ford and Williams (2007) واژه کارست را به دیگر

1. Karstic landforms

* نویسنده مرتبط: armani@sci.ikiu.ac.ir

و ورود و اختلاط سایر آب‌ها به سامانه است (شاهسوندی، ۱۳۸۷). رنگزن و همکاران (۱۳۹۶) آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی را با بهره‌گیری از روش COP مورد بررسی قرار دادند. باقری و همکاران (۱۳۹۸) اثر بارش و لیتولوژی در ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی استان خراسان شمالی را بررسی کردند. محمدی بهزاد و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم بر روی منابع تغذیه چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان پژوهشی انجام دادند. شمعانیان و مریدی (۱۳۹۵) کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه نهشته بوکسیت رسی شیرین‌آباد را در جنوب خاوری گرگان بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در اثر رویداد زمین‌ساختی سیمین پیشین فرایند کارست‌زایی در سازند الیکا رخ داده است.

بیش از ۱۱٪ سطح کشورمان را سازندهای کارستی می‌پوشاند (ناصری، ۱۳۷۰). امروزه با توجه به برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نگاه کارشناسان به‌ویژه در کشورهای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران، بیش از پیش متوجه برداشت از منبع آب کارستی شده است. در آمریکا نزدیک ۴۰ درصد از آب مورد نیاز این کشور از منابع کارستی به‌دست می‌آید (Ford and Williams, 2007). نزدیک ۳۵ درصد از مساحت فرانسه از سازندهای کارستی پوشیده شده و سهم این سازندها در تأمین آب آشامیدنی این کشور نیز، به همین میزان است (Bakalowicz, 2005). تمرکز جریان و ذخیره آب از مهمترین کارکردهای هیدرولیکی در چهره کارست درونی می‌باشد (Chow, 1988). گوناگونی زمین‌ریخت‌شناسی کارست^۱ و گنجینه مردم‌شناسی به همراه گوناگونی زیستی در سرزمین‌های کارستی نیز از دیگر نقاط بارز و با اهمیت این مناطق است می‌تواند در ساختن الگوهای بهینه برای پیشرفت پایدار سودمند باشد. افزون بر این، امروزه زمین‌گردشگری کارست در کشورهای دارای این پدیده شگفت‌انگیز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Migon, 2011).

منطقه تقسیم کرد و شامل کارست فراگیر^۲، کارست بخشی^۳ و کارست میانه^۴ می‌شود. کارست فراگیر هم در سطح زمین و هم در زیر زمین به خوبی گسترش یافته است، اما در کارست بخشی زمیندیس‌های کارستی به صورت فراگیر گسترش نیافته و بیشتر در سنگ‌آهک‌های نازک‌لایه و ناخالص مانند گِل‌سنگ آهکی، دولومیت و بنتونیت دیده می‌شوند. کارست میانه را به دلیل درجه کارستی شدن، میان کارست فراگیر و کارست بخشی قرار می‌دهند، اما بیشتر همانند کارست‌های فراگیر هستند. این نوع کارست بیشتر در سنگ‌آهک‌ها یافت می‌شوند و توسط رسوبات ناتراوا و انحلال‌پذیری کم از هم جدا شده‌اند. در رده‌بندی مهندسی، کارست به نوجوان، جوان، رسیده، پیچیده ۲ گسترده دسته‌بندی می‌شود (Waltham and Fookes, 2003). نشانه‌ها و عوارض کارستی همواره به صورت کارست بیرونی و درونی رده‌بندی می‌شوند. سیمای کارست بیرونی بر روی نقشه‌های زمین‌ریخت‌شناسی دیده می‌شود اما سیمای کارست درونی از بالاترین بخش‌های سنگ‌های کارستی آغاز و به سوی ژرفا گسترش می‌یابند، در نتیجه به آسانی آشکار نمی‌شوند. کارست‌زایی در زمان‌های پیش از کواترنر (کارست دیرینه^۵) کمیاب و آن هم بیشتر وابسته به بوکسیت‌های کارستی است. بنابراین، فرایند کارست‌زایی، مانند آن چیزی که امروزه می‌بینیم، تنها در کواترنر، به‌ویژه در طی ۴۳۰۰ سال در دوران پساسیلاب^۶ رخ داده است (Silvestra, 2000).

سنگ‌های کربناتی از منابع مهم مخازن آب زیرزمینی به شمار می‌روند. ویژگی شیمیایی آب زیرزمینی یک گستره متأثر از ترکیب سنگ‌ها، توپوگرافی، کیفیت آب تغذیه‌کننده و شرایط اقلیمی آن است (Anderson et al., 1988). کیفیت آب زیرزمینی یکی از ویژگی‌های شیمی آب می‌باشد که درباره توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی انواع سازندهای شیمیایی و قابلیت مصرف آب برای اهداف گوناگون آشامیدن، کشاورزی و صنعت گفتگو می‌نماید (Alley, 1993). اگر زیر زمین را به عنوان یک سامانه در نظر گرفت، کیفیت آب خروجی از این سامانه تابع کیفیت آب ورودی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سامانه، زمان گذر یا ایست آب در سامانه، واکنش‌های شیمیایی میان سامانه و آب در طول مسیر حرکت

1. Holokarst
2. Merokarst
3. Transitional
4. Paleokarst
5. Post-Flood era
6. Karst geomorphology

انواع کارن‌ها همواره اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا در چنین سامانه‌ای، بلوک‌های سنگی از یکدیگر جدا می‌شوند (Ford and Williams, 2007). تخلخل و تراوایی در راستای پهنه‌های شکسته سنگ‌های کربناته می‌تواند توسط جریان شماره (سیال) بالارونده به گونه فزاینده‌ای افزایش یابد و باعث گسترش کارست ژرف‌زادا شوند (Ennes-Silva et al., 2015).

چگونگی قرارگرفتن درزه‌ها بسیار مهم است زیرا در درزه‌های عمود بر هم، مجاری کارستی و غار به آسانی ساخته می‌شوند. از سوی دیگر ترک‌های سطحی که نتیجه فرآیندهای بیرونی است، بر روی سنگ‌های کربناتی در گسترش و پیدایش کارست نقش تعیین کننده‌ای دارند (ناصری و همکاران، ۱۳۹۱؛ مقیمی، ۱۳۹۱). آب، فاکتور اصلی اقلیمی در گسترش کارست است. این عامل، اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می‌باشد. به صورت طبیعی، کارست در مناطقی که میزان بارندگی بیشتر باشد، پیشرفت می‌کند. بنابراین، در مناطق خشک (مانند بیابان) یا بسیار سرد (قطبی) کارست گسترش نمی‌یابد (کریمی‌وردنجانی، ۱۳۹۴).

