



تأثیر جنس سنگ بستر و مواد محلول بر شکل‌گیری اسکالوپ‌ها در غار نمکی نمکسار و غار آهکی سراب

محمد نخعی^۱، سارا عدالتیان^{۲*}، اصغر دولتی^۳

۱- استاد، گروه آموزشی زمین‌شناسی کاربردی، مرکز پژوهشی آب، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۲- دانشجوی دکتری آب زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۳- استاد گروه آموزشی زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول: K2_infinite@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴

چکیده

اسکالوپ‌ها اشکال صدفی شکلی هستند که در اثر عبور جریان آب یا باد در دیواره‌ها و سقف غار شکل می‌گیرد و می‌تواند نشان‌دهنده مشخصات هیدرولیکی جریان در غار باشند. اسکالوپ‌ها نامتقارن هستند. شیب آن‌ها در پایین جریان ملایم و کم شیب و در بالای جریان پرشیب و تند است. شکل‌گیری اسکالوپ‌ها بر پایه جریان آشفته حلال بر روی سطح قابل حل است. در طبیعت، اغلب این پدیده در اثر انحلال کربناته با آب یا یخ توسط هوا ممکن است رخ دهد. در برخی موارد، انحلال و تشکیل اسکالوپ در غارهایی که در سنگ‌های کلرایده و ژئوسوم شکل می‌گیرد، ممکن است روی دهد. در تشکیل اسکالوپ‌هایی که توسط جریان آب شکل می‌گیرند، مشخصات هیدرولیکی و شیمیایی جریان آبی و نیز نوع سنگ بستر، در مورفولوژی اسکالوپ‌ها موثر است. جهت بررسی تأثیر جنس سنگ بستر و مواد محلول در آب بر شکل‌گیری اسکالوپ‌ها، دو غار نمکی و آهکی که دارای اسکالوپ بودند باهم مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپ‌های غار سراب نسبت به غار نمکسار، سرعت جریان در غار سراب کمتر بود. عدد رینولدز در هر دو غار تقریباً یکسان است و سرعت جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار اما دبی تخلیه در هر دو غار تقریباً یکسان بود. همچنین سرعت رسوبگذاری در غار نمکسار ۱/۸ برابر بیشتر از غار سراب بود. اهمیت این مقاله در این است که تاکنون هیچ گونه مقایسه‌ای بین اسکالوپ‌های نمکی و آهکی انجام نشده است.

کلیدواژه: اسکالوپ، غار سراب، غار نمکی، نقشه برداری غار، هیدروژئولوژی.

مقدمه

غار شکل می‌گیرد و می‌تواند نشان‌دهنده مشخصات هیدرولیکی جریان در غار باشند. این اشکال می‌تواند در غارهای نمکی، گچی و آهکی شکل گیرد. جهت بررسی تأثیر جنس سنگ بستر غار در شکل‌گیری اسکالوپ‌ها، غار سراب در استان همدان نیز که دارای این اشکال بودند، انتخاب گردید. غار سراب در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری از شمال غرب شهرستان همدان، استان همدان، و در سنگ‌های آهک ژوراسیک دگرگون شده شکل گرفته است. این غار در مسیر خروجی خود آثار جریان آب را نشان می‌دهد و پس از حدود بیست متر پیشروی به دریاچه‌های عمیقی منتهی می‌گردد.

جهت مقایسه اسکالوپ‌ها در هر دو غار نمکسار و سراب، تعدادی اسکالوپ انتخاب گردید و قطر کانال و یا عرض بین

غار نمکی نمکسار طبق نقشه‌برداری که از آن صورت گرفت حدود ۱۵۷ متر طول و ۱۹ متر عمق دارد. این غار شامل غارنهبشته‌های گل کلمی، کریستال و گل غار می‌باشد. جهت تعیین جنس سنگ بستر غار، از غارنهبشته گل غار نمونه‌برداری شد و با آنالیز پرتو X ساختار بلوری آن که کلراید سدیم می‌باشد، تعیین گردید. در سه بخش از این غار، اشکال حلزونی یا اسکالوپی مشاهده می‌گردد. اسکالوپ‌ها نامتقارن و صدفی شکلی هستند و شیب آن‌ها در یک جهت زیاد و در سمت مقابل پرشیب می‌باشد. این امر به دلیل تقسیم جریان عبوری و ایجاد هیدرولیک ادی در جهت جریان صورت گرفته است. این اشکال در اثر عبور جریان آب یا باد در دیواره‌ها و سقف

تحت شرایطی که اسکالوپ گسترش یافته، محاسبه شد. عدد رینولدز و سرعت آب، شرایط حرکت آب در هر دو غار را در گذشته نشان می‌دهد. با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپ‌های غار سراب نسبت به غار نمکسار، انتظار داشتیم سرعت جریان در غار سراب کمتر باشد. محاسبات نشان می‌دهد توان جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار است.

