

ویژگی های زمین شناختی تشکیلات کارستی غار «برزک»

فریبا فروغی*؛ استادیار دانشکده زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسلم یزدانی؛ دکتری علوم زمین، دانشگاه اشفورد، امریکا

سامان درویش بسطامی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸

چکیده

غار برزک، یکی از سیستم های کارستی مهم ایران مرکزی، در غرب کاشان در سازندهای آهکی کرتاسه (کنیاسین تا سانتونین) و شیل های سازند شمشک (ژوراسیک پایینی) شکل گرفته است. غار برزک بواسطه وجود دهلیزها و شکلهای تشکیل شده توسط تحلیل و نهشته شدن بعنوان غار فعال مطرح بوده و شکل آن تحت تاثیر گسل های معکوس فعال با جابجایی لایه های آهکی و ایجاد درزه ها و شکاف های ثانویه، مسیرهای اولیه انحلال را فراهم کرده اند. بطوریکه در جهت شمال غرب، جنوب شرق این غار شکل گرفته است. ورود آب های اسیدی، ناشی از ترکیب با CO_2 اتمسفری و فرآیندهای دیازنزی، باعث توسعه شبکه کارستی شده است. تنوع اشکال رسوبی شامل استالاکمیت، استالاکتیت، فلواستون، ریم استون، دراپری، پاپ کورن و کورالوئیدها بیانگر چندین فاز انحلال و نهشته گذاری در طول زمان است. این پژوهش نشان می دهد که تغییرات اقلیمی و فعالیت های زمین ساختی تأثیر قابل توجهی بر تکامل غار داشته اند. این یافته ها می توانند در درک دینامیک سیستم های کارستی و مدیریت منابع آب زیرزمینی این مناطق مفید باشند.

واژه های کلیدی: آهک های کرتاسه، انحلال شیمیایی، شبکه کارستی، غار برزک، فعالیت گسلی

مقدمه

سیستم های کارستی به عنوان ساختارهای پویای زمین شناسی، تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی، هیدروژئوشیمیایی و فرسایشی، در بازه های زمانی طولانی تکامل می یابند. غارها بر اساس تعریف، فضاهای طبیعی خالی در سنگ هستند که امکان ورود انسان به آن ها وجود دارد، حتی اگر در برخی موارد این فضاها به وسیله آب، رسوبات یا یخ پر شده باشند (جنینگز^۱، ۱۹۹۷). غار برزک، که در آهک های کرتاسه بالایی (کنیاسین تا سانتونین) و شیل های سازند شمشک (ژوراسیک) توسعه یافته، تحت تأثیر فرآیندهای زمین ساختی، از جمله حرکات گسلی و انحلال شیمیایی، شکل گرفته است. رژیم های فرسایشی طی یک بازه زمین شناسی طولانی، موجب تشکیل نهشته های متنوعی در این غار شده اند که بازتابی از تکامل چندمرحله ای آن است.

*f.foroughi@ut.ac.ir

*ر ایانامه نویسنده مسئول

تاکنون پژوهشهای زیادی در رابطه با عوامل زمین ساختی پیدایش غارها به خصوص غارهای کارستی و مورفولوژی آنها صورت گرفته است. علی پور (۱۳۸۶)، در تحقیقی به بررسی غار آبی پاریم قیه در مرز ایران و ترکیه پرداخت. این غار با حجم ۴۵۰۰ متر مکعب و دمای ثابت ۹ درجه سانتی گراد، عاری از آلودگی میکروبی و دارای آب شفاف و قابل شرب است و به طور دائم از تالاب مجاور تغذیه می شود. رضایی و نخعی (۱۳۸۷)، در تحقیقی به بررسی نحوه تشکیل غار کارستی کتله خور در استان زنجان پرداختند. این غار، که طولانی ترین غار شناخته شده در ایران است، در سازند قم و در منطقه تکتونیکی ایران مرکزی تشکیل شده است. این غار در سه طبقه و در محدوده ارتفاعی ۱۳۷۰ تا ۱۷۴۲ متر از سطح دریا گسترش یافته و تشکیل آن ناشی از نفوذ آب و تغییرات سطح ایستابی بوده است. قبادی و همکاران (۱۳۹۰)، در تحقیقی به بررسی نقش مطالعات ژئومورفولوژی کارست در شناخت منشأ غارهای علی صدر و کتله خور پرداختند. نتایج نشان داد که غار علی صدر حاصل فعالیت آبهای هیدروترمال و درونزاد^۲ است، در حالی که غار کتله خور به دلیل نفوذ آبهای سطحی به صورت برونزاد^۳ تشکیل شده است. همچنین، کارست زیرسطحی در منطقه علی صدر گسترده تر است، در حالی که در منطقه کتله خور، کارست سطحی و زیرسطحی هر دو توسعه یافته اند. کاظمی (۱۳۹۱)، در تحقیقی به بررسی عوامل مؤثر بر تحول ژئومورفولوژی کارست در کوه گاماسباب پرداخت. این مطالعه نشان داد که سنگهای آهکی و کربنانه ضخیم لایه، که حدود ۹۰ درصد لیتولوژی منطقه را تشکیل می دهند، همراه با شرایط اقلیمی مناسب، باعث تشکیل اشکال کارستی متنوعی مانند چشمه ها، غارها و لایه ها شده اند. نتایج نشان داد که لایه ها عمدتاً در ارتفاعات ۳۰۰۰ تا ۳۴۰۰ متری و در مناطق با شیب ۵۴ تا ۱۳۰ درجه و بارش سالانه ۶۹۹ تا ۷۷۳ میلی متر تشکیل شده اند. تحقیق دیگری در این زمینه توسط خضری و همکاران (۱۳۹۶) انجام شده است. محققان در این مطالعه به ارزیابی و پیش بینی تحول کارست در حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۴ (AHP) پرداختند. نتایج نشان داد که لیتولوژی مهم ترین عامل کنترل کننده توسعه کارست در منطقه بوده و عوامل زمین شناسی، هیدرولوژی و توپوگرافی از عوامل مهم در توسعه کارست این منطقه هستند. واعظی هیر و همکاران (۱۳۹۸) در استان کردستان، در تحقیقی بررسی توسعه کارست و فرایند ریخت زایی غارها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ۲۹ درصد از سازندهای استان را واحدهای کارستی تشکیل می دهند و حدود ۶۹/۵ درصد از چشمه های استان از این واحدها تغذیه می شوند. همچنین، ۹۰ درصد چشمه ها تحت تأثیر درز و شکستگی های تکتونیکی تشکیل شده اند. جعفری و ارجمند زاده (۱۴۰۱)، در تحقیقی به تحلیل مورفوتنیک تکوین غارهای استان خراسان شمالی پرداختند. نتایج نشان داد که غارهای این منطقه عمدتاً در اثر فرآیندهای تکتونیکی مانند گسل خوردگی و چین خوردگی و فرآیندهای بیرونی مانند انحلال تشکیل شده اند.

کلیمچوک (۲۰۰۵)^۵، در تحقیقی به ارائه مدلی مفهومی از غارزایی در سیستم های آرتزین چندطبقه پرداخت. ایشان معتقدند که غارزایی در محیط های محصور^۶ با محیط های آزاد^۷ تفاوت های اساسی دارد. در سیستم های آرتزین، ارتباط هیدرولیکی بین سفره های آب های زیرزمینی باعث ایجاد الگوهای شبکه ای^۸ و نفوذپذیری همگن تر در مقایسه با سیستم های آزاد می شود. این تفاوت ها می تواند در مدیریت منابع و ارزیابی خطرات مرتبط با کارست مفید باشد. فرومکین و فیشهندلر^۹ (۲۰۰۵)، در تحقیقی به بررسی مورفومتری و توزیع غارهای ایزوله به عنوان راهنمایی برای شرایط پالئوهیدرولوژیک

2 Hypogenic

3 Epigenic

4 Analytic hierarchy process

5 Klimchouk

6 Confined

7 Unconfined

8 Maze

9 Frumkin & Fischhendler

فریاتیکی و محصور پرداختند. نتایج نشان داد که دو نوع اصلی غارهای ایزوله وجود دارد: غارهای شبکه‌ای که در شرایط محصور و با جریان آب صعودی تشکیل می‌شوند، و غارهای اتاقی^{۱۰} که در شرایط فریاتیکی و با جریان جانبی آب شکل می‌گیرند. این یافته‌ها به بازسازی شرایط هیدرولوژیکی قدیمی در مناطق کارستی کمک می‌کند. باگاس و کرافیس^{۱۱} (۲۰۰۹)، در تحقیقی به تولید مدل‌های سه‌بعدی غارهای انحلالی برای محیط‌های مجازی پرداختند. آن‌ها روش‌هایی برای ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از گذرگاه‌های غار بر اساس نوع آن‌ها (فریاتیکی، وادوز و ترکیبی) ارائه کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از منحنی‌های نشان‌دهنده گسل‌ها یا جریان آب، می‌توان مدل‌های اولیه‌ای از گذرگاه‌های غار ایجاد کرد که برای استفاده در محیط‌های مجازی مناسب هستند. در تحقیق دیگری کلیمچوک (۲۰۰۹)، به بررسی مورفولوژی غارهای هایپوژنیک پرداخت. نتایج نشان داد که غارهای هایپوژنیک در اثر جریان آب‌های زیرزمینی عمیق که به سمت بالا حرکت می‌کنند و در شرایط محصور نشت‌پذیر تشکیل می‌شوند. پارو-ایگوزکویزا و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای به بررسی ریخت سنجی شبکه‌های سه‌بعدی مجاری کارستی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که این پارامترهای کمی می‌توانند در توصیف ژئومورفولوژی زیرزمینی، شبیه‌سازی شبکه‌های کارستی و تحلیل رفتار هیدرولوژیکی این سیستم‌ها مؤثر باشند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که شاخص‌های ریخت سنجی می‌توانند جهت‌های ترجیحی در فرآیند کارستی شدن و پیچیدگی ساختاری شبکه‌های کارستی را مشخص کنند.

