

## ارتباط بین ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک‌های سازند ایلام

مهرداد امیری<sup>۱</sup>، غلامرضا لشکری‌پور<sup>۲\*</sup>، ناصر حافظی‌مقدس<sup>۲</sup> و محمدحسین قبادی<sup>۳</sup>

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

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

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

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

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۳۱

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۴

## چکیده

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 مقطع تیپ 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 می‌شود. مرز پایینی آن با سازند سورگه و مرز بالایی آن با سازند گورپی به صورت پیوسته است. هدف از انجام این تحقیق مطالعه و بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در مقطع تیپ این سازند می‌باشد. سازند ایلام مانند سایر سازندهای دارای واحدهای کربناته می‌تواند در پروژه‌های مختلف مشکل آفرین باشد به ویژه زمانی که افق‌های مختلف سازند از نظر خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی با هم تفاوت داشته باشند. در این پژوهش، به منظور شناخت خصوصیات و رفتار مهندسی افق‌های این سازند، ۶۰ بلوک از افق‌های مختلف آهک‌های سازند ایلام برداشت شد و جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل و خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی تعیین گردید. آزمایش‌های انجام شده شامل خصوصیات فیزیکی، دوام و ارتعاشی، شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کشش برزیلی و سرعت موج می‌باشد. در ادامه آنالیزهای رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام شد. شاخص‌های آماری از قبیل  $R^2$ ، RMSE،  $R_{adjusted}^2$  مورد ارزیابی قرار گرفت و روابط تجربی بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تعیین گردید. این روابط با هدف کاهش هزینه و زمان می‌تواند برای تخمین خصوصیات مهندسی این سنگ‌ها کاربرد داشته باشد. براساس نتایج به دست آمده ضریب تعیین بالاتری جهت تخمین خصوصیات مکانیکی در حالت خشک در مقایسه با حالت اشباع وجود دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی نقش مهمی در رفتار مکانیکی سنگ‌های آهکی ایلام دارند.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات سنگ‌شناسی، خصوصیات فیزیکی، خصوصیات مکانیکی، سنگ‌آهک، سازند ایلام

## ۱- پیشگفتار

همکاران اشاره نمود. نامبردگان، روابطی را برای سنجش ویژگی‌های مکانیکی سنگ مانند مقاومت کششی و فشاری بر اساس عدد سختی‌اشمیت ارائه کردند (کاتز و همکاران، ۲۰۰۰). در سال ۲۰۰۲ داکال و همکارانش روابط بین دوام و شکستگی سنگ را با خصوصیات کانی‌شناسی مورد توجه قرار دادند (داکال و همکاران، ۲۰۰۲). تسیامبوس و سباتاکاکیس (۲۰۰۴) پس از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی نظیر شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری، فاکتورهای تبدیلی مختلفی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای برای سنگ‌های رسوبی نرم تا سخت پیشنهاد دادند. قهرمان و همکاران (۲۰۰۵) اثر تخلخل روی روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت بار نقطه‌ای را

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی سنگ‌ها در طراحی و روش اجرای پروژه‌های عمرانی اهمیت ویژه‌ای دارند. شناسایی خصوصیات ماده سنگ نیز بخشی عمده از مکانیک سنگ است که برای شناسایی دقیق آن در پروژه‌ها هزینه‌های زیادی پرداخت می‌گردد. مباحث مربوط به سنگ‌آهک از جمله بررسی کاربردی کانی‌شناسی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک به دلیل اهمیت سنگ‌شناختی، زمین‌شناسی مهندسی و کاربردهایی که در پروژه‌ها و صنایع دارند مورد توجه پژوهشگران است. در این زمینه محققان مختلف، تحقیقات زیادی طی سال‌های اخیر انجام دادند. برای نمونه می‌توان به ارزیابی خصوصیات مکانیکی سنگ با استفاده از چکش‌اشمیت توسط کاتز و

می‌باشد. پژوهشی توسط لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸) تحت عنوان "بررسی ضریب شکست و همبستگی تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک آسماری در سایت سد خرسان ۲ در جنوب غربی ایران" صورت گرفت. در این مقاله روابط تجربی برای تخمین شاخص‌های شکنندگی سنگ‌آهک آسماری برقرار شده است. معادلات ارائه شده برای پیش‌بینی شکنندگی بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی از دقت بالایی برخوردار بود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که برآورد شکنندگی از طریق موج فشارشی<sup>۱</sup> (Vp) بر اساس مفهوم  $B_3$  (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری به مقاومت کششی تقسیم بر ۲) دقت بیشتری نسبت به مفاهیم  $B_2$  (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری منهای مقاومت کششی) و  $B_1$  (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری بعلاوه مقاومت کششی) دارد (لشکری‌پور و همکاران، ۲۰۱۸). بررسی‌های کاراکول و اولوسای (۲۰۱۳) نشان داد با افزایش درجه اشباع، ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها کاهش می‌یابند. در حالی که سرعت موج فشاری روند متغیری را نشان می‌دهد. قبادی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌ها در شهرستان هرسین استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که انطباق بیشتری بین خصوصیات در شرایط خشک نسبت به اشباع را نشان می‌دهد.

قبادی و همکاران (۲۰۲۰) همچنین بر روی هوازدگی و ارتباط آن با خصوصیات زمین‌شناسی پریدوتیت‌ها پژوهشی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات دانه‌ها مانند شکل و اندازه، نوع تماس، درجه هوازدگی و شاخص ریزترک بر روی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی تأثیر می‌گذارد. قبادی و همکاران (۲۰۲۱) خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی ماسه‌سنگ‌ها منجر به تغییر در خصوصیات مکانیکی آن‌ها شده است و انطباق مناسبی بین نتایج آزمایش مقاومتی با سرعت موج طولی در حالت خشک و اشباع وجود دارد. پژوهشی توسط آذرافزا و همکاران (۲۰۱۹) بر روی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مارن‌ها انجام گرفت. خواص فیزیکی شامل

مطالعه کردند (قهرمان و همکاران، ۲۰۰۵). در سال ۲۰۰۶ چانگ و همکاران روابط تجربی بین مقاومت و خصوصیات فیزیکی سنگ ارائه کردند (چانگ و همکاران، ۲۰۰۶). شلابی و همکاران (۲۰۰۷) روابطی را بین خصوصیات مهندسی سنگ بکر برای آهک، آهک دولومیتی و شیل و انواع مختلف سختی برقرار کردند. قبادی و همکاران (۲۰۰۹) بین ویژگی‌های فیزیکی و سنگ‌شناسی و خصوصیات مهندسی سنگ‌آهک سازند آسماری در شمال شرق مسجد سلیمان روابطی منطقی برقرار کردند. کیانپور و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از چگالی، تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای شیل سازند شمشک در منطقه سیاه بیشه، مقاومت فشاری آن را برآورد کردند. قبادی و همکاران (۲۰۱۴) خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سازند گچساران را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مذکور علاوه بر بررسی انحلال‌پذیری ژپیس و تورم مارن این سازند در منطقه رامهرمز بین پارامترهای مقاومت کششی، درصد تخلخل و شاخص دوام سیکل اول و مقاومت واحدهای سنگی ارتباط معنادار برقرار کردند. بورونو و همکاران (۲۰۱۳) براساس آزمایش سختی اشمیت بر روی سنگ کربناته که از نظر مقاومت گستره مناسبی داشتند، روابط تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری این سنگ‌ها و بتن ارائه دادند. قبادی و همکاران (۲۰۱۵) ضمن بررسی خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند ایلام و سروک به این نتیجه رسیدند که همبستگی مناسبی بین خصوصیات مهندسی و فیزیکی این سنگ‌ها وجود دارد. ترابی و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه سنگ‌آهک آسماری در محل سد کارون و خرسان ۳ روابطی برای تخمین مقاومت فشاری و مدول‌یانگ با توجه به خصوصیات ذاتی مانند تخلخل، چگالی و سرعت موج فشاری ارائه دادند. دیامانتیس و همکاران (۲۰۰۹) از پارامترهایی مانند بار نقطه‌ای و سرعت موج طولی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده کردند و برخی مطالعات تجربی قبلی را توسعه دادند. جمشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای بر روی تراورتن انجام دادند. هدف از این مطالعه بررسی ارتباط بین سختی اشمیت و سرعت موج طولی با ویژگی‌های مکانیکی بوده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت موج طولی و سختی اشمیت برای تخمین خواص مکانیکی قابل اعتماد

<sup>۱</sup> . Pressure wave

بار نقطه‌ای و تخلخل پارامتری جدید ارائه داده‌اند. به علت گسترش زیاد سنگ‌های رسوبی به‌ویژه سنگ‌آهک در زاگرس، شمال و ایران مرکزی، توجه به خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی آن‌ها ضروری می‌باشد. سنگ‌آهک در مقطع تیپ سازند ایلام در غرب و جنوب غرب کشور رخنمون گسترده‌ای دارد و یکی از مهم‌ترین سازندهای در ارتفاعات زاگرس است. در این پژوهش ضمن مطالعه آزمایشگاهی، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک سازند ایلام در مقطع تیپ مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱، چندین رابطه برای سنگ آهک‌های مناطق و سازندهای دیگر ارائه شده است. از این‌رو، استفاده از چنین روابط تجربی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی سنگ‌آهک‌های نقاط دیگر از دقت لازم برخوردار نخواهد بود. در چنین شرایطی تعیین روابط تجربی بین خصوصیات مهندسی هر منطقه ضرورت دارد.