استلاگمیت و ستون‌هایی را دید که از سقف غار تا کف امتداد یافته‌اند. این مسیر بشکل تراورس پوشیده شده از کلسیت و فلواستون امتداد می‌یابد و سمت چپ آن به دریاچه ختم می‌گردد. در سمت راست سقف و دیواره از اسکالوپ پوشیده شده است. ادامه کار تنها با ورود به آب امکان‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در شمال آبادی بازخور واحدسنگی که از شیل‌های خاکستری روشن پلیتی، شیل‌های توقی، توف‌های آهکی و ماسه سنگ‌های کریوکی خاکستری مایل به سبز روشن میکادار دانه متوسط تا درشت (۶۰ تا ۲۰ سانتیمتر) لایه با درون لایه‌هایی از افق‌های کنگلومرای دانه‌ریز آهکی نومولیت‌دار تشکیل شده توسط یک واحد کنگلومرای پایه به صورت ناپیوسته و هم‌شیب بر روی واحد قرمز جگری رنگ قرار می‌گیرد.

واحد کنگلومرای پایه که ضخامت لایه (۱۰۰-۷۰ سانتیمتر) و رنگ خاکستری روشن دارد، از نظر سخت‌شدگی و جورشدگی متوسط و قطعات آن بیشتر از تشکیل دهنده‌های افیولیتی است. این واحد کنگلومرا تنها در محل دماغه ناودیس در زیر واحد سنگی ظاهر می‌شود و به علت گسله بودن مرز بین واحدهای سنگی در بیشتر طول همبری این واحد کنگلومرای پایه حذف و مشاهده نمی‌شود.

سن ائوسن زیرین-میانی را به این واحد سنگی نسبت می‌دهد. این واحد سنگی با رنگ سفید و ریخت چهره ساز و ستیغ ساز خود به صورت پیوسته و هم‌شیب بر تارک واحد سنگی دیگر به عنوان یک افق کلیدی و شاخص در گستره برکه قرار دارد که از مارن گچ‌دار و افق گچ به نسبت ضخیم تشکیل شده است. وجه تسمیه آبادی رباط سفید به دلیل گسترش همین واحد سنگی در طول رشته کوه‌های جنوب این آبادی می‌باشد. ضخامت این واحد سنگی کم و بیش شاید از صد متر تجاوز

دو دیواره موازی که اسکالوپ در آن توسعه یافته، اندازه گرفته شد. با اندازه‌گیری طول اسکالوپ‌ها در غارها و استفاده از رابطه میانگین ساتر، اندازه اسکالوپ میانگین به دست آمد و عدد رینولدز محاسبه گردید. سپس با داشتن مقادیر چگالی و ویسکوزیته سیال، با توجه به ترکیبات سیال که می‌تواند کربنات کلسیم و یا کلرایدسدیم باشد، سرعت متوسط سیال

غار نمکی نمکسار در محدوده روستای گلبقرائی در مسیر جاده مشهد - تربت حیدریه و در ۶۰ کیلومتری مشهد واقع شده است. غار در کوه‌های منفرد و در ارتفاع حدود ۲۰ متری از زمین‌های اطراف و با پوشش گیاهی بسیار اندکی قرار گرفته است (نجفی، ۱۳۹۶). اطراف غار نمکی حفره‌های بسیار زیاد دولین مشاهده می‌شود. روی سطح حفرات توسط لایه بسیار نازکی از نمک پوشیده شده است. اطراف دهانه غار کارن‌هایی وجود دارد که در سازندهای نمکی و ژئپس شکل گرفته است. کف غار مملو از کانی‌های خورد شده نمک، گچ، و ژئپس است که در اثر ریزش از سقف و حمل مواد از خارج غار بر اثر سیلاب می‌باشد. در انتهای غار روی سقف اشکال اسکالوپ به چشم می‌خورد که در اثر انحلال ایجاد گردیده است. همچنین سنگ‌های ریزشی مشاهده شده که داخل آن‌ها خار و خاشاک دیده می‌شود همچون خوشه‌های خشکیده جو یا گندم که احتمالاً باید توسط سیلاب به این مکان آورده شده باشد.

تزیینات داخل غار شامل گل غار، گل کلمی نمکی و کریستال‌های نمک می‌باشد. غار آهکی سراب در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری از شمال غرب شهرستان همدان، استان همدان، و در سنگ‌های ژوراسیک دگرگون شده شکل گرفته است. ورودی غار سراب از بلوک‌های سنگی تشکیل شده که در گذشته دهانه غار را مسدود کرده بودند اما جهت پیمایش مورد پاکسازی قرار گرفته‌اند. غار پس از ۱۰ متر راهروی ریفت مانند به سمت راست می‌چرخد و به سمت پایین که تالار کوچکی قرار دارد هدایت می‌شود. در این تالار اشکال اسکالوپ در سقف و دیواره‌های غار قابل تشخیص می‌باشد. از سمت چپ با یک گذرگاه کوچک مسیر ادامه می‌یابد. یک سوراخ کوچک در کف با یک جریان هوای سنگین دسترسی به اولین دریاچه غار را میسر می‌سازد (با شش متر طول و حداقل ۴ متر عمق). سپس با فرود دست به سنگ وارد دریاچه‌ای به عمق یک متر می‌شویم. در این قسمت دریاچه تزیینات Folia به چشم می‌خورد و کف دریاچه با رسوبات رسی و ماسه‌ای پوشیده شده است. در ادامه مسیر می‌توان فلواستون، استلاگتیت،

خوبی را برای این منطقه از نظر منبع اصلی تامین گچ استان و ایران داده است.

