

محاسبه نرخ فرسایش زمین شناختی کانیون آبشار رودمعجن در خراسان رضوی بر اساس معادله کوربل

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

مسلم یزدانی؛ دانش آموخته دکتری علوم زمین، دانشگاه اشفورد، امریکا

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

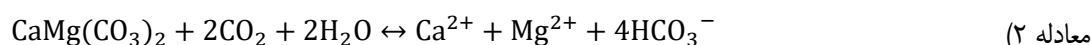
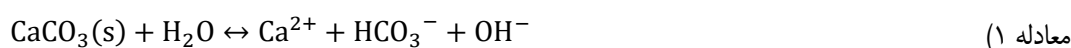
چکیده

کانیون آبشار رودمعجن شهرستان تربت حیدریه، یکی از عوارض زمین شناختی کواترنری شاخص شرق زون ایران مرکزی است که بر روی پهنه ای از آهک‌های رودیست دار کرتاسه زیرین، حاوی فرامینفرهای اوربیتولینا (بارمین - آلبین)، شکل گرفته و از اوایل کواترنری، تغییر شکل عمده و فرسایش شدیدی در بستر آهکی آن رخ داده است. منشا جریان آبی آن مربوط به ذخایر آب کارستی کواترنری ارتفاعات شمالی رودمعجن است. در این تحقیق با استفاده از معادله کوربل (۱۹۵۹) و به کمک مطالعات میدانی، نرخ فرسایش کانیون آبشار رود معجن محاسبه گردیده است. با توجه به شرایط تکتونیکی و گسلی منطقه، پیدایش این کانیون را می توان متأثر از عوامل تکتونیکی - گسلی و هم زمان، فرسایش آبی دانست. نتایج حاصل از محاسبات، حاکی از آن است که نرخ فرسایش انحلال آهک در کانیون آبشار رودمعجن حدود ۱۸۸/۱۴ میلی متر بر هزار سال بوده که نشان از کارایی نسبی این مدل دارد.

واژه‌های کلیدی: آبشار رودمعجن، تربت حیدریه، سنگ آهک، فرسایش زمین شناختی، معادله کوربل، کواترنری.

مقدمه

کانیون، ژرف دره یا گلوگاه یکی از اشکال زمین شناختی کارست و انواع خاص دره با دیواره‌های آهکی و کربناته پرشیب است که در اثر فروریزی و فرونشست غارهای عمیق و مستقیم به وجود می‌آید (کریمی وردنجانی، ۱۳۹۴). فرسایش انحلالی در سنگ‌ها و توده‌های کربناته به عوامل متعددی وابسته است. از جمله این عوامل می‌توان به آشفستگی یا خطی بودن سیستم، سرعت جریان، جدایی یون‌ها از سطوح کانیایی، میزان اسید کربنیک^۱، فرایندهای انتقالی، فشار جزئی CO₂، PH و عواملی از این دست اشاره کرد (دریبرت، ۱۹۹۸). معادله کلی فرسایش (انحلال) کلسیت و دولومیت به ترتیب به شرح زیر است (فورد و ویلیام، ۲۰۱۳):



عمده مطالعاتی که تاکنون در رابطه با فرسایش انحلالی انجام گرفته، بر روی سنگ‌های کربناته بوده است. با این حال در سال‌های اخیر مطالعاتی در مقیاس کوچک‌تر نسبت به موارد فوق بر روی توده‌های غیرکربناته نظیر تبخیری‌ها نیز انجام شده است. این امر ناشی از سختی مطالعه آن‌ها به علت قابلیت انحلال پذیری بالای آن‌ها است. از جمله مطالعات محدودی که در این رابطه انجام شده است، می‌توان به تحقیق کلیمچوک و همکاران^۳ (۱۹۹۶) اشاره کرد. آن‌ها در تحقیق جامعی ضمن بررسی انواع روش‌های موجود برای تخمین نرخ فرسایش، به طور ویژه به روش‌های میدانی تخمین نرخ فرسایش پرداخته‌اند. یکی از مهم‌ترین مطالعاتی که تاکنون در رابطه با فرسایش کارست صورت گرفته، توسط کوربل^۴ (۱۹۵۹) جغرافی‌دان و کارست شناس فرانسوی است. ایشان با بررسی آب‌های زهکشی شده توسط رودخانه‌ها در نواحی سردسیر و مقایسه آن با نواحی گرمسیر از منظر میزان کربنات کلسیم محلول، چنین استنباط نمود که میزان فرسایش کارستی در نواحی سردسیر بیشتر از گرمسیر بوده و این امر با توجه به میزان انحلال دی اکسید کربن در آب سرد و گرم توجیه پذیر است. در تحقیق دیگری ژاکوکس^۵ (۱۹۷۰) در بررسی نقش کنترلی عوامل اقلیمی در خوردگی کارست، ضمن بررسی نظریات کوربل در رابطه با ویژگی‌های فرسایشی کارست‌ها در اقلیم‌های مختلف، ایرادات جدی را بر نظریات او وارد دانست. از جمله آن که وی معتقد است، محتوای اسید کربنیک آب صرفاً به وسیله‌ی میزان دی اکسید کربن موجود تعیین نمی‌شود، همچنین میزان دی اکسید کربن موجود در بالاترین لایه خاک سطوح کارستی به واسطه پوسیدگی مواد آلی ممکن است چندین برابر کربن دی اکسید جو باشد و در آخر آن که خوردگی سنگ‌های آهکی تنها متأثر از اسید کربنیک نبوده بلکه سایر اسیدهای آلی و غیر آلی نیز از جمله‌ی عوامل موثر در این امر هستند. در تحقیقی به مطالعه درجه کارستی شدن منطقه کلات توسط رضائی عارفی و همکاران (۱۳۹۹) پرداخته شده است.