تیریا و ویجولی^{۱۳} (۲۰۱۳)، در تحقیقی به بررسی کنترل‌های ساختاری-تکتونیکی و ژئومورفولوژی راهروهای کارستی در رشته‌کوه‌های آهکی آلپ پرداختند. نتایج نشان داد که راهروهای کارستی در اثر انحلال سنگ‌آهک در امتداد شبکه درزه‌ها و گسل‌ها تشکیل شده‌اند و جهت‌گیری آن‌ها با گسل‌ها و درزه‌ها هم‌خوانی دارد. این راهروها عمدتاً در محیط‌های تکتونیکی کششی و در ارتفاعات ۱۶۰۰ تا ۱۸۵۰ متری توسعه یافته‌اند. ماکدا و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌سازی اسپلوژن، توزیع اندازه مجاری کارستی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تحلیل آماری مستقیم این شبکه‌ها به دلیل دسترسی محدود، ناقص است و برای حل این مشکل از مدل عددی واکنش-انتقال برای شبیه‌سازی تکامل مقاطع عمودی آبخوان‌های کربناته شکاف‌دار استفاده کردند. نتایج نشان داد که کارستی شدن در چندین مرحله از جمله آغاز، گسترش و توسعه رخ می‌دهد و این مراحل به توزیع چندمدالی اندازه مجاری منجر می‌شوند. لازاریدیس و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای، نقش فعالیت‌های تکتونیکی در شمال یونان را در شکل‌گیری غار اسپروما بررسی کردند. نتایج نشان داد که گذرگاه‌های غار تحت تأثیر میدان تنش منطقه‌ای و حرکات گسل‌ها شکل گرفته‌اند. سه فاز تکتونیکی اصلی شناسایی شدند: گسل‌های قدیمی‌تر (NNW-SSE)، گسل‌های راست‌گرد (NE-SW) و گسل‌های عادی که نشان‌دهنده رژیم کششی در کواترنری هستند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که غارزایی در شرایط فریاتیکی و اپی‌فریاتیکی و همزمان با فعالیت‌های تکتونیکی رخ داده است.

با توجه به اهمیت تاریخی و زمین‌شناختی غار برزک، تاکنون مطالعات جامعی به دلیل شرایط دشوار دسترسی، ورودی‌های بسیار تنگ و طولانی و مسیرهای خطرناک در این غار انجام نشده است. این پژوهش به بررسی نقش عوامل زمین‌ساختی و هیدروشیمیایی در پیدایش و تکامل مورفولوژی غار برزک و همچنین ارتباط آن با نهشته‌های رسوبی درون غار می‌پردازد تا بتوان درک بهتری از فرآیندهای شکل‌گیری و توسعه غارها در مناطق کارستی پیدا کرد.

10 Chamber Caves

11 Boggus & Crawfis

12 Pardo-Iguzquiza

13 Tirlă & Vijulie

14 Maqueda et al.

15 Lazaridis et al.

مواد و روشها

این پژوهش با رویکردی چندمرحله‌ای، شامل بررسی‌های میدانی، مطالعات سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی، تحلیل‌های پتروگرافی و رسوب‌شناسی و پردازش داده‌های سنجش از دور، به تحلیل فرآیندهای مؤثر بر تکامل غار بزرگ می‌پردازد. این روش‌ها بطور اجمالی در شکل ۱ آورده شده و در زیر به آن پرداخته شده است.

۱- بررسی‌های میدانی: ویژگی‌های زمین‌ساختی منطقه، شامل گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های کارستی، از طریق برداشت‌های میدانی و تحلیل ژئومورفولوژیکی ثبت شد. نمونه‌هایی از نهشته‌های کارستی (استلاگمیت، استالاکتیت، فلواستون و کورالوئیدها) و سنگ‌های آهکی غار نیز جمع‌آوری گردید.

۲- مطالعات سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی: برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های غار، تعدادی مقاطع نازک از نمونه‌های برداشت شده تهیه و بررسی شد. توالی‌های چینه‌ای منطقه بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی و مقایسه آن‌ها با مقاطع چینه‌ای استاندارد تحلیل گردید.

۳- سنجش از دور و تحلیل ساختاری: برای تحلیل ساختارهای تکتونیکی و توپوگرافی منطقه، داده‌های سنجش از دور از سنجنده‌های آلوس پالسار^{۱۶} و استر^{۱۷} مورد استفاده قرار گرفتند. مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استخراج و پردازش شد. تصاویر استر برای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی و تهیه نقشه‌های کاذب رنگی به کار گرفته شد. ساختارهای خطی منطقه، شامل گسل‌ها و درزه‌های اصلی، با استفاده از تکنیک‌های فیلترگذاری جهتی و با کمک نرم افزارهای سنجش از دور شناسایی و در محیط آرک جی آی اس^{۱۸} تفسیر شدند. استخراج ساختارهای خطی از تصاویر ماهواره‌ای عمدتاً با سه روش دستی، اتوماتیک و نیمه اتوماتیک صورت گرفته است. در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و به کمک نرم افزار ژئوماتیکا^{۱۹} اقدام به شناسایی و استخراج خطواره‌ها به صورت نیمه اتوماتیک گردید. برای این منظور از ماژول LINE به عنوان یکی از معمول‌ترین ابزارهای پردازش خودکار که در سال‌های اخیر به طور گسترده استفاده می‌شود، بهره‌گیری شد (پاندی و شرما^{۲۰}، ۲۰۱۹؛ آکینومیجین و همکاران^{۲۱}، ۲۰۱۶؛ سوکومار و همکاران^{۲۲}، ۲۰۱۴). این الگوریتم شامل سه مرحله تشخیص لبه‌ها، آستانه گذاری و استخراج منحنی می‌شود (آلشایف و جاود، ۲۰۱۸). مزیت روش نیمه اتوماتیک دقت نسبتاً بالایی آن در شناسایی عوارض خطی است (افشاری و همکاران، ۱۳۹۵). در نهایت با مقایسه خطواره‌های استخراج شده با آبراهه‌ها و سایر عوارض خطی انسان ساخت، فایل نهایی تصحیح گردید. برای ارزیابی جابجایی‌های احتمالی و ارتباط آن‌ها با مسیرهای انحلالی، مدل‌های سه بعدی از ساختارهای کارستی منطقه نیز تهیه شد.