زمین شناسی غار آهکی سراب

ناحیه گل تپه-زرین آباد که غار سراب و علیصدر (با فاصله ۷ کیلومتر از غار سراب) در آن واقع است، از لحاظ موقعیت زمین شناسی بین دو منطقه واقع شده، قسمت های شمال آن در بخش ایران مرکزی و ناحیه جنوبی آن در زون سندج-سیرجان واقع است. بنابراین در محدوده مورد مطالعه، سنگ ها و اثرات تکتونیکی هر دو ناحیه را می توان مشاهده نمود. شیل ها و شیست های دگرگون شده ژوراسیک، قدیمی ترین سنگ هایی هستند که در منطقه مورد مطالعه شناخته شده اند. این سنگ ها بیشتر در حاشیه غربی و گاهی به صورت پراکنده در جنوب و شرق منطقه وجود دارد. در قسمت زیرین از نوع شیست های خاکستری رنگ و آهک کریستالیزه همراه با آهک دولومیتی که به صورت تداخل بین لایه های قرار گرفته وجود دارد.

رسوبات کرتاسه فقط در محدوده کوچکی از جنوب و مرکز دشت شناخته شده اند. این تشکیلات به دو واحد آهکی و شیلی تقسیم می گردند. واحد آهکی در حد جنوبی دشت گسترش داشته و ارتفاعات جنوب روستای قرخلر را تشکیل می دهند. گسترش این آهک ها در شرق دره خورونده نسبت به سایر جنوب روستای قرخلر را تشکیل می دهند. گسترش این آهک ها در شرق دره خورونده نسبت به سایر نقاط بیشتر بوده است. واحد شیلی در ۱۵ کیلومتری شرق کبودرآهنگ ارتفاعات کوه قره لار را تشکیل می دهد.

سازندالیگومیوسن در اطراف منطقه نسبت به سایر تشکیلات زیادتر بوده و چین خوردگی هایی به صورت تاقدیس و ناودیس به وجود آورده اند. این سازند شامل تناوبی از لایه های آهکی و مارنی بوده و در قسمت های فوقانی بیشتر از مارن سبز رنگ و ماسه سنگ تشکیل شده است. آهک ها در نواحی شمالی و مارن ها در قسمت شرقی دشت گسترش بیشتری دارند. رسوبات دوران چهارم، شامل رسوبات مخروط افکنه ای، واریزه های دامنه ای ارتفاعات و آبرفت های میان دشتی می باشد؛ این بیشتر می باشد.

شرایط آب و هوایی منطقه

آب های زیرزمینی منطقه غار سراب

نکند. ضخامت افق گچ خالص در حدود ۲۰ تا ۳۰ متر است که به صورت خیلی فعال از آن بهره برداری می شود.

زمین شناسی ساختمانی

به دنبال حرکات کوهزایی بعد از کرتاسه پسین و قبل از ائوسن که منجر به جای گرفتن مجموعه سنگ های افیولیتی و تشکیل حوضه های رسوبی ائوسن و جوان تر گردید، کامه های دیگر حرکات کوهزایی آلپ به ویژه حرکات کوهزایی مربوط به کامه بعد از پلیوسن نقش بسیار مهمی در شکل گیری چهره کنونی منطقه و تشکیل عناصر ساختمانی مانند چین خوردگی ها و گسل خوردگی و فعالیت ماگماتیسم در منطقه گردیده است. برخی از چین ها در اثر نیروهای وارده برگشته و سطح محوری آن ها یا گرایش آن ها به سمت نیروهای وارده است (Lundberg et al., 2017).

شدت چین خوردگی ها در اثر نیروهای وارده در خیلی از نقاط در حدی بوده که گسلش و راندگی پایان پذیرفته است. گسل های معکوس بیشتر از نوع گسل های کم زاویه هستند.

فعالیت حرکات کوهزایی بعد از ائوسن سبب فعالیت و تزریق توده ماگمایی دیوریتی در سنگ های کهن تر گردیده که احتمال دارد که زمان این فعالیت آذرین در اولیگوسن صورت گرفته باشد. آن دسته از کامه های کوهزایی آلپ که بعد از ائوسن اتفاق افتاده است سبب تغییر شکل در تشکیل دهنده های مجموعه افیولیتی شده به طوری که سبب شده این مجموعه در شمال آبادی رباط سفید بر روی واحدهای سنگی مربوط به ائوسن رانده شود و یا در داخل خود مجموعه افیولیتی بخش هایی از آن به صورت فلس مانند بر روی همدیگر رانده شود. شکل این تراشه ها و چگونگی قرار گرفتن آن ها بر روی هم نشان می دهد که به احتمال زیاد این تغییر شکل ها در یک زون فشاری و برشی با مؤلفه افقی امتداد لغز راست بر صورت گرفته است. وجود رخساره های سنگی مربوط به حوضه های رسوبی کم عمق و کولابی و گسترش وسیع این رخساره های سنگی سبب شده که گستره رباط سفید برای موادمعدنی تبخیری همچون گچ و نمک قابلیت خوبی داشته باشد، علی رغم اینکه تمامی واحدهای مارنی به گچ آغشته هستند و یا دارای درون لایه های نازکی از گچ هستند. ولی واحد سنگی E2gm، به دلیل داشتن افق گچ با سبزی زیاد در حد ۲۰ متر و خالص بودن آن و گستردگی واحد، قابلیت خیلی

ایستگاه فوق در سال آبی ۸۷-۸۶ در ایستگاه قلعه‌جوق به میزان ۲۰۱/۵ میلی‌متر بوده است (مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴).