1 H2CO3

2 Ford & Williams

3 Klimchouk et al.

4 Corbel

5 Jakucs

آن‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی نظیر کلسیمتری، مطالعات میدانی و شواهد زمین‌شناختی و بررسی عوارض سطحی و همچنین تحلیل سلسله‌مراتبی، علاوه بر تعیین میزان بلوغ کارست‌های منطقه، میزان نرخ فرسایش موجود در منطقه مذکور را با استفاده از فرمول تجربی کوربل و روش سوئیتینگ^۶ محاسبه کرده‌اند. سرعت انحلال‌پذیری سازندهای آهکی در سه حوضه خرم‌آباد، الشتر و پیرانشهر توسط سپه‌وند و همکاران (۱۳۹۹)، بررسی شده است. نتایج تحقیقات ایشان حاکی از آن است که سازندهای آهکی آسماری، بیش‌ترین میزان ثابت انحلال‌پذیری و سازند شهبازان کمترین مقدار ثابت انحلال‌پذیری را دارا می‌باشند. در تحقیقی قهفرخی و همکاران (۱۳۹۹)، نرخ فرسایش حاصل از جریان‌های سطحی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها با مطالعه رودخانه زاینده‌رود به عنوان منطقه‌ی نمونه، به ارائه مدلی ریاضیاتی بر پایه روش پیشنهاد شده توسط دوان جهت تخمین میزان فرسایش دیواره رود پرداخته‌اند. تاثیر ویژگی‌های سنگ‌شناسی رشته کوه شتری بر توسعه‌ی عوارض کارستی توسط اشرف و همکاران (۱۳۹۲) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها خصوصیات نظیر میزان خلوص و داده‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های منطقه را مورد توجه قرار داده و مهم‌ترین عامل بازدارنده در توسعه‌ی کارست این منطقه را شرایط اقلیمی می‌دانند. گابروشک^۷ (۲۰۰۹)، در تحقیق خود با عنوان مفاهیم و روش‌های تخمین برهنه‌سازی انحلال‌پذیر در مناطق کارستی به بررسی روش‌های موجود برای تخمین نرخ فرسایش انحلالی در مناطق کارستی می‌پردازد (برنر، ۱۹۷۸). مطالعات قبلی در بیرویت^۸ (۱۹۸۱)، به تشریح شرایط تعادلی، سینتیک و رسوب کلسیت منیزیم در آب دریا می‌پردازد. ایشان نرخ انحلال ناشی از اختلاط خوردگی در سامانه کلسیم کربنات - کربن، دی‌اکسید-آب را در کارستی شدن نواحی دارای سنگ‌های کربناته، مورد بحث و بررسی قرار داده است. وی با استفاده از داده‌های سینتیک انحلال کلسیت به محاسبه نرخ انحلال آن پرداخته و سامانه کلسیم کربنات - دی‌اکسید کربن - آب با ترکیب شیمیایی متفاوت را یکی از عوامل مهم در کارستی شدن نواحی کربناته می‌داند. در نهایت با بررسی موارد مزبور، مدلی مفهومی در رابطه با توسعه غارها ارائه می‌دهد. در تحقیق جامعی گومبرت^۹ به بررسی انحلال کارستی و تخمین نقش آن بر چرخه کربن می‌پردازد. او برای دستیابی به این مهم از روش جدیدی تحت عنوان حداکثر پتانسیل^{۱۰} (MPD) بهره می‌گیرد. ایشان معتقد است این روش در تناسب و تعادل با سایر روش‌ها نظیر معادله تجربی کوربل بوده و نتایج واقعی‌تری از نرخ انحلال کارستی در آب و هوای مختلف به نمایش می‌گذارد. از دیگر تحقیقات مهمی که بر روی نرخ انحلال دولومیت‌ها و سنگ‌های کربناته صورت گرفته است، می‌توان به مطالعات و تحقیقات گروم و ویلیامز^{۱۱} (۱۹۶۵)، گان^{۱۲} (۱۹۸۱)، آدامز و سوینرتون^{۱۳} (۱۹۳۷) و سوچت و همکاران^{۱۴} (۱۹۹۵) اشاره کرد که می‌تواند برای نیل به هدف اصلی مقاله از آنها سود جست. از اهداف اصلی این تحقیقات محاسبه نرخ فرسایش کارستی کانیون آبشار رودمعجن با استفاده از معادله کوربل می‌باشد.

6 Sweeting

7 Gabrovšek

8 Dreybrodt

9 Gombert, 2002

10 Maximal Potential Dissolution: MPD

11 Groom & Williams

12 Gunn, 1981

13 Adams & Swinnerton, 1937

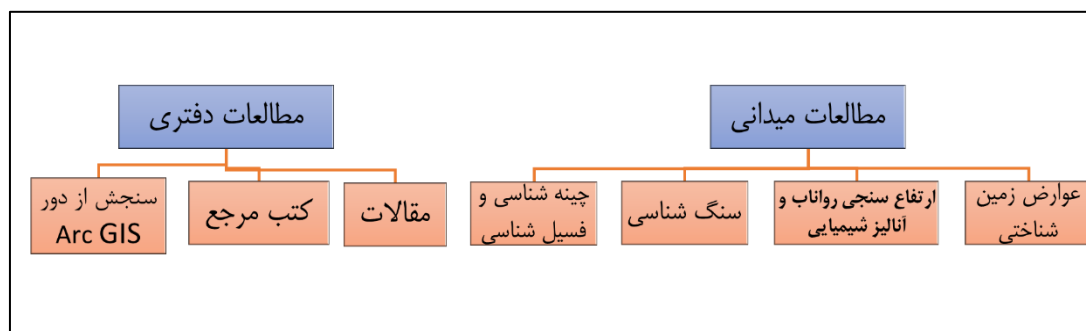
14 Suchet et al.

مواد و روش‌ها

روش‌های متعددی جهت مطالعه نرخ فرسایش وجود دارد. به طور کلی جهت مطالعه و بررسی نرخ فرسایش سه راهکار عمده وجود دارد (گابروشک، ۲۰۰۹؛ کلیمچوک و همکاران، ۱۹۶۹).

۱. تعیین میزان فرسایش انحلالی بر حسب بار املاح موجود به کمک مطالعات هیدروشیمیایی،
۲. تعیین میزان فرسایش بر حسب کاهش حجم یا وزن نمونه‌های مورد آزمایشگاه یا در واقع توده‌های سنگی موجود،
۳. تعیین میزان فرسایش به روش مستقیم به کمک اندازه‌گیری ریز فرسایش‌های انحلالی.

