پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال هشتم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۸
صص. ۷۹-۶۴

محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با استفاده از تکنیک های تجربی و آزمایشگاهی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران

محسن رضائی عارفی – دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
محمد علی زنگنه اسدی*– دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
ابوالفضل بهنیافر – دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران.
محمد جوانبخت – استادیار زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶ تائید نهایی: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

چکیده

یکی از پژوهش های کاربردی در ژئومورفولوژی، برآورد میزان کارستی شدن و شدت فرسایش سنگ های کربناته است. فرسایش کارستی مقدار خورندگی است که در سطح و یا داخل سازندهای کربناته رخ دهد. هدف از این تحقیق محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با استفاده از روش های تجربی و آزمایشگاهی می باشد. این پژوهش مبتنی بر تفسیر نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰کلات، نقشه زمین شناسی۱/۱۰۰۰۰۰ کلات، تصاویر ماهواره ای لندست ۸ و نرم افزارARC GIS 10.3 و مطالعات میدانی و آزمایشگاهی اشکال و فرایندهای ژئومورفیک کارست است که به منظور نمونه برداری و آنالیز آزمایشگاهی نمونه ها ازقبیل تعیین چگالی و قابلیت نفوذسنگ و سختی آب انجام شد. برای تعیین نرخ فرسایش کارستی از مدلهای سوئیتینگ، کوربل، ژیونگ، بررسی وزنی و روش اندازه گیریco2 استفاده شد و از روشICP و دستگاه کلسیمتر برنارد جهت کلسیمتری سازندها استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد که نرخ فرسایش سالیانه کارست با فرمول کوربل عدد ۲۳/۶۶، با فرمول سوئیتینگ عدد ۱۲/۹۲، با مدل ژیونگ عدد ۲۰ مترمکعب در کیلومترمربع، با روش بررسی وزنی عدد ۵۶/۳ و روش اندازه گیری co2 عدد ۴۴۸ سانتی مترمکعب را نشان داد. نتایج حاصل از تکنیک کلسیمتری ICP نشان داد که در بین چهار سازند مورد بررسی درICP تیرگان، مزدوران، شوریجه و سرچشمه، به ترتیب تیرگان با ۳۸/۴۳ درصد کلسیم، مزدوران۲ با ۳۸/۴۳ درصد، سرچشمه با ۳۸/۳۹ و شوریجه با ۷ درصد به ترتیب بالاترین میزان خصوص آهک را در حوضه داشتند. با استفاده از روش کلسیمتر برنارد عدد به دست آمده ۳۶/۳ را نشان داد. بعد از محاسبه فرمولهای تجربی و ریاضی در حوضه کوهستانی کلات به این نتیجه رسیدیم که از بین مدلهای مذکور در حوضه مورد مطالعه به دلیل وضعیت نیمه تکاملی کارست، مدل کوربل کارآیی نسبی مطلوبتری را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: فرسایش کارستی، مدل سوئیتینگ، مدل کوربل، مدل ژیونگ، تکنیکهای آزمایشگاهی.

* نویسنده مسئول: E-mail: ma.zanganehasadi@hsu.ac.ir

مقدمه

فرسایش کارستی یکی از موضوعات اساسی در هیدروژئومورفولوژی است که به ارزیابی میزان انحلال سازندهای کربناته بر سطح انترفاس[1] می پردازد. براساس تعریف فورد و ویلیامز، کارست حوضه ای با هیدرولوژی و مورفولوژی خاص می باشد که در اثر انحلال زیاد سنگ و توسعه‌ی بالای تخلخل ثانویه به وجود آمده است(فورد و ویلیامز۲، ۱:۲۰۰۹). ژئومورفولوژی کارست به مطالعه سیمای خاص مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی در سنگهای قابل انحلال(بیشتر کربنات) می پردازد، اشکال کارستی محصول عملکرد پدیده ها و عناصر اقلیمی و شرایط زمین شناسی در پهنه های آهکی است(زنگنه اسدی و همکاران،۸۷:۱۳۸۱). منظور از نرخ فرسایش انحلالی کارست مقدار خورندگی است که درسطح و یا در بخش های عمیق توده سنگ های کربناته رخ دهد. نتایج مطالعات باکالویچ(۲۰۰۸) در مورد نرخ هوازدگی شیمیایی بر روی سنگ های کربناته در اسلوانی نشان داده است که میزان فرسایش شیمیایی در سنگ های کارستی به سه عامل میزان نزولات جوّی، دما و رواناب ها بستگی دارد(بهنیافر و قنبرزاده ، ۱۲۸:۱۳۹۵) .حدود ۲۰ درصد از خشکی های جهان را سنگهای کارستی پوشانده اند (فورد و ویلیامز ، ۵:۲۰۰۷)(میلانویچ ، ۱:۱۹۸۱) . در سال ۲۰۱۳ میلادی ۲۸ درصد از جمعیت جهان از منابع آب کارست استفاده می کردند. طبق آخرین تحقیقات صورت گرفته حدود ۱۳ درصد مساحت ایران را سازندهای کربناته تشکیل می دهند که حدود ۸ درصد از منابع آب ایران از منابع آب کارست استفاده می شود که در تأمین آب شرب کشور نقش بسیار مهمی دارند(بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵: ۱۶). سرزمین ایران به دلیل وجود نهشته های کربناته در دوره های مختلف زمین شناسی از پهنه های کارستی شایان توجهی برخوردار است، به طوری که در ایران علاوه بر غارها، توسعه یافته ترین اشکال کارستی یعنی پولیه ها و اشکال مینیاتوری کارستی در حوضه ها(مانند لاپیه‌ها) نیز مشهود است(طاهری، ۳۲:۱۳۸۴). سرزمینهای کارستی از دیدگاههای مختلفی بررسی شده اند. اهمیت اصلی این پهنه ها در حجم قابل توجه آبهای زیرزمینی موجود در سازندهای کارستی است. این مخازن آب هم از نظر کمّی و هم از بعد کیفی عموماً مطلوبند و به مصرف شرب میرسند. دیگر اهمیت این پهنه ها در اشکال متنوعی است که در مناطق کارستیک تشکیل میشوند و توسعه می یابند. این موضوع برای سرزمینی مانند ایران که از یکسو به دلیل شرایط اقلیمی از منابع آب کافی برخوردار نیست و از سوی دیگر حدود ۱۳درصد مساحت آن را سنگهای کربناته(افراسیابیان، ۱۸:۱۳۷۳) می پوشاند اهمیت دارد، چرا که بسیاری از شهرها و روستاهای کشور به شدت به منابع آب کارست وابسته اند(طاهری، ۳۳:۱۳۸۴). همین امر موجب شده است تا به شناسایی و بهره برداری از ذخایر سازندهای کارستی در کشور به طور فزاینده ای توجه شود. در ایران ژئومورفولوژی اشکال کارستی را محققان مختلفی بررسی کرده اند. در سال ۱۳۸۳ عشقی و ثروتی در پژوهشی با استفاده از تکنیکهای تجربی به بررسی ویژگیهای ژئومورفولوژیکی مناظر کارستی در حوضه آبریز کارده در شرق زون کپه داغ پرداختند و مهمترین اشکال ژئومورفولوژی حوضه مزبور را طبقه بندی و شناسایی کردند. در سال ۱۳۸۷ ملکی و همکارانش اشکال کارستی استان کرمانشاه را از دیدگاه ژئومورفولوژی مطالعه و پهنه بندی کردند(ملکی شوهانی و علایی طالقانی، ۱۳۸۷). بهنیافر و همکاران(۱۳۸۸) در مقاله خود با استفاده از تکنیکهای تجربی به بررسی ویژگیهای ژئومورفیک توده کارستی اخلمد در دامنه های شمالی ارتفاعات بینالود پراختند و پدیده های ژئومورفیک در حوضه مورد مطالعه را شناسایی و ژئومتری کردند و فرایندهای مؤثر در شکل گیری کارست در منطقه را تحلیل نمودند. ولایتی و خانعلی زاده(۱۳۹۰) با استفاده از روشهای توصیفی ، تحلیلی و استقرایی به بررسی رابطه ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی در حوضه آبریز کارده پرداختند وبه این نتیجه رسیدند که مهمترین اشکال کارستی در منطقه شامل کارن، شکافهای انحلالی، حفرات انحلالی، غارها، و گالریهای کوچک که در امتداد درزه ها و شکافها و گسلها گسترش یافته اند بیانگر