بحث و نتایج

هر دو غار سراب با گرید UISV2-6-4-E و غار نمکی نمکسار با گرید UISV2-4-3-BC نقشه‌برداری گردید و مکان اسکالوپ‌ها در نقشه مشخص شد. نقشه‌برداری توسط متر لیزری دیستو X310 مجهز به کیت قطب‌نما و شیب‌سنج صورت گرفت که اطلاعات از طریق بلوتوث به نرم‌افزار توپودر وید منتقل گردید. با تعیین ایستگاه‌های نقشه‌برداری در نقاطی از غار که به یکدیگر دید مستقیم دارند و اندازه‌گیری طول، آزیموت (زاویه نسبت به شمال) و شیب بین دو ایستگاه به‌عنوان مقادیر اصلی، خطوط اصلی نقشه را ترسیم می‌نماییم. همچنین با اندازه‌گیری فاصله خطوط اصلی نقشه‌برداری از دیواره‌ها و سقف و کف غار، می‌توان فضای غار را در سه مقطع ترسیم نمود.

این دو غار به دلیل آن‌که اغلب آن به شکل افقی گسترش یافته بودند، صرفاً در نمای پلن ترسیم شدند و سایر اطلاعات نمای پروفایل مانند ارتفاع سقف و جهت شیب غار، به نمای پلن اضافه گردید.

مشخصات غار سراب

طول این غار ۱۷۰۰ متر و تغییرات عمق آن بیست متر می‌باشد. پس از صد متر اول اغلب مسیرها و معابر غار آبی است (Laumanns et al., 2000). عمق آب بین پنج تا بیست متر می‌باشد و دمای آب ۸ درجه سانتی‌گراد است. تیپ آب Ca-HCO₃ می‌باشد. آنالیز شیمیایی از آب صورت پذیرفت و نتایج به شرح زیر است:

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب غار سراب.

Table 1. The results of the chemical analysis of water samples from Sarab cave.

Name	Unit	R1-Cave Sarab 11/13/2019
Sample ID		
Date		11/13/2019
Calcium	mg/L	90
Magnesium	mg/L	50
Sodium	mg/L	5.2
Potassium	mg/L	0.23
Bicarbonate	mg/L	120
Chloride	mg/L	5.7
Dissolved Solids	mg/L	220
Conductivity	µmho/cm	300
pH		7.84
Alkalinity	mg CaCO ₃ /L	120
Carbonate	mg/L	0
Hardness	mg CaCO ₃ /L	140

وسعت محدوده مطالعاتی گل‌تپه-زرین‌آباد (محدوده غار سراب) برابر با ۶۴۸/۵۱ کیلومترمربع است که وسعت دشت و ارتفاعات مشرف بر آن به ترتیب برابر با ۱۰۹۴/۵ و ۴۰۷۰/۳ کیلومترمربع می‌باشد. وسعت دشت گل‌تپه برابر با ۳۹۹ کیلومترمربع و وسعت دشت زرین‌آباد برابر با ۶۹۵/۵ کیلومترمربع می‌باشد. در دشت‌های گل‌تپه و زرین‌آباد آبخوان آبرفتی آزاد به ترتیب دارای وسعت ۱۱۲ و ۴/۴۹۵ کیلومترمربع می‌باشند (مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴).