روش پژوهش

پراکندگی و گسترش سنگ‌های کربناته گستره آبگرم با به کارگیری نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰۰ آوج (Bolourchi, 1978) شناسایی شد. بازدیدهای میدانی برای بررسی سازندهای کربناته گستره آبگرم، شناسایی زمیندیس‌های کارستی، میزان و شدت کارست‌زایی در آن‌ها انجام گرفت (شکل ۱). برای بررسی‌های دقیق سنگ‌شناسی، از هر واحدهای سنگی دست کم یک نمونه برداشته شد. پس از تهیه بُرش نازک، برای شناسایی کانی کلیست از دولومیت، بُرش‌ها با محلول آلینارین سرخ، به روش (Dickson, 1966)، رنگ‌آمیزی شد و برای بررسی سنگ‌شناختی، با میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرارگرفت. با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست، پس از زمین‌مرجع کردن^۱، محدوده سازندهای کربناته در گستره آبگرم از سازندهای غیرکربناته جدا شدند. سپس

در ایران بیشترین کارست‌زایی در پهنه ساختاری-رسوبی زاگرس دیده می‌شود. پس از زاگرس، در البرز، به دلیل فراوانی سازندهای کربناته و شرایط اقلیمی و شکستگی‌ها، این فرایند بیشتر دیده می‌شود. در پهنه ایران مرکزی بیشترین کارست‌زایی در سازند قم گزارش شده است (قبادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ غضنفری و همکاران، ۱۳۹۴ و رضائی عارفی و همکاران ۱۳۹۸) (Karimi Vardanjani et al., 2014; Moradi et al., 2018; Biri et al., 2017). هدف اصلی این پژوهش شناسایی زمیندیس‌های کارستی و نقش ویژگی‌های سنگ‌شناسی، شکستگی، و همچنین آب‌وهوا در شکل‌گیری کارست در گستره، همچنین ویژگی‌های چشمه‌های کارستی و همبستگی آن‌ها با سازندهای کربناته است که مورد گفتگو قرار گرفت.

عوامل تأثیرگذار بر زمین‌ریخت‌شناسی کارست

در فرآیند کارست‌زایی، پارامترهای موثر مانند سنگ‌شناختی، شکستگی و آب‌وهوا نقش مهمتری نسبت به ویژگی‌های خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و دیگر عوامل دارند. ترکیب سنگ‌شناختی و کانی‌شناسی عامل مهمی در پیدایش زمیندیس‌های کارستی است. سرعت انحلال کلسیت بیش از دولومیت است، بنابراین سنگ‌آهک انحلال‌پذیرتر از دولومیت است (Tucker, 2001). البته سرعت انحلال در سنگ‌های تبخیری بسیار بیشتر از سنگ‌آهک است. میزان انحلال در روی سنگ‌های سولفات‌ها (مانند سنگ‌گچ) نزدیک ۱۰ برابر سنگ‌آهک است (Ford and Williams, 2007). این نرخ انحلال در سنگ‌نمک از این هم بیشتر است (Bozak, 2008). بررسی‌های انجام شده در مقیاس زیرپهنه البرز میانی نشانگر این نکته است که ویژگی‌های سنگ‌شناسی مانند میزان خلوص سنگ‌آهک، رخساره سنگی و ستبرای واحدهای سنگی در میزان کارستی‌شدن موثر هستند (Ghanea and Ghazanfari, 2014). درزه و شکاف‌هایی که به صورت یک شبکه گسترش می‌یابند، در شکل‌گیری و ساخت زمین ریخت‌های زیرزمینی مانند مجاری بهم پیوسته و ایجاد زمیندیس‌های بیرونی کارست مانند