---

1. Interface
2. Ford and Williams

ارتباط بین این اشکال و ساختارهای تکتونیکی می باشند. خانلری و مؤمنی(۱۳۹۱) ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین در غرب ایران را بررسی کردند و با استفاده از مطالعات کتابخانه ای، میدانی، نقشه زمین شناسی، ژئوشیمی و ردیابی آبهای زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که ژئومورفولوژی کارست در منطقه گسترش قابل توجهی دارد و آب اکثر چشمه ها به صورت بیکربنات کلسیت–منیزیم می باشد. میرعلایی موردی و همکاران(۱۳۹۲) در پژوهش خود به معرفی ژئومورفولوژی کارستی سنگهای کربناته منطقه آهنگران با استفاده از تکنیکهای میدانی در شمال شرق بیرجند پرداختند و اشکال کارستی کارن ها، چاله های بارانی و دره های خشک را در منطقه مورد مطالعه طبقه بندی و شناسایی نمودند. خوش رفتار و همکاران(۱۳۹۵) در مقاله خود به بررسی اشکال کارستی با استفاده از تکنیکهای میدانی در توده کوهستانی درفک در گیلان پرداختند و اشکال کارستی از قبیل دولین سبز و کارن(لاپیه)، حفره های بلعنده و تعداد زیادی دولین کوچک را در منطقه مورد مطالعه طبقه بندی و شناسایی نمودند.بهرامی و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگیهای هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون زاگرس پرداختند. خضری و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش خود به ارزیابی و پهنه بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاه از روش تحلیل سلسله مراتبی پرداختند. زنگنه اسدی و همکاران(۱۳۹۶) به ارزیابی میزان فرسایش کارستی با استفاده از روشهای میدانی و آزمایشگاهی در حوضه آهکی فهلیان فارس پرداختند که نرخ سالیانه آن را ۴۸ میلیمتر در هزار سال برآورد نمودند. در مورد محققان خارجی، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

استون و همکاران[1] (۱۹۹۴) در پژوهشی به اندازه گیری میزان فرسایش کارستی با استفاده از کلر–۳۶ در ساختارهای کلسیتی در استرالیا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اندازه گیری نرخ فرسایش سطحی برای پنج نمونه از سطوح سنگ های کربناته با استفاده از این روش بین ۵ میلی متردر هر هزار سال در دشت نولاربورتا ۲۹میلی متر در هر هزار سال در نواحی مرطوب تر جنوب استرالیا متفاوت می باشد. فورلانی و همکـاران در سال ۲۰۰۹ مقایسـهٔ میزان فرسایش کارستهای ساحلی و درون خشکی در ناحیهٔ آدریاتیک شمال شرقی را مورد بررسی قرار دادند. ماتسوشـی و همکـاران[2] در سال ۲۰۱۰ به اندازه گیری میزان فرسایش در قله های کارسـتی ژاپـن با استفاده از تکنیک ایزوتوپ کیهانی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش کارستی نشان دهنده همبستگی مثبت با ارزش های انحلالی دارد و رابطه پیچیده ای با محتوای منیزیم را نشان می دهد و همبستگی ضعیفی با محتوای خاک رس دارد. اینکپن و همکـاران[3] در سال ۲۰۱۲ با استفاده از شاخص قلم سرب (LLI) به مدلسازی آثار تغییرات آلاینده های جوی بر میزان فرسایش سنگ آهک در لندن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که غلظت دی اکسید بین مکان ها، بالاترین سطوح را در مکانهای صنعتی دارد. سوانسی در مقایسه با آکسفورد، بیرمنگام و پورتسموث دارای غلظت بسیار دی اکسید کربن می باشد. گان[4] در سال ۲۰۱۳ در مقاله خود با استفاده از تکنیکهای تجربی میزان و شدت فرسایش کارستی را مورد بررسی و تحلیل قرار داد و به این نتیجه رسیدند که فرمولهای تجربی نظری می توانند حداکثر میزان فرسایش رواناب(مازاد آب)، دما و غلظت دی اکسید کربن را پیش بینی کنند اما اندازه گیری های میدان نشان می دهد که فرسایش به ندرت در حداکثر سرعت عمل می کند و در فضاهای مختلف متفاوت می باشد. ژنگ و همکاران[5](۲۰۱۶) به ارزیابی تأثیرات آب و هوایی بر روی کربن موجود در مناطق کارستی جنوب غربی چین در بازه زمانی ۲۰۱۳–۱۹۷۰ با استفاده از روش انحلال بالقوه حداکثر (MPD) و GIS پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد که کربن موجود در مناطق کارستی میتواند به تغییرات آب و هوایی آینده، سریع واکنش

1- Ston and et al
2- Matsushi and et al
3- INkpen and et al
4- Gunn
5- Xiong et al

نشان دهد. کرکلس و همکاران[۱](۲۰۱۶) در پژوهشی به بررسی نرخ جاری برهنه سازی در سنگ دولومیت در یک منطقه در اسپانیای مرکزی: پیامدها برای تشکیل غارهای روباز پرداختند و نتایج مطالعاتشان نشان داد که در فصل سرد و مرطوب هوازدگی افزایش می‌یابد. با توجه به موقعیت خاص آب و هوایی ایران و کمبود بارش و همچنین توزیع نامناسب مکانی و زمانی آن، منابع آب زیرزمینی از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی به علت محدودیت منابع آب آبرفتی، از نظر کیفی و کمی و همچنین گسترش وسیع سازندهای کارستی در سطح کشور، مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست به منظور بهره برداری آنها دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. علی رغم بررسی‌های انجام شده در سطح بین المللی، تحقیقات چندانی در خصوص بررسی مقدار انحلال کارستی در ایران صورت نگرفته است. نظر به تنوع و وسعت نهشته های کربناته در ایران و موقعیت خشک آن در جهان توجه به مقدار انحلال کارستی به منظور اکتشاف منابع آب زیر زمینی حائز اهمیت می باشد. هدف از این پژوهش محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با استفاده از روشهای میدانی و آزمایشگاهی می باشد تا نتایج حاصل از این پژوهش در برنامه ریزی محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