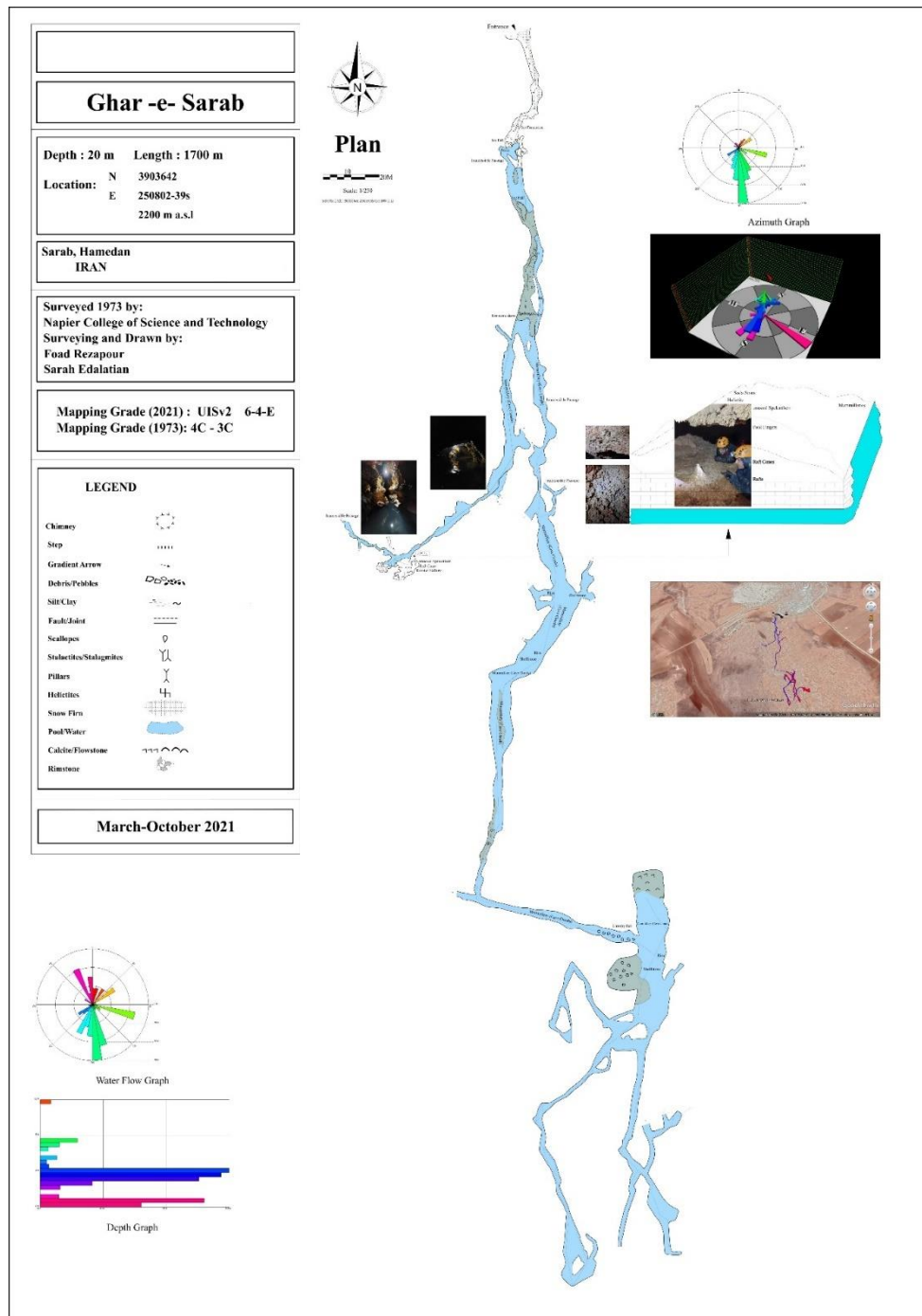
در دشت گل‌تپه رقوم منحنی‌های تراز آب‌زیرزمینی بین ۱۹۳۵ تا ۱۹۸۵ متر متغیر می‌باشد. منحنی‌های تراز آب‌زیرزمینی در این دشت به حالت کروی بوده و رقوم آن‌ها از جنوب شرق به شمال شرق کاهش می‌یابد. بیشینه تراز آب‌زیرزمینی با رقم ۱۹۸۵ متر مربوط به اراضی مخروط‌افکنه‌های واقع در جنوب شرقی دشت و کمینه آن در پایاب دشت ۱۹۳۵ متر می‌باشد. جهت جریان آب‌زیرزمینی در این دشت از جنوب شرق به شمال غرب می‌باشد. شیب هیدرولیکی آب‌زیرزمینی در اراضی مخروط‌افکنه‌ای دشت کمتر از ۱۰ در هزار، در اراضی میان‌دشتی ۴ در هزار و در اراضی پایاب دشتی کمتر از ۳ در هزار می‌باشد.

بارندگی

این محدوده دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا خشک و سرد است. منشأ عمده ریزش‌های جوی این منطقه مدیترانه‌ای بوده و منبع اصلی رطوبت هوا و بارندگی توسط جبهه‌های غربی تأمین می‌گردند. متوسط بارندگی دشت بر اساس آمار درازمدت (۳۶ ساله) ایستگاه پایگاه نوژه ۳۳۲/۷ میلی‌متر می‌باشد، ایستگاه قلعه‌جوق با دوره آماری ۱۷ ساله، با متوسط بارندگی ۳۱۹/۲ میلی‌متر در سال و میزان بارندگی

Ammonia	mg/L	0.01
Nitrite	mg/L	0.028
Nitrate	mg/L	20
Phosphate	mg/L	0.01
Silica	mg/L	---
Turbidity	NTU	0.21
Temperature	°C	18.6

- مقدار بسیار کم فسفات نشان می‌دهد که ممکن است در اثر فاضلاب یا کود کشاورزی ساده باشد چون بیشتر کودهای کشاورزی تجاری شامل فسفات هستند.
- غلظت موادمعدنی کربناته نسبتا پایین است. این نشان می‌دهد که آب یا خیلی طولانی در زمین نبوده و یا وقتی وارد زمین می‌شود خیلی اسیدی نبوده است. اگر آب برای مدت طولانی در آبخوان باشد و به‌خصوص اگر بیشتر اسیدی باشد، سنگ آهک بیشتری حل می‌شود. اسیدیته پایین برای یک محیط خشک به دلیل مقدار کم پوشش گیاهی برای تولید کربونیک اسید رایج است.
- درصد نسبتا بالای منیزیم در مقایسه با کلسیم نشان می‌دهد که سنگ دولومیتی است.
- فسفات کم است که می‌گوید تنها مقدار کمی گچ در سنگ وجود دارد.
- مقدار سدیم و کلرید کمی بیشتر از مقدار نرمال است. این نشان می‌دهد که غار احتمالا از دریا و یا مناطق نمک سنگ طبیعی فاصله دارند اما به اندازه کافی نزدیک است که با مقدار کمی نمک را حمل کند.
- نیترات بالاتر از حد قابل قبول برای استانداردهای بهداشتی است، بنابراین احتمالا مقدار کمی کشاورزی یا فاضلاب در منطقه وجود دارد.



شکل ۱- نقشه غار سراب.