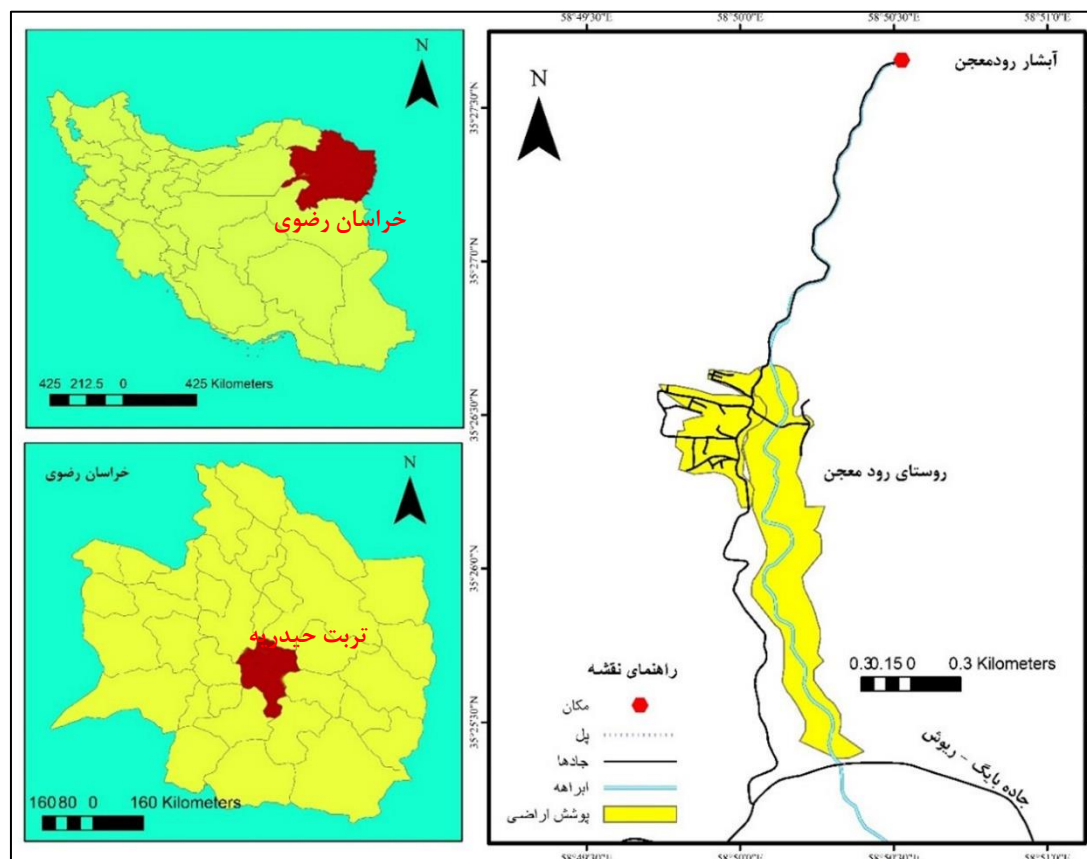
سایر روش‌ها که فرعی‌تر هستند، عبارتند از روش خوردگی سطحی، روش ژئومورفومتری، روش دی اکسید کربن حذفی و روش عملکرد فرایندها (رضائی‌عارفی و همکاران، ۱۳۹۸). جهت انجام این تحقیق از روش‌های میدانی و کتابخانه‌ای بهره گرفته شده است. در ابتدا منطقه‌ی مورد نظر به صورت مورد نظر به صورت میدانی بازدید شده، عوارض زمین شناختی، سنگ‌شناسی منطقه و ساختارهای زمین‌شناسی با کمک نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض آباد به تفصیل مورد بررسی قرار گرفتند. لازم به ذکر است در طی یکسال در فصل‌های مختلف، میزان رواناب و ارتفاع سنجی آن خط کش مدرج اندازه‌گیری شده و بر طبق آنالیزهای (I.C.P.) بر روی مقدار کربنات کلسیم آب اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از داده‌های حاصل از بازدیدهای صحرائی، نقشه منطقه به کمک نرم افزار Arc GIS ترسیم گردید. بخش اصلی و عمده تحقیق به کمک منابع کتابخانه‌ای، مقالات و سنجش از دور انجام گرفته است. با مراجعه به پایگاه‌های استنادی، گزارش‌های مرتبط جمع‌آوری و بررسی گردیدند و با کمک داده‌های بدست آمده از مطالعات صحرائی، مقاطع نازک، داده‌های استنادی مقالات و کتب مرجع این حوزه و به کمک معادله کوریل نرخ فرسایش در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید (شکل ۱).



شکل ۱: نمودار مراحل روش تحقیق.

زمین شناسی منطقه

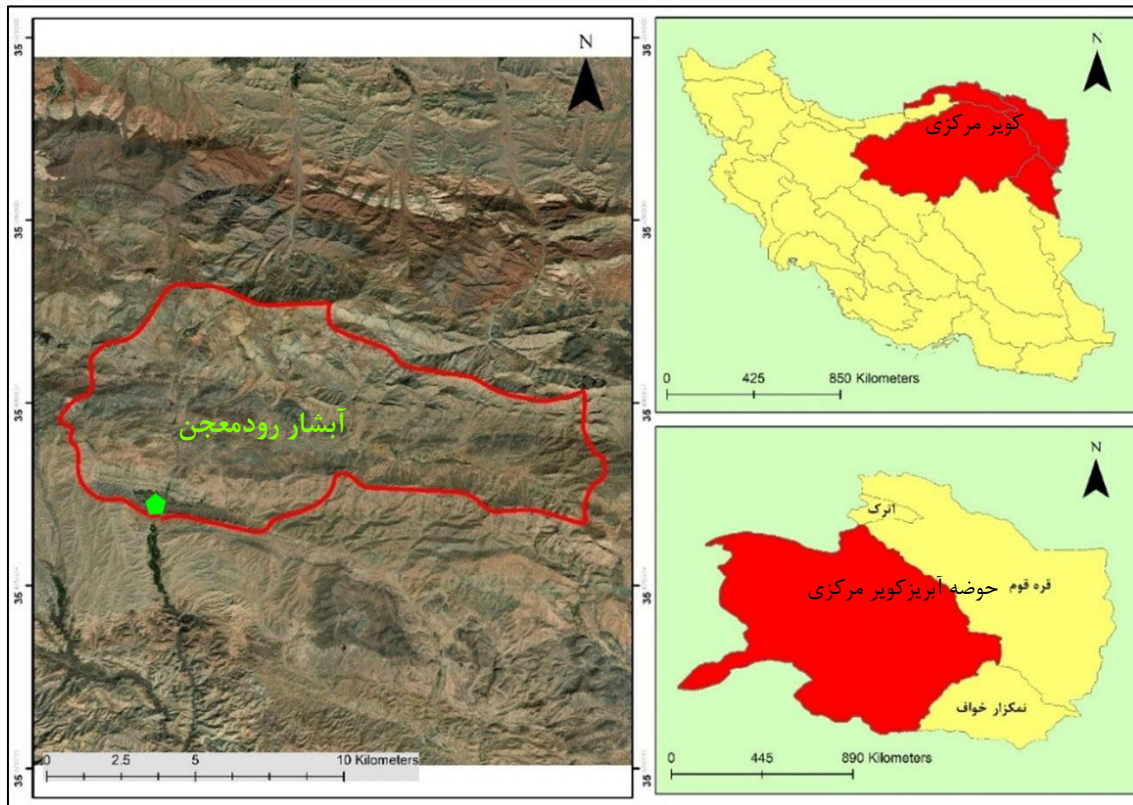
کانیون (ژرف دره) آبشار رودمعجن، یکی از عوارض زمین شناختی شاخص در شرق زون ایران مرکزی است که بر روی پهنه‌ای از آهک‌های رودیست‌دار کرتاسه (بارمین-آپتین)، شکل گرفته و مخصوصاً از اوایل کواترنری، تغییر شکل عمده و فرسایش شدیدی در بستر آهکی آن رخ داده‌است. آبشار رودمعجن در بخش بایگ شهرستان تربت حیدریه واقع شده است (شکل ۲). این آبشار واقع در حوضه آبریز کویر مرکزی ایران بوده (شکل ۳) و از سلسله کوه‌های چهل تن واقع در ۵۴ کیلومتری غرب شهرستان تربت حیدریه سرچشمه می‌گیرد و ارتفاعی در حدود ۲۸ متر دارد (مدرسی، ۱۳۹۸). در نهایت رودخانه مذکور به رودخانه حصار منتهی می‌شود. منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض آباد، در ۳۵ کیلومتری غرب شهرستان تربت حیدریه واقع شده است. مختصات جغرافیایی آن بین عرض‌های جغرافیایی "۳۵'۵۰" ۱۸° شمالی تا "۲۰'۵۵" ۳۵° شمالی و طول‌های جغرافیایی "۴۹'۴۰" ۵۸° شرقی تا "۵۲'۴۵" ۵۸° شرقی قرار دارد. از جمله ارتفاعات مهم این منطقه می‌توان به کوه‌های شصت دره، کزز و سرسفیدال اشاره کرد. رخنمون کوه‌های شصت دره عمدتاً از ماسه سنگ، آهک و شیل‌های سیاه رنگ ژوراسیک تشکیل شده است. از جمله ساختارهای مهم تکتونیکی می‌توان به گسل درونه با امتداد شرقی- غربی اشاره کرد که سنگ‌شناسی بخش شمالی این گسل عمدتاً شامل سنگ‌های آتشفشانی پالئوژن همراه ادخال‌هایی از آهک‌های نومولیت‌دار است. سازند-های منطقه به ترتیب زمانی شامل سازند آهکی کالشانه در کامبرین میانی، سازند درنجال با لیتولوژی آهکی با سن کامبرین میانی- فوقانی، سازند شیرگشت با سن اردوویسین - سیلورین، عمدتاً شامل سیلت و شیل، سازند نیور شامل ماسه سنگ‌های کوارتز و شیل، سازندهای پادها، سیب زار و بهرام در سیلورین - دونین می باشد. از سازندهایی با سن مزوزوئیک (ژوراسیک) می‌توان به سازند بغمشاه و سازند آهکی اسفندیار اشاره کرد. دو سازند کنگلومرای قرمز و آهک قرمز از سازندهای دوره‌ی کرتاسه این ناحیه هستند (امین داور، ۱۴۰۰؛ بهروزی، ۱۳۶۶).



