

## ارزیابی انحلال‌پذیری و توسعه کارست در افق‌های مختلف مقطع تیپ سازند ایلام

مهرداد امیری<sup>۱</sup>، غلامرضا لشکری‌پور<sup>۲\*</sup>، ناصر حافظی‌مقدس<sup>۲</sup> و محمدحسین قبادی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲ و ۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

نویسنده مسئول: lashkaripour@um.ac.ir \*

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۸

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

### چکیده

کارست در سنگ‌آهک‌ها به دلیل قابلیت انحلال‌پذیری زیاد به آسانی توسعه پیدا می‌کند. فراوانی سنگ‌های آهکی سبب شده تا در پروژه‌های مختلف مهندسی با این نوع سنگ‌ها مواجه باشند. سازند ایلام از جمله سازندهایی است که در ارتفاعات زاگرس گسترش زیادی دارد و در برش نمونه شامل ۱۹۵ متر سنگ‌آهک کرم‌رنگ است. با توجه به گستردگی این سازند پروژه‌های زیادی بر روی این سازند اجرا شده و در حفاری‌های نفتی هم با این سازند برخورد دارند. مرز پایینی آن با سازند سورگه و مرز بالایی آن با سازند گورپی به صورت پیوسته است. در این پژوهش با استفاده از مطالعات سنگ‌شناسی و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ‌آهک سازند ایلام در مقطع تیپ، انحلال‌پذیری و گسترش کارست بررسی گردیده است. به منظور ارزیابی انحلال‌پذیری سازند ایلام، از افق‌های مختلف سازند نمونه‌برداری انجام شد و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، ترکیب شیمیایی، ویژگی‌های مهندسی و انحلال‌پذیری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج XRD نشان می‌دهد که کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه شامل: کوارتز، کربنات کلسیم، کانی‌های رسی و مقدار اندکی دولومیت در نمونه‌ها می‌باشد. نتایج XRF نمونه‌ها نشان می‌دهد که عمده اکسیدهای تشکیل‌دهنده  $\text{CaO}$ ،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{MgO}$  می‌باشد. همچنین براساس آزمایش کلسیمتری و XRF موجود افق‌های E و F بیشترین مقدار کربنات کلسیم را دارا است و تفاوت انحلال‌پذیری در افق‌های مختلف سازند را نشان می‌دهد به این صورت که افق F بیشترین ثابت سرعت انحلال را دارد. پدیده‌های کارستی همچون فروچاله، کارن، حفرات انحلالی، کانیون، غار، جاماها، تنگه و کارن چاله باران در منطقه و سازند مورد مطالعه وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** خصوصیات سنگ‌شناسی، خصوصیات فیزیکی، انحلال‌پذیری، سنگ‌آهک، سازند ایلام

### ۱- پیشگفتار

جمله ویژگی‌هایی هستند که در درازمدت، به‌ویژه در صورت برقراری شرایط مناسب می‌توانند تأثیرات بسیار زیان باری را در سازه‌های سطحی و زیرسطحی ایجاد نمایند. انحلال باعث ایجاد پدیده‌ای به نام کارست می‌شود. انحلال‌پذیری در مفهوم دقیق آن به مقدار ماده‌ای اطلاق می‌گردد که قادر است تحت شرایط تعادلی خاصی از درجه حرارت و فشار در یک حلال، حل شود. انحلال‌پذیری یک ماده متأثر از ترکیب کل سیستم می‌باشد که ممکن است شامل فازهای جامد، آب اولیه باشد. در ارتباط با انحلال‌پذیری مواد، قانون فاز گیبس<sup>۱</sup>، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قانون یک اصل شیمیایی می‌باشد که به‌طور کامل در کتب اختصاصی شیمی توصیف شده است و توضیح بیشتر در رابطه با آن از حوصله این بحث خارج

سنگ‌های کربناته فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی ایران می‌باشند و در بسیاری از پروژه‌های عمرانی نقش مهمی دارند. این سنگ‌ها عمدتاً جزو سازندهای مسئله‌ساز محسوب می‌گردند (قبادی و امیری، ۲۰۱۸). احداث سازه‌های سطحی و زیرسطحی در این‌گونه سازندها دارای پتانسیل بالای مشکلات ژئوتکنیکی و اجرایی بوده و بعضاً موجبات عواقب بسیار دشواری چه در زمان اجرا و چه در زمان بهره‌برداری می‌گردند. پاره‌ای از این خصوصیات، ویژگی‌هایی هستند که در مدت‌زمان کوتاه قابل آزمایش بوده، مانند: ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی که اثرات آن‌ها در سازه‌ها قابل مشاهده و چاره‌جویی است. اما برخی از ویژگی‌ها وابسته به زمان این‌گونه مصالح، مانند انحلال از

<sup>1</sup> Gibbs phase

k ثابت سرعت انحلال برحسب  $\text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  و R نرخ انحلال کانی است. بررسی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌آهک در pHهای مختلف اسیدی و قلیایی توسط سینک و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که مقدار pH تأثیر مهمی بر روی ویژگی‌های مهندسی دارد. رمانف و همکاران در سال ۲۰۰۳ مدلی برای محاسبه زمان لازم برای پیشرفت پدیده کارست، تا رسیدن به مرحله بحرانی ارائه دادند. مدل طراحی شده، پدیده کارستی شدن در زیر یک سد را به‌وسیله ارتباط عریض شدگی انحلالی با جریان هیدرودینامیکی موجود نمایش می‌داد.

قبادی و کرمی (۲۰۰۹) به بررسی پدیده فرار آب از تکیه‌گاه چپ سد خاکی مارون پرداختند. در این پژوهش به منظور ارزیابی وضعیت تراوش و شرایط کارستی شدن آزمایش‌های انحلال‌پذیری، XRD و XRF انجام شد. نتایج حاصله نشان داد که نقش هیدروژن‌لوژیکی درزه‌های اصلی عمود بر ساختمان‌های زمین‌شناسی محل، نوع مواد پرکننده درزه‌ها و ترک‌های بین لایه‌ای در توسعه کارست و افزایش تراوش چشم‌گیر است. سلیمی (۲۰۰۹) به بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های جنوب و جنوب شرق استان همدان پرداختند. آن‌ها آزمایش انحلال‌پذیری بر روی سنگ‌های آهکی مذکور انجام دادند و ثابت سرعت انحلال‌پذیری آن‌ها را در سه pH مختلف تعیین کردند. با توجه به امکان ارتباط سنگ‌های آهکی مذکور با سازه‌های هیدرولیکی بزرگ، در ادامه به بررسی و انجام آزمون آبگذری درزه‌ها پرداختند. نتایج آزمون‌های آبگذری درزه نشان داد که سرعت بازشدگی در درزه‌های قائم بیشتر از درزه‌های افقی می‌باشد. همچنین نتیجه‌گیری کردند که تغییرات pH آب باعث تغییر روند بازشدگی درزه‌ها می‌گردد. در سال ۲۰۱۵ قبادی و همکاران به بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک در سازندهای ایلام و سروک در منطقه خرم‌آباد پرداخته‌اند. در این پژوهش بیان داشتند که محیط تشکیل اکثر سنگ‌های آهکی بررسی‌شده عمیق بوده است. سنگ‌آهک‌های ایلام- سروک سخت‌شدگی زیاد و تخلخل کم دارند و دانسیته متوسط تا زیاد دارند. سنگ‌های مذکور از دیدگاه دوام‌پذیری در رده خیلی مقاوم قرار می‌گیرند. مقاومت تراکمی تک‌محوری آن‌ها متوسط تا زیاد است. از لحاظ تراوایی سنگ‌های بکر نفوذناپذیر هستند. با توجه به رده‌بندی مهندسی سنگ بکر سنگ‌آهک‌های ایلام- سروک

می‌باشد (جیمز و کرک پاتریک، ۱۹۸۰). وجود کانی‌های انحلال‌پذیر در محل پروژه‌ها و سازه‌های هیدرولیکی در طولانی مدت می‌تواند خطر نشت آب از مخزن سد را همراه داشته باشد. بنابراین تعیین مقدار و سرعت انحلال این کانی‌ها ضروری می‌باشد. فرایند انحلال کانی‌ها در آب نقش بسیار مهمی را در ارزیابی سیستم‌های ژئوشیمیایی ایفا می‌کند. بنابراین برای مشخص شدن ارتباط میان نرخ انحلال و ترکیب شیمیایی آب، ارزیابی انحلال‌پذیری کانی‌ها در آزمایشگاه ضروری به نظر می‌رسد. دستگاه سیرکولاسیون انحلال در سال ۱۹۷۸ توسط جیمز و لاپتون طراحی شد. هم‌چنین دستگاه سیرکولاسیون انحلال به روش آشفته (سرعت جریان آب عبوری قابل تنظیم) در سال ۱۹۸۱ توسط آن‌ها ساخته شد (جیمز، ۱۹۹۲؛ ترابی‌کاوه و حیدری، ۲۰۱۱). انحلال‌پذیری سنگ‌های با قابلیت انحلال و نشست دو مشکل اساسی در بسیاری از پروژه‌ها است. یکی از مسائل مهم، تعیین مناطق کارستی است که باید جوانب قضیه و مخاطرات ناشی از پدیده کارستی از جمله درجه انحلال‌پذیری را در نظر گرفت. تجربه نشان داده است که پدیده‌های بحرانی زمین‌شناسی موجب بروز مشکلات فراوانی در برخی پروژه‌ها و برخی سدها شده است که بیشتر این پدیده‌ها در مناطق کارستی به دلیل وجود تخلخل و شکستگی‌های ناشی از انحلال سنگ‌هایی همچون سنگ‌آهک، دولومیت، ژپس و انیدریت و... است (نوری سرتنگی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین برای بررسی دقیق مطالعات زمین‌شناسی نیاز به تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها، حفاری‌ها و گمانه‌ها، ترانسه‌ها و ... است بنابراین لازم است که سنگ‌های کربناته و تبخیری از نظر انحلال‌پذیری مطالعه شوند و همیشه سعی شود که مخاطرات ناشی از عوامل انحلال‌پذیر و همچنین دسته‌بندی مخاطرات در ارتباط با شرایط محل آن‌ها همچون انحلال‌پذیری، فرسایش، تغییر شکل‌پذیری، اثر تخلخل و... بررسی شود و راهکارهای مثبتی در پیش گرفته شود (نوری سرتنگی و همکاران، ۲۰۱۷).

ساده‌ترین معادله خطی مربوط به انحلال سنگ را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد (ترابی‌کاوه و حیدری، ۲۰۱۱).

$$R = K \left[ 1 - \frac{C}{C_{eq}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه C غلظت یون مورد نظر در محلول،  $C_{eq}$  غلظت تعادلی (غلظت در حالت اشباع) برحسب  $\text{mol/cm}^3$

است که بهترین کارست‌ها در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها تشکیل می‌شود. زروش و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاق‌دیس کبیرکوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سنجش از دور و GIS پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی و یافته‌های دیگر هفت پارامتر به‌عنوان عوامل مؤثر بر توسعه کارست در منطقه در نظر گرفته شد که نتایج حاصل به‌صورت نقشه‌ای با سه کلاس توسعه کارست: خوب، متوسط، ضعیف ارائه گردید. نتایج نشانگر آن است که سنگ‌شناسی منطقه مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پتانسیل توسعه کارست در منطقه می‌باشد. همچنین مناطق دارای شکستگی در سازندهای آهکی منطقه از جمله آسماری، سروک، ایلام و تا حدودی در مرز سازندها می‌باشد. با هم‌پوشانی چشمه‌های منطقه با نقشه پتانسیل توسعه کارست مشاهده شد که بیشتر چشمه‌ها در مناطق با توسعه کارست خوب واقع شدند که این صحت مدل را تأیید می‌کند. بعضی از چشمه‌ها در مناطق با توسعه کارست ضعیف قرار می‌گیرند که اغلب این چشمه‌ها دبی قابل توجهی ندارند. بیشتر چشمه‌های منطقه در ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متر و در محل تماس سازندهای نفوذپذیر با سازندهای نفوذناپذیر رخنمون دارند که بررسی‌های صحرائی نیز این مطلب را تأیید می‌کند. به‌علاوه بیشترین توسعه کارست در سازندهای آهکی آسماری، ایلام-سروک رخ داده است که با سنگ‌شناسی این سازندها همخوانی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی توسعه کارست در تاق‌دیس کبیرکوه، پارامتر سنگ‌شناسی می‌باشد. قبادی و امیری (۲۰۱۸) بر روی خصوصیات ژئومورفولوژیکی کارست در منطقه حسن‌آباد مبارکه اصفهان پژوهشی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که ناپیوستگی‌های فراوان در منطقه، شرایط آب و هوایی، نوع اقلیم (نیمه‌خشک شدید) ناحیه و فراوانی پدیده‌های ژئومورفولوژیکی بر توسعه کارست در منطقه دلالت دارد. موسوی مداح (۲۰۲۰) خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های کربناته منطقه گلول و سرانی شمال شیروان را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که تأثیر تغییرات دما بر انحلال‌پذیری سنگ‌آهک بیشتر از دولومیت است. همچنین در نمونه‌های با بافت دانه پستیبان، تأثیر pH بر افزایش انحلال‌پذیری بیشتر است.