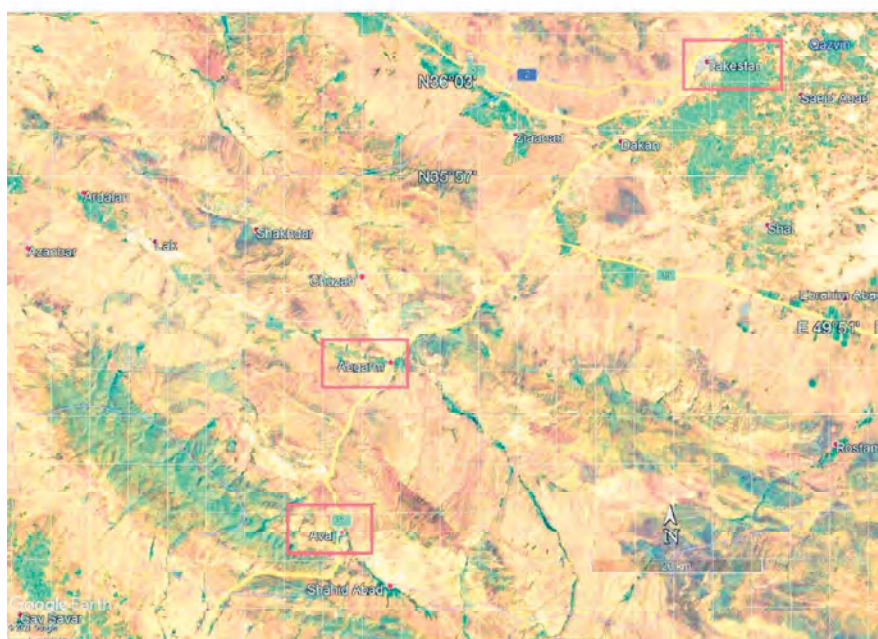
1. Hypogene karst

2. GeoRef

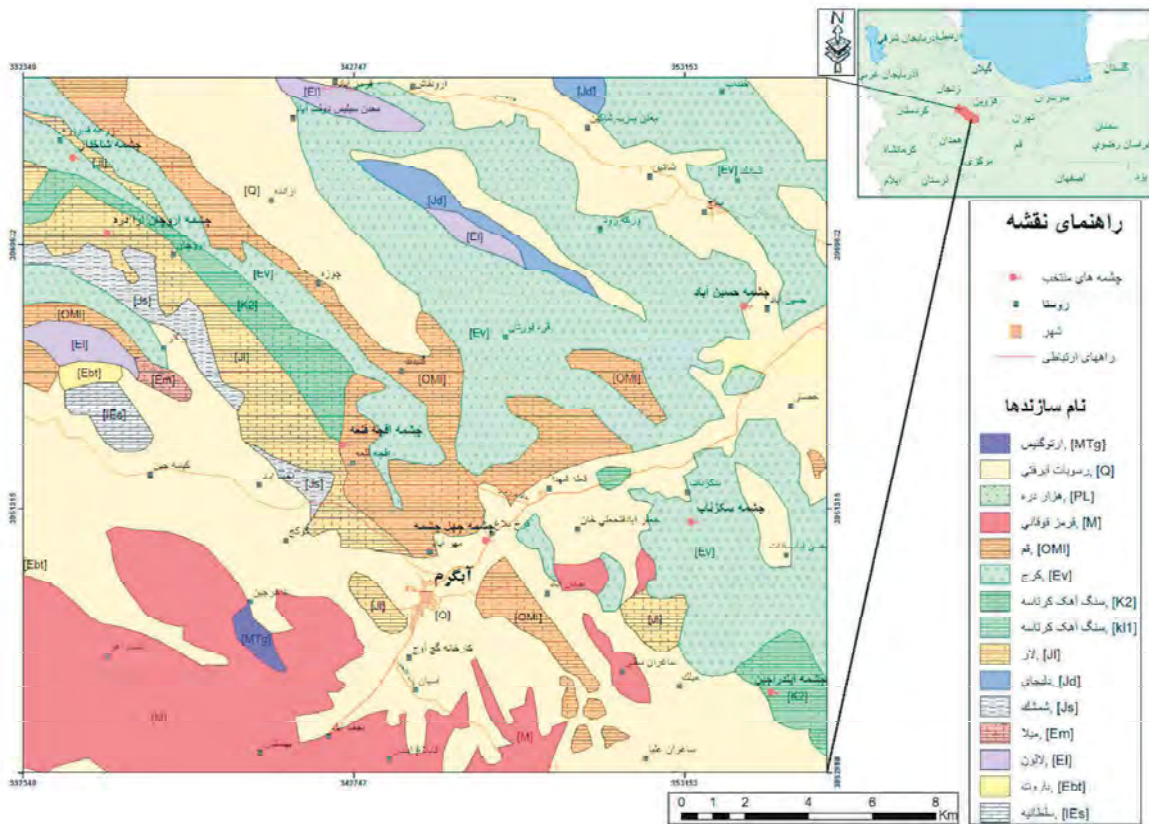
آنیون‌های اصلی و دمای آب، شاخص‌هایی چون P_{CO_2} ، SIC و SID محاسبه شد. در بررسی آبهای زیرزمینی در محیط‌های کارستی، محاسبه شاخص‌های SIC و SID می‌تواند مدت زمان ایست آب در آبخوان را نشان دهد. هر قدر زمان ایست آب در آبخوان کوتاه باشد، مقدار این شاخص‌ها کوچکتر می‌شود. همچنین با مقایسه این شاخص‌ها می‌توان به طور نسبی نشان داد، آب از محیط آهکی یا دولومیتی گذر کرده است (Langmuir, 1997). نمونه‌ها در آزمایشگاه سازمان آب منطقه‌ای استان قزوین واکاوی شدند.

گستره مورد بررسی در مختصات جغرافیایی از 49° تا $49^{\circ}30'$ طول‌خاوری و از $35^{\circ}30'$ تا 36° عرض شمالی است (شکل ۱). این گستره، از جنوب به استان همدان، از خاور به استان البرز و از باختر به استان زنجان محدود می‌شود.

با به‌کارگیری نرم‌افزار ILWIS الگوی شبکه آبراهه‌ها و خطواره‌های زمین‌شناختی استخراج شد. همچنین یکی از روش‌های شناسایی نوع سیستم جریان در آبخوان کارستی، به‌کارگیری نتایج واکاوی‌های شیمیایی آب چشمه‌های این مناطق است. برای شناخت سامانه ژئوشیمیایی آب زیرزمینی از چشمه‌ها در دو دوره خشک (اواخر تیرماه) و تر (فروردین) نمونه برداری شد. پارامترهای EC، pH و دما در روی زمین اندازه‌گیری شد و واکاوی شیمیایی نمونه‌های آب، در آزمایشگاه سازمان آب منطقه‌ای قزوین انجام گرفت. شکل ۲ جایگاه نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. برای بررسی و تفسیر داده‌های واکاوی شیمیایی از نرم‌افزار AqQa (Tick and Vlassopoulos, 2004) و برای مدل‌سازی هیدروشیمیایی از نرم‌افزار Phree Qc (Parkhurst and Appelo, 1999) بهره‌گیری شد. برپایه مقدار کاتیون و



شکل ۱. تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی در ایران، استان قزوین و گستره پژوهش (شهر تاکستان در بالا، آبگرم در بخش میانی و آوج در جنوب با چهارگوش سرخ رنگ نشان داده شد) (برگرفته از Google Earth)



شکل ۲. جایگاه نمونه برداری از چشمه‌ها در منطقه ابگرم، جنوب استان قزوین (نقشه زمین‌شناسی برگرفته از: Bolourchi, 1978)

زمین‌شناسی و چینه‌نگاری

در نزدیکی روستای آورنه، همچنین رخنمون‌های گسترده‌ای از این سازند در بخش‌های شمالی گستره دیده می‌شود (شکل ۴). سازند الیکا (تریاس زیرین تا میانی) از سنگ‌آهک سرشار از اکسید آهن در زیر و سنگ‌آهک و دولومیت به رنگ روشن در روی آن ساخته شده است. سازند لار (ژوراسیک بالایی) دارای سنگ‌آهک و دولومیت همراه با گچ است. واحدهای سنگی کربناته کرتاسه (کرتاسه میانی-بالایی) از سنگ‌آهک ساخته شده‌اند. سازند زیارت (ائوسن زیرین-میانی) دارای سنگ‌آهک نومولیتی است. سازند قم (الیگومیوسن)، گسترده‌ترین سازند کربناته، از سنگ‌آهک و سنگ‌آهک رسی ساخته شده است (شکل ۴).

یافته‌های پژوهش

بررسی‌های سنگ‌شناختی پُرش‌های نازک از سازندهای کربناته برای شناسایی دقیق سنگ‌شناسی آن‌ها انجام شد و

گستره مورد بررسی در جنوب استان قزوین و در پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران مرکزی و کمی در سنجند-سیرجان قرار دارد. این گستره در برگزیده سازندهای دوران‌های دیرینه‌زیستی، میانه زیستی و نوزیستی است. این سازندها از سنگ‌های گوناگون رسوبی آواری، کربناته و تبخیری، همچنین از انواع سنگ‌های آذرین ساخته شده‌اند. سنگ‌های کربناته چون سنگ‌آهک و سنگ‌دولومیت در سازندهای سلطانیه، میلا، روته، الیکا، دلچای، لار، کرتاسه، زیارت و قم دیده می‌شوند.