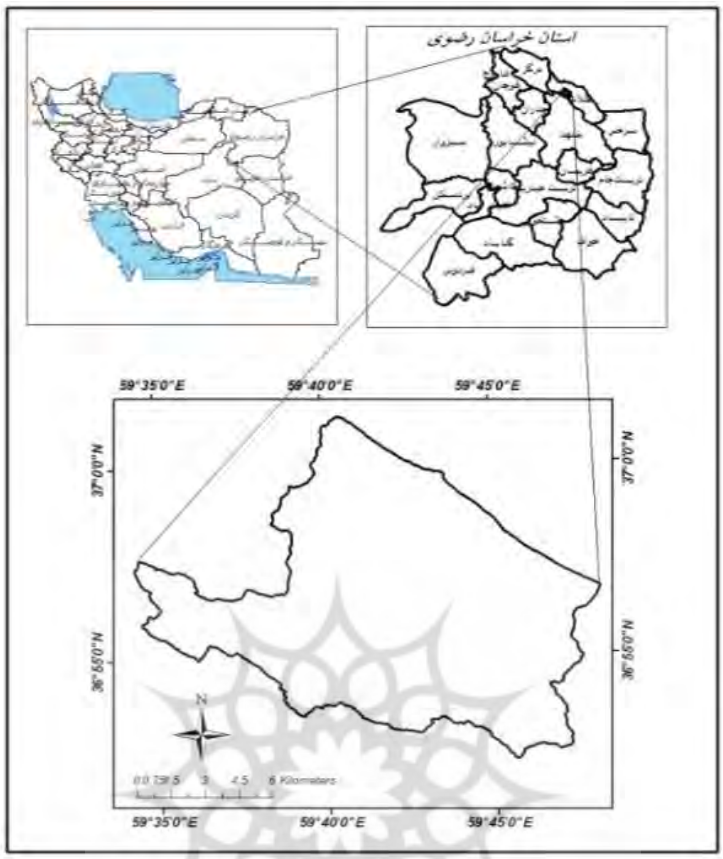
روش تحقیق

در این پژوهش از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ مارشک و نیز نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلات استفاده گردید. سپس به کمک نرم افزار ARC GIS 10.3 اقدام به رقومی سازی نمودیم و لایه ها و نقشه های موردنیاز تهیه گردید. روش کار در این پژوهش از نوع میدانی و آزمایشگاهی است که پس از مطالعات میدانی و نمونه برداری از سنگ های کارستی شونده و آب رودخانه، مبادرت به تهیه داده های موردنیاز با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی از قبیل آنالیز میزان سختی آب(TDS)، ایسیمتری(EC)،بررسی چگالی سنگ، کلسیمتری به روش ICP و کلسیمتر برنارد برای برآورد میزان انحلال و فرسایش کارستی در مدل های تجربی سوئیتینگ، کوربل، ژیونگ در حوضه مورد مطالعه شد. لازم به ذکر است جهت انجام آزمایشهای هیدروشیمی و ژئوشیمی، نمونه آب از منابع سطحی حوضه جهت آزمایش سختی و هدایت الکتریکی انجام گرفت و جهت انجام آزمایشهای ژئوشیمی سنگ های حوضه، ۴ نمونه سنگ از سازندهای آهکی حوضه شامل تیرگان، مزدوران ۲، کلات و شوریجه انتخاب شد که بر روی نقشه زمین شناسی علامت گذاری گردید. سپس جهت دستیابی به اهداف، ۴ نمونه سنگ را در آزمایشگاه رسوب شناسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، به روشهای ICP، کلسیمتری، روش وزنی و روش بررسی میزان Co_2 مورد بررسی قرار گرفت.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

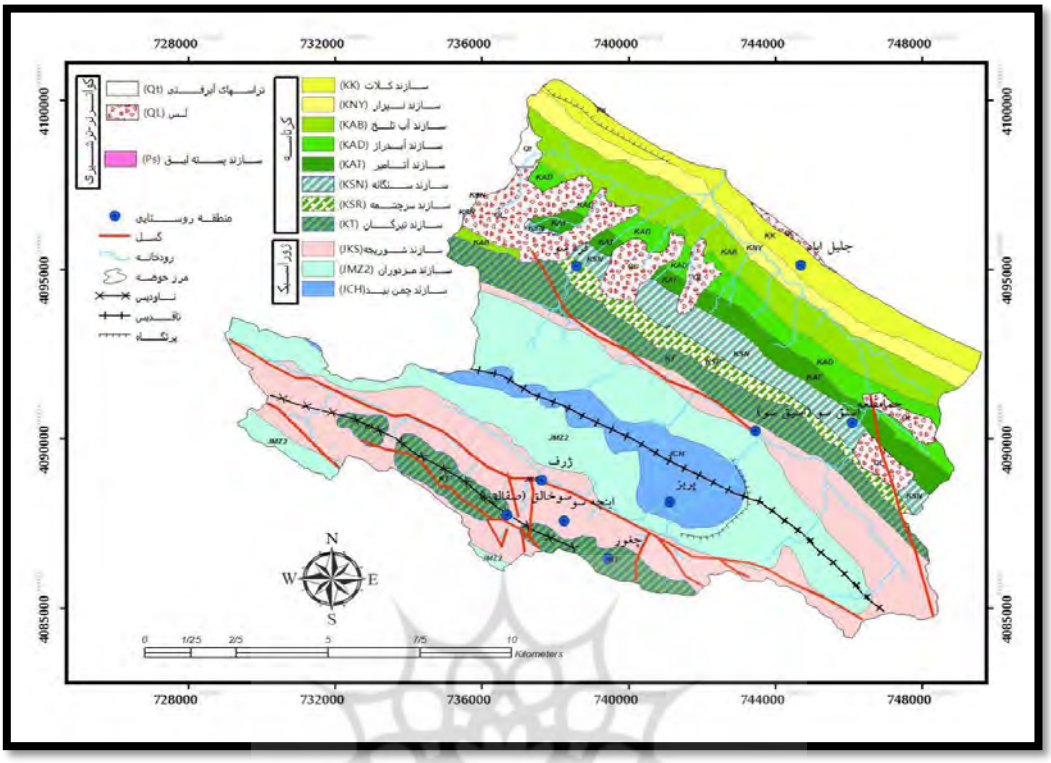
محدوده مورد مطالعه، حوضه کوهستانی کلات در زون کپه داغ می باشد که در ارتفاعات هزار مسجد و شمال شرق ایران واقع شده است. این حوضه با وسعت ۱۶۸/۳۷ کیلومتر مربع در ۱۴۵ کیلومتری شمال شهر مشهد و در استان خراسان رضوی قرار گرفته است که بالاترین نقطه ارتفاعی ۲۷۰۹ متر در جنوب غرب حوضه و حداقل ارتفاع آن ۶۲۰ متر در نواحی مرکزی تا شمالی حوضه می باشد. از نظر موقعیت ریاضی بین طول جغرافیائی ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیائی ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مهم ترین راه های دسترسی به این حوضه از مسیر مشهد به کلات، درگز به کلات و سرخس به کلات می باشد(شکل۱).

[6-]. Krklec & et all



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

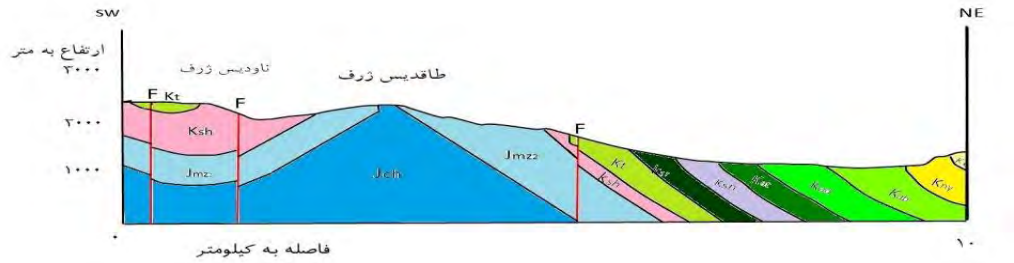
بر اساس طبقه بندی اقلیمی کوپن، آب و هوای این حوضه نیمه خشک می باشد. متوسط دمای سالیانه منطقه برابر با ۱۶/۴۹ درجه سانتیگراد و متوسط بارش سالیانه حوضه برابر با ۳۱۴ میلیمتر می باشد. کمترین دمای متوسط ماهانه منطقه مربوط به دی ماه برابر با ۳/۵۴ درجه سانتی گراد و بیشترین دمای متوسط ماهانه مربوط به ماه تیر برابر با ۲۸/۱۹ درجه سانتی گراد می باشد. همچنین میانگین حداقل دما مربوط به دی ماه برابر با ۰/۴ درجه سانتی گراد و میانگین حداکثر دمای ثبت شده برابر با ۳۴/۲ درجه سانتی گراد مربوط به تیر ماه می باشد. واحدهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه از رسوبات دورانهای دوم و سوم و چهارم زمین شناسی در وجود دارد. در اوایل کرتاسه پیشروی دریا در کپه داغ صورت می گیرد و در اواخر کرتاسه زیرین به اوج خود میرسد و سپس پسروی آغاز می شود. این پیشروی و پسرویها، سنگ بنای سازندهای منطقه را تشکیل می دهد و فعالیت بعدی گسل ها منجر به ایجاد چین خوردگی ها به صورت آنتی کلینال و سنکلینال در منطقه می شود. قدیمی ترین رخنمون های این واحدها به دوره ژوراسیک مربوط می شود(سازند چمن بید) و وسیع ترین گسترش رخنمون ها متعلق به سازندهای مزدوران و شوریجه می باشد. سازندهای آهکی عمده حوضه مورد مطالعه، تیرگان، مزدوران، کلات و چمن بید می باشد. در حوضه مورد مطالعه مجموعاً ۱۳ واحد سنگ چینه ای مشخص شده است. از ۱۶۸,۳۷ کیلومترمربع مساحت کل حوضه، بیش از ۲۵ درصد(۴۴,۱۶ کیلومترمربع) از مساحت آن را سازندهای کارستی به خود اختصاص می دهند.