در رده‌ی CM و CL قرار می‌گیرند. آزمایش انحلال‌پذیری سنگ‌آهک در سه سیکل ۵/۵ تا ۶، ۶ تا ۶/۵ و ۶/۵ تا ۷ انجام گردید که به طور متوسط ثابت سرعت انحلال سنگ‌آهک منطقه برابر با  $1.39 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه محاسبه شده است. همچنین نتایج سنگ‌شناسی نشان داد با کاهش اندازه ذرات در سنگ‌های آهکی، میزان مقاومت تراکمی تک‌محوری به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. حیدری و طالب‌بیدختی (۲۰۰۳) به بررسی انحلال‌پذیری سنگ‌های کربناته حاشیه نیروگاه شهید مفتاح همدان پرداختند. مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که این مناطق دارای پتانسیل بالایی برای ایجاد فروچاله‌های بزرگ می‌باشند. تعدادی نمونه‌های مکعبی با ویژگی‌های خاص به منظور تعیین پتانسیل انحلال‌پذیری پیوسته و فزاینده سنگ‌های کربناته در دمای ثابت و pH های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که ثابت سرعت انحلال‌پذیری ( $K_c$ ) در منطقه مورد مطالعه بیشتر از سنگ‌های کربناته محل سد لار و منطقه غار علیصدر شهرستان همدان است.

مقصودی و همکاران (۲۰۱۵) نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی، حوضه سیف‌آباد لاغر اقدام کردند. در این مطالعه شاخص‌هایی که برای پهنه‌بندی میزان انحلال کارست در منطقه مورد استفاده قرار گرفتند شامل بارش، دما، تراکم فروچاله‌ها، فاصله از فروچاله‌ها، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه‌ها، تراکم گسل، فاصله از گسل و شیب می‌باشد. در پژوهش ذکر شده به این نتیجه رسیدند که در مناطق کارستی، پراکندگی و نظم فروچاله‌ها با درزه‌های اصلی در ارتباط است لذا تراکم فروچاله‌ها از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی برای سنجش میزان کارستی‌شدن منطقه است. بر همین اساس، با کاهش فاصله از این عوارض، احتمال کارستی‌شدن نیز افزایش می‌یابد. تراکم شبکه زهکشی و فاصله از آبراهه از آن‌رو اهمیت دارد که تراکم بیشتر شبکه زهکشی، آب بیشتری برای انجام فرایند انحلال فراهم می‌سازد و فاصله از آبراهه نیز همین نقش را در جهت معکوس ایفا می‌کند. همچنین، با افزایش تعداد گسل در مناطق کارستی، درز و شکاف بیشتری در این سازندها ایجاد شده که این درز و شکاف‌ها به‌نوبه خود سبب تماس بیشتر آب با سنگ‌های کارستی شده و احتمال کارستی شدن را بیشتر می‌کند و همچنین به اثبات رسیده

سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام تحت عنوان گروه بنگستان معرفی شده‌اند که نام آن از کوه بنگستان در شمال بهبهان گرفته شده است. سازند ایلام در این گروه دارای دو رخساره ژرف و کم‌ژرفا می‌باشد. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره ژرف است، در پایانه شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری شهرستان ایلام اندازه گیری شده است. در این برش سازند ایلام شامل ۱۹۵ متر سنگ‌آهک‌های رسی دانه‌ریز پلاژیک خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و میان لایه‌های نازک شیل، به سن سانتونین-کامپانین است. رخساره کم‌ژرفای ایلام در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارد که شامل سنگ‌آهک‌های قلوهای است که همچنان سن سانتونین و کامپانین دارد. در برخی نقاط می‌توان ارتباط بین انگشتی دو رخساره پلاژیک و کم‌ژرفای سازند ایلام را مشاهده نمود. برش نمونه این سازند که معتبر شناخته می‌شود، در تنگ گراب واقع در یال جنوب باختری کوه سورگاه و شمال باختری کبیرکوه انتخاب و اندازه‌گیری شده است. مختصات قاعده برش نمونه "N: 33° 35' 09" و "E: 46° 19' 06" می‌باشد. مرز پایینی آن با سازند سورگاه و مرز بالایی آن با سازند گورپی به صورت پیوسته است (بخشنامه و همکاران، ۲۰۱۴). در شکل ۱ نقاط نمونه‌برداری شده از سازند ایلام همچنین وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش بررسی‌های کتابخانه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات موجود در رابطه با سنگ‌های کربناته در منطقه ایلام انجام گردید. به‌منظور شناسایی اشکال کارستی در آهک‌های سازند ایلام در مقطع تیپ ابتدا مطالعات صحرایی شامل شناسایی پدیده‌های مورفولوژیکی کارست، درزه‌برداری از منطقه انجام گرفت. طی بازدیدهای صحرایی، نمونه‌برداری صورت گرفته است. به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و انحلال‌پذیری سنگ‌آهک سازند ایلام، تعداد ۶۰ بلوک مناسب به ابعاد تقریبی ۴۰×۴۰×۳۰ سانتی‌متر مکعب تا ۵۰×۵۰×۴۰ سانتی‌متر مکعب از سازند انتخاب و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه انتقال داده شد. از نمونه‌های سنگی جمع‌آوری شده، تعدادی مغزه استوانه‌ای به قطر ۵۴/۷ میلی‌متر تهیه و آزمایش‌های فیزیکی و

افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نسبت به تغییرات دما تأثیر بیشتری در انحلال‌پذیری نمونه‌ها دارد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که نمونه‌های تهیه شده از عمق ۴۰-۵۵ و ۱۴۵-۱۷۵ متر بهترین شرایط برای تشکیل و توسعه کارست فراهم می‌کنند. محمدیان (۲۰۲۱) به بررسی ارتباط خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی با توسعه کارست در ژیبس‌های سازند گچساران و آهک‌های سازند آسماری در حوضه آبریز جراحی- زهره شرق استان خوزستان پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که بافت بیشترین تأثیر را بر روی خصوصیات مهندسی ژیبس دارد. در سال ۲۰۲۰ هو و همکاران پژوهشی بر روی پارامترهای مکانیکی آهک‌های حفره‌دار انجام دادند. خصوصیات مکانیکی و تخلخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. آن‌ها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت اشباع و رطوبت طبیعی با افزایش تخلخل سنگ‌آهک کاهش می‌یابد.

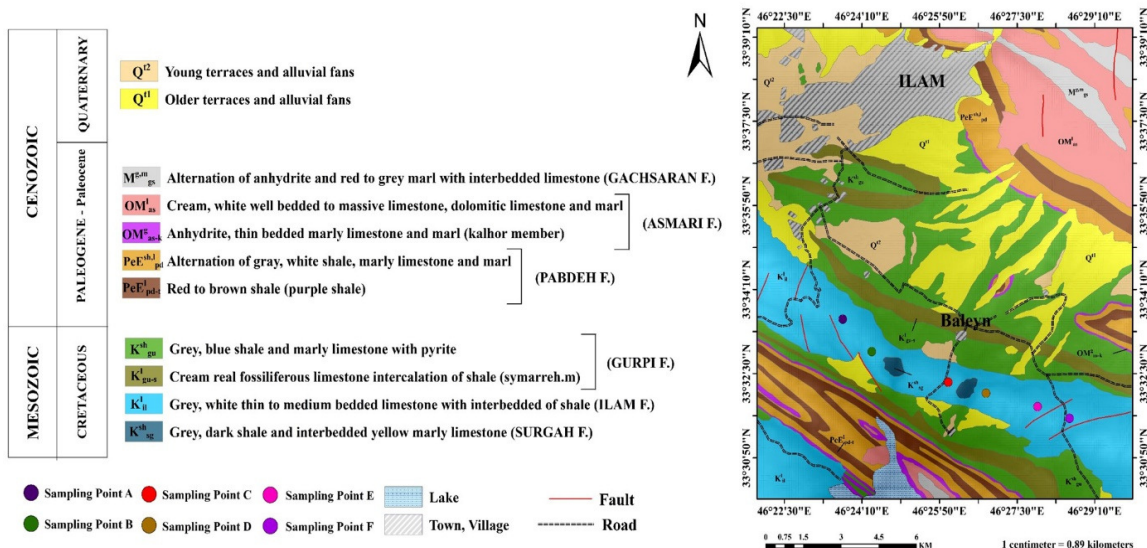
هدف از این پژوهش، مطالعه خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های مهندسی و انحلال‌پذیری سنگ‌آهک سازند ایلام در مقطع تیپ می‌باشد همچنین توسعه کارست و وجود اشکال کارستی در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. تاکنون پژوهشی بر روی خصوصیات مهندسی و انحلال‌پذیری این برش از سازند ایلام صورت نگرفته است.

### ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

یکی از سازندهای مهم حاوی لایه‌های سنگ‌های کربناته در ایران سازند ایلام است. این سازند که عمدتاً از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است، از سنگ‌های مولد هیدروکربن جنوب باختر ایران است. از اجزای بسیار مهم و کلیدی سنگ‌های آهکی ایلام روزنبران پلانکتونیک هستند. سازند ایلام به‌عنوان سنگ مخزن هیدروکربنی، در بسیاری از مناطق نفت‌خیز جنوب ایران، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حوضه رسوبی زاگرس که در جنوب و جنوب غرب ایران قرار دارد. منابع عظیم نفت و گاز را در خود جای داده است. نبود فعالیت‌های آذرین، وجود سنگ مادر متعدد و بسیار غنی از مواد آلی، سنگ مخزن متخلخل و تراوای زیاد با سنگ‌پوش‌های مناسب شرایط منحصر به فردی را برای تولید و انباشت هیدروکربن در زاگرس فراهم کرده است، به‌طوری‌که این حوضه رسوبی از نفت‌خیزترین حوضه‌های دنیا می‌باشد. توالی‌های آلبین تا کامپانین این حوضه به نام

آزمایش XRF، ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و انحلال‌پذیری برای سنگ‌های کربناته انجام شد. در نهایت ارتباط بین ویژگی‌های لیتولوژیکی، فیزیکی و مکانیکی و توسعه کارست مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مکانیکی مطابق با دستورالعمل ASTM و ISRM بر روی آن‌ها انجام شده است. در راستای این پژوهش، پس از نمونه‌برداری از منطقه مورد مطالعه و تهیه مغزه از نمونه‌های بلوکی خصوصیات سنگ‌شناسی، آزمایش XRD



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی و نقاط نمونه‌برداری شده (امیری و همکاران، ۲۰۲۳)

Fig.1. Geological map and sampling points (Amiri et al., 2023)

جدول ۱. مطالعه مقاطع نازک سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند

Table 1. Study of photomicrographs of limestone in different horizons of the formation