16 ALOS PALSAR

17 ASTER

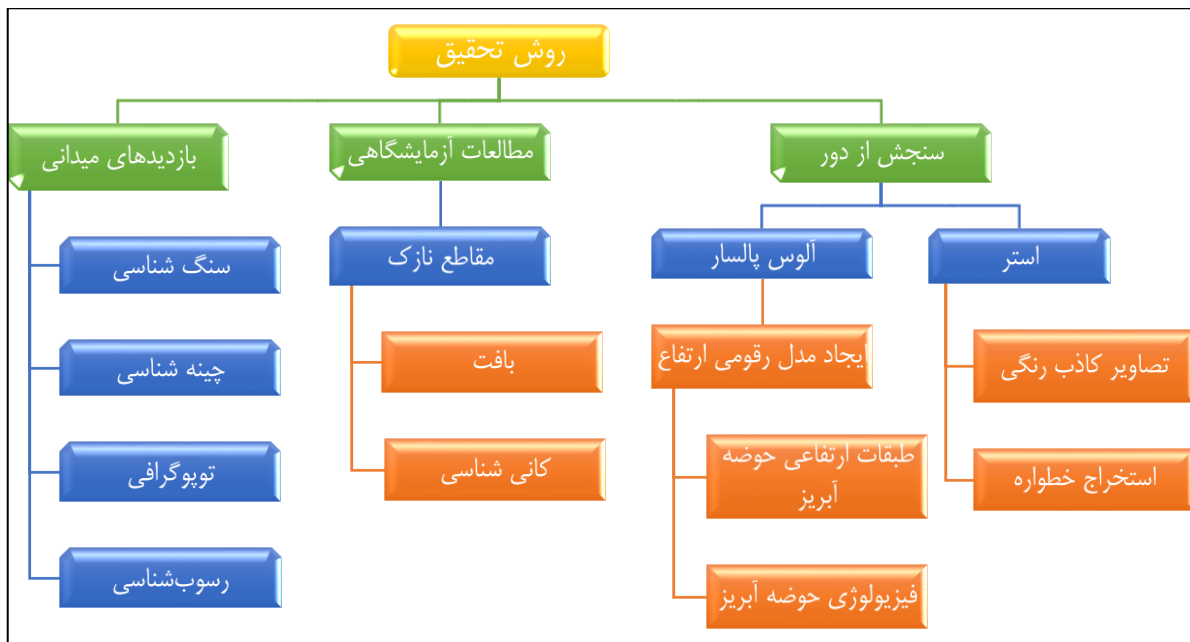
18 Arc GIS

19 PCI Geomatica

20 Pandey & Sharma

21 Akinwumiju et al.

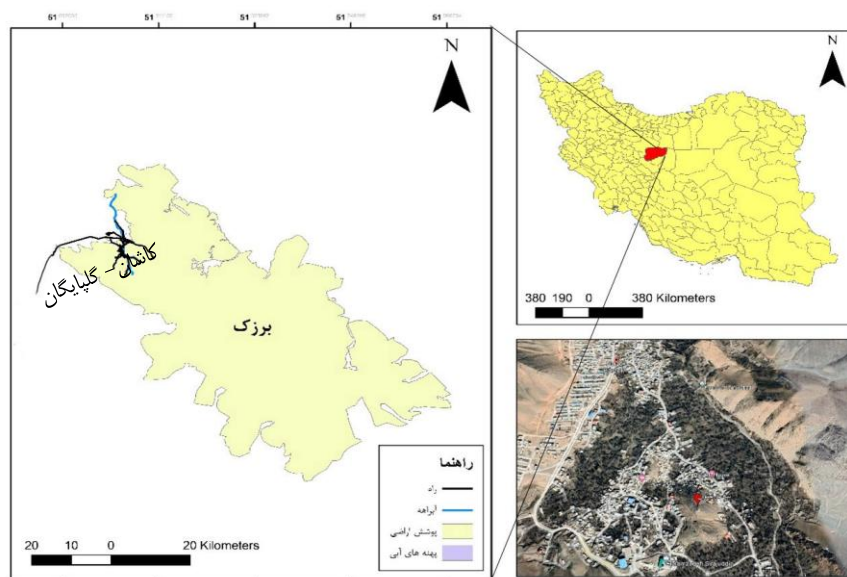
22 Sukumar et al.



شکل ۱: نمای روش تحقیق در این مقاله

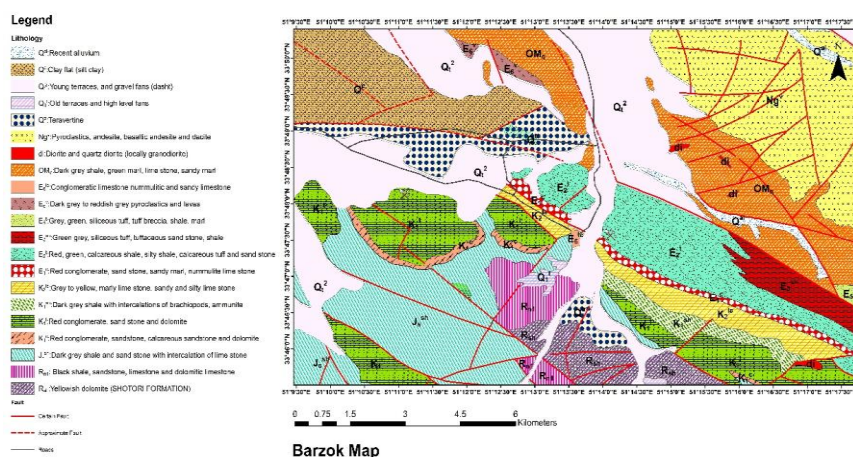
موقعیت جغرافیایی غار برزک

منطقه برزک در کاشان، در غرب زون ایران مرکزی و در دامنه های رشته کوه کرکس، در فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر کاشان و در مسیر جاده ی کاشان-گلپایگان قرار دارد. غار برزک در مرکز این منطقه و در جبهه شمال شرقی تپه ای محلی با نام تپه «مرجنون»، در ارتفاع ۲۰۲۰ متری از سطح دریا واقع شده است. مختصات جغرافیایی این غار، عرض شمالی $33^{\circ}46'55/1''$ و طول شرقی $51^{\circ}13'44/7''$ است. در شکل ۲، موقعیت منطقه برزک و راه های دسترسی به آن از جاده کاشان-گلپایگان نشان داده شده و نقشه ماهواره ای تپه مرجنون نیز آورده شده است. غار برزک دارای سیستم کارستی بسته بوده و در واقع توسط عوامل انسانی برای اولین بار باز شده است. این غار فاقد دهانه کلاسیک می باشد و این مطالعه اولین گزارش زمین شناسی از غار برزک است. کارست برزک دارای آب قابل توجهی بوده و نهشته های کارستی غار، همگی فعال و در حال نهشت می باشند. این غار دارای کریدورهای کاملاً آبی بوده و وجود آبهای ساکن یا جوشنده در جای جای آن دیده می شود.



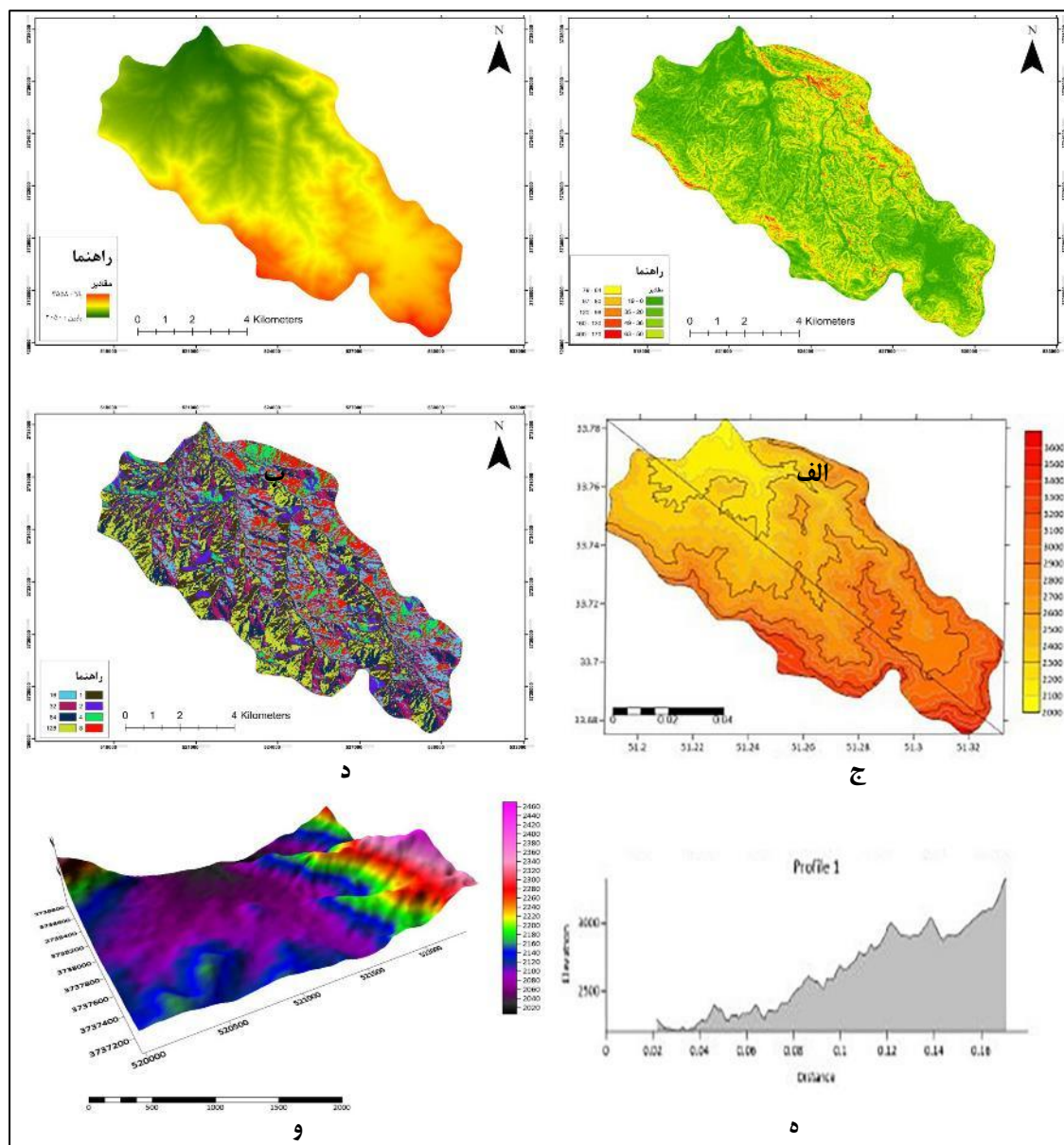
شکل ۲: نقشه راه های دسترسی به منطقه برزک و نقشه ماهواره ای تپه برزک (مِرجون)

تشکیلات کارستی غار برزک، در لایه های آهکی و شیلی ژوراسیک و آهکهای کرتاسه بالایی با سن کنیاسین تا سانتونین شکل گرفته است. در شکل ۳ نقشه زمین شناسی منطقه نیز از طریق GIS ترسیم شده است.