شکل ۲: نقشه زمین شناسی حوضه کوهستانی کلات(مآخذ: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

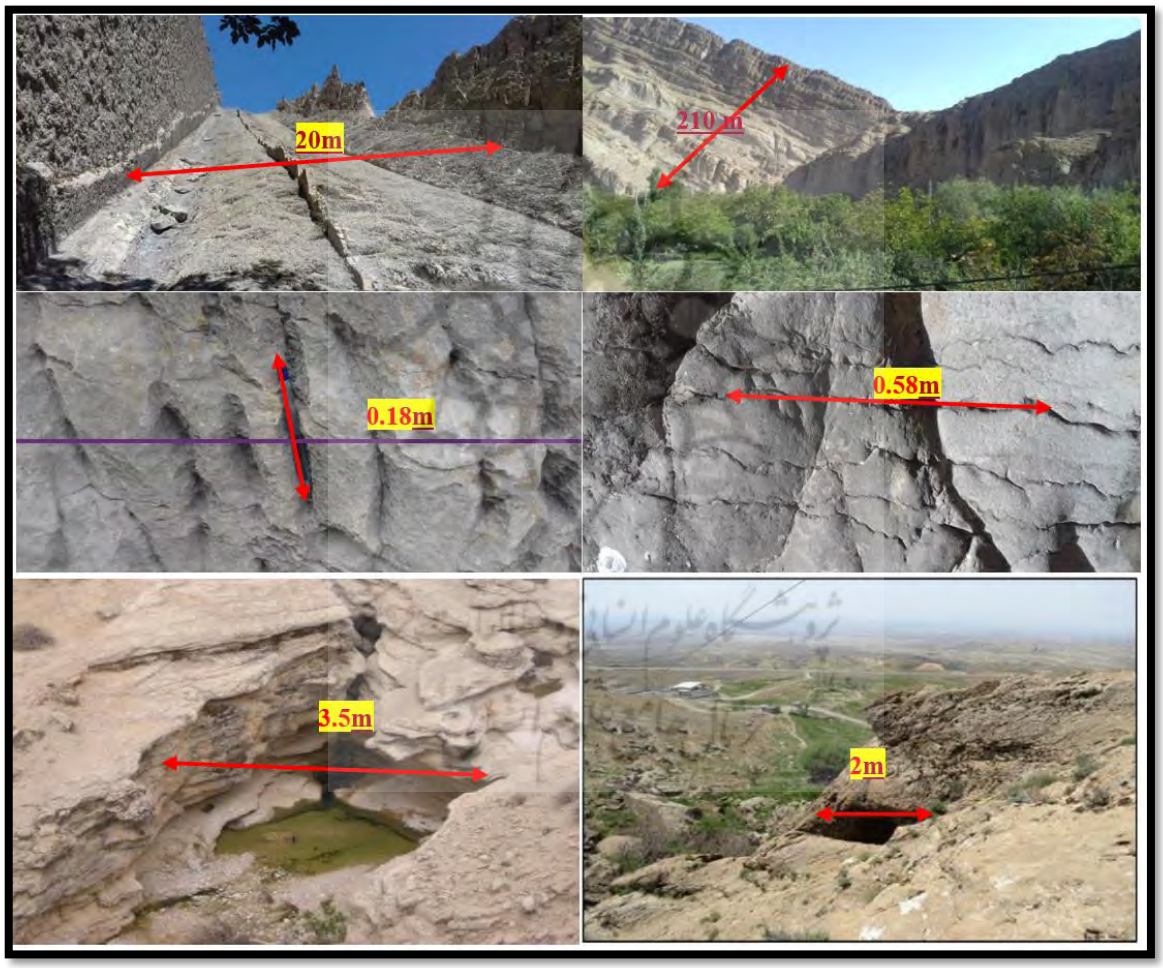
جدول ۱: توزیع و نسبت سازندهای کربناته و غیرکربناته در حوضه کوهستانی کلات (مأخذ: یافته های نگارنده گان)

ردیف	نام سازند	مساحت سازند به کیلومترمربع	مساحت سازند به درصد
۱	چمن بید(JCh)	۱۰/۱۰	۵/۹۹
۲	مزدوران۲(Jmz2)	۳۵/۷۵	۲۱/۲۳
۳	شوریجه(JkS)	۳۶/۶۱	۲۱/۷۴
۴	تیرگان(KT)	۱۸/۱۸	۱۰/۷۹
۵	سرچشمه(KSR)	۴/۸۶	۲/۸۸
۵	سنگانه(KSN)	۶/۹۵	۴/۱۲
۶	آتامیر(KAT)	۶/۰۸	۳/۶۱
۷	آبداز(KAD)	۷/۲۲	۴/۲۸
۸	آب تلخ(KAB)	۱۳/۱۵	۷/۸
۹	نیزار(KNY)	۶/۹۵	۴/۱۲
۱۰	کلات(KK)	۸/۹۷	۵/۳۲
۱۱	پسته لیق(Ps)	۰/۰۱۹	۰/۰۱۱
۱۲	لس(QL)	۱۲/۹۳	۷/۶۷
۱۳	تراسهای آبرفتی(Qt)	۰/۶۵	۰/۳۶



شکل ۳: مقطع زمین شناسی حوضه کوهستانی کلات(ماخذ: نقشه زمین شناسی کلات)

در ذیل نمونه ای از لندفرمهای کارستی در حوضه کوهستانی کلات که توسط نگارندگان گرفته شده است از نظر می گذرد:



اشکال ۴ ، ۵ ، ۶ ، ۷ ، ۸ ، ۹ به ترتیب از بالا سمت راست: تنگ یا گورج کارستی، کریدور کارستی، ماندر کارن، ریلن کارن، غار و دولین در حوضه کوهستانی کلات(عکس از نگارندگان: بازدید های میدانی: ۳ مرداد ، ۱۱ مرداد و ۲۴ آبان ۹۷)

بحث و یافته ها

روشهای اندازه گیری نرخ فرسایش انحلالی کارست در حوضه مورد مطالعه

میزان فرسایش انحلالی سنگ آهک را می توان به روشهای متعددی، بررسی و تعیین نمود. این موضوع ارتباط مستقیم با ویژگیهای اقلیمی هر منطقه کارستی به ویژه میزان نزولات جوی و رواناب دارد تا بتوان مقدار فرسایش برجازای[1] انحلالی را اندازه گیری نمود. مهمترین متدهای اندازه گیری عبارتند از:

الف) اندازه گیری و سنجش مقدار فرسایش سطحی یا نرخ پست شدگی ناهمواریهای کربناته(روش خورندگی سطحی).

ب) سنجش نرخ فرسایش انحلالی و مقایسه آن با محیطهای مختلف برای تعیین فرایندهای مختلف فرسایشی (روش مقایسه ای).

ج) سنجش نرخ فرسایش از طریق ژئومتری کردن اشکال کارستی(روش ژئومورفومتری).

د) شناسایی فرایندها و عملکردهای مهم تأثیرگذار بر فرسایش انحلالی(روش عملکردی فرایندها).

ه) برآورد مقدار دی اکسید کربن حذف شده طی انحلال سنگ آهک(روش دی اکسید کربن حذفی).