تخلخل، دانسیته، حد روانی و خصوصیات مکانیکی مارن‌های منطقه پارس جنوبی شامل آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش دوام و ارتفتگی تعیین شده‌اند. آن‌ها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که در سنگ‌های رسوبی دارای رس زیاد مانند مارن، در آزمایش دوام و ارتفتگی هر چه تعداد سیکل‌های آزمایش افزایش یابد میزان افت وزنی زیادی در نمونه‌ها رخ می‌دهد و بالعکس. احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۳ پژوهشی تحت عنوان ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آرژیلیتی در منطقه مکران جنوبی (راه‌آهن چابهار- نیک‌شهر) انجام دادند که سنگ‌های منطقه مکران را مطابق طبقه‌بندی مهندسی سنگ به روش RMR، Q-System و GSI عمده توده سنگ در طبقه‌بندی ضعیف و خیلی ضعیف قرار دارند. پژوهشی توسط رحیمی‌شهید و همکاران (۲۰۲۲) بر روی سنگ‌آهک‌های همدان انجام شد آن‌ها بر روی خصوصیات مهندسی سنگ‌آهک کار کردند و با استفاده از آزمایش‌های

جدول ۱. برخی از مطالعات پیشین انجام گرفته بر روی سنگ‌آهک

ضریب همبستگی	رابطه	مرجع	جنس سنگ
-	$V_s = V_p / 1.9$	پیکت (۱۹۶۳)	کربناته
NA	$UCS = 6.9 \times 10^{(1.348 \log(H_R \times \rho) - 1.325)} R$	آفموت (۱۹۷۳)	سنگ‌های مختلف
-	$UCS = 16 I_{S50}$	ریید و همکاران (۱۹۸۰)	رسوبی
-	$V_s = -0.055 V_p^2 + 1.017 V_p - 1.031$	کاستاگنا و همکاران (۱۹۹۳)	آهک
-	$V_s = (\rho / 23.3)^{(1/0.14)}$	اویانیک و همکاران (۲۰۱۹)	سنگ‌های رسوبی
-	$V_s = 4.99 \times \rho - 10.071$	غفوری و همکاران (۲۰۱۸)	آهک
۰/۸۴	$I_{S50} = 7.8 - 0.48 n$	رحیمی‌شهید و همکاران (۲۰۲۲)	آهک
۰/۹۵	$UCS = 10.382 BTS - 1.5993$	محمدیان (۲۰۲۱)	آهک
-	$V_s = 1.742 I_{S50}^{0.28}$	لشکری پور و همکاران (۲۰۱۸)	کربناته
۰/۹۰	$I_{d15} = -0.260 n + 99.716$	قیادی و همکاران (۲۰۱۵)	آهک
۰/۸۳	$UCS_{dry} = 2.6356 BTS_{dry} + 29.559$	قیادی و همکاران (۲۰۱۵)	آهک

UCS: Uniaxial compressive strength,  $I_{S50}$ : Point load index,  $I_d$ : Durability index, BTS: Brazilian tensile strength, n: porosity,  $\rho$ : Density,  $H_R$ : Schmidt hardness

هستند. سازند ایلام به عنوان 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

### موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

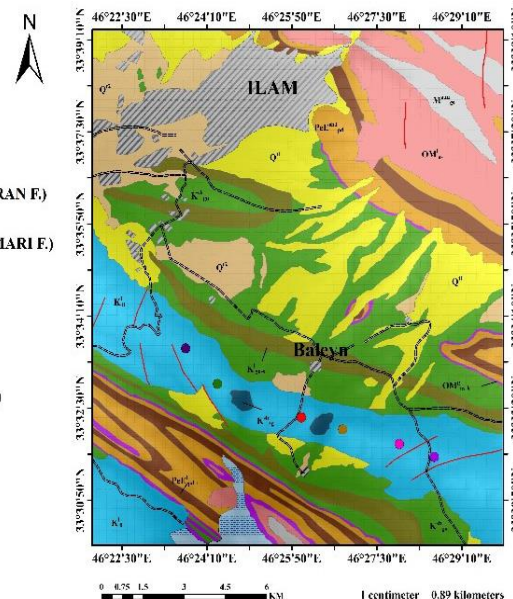
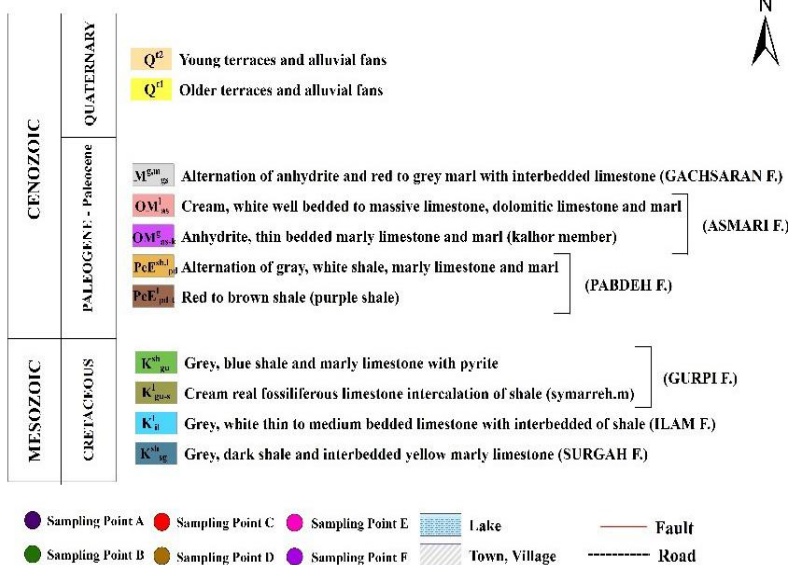
یکی از سازندهای مهم حاوی لایه‌های سنگ‌های کربناته در ایران، سازند ایلام است. این سازند که عمدتاً از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است، از سنگ‌های مولد هیدروکربن جنوب باختر ایران است. از اجزای بسیار مهم و کلیدی سنگ‌های آهکی ایلام روزنبران پلانکتونیک

سانتونین-کامپانین است. رخساره کم ژرفای 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 کم ژرفای سازند ایلام را دید. 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 (شکل ۱). حد پایینی در برش نمونه سازند سورگاه است (بخشیده و همکاران، ۲۰۱۴). در شکل ۲ نقاط نمونه‌برداری شده از سازند ایلام همچنین وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

و تراوی زیاد با سنگ‌پوش‌های مناسب شرایط منحصر به فردی را برای تولید و انباشت هیدروکربن در زاگرس فراهم کرده است، به طوری که این حوضه رسوبی از نفت‌خیزترین حوضه‌های دنیا باشد. توالی‌های آلبین تا کامپانین این حوضه به نام 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 کم ژرفا می‌باشد. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره ژرف است، در پایانه شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری شهرستان ایلام اندازه‌گیری 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



شکل ۱. راه‌های دسترسی به منطقه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و نقاط نمونه‌برداری شده (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ایلام، سازمان زمین‌شناسی کشور)

## مواد و روش‌ها

استوانه‌ای به قطر NX (۵۴/۷ میلی‌متر) تهیه و آزمایش‌های فیزیکی و 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 به ویژگی‌های سنگ‌شناسی مقاطع نازک از آن‌ها تهیه گردید و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بررسی گردید. همچنین، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک‌ها تعیین گردید. پس از بررسی خصوصیات آماری نمونه‌ها در نرم‌افزار Minitab 16 روابط همبستگی و براساس بهترین برازش بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی برقرار شده است و تصاویر سه‌بعدی با نرم‌افزار Matlab 2018 رسم شده است.