شکل ۴: نقشه زمین شناسی ترسیم شده منطقه مورد مطالعه (باز ترسیم و اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان، حدادیان و همکاران، ۱۹۹۳)

تشکیلات کارستی غار برزک بر مبنای رخدادهای گسلی، با جابجایی لایه های آهکی کنیاسین-سانتونین و لایه های آهک و شیل سازند شمشک با سن ژوراسیک و سپس انحلال شیمیایی شکل گرفته است. در ارزیابی تعیین جهات شیب زمین، جریانهای آبی و ارتفاعی در زمین جهت ارزیابی هیدروژئولوژی منطقه نقشه های ۵ (الف تا ه) ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می گردد، جهت شیب تپه برزک، شمال غرب به سمت جنوب شرق بوده و جریانهای آبی از بالا به سمت پایین دست در جریان می باشند. مناطق ارتفاعی نیز در این ناحیه در شمال غرب از میزان ارتفاع بالاتری هستند، لذا برای پیگیری جریانهای هیدروژئولوژی موجود از اهمیت بالایی برخوردارند شکلهای (ج-ه-۵). همچنین در شکل ۵ (و) نیز نقشه سه بعدی از عوارض ارتفاعی نیز ترسیم شده است.



شکل ۵: (الف- و). نقشه های جهات شیب زمین، جریانهای آبی و ارتفاعی در زمین برای ارزیابی هیدروژئولوژی (الف تا ه) و نقشه سه بعدی ارتفاعی در تپه برزک (و)

یافته ها و بحث

- چینه شناسی منطقه

غار کارستی بَرزُک، در شیل و آهکهای ژوراسیک و آهکهای کرتاسه و سپس انحلال شیمیایی شکل گرفته است. بطور کلی تشکیلات کارستی غار بَرزُک، بر اساس فعالیت تکتونیکی و گسلی در طی زمانهای مختلف زمین شناسی و انحلال لایه های آهکی در آب های جوی دارای اسیدیته قابل توجه، تشکیل شده است. طوریکه این غار در سنگهای آهکی با سن ژوراسیک در سازند شمشک و کرتاسه بالایی از کنیاسین تا سانتونین، ایجاد شده است. لذا به ترتیب به تشکیلات ژوراسیک و کرتاسه و تاریخ تکوین آنها در زون ایران مرکزی پرداخته می شود.

الف) تشکیلات ژوراسیک در منطقه مورد مطالعه

سنگهای ژوراسیک ایران مرکزی تاریخچه سنگی و زیستی مشابه با کوههای البرز دارد، به گونه ای که به جز موارد استثنایی، تفکیک واحدهای سنگ چینه ای ژوراسیک در این دو منطقه (البرز و ایران مرکزی) چندان ضروری نبوده است. در ایران مرکزی سنگهای زمان ژوراسیک در دو چرخه رسوبی زغالدار (گروه شمشک) و چرخه رسوبهای دریایی (گروه مگو) وجود دارند. در بعضی نقاط ایران مرکزی مانند تفرش، محلات، اصفهان، اردستان و کاشان، ردیفهای دریایی ژوراسیک میانی - بالایی (گروه مگو) وجود ندارد. در این نواحی، ردیفهای زغالدار تریاس بالا - ژوراسیک میانی در بیشتر مناطق به طور دگرشیب با رسوبهای آواری پیشرونده کرتاسه پایین پوشیده شده اند. نبود ردیفهای گروه مگو و به ویژه دگرشیبی زاویه دار، نشان می دهد که بخشی از ایران مرکزی در اثر رویداد سیمیرین میانی، در زمان باژوسین - باتونین، چین خورده و پسروی دریا تا پیشروی آن در کرتاسه پایینی، ادامه داشته است. سنگهای ژوراسیک بالایی ایران مرکزی در شرایط رسوبی متفاوت نهشته شده اند و به همین دلیل، رخساره همانند ندارند. از طیس تا کرمان، سنگهای ژوراسیک میانی - بالایی، ضمن دریایی بودن، بیشتر رخساره آواری دارند، به گونه ای که تفکیک واحدهای سنگی گوناگون دشوار است. در شمال کرمان به مجموعه سنگهای ژوراسیک میانی - بالایی «سری بیدو» نامیده شده که معادل تمام سازندهای گروه مگو است. در ایران مرکزی، همانند البرز و کپه داغ، سنگهای ژوراسیک میانی - بالایی، ردیفهای مارنی و سنگ آهکهای دریایی هستند که با ردیفهای آواری گاه ضخیم و یا نهشته های تبخیری ژوراسیک پسین - کرتاسه پیشین سرانجام می گیرند (آقاناتی، ۱۳۸۳).

جایگاه چینه شناسی شاخص در مرز ژوراسیک - کرتاسه این تصور را ایجاد می کند که توالی موردنظر ردیفهای پسروده دریای ژوراسیک و نهشته های پیشرونده کرتاسه آغازین هستند. مرز ژوراسیک - کرتاسه در ایران، بیانگر آن است که در بخشهای وسیعی از البرز، ایران مرکزی، کپه داغ، سنندج - سیرجان و زاگرس، رسوبگذاری در مرز این دو سیستم پیوسته بوده و ناپیوستگی رسوبی ناشی از رویداد زمین ساختی سیمیرین پسین، پیش از بارمین صورت گرفته و مهمترین حادثه آن از نوع خشکی زایی بوده و شواهد کوهزایی منسوب به آن (سیمیرین پسین)، حاصل رخداد قدیمی تری است که در ژوراسیک میانی (سیمیرین میانی) روی داده است.

ب) تشکیلات کرتاسه در منطقه مورد مطالعه

سنگ آهک های اُربیتولین دار کرتاسه پایینی، یکی از شاخص ترین واحدهای سنگی ایران مرکزی است که اغلب با لایه های آواری قرمز رنگ آغاز و به طور پیشرونده و گاه دگرشیب سنگ های قدیمی تر را می پوشانند. گستردگی زیاد این سنگ ها، در نواحی گوناگون ایران مرکزی، گویای پیشروی گسترده دریا و پوشیده شدن بسیاری از مناطق با دریای پیشرونده کرتاسه پایینی است. در مناطقی که توالی کرتاسه پایینی بر روی سنگ های قدیمی تر از ژوراسیک بالایی قرار دارند، ناپوستگی از نوع دگرشیبی زاویه دار و گاه آذرین پی می باشد. ولی در محل هایی که سنگ های کرتاسه پایینی با ردیف های ژوراسیک بالا همشیب و پیوسته است.

سنگ های کرتاسه پایین ایران مرکزی دو رخساره به طور کامل متفاوت دارد. در گستره های وسیعی از این پهنه، رخساره سنگ های کرتاسه پایینی نشانگر سکوه های کربناتی است، ولی در فروافتادگی های محدود به زون های گسلی، حوضه فرونشست درخور توجه داشته و به همین رو در این گونه نواحی، سنگ های کرتاسه پایینی رخساره فلیش مانند دارند و شامل شیل های خور و بیابانک بیابانک می باشند. رخساره کربناتی کرتاسه پایین شامل سه واحد سنگی زیر است:

- ردیف های آواری زیرین، متشکل از نهشته های کنگلومرایی و ماسه سنگی، به سن هاتریون - بارمین، به رنگ سُرخ ارغوانی که گاهی میان لایه هایی از مارن و یا سنگ آهک دارد و در شمال کرمان، افق های گچ به آن افزوده می شود. ضخامت این واحد از خیلی کم (۱۵ تا ۱۰ متر) تا حدود چند صد متر متغیر است.

- ردیف های کربناتی میانی، واحدی بسیار آشکار از کربنات های ضخیم لایه با سیمای کوه ساز است که به داشتن اُربیتولین و دیگر سنگواره های بارمین - اوایل آلبین شاخص است. رخساره سنگی کربنات های اُربیتولین دار ایران مرکزی نشانگر محیط های دریایی گرم با ژرفای کم و گاهی نشانگر محیط های ریفی است و با سنگ آهک های اُربیتولین دار دیگر مناطق ایران، شباهت های سنگی و زیستی زیادی دارد.