مطالعات ژئومورفولوژیستها نشان داده است که مقادیر به دست آمده از هریک از روشهای فوق تحت شرایط اقلیمی متفاوت، متغیر است. از آنجا که سیستم فرسایش کارست حالت سه بعدی دارد، لذا می توان با اندازه گیری و ژئومتری ابعاد اشکال کارستی، مقدار فرسایش کارست را محاسبه کرد. اگرچه این سنجش ها را نمی توان برای هرمحیطی با شرایط اقلیمی متفاوت تعمیم داد، ولی اندازه گیری نرخ فرسایش انحلالی در محیطهای مختلف می تواند درک ما را نسبت به تأثیر اقلیم های متفاوت بر فرسایش کارست بیشتر کند(بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵:۱۴۶).

به طور کلی برای محا سبه نرخ فر سایش انحلالی و مقدار خوردگی سنگ آهک، باید شرایط زیر را فراهم کرد:

الف) وجود ایستگاههای باران سنج خودکار با فا صله های ا ستاندارد در حو ضه بر ا ساس و ضعیت توپوگرافیکی حو ضه کارستی.

ب) اندازه گیری مقدار روانابهای سطحی در محل ایستگاههای هیدرومتری در حوضه و سنجش متداوم میزان هدایت الکتریکی و درجه حرارت آبهای سطحی.

ج) اندازه گیری م ستمر دبی رودهای ا صلی حو ضه(دبی آب و دبی جامد)، به طوری که بارمحلول و بارمعلق، سنجش و اندازه گیری شده باشند.

د) اندازه گیری دبی جامد سیلابهای ناگهانی حوضه و فلش فودها به وسیله آمارهای خودکار در محل ایستگاههای هیدرومتریک حوضه کارستی.

ه) تهیه نقشه لیتولوژی کربناتهای حوضه و سنجش آب بردگی در طول دوره های مختلف که به طور معمول سالانه انجام می شود.

با در اختیار دا شتن چنین اطلاعاتی از هر حو ضه کار ستیک، می توان میزان فر سایش انحلالی را در سطوح سنگ آهک تعیین کرد. این سنجش به طور معمول نرخ فرسایش برجازایی حوضه را مشخص نموده و اگر جریانهای دیگری از حوضه های مجاور به آبگیر کارست وارد شود، می بایست مدنظر قرارگیرد.

[1] - Autochthonous Erosion

تکنیکها و فرمولهای تجربی جهت محاسبه نرخ فرسایش کارست در حوضه مورد مطالعه

۱.معادله کوربل

یکی از مناسب ترین معادلات تعیین نرخ فرسایش انحلالی ، معادله کوربل[1] می باشد که به صورت ذیل ارائه شده است:

$$X=4ET/100= 4\times./7\times845/100=23.66$$

که در آن x: مقدار انحلال سنگ آهک به میلی متر در هر هزار سال($m^3km\text{-}2a\text{-}1$)

E: مقدار رواناب(dm).

T: میانگین حجم $CaCo_3$ آب به ($mgl\text{-}1$).

این معادله به ویژه در مناطقی که اشکال سطحی کارست وجود دارد، یکی از مناسب ترین روشهای محاسبه تعیین نرخ فرسایش انحلالی در هر حوضه کارستی است. برای استفاده از فرمول باید توجه داشت که میزان چگالی سنگهای کربناته بین ۱/۵ تا ۲/۹ باشد و برای دولومیتها حتما مقدار سختی آب و دما اندازه گیری شوند تا میزان انحلال از طریق بارش به دست آید و برای تعیین سنگهای سولفاته مقدار $Ca2+$ و سختی سنگهای کربناته اندازه گیری شوند. کوربل(۱۹۵۹) بعد از بررسیهای مفصل نتیجه گیری نمود که شرایط کارستی شدن در شرایط آب و هوای سرد، با بارش غالبا برف سریعتر از مناطقی است که دارای آب و هوای گرم می باشد. طبق نظر کوربل نرخ فرسایش، اعم از مکانیکی و شیمیایی در کوهستانهای کم ارتفاع با بارش ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ میلیمتر و در شرایط آب و هوای سرد برابر ۱۶۰ میلیمتر در ۱۰۰۰ سال است و در همین مدت در شرایط آب و هوای گرم این میزان ۱۰ برابر کمتر و فقط ۱۶ میلی متر می باشد. در مناطق نسبتا هموار با بارش ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلیمتر و آب و هوای سرد، میزان فرسایش ۴۰ میلیمتر در ۱۰۰۰ سال است و در رژیم آب و هوایی گرم این میزان فقط ۴ میلیمتر در ۱۰۰۰ سال می باشد(زنگنه اسدی، ۸۵:۱۳۹۴). با توجه به اینکه عدد بدست آمده از فرمول کوربل ۲۳/۶۶می باشد با آنچه کوربل ذکر کرده از کارآیی نسبی برخوردار می باشد. زیرا حوضه مورد مطالعه اولاً جوان و نیمه تکاملی می باشد و ثانیا انحلال پذیری فقط در سازندهای آهکی می باشد و در بقیه سازندها، انحلال پذیری کمی وجود دارد. به همین خاطر عدد به دست آمده از کارآیی مناسب برخوردار می باشد.

۲.معادله سوئیتینگ

محاسبات گوناگونی برای تعیین مقدار پایین آمدن سطح کارست بر اثر انحلال انجام گرفته است. این محاسبات بدون در نظر گرفتن انحلال عمقی و وجود اسیدهای آلی(یعنی بر اساس قانون هنری دالتون[2] درباره جذب گاز انجام شده است)، یکی از متداولترین آنها به شرح ذیل است(چورلی، ۱۳۸۶ :۲۱۵). (سوئیتینگ[3]، ۱۹۷۲):

$$X=FQTN/(10^{12} \times AD)$$

در اینجا X = مقدار انحلال برحسب میلی لیتر در زمان معین، Q = تخلیه حوضه زهکشی به مترمکعب، A = مساحت حوضه زهکشی برحسب کیلومترمربع، T = سختی تخلیه آب(بخش در میلیون یا P.P.M)، D= چگالی سنگ، 1/n = قسمتی از حوضه که آهک در آن رخنمون دارد، F = ضریب ثابتی که به واحدهای استفاده نشده بستگی دارد(در سیستم متریک این ضریب ثابت برابر ۱۰۰۰ است).

$$X=FQTN/(10^{12} \times AD)= ۱۰۰۰\times۱۰۵۰۰۰۰۰۰\times۸۴۵۰۰۰\times./^{\times}۳۹ / ۱۰^{۱۲}\times۱۶۸/۳۷\times۱/۵۹ = ۱۲/۹۲$$

میلیمتر در هزار سال

با توجه به عدد به دست آمده در فرمول بالا این معادله از کارآیی نسبی برخوردار نمی باشد و با جدول ذیل چندان

---

[1] - Corbel

[2] -Henry – Dalton

[3] - Sweeting

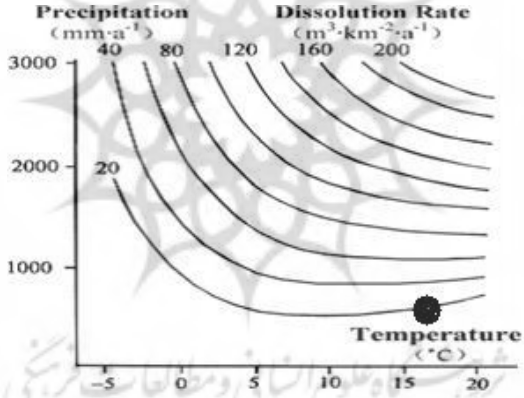
مطابقت نمی کند، زیرا تمام سازندهای حوضه، کارستی و آهکی نمی باشد و از طرف دیگر حوضه مورد مطالعه جوان و نیمه تکاملی می باشد و درنهایت بخش عمده حوضه دارای سنگ عریان و بدون پوشش نمی باشد.