انرژی	نوع تخلخل	محیط	نام براساس طبقه‌بندی دانه‌ها (۱۹۶۲)	افق سنگ آهک
کم	درون‌دانه‌ای	دریای باز	پلانکتونیک فرامینیفر با یوکلاست و کستون	A
کم	بین‌دانه‌ای - درون‌دانه‌ای	دریای باز	پلانکتونیک فرامینیفر با یوکلاست و کستون	B
کم - متوسط	بین‌دانه‌ای - درون‌دانه‌ای	دریای باز	با یوکلاست پلانکتونیک فرامینیفر و کستون - پکستون	C
کم - متوسط	بین‌دانه‌ای - درون‌دانه‌ای	دریای باز	با یوکلاست پلانکتونیک فرامینیفر و کستون - پکستون	D
متوسط	بین‌دانه‌ای - درون‌دانه‌ای	دریای باز	با یوکلاست پکستون	E
متوسط	بین‌دانه‌ای	دریای باز	با یوکلاست پلانکتونیک فرامینیفر و کستون	F

#### ۴-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی

##### ۴-۲-۱- خصوصیات فیزیکی

هر نوع سنگ با توجه به منشأ و فرایندهای متداول زمین‌شناسی که در طول زمان بر روی آن رخ داده است، دارای خصوصیات خاص به خود است. خصوصیات فیزیکی به‌وسیله آزمون‌های آزمایشگاهی طبق استاندارد (ISRM, 2007) تعیین شده‌اند. این ویژگی‌ها شامل وزن واحد حجم (γ)، درصد جذب آب (Iv%)، درصد تخلخل (pn%)، نسبت پوک (e) و وزن مخصوص قسمت جامد (Gs) است. خواص فیزیکی سنگ بکر به بافت و ریزساختارهای آن بستگی دارد. این ریزساختارها شامل مرز دانه‌ها،

#### ۴-۱- مطالعات سنگ‌شناسی

در این پژوهش از افق‌های سازند آهکی سازند ایلام برش‌های نازک میکروسکوپی تهیه گردید. مطالعه کانی‌شناسی سنگ‌های آهکی انجام شد. مقاطع نازک نشان داد که این سنگ‌های آهکی از با یوکلاست و فسیل‌های پلاژیک فرامینیفر در زمینه میکرایت تشکیل شده است و مقاطع نازک میکروسکوپی بر اساس طبقه‌بندی دانه‌ها (۱۹۶۲) نام‌گذاری شدند. نتایج بررسی مقاطع (انرژی، محیط، نام سنگ و نوع تخلخل) در جدول ۱ و تصاویر مقاطع در شکل ۲ آورده شده است.

رده‌بندی ارائه شده توسط آنون (۱۹۷۹)، وزن واحد حجم در رده سنگ‌هایی با چگالی پایین تا بالا و تخلخل در رده خیلی پایین تا پایین قرار دارد.

شکست و رخ می‌باشد. ریزشکست‌ها بر روی مقاومت و جهت شکست سنگ تأثیر می‌گذارد (شلیبی و همکاران، ۲۰۰۷). در جدول ۲ نتایج خصوصیات فیزیکی و تعداد نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است. براساس

جدول ۲. نتایج آزمون‌های خواص فیزیکی نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند

Table 2. The results of physical properties of limestone samples in different horizons of the formation

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ آهک	
								پارامتر	واحد
۶۰	۲۵/۵۱	۲۵/۱۹	۲۶/۰۳	۲۵/۷۶	۲۵/۵۵	۲۱/۶۷	حداقل	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	
	۲۶/۴۹	۲۶/۴۰	۲۶/۳۹	۲۶/۱۸	۲۶/۰۲	۲۴/۸۵	میانگین		
	۲۷/۲۷	۲۷/۸۳	۲۶/۸۰	۲۶/۷۶	۲۶/۵۷	۲۶/۸۶	حداکثر		
	۰/۶۴	۰/۹۶	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۸۹	Std error		
	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۴۶	۰/۳۷	۲/۰۰	Std deviation		
۶۰	۲۵/۵۳	۲۵/۲۰	۲۶/۰۵	۲۵/۷۹	۲۵/۵۷	۲۱/۶۸۶	حداقل	$\gamma_m$ (kN/m <sup>3</sup> )	
	۲۶/۵۶	۲۶/۴۲	۲۶/۴۱	۲۶/۲۰	۲۶/۰۶	۲۴/۸۷	میانگین		
	۲۷/۳۴	۲۷/۸۴	۲۶/۸۱	۲۶/۷۷	۲۶/۵۹	۲۶/۸۸	حداکثر		
	۰/۶۸	۰/۹۵	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۸۹	Std error		
	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۳۷	۲/۰۱	Std deviation		
۶۰	۲۵/۵۷	۲۵/۲۷	۲۶/۱۳	۲۵/۹۰	۲۵/۷۱	۲۱/۷۶	حداقل	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
	۲۶/۶۴	۲۶/۵۳	۲۶/۵۱	۲۶/۳۳	۲۶/۱۵	۲۴/۹۸	میانگین		
	۲۷/۳۹	۲۷/۹۸	۲۶/۸۶	۲۶/۹۱	۲۶/۶۶	۲۶/۹۷	حداکثر		
	۰/۷۰	۰/۹۷	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۹۱	Std error		
	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۲۴	۰/۴۴	۰/۳۷	۲/۰۳	Std deviation		
۶۰	۰/۶۴	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۷۰	حداقل	n (%)	
	۰/۹۹	۱/۳۱	۱/۳۸	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۳۳	میانگین		
	۱/۴۷	۱/۸۳	۱/۸۷	۲/۰۶	۱/۷۳	۲/۲۲	حداکثر		
	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲۵	Std error		
	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۵۶	Std deviation		
۶۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	حداقل	e	
	۰/۰۱۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	میانگین		
	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۲۸	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	حداکثر		
	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	Std error		
	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	Std deviation		
۶۰	۲/۶۱	۲/۶۵	۲/۶۸	۲/۶۶	۲/۶۴	۲/۲۲	حداقل	Gs	
	۲/۷۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۱	۲/۶۸	۲/۵۶	میانگین		
	۲/۸۰	۲/۷۹	۲/۷۴	۲/۷۷	۲/۷۳	۲/۷۶	حداکثر		
	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۹	Std error		
	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۳۱	Std deviation		
۶۰	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۲۹	حداقل	Iv (%)	
	۰/۳۵	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۵۱	میانگین		
	۰/۴۶	۰/۷۰	۰/۶۹	۱/۰۵	۰/۶۴	۰/۸۴	حداکثر		
	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۸	Std error		
	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۱۹	Std deviation		

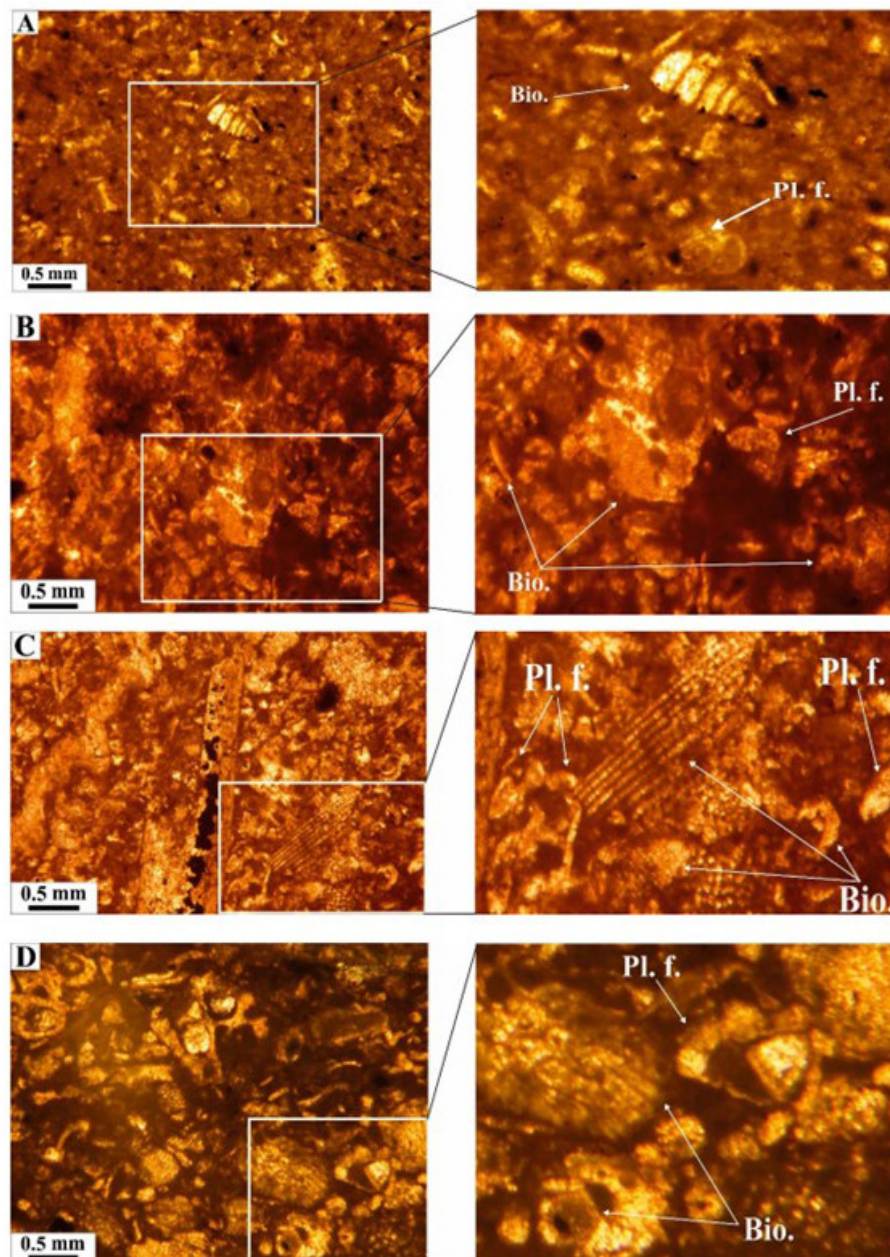
سنگ دارد. قابلیت وارفتگی سنگ‌ها و تأثیرپذیری آن‌ها از فرایندهای هوازگی از مسائل مهم می‌باشد (قبادی و همکاران، ۲۰۱۲؛ قبادی و همکاران، ۲۰۲۱). در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی اثر افزایش تعداد سیکل‌های تر و

#### ۴-۲-۲- دوام وارفتگی

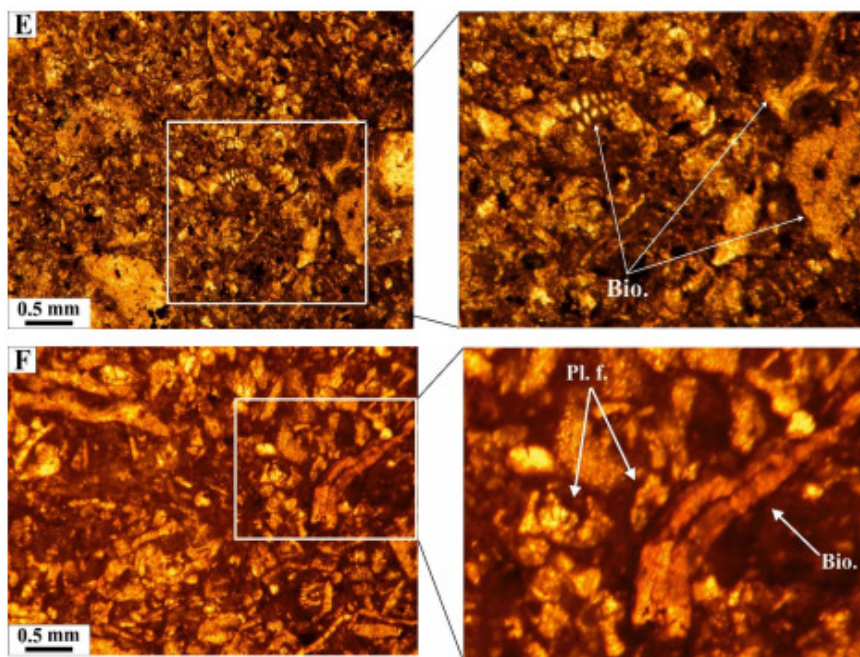
دوام وارفتگی (SDI) یکی از پارامترهای مهندسی مهمی در ارزیابی زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی است و ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های مکانیکی

مشاهده شد. نتایج آزمایش دوام وارفتگی در شکل ۳ و جدول ۳ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آهک‌های سازند ایلام از افق A به سمت افق F بیشترین شاخص دوام وارفتگی را دارند و افق A با دارا بودن شاخص دوام وارفتگی ۹۱/۷۶ درصد کمترین شاخص دوام را به خود اختصاص داده است و شاخص دوام وارفتگی این سنگ‌ها به‌صورت خطی با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد (جدول ۳).