برای انجام این پژوهش، بررسی‌های کتابخانه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات موجود در رابطه با سنگ‌های کربناته در منطقه ایلام انجام گردید. طی بازدیدهای صحرایی، نمونه‌برداری صورت گرفته است. به منظور بررسی خصوصیات زمین‌شناسی سنگ‌آهک سازند ایلام، تعداد ۶۰ بلوک مناسب به ابعاد تقریبی ۳۰×۴۰×۴۰ سانتی‌متر تا ۵۰×۴۰×۵۰ سانتی‌متر از سازند انتخاب و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی انتقال داده شد. بخشی از بلوک‌های تهیه شده جهت مغزه‌گیری در شکل ۳ نشان داده شده است. از نمونه‌های سنگی جمع‌آوری شده، تعدادی مغزه



شکل ۳. نمونه‌هایی از بلوک‌های سنگ‌آهک سازند ایلام

پایداری و دوام این سنگ‌ها در برابر انحلال و هوازدگی است. تخلخل تأثیر بسیار زیادی بر مقاومت فشاری تک‌محوری این سنگ‌ها دارد. الجسار و هاکین (۱۹۷۹) بیان کردند که سنگ‌آهک میکرایتی (ریزبلور) دارای مقاومت بیشتری نسبت به نوع اسپرایتی (درشت بلور) است. این سنگ‌ها ممکن است حاوی مقادیر متفاوت ناخالصی (کوارتز، کانی رسی و اکسید آهن) باشند (اجل‌لوئیان و محمدی، ۲۰۱۱). رفتار مکانیکی آهک غالباً با ۵ فاکتور شامل تخلخل، کلیواژ، اندازه، سنگ‌شدگی و میکروترک کنترل می‌شود. برای مثال مقاومت تابعی از (اجل‌لوئیان و محمدی، ۲۰۱۱). در ارتباط با کلیواژ، بلور کلسیت در مقایسه با فلدسپات و کوارتز از نظر آماری خیلی آسیب‌پذیرتر است. زیرا کلسیت سه رخ دارد. در حالی که فلدسپات دو رخ و کوارتز بدون رخ است. این باور وجود دارد که کانی‌ها در طول سطوح کلیواژ خود دچار شکستگی

## بحث

### مطالعات سنگ‌شناسی

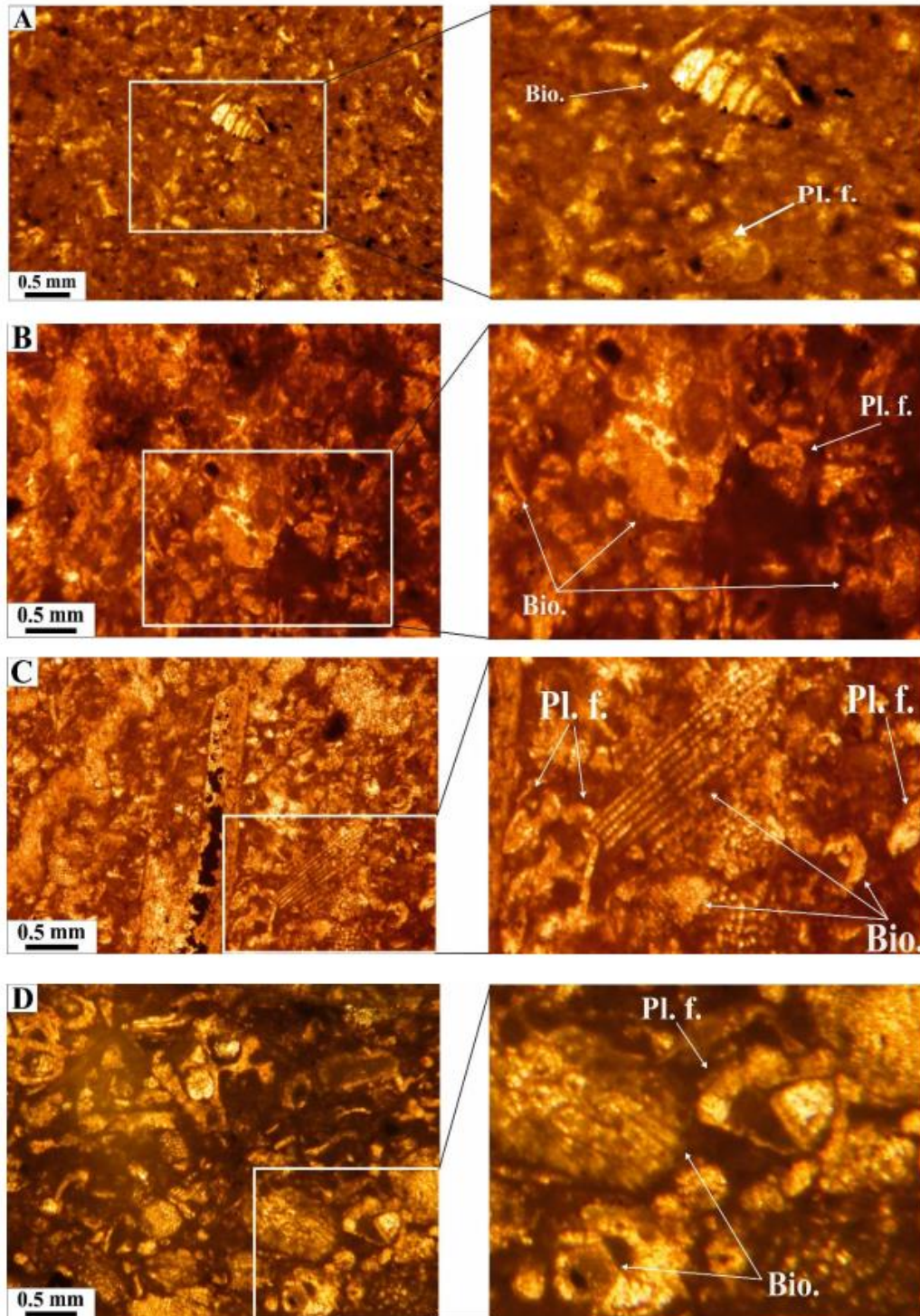
در این تحقیق از افق‌های سازند آهکی ایلام برش‌نازک میکروسکوپی تهیه گردید. مطالعه کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های آهکی انجام شد. مطالعه مقاطع نازک نشان داد که این سنگ‌های آهکی از بایوکلاست و فسیل‌های پلاژیک فرامینیفر در زمینه میکرایت تشکیل شده است و بر اساس طبقه‌بندی دانه‌بندی (۱۹۶۲) نام‌گذاری شدند. نتایج بررسی مقاطع (انزری، محیط، نام سنگ و نوع تخلخل) در جدول ۱ و تصاویر مقاطع در شکل ۴ آورده شده است.

### عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر خصوصیات مهندسی سنگ‌آهک

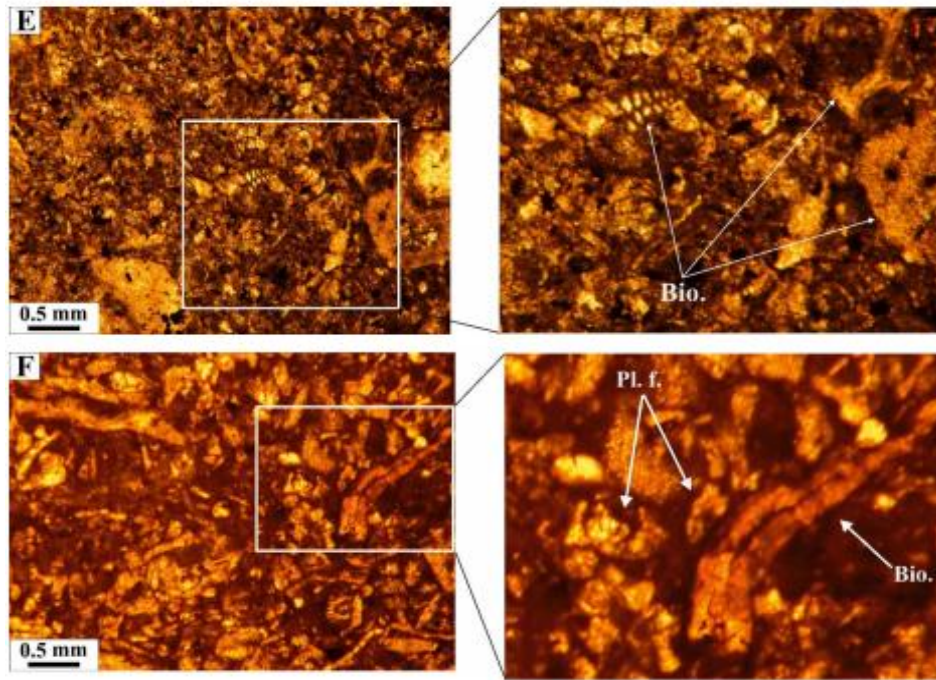
عوامل مهم و مؤثر در رفتارهای مهندسی سنگ‌آهک، درجه سخت‌شدگی، اندازه دانه‌ها، تخلخل و دانسیته، نفوذپذیری،

آسان‌تر است (اجل‌لوئیان و محمدی، ۲۰۱۱). اندازه بلورهای آهک‌های متراکم از سخت‌شدگی رسوبات سست منشأ می‌گیرد و اعتقاد بر این است که اندازه‌ی بلور کلسیت بر رفتار خردشدگی سنگ‌آهک تأثیر دارد (اجل‌لوئیان و محمدی، ۲۰۱۱).