جدول۲: مقدار انحلال کربنات کلسیم (CaCo3) به میلی گرم در لیتر(چورلی و همکاران، ۱۹۸۵: ۲۰۴)

اقلیم / نوع سنگ	سنگ عریان(بدون پوشش)	حد فاصل خاک و سنگ
سرد	۴۵	۱۰۰
معتدل	۵۰	۱۱۴
گرم و خشک	۹۰	۸۵

۳.مدل ژیونگ

ژیونگ و همکاران[1](۱۴۸۲:۲۰۰۹) معادلات مربوط به انحلال کارست در طبیعت را که از سوی کائو(۱۰۱:۲۰۰۵) معرفی شده بود را در قالب نموداری به نمایش گذاشتند(شکل ۱۰). که در آن متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۶/۴۹ نسبت فرسایش انحلالی را ۲۰ مترمکعب برکیلومترمربع نشان می دهد. بر اساس یافته های آنها، زمانی که دمای هوا کم است، تغییرات بارش تأثیر اندکی بر میزان انحلال کارست دارد، اما زمانی که دمای هوا به ۱۶ تا ۲۰ درجهٔ سانتی گراد می رسد با افزایش بارش میزان انحلال کارست به سرعت افزایش می یابد.



شکل ۱۰: رابطهٔ بین دما، بارش و میزان انحلال کارست در طبیعت

محور افقی میانگین سالانهٔ دمای هوا برحسب درجهٔ سانتی گراد، خطوط منحنی میانگین مجموع بارش سالانه برحسب میلی متر، و محور عمودی میزان انحلال سنگ های کربناته برحسب مترمکعب در کیلومترمربع در هرسال را نشان می‌دهد(ژیونگ و همکاران، ۲۰۰۹) (مقصودی،۱۳۹۳).

۲۰=۱۶۸,۳۷ / ۱۶۸,۳۷×۲۰= مدل ژیونگ

نتایج حاصل از مدل ژیونگ نشان می دهد که در حوضه مورد مطالعه این مدل از کارآیی نسبی برخوردار نمی باشد زیرا با جدول ذیل مطابقت نمی کند. به دلیل اینکه میانگین سالیانه دما و بارش در کل حوضه به دست آمده و مربوط به یک منطقه خاص نمی باشد.

[1]. Gyeong & et al

جدول ۳: نسبت و مقدار فرسایش سنگ آهک(معتمد، ۱۳۸۶)

منطقه	میلی متر در هزار سال	منطقه	میلی متر در هزار سال
سرد و مرطوب	۴۵۰	آلپ جنوبی	۳۰۰
حاشیه یخچالی	۲۰۰	سرد و نیمه مرطوب	۱۶۰
کوهستانهای مناطق معتدل	۱۰۰	یوگسلاوی سابق	۸۰
دربی شایر	۸۰	گرم و مرطوب	۸۰
جامائیکا	۷۲	ایرلند غربی	۵۵
گرم و نیمه مرطوب	۴۵	گل سفید شرق انگلستان	۲۵
سرد و خشک	۱۴	گرم و خشک	۶

تکنیکهای آزمایشگاهی جهت بررسی نرخ فرسایش کارست حوضه

۱. **اندازه گیری آهک در رسوب به روش کلسیمتری(حجم سنجی) با کلسیمتر برنارد**

رسوبهای آهکی فراوانترین رسوبهای شیمیایی هستند و اغلب با مواد دیگر خصوصا رس و یا ماسه مخلوط و خیلی کم به صورت خالص دیده می شوند. مثل دولومیت که ترکیبی از آهک و منیزیم است(زنگنه اسدی، ۴۳:۱۳۹۴). اساس اندازه گیری آهک را انحلال[1] آن در اسیدکلریدریک تشکیل می دهد و از راه گاز Co_2 حاصل، طبق رابطه زیر مقدار آهک موجود در رسوب را نشان می دهد(یمانی، ۱۲۹:۱۳۹۴).

$$1.\ CO3Ca + 2ClH = Cl2 + CO2 + H2O$$

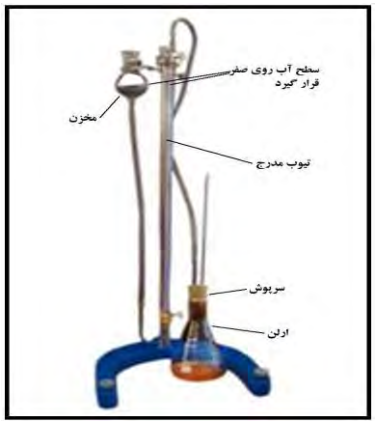
لازم است قبل از اقدام به آزمایش با ۳/. کربنات کلسیم خالص و خشک حجم گاز متصاعده را کنترل نمود و سپس درصد آهک را در نمونه تعیین نمود . برای این کار از کلسیمتر برنارد[2] استفاده می کنند(زنگنه اسدی، ۴۳:۱۳۹۴). کلسیمتر برنارد دستگاهی است که حجم گاز کربنیک حاصل از مقدار معینی کربنات کلسیم را در مقدار معینی از رسوب، معلوم می دارد. اگر برروی رسوب حاوی آهک، مقدار معینی اسید کلریدریک اضافه شود، در نتیجه تجزیه آهک موجود در رسوب به جوش آمده و گاز Co_2 از آن متصاعد می شود. با تعیین حجم گاز متصاعد شده می توان به طور غیرمستقیم درصد کربنات کلسیم یا آهک موجود در رسوب را تعیین کرد(یمانی، ۱۲۹:۱۳۹۴).

مواد و وسایل لازم: اسید کلریدریک ۱/۲ نرمال، نمونه رسوبی، ترازو، دستگاه کلسیمتر(گازومتر)، بشر، ارلن، لوله آزمایش.

شرح کار: در این آزمایش به این طریق عمل می نماییم که مقدار N گرم رسوب را در هاونی کاملا کوبیده و در ارلنی که دارای یک لوله جانبی ا ست می ریزند و لوله را در ا ستوانه مدرج پر از آبی که وارونه در تشتک آب قرار دارد وارد می نمایند. سپس از قیف شیرداری که از چوب پنبه ارلن عبور کرده، ا سید کلریدریک ۱/۲ نرمال به رسوب ا ضافه می کنند. آهک در اسید حل شده و گاز CO_2 به وسیله لوله ارلن به استوانه هدایت شده و سطح آب را به اندازه V سانتیمتر پایین می آورد(زنگنه اسدی، ۴۴:۱۳۹۴).

[1] - Solution

[2] - Bernard calcimetry



شکل ۱۱ : دستگاه کلسیمتر برنارد

در این پژوهش به منظور بررسی میزان فرسایش سالیانه در محدوده مورد مطالعه نیاز به آنالیز آزمایشگاهی داشتیم. به منظور کلسیمتری و مقدار آهک موجود در نمونه سنگ آهک از سازند آهکی تیرگان، سرچشمه، کلات و مزدوران۲ از هر سازند یک نمونه سنگ با چکش اسمیت از محل دیواره ها کندیم. سپس مقدار معینی آهک را در هاون آزمایشگاهی پودر نمودیم و سپس ۵/۵ گرم از آن را در ارلن مخصوص کلسیمتری ریخته و مقداری اسید هیدروکلریدریک به آن اضافه نموده و اقدام به اندازه گیری حجم گاز متصاعد شده در دستگاه کلسیمتر برنارد نمودیم. درصد کلسیت نمونه سنگی در آزمایش کلسیمتری براساس رابطه ذیل تعیین گردید(زنگنه اسدی، ۴۱:۱۳۹۵).

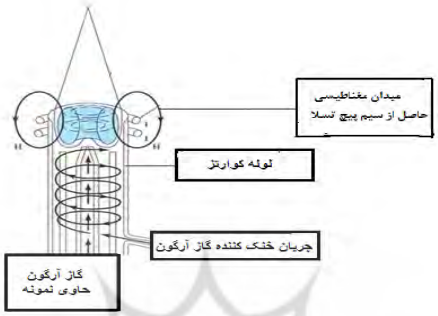
$$K=V*100/N*224$$

مقدار V عبارت است از گاز CO_2 آزاد شده از نمونه مورد آزمایش، N وزن نمونه رسوب به گرم هرگاه مقدار کربنات کلسیم یک ملکول ۱۰۰ گرم باشد گاز CO_2 متصاعد شده طبق قانون آووگادرو برابر با ۲۲۴۰۰ سانتی مترمکعب خواهد بود. میانگین میزان خلوص آهک و درصد کلسیت محاسبه شده از نمونه سنگ های چهار سازند مورد آزمایش برابر ۳۶/۳ درصد تعیین گردید.