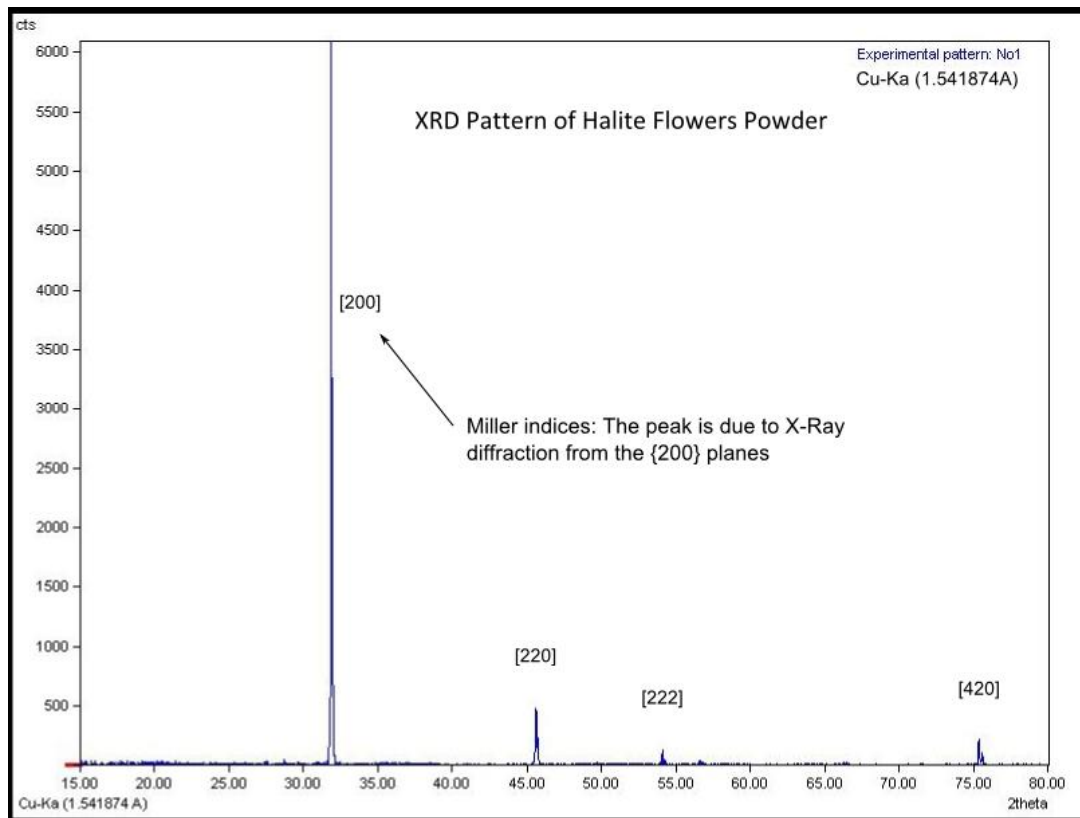
Figure 1. Sarab Cave map.

مشخصات غار نمکی نمکسار

غار حکم فرماست و از آب چکه در این غار اثری به چشم نمی خورد. از گل های غار نمونه برداری شد و نتایج پراش پرتو X (XRD) گرفته شده از آن نشان دهنده ترکیب شیمیایی کلراید سدیم با ساختار بلوری مکعبی می باشد.

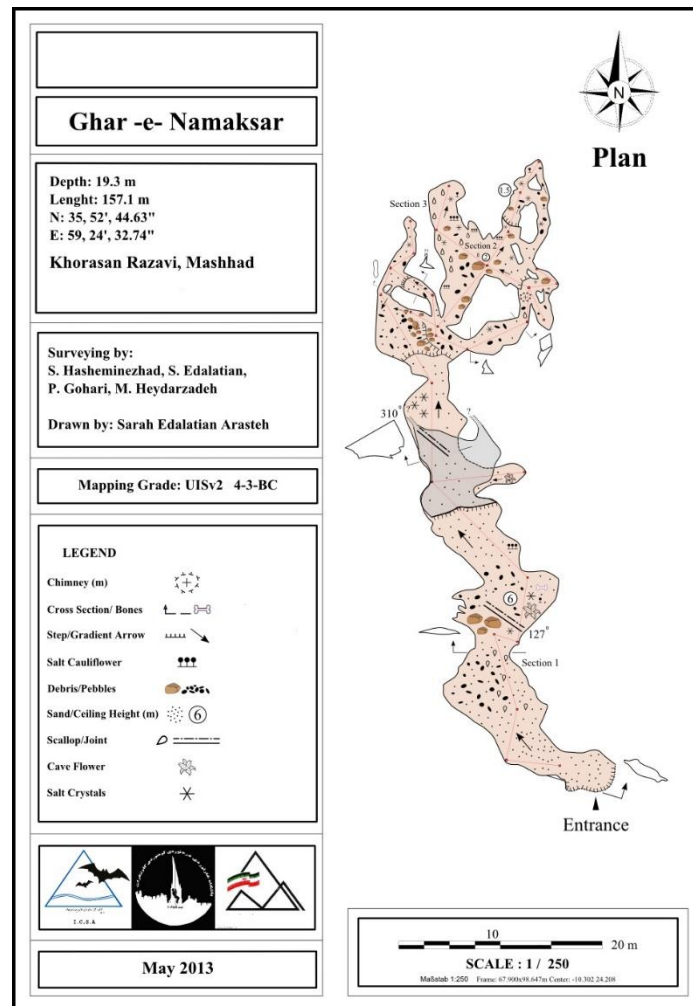
طول این غار ۱۵۷ متر و تغییرات عمق آن بیست متر می باشد. در سه قسمت این غار اسکالوپ ها شکل گرفته اند که اسکالوپ های انتهایی غار به دلیل تعداد و وضوح بیشتر جهت اندازه گیری انتخاب گردید.