می‌شوند. ترک‌ها با یک افزایش تنش محلی آغاز می‌شوند و می‌تواند از گوشه ذرات دیگر شکل بگیرند. به دلیل جهت‌های کلیواژ اجزای بلورهای کلسیت، آهک می‌تواند نسبت به تنش‌های محلی آسیب‌پذیر شود و کاهش اندازه آهک و خرد شدن آن نسبت به ماده‌ای سخت مثل کوارتز



شکل ۴. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی از افق‌های سازند ایلام. اختصارات - Pl. f: پلانکتونیک فرامینیفرا، Bio: بایوکلاست



ادامه شکل ۴. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی از افق‌های سازند ایلام. اختصارات - Pl. f: پلانکتونیک فرامینیفرها، Bio: بایوکلست

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

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

واحد حجم (V)، درصد جذب آب ( $Iv\%$ )، درصد تخلخل ( $n\%$ )، نسبت پوکی (e) و چگالی ذرات جامد (Gs) است. خواص فیزیکی سنگ بکر به بافت و ریز ساختارهای آن بستگی دارد. این ریزساختارها شامل مرز دانه‌ها، شکست و رخ می‌باشد. ریزشکست‌ها بر روی مقاومت و جهت شکست سنگ تأثیر می‌گذارد (شلبی و همکاران، ۲۰۰۷). میانگین نتایج اندازه‌گیری‌ها که شامل وزن واحد حجم، درصد جذب آب، درصد تخلخل و چگالی ذرات جامد می‌باشد. در جدول ۳ توصیف خصوصیات فیزیکی طبق رده‌بندی آنون (۱۹۷۹) و در جدول ۲ نتایج خصوصیات فیزیکی آورده شده است. براساس رده‌بندی ارائه شده توسط آنون (۱۹۷۹)، وزن واحد حجم در رده سنگ‌هایی با چگالی پایین تا خیلی بالا و تخلخل در رده خیلی پایین تا پایین قرار دارد.

### خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی

به منظور تعیین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک‌های سازند ایلام علاوه بر مشخص شدن خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مذکور مورد توجه قرار گرفت. این آزمون‌ها با روش‌های استاندارد به شرح زیر انجام و از نتایج آن‌ها برای تعیین ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استفاده گردید.

### 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 به وسیله آزمون‌های آزمایشگاهی طبق استاندارد (ISRM, 2007) تعیین شده‌اند. این ویژگی‌ها شامل وزن

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

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ‌آهک	
								واحد	پارامتر
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	۱/۲۸	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	$G_s$	
	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	۰/۲۱	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		

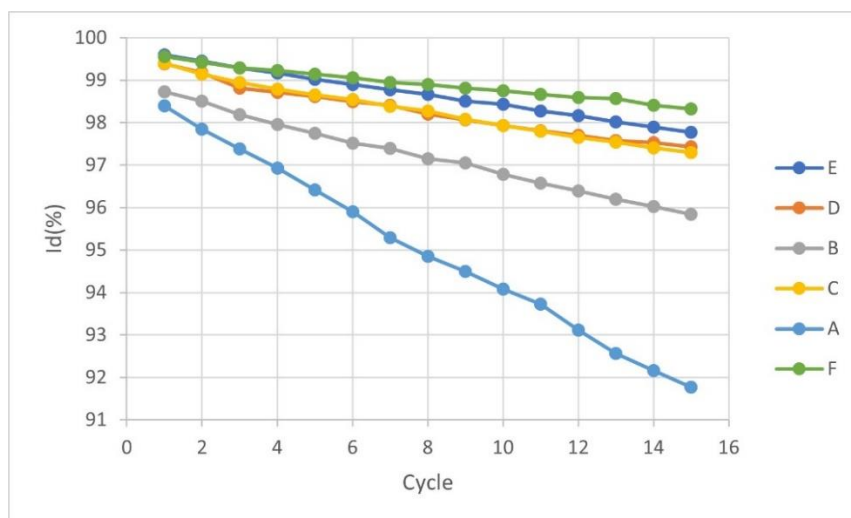


جدول ۳. طبقه‌بندی سنگ براساس درصد تخلخل، نسبت پوکی و وزن واحد حجم (آنون، ۱۹۷۹)

گروه	وزن واحد حجم (gr/cm <sup>3</sup> )	نسبت پوکی	تخلخل (%)	توصیف
۱	> ۲/۷۵	> ۰/۴۳	> ۳۰	خیلی بالا
۲	۲/۵۵ - ۲/۷۵	۰/۱۸ - ۰/۴۳	۱۵ - ۳۰	بالا
۳	۲/۲۰ - ۲/۵۵	۰/۰۵ - ۰/۱۸	۵ - ۱۵	متوسط
۴	۱/۸۰ - ۲/۲۰	۰/۰۱ - ۰/۰۵	۱ - ۵	پایین
۵	< ۱/۸	< ۰/۰۱	< ۱	خیلی پایین

خطی با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد (جدول ۴). سرعت سیر موج: به منظور اندازه‌گیری سرعت موج P در سنگ‌آهک از دستگاه سرعت صوت و مغزه‌های سنگی با قطر NX استفاده شده است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D2845 (2005) انجام شده است. آزمایش سرعت موج یکی از آزمایش‌های غیرمخرب و آسانی است که هم در محل و هم در آزمایشگاه می‌تواند انجام شود و به صورت روزافزون برای تعیین خصوصیات دینامیکی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. عوامل زیادی چون نوع سنگ، بافت، دانسیته، تخلخل، درصد رطوبت، فشار محصور کننده و دما بر سرعت انتشار امواج صوتی و ثابت الاستیک-دینامیک مؤثرند. به علاوه زون‌های هوازده‌گی و دگرسانی، صفحات لایه‌بندی و خصوصیات درزه‌ها (زبری، پرشدگی توسط آب، مواد پرکننده، شیب و امتداد) تأثیر مهمی بر روی سرعت لرزه‌ای دارد. در جدول ۶ طبقه‌بندی آنون برای سرعت موج و در جدول ۵ نتایج آزمایش سرعت موج در حالت خشک و اشباع آورده شده است.

دوام وارفتگی: دوام وارفتگی (SDI) معرف میزان مقاومت سنگ در برابر هوازده‌گی است که از طریق آزمایش دوام وارفتگی با قرار دادن کلوخه‌های سنگی در آب طی دو سیکل اندازه‌گیری می‌شود (قبادی و همکاران، ۲۰۲۱). در این تحقیق، به منظور ارزیابی اثر افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک‌شدگی بر روی دوام سنگ‌آهک‌ها و پیش‌بینی رفتار درازمدت آن‌ها در طی فرایند هوازده‌گی، این آزمون در ۱۵ سیکل انجام شده است. گمبل (۱۹۷۱)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام دو مرحله‌ای و فرانکلین و چاندر (۱۹۷۲)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله طبقه‌بندی کرده‌اند. در این آزمون شاخص دوام مطابق استاندارد (1998) ASTM D4644 محاسبه و انجام شده است. نتایج آزمایش دوام وارفتگی در شکل ۵ و جدول ۴ 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 به صورت



شکل ۵. نتایج آزمایش دوام وارفتگی در ۱۵ سیکل بر روی آهک‌های مورد آزمایش

جدول ۴. نتایج آزمایش دوام وارفتگی سنگ آهک‌های سازند ایلام

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	۹۹/۳۸	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	۹۸/۲۷	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> (%)	

جدول ۵. نتایج آزمایش سرعت موج نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند در حالت خشک و اشباع