کهن‌ترین رخنمون شناخته شده در ناحیه مورد بررسی سنگ‌های دولومیتی خاکستری رنگ استروماتولیت‌دار همراه با باندها و گرهک‌های سیاه‌رنگ چرت سازند سلطانیه (کامبرین زیرین) است (شکل ۳). سازند میلا (کامبرین میانی-بالایی)، از سنگ‌آهک و دولومیت ساخته شده است (شکل ۳). بروزندهای شناخته شده سازند روته (پرمین) را

زمین‌ریخت‌شناسی کارست در سنگ‌های کربناته گستره آبگرم ...

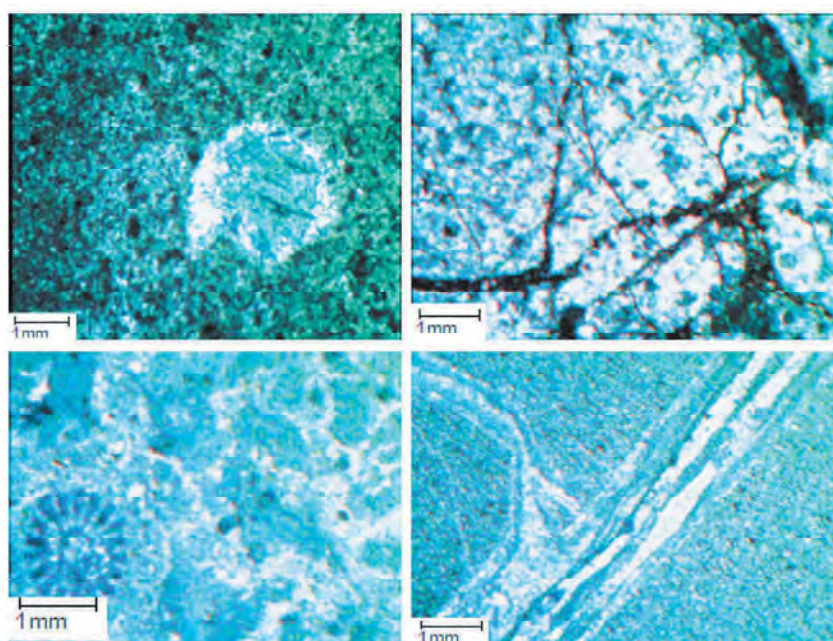
نشان داد بیشتر سنگ‌های کربناته از سنگ‌آهک و به میزان کمتر از سنگ‌های دولومیت است (شکل ۵). سازندهای سلطانیه، میلا و روته از سنگ دولومیت، و سازند قم از سنگ‌آهک ساخته شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۳. سازند سلطانیه، جاده شنیز-آورنه، دید به سوی باختر (راست)، سازند میلا، نمایی از روستای آورنه، دید به سوی جنوب خاور (چپ)



شکل ۴. سازند روته، شمال باختر روستای آورنه، دید به سوی جنوب (راست)، سازند قم، شمال آبگرم (دید به سوی شمال باختر) (چپ)

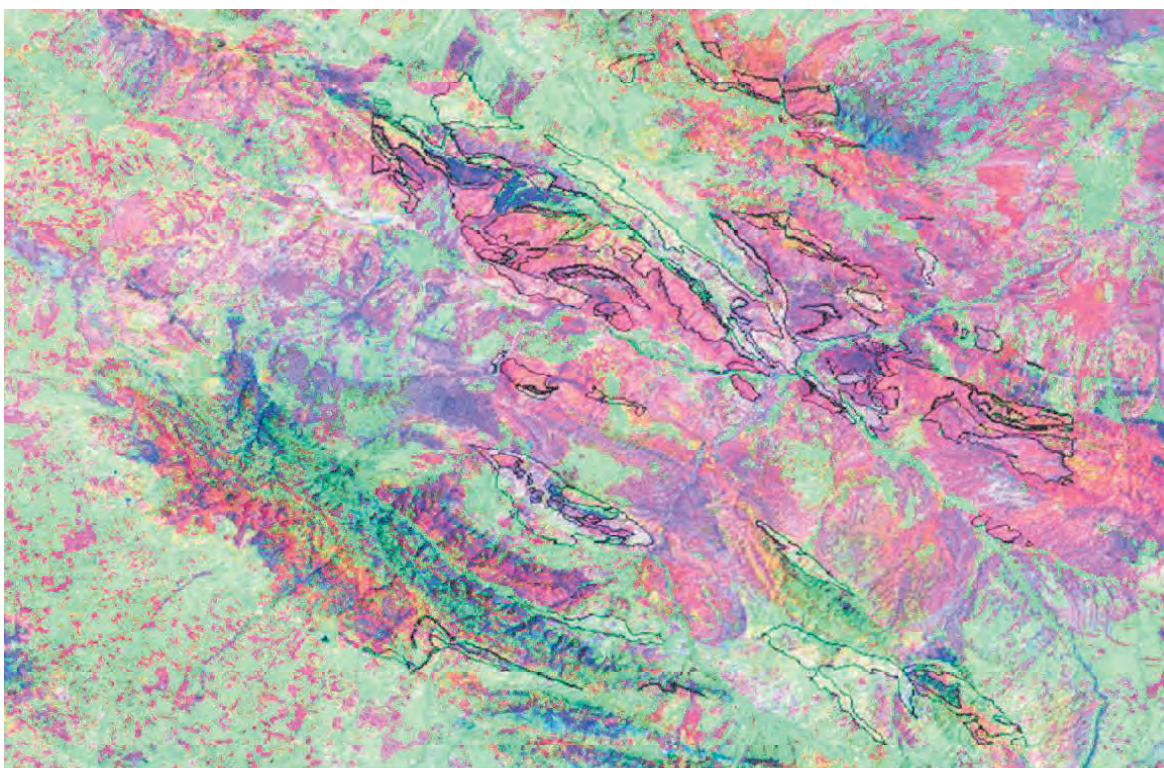


شکل ۵. بُرش‌های نازک میکروسکوپی، در نور XPL. (a) دولومیت، سازند سلطانیه، (b) دولومیت، سازند میلا، (c) دولومیت، سازند روته، (d) سنگ‌آهک فسیل‌دار، سازند قم