شکل ۲. نقشه منطقه آبشار رودمعجن در استان خراسان رضوی و شهرستان تربت حیدریه (اقتباس از <https://www.google.com/maps>, 2024)

از جمله آهک هایی که این آبشار آن ها را تحت فرسایش قرار داده دارای سن کرتاسه پایینی هستند. این آهک ها شامل رودیست ها و آهک هایی با فرامینفرهای بنتیک (اوریتولین ها ۱۵) و دارای سن بارمین و آپتین هستند. این رسوبات آهکی در حوضه ایران مرکزی، معادل سازند تیرگان در حوضه کپه داغ بوده و ستیخ ساز هستند. این رسوبات شامل سنگ آهک مارنی، مارن و شیل آهکی بسیار سبتر، محکم، صخره ساز و غنی از فرامینفرهای بنتیک اوریتولین و میلیولید ۱۴ هستند. این سازند آهکی از سنگ آهک های سبتر لایه تا توده ای اوولیتی و زیست آواری با میان لایه های اندکی از سنگ آهک مارنی، مارن و شیل آهکی تشکیل شده است. مرز پایینی آهک های کرتاسه شامل ماسه سنگ های قرمز رنگ بوده که در محیط خشکی بصورت همشیب قرار گرفته اند و مرز بالایی این واحد رسوبی، شیل و مارن خاکستری روشن است. شاخص ترین سنگواره آهک های کرتاسه پایینی اوریتولین است که بیشتر هسته اوولیت ها را تشکیل می دهند. در شکل ۴ ستون چینه شناسی شماتیک از آهک های کرتاسه با ضخامت ۳۱۰ متر که در مصب آبشار رود معجن وجود دارد، نشان داده شده است. قابل ذکر است که بخش های پرفسیل بیشتر در معرض فرسایش قرار گرفته و تخلخل مکانیکی سنگ را افزایش می دهند. سنگ های مصب کانیون آبشار رود معجن از داخل رودخانه ای که بصورت گسلی و تحت عوامل تکتونیکی و فرسایش آبی ایجاد شده، مربوط به آهک های صخره سازی هست که با سن کرتاسه پایینی (بارمین تا آلبین) در ایران مرکزی می باشد. تعدادی از تصاویری از این رودخانه و آبشار در

شکل ۵a-d (یزدانی، ۱۴۰۱) نشان داده شده است. در شکل ۶a-b تصاویر نمونه های دستی از این رسوبات نشان داده شده است.



شکل ۳: حوضه آبریز رودمعهجن، در ناحیه حوضه آبریز اصلی کویر مرکزی.

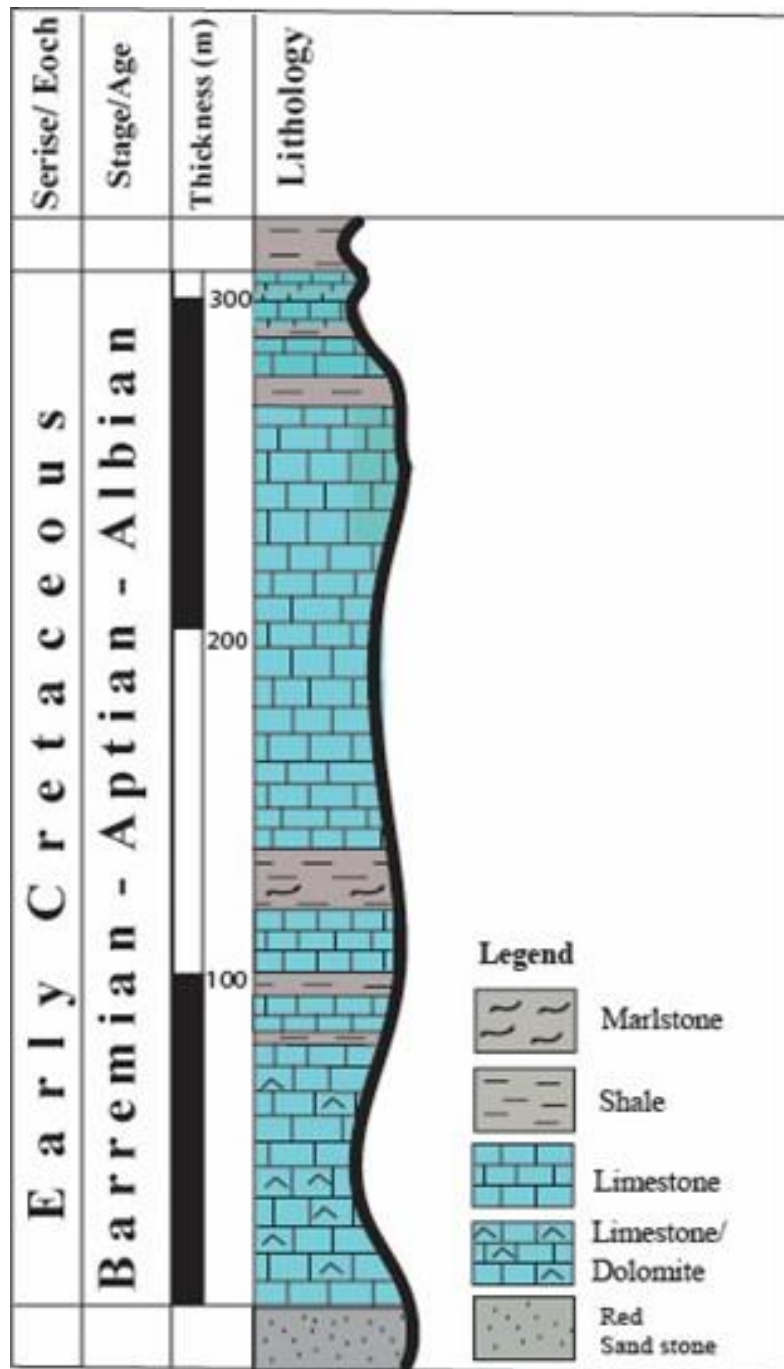
سنگ‌های کرتاسه پایینی ایران مرکزی دو رخساره کاملاً متفاوت دارد. در گستره‌های وسیعی از این پهنه، رخساره سنگ‌های کرتاسه پایین نشانگر سکوه‌های کربناتی است. رخساره‌های کربناتی کرتاسه پایینی ایران مرکزی، شامل سه واحد سنگی زیر است:

- ردیف‌های آواری زیرین، متشکل از نهشته‌های کنگومرایی و ماسه‌سنگی، به سن هاتریوین-بارمین، به رنگ سرخ ارغوانی که گاهی میان‌لایه‌هایی از مارن و یا سنگ‌آهک دارد.