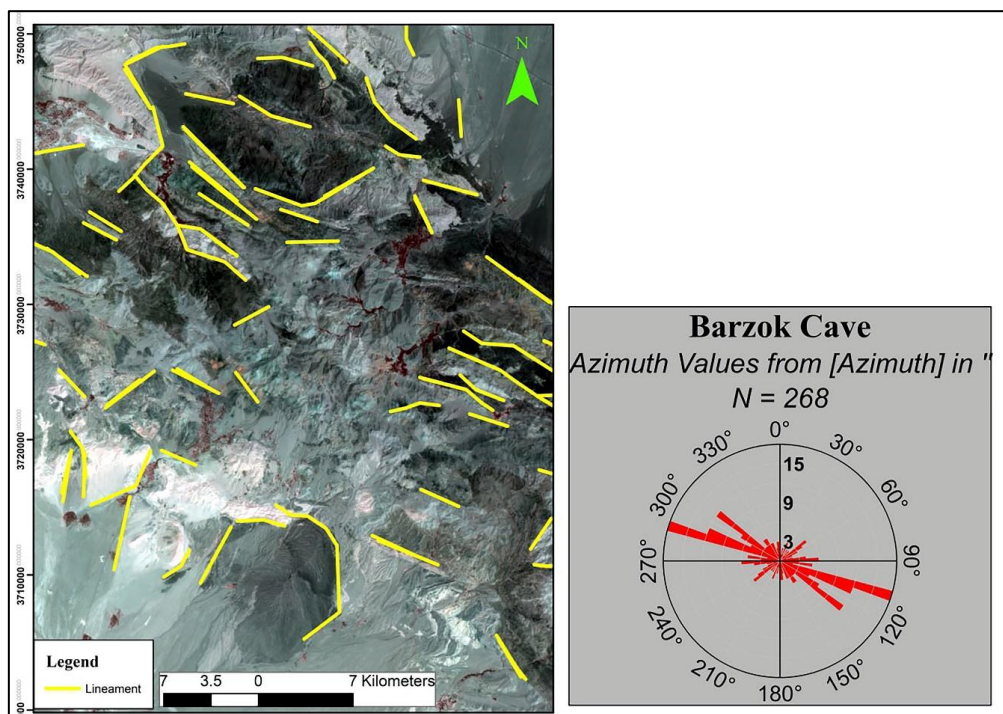
- ردیف های شیلی - مارنی بالایی، ردیفی از شیل و مارن های رسی تیره رنگ با رنگ هوازگی مایل به سبز زیتونی و زرد است که به ویژه در اصفهان، یزد، شرق سمنان، کاشان و انارک، سنگ آهک های اُربیتولین دار را می پوشاند. این واحد سنگی، شکل فرسوده و تپه ماهوری داشته و فسیل شاخص آن آمونیت های نوع بودانتی سراس بوده و معرف آشکوب آلبین است. به همین رو، از این ردیف های شیلی اغلب با عنوان شیل های آلبین یاد می شود. گسترش جغرافیایی شیل های آلبین محدود به ایران مرکزی نیست. در پهنه های زاگرس، البرز، کپه داغ نیز ردیف های آلبین، شیل های سبزرنگی هستند که می تواند بیانگر شرایط یکسانی رسوبی زمان آلبین در تمام ایران باشد.

از اوایل کرتاسه پسین، تحولات زمین ساختی موجب تغییرات زیادی در وسعت، ژرفا و شرایط زیستی حوضه های رسوبی شده، به سانی که در اثر این رویداد حوضه های مستقلی به وجود آمده که از نظر رخساره شرایط رسوب گذاری و محیطی با هم اختلاف عمده داشته و آغاز و پایان آنها در همه جا همزمان نیست. به همین رو، در بیشتر نقاط ایران مرکزی، ردیف های کرتاسه بالایی با رسوب های کم ژرفای سنومانین آغاز می شود ولی در مجموع ماسه سنگ گلاکونیت دار، سنگ آهک های هیپوریت و اینوسراموس دار و نهشته های شیلی - مارنی عمومیت دارند. در تغییرات مربوط به رخساره و ضخامت رسوبات کرتاسه بالایی ایران مرکزی رویدادهای زمین ساختی و فعالیت دوباره گسل ها نقش اساسی داشته اند. در بیشتر نقاط ایران

مرکزی، توالی کرتاسه بالایی کامل و پیوسته نیست و شواهد ناپیوستگی‌های رسوبی متعدد و مکرر قابل مشاهده است. ناپیوستگی‌های رسوبی بین توالی کرتاسه بالای ایران مرکزی و یا حذف قسمتی از توالی‌ها، نیز پیامد حرکات تکتونیکی همزمان با رسوبگذاری است که از آن جمله می‌توان به ناپیوستگی دگرشیب بین رسوبات سانتونین و کامپانین در جندق و هفت تومن، دگرشیبی بین رسوبات کامپانین و ماستریشین میانی با بالایی و سرانجام خروج گسترده زمین در نواحی اصفهان، زفره، گلپایگان و یزد در اواخر ماستریشین اشاره کرد که عامل آن رویداد لارامین است

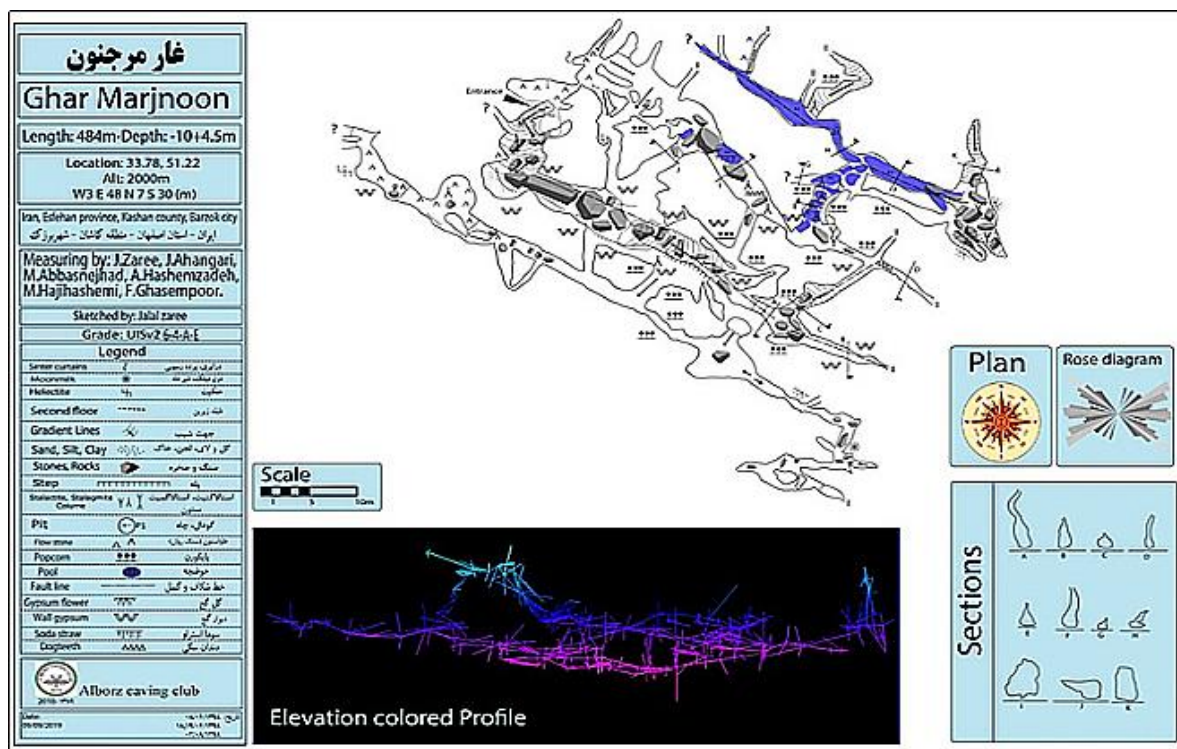
- نهشته‌های غار کارستی برزک

با توجه به مجاورت این غار با تشکیلات متعدد تراورتنی سازند قم به سن الیگوس-میوسن و متاثر بودن منطقه از تکاپوهای آتشفشانی ائوسن و وجود تغییرات دمایی آب‌های کارستی و تغییرات اقلیمی و دمایی نسبتاً شدید در دوره‌های پیدایش و تکوین غار، می‌توان نتیجه گرفت که گسترش این غار در دوره‌های متعدد و نامنظم رخ داده که تنوع عوارض کارستی تشکیل شده در این غار نیز می‌تواند موید این موضوع باشد. فرایندهای مختلف گسلی و تکتونیکی در زمانهای مختلف بسیار تاثیرگذار بر روی شکل دهی این غار بوده است. طوریکه با بررسی فرایندهای تکتونیکی و ترسیم رزدياگرام آن می‌توان به بررسی جهت و برآیندهای مختلف تکتونیکی دست یافت. شکل ۶ نقشه ماهواره ای و نقشه رزدياگرام ترسیم شده در این منطقه را نشان می‌دهد. وجود نیروهای متعدد تکتونیکی در طی زمانهای مختلف زمین شناسی که بطور غالب در روند شمال غرب به جنوب شرق با آزیموت $N268^\circ$ قرار داشته اند، در روند ایجاد غار بسیار موثر بوده اند. طوریکه در شکل ۷ ملاحظه می‌شود در نقشه غار تهیه شده توسط گروه غارنوردان البرز سال ۲۰۱۹، این غار دارای یک سیستم انتقال آب بوده و در راستای انحلال سنگهای آهکی که متاثر از سیستم های گسلی و تکتونیکی (یزدانی، ۱۴۰۱) می باشد، شکل گرفته است.