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ آهک	
								پارامتر واحد	
۶۰	۲۲۵۹/۷۴	۱۷۶۵/۷۰	۱۶۰۲/۷۸	۱۴۵۱/۳۷	۱۴۶۹/۷۴	۱۲۵۱/۵۶	حداقل	Vp dry (m/s)	
	۴۸۱۱/۹۲	۴۷۱۵/۶۱	۳۵۰۷/۷۱	۴۱۹۶/۳۷	۳۴۸۰/۰۷	۲۴۵۸/۴۹	میانگین		
	۷۶۱۱/۹۴	۷۷۰۵/۳۳	۴۷۰۵/۸۸	۵۹۱۱/۹۵	۵۹۰۹/۰۹	۳۶۶۷/۷۱	حداکثر		
	۷۲۸/۵۱	۸۴۹/۲۷	۵۱۷/۸۱	۵۹۴/۲۲	۵۷۵/۰۷	۳۶۸/۸۱	Std error		
	۱۷۸۴/۵۰	۲۲۴۶/۹۸	۱۳۷۰	۱۵۷۲/۱۸	۱۴۰۸/۶۵	۹۰۳/۳۹	Std deviation		
۶۰	۱۴۹۱/۴۲	۱۱۶۵/۳۶	۱۰۵۷/۸۴	۹۵۷/۹۱	۹۷۰/۰۲	۸۲۶/۰۳	حداقل	Vs dry (m/s)	
	۳۱۷۵/۸۶	۳۱۱۲/۳۰	۲۳۱۵/۰۸	۲۷۶۹/۶۰	۲۲۹۶/۸۵	۱۶۲۲/۶۰	میانگین		
	۵۰۲۳/۸۸	۵۰۸۷/۵۰	۳۱۰۵/۸۸	۳۹۰۱/۸۸	۳۹۰۰	۲۴۲۰/۶۹	حداکثر		
	۴۸۰/۸۲	۵۶۰/۵۲	۳۴۱/۷۵	۳۹۲/۱۹	۳۷۹/۵۵	۲۴۳/۴۱	Std error		
	۱۱۷۷/۷۷	۱۴۸۳	۹۰۴/۲۰	۱۰۳۷/۶۴	۹۲۹/۷۰	۵۹۶/۲۴	Std deviation		
۶۰	۳۰۰۹/۴۰	۲۰۸۴/۱۶	۳۲۲۹/۳۹	۱۸۹۵/۳۰	۲۳۷۴/۶۷	۱۹۸۵/۴۲	حداقل	Vp sat (m/s)	
	۶۲۷۶/۱۱	۶۰۹۱/۷۲	۵۸۴۴/۲۹	۵۳۰۶/۴۸	۵۲۲۴/۴۳	۳۷۳۵/۶۴	میانگین		
	۸۶۵۳/۸۴	۸۹۲۸/۵۷	۹۴۳۳/۹۶	۹۲۹۱/۳۳	۷۴۶۲/۶۸	۵۵۱۷/۲۴	حداکثر		
	۶۶۲/۱۶	۸۰۸/۹۹	۷۵۴	۱۱۸۶/۷۵	۸۸۳/۲۱	۶۲۲/۳۵	Std error		
	۱۸۷۲/۸۹	۲۱۴۰/۳۹	۱۹۹۴/۹۱	۲۶۵۳/۶۶	۱۹۷۴/۹۳	۱۳۹۱/۶۲	Std deviation		
۶۰	۱۹۸۶/۲۰	۱۳۷۵/۵۵	۲۱۳۱/۴۰	۱۲۵۰/۹۰	۱۵۶۷/۲۸	۱۳۱۰/۳۸	حداقل	Vs sat (m/s)	
	۴۱۴۲/۲۳	۴۰۲۰/۵۳	۳۸۵۷/۲۳	۳۵۰۲/۲۷	۳۴۴۸/۱۲	۲۴۶۵/۵۲	میانگین		
	۵۷۱۱/۵۳	۵۸۹۲/۸۵	۶۲۲۶/۴۱	۶۱۳۲/۲۸	۴۹۲۵/۳۷	۳۶۴۱/۳۷	حداکثر		
	۴۷۳/۰۲	۵۳۳/۹۳	۴۹۷/۶۴	۷۸۳/۲۵	۵۸۲/۹۲	۴۱۰/۷۵	Std error		
	۱۲۳۶/۱۱	۱۴۱۲/۶۶	۱۳۱۶/۶۴	۱۷۵۱/۴۲	۱۳۰۲/۴۵	۹۱۸/۴۷	Std deviation		

جدول ۶. طبقه‌بندی سنگ (بکر یا توده‌سنگ) بر اساس سرعت موج طولی (آنون، ۱۹۷۹)

توصیف	سرعت صوت طولی (Km/S)
خیلی پایین	< ۲/۵
پایین	۲/۵ - ۳/۵
متوسط	۳/۵ - ۴
بالا	۴ - ۵
خیلی بالا	> ۵

بارنقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع انجام شده است. مقاومت کشش برزیلی آهک‌ها نیز با استفاده از مغزه‌هایی با نسبت طول به شعاع بزرگ‌تر از یک تعیین شده است. نتایج خصوصیات مکانیکی در جدول ۸ و ۹ آورده شده است. بر اساس رده‌بندی ارائه‌شده توسط دیر و میلر (۱۹۶۶) بر طبق جدول ۷ می‌توانیم سنگ‌ها را بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری در پنج دسته طبقه‌بندی کنیم:

### خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها

خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها نیز مطابق استاندارد (2007, ISRM) تعیین شده است. از مهم‌ترین خصوصیات مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. اندازه‌گیری این ویژگی مکانیکی در تمام پروژه‌های مهندسی که بر روی سنگ و یا درون آن اجرا می‌شود، الزامی است. همچنین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی سنگ آهک‌های سازند ایلام اندازه‌گیری شدند. آزمایش مقاومت

جدول ۷. رده‌بندی سنگ بکر بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری [دیر و میلر، ۱۹۶۶]

رده	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_c$ (psi)	$\sigma_c$ (Km/s <sup>2</sup> )	توصیف مقاومت
A	> ۲۲۱	> ۳۲۰۰۰	> ۲۲۵۰	خیلی بالا
B	۱۱۰-۲۲۱	۱۶۰۰۰-۳۲۰۰۰	۱۱۲۵-۲۲۵۰	بالا
C	۵۵-۱۱۰	۸۰۰۰-۱۶۰۰۰	۵۶۲-۱۱۲۵	متوسط
D	۲۸-۵۵	۴۰۰۰-۸۰۰۰	۲۸۱-۵۶۲	پایین
E	< ۲۸	< ۴۰۰۰	< ۲۸۱	خیلی پایین

جدول ۸. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند در حالت خشک

مجموع کل نمونه‌های مورد آزمایش	F	E	D	C	B	A	دامنه	افق سنگ آهک	
								پارامتر 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	۳/۳۳	۳/۵۱	۲/۵۴	حداقل	IS <sub>50</sub> (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		

جدول ۹. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نمونه‌های سنگ آهک در افق‌های مختلف سازند در حالت اشباع

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	
	۱۴/۲۹	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	
	۹/۳۲	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	Is <sub>50</sub> (MPa)
	۴/۵۲	۳/۹۴	۳/۹۱	۳/۲۱	۲/۸۸	۲/۲۵	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	

در هزینه آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی صرفه‌جویی خواهد شد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که درون یا بر روی پروژه‌های عمرانی یا معدنی اجرا شود. به منظور ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ارائه شده در این پژوهش از ۵ پارامتر آماری مجذور ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب تعیین اصلاح شده ( $R^2$  adjusted)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، استفاده شده است که از روابط ۲ و ۳ و ۴ بدست می‌آید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

همچنین جهت بررسی خطاهای موجود در روابط مربوط به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، از پارامتر آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) از رابطه (۳) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{N}} \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)،  $\bar{y}_i$  و  $\bar{x}_i$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده متغیرهای  $y_i$  و  $x_i$  هستند و  $N$  تعداد نمونه‌های آزمایش است.

$$R^2_{adjusted} = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-P-1} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $N$ : تعداد نمونه‌ها،  $R^2$ : ضریب تعیین و  $P$ : تعداد متغیرهای پیش‌بینی شده می‌باشد. رابطه‌ای ایده‌آل است که ضریب تعیین اصلاح شده، ارزش حسابی و ریشه

### ارزیابی همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی

رگرسیون خطی چندمتغیره: روش آنالیز رگرسیون چند متغیره برای بدست آوردن بهترین رابطه بین متغیرها، زمانی که بیش از یک پارامتر ورودی وجود داشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی موضوع اصلی روش رگرسیون چندمتغیره تولید یک ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی است. در این مطالعه متغیرهای مستقل مورد استفاده عبارتند از تخلخل، جذب آب و دانسیته و... که عموماً رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت ارتباط بین متغیرهای خروجی یا وابسته و متغیرهای ورودی یا مستقل بیان می‌شود که این موضوع در رابطه ۱ نشان داده شده است (عبدی و قاسمی‌دهنوی، ۲۰۱۹، مرادی و همکاران، ۲۰۲۲).

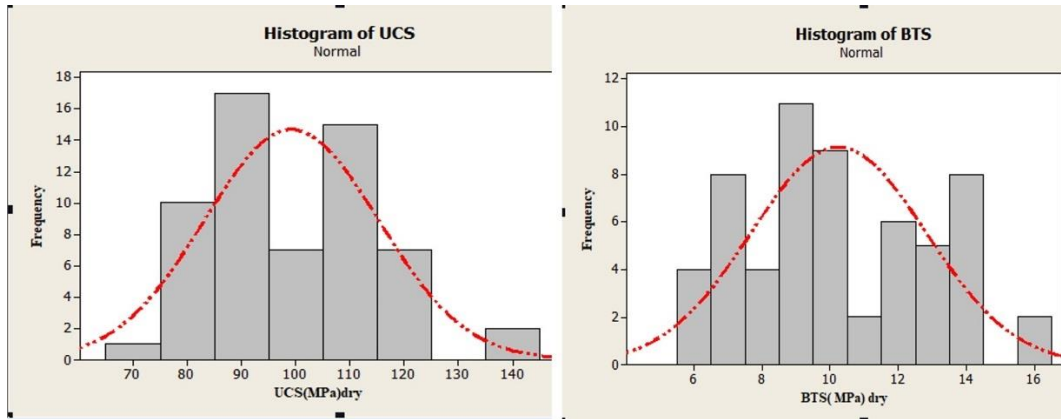
$$Y = C + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_n X_n \quad (1)$$

در این رابطه،  $Y$ : متغیر وابسته،  $C$ : ثابت،  $X_i$ : متغیرهای مستقل و ورودی‌های مسئله هستند و  $b_i$ : ضرایب رگرسیون می‌باشد.