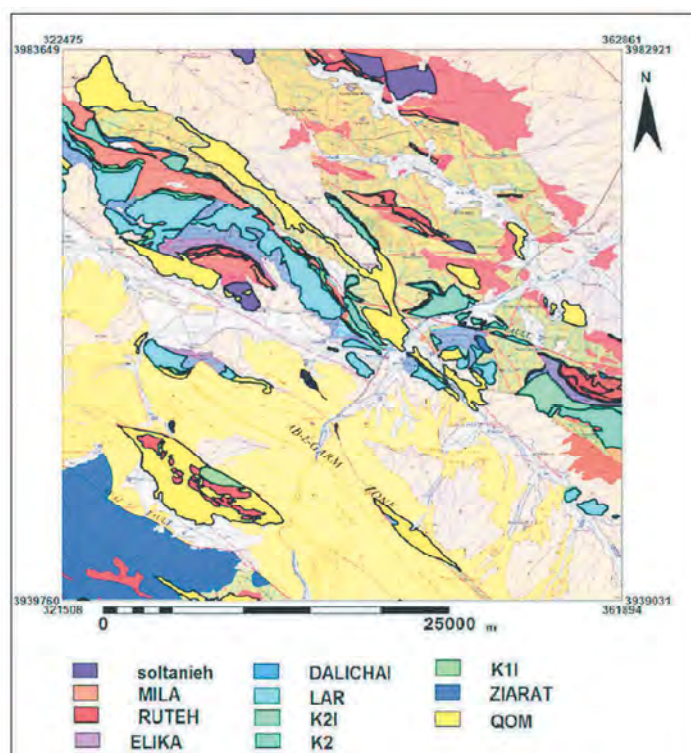
می‌یابد و کارست‌زایی بیشتر می‌شود (قبادی، ۱۳۸۸). دما به عنوان عامل مهم در کارستی‌شدن سنگ‌های کربناته به شمار می‌آید. انحلال سنگ‌آهک در یک لیتر آب با دمای ۳۰ درجه صفر درجه، چهار تا پنج برابر بیشتر از آب با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و شش برابر آب با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد است (James, 1981). با افزایش دما، حلالیت کربنات کلسیم، کمتر می‌شود (James and Lupton, 1978). برپایه نقشه همدمای استان، همدمای سالانه آوج میان نه تا یازده درجه سانتیگراد و همدمای سالانه آبگرم میان یازده تا سیزده ۱۳ درجه سانتیگراد است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱). برپایه تصاویر ماهواره‌ای لندست، پراکندگی سازندهای کربناته و پوشش گیاهی (شکل ۶) و برپایه نقشه‌های زمین‌شناسی و با به‌کارگیری نرم‌افزار ILWIS (در محیط GIS) نقشه سازندهای کربناته در گستره آبگرم (شکل ۷) و مساحت آن‌ها به دست آمد.

چورلی و همکاران (۱۹۸۵) بر این باورند که در گستره‌هایی که میزان بارندگی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر باشد، زمیندیس‌های کارستی پدید نمی‌آید. بنابراین، ساختارهای کارستی بیشتر در مناطق سرد و مرطوب با بارش بیش‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر که دارای سنگ بستر کربناته یا تبخیری باشند شکل می‌گیرند. میانگین بارش‌های جوی سالانه گستره نزدیک ۳۱۲ میلی‌متر است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱).

جنوب استان به لحاظ جایگاه جغرافیایی و قرارگرفتن در دامنه کوه خرقان با بلندای میان ۱۶۵۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا، دارای آب و هوای سرد با زمستان‌های دراز و تابستان‌های معتدل می‌باشد. برپایه نقشه هواشناسی استان، منطقه آوج دارای پهنه‌های آب و هوایی فراسرد تا مدیترانه‌ای فراسرد است. گستره آبگرم هم دارای آب و هوای فراسرد تا نیمه‌خشک سرد است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱). دیگر عامل تاثیرگذار بر کارستی‌شدن، دمای هوا می‌باشد. هر چه دمای هوا کمتر باشد، قابلیت انحلال آب افزایش



شکل ۶. تصویر ماهواره‌ای لندست همراه با پراکندگی سازندهای کربناته در آبگرم-آوج (برگرفته از Bolourchi, 1978)



شکل ۷. پراکنندگی سنگ‌های کربناته (برگرفته از Bolourchi, 1978)

زمیندیس‌های کارستی گستره آبگرم

زمیندیس‌های کارستی دارای گوناگونی بسیاری هستند. در گستره آبگرم، کارست بیرونی و درونی دارای گوناگونی بسیار زیاد نیست. از این روی، کارست آن دارای پیچیدگی کمی است. در زیر به مهمترین آن‌ها اشاره می‌شود:

چاله باران: از زمیندیس‌های انحلالی که بر روی توده‌ی سنگ و بدون اثر عوامل ساختاری ایجاد می‌شوند، می‌توان به چاله‌های باران اشاره کرد. این کارن‌ها به صورت حفرات کوچکی با ابعاد چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر بر روی سنگ لخت ایجاد می‌شوند. شکل ظاهری آن‌ها به صورت دایره‌های نامنظم است و دو طرف آن قرینه می‌باشد. دلیل پیدایش آن‌ها ناهمگنی در سنگ‌آهک و یا عمل موجودات زنده است (کریمی‌وردنجانی، ۱۳۹۴). این پدیده در بیشتر سازندها دیده می‌شود (برای نمونه، شکل ۸).

ریزشیاری: ریزش‌کارن^۲ یا ریزشیاری^۳ دارای شیاریهای ژرف‌تر و گسترده‌تر از حدود یک میلی‌متر و درازتر از چند سانتی‌متر نیستند. این پدیده کارستی کوچک، در بسیاری از سازندهای منطقه دیده می‌شود (برای نمونه، شکل ۸).

کارن شیاری: کارن شیاری^۴ دارای گذرگاه‌های نازک با بُرش است. این شکل‌ها در شیب‌های تند پدید می‌آیند (شکل ۹). هر چه بارش و شیب بیشتر شود، درازای کارن شیاری هم افزایش می‌یابد (Bögli, 1980).