خشک‌شدگی بر روی دوام سنگ‌آهک‌ها و پیش‌بینی رفتار درازمدت آن‌ها در طی فرایند هوازدگی، این آزمون در ۱۵ سیکل انجام شده است. گمیل (۱۹۷۱)، سنگ‌ها را بر اساس شاخص دوام دو مرحله‌ای و فرانکلین و چاندرا (۱۹۷۲)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله طبقه‌بندی کرده‌اند. در این آزمون شاخص دوام مطابق استاندارد ASTM D4644-87(1998) محاسبه و انجام شده است. با افزایش تعداد سیکل‌ها گردش‌دگی در نمونه‌ها



شکل ۲. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی از افق‌های سازند ایلام. اختصارات- Pl. f: پلانکتونیک فرامینیفرها، Bio: بایوکلاست  
**Fig. 2. Representation photomicrographs of the Ilam formations in the type section** Abbreviations: Pl. f: Planktonic foraminifera, Bio: Bioclast. for details see the descriptions in Table 1.



ادامه شکل ۲. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی از افق‌های سازند ایلام. اختصارات- Pl. f: پلانکتونیک فرامینیفرها، Bio: بایوکلاست  
 Fig. 2. Representation photomicrographs of the Ilam formations in the type section Abbreviations: Pl. f: Planktonic foraminifera, Bio: Bioclast. for details see the descriptions in Table 1.

جدول ۳. نتایج آزمایش دوام وارفتگی سنگ آهک‌های سازند ایلام

Table 3. The results of durability test of Ilam formation limestones

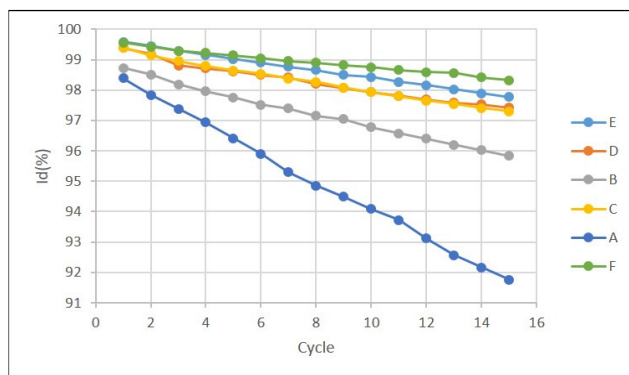
F	E	D	C	B	A	افق سنگ آهک
						پارامتر واحد
۹۹/۵۶	۹۹/۵۹	۹۹/۳۸	۹۹/۳۹	۹۸/۷۲	۹۸/۳۹	SDI <sub>1</sub> (%)
۹۹/۴۲	۹۹/۴۴	۹۹/۱۸	۹۹/۱۴	۹۸/۵۰	۹۷/۸۴	SDI <sub>2</sub> (%)
۹۹/۲۹	۹۹/۲۸	۹۸/۸۱	۹۸/۹۵	۹۸/۱۸	۹۷/۳۸	SDI <sub>3</sub> (%)
۹۹/۲۲	۹۹/۱۶	۹۸/۷۱	۹۸/۷۹	۹۷/۹۵	۹۶/۹۳	SDI <sub>4</sub> (%)
۹۹/۱۳	۹۹/۰۱	۹۸/۶۱	۹۸/۶۴	۹۷/۷۵	۹۶/۴۱	SDI <sub>5</sub> (%)
۹۹/۰۵	۹۸/۸۹	۹۸/۴۹	۹۸/۵۴	۹۷/۵۱	۹۵/۹۰	SDI <sub>6</sub> (%)
۹۸/۹۵	۹۸/۷۷	۹۸/۴۱	۹۸/۳۸	۹۷/۴۰	۹۵/۲۹	SDI <sub>7</sub> (%)
۹۸/۹۰	۹۸/۶۶	۹۸/۱۹	۹۸/۲۷	۹۷/۱۴	۹۴/۸۴	SDI <sub>8</sub> (%)
۹۸/۸۱	۹۸/۵۰	۹۸/۰۶	۹۸/۰۸	۹۷/۰۴	۹۴/۴۹	SDI <sub>9</sub> (%)
۹۸/۷۴	۹۸/۴۳	۹۷/۹۲	۹۷/۹۳	۹۶/۷۷	۹۴/۰۸	SDI <sub>10</sub> (%)
۹۸/۶۶	۹۸/۳۷	۹۷/۸۱	۹۷/۷۹	۹۶/۵۷	۹۳/۷۲	SDI <sub>11</sub> (%)
۹۸/۵۹	۹۸/۱۶	۹۷/۶۹	۹۷/۶۵	۹۶/۳۹	۹۳/۱۲	SDI <sub>12</sub> (%)
۹۸/۵۶	۹۸/۰۲	۹۷/۵۷	۹۷/۵۴	۹۶/۱۹	۹۲/۵۶	SDI <sub>13</sub> (%)
۹۸/۴۱	۹۷/۸۹	۹۷/۵۲	۹۷/۴۰	۹۶/۰۲	۹۲/۱۵	SDI <sub>14</sub> (%)
۹۸/۳۲	۹۷/۷۷	۹۷/۴۲	۹۷/۲۹	۹۵/۸۴	۹۱/۷۶	SDI <sub>15</sub> (%)

مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. در جدول‌های ۴ و ۵ خصوصیات مکانیکی آهک‌های سازند ایلام در دو حالت خشک و اشباع آورده شده است. کمترین مقاومت برای آهک‌های سازند ایلام مربوط به افق A می‌باشد و بیشترین مقاومت مربوط به افق F می‌باشد.

#### ۴-۲-۳- خصوصیات مکانیکی

در این مطالعه جهت مقایسه مقاومت نمونه‌ها از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش کشش برزلی استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها مطابق استاندارد (ISRM, 2007) تعیین شده است. از مهم‌ترین خصوصیات





شکل ۳. نتایج آزمایش دوام وارفتگی در ۱۵ سیکل بر روی سنگ آهک‌های مورد آزمایش

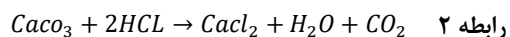
Fig. 3. The results of durability test on the tested limestones in 15 cycles

جدول ۴. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند در حالت خشک

Table 4. The results of mechanical properties of limestone samples in different horizons of the formation in dry condition

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ آهک	
								پارامتر واحد	واحد
۶۰	۹۶/۶۸	۸۹/۹۶	۷۸/۴۶	۷۶/۷۲	۷۹/۷۰	۷۵/۴۸	حداقل	UCS (MPa)	
	۱۰۷/۵۴	۱۰۲/۹۱	۱۰۱/۹۷	۱۰۰/۴۳	۱۰۰/۲۱	۸۹/۹۶	میانگین		
	۱۲۳/۰۸	۱۴۳/۷۳	۱۱۷/۸۹	۱۲۰/۴۸	۱۱۸/۹۱	۱۰۶/۵۶	حداکثر		
	۴/۲۸	۹/۱۶	۶/۳۷	۷/۱۲	۶/۶۶	۴/۶۴	Std error		
	۹/۵۹	۲۰/۵۰	۱۴/۲۵	۱۵/۹۳	۱۴/۹۰	۱۰/۳۸	Std deviation		
۶۰	۸/۸۳	۱۰/۴۹	۱۰/۴۹	۸/۸۸	۶/۴۸	۶/۳۶	حداقل	BTS (MPa)	
	۱۲/۷۲	۱۲/۴۶	۱۲/۳۵	۹/۷۸	۸/۲۹	۷/۹۶	میانگین		
	۱۵/۸۶	۱۳/۵۹	۱۳/۵۱	۱۱/۸۴	۱۰/۰۰	۸/۱۴	حداکثر		
	۱/۲۷	-۰/۵۱	-۰/۵۹	-۰/۴۸	-۰/۵۲	-۰/۸۰	Std error		
	۲/۸۵	۱/۱۶	۱/۳۳	۱/۰۹	۱/۲۷	۱/۹۶	Std deviation		
۶۰	۵/۵۳	۴/۵۶	۴/۶۲	۴/۳۳	۳/۵۱	۲/۵۴	حداقل	Isso (MPa)	
	۵/۸۹	۵/۵۴	۵/۱۸	۴/۶۳	۴/۵۰	۳/۹۳	میانگین		
	۶/۳۰	۷/۰۱	۵/۸۶	۶/۰۶	۵/۶۸	۴/۹۲	حداکثر		
	-۰/۱۲	-۰/۳۵	-۰/۱۸	-۰/۴۰	-۰/۳۲	-۰/۳۸	Std error		
	-۰/۲۷	-۰/۸۶	-۰/۴۴	-۰/۹۱	-۰/۷۳	-۰/۸۶	Std deviation		

منظور مقداری از سنگ را با دستگاه آسیاب پودر کرده و از الک ۱۰۰ مش عبور می‌دهیم، به طوری که تمام پودر از الک عبور کند و باقیمانده روی الک نماند. سپس ۱۲۰ گرم از آن را داخل ظرف بشر ریختیم و اسیدکلریدریک رقیق شده به غلظت ۱۰ درصد را به آرامی به پودرها اضافه کرده و با قاشق‌های مجزا آن را به هم زدیم. به این صورت کلسیم کربنات موجود در پودر سنگ‌ها با اسیدکلریدریک طبق رابطه ۲ واکنش می‌دهد و حذف می‌شود. براساس رابطه ۲ در اثر واکنش کربنات کلسیم با اسیدکلریدریک، گاز کربنیک تولید می‌گردد:



افزودن اسید را آن قدر ادامه می‌دهیم تا دیگر در اثر اضافه شدن اسید به محلول جوشش رخ ندهد. بعد از آن محلول

#### ۴-۲-۴- آزمون کلسیمتری جهت تعیین درصد کربنات کلسیم

درصد کربنات کلسیم از عوامل کنترل‌کننده انحلال‌پذیری سنگ‌های آهکی است و هرچه میزان کربنات کلسیم سنگ بالاتر باشد، قابلیت انحلال‌پذیری سنگ بالاتر است. به این منظور در این مطالعه با استفاده از آزمایش کلسیمتری، میزان کربنات کلسیم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای انجام این آزمایش از روش حذف کربنات کلسیم توسط محلول اسیدکلریدریک و مقایسه وزن باقیمانده با وزن اولیه استفاده شد. برای انجام بهتر واکنش کربنات کلسیم با اسید بهتر است از حالت پودر کربنات کلسیم به جای سنگ آن استفاده شود. زیرا به دلیل افزایش زیادتر سطح تماس واکنش به شکلی بهتر و سریع‌تر انجام خواهد شد. به این

رسوبات به آون انتقال داده شد تا رطوبت آن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شود. با اندازه‌گیری وزن رسوبات باقیمانده و بررسی اختلاف آن با پودر اولیه، درصد کربنات کلسیم سنگ مشخص می‌شود. نتایج آزمایش کلسیمتری در جدول ۶ نشان داده شده است.