شکل ۶: نقشه ماهواره ای از منطقه برزک و نمودار رزدياگرام ترسیم شده از برآیند فرایندهای تکتونیکی در منطقه مورد مطالعه

همانطور که در این شکل نشان داده شده شکل غار برزک در امتداد شمال غرب به جنوب شرق تشکیل شده و مجراهای اصلی آن شکل گرفته است. همچنین در جهات عمود بر آن و افقی نیز تعدادی از راه آبهای غار نیز تشکیل شده است که متاثر از حرکات تکتونیکی در فازهای مختلف زمین شناسی از سیمرین، لارامین تا آلپین بوده است. تشکیل این غار کارستی با فعالیت گسلی از نوع معکوس، آغاز شده و نیروهای فشارشی با امتداد شمال شرق - جنوب غرب، باعث جابجایی لایه های آهکی کرتاسه در امتداد صفحه گسلی شده است. رژیم های فرسایشی، باعث شکل گیری درزه ها و شکاف های متعددی شده که همگی از حرکات گسل مذکور، تبعیت نموده و در این آهک ها، باعث افزایش تخلخل و نفوذ پذیری ثانویه توده سنگی شده اند.



شکل ۷: نقشه غار برزک (تپه مرجنون) با فرم کلی مارپیچ، گروه غارنوردان البرز (اقتباس از Zaree et al., 2019)

در شکل ۸ (الف و ب) ورودی و خروجی غار نشان داده شده است. شکل ۸ (الف) دهانه ورودی غار را نشان می دهد که در سمت شمال شرق تپه مرجنون واقع شده و شکل ۸ (ب) دهانه خروجی غار که از داخل غار عکسبرداری شده است. لازم به ذکر است دهانه خروجی غار در سمت جنوب شرق تپه برزوک قرار گرفته است. تقسیم بندی های متعددی برای نهشته های درون غار توسط محققان مختلف ارائه شده، از جمله مهمترین آنها می توان به اطلاعات بوگل^{۳۳} (۱۹۸۰)؛ گال^{۳۴} (۱۹۹۸)؛ فورد و ویلیامز^{۲۵} (۲۰۱۳) اشاره کرد.

رسوبات درون غار را به دو دست اصلی تخریبی و شیمیایی تقسیم می‌شوند (وایت^{۲۶}، ۲۰۰۷). تشکیل نهشته‌های آهکی درون غارها نتیجه فرآیندهای انحلال و رسوب‌گذاری آهسته‌ای است که در بازه‌های زمانی طولانی رخ می‌دهند. هنگامی که آب‌های نفوذی از طریق شکستگی‌ها و درزه‌های موجود در سنگ‌های آهکی به درون غار راه می‌یابند، ترکیباتی مانند کلسیت، آراگونیت و گچ از دیواره‌های غار در آب حل می‌شوند. با ورود این محلول اشباع به فضای داخلی غار و کاهش فشار جزئی باعث آزاد شدن دی‌اکسید کربن محلول می‌شود که این امر کاهش حلالیت یون‌های کلسیم و بی‌کربنات را به دنبال دارد. در نتیجه، فرآیند رسوب‌گذاری آغاز شده و به‌مرور زمان، که ممکن است ده‌ها هزار سال به طول بیانجامد، نهشته‌های آهکی مختلفی شکل می‌گیرند. نرخ تشکیل غارسنگ‌ها تحت تأثیر عواملی همچون غلظت دی‌اکسید کربن، دما، میزان تبادل گازی و ترکیب شیمیایی آب قرار دارد.

اشکال استلاگمیت^{۲۷}، استلاکتیت^{۲۸}، فلواستون^{۲۹}، دراپری^{۳۰}، ریم استون^{۳۱}، پاپ کورن^{۳۲} یا کورالوئید^{۳۳}، استارز^{۳۴}، کلسیت^{۳۵} و هلکتیت^{۳۶} عمده نهشته‌های شیمیایی غار بزرگ هستند که دارای سنین متفاوت می‌باشند. نهشته‌های آهکی موجود در قسمتهای مختلف غار دیده شده که تصاویری از آنها در مجموعه شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. رسوبات از دو جهت در تشخیص تحولات ریخت‌زایی حائز اهمیت هستند. آنها اطلاعات مهمی درباره اندازه مجرا و نرخ سرعت جریان در اختیار قرار می‌دهند. در واقع به کمک جورشدگی اندازه رسوبات و بازشدگی مجرا، می‌توان نرخ تخلیه از غار را ارزیابی نمود (آدورا و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۸: دهانه ورودی غار (a) شمالشرق و دهانه خروجی (b) در جنوب غرب تپه بزرگ

- 26 White
- 27 Stalacmite
- 28 Stalactite
- 29 Flowstone
- 30 Drapery
- 31 Rimstone
- 32 Popcorn
- 33 Coralloids
- 34 Stars
- 35 Calsite
- 36 Helictite



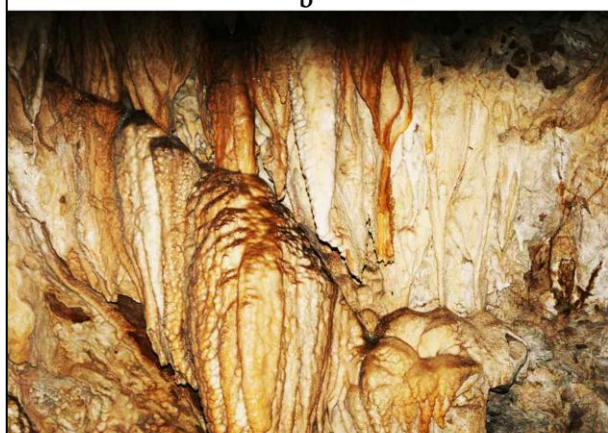
شکل ۹: اشکال نهشته های شیمیایی موجود در غار برزک: الیت (a)، هلیکتیت (b)



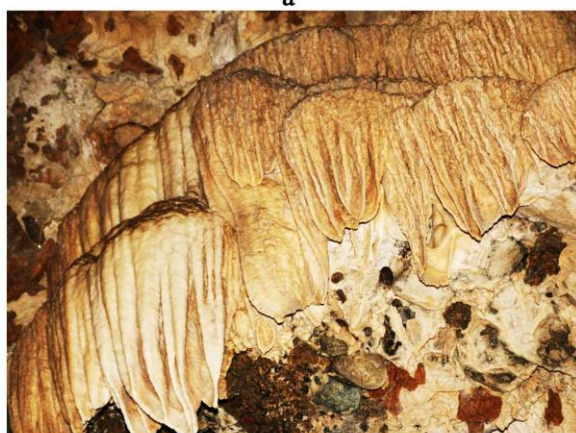
b



a



d



c



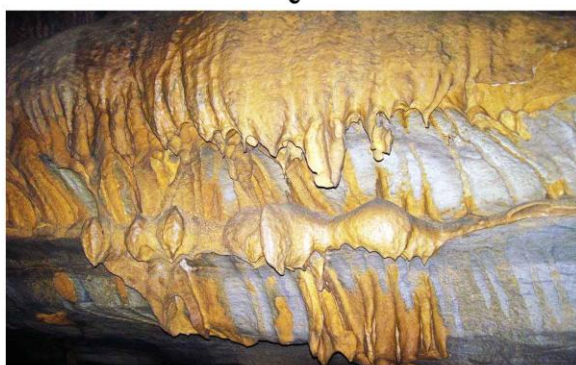
f



e



h



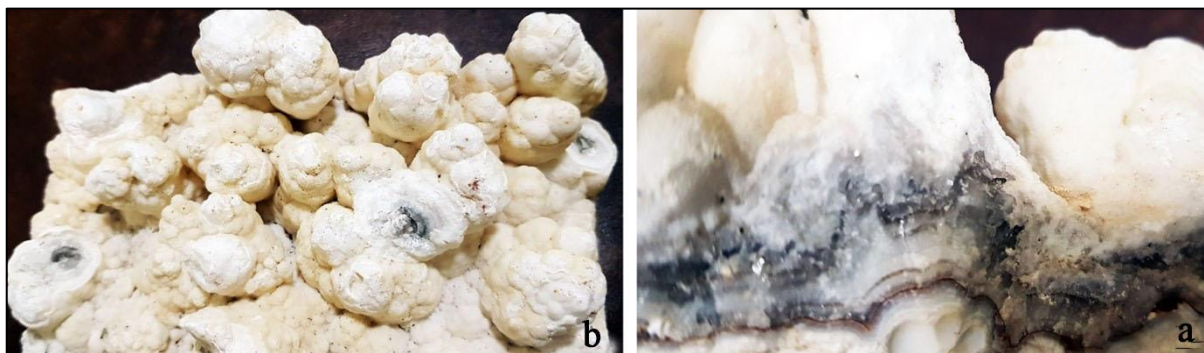
g

شکل ۱۰: تعدادی از اشکال نهشته های شیمیایی غار برزک (a) ریم استون، (b) استلاکتیک و استلاکمیت، (c) دراپری، (d) فلواستون، (e) کلسیت و هلکتیک، (f) فلواستون، (g) دراپری، (h) وجود آب در غار فعال، چشمه های جوشان آب در غار (عکس از یزدانی در همین مقاله)



شکل ۱۱. تعدادی از اشکال نهشته های شیمیایی غار برزک (a) استلاکتیک و استلاکمیت، (b) دراپری، ریم استون، فلواستون، (c) آراگونیت، وجود آب در غار و ادامه نهشت رسوبات و شاهی بر فعال بودن غار، (d) دراپری، ریم استون، فلواستون، (e) پاپ کورن، (f) پاپ کورن و ریم استون، (g) کلیست و آراگونیت، (h) کلیست (عکس از یزدانی در همین مقاله).