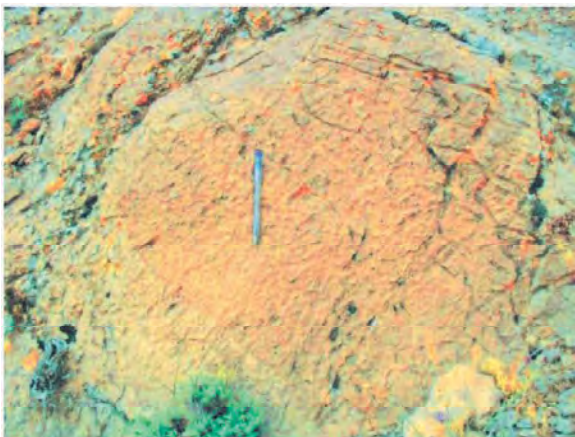
ژرف‌شیاری: ژرف‌شیاری^۵ در نتیجه انحلال در محل درزه‌ها پدیدمی‌آید. وسعت و ژرفای انحلال، جداکننده آن از شیاریهای انحلالی است. ژرف‌شیاریها معمولاً دارای چند سانتی‌متر عرض و چندین متر ژرفا می‌باشند (برای نمونه، شکل ۹). اهمیت ژرف‌شیاریها به علت هدایت‌کنندگی اصلی آب باران به داخل سفره‌های کارستی می‌باشند (کریمی‌وردنجانی، ۱۳۹۴).

غار: غار^۶ یک بازشدگی طبیعی در روی زمین است و دارای اندازه‌های بزرگی است که یک انسان بتواند وارد آن شود (Fleury, 2009). اگر اندازه حفره کوچکتر از یک

1. Rain pits
2. Microkarren
3. Microrill
4. Rill karren
5. Grikes/Cleft karren
6. Cave

می‌شوند (مقیمی، ۱۳۹۱). بیشتر غارهای گستره آبگرم، در سازند قم ساخته شده‌اند (برای نمونه شکل ۱۰). از غارهای شناخته شده می‌توان به غار قلعه کرد در ۲۱ کیلومتری روستای حصار و غار عباس‌آباد در چهار کیلومتری شمال آبگرم اشاره کرد.^۱

متر باشد به آن غارکا گویند. غار در دسته کارست بیرونی قرار می‌گیرد. سنگ‌آهک‌هایی که در میان آن‌ها لایه‌های شیلی وجود دارد از دید ساخت غار بسیار مهم است، زیرا شیل‌ها آب‌های زیرزمینی را متوقف کرده و باعث سرعت بخشیدن به انحلال سنگ‌آهک و در پایان ساخت غار



شکل ۸. ریزکارن و کارن سازند میلا، راه شنیر-آورنه (راست) و میکروکارن و کارن و چاله باران در سازند لار، جنوب آبگرم، راه داخرجین (چپ)



شکل ۹. کارن شیاری، سازند روته، شمال باختر روستای آورنه (راست) و ژرف‌شیار در سازند قم، روستای گنبدک، شمال باختر آبگرم (چپ)



شکل ۱۰. غار و غارک در سازند قم، روستای گنبدک، شمال باختری آبگرم (راست) و در شمال آبگرم (چپ)

ویژگی‌های سازندهای کربناته در گستره آبگرم از دید سنگ‌شناختی، مساحت برونزد، زمین ریخت‌های کارستی و درجه نسبی کارستی‌شدن در جدول ۱ ارائه شده است. بر این پایه، بیشترین برونزد و گسترده‌ترین کارستزایی در جوان‌ترین سازند، که سازند قم باشد، پدید آمده است. در

این راستا، فاکتورهایی که بیشترین تاثیر را در درجه نسبی کارستی‌شدن سازندهای کربناته داشته است، سنگ‌شناسی و مساحت برونزد آن‌ها می‌باشد. برپایه گسترش کارستزایی، کارست آبگرم بخشی و کم ژرف و برپایه چرخه کارست، نوجوان تا جوان است (Veress, 2020).

جدول ۱. سنگ‌شناختی، مساحت و زمین‌دیس‌های کارستی سازندهای کربناته گستره آبگرم

سازند کربناته	دوره زمین‌شناسی	سنگ‌شناختی	مساحت (km ²)	زمین‌دیس‌های کارستی (Karstic Landforms)	درجه نسبی کارستی‌شدن
قم	الیگومیوسن	سنگ‌آهک	۱۲۹/۱۹	ژرف‌شیار، گودال انحلالی، غارک، غار	۱۰
روته	پرمین	سنگ‌آهک و دولومیتی	۱۰/۷۴	کارن، میکروکارن، کارن شکافی، چاله باران	۷
میلا	کامبرین	سنگ‌آهک، شیل، دولومیت	۷/۷۷	کارن، میکروکارن، کارن شکافی، حفره انحلالی	۶
سلطانیه	کامبرین	دولومیت	۱۷/۸۲	کارن، میکروکارن	۵
لار	ژوراسیک	دولومیت، سنگ‌آهک، ژئیس	۶۵/۷۲	کارن، میکروکارن، چاله باران	۴
کرتاسه	کرتاسه	سنگ‌آهک و گلسنگ‌آهکی	۶۴/۰۹	کارن، حفره انحلالی	۳
الیکا	تریاس	دولومیت	۱/۴۲	کارن، میکروکارن	۲
زیارت	ائوسن	سنگ‌آهک	۹/۶۷	کارن	۱

هیدروشیمی کارست

در سازندهای باروت و یا سلطانیه واقع شده است. از دید پارامتر دما، کمترین دمای آب زیرزمینی منطقه مربوط به آروچان آرآدره می‌باشد و این موضوع را می‌توان به دمای هوا، سنگ منشا چشمه و دمای سنگ‌های کناری که آب چشمه از میان آن‌ها عبور می‌کند، نسبت داد که در نتیجه می‌تواند کارستی‌شدن بیشتر سنگ منشا چشمه را نشان دهد.