- ردیف‌های کربناتی میانی، واحدی بسیار آشکار از کربنات‌های ستبرلایه با سیمای کوه‌ساز است که به داشتن اربیتولین و دیگر سنگواره‌های بارمین-اوایل آلبین شاخص است. رخساره سنگی کربنات‌های اربیتولین‌دار ایران مرکزی نشانگر محیط‌های دریایی گرم با ژرفای کم و گاهی نشانگر محیط‌های ریفی است و با سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار دیگر مناطق ایران، شباهت‌های سنگی و زیستی زیادی دارد.

- ردیف‌های شیلی - مارنی بالایی، سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار را می‌پوشاند. این واحد سنگی، سیمای فرسوده و تپه ماهوری دارد. سنگواره‌های گوناگون آن، به ویژه آمونیت‌های بودانتی سراسر معرف آشکوب آلبین است. از این رو، از این ردیف‌های شیلی اغلب با عنوان "شیل‌های آلبین" یاد می‌شود. گسترش جغرافیایی شیل‌های آلبین محدود به ایران مرکزی نیست و در پهنه‌های زاگرس، البرز و کپه‌داغ نیز وجود دارد. ردیف‌های سه گانه کرتاسه پایینی ایران مرکزی هنوز به طور رسمی نام‌گذاری نشده‌اند و فقط به صورت آهک‌های کرتاسه پایینی ایران مرکزی معروف هستند.

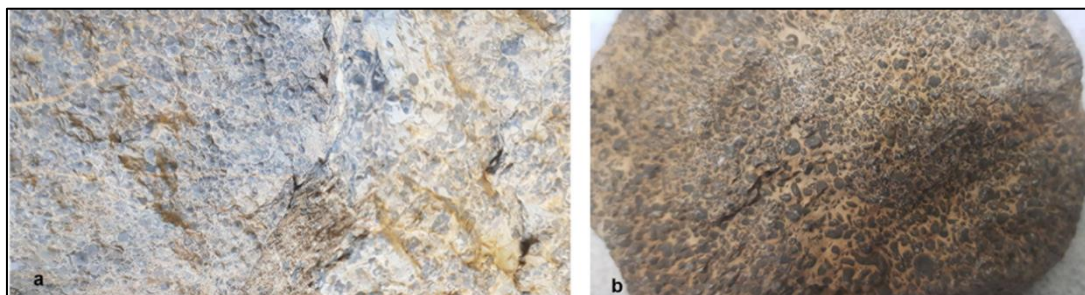
در دره رودمعجن آهک‌های کرتاسه پایینی با سن بارمین، آپتین و آلبین دارای رخساره کربناته و غنی از فسیل‌های اوربیتولین هستند. سنگ‌های آهکی برداشت شده این کانیون نشانگر تعداد بسیار زیادی از اوربیتولین‌های بنتیک در این رسوبات بوده و در بخش‌های دیگر آن تعداد و تمرکز آنها متفاوت است. تصاویری از نمونه‌های برداشت شده از قسمت ابتدایی برش و تمرکز و تعداد آنها در سنگ قابل ملاحظه است (6a)، در قسمت بالایی برش (6b) صخره ساز بوده و شامل آهک‌های بسیار ستبر می‌باشد.



شکل ۴: ستون شماتیک چینه‌شناسی کرتاسه پایینی در ایران مرکزی (کانیون آبشار رودمعجن).



شکل (a-d) ۵. تصاویری از زمین شناختی منطقه آبشار رودمعجن.

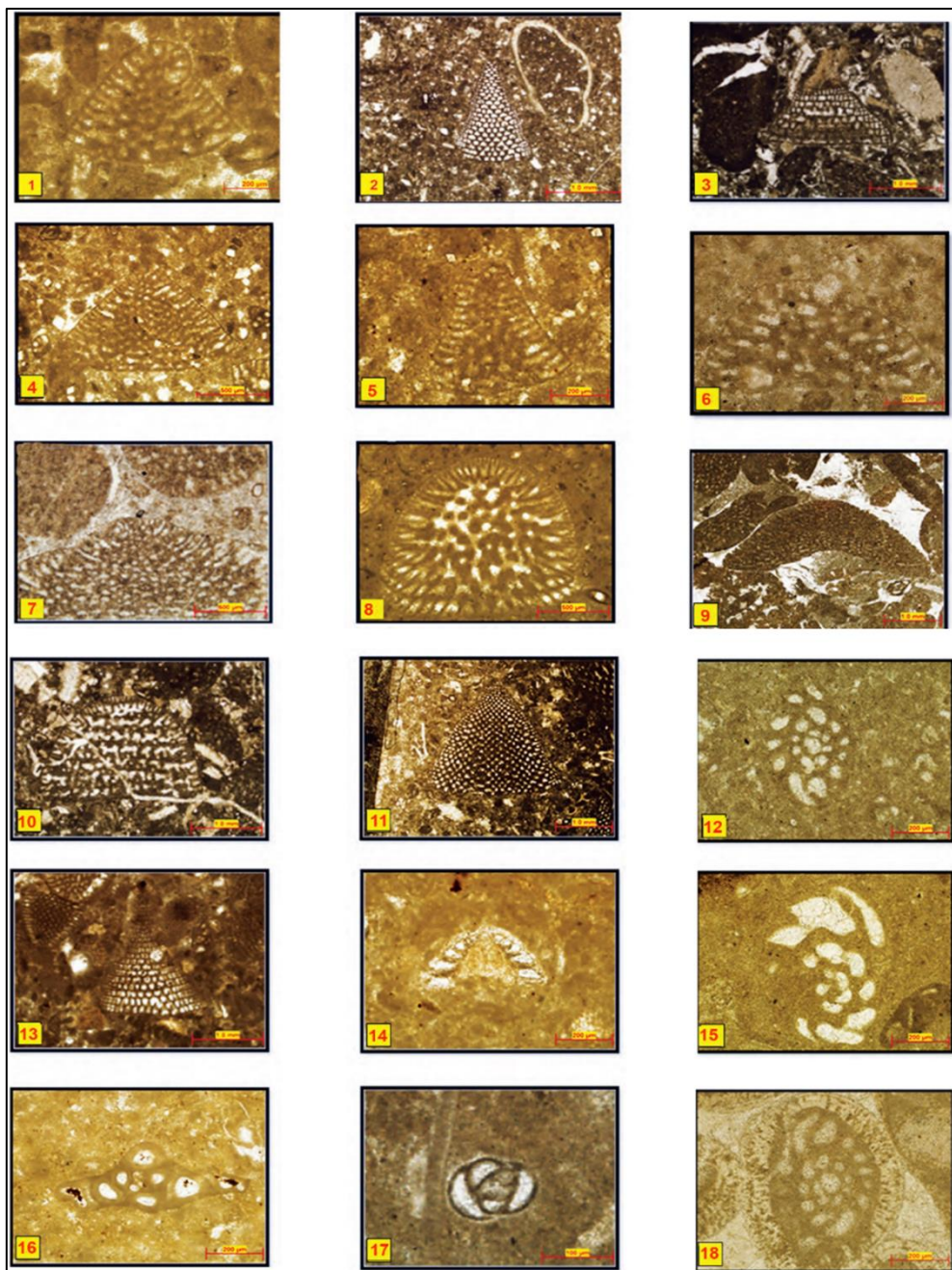


شکل ۶(a-b). تصاویری از نمونه های دستی آهک های کرتاسه پایینی ایران مرکزی غنی از فسیل های اوربیتولین.