۲.روش ICP[1](پلاسمای جفت شده ی القایی آنالیزعنصری): طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده القایی از جمله روش‌های طیف‌سنجی اتمی است که در آن اتمی شدن عناصر (Atomization) به کمک محیط گرم پلاسما صورت می‌پذیرد. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، روشی حساس‌تر، با حد تشخیص بهتر و تکرارپذیری بالاتر است. این روش یکی از مهمترین روش‌های دستگاهی آنالیز عنصری است. از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری حدود ۷۰ عنصر از جدول تناوبی با حدود تشخیص درحدppb در نمونه‌های مختلفی مانند نمونه‌های خاک، آب، فلزات، سرامیک‌ها و نمونه‌های آلی استفاده کرد. اساس این روش برانگیختگی الکترون‌های عناصر مختلف در محیطی به نام پلاسما و نشر نور بعد از حالت آسایش الکترونی است و بدلیل تطبیق‌پذیری و تکرارپذیری، می‌توان نتایجی با دقت و صحت بالا به دست آورد. این محیط بوسیله امواج رادیویی با توان بالا ایجاد می‌شود. با تولید میدان امواج رادیویی، الکترونها و یونهای پلاسما در مسیرهای مدور و خلاف جهت هم با شتاب خیلی بالا به حرکت در می‌آیند و اصطکاک ناشی از این برخورد تولید گرما (پلاسما) می کند. اتمهای خنثی آرگون در درون پلاسما در اثر برخورد با ذرات باردار در حال حرکت، یونیزه شده و بدین ترتیب بقای پلاسما ادامه می‌یابد. نمونه از میان یک مجرای باریک(مه پاش) بوسیله جریان آرگن در پلاسما پخش شده و گرمای پلاسما باعث اتمی شدن و برانگیختگی عناصر موجود در نمونه می‌شود. هرعنصر در برگشت به حالت انرژی پایه

1- Inductively Coupled Plasma

خود، پرتوهایی با طول موجهای خاص خود نشر می کند. طول موج ها نشان دهنده نوع عنصر و شدت آنها نشان دهنده غلظت عنصر در نمونه است. یکی از مزایای مهم این روش تکرار پذیری بالا و نیز امکان اندازه‌گیری همزمان چندعنصر با هم می‌باشد. نمونه باید بصورت محلول و با ویسکوزیته پایین باشد. پلاسما جفت‌شده القایی از یک مشعل با سه لوله متحدالمرکز از جنس کوارتز تشکیل شده است. درون هر لوله گاز آرگون(با سرعت جریان‌های متفاوت) جهت خنک کردن و همچنین انتقال نمونه به درون پلاسما جریان دارد. نمایی از مشعل و سایر اجزا ICP در شکل یک آورده شده است(آدابی،۱۳۹۰:۱۰).



شکل ۱۲ : نمایی از مشعل ICP و اجزاء جانبی آن

جهت انجام آزمایش با استفاده از تکنیک ICP از چهار سازند مهم آهکی حوضه چهار نمونه سنگ برداشت گردید و در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفت و نتایج آن به شرح جدول ذیل آمده است:

جدول۴ : میزان عنصر کلسیم(Ca) در حوضه کوهستانی کلات به تفکیک چهار سازند برحسب درصد

نوع سازند	میزان کلسیم به درصد
تیرگان	۳۸/۹۰
مزدوران۲	۳۸/۴۳
سرچشمه	۳۸/۴۱
شوریجه	./۷

با توجه به جدول بالا بالاترین درجه خلوص آهک در سازند آهکی و ضخیم لایه تیرگان مشاهده می شود، بعداز آن مزدوران ۲ و سپس سرچشمه و درنهایت شوریجه که با کمترین میزان خلوص آهک می باشد. بنابراین شناخت درجه خلوص آهک و کلسیم جهت مدیریت سرزمین و برنامه ریزی محیطی که در راس آن پتانسیل یابی منابع آب می باشد آشکار می گردد.

۳.سختی آب و چگالی سنگ حوضه: برای تعیین درجه سختی نمونه آب خروجی حوضه از رابطه ذیل استفاده شده است:

$$TDS=0.64*EC= 0.64\times1320=844.8$$

برای تعیین چگالی نمونه سنگ آهک اقدام به اندازه گیری حجم و وزن آن با ترازوی دقیق آزمایشگاهی نمودیم که به ترتیب ۳۵/۱۸ گرم و ۲۲ سانتی مترمکعب و میزان چگالی ۱/۵۹ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمد.

شکل ۱۳: نمونه برداری از آب حوضه تاریخ نمونه برداری : ۲۴ آبان ۹۷

۴. اندازه گیری مقدار co_2 موجود در سنگ

هرصد گرم آهک خاص در شرایط معمولی حدود ۲۲/۴ لیتر گاز CO_2 ایجاد می کند لذا اگر وزن رسوب آهکی، ۱۰۰۰ گرم باشد و آن را با اسید بجوشانیم نسبت میزان CO_2 متصاعد شده از رسوب آهکی بیان کننده میزان آهک رسوب مورد نظر خواهد بود(مقیمی و محمودی، ۲۰۵:۱۳۸۳). با توجه به اندازه گیری میزان CO_2 موجود در نمونه های سنگی با استفاده از دستگاه کلسیمتر برنارد، میزان اسید کربنیک یا دی اکسید کربن نمونه های سنگی عدد ۴۴۸ سانتی مترمکعب را نشان می دهد.

۵. روش بررسی وزنی

بررسی وزنی نسبت به تکنیک کلسیمتری روش ساده تری است و آن این است که یک کیلوگرم سنگ آهک را آسیاب کرده، مجددا آن را وزن میکنیم تا کسری آسیاب آن معلوم شود، مقداری محلول اسید تهیه و آن را نیز وزن می کنیم. سنگ آهک آسیاب شده را در اسید می جوشانیم. در این صورت باقیمانده سنگ آهک مورد نظر را کاملا در دستگاه آون خشک می کنیم. چنانچه باقیمانده صفر درصد باشد معنی آن این است که سنگ آهک نمونه دارای صد در صد آهک بوده است و اگر وزن خشک باقیمانده مثلا ۳۰۰ گرم باشد به معنی این است که سنگ آهک نمونه مورد نظر دارای ۷۰ در صد آهک است و الی آخر(مقیمی و محمودی، ۲۰۵:۱۳۸۳). باتوجه به انجام این آزمایش در آزمایشگاه رسوب شناسی از ۴ نمونه سازند تیرگان، مزدوران ۲، کلات و سرچشمه میانگین میزان آهک مورد نظر عدد۵۶/۳ درصد را نشان می دهد که به تکنیک کلسیمتری نزدیک می باشد.