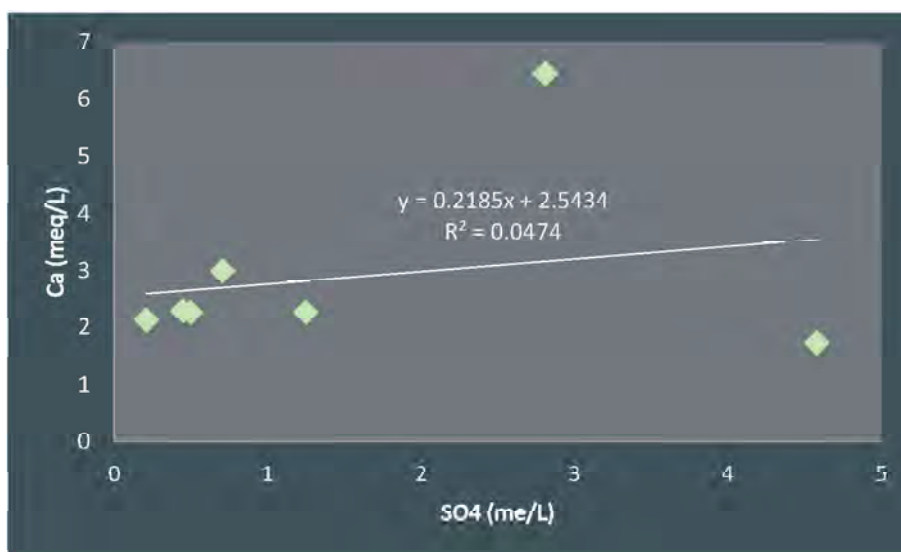
از سوی دیگر، با توجه به مدلسازی هیدروژئوشیمیایی و شناسایی اندیس سیرشدگی هنگامی که مقدار SI نمونه آب نسبت به یک کانی خیلی کوچک باشد، آن کانی می‌تواند تا مدتها در آب حل شود. اندیس سیرشدگی همه نمونه‌های آب چشمه‌های برداشت شده نسبت به کانی‌های آراگونیت، کلسیت و دولومیت و هالیت منفی است. در نتیجه آب زیرزمینی در این مناطق از این مواد در حالت زیر سیرشدگی می‌باشد. این ویژگی نشان‌دهنده زمان ایست کم آب در محیط کارستی است (شکل ۱۲). از دید محیط کارستی، سنگ‌های کربناته، با سه اندیس منفی سیرشدگی آراگونیت، کلسیت و دولومیت اهمیت بسیاری دارند. برپایه مقدار بسیار

برای راستی‌آزمایی نتایج به دست‌آمده از پژوهش‌های زمین‌ریخت‌شناسی و سنجش از دور، هیدروشیمی چشمه‌های کارستی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سنگ مخزن چشمه‌های کارستی و همچنین زمان ایست آب در آن ارزیابی شد. برپایه نمودارهای پایپر و استیف، نوع و رخساره نمونه‌های آبی بیکربناته-کلسیم-منیزیم مشخص شد. این رخساره را می‌توان با انحلال سازندهای کربناته سنگ‌آهک، دولومیت و در نتیجه افزایش مقدار بیکربنات و کلسیم در آب زیرزمینی تفسیر کرد. همچنین با توجه به نمودار ترکیبی Ca در برابر SO₄، قطع‌شدن محور Ca توسط خط برازش، نشان از افزایش این یون است (شکل ۱۱). همچنین نشان‌دهنده آن است، یون Ca افزون بر ژئیس، دارای منشأ دیگری مانند کربنات کلسیم است.

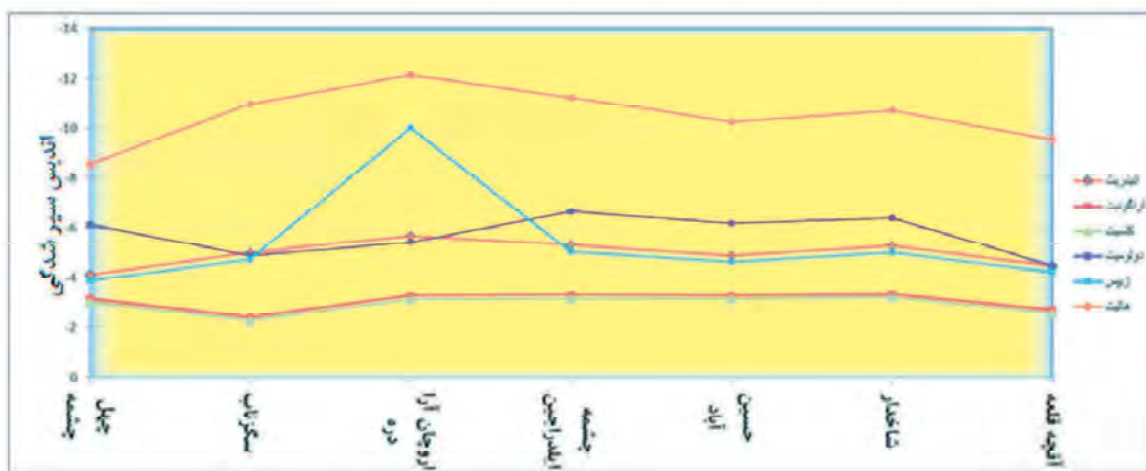
بیشترین دمای آب در دوره خشک در چشمه حسین آباد برابر با ۱۷/۲ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شده است. این دما می‌تواند نشان دهد که نسبت به بقیه مخزن‌ها، این چشمه در ژرفای کمتری قرار دارد. سنگ مخزن این چشمه

1. Saturation index

پایین این شاخص‌ها در چشمه‌های گستره آبگرم نتیجه‌گیری می‌شود کارست این منطقه بخشی و نارس است. این دید
 نیز نتایج مدل‌سازی هیدروشیمیایی و مطالعات زمین ریخت شناسی را تایید می‌کند.



شکل ۱۱. نمودار ترکیبی Ca در برابر SO₄ در نمونه‌های آبی گستره آبگرم



شکل ۱۲. اندیس سیرشدگی چشمه‌های برگزیده آبگرم نسبت به کانی‌های عمده

نتیجه‌گیری

در کارستزایی، به ویژه در کارست پیشرفته غارهای قلعه‌کرد و عباس‌آباد، موثر است.

در کل کارست‌های گستره آبگرم بر پایه رده‌بندی زمین‌ریخت‌شناسی از نوع کارست بخشی و برپایه رده‌بندی مهندسی، نوجوان تا جوان است. با توجه به بازدهی‌های میدانی و آکاو‌های انجام شده، سازند قم و پس از آن سازند روتنه، بیشترین میزان کارستزایی را دارند و سازندهای الیکا و زیارت دارای کمترین میزان کارستزایی هستند (جدول ۱). بر پایه مدل‌سازی هیدروشیمیایی با توجه به زمان ایست کم آب

گستره آبگرم دارای شرایط سنگ‌شناسی و آب و هوایی مناسب برای کارستزایی است. میانگین بارش‌های جوی سالانه منطقه نزدیک ۳۱۲ میلی‌متر می‌باشد. میانگین درازمدت دمای سالانه ۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. جریان یافتن آب سرد ناشی از آب‌شدن برف و باران به درز و شکاف‌های سنگ‌های کربناته، باعث افزایش انحلال و سرانجام پیدایش زمین‌دیس‌های کارستی شده است. شرایط آب و هوایی و اقلیمی گذشته در دوره‌های یخبندان بیشتر

- کریمی‌وردنجانی، ح.، ۱۳۹۴. هیدروژئولوژی کارست، مفاهیم و روش‌ها. انتشارات ارم شیراز، چاپ اول، ۴۱۴.

- محمدی بهزاد، ح.ر.، کلانتری، ن.، چرچی، ع. و ندری، آ.، ۱۳۹۶. شناخت منابع تغذیه چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۴۳، ۱۳-۱.