در شکل ۷ تعدادی از فرامینیفیرهای بنتیک کرتاسه پایینی با سن بارمین-آپتین نشان داده شده که هم ارز سازند تیرگان از حوضه کپه داغ است (اقتباس از ریاحی و همکاران، ۱۴۰۰). در این واحدهای رسوبی که اوربیتولین ها و میلیولیدها فراوان هستند، نشانگر رسوبگذاری در یک محیط رمپ کربناته و لاگونی هستند. با مطالعاتی که در این حوضه انجام شده، حضور این فسیل ها در محیطهای کم عمق و رمپ کربناته و لاگون حاشیه قاره تشکیل شده است.

تاریخچه تکتونیکی منطقه

تحولات تکتونیکی در منطقه ی مورد مطالعه عامل تحولات مهمی بوده و موجب تغییرات رخساره ای شده است. به گونه ای که این ناحیه از منظر زمین شناسی به چهار بخش با رخساره های سنگی خاص هر منطقه تقسیم شده است. عمده گسل های منطقه جهت شرقی - غربی دارند. نهشته های کربناته و شیلی موجود در شمال شرق این ناحیه سن ژوراسیک داشته و در فاز کوهزایی کیمرین پسین چین خورده اند. در شمال گسل درونه یک ناپیوستگی حاصل از فعالیت های شدید آتشفشانی مشاهده می شود و در کوه های شصت دره سنگ های افیولیتی در زیر ناپیوستگی قرار دارند که مرز بالای آن شامل سنگ های آذر آواری ائوسن و کنگلومرا است. به طور کلی منطقه ی فوق زمین شناختی خشن و صخره ای داشته و ارتفاع از سمت شرق به غرب افزایش می یابد (امین داور، ۱۴۰۰؛ بهروزی، ۱۳۶۶). واحدهای سنگی منطقه شامل واحدهای آتشفشانی و آذر آواری متشکل از توف های آندزیتی و آندزیت، واحدهای عمیق و نیمه عمیق شامل کوارتز مونزونیت پورفیری، مونزوگرانیت، بیوتیت گرانودیوریت و سینوگرانیت و واحد رسوبات عهد حاضری که عمدتاً در سیستم آبراهه ای منطقه جای دارند و عمدتاً شامل پادگانه های آبرفتی و نهشته های آواری است (امین داور، ۱۴۰۰). واحد توف آندزیتی، رخنمون خاکستری رنگ همراه با پوشش هایی از ورنی صحرا، قدیمی ترین واحد سنگی در منطقه است. واحد مذکور عمدتاً بافت پورفیری به همراه بلورهای درشت پلاژیوکلاز و پیروکسن دارد. واحد توف آندزیتی نیز لایه لایه و به رنگ خاکستری تیره است. واحد کوارتز مونزونیت رخنمون خاکستری روشن دارد. بخش های شمالی و جنوبی آن زمین شناختی صخره ساز و بخش های مرکزی آن حالت تپه ماهوری دارد. این واحد دگرسان شده و دارای بافت پورفیری است. واحد مونزوگرانیت استوک مانند و تحت دگرسانی قرار گرفته و رخنمون سفید تا خاکستری است. واحد بیوتیت گرانودیوریت با مورفولوژی صخره ای خود مرتفع ترین بخش منطقه را می سازد. این واحد به صورت دگرسان شده بوده و دارای کانی های پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و آلکالی فلدسپار در نمونه دستی است. واحد سینوگرانیت در نزدیکی رودخانه مورفولوژی تپه ماهوری داشته و به شکل توده ای و استوک در منطقه گسترش دارد. رخنمون آن به رنگ سفید تا خاکستری روشن است (امین داور، ۱۴۰۰). در شکل ۸ نقشه زمین شناسی منطقه که توسط GIS ترسیم شده، نشان داده شده است.



شکل ۷: تعدادی از فرامینیفراهای بنتیک کرتاسه پایینی (اقتباس از ریاحی و همکاران، ۱۴۰۰).

1) *Falsurgonina pileola* Arnaud-Venneau and Argot, 1973; 2) *Iraqia simplex* Henson, 1948; 3) *Paracoskinolina sunnilandensis* (Maync, 1955); 4) *Orbitolinopsis elongatus* Dieni, Massari & Moullade, 1963; 5) *Orbitolinopsis subkiliani* Henson, 1948; 6) *Eopalorbitolina charollaisi* Schroeder and Conrad, 1968; 7) *Paleodictyoconus pachymarginalis* Schroeder, 1965; 8) *Paleodictyoconus pachymarginalis* Schroeder, 1965; 9) *Palorbitolina lenticularis* (Blumenbach, 1805); 10) *Rectodictyoconus giganteus* Schroeder, 1964; 11 & 13) *Valserina broennimanni* Schroeder and Conrad, 1968; 12) *Mayncina bulgarica* Laugh, Peybenes & Rey, 1968; 14) *Trocholina odukpaniensis* Dessauvage, 1968; 15) *Charentia cuvillieri* Neumann, 1965; 16) *Derventina filipescai* Neagu, 1968; 17) *Istriloculina elliptica* (Iovcheva, 1962); 18) *Mayncina bulgarica* Laugh, Peybenes & Rey, 1968.

واکاوی یافته ها

بر اساس تعریف، اختلاط و حمل و نقل مواد توسط یک عامل سیال همانند آب، یخ و باد، فرسایش ۱۷ نامیده می‌شود. فریب ریچ^{۱۸} (۱۹۶۸) در مقابل خوردگی، به فرسایش شیمیایی نیز اشاره دارد و برخی آن را همان هوازدگی شیمیایی دانسته‌اند. همچنین گروژری^{۱۹} (۱۹۱۱) فرایند تهی سازی ۲۰ را به تمامی عواملی اطلاق می‌کند که موجب از بین رفتن سطح زمین و کاهش ارتفاع می‌شود. هر چند ممکن است دو واژه تهی سازی و فرسایش، مترادف با هم استفاده شوند، اما در کاربرد آن‌ها باید دقت داشت. شرودر^{۲۱} (۲۰۱۳) معتقد است که تهی سازی باید در معنای محدودتری نسبت به فرسایش به کار رود. این ترادف از آن جا ناشی می‌شود که نرخ فرسایش با کمیت حجم/حجم/زمان بیان می‌شود، درست مانند نرخ تهی سازی. البته از آنجا که در عمل اندازه‌گیری حجم توده سنگی دشوار یا تقریباً ناممکن است، لذا از کمیت حجم/مساحت/زمان استفاده می‌شود (شرودر، ۲۰۱۳).