ایجاد شده را در جایی آرام و بدون حرکت قرار دادیم تا به‌طور کامل ته‌نشین شود. با تخلیه محلول اسید بالایی سطح رسوبات باقیمانده به کمک سرنگ، کلسیم کلراید به وجود آمده در طی آزمایش از محیط خارج شده سپس با دقت بیشتر رسوبات باقیمانده را با آب مقطر و به همین روش ته‌نشینی ۳ بار شستشو دادیم. سپس بشرهای حاوی

جدول ۵. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند در حالت اشباع

Table 5. The results of mechanical properties of limestone samples in different horizons of the formation in saturation condition

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ آهک	
								پارامتر واحد	
۶۰	۵۷/۷۳	۶۵/۷۳	۶۰/۶۲	۵۵/۸۵	۵۰/۳۲	۴۶/۰۶	حداقل	UCS (MPa)	
	۷۷/۲۰	۷۴/۳۸	۶۸/۵۷	۶۸/۰۹	۶۲/۶۱	۶۰/۰۲	میانگین		
	۹۸/۹۰	۸۴/۵۵	۸۵/۴۴	۷۷/۱۰	۹۱/۱۱	۶۶/۲۴	حداکثر		
	۶/۳۹	۲/۸۹	۳/۸۷	۳/۶۳	۵/۵۴	۳/۳۱	Std error		
	۱۴/۳۹	۶/۴۷	۸/۶۶	۸/۱۳	۱۳/۵۷	۸/۱۱	Std deviation		
۶۰	۷/۰۶	۷/۶۰	۷/۳۷	۶/۴۹	۴/۱۱	۴/۲۲	حداقل	BTS (MPa)	
	۸/۴۳	۸/۳۹	۷/۸۶	۷/۶۱	۶/۰۶	۵/۰۵	میانگین		
	۹/۲۲	۹/۹۸	۸/۳۶	۹/۸۸	۷/۵۲	۶/۹۱	حداکثر		
	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۱۶	۰/۵۳	۰/۴۱	۰/۳۶	Std error		
	۰/۷۳	۰/۸۴	۰/۳۷	۱/۱۹	۱/۰۱	۰/۸۸	Std deviation		
۶۰	۲/۴۹	۲/۷۸	۳/۱۵	۲/۱۱	۲/۱۸	۱/۸۴	حداقل	I <sub>ss0</sub> (MPa)	
	۴/۵۲	۳/۹۴	۳/۹۱	۳/۲۱	۲/۸۸	۲/۳۵	میانگین		
	۵/۳۵	۵/۵۳	۴/۷۱	۴/۳۰	۳/۸۴	۲/۸۱	حداکثر		
	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۱۴	Std error		
	۱/۰۴	۰/۸۸	۰/۵۶	۰/۷۰	۰/۶۶	۰/۳۳	Std deviation		

جدول ۶. نتایج آزمایش کلسیمتری بر روی نمونه‌ها

Table 6. Results of calcium carbonate test on samples

شماره نمونه	درصد کربنات کلسیم
A	۹۰/۵۳
B	۹۲/۶۱
C	۹۳/۶۹
D	۹۵
E	۹۶/۰۷
F	۹۶

مطابق با استاندارد (BS EN 13925-1 (2003) به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انتقال داده شد و آزمایش انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۷ به صورت شدت فراوانی کانی‌های موجود در آزمایش XRD و همچنین مشخصات دستگاه XRD آورده شده است.

#### ۴-۲-۶- آزمایش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

آزمایش XRF از رایج‌ترین آزمایش‌ها آنالیز مواد می‌باشد که بدون اثر تخریبی، ترکیب عناصر موجود در ماده از نظر کیفی و کمی شناسایی می‌کند. اصول کار در این روش نیز همانند XRD بر پایه تابش اشعه ایکس است. اما تفاوت‌های

#### ۴-۲-۵- آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)

الگوی پراش اشعه ایکس به عنوان نمودار حاصل از شدت اشعه ایکس ساطع شده از نمونه در زوایای مختلف تعریف می‌شود. برای ایجاد این نمودار، آشکارساز به دور نمونه در یک محور دایره‌ای چرخش می‌کند. براساس زاویه  $\theta$  موقعیت آشکارساز ثبت می‌گردد. در این پژوهش آزمایش XRD در زاویه  $\theta$  انجام گرفته است. پیش از انجام آزمایش انحلال‌پذیری برای مشخص نمودن ویژگی‌های سنگ‌شناسی و وجود ناخالصی در نمونه‌ها و ارتباط آن با میزان انحلال‌پذیری از همه افق‌های سازند ایلام یک مخلوط از پودر سنگ آهک تهیه و جهت انجام آزمایش XRD

که در جدول ۸ قابل مشاهده است، درصد اکسید کلسیم و L.O.I بالا است که این موضوع بر فراوانی کلسیت در نمونه‌ها تأکید دارد و نتایج نشان می‌دهد که آنالیز کلسیمتری با آزمایش XRF تطابق خوبی دارد. اکسید آلومینیوم (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) در نمونه‌ها بیانگر وجود رس در سنگ‌های کربناته است، که تطابق مناسبی با نتایج آزمایش XRD و آزمایش کلسیمتری دارد.

بسیاری در نوع تشخیص وجود دارد. در این آزمایش با اندازه‌گیری فلورسانس اشعه X ثانویه ناشی از تابش اشعه ایکس اولیه به نمونه نوع و مقدار عنصر تعیین می‌گردد. درصد اکسیدهای مهم برای نمونه‌های مورد نظر تعیین گردید. براساس مقادیر حاصل از جدول ۸ نتایج آنالیز XRF نمونه‌ها نشان می‌دهد که عمده اکسیدهای تشکیل‌دهنده CaO، SiO<sub>2</sub>، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و MgO می‌باشد. به صورتی

جدول ۷. نتایج به ترتیب شدت فراوانی حاصل از آزمایش XRD

Table 7. The results of X-ray diffraction (XRD)

مشخصات دستگاه	کانی‌های موجود	افق‌های سازند
Model: EXPLORER Company: GNR Made in Italy Detector type: Scintillator Step:0.05 2Theatha (5-70) Integration time:1"	۱- کلسیت ۲- مونت‌موریونیت ۳- کانولینیت ۴- کوارتز	A
	۱- کلسیت ۲- مونت‌موریونیت ۳- کانولینیت ۴- کوارتز	B
	۱- کلسیت ۲- مونت‌موریونیت ۳- کانولینیت ۴- کوارتز	C
	۱- کلسیت ۲- کوارتز ۳- کانولینیت	D
	۱- کلسیت ۲- کوارتز ۳- کانولینیت	E
	۱- کلسیت ۲- کوارتز ۳- کانولینیت	F

جدول ۸. نتایج آزمایش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

Table 8. The result of X-ray fluorescence (XRF)

Sample Name	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	L.O. I (%)	SiO (%)
A	6.65	1.24	50.33	0.62	0.10	1.05	0.06	0.09	0.13	0.06	39.55	0.12
B	4.62	1.18	51.27	0.57	0.11	1.03	0.06	0.07	0.63	0.06	40.28	0.12
C	3.89	1.03	51.92	0.49	0.07	0.94	0.05	0.09	0.56	0.05	40.80	0.11
D	3.77	0.77	52.46	0.36	0.07	0.85	0.07	0.07	0.24	<	41.21	0.13
E	2.83	0.61	53.22	0.38	0.05	0.75	<	<	0.22	<	41.81	0.13
F	2.91	0.49	53.15	0.36	0.05	0.82	<	0.07	0.26	<	41.76	0.13

(&lt;) کوچک‌تر از حد تشخیص دستگاه می‌باشد.

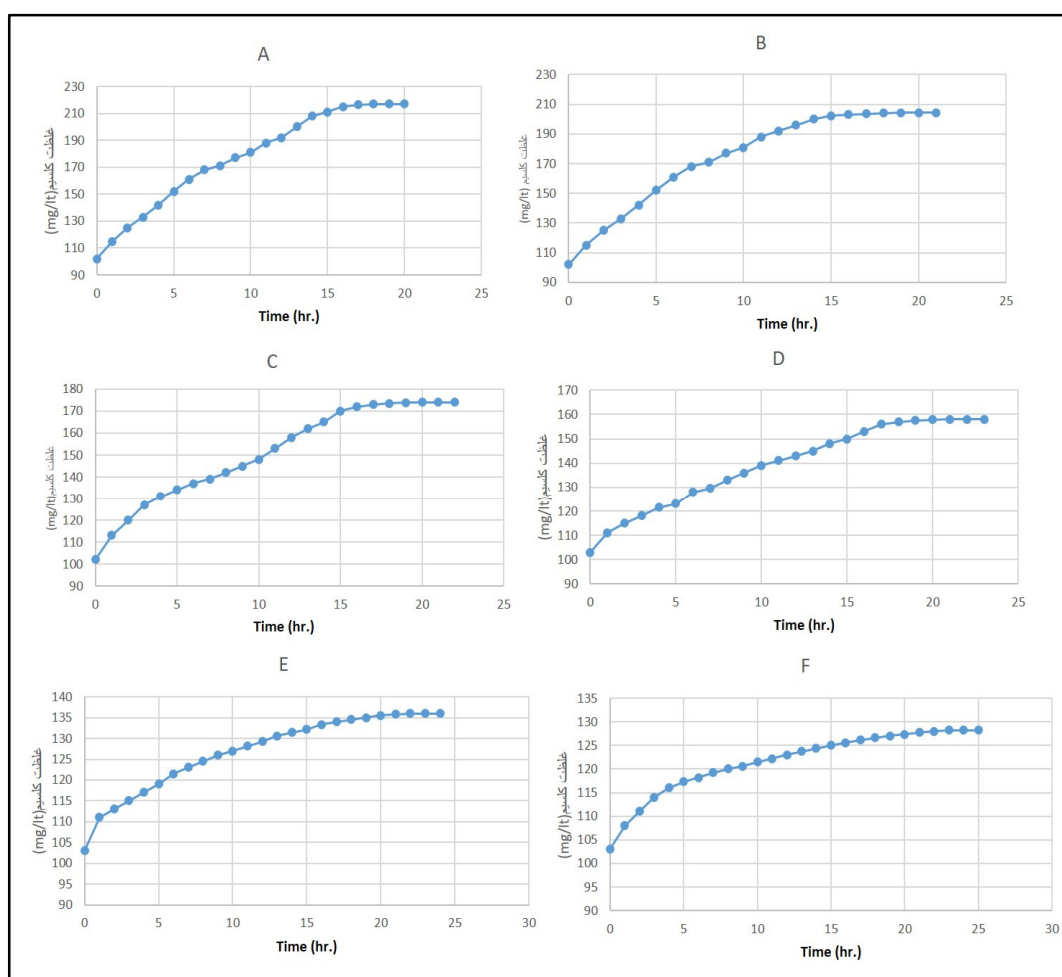
اندازه‌گیری شده است. سیکل اندازه‌گیری ثابت سرعت انحلال‌پذیری آن‌ها در یک سیکل با مقادیر ثابتی از دی‌اکسیدکربن محلول در آب اندازه‌گیری شده است. سیکل اندازه‌گیری ثابت سرعت انحلال‌پذیری با pH ۶/۵ تا ۷ انجام شده است. از آنجایی که هدف از انجام این آزمایش، صرفاً تعیین ثابت انحلال سنگ‌آهک مورد مطالعه بوده، لذا تمامی نمونه‌ها در آب با دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگه‌داشته شد تا بتوان در یک شرایط یکسان نسبت به تغییرات نمونه‌ها قضاوت نمود. آزمایش انحلال‌پذیری برای هر افق از سنگ‌آهک‌های سازند ایلام و در یک سیکل با استفاده از آب شهری با pH ۶/۵ تا ۷ و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در حجم ۲۰ لیتر انجام شده است. میانگین آنالیز شیمیایی آب شهر مشهد در جدول ۹ ارائه شده است. دستگاه انحلال که در این پژوهش استفاده شد دارای سیستم بسته بوده که از ۸ مخزن به ابعاد ۶۰×۳۰×۲۰ سانتی‌متر همراه با سیستم خنک‌کننده و گرم‌کننده