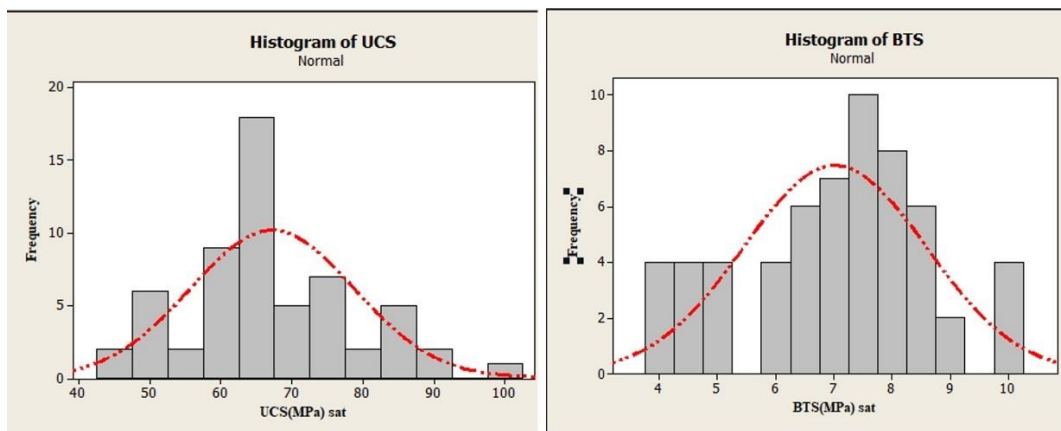
خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ شامل شناخت ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی است. با آگاهی از ویژگی‌های مذکور می‌توان با برقراری ارتباط بین آن‌ها روابط مناسبی به دست آورد. با داشتن چنین روابطی

آماري پرداخته شده است. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از نمودار هیستوگرام فراوانی برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای و مقاومت کشش برزیلی در حالت کلی و برای تمام افق‌ها در دو حالت خشک و اشباع ترسیم شده است استفاده شده است (شکل‌های ۶ تا ۸). همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود داده‌ها و توزیع احتمال نرمال یا تقریباً نرمال می‌باشد.

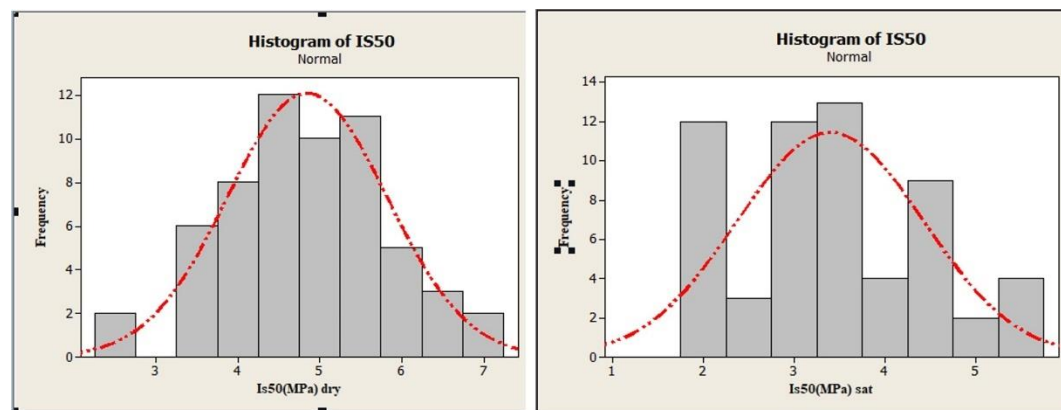
مربعات خطای آن به ترتیب ۱، ۱۰۰ درصد و صفر باشد (کراری و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهش حاضر خواص فیزیکی و مکانیکی افق‌های مختلف سازند ایلام در مقطع تیپ بررسی شده است. پس از آزمون‌های ذکر شده، تحلیل رگرسیونی چندگانه ابتدا برای هر افق و سپس به صورت کلی انجام شده است. تحلیل رگرسیونی مدل‌هایی را برای تخمین پارامترها ارائه می‌دهند. در ابتدا به بررسی نرمال بودن داده‌ها دقت روابط ارائه شده با استفاده از روش‌های



شکل ۶. هیستوگرام فراوانی برای مقاومت فشاری تک محوری و کشش برزیلی برای تمام افق‌ها در حالت خشک



شکل ۷. هیستوگرام فراوانی برای مقاومت فشاری تک محوری و کشش برزیلی برای تمام افق‌ها در حالت اشباع



شکل ۸. هیستوگرام فراوانی شاخص بارنقطه‌ای برای تمام افق‌ها در حالت خشک و اشباع

و ضرایب تعیین بین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک سازند ایلام در مقطع تیپ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱۰ (حالت خشک) مشاهده می‌کنید (مدل ۱۷ و ۱۸) بیشترین ضریب تعیین و کمترین ریشه مربعات خطا (RMSE) را مشاهده می‌کنید که در مدل ۱۷ رابطه بین دانسیته خشک و درصد جذب آب با شاخص بار نقطه‌ای است و در مدل ۱۸ رابطه بین سرعت صوت و دانسیته خشک با مقدار شاخص بار نقطه‌ای می‌باشد. در جدول ۱۱ (حالت اشباع) مدل‌های ۲ و ۳ بیشترین ضریب تعیین و کمترین ریشه مربعات خطا (RMSE) را مشاهده می‌کنید که در مدل ۲ رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل با مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. در مدل ۳ رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و درصد جذب آب با مقاومت کشش برزیلین است. پس از ارائه مدل به کمک رگرسیون چندمتغیره برای افق‌های مختلف سازند با استفاده از پارامترهای آماری مختلف به بررسی دقت روابط بدست آمده پرداخته شده است.

با توجه به اینکه مطالعات سنگ‌شناسی در سنگ‌های آهک، تأثیر زیادی بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک دارد. مقدار جذب آب سنگ‌آهک‌ها کمتر از یک درصد است که با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و مقاومت سنگ‌ها مقادیر به دست آمده قابل انتظار است. با افزایش مقاومت سنگ و کاهش تخلخل مقدار جذب آب کاهش می‌یابد. نوع سیمان نیز بر روی ویژگی‌های مقاومتی و انحلال‌پذیری سنگ‌آهک تأثیر دارد. به طوری که سیمان میکرایتی و ریزیلور بودن باعث افزایش مقاومت می‌شود. در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی برای برآورد سریع خصوصیات مکانیکی سنگ‌های یک پروژه، تعیین ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت کششی برزیلی کمک مؤثری به کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی خواهد داشت. از این‌رو مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت برزیلی و بارنقطه‌ای رابطه مستقیم دارد و با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری مقاومت کششی و بارنقطه‌ای نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ معادلات

جدول ۱۰. روابط تجربی به دست آمده بین خصوصیات مهندسی سنگ‌آهک ایلام در حالت خشک

RMSE	$R^2_{adjusted}$	$R^2$	رابطه تجربی	مدل	افق‌های سازند ایلام
1.18	0.9744	0.987	$UCS = 5.835 Is50 + 9.913 BTS - 3.582$	۱	A
3.37	0.790	0.895	$UCS = 9.867 Is50 - 2.245 n + 54.11$	۲	
0.36	0.771	0.885	$BTS = -1.141 Iv + 1.197 Is50 + 3.82$	۳	B
2.01	0.962	0.981	$UCS = 28.466 \gamma_d + 3.670 BTS - 672.45$	۴	
0.31	0.821	0.910	$BTS = -2.749 Iv + 0.00059 Vp + 7.69$	۵	
1.87	0.966	0.983	$UCS = -88.73 Iv + 0.0028 Vp + 133.39$	۶	C
3.29	0.91	0.957	$UCS = 7.11 Is50 - 22.34 n + 97.98$	۷	
4.83	0.81	0.909	$UCS = 13.46 \gamma_d - 40.39 Iv - 229.14$	۸	
0.37	0.795	0.897	$Is50 = 0.73 \gamma_d - 2.33 Iv - 13.39$	۹	
0.54	0.54	0.774	$BTS = 1.27 \gamma_d - 1.03 n - 22.24$	۱۰	D
3.85	0.855	0.927	$UCS = 14.357 Is50 + 6.125 BTS - 49.70$	۱۱	
4.36	0.814	0.907	$UCS = 37.81 \gamma_d + 9.30 Is50 - 945.39$	۱۲	
4.90	0.758	0.879	$UCS = -34.93 Iv + 17.324 Is50 + 27.05$	۱۳	
0.46	0.753	0.876	$BTS = 2.47 Is50 + 0.00038 Vp - 2.37$	۱۴	
1.65	0.946	0.973	$Is50 = 0.207 \gamma_d - 0.723 n + 0.750$	۱۵	E
0.39	0.769	0.884	$BTS = 0.471 \gamma_d - 1.615 n + 2.140$	۱۶	
0.12	0.966	0.983	$Is50 = 0.702 \gamma_d - 1.59 Iv - 12.17$	۱۷	
0.12	0.970	0.985	$Is50 = 0.662 \gamma_d + 0.00016 Vp - 12.50$	۱۸	F
2.23	0.897	0.948	$UCS = 0.650 BTS + 27.14 Is50 - 60.65$	۱۹	
2.23	0.898	0.949	$UCS = 28.49 Is50 - 4.72 n - 55.77$	۲۰	
1.68	0.944	0.972	$UCS = 15.99 Is50 + 0.0036 Vp - 2.30$	۲۱	
0.97	0.774	0.887	$BTS = 0.899 \gamma_d + 7.91 Is50 - 57.86$	۲۲	
0.93	0.789	0.894	$BTS = 0.00081 Vp + 5.73 Is50 - 24.55$	۲۳	