- مقیمی، ه.، ۱۳۹۱. هیدروژئولوژی کارست. انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ سوم، ۲۶۸.

- ناصری، ح.ر.، ۱۳۷۰. مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کراتی حوضه آبریز درودزن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه شیراز.

- ناصری، ح.ر.، فتحی، ا. و صیادی، م.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای کارستی شمال شرق استان تهران با استفاده از آنالیز سلسله مراتبی (AHP). شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.

- هدایتی دزفولی، ا. و کاکوند، ر.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین. مجله علمی و فنی نیوار، ۷۶، ۷۷: ۵۹-۶۶.

- Alley, W.M., 1993. Regional ground-water quality. John Wiley and Sons. 634.

- Anderson, T.W., Welder, G.E., Lesser, G. and Trujilo, A., 1988. Region 7, Central alluvial basin, In Geology of North America (hydrology). Edited by William Back, Joseph S. Rosenbein, and Paul R. Seaber: 81-86.

- Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal, 13, 1: 148-160.

- Biri, G., Ghazanfari, P. and Bajelan, H., 2014. The role of fractures in the karst phenomena and Abasabad cave formation in the southern provenance of Qazvin. 32nd National and 1st International Geosciences Congress Fundamental Geology, 16-19 February, Ferdosi University, Mashhad, Iran.

- Bolourchi, M.H., 1978. Geological map of Avaj 1/100000. Geological Survey of Iran.

در محیط کارستی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد، اپی کارست آبگرم گسترش چندانی ندارد و کارست از نوع کارست افشان و توسعه نیافته است.

منابع

- باقری، ف.، کرمی، غ.ح.، باقری، ر. و مشکینی، ج.، ۱۳۹۸. اثر بارش و لیتولوژی در خصوصیات هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی استان خراسان شمالی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۲، ۸۹-۱۰۳.

- رضائی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م.ع.، بهنیا فرا. و جوانبخت، م.، ۱۳۹۸. محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با بهره‌گیری از تکنیک‌های تجربی و آزمایشگاهی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸، ۳، ۶۴-۷۹.

- رنگزن، ک.، محرابی‌نژاد، ع.، علیجانی، ف. و استادهاشمی، ز.، ۱۳۹۶. آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی، جنوب شرق ایزد، با استفاده از روش COP. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۳، ۲۰-۲۸.

- شاهسوندی، م.، ۱۳۸۷. تاثیر فاضلاب‌های شهری بر چاه‌های آب شرب شهر قم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۱۴۳.

- شمعیان، غ.ح. و مریدی، ز.، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه نهشته بوکسیت رسی شیرین‌آباد، جنوب شرق گرگان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۳۹، ۱۰۳-۱۱۵.

- غضنفری، پ.، بختیاری، م. و جلالی، ن.، ۱۳۹۴. کارست‌زایی سنگ‌های کربناته با بهره‌گیری از RS و GIS در منطقه الموت، شمال قزوین. کواترنری ایران، ۴، ۳۳۹-۳۵۲.

- غضنفری، پ.، بختیاری، م. و تاج‌آبادی، م.، ۱۳۹۶. زمین‌دیس‌ها و چشمه‌های کارستی دره الموت، شمال قزوین. کواترنری ایران، ۲ (۸)، ۳۵۳-۳۶۶.

- قبادی، م.ح.، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی مهندسی کارست، دانشگاه بوعلی سینا، ۳۰۴.

- قبادی، م.ح.، طالب بیدختی، ع.ر. و مومنی، ع.ا.، ۱۳۸۹. نقش لیتولوژی و ساختارهای تکتونیکی در گسترش کارست، تغییر آبدهی و کیفیت چشمه‌های کارستی منطقه آبگرم قزوین. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۳ و ۴، ۱-۱۲.

- Bögli, A., 1980. Karst hydrology and physical speleology. New York, Springer, 270.
- Bozak, P., 2008. Karst processes and time. *Geologos*, 14, 1: 121-127.
- Chow, V.T., 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, 627.
- Cvijić, J., 1925. Types morphologiques des terrains calcaires, *Comptes Rendus, Académie des Sciences (Paris)*, 180, 592-594.
- Dickson, J.A.D., 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of Sedimentary Petrology*, 36: 491-505.
- Ennes-Silva, R.A., Bezerra, F.H.R., Nogueira, F.C.C., Balsamo, F., Klimchouk, A., Cazarin, C.L. and Auler, A.S., 2015. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.006>.
- Fleury, S., 2009. Land Use Policy and Practice on Karst Terrains: Living on Limestone. Springer, 187.
- Ford, D.C. and Williams, P.W., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 576.
- Ghanea, M. and Ghazanfari, P., 2014. Karst features of Carbonate Rocks of Cretaceous Haraz Valley, Central Alborz. 32nd National and 1st International Geosciences Congress Fundamental Geology, 16-19 February, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- James, A.N., 1981. Solution parameters of carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, 19-25.
- James, A.N. and Lupton, A.R.R., 1978. Gypsum and anhydrite in foundation of hydraulic structures. *Geotechnique*, 28, 249-272.
- Karimi Vardanjani, H., Bahadorinia, S. and Ford, D.C., 2017. An Introduction to Hypogene Karst Regions and Caves of Iran. In: Hypogene Karst Regions and Caves of the World (Klimchouk A, Palmer AN, Waele JD, Auler AS, Audra P), Springer. 479-494.
- Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, 600.
- Migon, P., 2011, Development of karst phenomena for geotourism in the Moravian Karst (Czech Republic). *Geotourism*, 3-4 (26-27), 3-24.
- Moradi, S., Kalantari, N. and Charchi, A., 2018. Karstification Potential Mapping in Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Fuzzy Logic and analytical Hierarchy Process (AHP) techniques. *Geopersia* 6 (2), 2016, 265-282.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USA Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 99-4259.
- Silvestra, E., 2000. Paleokarst-a riddle inside confusion. *CEN Technical Journal*, 14, 3, 100-108.
- Tick, G. and Vlassopoulos, D., 2004. AqQA: quality assurance and presentation graphics for ground water analyses. *Ground Water*, 42(3), 326-329.
- Tucker, M.E., 2001. Sedimentary Petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks. Blackwell Scientific Publication, 262.
- Veress, M., 2020. Karst Types and Their Karstification. *Journal of Earth Science*, 31 (3), 621-634.
- Waltham, A.C. and Fookes, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Journal of Engineering Geology and Hydrology*, 36, 101-118.