#### ۴-۲-۷- انحلال‌پذیری

پروژه‌های متعددی در کشور با مسئله حضور کانی‌های انحلال‌پذیر مانند آهک و مشکلات ناشی از آن روبرو هستند. ثابت سرعت انحلال (Kc) یکی از پارامترهای اصلی برای تعیین میزان انحلال‌پذیری است. اندازه‌گیری این پارامتر به صورت تجربی در آزمایشگاه صورت می‌گیرد. در این پژوهش از دستگاه سیرکولاسیون برای اندازه‌گیری ثابت سرعت انحلال استفاده گردیده است. میزان ثابت سرعت انحلال رابطه مستقیم با سرعت جریان آب و دی-اکسیدکربن محلول در آب دارد. در طبیعت اسیدیته آب زیرزمینی می‌تواند توسط سایر مواد اسیدی و قلیایی غیر از گاز دی‌اکسیدکربن نیز تغییر کند، اما در دستگاه سیرکولاسیون انحلال، عامل تغییردهنده اسیدیته میزان گاز دی‌اکسیدکربن تزریقی به مخزن است. لذا پس از آماده‌سازی نمونه‌های سنگ‌آهک ثابت سرعت انحلال آن‌ها با مقادیر ثابتی از دی‌اکسیدکربن محلول در آب

آزمایش انحلال سنگ‌آهک باید اسیدی باشد از تزریق گاز کربن‌دی‌اکسید به آب موجود در آزمایش برای اسیدی کردن آب استفاده شده است. برای هرکدام از ۶ افق سنگ‌آهک، مغزه‌هایی با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر درون مخزن آزمایش قرار داده شد. آزمایش انحلال‌پذیری نمونه‌های آهک زمانی به اتمام می‌رسد که آب موجود در آزمایش نسبت به یون کلسیم اشباع گردد. نمودارهای غلظت بر حسب زمان در شکل‌های ۴ (الف، ب، ج، د، ه، ی) آورده شده است. ثابت سرعت انحلال نیز به روش حجمی محاسبه گردید (جدول ۱۰).

اتوماتیک تشکیل شده است. جهت تنظیم pH آب نیز از سیستم تزریق گاز دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. به منظور ایجاد حداکثر سطح تماس نمونه سنگ با آب و همچنین محاسبه سطح تماس نمونه جهت استفاده از روابط ثابت سرعت انحلال، از نمونه‌هایی با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر و طول مشخص استفاده شد. روش کار دستگاه انحلال به این صورت است که پس از اندازه‌گیری ابعاد و وزن نمونه‌های مورد آزمایش، این نمونه‌ها را درون مخازن قرار داده و حجم مشخصی از آب درون مخازن ریخته می‌شود. با استفاده از پمپ اتوماتیک، جریان آب در سیستم به چرخش درمی‌آید. از آنجایی که آب مورد استفاده در



شکل ۴. A) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق A در  $\text{pH}=6.5-7$ ، B) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق B در  $\text{pH}=6.5-7$ ، C) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق C در  $\text{pH}=6.5-7$ ، D) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق D در  $\text{pH}=6.5-7$ ، E) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق E در  $\text{pH}=6.5-7$ ، F) تغییرات غلظت یون کلسیم نسبت به زمان برای سنگ‌آهک افق F در  $\text{pH}=6.5-7$ .

Fig. 4. A) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon B limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ , B) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon C limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ , C) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon D limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ , D) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon E limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ , E) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon F limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ , F) Variation of calcium ion concentration ratio to time for horizon F limestone at  $\text{pH}=6.5-7$ .

جدول ۹. میانگین آنالیز شیمیایی آب شهر مشهد

Table 9. Chemical analysis of Mashhad city water

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی			کاتیون‌ها (mg/lit)				آنیون‌ها (mg/lit)			
pH	EC ( $\mu\text{s/cm}$ )	TDS (mg/lit)	K <sup>+</sup>	Na <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
۷/۲	۷۶۰	۴۸۴	۲/۳	۲۵	۹	۹۲/۷	۴۸/۷	۴۰	۲۸۰	۰

جدول ۱۰. نتایج حاصل از آزمایش انحلال‌پذیری سنگ‌آهک برای افق‌های مختلف سازند

Table 10. The results of limestone solubility test for different horizons of the formation

نمونه آهک	معادله درجه اول	PH	ثابت سرعت انحلال (K) (m/s)
A	$y = 0.1765 x + 1.6338$	۷-۶/۵	$۴/۹۵ \times 10^{-6}$
B	$y = 0.1937 x + 1.5363$	۷-۶/۵	$۵/۴۳ \times 10^{-6}$
C	$y = 0.204 x + 0.4518$	۷-۶/۵	$۵/۷۲ \times 10^{-6}$
D	$y = 0.2279 x + 0.3576$	۷-۶/۵	$۶/۶۳ \times 10^{-6}$
E	$y = 0.2553 x + 0.3832$	۷-۶/۵	$۷/۱۶ \times 10^{-6}$
F	$y = 0.2883 x - 0.0588$	۷-۶/۵	$۸/۰۸۸ \times 10^{-6}$

## روش محاسبه ثابت سرعت انحلال سنگ‌های آهکی

## روش حجمی (وایت)

در این روش با استفاده از رابطه ۳ ثابت سرعت انحلال قابل محاسبه است:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{KA}{V} (C_s - C)^n \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه:

V: حجم آب در جریان ( $\text{m}^3$ )؛ A: مساحت سنگ در تماس با آب ( $\text{m}^2$ )؛ dc: تغییرات غلظت یون کلسیم؛ dt: تغییرات زمان (sec)؛  $C_s$ : غلظت یون کلسیم در حالت اشباع (gr/lit)؛ C: غلظت یون کلسیم در حالت عادی (gr/lit)؛ n: درجه واکنش. مقدار (C<sub>s</sub> - C) مفهوم پتانسیل انحلال را در برمی‌گیرد و معمولاً شرایطی را که در بیشتر محیط‌های مهندسی با آن برخورد می‌شود، شامل می‌گردد. مقدار n (درجه واکنش)، در مطالعات صورت گرفته توسط محققین در سال‌های گذشته مقادیر متفاوتی دارد. در کارهای انجام گرفته تاکنون مقدار n برای کلسیت و سنگ‌آهک برابر ۱ در نظر گرفته شده است (وایت، ۱۹۷۷).

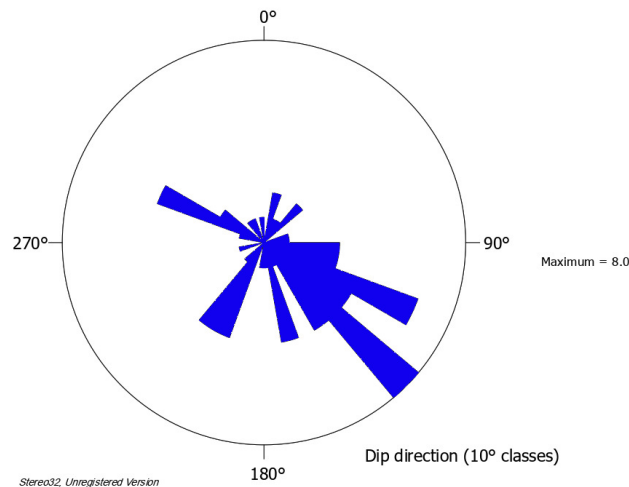
سازند آهکی ایلام جز سازندهای مشکل‌آفرین محسوب می‌شود. مشکل‌آفرینی این سازند مربوط به انحلال‌پذیری سنگ‌آهک می‌باشد. به این دلیل شناخت شرایط چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی سازند به عنوان یک ضرورت مطرح است. مقطع تیپ سازند ایلام از ۶ بخش (افق) آهکی تشکیل شده است. سازند ایلام از جمله سازندهایی است که در ارتفاعات زاگرس گسترش زیادی دارد و در برش نمونه شامل سنگ‌آهک کرم‌رنگ است. با توجه به گستردگی آن پروژه‌های زیادی بر روی این سازند اجرا شده و در حفاری‌های نفتی هم با این سازند برخورد دارند. مرز

پایینی آن با سازند سورگام و مرز بالایی آن با سازند گورپی به صورت پیوسته است. واحدهای سنگی، شرایط متفاوتی را بر رفتار سازند حاکم کرده است. به‌منظور شناخت این رفتار آگاهی از خصوصیات فیزیکی هر واحد سنگی ضروری است. با توجه به مطالعات سنگ‌شناسی در سنگ‌های آهک، تأثیر زیادی بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک دارد. واحدهای سنگی این سازند به دلیل تخلخل بین ۰/۵ تا ۲/۲۲ و همچنین داشتن ناخالصی و مقدار جذب آب سنگ‌آهک‌ها کمتر از یک درصد است که با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و مقاومت سنگ‌ها مقادیر به‌دست‌آمده قابل انتظار است. افق A به دلیل داشتن بیشترین ناخالصی طبق آزمایش کلسیمتری و همچنین داشتن کانی رسی بیشترین مقدار تخلخل و بیشترین درصد جذب آب را دارا می‌باشد. تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی باعث تفاوت در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی می‌شود. به این صورت که در افق A به دلیل وجود MgO بیشتر نسبت به بقیه افق‌ها (آثار دولومیتی شدن) باعث کاهش ثابت سرعت انحلال، افزایش تخلخل و کاهش کرنات کلسیم در آزمایش کلسیمتری قابل توجه است. با افزایش مقاومت سنگ و کاهش تخلخل مقدار جذب آب کاهش می‌یابد. افق A کمترین مقاومت و افق F بیشترین مقاومت را داراست. نوع سیمان نیز بر روی ویژگی‌های مقاومتی و انحلال‌پذیری سنگ‌آهک تأثیر دارد. به‌طوری‌که سیمان میکرایتی و ریز بلور بودن باعث افزایش مقاومت می‌شود. دوام وارفتگی سنگ‌آهک از سنگ‌شناسی تبعیت می‌کند. افقی که بیشترین ثابت سرعت انحلال را دارد، بیشترین مقاومت و کرنات کلسیم را دارا می‌باشد.

تفاوت در توسعه کارست و کارستی شدن سنگ‌آهک‌های سازند ایلام و همچنین تفاوت در ثابت سرعت انحلال در افق‌های مختلف سازند ایلام می‌باشد. به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف رفتار متفاوتی در برابر انحلال و کارست‌شدگی از خود نشان می‌دهد. لیتولوژی‌های مختلف به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف، رفتار متفاوتی در برابر کارست‌شدگی از خود نشان می‌دهد. خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سنگ‌آهک‌ها می‌تواند از عوامل اصلی تفاوت در کارست‌شدگی منطقه باشد. از جمله پدیده‌های کارستی قابل مشاهده در منطقه فروچاله انحلالی، کارن، کانیون، غار، جاماها، تنگه، حفرات انحلالی و کارن چاله باران می‌باشد. در شکل ۶ تعدادی از شواهد کارست را می‌توان دید. انحلال‌پذیری بیشتر (براساس آزمایش انحلال‌پذیری) و رفتار شکننده سنگ‌آهک (بر اساس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری) سنگ‌آهک موجود در افق‌های سازند ایلام نشان می‌دهد که افق A نسبت به بقیه افق‌های سازند ناخالصی بیشتر طبق آزمایش کلسیمتری، همینطور مقاومت کمتر می‌باشد. به علت وجود درزه و شکستگی در توده‌سنگ، مقاومت توده‌سنگ با مقاومت سنگ بکر متفاوت است. مقاومت توده‌سنگ نیازمند انجام آزمایش‌ها برجاست که در پژوهش حاضر این امکان وجود نداشته است. براساس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌آهک‌های افق‌های E و F به علت قفل و بست بین دانه‌ها دارای مقاومت بالاتری نسبت به سایر افق‌ها است.