UCS: Uniaxial compressive strength (MPa),  $I_{S50}$ : Point load index (MPa), BTS: Brazilian tensile strength (MPa), n: porosity (%), Iv: Water absorption (%),  $\gamma$ : unit weight (kN/m<sup>3</sup>),  $V_p$ : P-wave velocity (m/s)

جدول ۱۱. روابط تجربی به دست آمده بین خصوصیات مهندسی سنگ آهک ایلام در حالت اشباع

RMSE	$R^2_{adjusted}$	$R^2$	رابطه تجربی	مدل	افق‌های سازند ایلام
4.34	0.385	0.692	$UCS = 2.218 BTS + 2.902 \gamma_{sat} - 21.17$	۱	A
0.04	0.972	0.986	$BTS = 0.985 Is50 - 0.0046 n + 2.464$	۲	
0.04	0.972	0.986	$BTS = 0.979 Is50 - 0.025 Iv + 2.485$	۳	
0.58	0.474	0.537	$BTS = 0.296 Is50 - 3.20 Iv + 6.51$	۴	B
2.06	0.200	0.600	$UCS = 1.090 BTS - 30.56 n + 96.68$	۵	
3.47	0.638	0.819	$UCS = 9.64 Is50 + 1.455 \gamma_{sat} - 1.230$	۶	C
3.29	0.676	0.838	$UCS = 6.02 Is50 - 12.96 Iv + 56.08$	۷	
4.77	0.313	0.656	$UCS = 2.77 BTS + 8.122 \gamma_{sat} - 166.93$	۸	
3.31	0.673	0.837	$UCS = 1.79 BTS - 22.51 Iv + 67.20$	۹	
0.48	0.716	0.858	$BTS = 1.25 Is50 + 0.56 \gamma_{sat} - 11.31$	۱۰	
0.45	0.722	0.861	$BTS = 0.87 Is50 + 0.00018 Vp + 3.80$	۱۱	D
5.39	0.222	0.611	$UCS = 6.75 Is50 + 9.18 BTS - 31.19$	۱۲	
4.51	0.446	0.723	$UCS = 19.455 \gamma_{sat} - 5.66 n - 440.08$	۱۳	
0.12	0.788	0.894	$BTS = 0.677 \gamma_{sat} - 0.411 n - 9.55$	۱۴	
1.20	0.965	0.982	$Is50 = 0.085 \gamma_{sat} - 0.974 n + 3.06$	۱۵	
0.64	0.980	0.990	$UCS = 4.20 Is50 + 2.53 \gamma_{sat} - 9.17$	۱۶	E
0.56	0.984	0.992	$UCS = 5.04 Is50 - 4.24 n + 60.32$	۱۷	
0.83	0.968	0.984	$UCS = 5.86 Is50 + 0.00041 Vp + 49.27$	۱۸	
1.25	0.937	0.968	$Is50 = 0.529 BTS + 0.52 \gamma_{sat} - 14.58$	۱۹	
1.53	0.980	0.990	$Is50 = 0.71 BTS - 0.98 n - 0.82$	۲۰	F
6.50	0.583	0.791	$UCS = 6.68 BTS + 12.10 \gamma_{sat} - 303.37$	۲۱	
5.31	0.727	0.863	$UCS = 5.79 BTS - 28.99 n + 56.61$	۲۲	
0.17	0.947	0.973	$Is50 = 1.37 BTS - 0.101 n - 6.93$	۲۳	

UCS: Uniaxial compressive strength (MPa),  $I_{S50}$ : Point load index (MPa), BTS: Brazilian tensile strength (MPa), n: porosity (%), Iv: Water absorption (%),  $\gamma$ : unit weight (kN/m<sup>3</sup>),  $V_p$ : P-wave velocity (m/s)

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مقدار شاخص بارنقطه‌ای ( $I_{S50}$ ) افزایش و وزن واحد حجم اشباع ( $\gamma_{sat}$ ) افزایش یافته است. یعنی رابطه مستقیم برقرار است و شیب مثبت می‌باشد. رابطه شکل ۱۰ به صورت زیر می‌باشد:

$$UCS = 4.9307 I_{S50} \text{ (MPa)} + 2.975 \gamma_{sat} \text{ (kN/m}^3\text{)} - 27.479$$

#### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، تحلیل و بررسی نمودارهای رسم شده در مورد سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در مقطع تیپ، نتیجه می‌شود که 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.

#### روابط مقاومت فشاری و مقاومت کشش برزیلین برای

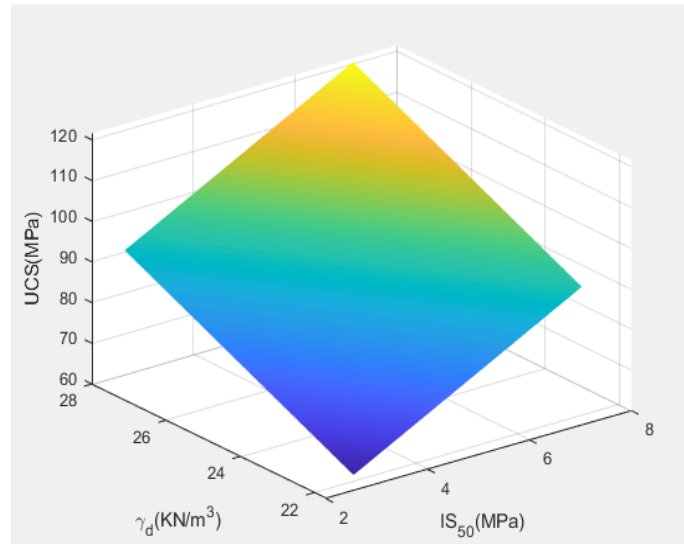
##### تمام افق‌های سازند ایلام

الف) در حالت خشک: در شکل ۹ تصویر سه‌بعدی سطوح بین مقاومت فشاری تک‌محوری با دانسیته خشک و شاخص بارنقطه‌ای در حالت خشک رسم شده است. همان‌طور که در تصویر مشخص است با افزایش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مقدار شاخص بارنقطه‌ای ( $I_{S50}$ ) و همین‌طور وزن واحد حجم خشک سنگ ( $\gamma_d$ ) افزایش یافته است. یعنی رابطه مستقیم برقرار است و شیب مثبت می‌باشد. رابطه شکل ۹ به صورت زیر می‌باشد:

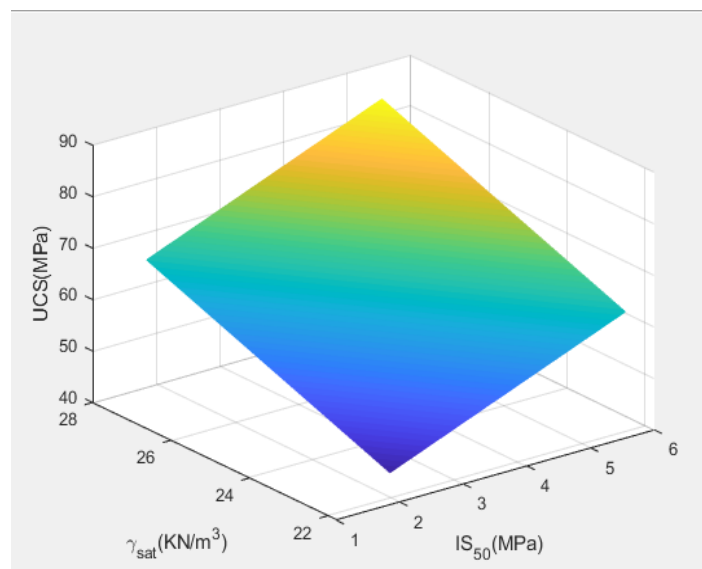
$$UCS = 6.701 I_{S50} \text{ (MPa)} + 4.473 \gamma_d \text{ (kN/m}^3\text{)} - 49.897$$

ب) در حالت اشباع: در شکل ۱۰ رابطه سه‌بعدی سطوح

بین مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم اشباع ( $\gamma_{sat}$ ) و شاخص بارنقطه‌ای در حالت اشباع رسم شده است. همان‌طور که در تصویر مشخص است با افزایش مقدار



شکل ۹. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم و شاخص بارنقطه‌ای در حالت خشک



شکل ۱۰. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم و شاخص بارنقطه‌ای در حالت اشباع

سرعت امواج در سنگ با خصوصیات سنگ‌شناسی و ویژگی‌های الاستیک سنگ بکر هم در ارتباط است. به همین دلیل مقادیر سرعت امواج در سنگ‌ها و خصوصیات مکانیکی آن‌ها قابل انطباق می‌باشند. بر اساس رده‌بندی ارائه‌شده توسط دیر و میلر (۱۹۶۶) سنگ‌های آهک سازند ایلام از نظر میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک و اشباع در رده متوسط قرار داد. با توجه به رگرسیون‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی انطباق خوبی را با هم نشان می‌دهد و اکثر روابط دارای ضریب تعیین قابل قبولی هستند. با روابط تجربی بدست آمده در این تحقیق تخمین قابل قبول از خصوصیات مهندسی با هزینه کم امکان‌پذیر است.