در این غار هیچ گونه جریان آبی به چشم نمی خورد. وجود گل های غار حاکی از این است که شرایط نسبتاً خشکی در این



شکل ۲- تصویر پراش پرتو X (XRD) گرفته شده از نمونه پودری گل غار هالیت موجود در غار نمکسار که نشاندهنده ساختار بلوری مکعبی است.

Figure 2. X-ray diffraction (XRD) image taken from the powder sample of halite cave flower found in Namaksar cave, which shows the cubic crystal structure.



شکل ۳- نقشه غار نمکسار.

Figure 3. Namaksar cave map.

مطالعات اسکالوپ



شکل ۴- حرکت سیال در مجاورت اسکالوپ. نقطه ۱. جدایی جریان در تاج. نقطه ۲. گذار جریان برشی لومینار به آشفته. نقطه ۳. چرخش مجدد جریان در ادی نقطه ۴. ناحیه پیوند مجدد جریان جت (Murphy et al., 2017).

Figure 4. Fluid motion in the vicinity of a scallop. Point1: flow separation at crest. Point 2: transition of laminar shear layer to turbulence. Point 3: recirculating flow in lee eddy. Point 4: jet reattachment region (Murphy et al., 2017).

در غار نمکسار برخی از اسکالوپ‌های دهلیزهای منتهی به انتهای غار تخریب شده‌اند. برخی از این تخریب‌ها در اثر بارندگی، سیلاب و ریزش ناشی از آن رخ داده‌اند و برخی از آن‌ها در اثر زمین‌لرزه‌ای که در نزدیک این غار رخ داد، ایجاد شده‌اند و باعث تخریب برخی اسکالوپ‌ها گردیده‌اند. در آوریل سال ۲۰۱۷ زلزله‌ای به بزرگی ۶/۱ در مقیاس ریشتر رخ داد.

$$u^* = \frac{Re\mu}{L\rho} \quad (2)$$

این زمین‌لرزه در منطقه ای نزدیک به گسل کشف‌رود روی داد. مرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. پس از آن بیش از ۷۷۰ پس‌لرزه که ۷۸ تای آن‌ها بزرگی بیش از ۳ ریشتر داشتند، در این منطقه ثبت گردید.

$$\bar{u} = u^* \left[2.5 \left\{ \ln \left(\frac{D}{2L_{32}} \right) - 1.5 \right\} + B_L \right] \quad (3)$$

در آن زمین‌لرزه در منطقه ای نزدیک به گسل کشف‌رود روی داد. مرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. پس از آن بیش از ۷۷۰ پس‌لرزه که ۷۸ تای آن‌ها بزرگی بیش از ۳ ریشتر داشتند، در این منطقه ثبت گردید.

در انتهای غار نمکی نمکسار ۲۲ عدد اسکالوپ انتخاب و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت جریان آب در اسکالوپ‌ها از روی قسمت پرعمق و کم‌عمق آن‌ها قابل تشخیص است. قسمت‌های عمیق در بالا و قسمت‌های کم‌عمق در پایین، جایی که جریان ادی خارج می‌شود قرار دارد. بنابراین جهت جریان آب به سمت انتهای غار است. از رابطه ساتر (رابطه ۱) میانگین طولی اسکالوپ‌ها به دست می‌آید (Curl, 1974):

$$Re = \frac{\bar{u}D\rho}{\mu} \quad (4)$$

$$f = \frac{8}{\left(\frac{\bar{u}}{u^*}\right)^2} \quad (5)$$

$$F = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gD}} \quad (6)$$

$$\tau = (u^*)^2 \rho \quad (7)$$

$$\omega_{max} = 0.96 \bar{u}^* \quad (8)$$

$$Q = \bar{u}A \quad (9)$$

در غار نمکسار برخی از اسکالوپ‌های دهلیزهای منتهی به انتهای غار تخریب شده‌اند. برخی از این تخریب‌ها در اثر بارندگی، سیلاب و ریزش ناشی از آن رخ داده‌اند و برخی از آن‌ها در اثر زمین‌لرزه‌ای که در نزدیک این غار رخ داد، ایجاد شده‌اند و باعث تخریب برخی اسکالوپ‌ها گردیده‌اند. در آوریل سال ۲۰۱۷ زلزله‌ای به بزرگی ۶/۱ در مقیاس ریشتر رخ داد.

این زمین‌لرزه در منطقه ای نزدیک به گسل کشف‌رود روی داد. مرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. پس از آن بیش از ۷۷۰ پس‌لرزه که ۷۸ تای آن‌ها بزرگی بیش از ۳ ریشتر داشتند، در این منطقه ثبت گردید.