شکل های نهشته های آهکی موجود در غار فعال غار برزک همچنان نیز با وجود آب و تشکیل آنها در داخل غار تشکیل و اشکال بینظیری را خلق می کنند که می توان تعدادی از آنها را در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ می توان ملاحظه کرد. وجود آب در غار نشان دهنده غار فعال می باشد که در غار برزک قابل مشاهده است. در شکل (a-b) ۱۲ نمونه هایی از نهشته های آهکی غار برزک، شامل اشکال گل کلمی یا پاپ کورن^{۳۷} و کورالوئید^{۳۸} مشاهده می شود که در نتیجه فرآیندهای ژئوشیمیایی تشکیل شده اند.

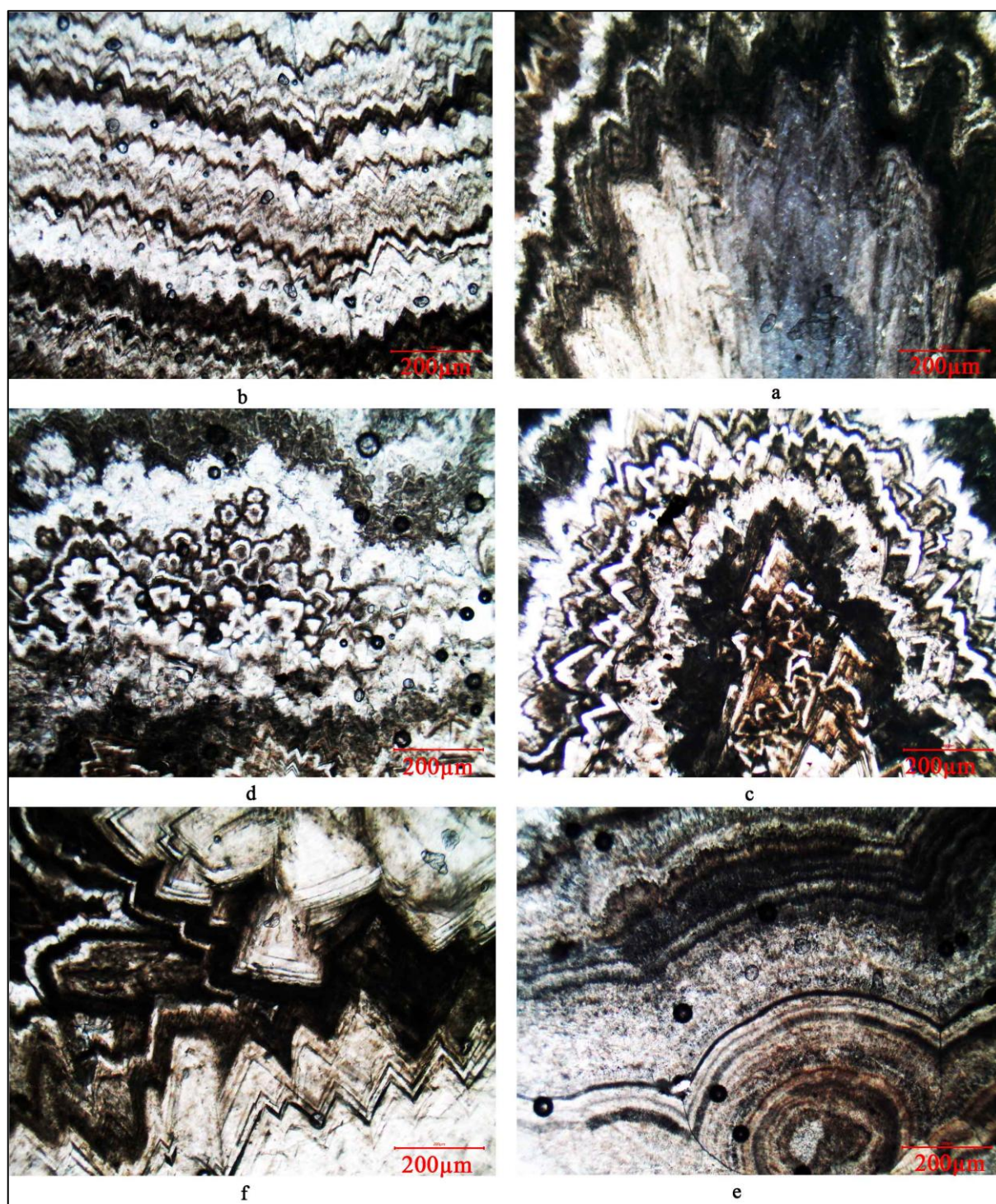


شکل (a-b) ۱۲: تصویری از یک سنگ آهکی داخل غار بصورت گل کلمی یا پاپ کورن

غار سنگها معمولاً در غارهای سنگ آهکی و غارهای تشکیل شده از صخره های دولومیتی که انحلال پذیر باشند، تشکیل می شوند. غاری که در آن رطوبت وجود دارد و در آن شکلهای مختلفی که حاصل از انحلال و تشکیل صخره ها و رشد شکلهای بی نظیر آهکی هستند را غار فعال می گویند، غار برزک یکی از غارهای فعال می باشد. بررسی غارسنگها می تواند در خصوص تعیین آب و هوای گذشته نیز کمک کنند. در شکل (a-f) ۱۳ اشکال متنوعی از تغییرات انحلال و رسوبگذاری با رنگها و اشکال متفاوت بصورت گل کلمی و کریستالیزه در سنگهای رسوبی در غار برزک بصورت مقاطع نازکی از سنگهای داخل غار، نشان داده شده است. ترکیبات مختلف موجود در آب غار، تغییرات دمایی آب های کارستی، ترکیبات هیدروشیمیایی و تغییرات اقلیمی و دمایی نسبتاً شدید در دوره های پیدایش و تکوین غار، موجب تغییراتی در شکل، نحوه تشکیل، رنگ و میزان تشکیل اشکال موجود در سنگهای غار شده است و هنوز این فرآیندها ادامه دارند.

37 Popcorn

38 Coralloids



شکل ۱۳: (a-f) اشکال متنوعی از تغییرات انحلال، رسوبگذاری و کریستالیزه شدن در سنگهای رسوبی در غار برزک

- شیمی توسعه کارست

واکنش های شیمیایی حاکم بر تشکیلات غار برزک که از آهک های کرتاسه تشکیل شده، بر حسب مول و میزان اسیدیته بر اساس شکل ۱۱ محاسبه می شود (باید توجه داشت که یون های H و OH، به عنوان فرآورده های برگشت پذیر از H₂O و در شرایط استاندارد در نظر گرفته می شوند). در جدول ۱ نیز به تعادل شیمیایی ترکیبات متداول یک غار فعال، اشاره می شود:

Dissociation of H ₂ O: $H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$	
$K_w = \frac{a_{H^+} * a_{OH^-}}{a_{H_2O}}$	Under dilute conditions:
At 25°C $K_w = 10^{-14}$	$a_1 = [i]$
K_w is temperature dependent	And $a_{H_2O} = 1$
	Hence:
At 25°C $K_w = 10^{-14}$	$K_w = [H^+] * [OH^-]$
Neutral water $[H^+] = [OH^-]$	
At 25°C pH of neutral water = 7	
At 0°C $K_w = 10^{-14.727}$ and neutral water has a pH of 7.363	
At 60°C $K_w = 10^{-13}$ and neutral water has a pH of 6.5	

شکل ۱۱: واکنش های شیمیایی حاکم بر تشکیلات غار برزک از آهک های کرتاسه، بر حسب مول و میزان اسیدیته بر اساس معادله استاندارد

واکنش های قابل توجه در فاز آبی با توجه به ثابت لگاریتم K، بیانگر تمایل و پایداری ترکیبات شیمیایی به ایجاد واکنش های شیمیایی و تشکیل ترکیبات نهشته جدید است. در جدول ۱. تعادل شیمیایی ترکیبات متداول کارست (Liu et al., 2016) نشان داده شده است.

جدول ۱. تعادل شیمیایی ترکیبات متداول کارست (Liu et al., 2016)

Reaction Term	Dissolution Reaction Equation
CO ₂ (g)	$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$
Anhydrite	$CaSO_4 \rightleftharpoons Ca^{2+} + SO_4^{2-}$
Halite	$NaCl \rightleftharpoons Na^+ + Cl^-$
Calcite	$CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$
Cation Exchange	$2NaX + Ca^{2+} \rightleftharpoons 2Na^+ + CaX_2$

با توجه به شیمی نهشته های غار برزک، می توان از میزان ثابت لگاریتم K، به درک توسعه شکل های گوناگون تشکیل سنگ نهشته های کارستی غار پی برد. در جدول ۲ این موارد نشان داده شده است.