براساس رده‌بندی گمبل، تمامی سنگ‌آهک‌های این سازند در رده دوام و ارتنگی از کمی مقاوم تا خیلی مقاوم و براساس رده‌بندی فرانکلین و چاندررا تمام نمونه‌ها در رده خیلی مقاوم تا شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد با افزایش درصد جذب آب نمونه‌های سنگ‌آهک مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد جذب آب فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. که ناپایداری سطوح ضعف را به همراه خواهد داشت. افزایش درصد جذب آب در سنگ‌آهک افزایش سرعت موج را موجب شده است. این موضوع به دلیل آن است که سرعت امواج از میان آب بیش‌تر از هوا می‌باشد.



- 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).
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Kan, T. K (1993) Rock physics- the link between rock properties and AVO response in Castagna, J. P., and Backus, M. M., Eds., *Offset-dependent reflectivity-Theory and practice of AVO analysis*", Society of Explorat.
- Chang, C., Zoback, M. D., & Khaksar, A (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3-4): 223-237.
- Dhakal, G., Yoneda, T., Kato, M., & Kaneko, K (2002) Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 65(1): 31-45.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional textures.
- Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G (2009) Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: test results and empirical relations. *Engineering Geology*, 108(3-4): 199-207.
- Deere, D. U., & Miller, R. P (1966) Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ At Urbana Dept of Civil Engineering.
- Franklin, J. A. Chandra, A (1972) The Slake durability test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9: 325-341.
- 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., 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., & Aliani, F (2020) The study of relationship weathering, mineralogical and texture of peridotite rocks with engineering geological properties (Case study: peridotite Harsin city, Kermanshah province). *New Findings in Applied Geology*, 14(27): 43-54. doi: 10.22084/nfag.2019.19208.1375.
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., Aliani, F (2020) The study of engineering geological properties of peridotites in Harsin Kermanshah province (A

## 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 هیات تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

- 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.
- ASTM D4644-87 (1998) Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks. West Conshohocken ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/D4644-87R98>.
- ASTM, D (2005) 2845-05, Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. ASTM International Standards Worldwide.
- Aufmuth, R. E (1973) A systematic determination of engineering criteria for rock. *Bulletin Association Engineering Geology*, 11: 235-245.
- Abdi, Y., Ghasemi Dehnavi, A (2019) Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of sandstones using artificial neural network and multiple regression analysis. *New Findings in Applied Geology*, 13(26), 45-54. doi: 10.22084/nfag.2019.17545.1341 (in persian).
- Ahmadi khounsaraki, V., Uromeihy, A., Madanipour, S., Amiri, M (2023) Evaluation of geomechanical properties of argillite rocks in the region of south Makran (Chabahar-Nikshahr railway). *New Findings in Applied Geology*, 17(33): 150-168. (in persian).
- Azarafza, M., Ghazifard, A., Akgün, H., Asghari-Kaljahi, E (2019) Geotechnical characteristics and empirical geo-engineering relations of the South Pars Zone marls, Iran, *Geomechanics and Engineering, An International Journal*, Techno press, 19(5): 393-405.
- Ajalloeian, R., Mohammadi, M (2011) Evaluation of geomechanical characteristics of Asmari limestone in Khersan dam sites. *Journal of Engineering Geology*, 5(1): 1059-1076 (in persian).
- Bruno, G., Vessia, G., & Bobbo, L (2013) Statistical method for assessing the uniaxial compressive strength of carbonate rock by Schmidt hammer tests performed on core samples. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(1): 199-206.

- Karakul, H., & Ulusay, R (2013) Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock mechanics and rock engineering*, 46: 981-999.
- Lashkaripour, G. R., Rastegarnia, A., & Ghafouri, M (2018) Assessment of brittleness and empirical correlations between physical and mechanical parameters of the Asmari limestone in Khersan 2 dam site, in southwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 138: 124-132.
- Moradi, S., Amiri, M., Rahimi Shahid, M., & Karrari, S. S (2022) The presentation of simple and multiple regression relationships to the evaluation of uniaxial compressive strength sedimentary and pyroclastic rocks with usage experimental of the Schmidt hammer. *New Findings in Applied Geology*, 16(32): 92-108. (in persian).
- 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).
- Pickett, G. R (1963) Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum technology*, 15(06): 659-667.
- Rahimi Shahid, M., Amiri, M., lashkaripour, G., Moradi, S (2022) The estimation of Hamedan limestone brittleness index using point load index and porosity test. *Geopersia*, 12(2): 331-352.
- Read, J. R. L., Thornton, P. N., & Regan, W. N (1980) A rational approach to the point load test, *Proc. Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*.
- 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.
- Torabi-Kaveh, M., Naseri, F., Saneie, S., & Sarshari, B (2015) Application of artificial neural networks and multivariate statistics to predict UCS and E using physical properties of Asmari limestones. *Arabian journal of Geosciences*, 8(5): 2889-2897.
- Tsiambaos, G., & Sabatakakis, N (2004) Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 72(3-4): 261-273.
- Uyanık, O., Sabbağ, N., Uyanık, N. A., & Öncü, Z (2019) Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8): 6003-6016.
- case study). *Journal of Engineering Geology*, 14 (1): 105-132 (in persian).
- Gobadi, M. H., Mohamadian, M., Mohseni, H., & Karami, R (2014) Effects of engineering geological properties of Gachsaran Formation gypsum on karst development (Khuzestan, Ramhormoz). *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 6 (3-4): 1-16 (in persian).
- Gobadi, M. H., Mohseni, H., & Rasooli Farah, M. R (2009) Study of engineering geological properties of Asmari limestone in the north-east Masjed-Suliman. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 2(1-2): 1-18 (in persian).
- Ghafouri, M., Rastegarnia, A., & Lashkaripour, G. R (2018) Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks. *Journal of African Earth Sciences*, 137: 22-31.
- Gamble, J. C (1971) Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 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.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamsehchiyan, M., Zarei Sahamieh, R., & Abdi, Y (2016) A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(10): 1-12.
- Kahraman, S. A. İ. R., Gunaydin, O., & Fener, M (2005) The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(4): 584-589.
- Karrari, S. S., Heidari, M., Hamidi, J. K., & Teshnizi, E. S (2022) Estimation of drilling rate index values of granitic rocks with their mineralogical properties using different estimation models. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9): 1-17.
- Katz, O., Reches, Z., & Roegiers, J. C (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 37(4): 723-728.
- Kianpour, M., Sayari, M., Uromeihy, A., & Nikudel, M (2013) A Fuzzy Model to Prediction of Shear Strength Parameters of Shemshak Formation Shales. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 23(89): 11-20. doi: 10.22071/gsj.2013.44014 (in persian).

## The relationship between petrographical, physical, and mechanical properties in Ilam formation limestone

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

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

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

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

\* lashkaripour@um.ac.ir

Received: 2023.1.24 Accepted: 2023.5.21

### Abstract

The frequency of limestone has caused to be encountered in different projects of engineering. The Ilam Formation is one of the formations that is widely spread in the Zagros Mountains, and in the sample cutting, it contains 195 meters of cream-colored limestone. Due to the extent of this formation, many projects have been performed 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. The aim of this study is to investigate and introduce the engineering geological features of Ilam formation limestones in the type section. The Ilam Formation is a challenge in various projects like other formations with carbonate units. Especially, when the mentioned units are different in terms of lithology, physical, and mechanical. In order to identify the characteristics and engineering behavior of these rocks, 60 blocks were selected from different limestone horizons of the Ilam Formation and were transferred to the laboratory. Then, the physical and mechanical properties and lithology characteristics of limestones are determined. The samples have been used to test the physical properties, durability, point load index, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and wave velocity. The results of the multivariate regression showed that the differences between petrological and physical properties have led to a variation in their mechanical properties. Statistical indices such as  $R^2$ ,  $R^2_{adjusted}$ , RMSE have been evaluated by Minitab 16 software, and the relationship between physical and mechanical properties was determined. Based on the results, there is a higher reliability coefficient for estimating mechanical properties than other properties in the dry condition compared to the saturated condition. The results of this research showed that lithological and physical characteristics play an important role in the mechanical properties of Ilam limestones.

**Keywords:** Lithological properties, Physical properties, Mechanical properties, Limestone, Ilam formation.