هم‌چنین کمترین کاهش وزن ناشی از آزمایش دوام در این افق اتفاق افتاده است. نتایج آزمایشات انجام شده نشان داد که بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ با گسترش و توسعه کارست ارتباط وجود دارد. یکی از خصوصیات آزمایشگاهی سنگ که بتوان با استفاده از آن نسبت به قابلیت انحلال و توسعه کارست در آن سنگ اظهارنظر کرد، ثابت سرعت انحلال (K) می‌باشد که با استفاده از آزمایش انحلال قابل اندازه‌گیری می‌باشد. ویژگی‌های دیگری که به طور مستقیم با انحلال‌پذیری سنگ در ارتباط است، درصد کانی‌های انحلال‌پذیر موجود در سنگ می‌باشد. مطالعات نشان داده که هر چه درصد کربنات کلسیم سنگ‌آهک بالاتر باشد، قابلیت انحلال و توسعه کارست در آن سنگ بالاتر می‌باشد.

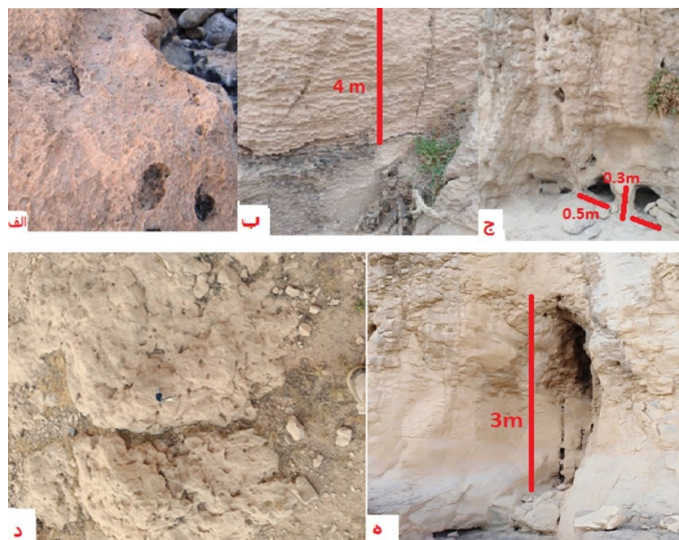
توسعه کارست در یک منطقه به پارامترهای زیادی همچون تکتونیک منطقه، شرایط آب و هوایی، ویژگی سنگ‌شناسی، ترکیب شیمیایی آب منطقه و ... بستگی دارد. در یک منطقه که بسیاری از این پارامترها یکسان و مشابه است، عامل اصلی تفاوت در کارست، وجود تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و ویژگی‌های مهندسی می‌باشد. مطالعه عوامل ساختاری نشان داد در محدوده مقطع تیپ سازند ایلام، عملکرد گسل‌های منطقه معکوس در تشکیل توسعه کارست نقش داشته است. همچنین مطالعات نشان داد که غالب درزه‌های موجود در منطقه در جهت شمال‌غرب جنوب‌شرق می‌باشد. در شکل ۵ نمودار گل‌سرخ‌ی ناپیوستگی‌های منطقه و جهت غالب درزه‌ها تهیه شده است. با شرایط تقریباً یکسان آب و هوایی، شاهد



شکل ۵. نمودار گل‌سرخ‌ی حاصل از درزه و شکستگی در منطقه مورد مطالعه  
**Fig. 5. The result of Rose diagram joint and fracture in the study area**

سروک در منطقه خرم‌آباد پرداخته‌اند. در جدول ۱۱ مقایسه نتایج مطالعه گذشته توسط قبادی و همکاران (۲۰۱۵) با نتایج پژوهش حاضر ارائه شده است.

۵- مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات گذشته در سال ۲۰۱۵ قبادی و همکاران به بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک در سازندهای ایلام-



شکل ۶. الف) تصویری به‌جامانده از ضربات قطره‌های باران بر روی سنگ‌آهک، ب) کارن، ج) حفرات انحلالی، د) کارن چاله باران و ه) غار تشکیل شده در سنگ‌آهک

Fig. 6. a) A picture of raindrops on limestone b) Karen, c) dissolution holes, d) rain hole Karen and e) cave formed in limestone

جدول ۱۱. مقایسه نتایج مطالعه گذشته توسط قبادی و همکاران (۲۰۱۵) با نتایج پژوهش حاضر

Table 11. Comparison Result in this study with previous studie

ردیف	منطقه مورد مطالعه	نوع سنگ	محققین	ویژگی‌ها
۱	خرم‌آباد	آهک	قبادی و همکاران (۲۰۱۵)	۱- نتایج نشان داد با کاهش اندازه ذرات در سنگ‌های آهکی مقاومت افزایش می‌یابد. ۲- تخلخل سنگ‌های آهکی ایلام- سروک کمتر از ۱ تا ۴ درصد متغیر است. ۳- شاخص جذب آب در تمام نمونه‌ها کمتر از ۲ درصد است. ۴- در آزمایش دوام طبق رده‌بندی گمبل و فرانکلین و چاندررا در رده خیلی مقاوم قرار دارد. ۵- انحلال‌پذیری با افزایش کرنات کلسیم افزایش می‌یابد. ۶- متوسط ثابت سرعت انحلال سنگ آهک برابر با $1.39 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه محاسبه شده است.
۲	مقطع تپ (تنگه گراب)	آهک	پژوهش حاضر	۱- تخلخل سنگ‌های آهکی متغیر است. بین ۰/۵ تا ۲/۲۲ درصد متغیر است. ۲- شاخص جذب آب در تمام نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد است. ۳- در آزمایش دوام وارفتگی براساس رده‌بندی گمبل تمامی سنگ‌آهک‌های این سازند در رده کمی مقاوم تا خیلی مقاوم و براساس رده‌بندی فرانکلین و چاندررا تمام نمونه‌ها در رده خیلی مقاوم تا شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. ۴- انحلال‌پذیری با افزایش کرنات کلسیم افزایش می‌یابد. ۵- متوسط ثابت سرعت انحلال سنگ آهک برابر با $6.32 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

دارند. این تفاوت مربوط به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آهک‌ها است. که می‌تواند عامل اصلی توسعه کارست باشد. از لحاظ سنگ‌شناسی سنگ‌آهک سازند ایلام در ۳ نوع و کستون، و کستون- پکستون قرار دارد. نتایج XRD نشان‌دهنده کانی‌شناسی شامل: کوارتز،

### ۶- نتیجه‌گیری

با وجود یکسان بودن عوامل ساختاری و تکتونیکی، آب و هوایی منطقه مورد مطالعه، توسعه پدیده‌های مورفولوژیکی کارست در آهک‌های منطقه مورد مطالعه و همین‌طور انحلال‌پذیری در افق‌های مختلف سازند ایلام با هم تفاوت

## References

- Anon, O (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: rock and soil materials, Bull Int Assoc Eng Geol. 19(1): 364-437.
- Amiri, M., Lashkaripour, G. R., Hafezi Moghaddas, N., Ghobadi, M. H (2023) The relationship between petrographical, physical, and mechanical properties in Ilam formation limestone. *New Findings in Applied Geology*, 34, doi: 10.22084/nfag.2023.27419.1545 (in persian).
- ASTM D4644 – 87 (1998) Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks. West Conshohocken ASTM Int. doi.org/10.1520/D4644-87R98.
- Bakhshandeh, L., Mohtat, T., Bakhshandeh, H., & Senmari, S (2014) Biozonation and Abundance of Foraminifera in the Type Section of Ilam Formation. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 23(92): 75-84. doi: 10.22071/gsj.2014.43654 (in persian).
- EN, B (2003) 13925-1. Standard Non-destructive testing X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials General principles. British Standard Institute.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional textures.
- Franklin, J. A. Chandra, A (1972) The Slake durability test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 9: 325-341.
- Ghobadi, M. H, Ghorbani, A., Mohseni H., Uromeihy, A (2015) study of engineering geological properties of the Ilam - Sarvak formations in Khorramabad city. *Journal of Engineering Geology*, 8 (4): 2463-2486. (in persian).
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., & Rasoli Farah, M (2021) The study of geotechnical properties of Qom formation sandstones and their using as borrow material (case study: Latgah village, northern Hamedan). *New Findings in Applied Geology*, 15(29): 55-70. doi: 10.22084/nfag.2020.21215.1408 (in persian).
- Ghobadi, M. H., Amiri, M (2018) Assessment of Karst development base on lithological, morphological and structural characteristics in the Hasan Abad galebozi region, East of mobarake, East of Esfahan province, The 21st Conference of the Geological Society of Iran and the 11th National Geological Conference of Payam Noor University, 9 pp. (in persian).
- Ghobadi, M. H., Karami, R (2009) Solubility of limestone and seepage problems in the left abutment of the Marun dam, southwest of Iran. *Journal of Engineering Geology*, 3(1): 615-632.
- Gamble, J. C (1971) Durability plasticity classification of shale and other argillaceous rocks. Ph. D., Thesis University of Illinois.

کربنات کلسیم، کانی‌های رسی و دولومیت می‌باشد. بر اساس مقادیر حاصل از جدول ۸ نتایج آنالیز XRF نمونه‌ها نشان می‌دهد که عمده اکسیدهای تشکیل‌دهنده  $MgO$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$ ،  $CaO$  می‌باشد. به صورتی که در جدول ۸ قابل مشاهده است، درصد اکسید کلسیم و L.O.I بالا است که این موضوع بر فراوانی کلسیت در نمونه‌ها تأکید دارد و نتایج نشان می‌دهد که آنالیز کلسیمتری با آزمایش XRF تطابق خوبی دارد. اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) در نمونه‌ها بیانگر وجود رس در سنگ‌های کربناته است، که تطابق مناسبی با نتایج آزمایش XRD دارد. همچنین بر اساس آزمایش کلسیمتری و XRF موجود افق‌های E و F بیشترین مقدار کربنات کلسیم را دارا است. براساس آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی، طبق طبقه‌بندی آنون درصد تخلخل در سنگ‌آهک‌ها در رده خیلی پایین تا پایین قرار دارد و به طبع مقدار شاخص جذب آب نیز کم می‌باشد. محدوده وزن واحد حجم در رده سنگ‌هایی با چگالی پایین تا بالا می‌باشد. ولی به طور میانگین مقدار وزن مخصوص قسمت جامد و وزن واحد حجم متوسط تا بالا می‌باشد. براساس رده‌بندی گمبل، تمامی سنگ‌آهک‌های این سازند در رده دوام وارفنگی از کمی مقاوم تا خیلی مقاوم و براساس رده‌بندی فرانکلین و چاندرا تمام نمونه‌ها در رده خیلی مقاوم تا شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. دوام وارفنگی سنگ‌آهک از سنگ‌شناسی تبعیت می‌کند. افق A به علت داشتن ناخالصی مثل کانی رسی و همچنین دارا بودن کمترین مقاومت دارای بیشترین افت وزنی می‌باشد که این موضوع تأثیر زیادی بر روی انحلال‌پذیری سنگ‌آهک دارد. افقی که دارای بیشترین مقاومت و کمترین کاهش وزن است دارای بیشترین ثابت سرعت انحلال می‌باشد. پدیده‌های کارستی همچون فروچاله انحلال، کارن، حفرات انحلالی، کانیون، غار، جاماها، تنگه و کارن چاله باران در منطقه و سازند مورد مطالعه وجود دارد.

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم برای انجام آزمایشات و همچنین داوران محترم، سردبیر و هیأت تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.



- leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Engineering Geology*, 70: 17-35.
- Salimi, S (2009) Engineering geology study of limestone rocks in south and southeast of Hamedan province, Master's thesis, Bu Ali Sina University, Hamedan (in persian).
- Shalabi, F. I., Cording, E. J., & Al-Hattamleh, O. H (2007) Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology*, 90(3-4): 138-147.
- Sharma, L. K., & Singh, T. N (2018) Regression-based models for the prediction of unconfined compressive strength of artificially structured soil. *Engineering with computers*, 34: 175-186.
- Singh, T. N., Sharma, P. K., Khandelwal, M (2006) Effect of pH on the Physico - mechanical properties of marble. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66 (1): 81-87.
- Torabi - Kaveh, M., Heydari, M (2011) Studying the dissolution process of gypsites of Gachsaran Formation in Chamshir Dam Reservoir, *Journal of Geotechnical Geology*, 7 (3): 191-198.
- White, W. B (1977) Role of solution kinetics in the development of karst aquifers. *Mem. Int. Assoc. Hydrogeol*, 12: 503-517.
- Zaroosh, N., Vaezi, A., & Karimi, H (2015) Evaluation of karst development potential in Kabirkoh anticline of Ilam province using fuzzy integration and analysis hierarchy method (AHP), remote sensing and GIS. *Quantitative Geomorphology Research*, 3(3): 144-15.
- Ghobadi M. H, Taleb Beydokhti, A., Asiabanha, A (2012) The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability of tuff in north Qazvin. *Journal of Engineering Geology*, 6 (1): 1409-1428. (in persian).
- Heydari, M., Taleb Bidakhti, A. R (2003) Investigating the solubility of limestones near the Hamedan power plant, *Proceedings of the 7th Conference of Geological Society of Iran*, University of Isfahan, 11 pages (in persian).
- Hu, Z., Klaver, J., Schmatz, J., Dewanckele, J., Littke, R., Krooss, B.M., Hildenbrand, A (2020) Stress sensitivity of porosity and permeability of Cobourg limestone, *Engineering Geology*, 273: p. 105632.
- ISRM (2007) The blue book: the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974 -2006. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) *Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group*, Ankara, Turkey. Kazan Offset Press, Ankara.
- James, A. N (1992) Soluble material in civil engineering, Ellis Horwood, New York.
- James, A. N., and Kirkpatrick, I. M (1980) Design of foundations of dams containing soluble rocks and soil, *Q. J. Eng. Geol*, 13: 189-198.
- Mousavi Maddah, S. M., Hafezi Moghaddas, N., & Ghafoori, M (2020) Solubility variations of Tirgan limestone in Northeast of Iran with change of PH and temperature. *Carbonates and Evaporites*, 35: 1-10.
- Mohammadian, M (2021) Investigation of the relationship between lithological, physical and mechanical properties with karst development in gypsum of Gachsaran Formation and limestone of Asmari Formation in Jarahi-Zohreh catchment, east of Khuzestan province. PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad (in persian).
- Maghsoudi, M., Akhavan, H., Mahdian Mahforouzi, M., & Ashournejad, Q (2015) Zonation of the Intensity of Carbonaceous Rocks in Southern Zagros (Case Study: Seif Abad-e-Laghar Basin). *Physical Geography Research Quarterly*, 47(1): 105-124, doi:10.22059/jphgr.2015.53681 (in persian).
- Naseri, H. R., & Alijani, F (2012) Karst system analysis of Asmari and Ilam - Sarvak formations in the South-West of Izeh. *Advanced Applied Geology*, 2(1): 94-104 (in persian).
- Noori Sartangy, M., Uromeihy, A., & Zarea Mozafary, K (2017) Engineering geological characteristics of Gachsaran formation of a leakage (Case Study: Dam Khersan 3). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(105): 131-142. doi: 10.22071/gsj.2017.54177.
- Romenov, D. K., Gabrovsek, F. Debrodt, W (2003) Dam site in soluble rocks: a model of increasing

## Evaluation of solubility and karst development in type section of Ilam Formation

M. Amiri<sup>1</sup>, Gh. R. Lashkaripour<sup>\*2</sup>, N. Hafezi Moghaddas<sup>3</sup> and M. H. Ghobadi<sup>4</sup>

1- Ph. D. student, Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2, 3- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

4- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

\* lashkaripour@um.ac.ir

Received: 2023/3/9 Accepted: 2023/7/9

### Abstract

Karstification develops in limestones easily due to high solubility. The abundance of limestone has caused them to face this type of rock in different engineering projects. The Ilam Formation is exposed in the Zagros mountains and this Formation contains 195 meters of cream-colored limestone in the type section. Due to the extent of this formation, many projects have been executed on this formation, and they also encounter this formation in oil drilling. Its lower and upper Boundaries are continuous with Surgah Formation and Gurpi Formations, respectively. In this research, lithological studies and determining the physical and mechanical properties of limestone samples of Ilam formation in type section, the solubility and karst development have been investigated. In order to evaluate the solubility of the Ilam Formation, samples were taken from different horizons of the formation and transferred to the geological engineering laboratory for the dissolution test, the samples were evaluated for their chemical composition, engineering properties, and solubility after preparation. The results of XRD show that the oxides include silica, calcium carbonate, clay minerals, and a few numbers of dolomite. The results of the XRF samples show that the major constituent oxides are CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO. Additionally, based on calcium and XRF tests, horizons E and F contain the highest levels of calcium carbonate and demonstrate variations in solubility across different layers of the formation. Horizon F, in particular, has the highest rate of dissolution. There are karst phenomena such as dissolution sinkholes, Karen, dissolution holes, canyons, caves, James, gorges, and rain hole Karen in the study area.

**Keywords:** Lithological properties, Physical properties, Solubility, Limestone, Ilam Formation

### Introduction

Carbonate rocks are the most abundant sedimentary rocks in Iran and play a critical role in many construction projects. These formations are often considered problematic, as constructing surface and subsurface structures in such rocks presents significant geotechnical challenges, potentially leading to serious consequences during both the construction and operation phases. Some of these properties, such as physical and mechanical characteristics, can be assessed within a relatively short timeframe and have direct impacts on structural behavior. These evaluations allow engineers to identify potential issues and implement solutions promptly. However, time-dependent characteristics, such as dissolution, can pose long-term risks to surface and subsurface structures, especially when favorable conditions for dissolution are present. Dissolution leads to the formation of karst, a

process in which soluble minerals dissolve, creating voids and cavities. Solubility, in its strict sense, refers to the amount of a substance that dissolves in a solvent under specific equilibrium conditions of temperature and pressure. The presence of soluble minerals at sites of hydraulic structures can lead to long-term risks, such as water leakage from dam reservoirs. Therefore, it is crucial to determine both the quantity and rate of dissolution of these minerals. The dissolution process plays a vital role in evaluating geochemical systems and understanding the relationship between dissolution rates and water chemistry requires laboratory testing. Determining karst areas is another critical issue, as the karst phenomenon introduces risks, including variable solubility. Past experience has shown that geological phenomena, particularly in karst areas, have caused significant problems in projects and dams. These issues are often due to porosity and fractures caused by the dissolution of rocks

such as limestone, dolomite, gypsum, and anhydrite. The aim of this research is to investigate the lithological and engineering characteristics, as well as the solubility of limestone in the Ilam Formation at the Type section, including the development of karst and the presence of karst features in the study area. To date, no research has been conducted on the engineering properties and solubility of this specific section of the Ilam Formation.

### Materials and methods

To conduct this research, both a literature review and data collection on carbonate rocks in the Ilam region were undertaken. Field studies were carried out in the Type section to identify karst formations in the limestones of the Ilam Formation, which included the recognition of karst morphological features and seams. Sampling was conducted during these field visits, where 60 suitable blocks with dimensions ranging from 40 × 40 × 30 cm to 50 × 50 × 40 cm were selected and transported to the geological engineering laboratory of the university. From these blocks, cylindrical cores with a diameter of 54.7 mm were prepared for testing. Physical and mechanical tests were performed on these cores following ISRM and ASTM standards. In addition to physical sampling, lithological characterization, X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence (XRF) tests were conducted, along with physical, mechanical, and solubility analyses for the carbonate rocks. The aim was to assess the relationship between lithological, physical, and mechanical properties and the extent of karst development in the area. Ultimately, the data collected from these tests were used to analyze the influence of these properties on karst formation in the Ilam Formation.

### Discussion

The limestone formation of Ilam is recognized as a problematic geological unit, primarily due to the solubility of its limestone. Understanding the stratigraphic and petrological conditions of this formation is essential for addressing the associated challenges. The cross-section of the Ilam formation comprises six distinct limestone sections (horizons). This formation is extensively distributed across the Zagros highlands, characterized by cream-colored limestone in the sample area. Given its vastness, numerous construction and oil

drilling projects have been conducted within this formation. Geologically, the lower boundary of the Ilam formation transitions into the Surgah Formation, while its upper boundary interfaces with the Gurpi Formation. The various rock units exhibit differing behaviors, necessitating an understanding of the physical characteristics inherent to each unit. Lithological studies indicate that these characteristics significantly influence the physical and mechanical properties of the limestone. The rock units within this formation exhibit porosities ranging from 0.5 to 2.22, while their water absorption rates are generally below 1%, which aligns with their mineralogical composition and strength. Among the horizons, Horizon A demonstrates the highest porosity and water absorption rates, attributed to its elevated impurity levels and the presence of clay minerals, as determined by calcimetry tests. Variations in lithological and mineralogical properties result in corresponding differences in the physical and mechanical characteristics of the rock. Notably, the presence of magnesium oxide (MgO) in Horizon A, resulting from dolomitization, leads to a marked reduction in the dissolution rate, increased porosity, and diminished calcium carbonate content as evidenced by calcimetry tests. Consequently, as rock strength increases and porosity decreases, the water absorption capacity diminishes. Horizon A exhibits the lowest strength, in contrast to Horizon F, which showcases the highest strength. Additionally, the type of cement present within the limestone significantly influences both the strength and solubility characteristics. Specifically, micrite and fine crystalline cement enhance the overall strength of the rock. The durability of limestone deposition is inherently linked to its lithological composition. Interestingly, the horizon with the highest dissolution rate constant also shows the greatest strength and calcium carbonate content, while the lowest weight loss recorded during durability tests was observed in this horizon. The experimental findings reveal a clear relationship between the physical and mechanical characteristics of the limestone and the expansion and development of karst formations. One key laboratory parameter indicative of a rock's ability to dissolve and subsequently develop karst features is the dissolution rate constant (K), which can be quantified through dissolution

testing. Furthermore, the percentage of soluble minerals present in the limestone is directly related to its solubility. Research indicates that a higher percentage of calcium carbonate in the limestone correlates with an increased capacity for dissolution and the development of karst features within the rock.

### Conclusion

Despite similar structural and tectonic factors, the climate of the studied area, the development of karst morphological phenomena in the limestones, and the solubility variations across different horizons of the Ilam Formation exhibit significant differences. These discrepancies can be attributed to the physical, chemical, and mechanical properties of the limestone, which are crucial factors influencing karst development. Lithological, the limestone of the Ilam Formation is categorized into three types: Wackestone, Wackestone-packstone, and packstone. X-ray Diffraction (XRD) analysis reveals a mineralogical composition that includes quartz, calcium carbonate, clay minerals, and dolomite. The X-ray Fluorescence (XRF) analysis results presented in Table 8 indicate that the primary oxides are CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and MgO. Notably, the high percentages of calcium oxide and Loss on Ignition (L.O.I) underscore the prevalence of calcite in the samples, and the calcium content aligns well with the XRF findings. The presence of aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in the samples suggests the occurrence of clay within the carbonate rocks, further corroborating the XRD results. Additionally, the calcimetry and

XRF tests indicate that Horizons E and F possess the highest concentrations of calcium carbonate. According to physical property assessments and following Anon classification, the porosity percentage in these limestones falls within the very low to low category, which correlates with a similarly low water absorption index. The weight per volume of these rocks is classified as having low to high density, with the average specific weight of the solid component and the unit volume weight ranging from medium to high. Utilizing Gamble classification, all limestones in this formation are categorized as having durability ranging from slightly strength to very strength. In accordance with Franklin and Chandra's classification, all samples fall within the category of very strength to extremely strength. The durability of limestone deposition is inherently linked to its lithology. Horizon A, which exhibits the highest weight loss, contains impurities such as clay minerals and displays the lowest strength, significantly influencing the limestone's solubility. Conversely, the horizon with the highest strength and lowest weight loss is characterized by the greatest dissolution rate constant. The area and the formation under investigation feature various karst phenomena, including dissolution sinkholes, karrens, dissolution holes, canyons, caves, jamas, gorges, and rain hole karrens. These features highlight the dynamic geological processes at play within the Ilam Formation, further emphasizing the importance of understanding its properties and behaviors in relation to karst development.