در انتهای غار نمکی نمکسار ۲۲ عدد اسکالوپ انتخاب و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت جریان آب در اسکالوپ‌ها از روی قسمت پرعمق و کم‌عمق آن‌ها قابل تشخیص است. قسمت‌های عمیق در بالا و قسمت‌های کم‌عمق در پایین، جایی که جریان ادی خارج می‌شود قرار دارد. بنابراین جهت جریان آب به سمت انتهای غار است. از رابطه ساتر (رابطه ۱) میانگین طولی اسکالوپ‌ها به دست می‌آید (Curl, 1974):

$$\bar{L}_{32} = \frac{\sum L_i^3}{\sum L_i^2} \quad (1)$$

در غار سراب نیز اسکالوپ‌ها پس از عبور از برکه اول غار، جهت اندازه‌گیری مناسب بودند. تعداد ۹ اسکالوپ انتخاب و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد و از رابطه میانگین ساتر طول میانگین اسکالوپ‌ها محاسبه گردید.

کرل (1974) در مقاله خود نشان داد که اسکالوپ‌ها در عدد رینولدز ثابت $Re = 2200$ شکل می‌گیرند. بنابراین با داشتن مقادیر چگالی و ویسکوزیته آب محلول حاوی کلراید سدیم

جدول ۲- معادلات هیدرولیک جریان در دو غار سراب و نمکسار.

Table 2. Hydraulic equations of flow in two caves, Sarab and Namaksar.

	Limestone	Salt
$L_{32} (cm)$	39.85	23.07
$D (cm)$	275	234.5
$\bar{u}^* (cm/s)$	0.73	1.33
Velocity - $\bar{u} (cm/s)$	6.37	12.93

Reynolds number (<i>Re</i>)	1.33×10^5	2.21×10^5
Cross sectional area (m^2)	2.53	1.38
Darcy – Weisbach friction factor – <i>f</i>	0.105	0.085
Froude number – <i>F</i>	0.12	0.27
Shear stress $\bar{\tau}$ (N/m^2)	0.05	0.18
Power of flow P ($N/m.s$)	0.34	0.02
Settling velocity ω_{max} (cm/s)	0.7	1.28
Discharge – <i>Q</i> m^3/s	0.16	0.18

نتیجه گیری

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت و همکاری غارنوردان و غارشناسانی از استان خراسان رضوی، آقای سعید هاشمی نژاد و استان همدان آقای فواد رضاپور و دکتر جورج ونی، رئیس موسسه ملی تحقیقات غار و کارست آمریکا، صورت پذیرفت که بدین وسیله از همکاری آنها قدردانی می‌گردد.

در این تحقیق خصوصیات جریان در دو غار نمکی نمکسار و آهکی سراب با استفاده از خصوصیات فیزیکی و هندسی اسکالوپها بررسی شده است. از اسکالوپهای موجود در انتهای غار نمکسار و در قسمت دوم غار سراب برای اندازه‌گیری استفاده شده است. در مقایسه با غار نمکسار، سرعت آب با افزایش اندازه اسکالوپها کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با کاهش سرعت جریان، اندازه اسکالوپها افزایش می‌یابد. عدد رینولدز به‌دست آمده (بر اساس قطر مجرا) در دو غار جریان آشفته در هر دو مجرا را نشان می‌دهد. با استفاده از عدد فرود بر اساس رابطه بین سرعت جریان و عمق جریان نیز برای طبقه‌بندی شرایط جریان استفاده گردید. در این تحقیق با توجه به عدد فرود کمتر از یک ($F < 1$) جریان زیربحرانی را نشان می‌دهد که جریانی عمیق و آهسته با حالت انرژی کم است. هنگامی که شرایط جریان زیربحرانی است، اختلالات در جریان می‌تواند امواج سطحی ایجاد کند، و چون جریان پایین دست بسیار کند است، آن امواج سطحی می‌توانند در جهت بالادست و جهت پایین دست حرکت کنند.

منابع

نجفی‌زرمهری، ف.، ۱۳۹۶. بررسی ژئومورفولوژی فروچاله‌های کارستی مشرف به غار نمکسار در روستای گلبقرایی، دومین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست شهر مشهد، مشهد.

مهندسین مشاور کنکاش عمران، ۱۳۹۴. مطالعات بهنگام‌سازی بیلان منابع آب حوزه آبریز سفیدرود بزرگ، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان.

Lundberg, J., Carroll, W., Roberts, W., McFarlane, D.A., Buchroithner, M., Rentergem, G., 2017. Analysis of scallops in gomantong caves, by GIS processing of 3D terrestrial laser scanner data.

Curl, R.L., 1974. Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. Natl. Speleological Soc. Bull. 36, 1-5.

Laumanns, M., Brooks, S., Dorsten, I., Kaufmann, G., Lopez Correa, M., Koppen, B., 2000. Speleological Project Ghar Alisadr (Hamadan/Iran).

Murphy, P.J., 2017. Solutional sculpturing. Encyclopedia of caves. 536-539.

نتایج نشان می‌دهند که با توجه به ابعاد بزرگتر اسکالوپهای غار سراب نسبت به غار نمکسار، سرعت جریان در غار سراب کمتر می‌باشد. عدد رینولدز در هر دو غار تقریباً یکسان است. محاسبات نشان می‌دهد توان جریان در غار سراب ۱۷ برابر بیشتر از غار نمکسار است. سرعت رسوب‌گذاری در غار نمکسار ۱/۸ برابر بیشتر از غار سراب بوده در صورتیکه دبی تخلیه در هر دو غار تقریباً یکسان است.