کوریل (۱۹۵۹) معادله‌ای را جهت تخمین نرخ فرسایش کارستی ارائه کرد که در مورد سازندهای آهکی، کاربرد زیادی دارد:

معادله ۳)

$$X = \frac{4ET}{100}$$

معادله کوریل برای کانیون رودمعجن به صورت زیر حل می‌شود:

$$X = 4ET/100 = 4 \times 3.2 \times 923/100 = 188.14$$

X: مقدار انحلال سنگ آهک به میلی متر در هر هزار سال بر حسب (1-2a-3km m)

E: ارتفاع رواناب بر حسب (dm)

T: میانگین حجم CaCo₃ آب بر حسب (l-mg)

برای بدست آوردن مقدار رواناب، یک سال در فصول مختلف (بهار، تابستان، پاییز، زمستان)، رواناب موجود در کانیون از ۱۰ نقطه مختلف کانیون که دارای تفاوت های معناداری از نظر ارتفاع بودند، اندازه گیری شد. میانگین کل این اعداد، ارتفاع ۳/۲ دسیمتر (dm) را نشان می‌دهد. در جدول ۱ ارتفاع رواناب در فصول مختلف نشان داده شده است. نقاط ده گانه ارتفاع سنجی رواناب کانیون رودمعجن در شکل ۹ نشان داده شده است. میانگین حجم CaCo₃ آب بر حسب (l-mg) نیز با نمونه برداری از نقاط مختلف آب و انجام آزمایش (I.C.P.) بدست می‌آید که با توجه پهنه کاملاً آهکی کانیون رودمعجن در تمامی نقاط، اختلاف عددی معناداری را نشان نداد و عدد ۹۲۳ میلی گرم بر لیتر، بدست آمد. باید توجه داشت که میزان چگالی سنگ های کربناته بین ۱/۵ تا ۲/۹ باشد و برای دولومیت‌ها حتماً مقدار سختی آب و دما اندازه گیری شوند تا میزان انحلال از طریق بارش به دست آید تا برای تعیین سنگ‌های سولفات‌ها مقدار یون کلسیم و سختی سنگ‌های کربناته اندازه گیری شوند. با استفاده از داده‌های موجود و معادله کوریل، نرخ فرسایش کارستی در منطقه مورد مطالعه ۱۸۸/۱۴ میلی‌متر بر هزار سال بدست آمد. این عدد با آنچه کوریل ذکر کرده از کارآیی مناسبی برخوردار می‌باشد. زیرا حوضه مورد مطالعه، جوان و تکاملی بوده و انحلال پذیری نیز فقط در سازندهای آهکی رخ می‌دهد. با توجه به اطلاعات مربوطه از دیدگاه زمین ریخت شناسی و مجموع اطلاعات سرزمین،

17 Erosion

18 Fairbridge

19 Gregory

20 Denudation

21 Shroder

تکتونیک و میدانی از کانیون آبشار رودمعجن به نظر می رسد فرسایش در سازند آهکی کرتاسه پایینی با حضور نمونه های دستی غنی از رودیست ها و فرم های اوربیتولین و نمونه های شاخص فرامنیفرهای بنتیک مثل اوربیتولینای شاخص آپتین-آلبین بسیار بوده است، چرا که با در نظر گرفتن اهمیت گسل ها و آب و هوای منطقه، میزان و نرخ تکتونیک فعال و ژئوشیمی آب و گرما و سرما در طول فصل های سال و اختلاف دمای ۵۲ درجه ای و میزان آهک و نرخ فرسایش فیزیکی آن، نرخ فرسایش با توجه به معادله کوریل در منطقه مورد مطالعه ۱۸۸/۱۴ میلی متر بر هزار سال محاسبه شد.

جدول ۱: میانگین سنجی ارتفاع رواناب بر حسب دسیمتر (dm)

ارتفاع نقاط نمونه برداری	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
A1	۵.۱	۲	۲.۳	۳
A2	۵.۲	۲.۱	۲.۷	۲.۹
A3	۵.۳	۲.۲	۲.۶	۲.۹
A4	۵.۲	۲.۱	۲.۶	۲.۸
A5	۵.۲	۲.۱	۲.۵	۲.۹
A6	۵.۴	۲.۲	۲.۹	۳.۳
A7	۵.۲	۲.۱	۲.۶	۲.۹
A8	۵	۲	۲.۶	۲.۵
A9	۵.۲	۲.۱	۲.۷	۳.۱
A10	۵.۲	۲.۱	۲.۵	۲.۷
میانگین ارتفاع	۵.۲	۲.۱	۲.۶	۲.۹
میانگین کل		۳.۲		



شکل ۹: نقاط ده گانه ارتفاع سنجی رواناب کانیون رودمعجن (اقتباس از <https://www.google.com/maps>, 2024).

لازم به ذکر است که معادلات پیچیده جریان رکود که توسط راگب^{۲۲} (۱۹۵۸) ارائه شد، نقش عمده ای در توسعه معادله کوریل داشت. معادلات راگب، از بسط مجانب هندسی برای جریان رواناب و سیالات استفاده می کرده اند که با معادلات زیر اثبات می شدند:

$$Q = Q_0 \left[1 - \sqrt{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\zeta}{2^{2/3}} \right) \right] + Q_i \left[1 - \frac{3^{3/4}}{\Gamma(1/4) \zeta^{3/2}} + \frac{3}{\sqrt{2\pi} \zeta} \exp(-\zeta^2) - \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{erfc}(\zeta) \right] \quad \zeta = \sqrt{3z}^{1/6}. \quad (۴)$$

$$Q = Q_0 \left[1 - \frac{2\psi^{1/6}}{\sqrt{3\pi}} \exp\left(-\frac{3}{2\psi^{1/3}}\right) \right] + Q_i \left[1 - \frac{(\psi/2)^{1/4}}{\Gamma(1/4)} \right] \quad \psi = \frac{32t}{\gamma^2} \quad (\text{معادله ۵})$$

که در آن Q_0 شرایط جریان قبلی در مجرا است که مؤلفه شارش موضعی متمرکز (سریع) را نشان می دهد و Q_i سهم جریان قبلی ماتریس است که مؤلفه شارش منتشر (آهسته) را نشان می دهد و \exp یک تابع نمایی تعریف می شود. به دلیل پیچیدگی این معادلات از بسط مجانب و اثبات معادله کوربل از آن ها در این مقاله، صرف نظر شده و به همین میزان، بسنده شده است. معادله کوربل برای تعیین میزان تهی سازی و فرسایش بسترهای آهکی در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته و به شرط وجود بستر تماما آهکی، نتایج قابل قبول و مشابه کانیون آبشار رودممعجن، بدست آمده است. به عنوان نمونه گزارشات پیرامون تعیین نرخ فرسایش گرند کانیون در انجمن زمین شناسی آمریکا که توسط واین و همکاران ۲۳ (۲۰۱۸) انجام شده است.