جدول ۲: واکنش های شیمیایی کارست آهکی و ثابت لگاریتم K (Marandi et al., 2004)

Reactions defining the specciation	log K
$H_2O = OH^- + H^+$	-14.0
$Ba^{2+} + CO_3^{2-} = BaCO_3$	2.71
$Ba^{2+} + HCO_3^- = BaHCO_3^+$	0.982
$Ba^{2+} + SO_4^{2-} = BaSO_4$	2.7
$BaCO_3 = Ba^{2+} + CO_3^{2-}$	-8.562
$BaSO_4 = Ba^{2+} + SO_4^{2-}$	-9.97
$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3$	3.224
$Ca^{2+} + HCO_3^- = CaHCO_3^+$	1.106
$Ca^{2+} + SO_4^{2-} = CaSO_4$	2.3
$CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$	-8.48
$CO_3^{2-} + 2H^+ = CO_2 + H_2O$	16.681
$H^+ + CO_3^{2-} = HCO_3^-$	10.329
$Mg^{2+} + HCO_3^- = MgHCO_3^+$	1.07
$Mg^{2+} + SO_4^{2-} = MgSO_4$	2.37
$NO_3^- + 10H^+ + 8e^- = NH_4^+ + 3H_2O$	119.077
$NO_3^- + 2H^+ + 2e^- = NO_2^- + H_2O$	28.57

انحلال شیمیایی توسط اسید کربنیک و اسیدهای آلی، موجب تشکیل نهشته های کارستی بر روی توده های آهکی و پیدایش شبکه کارستی غار برزک شده است.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می دهد که تکامل غار برزک به شدت تحت تأثیر برهم کنش فرآیندهای تکتونیکی، هیدروژئوشیمیایی و فرسایشی بوده است. فعالیت گسل های معکوس منطقه، با ایجاد شکستگی ها و درزه های متعدد، شرایط لازم برای نفوذپذیری اولیه و آغاز فرآیندهای انحلال شیمیایی را فراهم کرده است. انحلال سنگ های آهکی تحت تأثیر آب های اسیدی، که از ترکیب CO_2 با آب های جوی حاصل شده اند، نقش کلیدی در توسعه شبکه های کارستی این غار داشته است. مطالعه نهشته های کارستی، از جمله استالاکمیت ها، استالاکتیت ها و فلواستون ها، نشان دهنده چندین فاز تکاملی در طول زمان است که احتمالاً با تغییرات اقلیمی و نوسانات سطح ایستابی مرتبط بوده اند. پردازش داده های سنجش از دور و تحلیل ساختاری منطقه، بیانگر همبستگی بالای توسعه مسیرهای غار با فعالیت های زمین ساختی است. یافته های این پژوهش می توانند به درک بهتر مکانیسم های غارزایی در سیستم های کارستی مشابه کمک کرده و در مدیریت منابع آب زیرزمینی، تحلیل پایداری سازه های کارستی و مطالعات ژئومورفولوژیکی منطقه مؤثر باشند. ادامه این تحقیقات با استفاده از روش های ژئوفیزیکی و مدل سازی عددی، می تواند به ارزیابی دقیق تر دینامیک سیستم های کارستی کمک کند.

منابع

- ۳۲۵ ص. آقانیاتی، ع. (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. افشاری، س.، آقا محمدی زنجیرآباد، ح.، نوری، م.، (۱۳۹۵). استخراج گسل های زمین شناسی با استفاده از داده های سنجش از دور (مطالعه موردی: منطقه کپه داغ- شمال استان خراسان شمالی). ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۵۴-۶۱، (۱۳۷۰).
- جعفری، ت.، ارجمندزاده، ر.، (۱۴۰۱). شناسایی و تحلیل سیستماتیک غارها (مطالعه موردی: ۱۶ غار در استان خراسان شمالی). پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۴)، ۵۵۵-۵۳۱.
- حدادیان، م.، افشاریان زاده، م.، فرشچی، ژ.، (۱۹۹۳). نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان. سازمان زمین شناسی کشور. خضری، س.، شهابی، ه.، محمدی، س.، (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۶(۱)، ۳۹-۲۱.
- رضایی، م.، نخعی، م.، (۱۳۸۷). نحوه تشکیل غار کارستی کتله خور در استان زنجان. زمین شناسی ایران. علی پور، ص.، (۱۳۸۶). غار یاریم قییه ماکو (بررسی و شناخت). فصلنامه علوم زمین، ۱۷(۶۶). قبادی، م.، محبی حسن آبادی، ی.، عبدی لر، ی.، (۱۳۹۰). نقش مطالعات ژئومورفولوژی کارست در شناخت منشأ غارها. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۴(شماره ۳ و ۴)، ۳۰-۱۹.
- کاظمی، م.، (۱۳۹۱). بررسی عوامل موثر بر تحول ژئومورفولوژی کارست در کوه گاماسیاب با تاکید بر تحول لاپیه (جنوب نهاوند). نشریه جغرافیای سرزمین، ۹(۳۳)، ۱۲۸-۱۰۹.
- واعظی هیر، ع.، جبرائیلی اندریان، ن.، بختیاری، ش.، (۱۳۹۸). بررسی توسعه کارست در استان کردستان؛ مکانیسم تشکیل ژئومورفولوژی غارها و هیدروژئولوژی چشمه های کارستی. نشریه هیدروژئومورفولوژی، ۵(۲۰)، ۴۱-۵۶.
- یزدانی، م.، (۱۴۰۱). بررسی عوامل زمین شناختی موثر بر پیدایش تشکیلات کارستی غار «برزک». هفتمین همایش رسوب شناسی ایران، دانشگاه اصفهان، ۲۳-۲۵ آذرماه ۱۴۰۱.
- Akinwumiju, A. S., Olorunfemi, M. O., Afolabi, O., (2016). Automated lineament mapping from remotely sensed data: Case study Osun drainage basin, southwestern Nigeria. *Ife Journal of Science*, 18(1), 177-201.
- Alshayef, M. S., Javed, A., (2018). Geomatica-Based Approach for Automatic Extraction of Lineaments from ASTER-GDEM Data, in Part of Al-Rawdah, Shabwah, Southeast Yemen. In *Hydrologic Modeling: Select Proceedings of ICWEES-2016* (pp. 423-434). Springer.
- Audra, P., Bini, A., Gabrovšek, F., Häuselmann, P., HOBLÉA, F., Jeannin, P.Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Šušteršič, F., Tognini, P., (2007). Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography. *Acta Carsologica*, 36(1).
- Bogbus, M., Crawfis, R., (2009). Explicit Generation of 3D Models of Solution Caves for Virtual Environments. In *CGVR* (pp. 85-90).
- Bögli, A. (1980). *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ford, D., Williams, P.D., (2013). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Frumkin, A., Fischhendler, I., (2005). Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology*, 67(3), 457-471. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.009>
- Gale, S. J. (1998). *Caves: Processes, development and management*. Australian Geographer, 29(2), 265.
- Jennings, J. N., (1997). *Cave and Karst Terminology*. Australian speleological federation incorporated administrative handbook.
- Klimchouk, A., (2005). Conceptualisation of speleogenesis in multi-storey artesian systems: a model of transverse speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 34(1), 4.
- Klimchouk, A., (2009). Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106(1), 100-117. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.013>
- Lazaridis, G., Katrivanos, E., Dora, D., Papadopoulou, L., Lazos, I., Chatzipetros, A., (2024). Evaluating the Relation of Cave Passage Formation to Stress-Field: Spatio-Temporal Correlation of Speleogenesis with Active Tectonics in Asprorema Cave (Mt. Pinovo, Greece). *Geosciences*, 14(5), 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050126>
- Liu, B., Malekian, R., Xu, J., (2016). Groundwater mixing process identification in deep mines based on hydrogeochemical property analysis. *Applied Sciences*, 7(1), 42.

- Maqueda, A., Renard, P., Filipponi, M., (2023). Karst conduit size distribution evolution using speleogenesis modelling. *Environmental Earth Sciences*, 82(14), 360.
- Marandi, A., Karro, E., Puura, E., (2004). Barium anomaly in the Cambrian-Vendian aquifer system in North Estonia. *Environmental Geology*, 47, 132–139.
- Pandey, P., Sharma, L. N., (2019). Image processing techniques applied to satellite data for extracting lineaments using PCI geomatica and their morphotectonic interpretation in the parts of Northwestern Himalayan Frontal Thrust. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(5), 809–820.
- Pardo-Iguzquiza, E., Durán-Valsero, J., Rodríguez-Galiano, V., (2011). Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits. *Geomorphology*, 132(1), 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.030>
- Sukumar, M., Venkatesan, N., Babu, C. N., (2014). A review of various lineament detection techniques for high resolution satellite images. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 4(3), 72–78.
- Tîrlă, L., Vijulie, I., (2013). Structural–tectonic controls and geomorphology of the karst corridors in alpine limestone ridges: Southern Carpathians, Romania. *Geomorphology*, 197, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.003>
- White, W. B., (2007). Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1), 76–93.
- Zaree, J., Ahangari, J., Abbasneghad, M., Hashemzadeh, A., Hajihashemi, M., Ghasempoor, F., (2019). Ghar Marjnoon. Alborz caving club.