اشکال ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷: به ترتیب از سمت راست نمونه سنگ مورد آزمایش، سنگ پودر شده، پودر مخلوط با اسید کلریدریک رقیق و دستگاه آون جهت خشک کردن نمونه رسوب پودر شده در آزمایشگاه رسوب شناسی

نتیجه گیری

حوضه آبریز کلات یکی از حوضه های کارستی در زون کپه داغ در شمال شرق ایران می باشد که بیش از ۲۵ درصد از مساحت آن کارستی می باشد. هدف از این پژوهش بررسی و تحلیل نرخ فرسایش کارست با استفاده از تکنیکهای تجربی و آزمایشگاهی می باشد. استفاده از تکنیکهای میدانی و تجربی یکی از کارآمدترین روشهایی است که با آن می توان میزان انحلال آهک در حوضه را به دست آورد. با استفاده از فرمولهای تجربی کوربل، سوئیتینگ و ژیونگ جهت شناخت فرسایش

کارست حوضه و نیز پتانسیل یابی منابع آب کارست استفاده شد که در این پژوهش در فرمول کوربل عدد ۲۳/۶۶ میلی متر در هزار سال ، در روش سوئیتینگ عدد ۱۲/۹۳ میلی متر در هزار سال و در مدل ژیونگ عدد ۲۰ متر مکعب در کیلومتر مربع را نشان داد که با توجه به تطبیق با جداول و نمودارهای استاندارد، فرمول کوربل از کارآئی بیشتر برخوردار می باشد که نشان دهنده ارتباط معنادار فرسایش و پتانسیل منابع آب کارست و گردشگری در حوضه می باشد . با استفاده از روشهای آزمایشگاهی کلسیمتری ، ICP ، بررسی وزنی و روش بررسی میزان co2 میزان درصد آهک در سازندهای کربناته به ترتیب ۳۶/۳ درصد ، ۳۸ درصد ، ۵۶/۳ درصد و ۴۴۸ سانتی متر مکعب به دست آمد که نشان از خلوص نسبتا مناسب آهک در سازندهای کربناته حوضه می باشد و نشان دهنده این است که علی رغم جوانی کارست حوضه و با توجه به درصد متوسط کلسیم حوضه،منابع آب کارست در نقاط برداشت، مشاهده شده و از طرفی آبشار قره سو به عنوان نماد گردشگری منطقه این ارتباط معنادار بین آنالیز روشهای آزمایشگاهی و گردشگری را اثبات می کند.

منابع

- آدابی ، محمد حسین ، ۱۳۹۰ ، ژئوشیمی رسوبی ، انتشارات آرین زمین ، چاپ دوم.
- افراسیبیان، احمد، ۱۳۷۳، اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی ، کرمانشاه–تهران
- بهنیافر، ابوالفضل، قنبرزاده، هادی ،۱۳۹۵، ژئومورفولوژی کارست، مشهد، انتشارات نگاران سبز.
- بهنیافر ،ابوالفضل ، قنبرزاده ، هادی ،فرزانه ، عباسعلی،۱۳۸۸، ویژگیهای ژئومورفیک توده ی کارستی اخلمد در دامنه های شمالی ارتفاعات بینالود، زاهدان، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۴، صص ۱۴۰–۱۲۱.
- بهرامی، شهرام، زنگنه اسدی، محمد علی، جهانفر، علی،۱۳۹۵، ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگیهای هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه : تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون) ، مجله جغرافیا و توسعه ، شماره ۳ ، صص ۷۴–۶۱ .
- خانلری، غلامرضا و مؤمنی، علی اکبر ،۱۳۹۱، ژئومورفولوژی ، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین ، غرب ایران ، جغرافیا و آمایش شهری منطقه ای ، شماره ۳ ، صص ۷۴–۶۱ .
- خضری ، سعید ، شهابی ، هیمن و محمدی ، سارا ،۱۳۹۶، ارزیابی و پهنه بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی ، مجله پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی ، شماره ۱ ، صص ۳۹–۲۱ .
- خوش رفتار، رضا. سرور، جلیل الدین و فرید مجتهدی، نیما،۱۳۹۵، بررسی اشکال کارستی در توده کوهستانی برفک گیلان، فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی، شماره ۵۳ ، صص۵۶–۳۹.
- چورلی ،ریچارد جی، ای شوم، استانلی، ای سودن، دیوید، ترجمه احمد معتمد،۱۳۸۶، ژئومورفولوژی جلد دوم(زمین شناسی)، انتشارات سمت، ص۲۰۴.
- زنگنه اسدی، محمدعلی. غیور، حسنعلی. رامشت، محمدحسین و ولایتی، سعداله،۱۳۸۱، چشم اندازهای کارستی اخلمد و مدیریت محیطی آن، تهران، مجله پژوهشهای جغرافیایی، شماره ۴۲، صص ۱۰۱–۸۷.
- زنگنه اسدی، محمد علی، شفیعی، نجمه، کولیوند، تیمور،۱۳۹۶، ارزیابی میزان فرسایش کارستی در حوضه آهکی فهلیان فارس، پنجمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، ص ۲۱۷.
- عشقی،ابوالفضل،ثروتی، محمدرضا،۱۳۸۳، ویژگیهای ژئومورفولوژی مناظر کارستی در حوضه آبریز کارده، پژوهشهای جغرافیایی، شماره ۸ ، صص ۱۵–۱.
- مقیمی،ابراهیم، محمودی، فرج ا....،۱۳۸۳، روش تحقیق در جغرافیای طبیعی،انتشارات قومس، تهران.

- مقصودی، مهران، اخوان، هانیه، مهدیان ماهفروزی، مجتبی، عشور نژاد،غدیر،۱۳۹۴، پهنه بندی شدت انحلال سنگ-های کربناته در زاگرس جنوبی(مطالعه موردی: حوضه سیف آباد لاغر)، پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۱، ص۱۰۵-۱۲۴.
- میرعلایی موردی، مهدی، میراب شبستری، غلامرضا، اعتباری، بهروز و هیهات، محمود رضا،۱۳۹۲،معرفی ژئومورفولوژی کارستی سنگهای کربناته منطقه آهنگران(شمال شرق بیرجند)، جغرافیاوآمایششهری–منطقه ای،شماره ۸ ، صص ۱۳۰-۱۱۵.
- ملکی، امجد، شوهانی، داوود، علایی طالقانی، محمود،۱۳۸۸، پهنه بندی تحول کارست در استان کرمانشاه، برنامه ریزی و آمایش فضا، مدرس علوم انسانی، شماره ۱۳، صص ۲۷۱-۲۵۹.
- ملکی،امجد،محمدی ، سارا،کریمی ، حاجی،زینتی زاده ، علی اکبر،۱۳۹۷،ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگیهای هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در آبخوانهای شاهو و اسلام آباد استان کرمانشاه ،مجله پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی ، سال ششم ، شماره ۴.
- یمانی، مجتبی،۱۳۹۴، راهنمای عملی تکنیکهای میدانی و آزمایشگاهی، دانشگاه تهران.
- ولایتی، سعداله ، خانعلی زاده، فریده،۱۳۹۰، بررسی رابطه ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی، مطالعه موردی حوضه آبریز کارده، مجله جغرافیا،شماره ۳۱، صص۱۸۹-۱۷۱.
- ولایتی، سعداله. زنگنه اسدی، محمدعلی،۱۳۸۲، حوضه کارستی اخلمد، نمادی از تکامل ژئومورفیک کارست، مشهد، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه ای صص ۱۴۶-۱۲۳.
- *Cao, J.H., Yuan, D.X. et al .(2005) .Karst ecosystem of southwest China constrained by geological setting, Geology.*
- *Mull, D.S. et al. (1988). Application of dye – tracing techniques for determining solute transport characteristics of Groundwater in Karst terrains.*
- *Ford, D., & Williams, P. D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. West Sussex, England: John Wiley & Sons.*
- *Gunn, J. (2013). Denudation and Erosion Rates in Karst, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, 72-81.*
- *INkpen, R., Viles, H., Moses C., Baily B. (2012). Modelling the impact of changing atmospheric pollution levels on limestone erosion rates in central London, 1980–2010, Atmospheric Environment, Vol. 61, 476-481*
- *Milanovic, P. J. (1981). Karst hydrogeology. Colorado, CO: Water Resources ublications.*
- *Stone, J., Allan, G.L., Fifield, L.K., Evans, J.M., Chivas, A.R. (1994). Limestone erosion measurements with cosmogenic chlorine-36 in calcite — preliminary results from Australia, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 92, No. 1–4, 311-316*
- *Selby, M.J. (1985). Earth changing surface: an introduction to geomorphology, Clarnbon press: Oxford.*
- *Xiong, Y. J, Qiu, G.Y, Mo, D.K., Lin, H, Sun, H, Wang, Q.X., Zhao, S.H. Yin, J..(2009). Rocky desertification and its causes in karst areas: a case study in Yongshun County, Hunan Province, China, Environmental Geology, June, Vol. 57, No.7, 1481-1488.*
- *White, W.B., (1988). Geomorphology and hydrology of karst terrains, Oxford University press.*