نتیجه گیری

کانیون آبشار رودممعجن در شهرستان تربت حیدریه، یکی از عوارض زمین شناختی شاخص شمال شرق زون ایران مرکزی است که بر روی آهک های کرتاسه پایینی، حاوی فرامینیفیرهای اوربیتولینا (بارمین - آلبین)، شکل گرفته و از اوایل کواترنری، تغییر شکل عمده و فرسایش شدیدی در بستر آهکی آن رخ داده است. بخش های پرفسیل بیشتر در معرض فرسایش قرار گرفته و تخلخل مکانیکی سنگ را افزایش می دهند. سنگ های مصب کانیون آبشار رودممعجن از داخل رودخانه ای که بصورت گسلی و تحت عوامل تکتونیکی و فرسایش آبی ایجاد شده، مربوط به آهک های صخره سازی هست که با حضور فسیل های اوربیتولین های دارای سن کرتاسه پایینی (بارمین تا آلبین) در ایران مرکزی می باشد. منشا جریان آبی آن مربوط به ذخایر آب کارستی کواترنری ارتفاعات واقع در شمال رودممعجن بوده است. در این تحقیق با استفاده از معادله کوربل (۱۹۵۹) و به کمک مطالعات میدانی، نرخ فرسایش کانیون آبشار رود معجن و با توجه به آهک های بلورین بستر کانیون آبشار رودممعجن که دارای سن کرتاسه پیشین (بارمین-آپتین) می باشند، نرخ فرسایش این کانیون را می توان با روش کوربل برابر با عدد ۱۸۸٫۱۴ میلی متر بر هزار سال برآورد کرد، که با ارتفاع سنجی رواناب بر حسب دسیمتر در فصول چهارگانه سال و انجام آزمایش شیمیایی تعیین میزان CaCO_3 محلول در آب بر حسب میلی گرم در لیتر، صورت می گیرد. با توجه به شرایط تکتونیکی و گسلی منطقه، پیدایش این کانیون را می توان متأثر از عوامل تکتونیکی- گسلی و هم زمان، فرسایش آبی دانست.

منابع

- اشرف، ط.، میراب شبستری، غ. و اعتباری، ب.، (۱۳۹۲). بررسی تأثیر ویژگیهای سنگ شناسی بر توسعه عوارض کارستی در واحدهای سنگی کربناته رشته کوه شتری، شرق ایران. رخساره‌های رسوبی، ۶(۱)، ۱-۱۸.
- امین داور، س.، (۱۴۰۰). زمین شناسی، پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز گرانیتوئیدهای منطقه رودمعجن (شمال سلطان آباد- تربت حیدریه) (پایان نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه فردوسی مشهد.
- بهروزی، ا.، (۱۳۶۶). گزارش نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰: فیض آباد. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رضائی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م. ع.، بهنیافر، ا. و جوانبخت، م.، (۱۳۹۸). محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با استفاده از تکنیک های تجربی و آزمایشگاهی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۳۱(۸)، ۶۴-۷۹.
- رضائی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م. ع.، بهنیافر، ا.، جوانبخت، م.، (۱۳۹۹). شناسایی درجه کارستی شدن حوضه کوهستانی کلات در شمال شرق ایران. فضای جغرافیایی، ۲۰(۷۱)، ۴۹-۷۴.
- ریاحی، ن.، صادقی، ع.، آدابی، م. ح.، کامیابی شادان، ح.، (۱۴۰۰). بایوستراتیگرافی سازند تیرگان در برش های چینه شناسی نایا-رباط عشق جنوب غرب بجنورد) و قزل قان (شمال بجنورد) و مقایسه آنها با یکدیگر. فصلنامه زمین شناسی ایران، (۵۷) ۱۵، ۱۳۳-۱۴۱.
- سپه وند، ع.، نظری سامانی، ع.، محمدیان، ه.، احمدی، ح. و فیض نیا، س.، (۱۳۹۹). تغییرات فصلی بار رسوب انحلالی و تعیین سرعت انحلال پذیری سازندهای آهکی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز خرم آباد، الشتر و پیرانشهر). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۴(۴۸).
- قهفرخی، س.، رضابوریان، احمدی، م. و قادری، ک.، (۱۳۹۹). مدل ریاضی محاسبه نرخ فرسایش دیواره رودخانه مطالعه موردی: رودخانه زاینده رود. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، (۴۰).
- کریمی وردنجانی، ح.، (۱۳۹۴). هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی کارست (ویرایش دوم، ج ۱-۱). انتشارات ارم شیراز.
- مدرسی، ف.، (۱۳۹۸). ثبت ملی آبشار رود معجن تربت حیدریه
<https://www.irna.ir/news/83466498>
- یزدانی، م.، (۱۴۰۱). تعیین نرخ فرسایش مورفولوژیک کانیون آبشار رودمعجن بر اساس معادله کوربل. پنجمین همایش ملی کواترنری ایران، ۷ اسفند ۱۴۰۱.
- Adams, C.S., Swinnerton, A.C., (1937). Solubility of limestone. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18(2), 504-508.
- Berner, R.A., (1978). Equilibrium, kinetics, and the precipitation of magnesian calcite from seawater; discussion. *American Journal of Science*, 278(10), 1475-1477.
- Corbel, J., (1959). Erosion en terrain calcaire (vitesse d'érosion et morphologie). *Annales de géographie*, 68(366), 97-120. <https://doi.org/10.3406/geo.1959.16541>
- Dreybrodt, W., (1998). Limestone dissolution rates in karst environments. *Limestone Dissolution Rates in Karst Environments*, (16), 167-183.
- Dreybrodt, W., (1981). Mixing corrosion in CaCO₃/1bCO₂/1bH₂O systems and its role in the karstification of limestone areas. *Chemical Geology*, 32(1), 221-236. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(81)90145-5)
- Fairbridge, R., (1968). Corrosion, etching, Springer Link. Retrieved February 21, 2024, from https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/3-540-31060-6_69
- Ford, D., Williams, P., (2013). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Publisher John Wiley & Sons, 576 p.
- Gabrovšek, F., (2009). On concepts and methods for the estimation of dissolutional denudation rates in karst areas. *Geomorphology*, 106(1-2), 9-14.

- Gombert, P., (2002). Role of karstic dissolution in global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 33(1-2), 177–184.
- Gregory, J. W., (1911). *The Terms Denudation, Erosion, Corrosion and Corrasion on* JSTOR. Retrieved February 21, 2024, from <https://www.jstor.org/stable/1777908>
- Groom, G.E., Williams, V.H., (1965). The solution of limestone in South Wales. *The Geographical Journal*, 131(1), 37–41.
- Gunn, J., (1981). Prediction of limestone solution rates from rainfall and runoff data: some comments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6(6), 595–597.
- Jakucs, L., (1970). The role of climate in the quantitative and qualitative control of Karstic corrosion. *Acta Geographical Journal*, 10(1), 8.
- Klimchouk, A., Cucchi, F., Calaforra, J., Aksem, S., Finocchiaro, F., & Forti, P., (1996). Dissolution of gypsum from field observations. *International Journal of Speleology*, 25 (3). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.25.3.3>
- Ragab, F.M. (1958). The inverse Laplace transforms of an exponential function. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 11(1), 115–127.
- Shroder, J.F., (2013). *Treatise on Geomorphology*. Academic Press.
- Suchet, P., Amiotte, Probst, J.L., (1995). A global model for present-day atmospheric/soil CO₂ consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO₂). *Tellus B*, 47(1-2), 273–280.
- Winn, C., Karlstrom, K., Kelley, S., 2018. Timing and geometry of the ‘great denudation’ of the grand staircase of the southern Colorado Plateau from combined geological and Apatite thermochronologic data. *Geological Society of America*, 50., 5. doi: 10.1130/abs/2018RM-314309.
- <https://www.google.com/maps>, 2024