

## بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌ها (مطالعه موردی: شهرستان هرسین، استان کرمانشاه)

محمدحسین قبادی، مهرداد امیری، فرهاد آلیانی؛

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه

پذیرش ۹۷/۱۱/۱۲

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۵/۰۴

### چکیده

بخش اعظم شرق و جنوب شرق استان کرمانشاه از رخنمون پریدوتیت‌ها تشکیل شده است. شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌های هرسین به شناخت عمومی زمین‌شناسی مهندسی محل کمک زیادی می‌کند. هدف این مقاله بررسی و معرفی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌های هرسین در استان کرمانشاه است. در این پژوهش، به منظور شناخت خصوصیات و رفتار مهندسی این سنگ‌ها، ۱۵ بلوک از پریدوتیت‌های هرسین انتخاب شد و برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه انتقال داده شد. خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پریدوتیت‌ها تعیین شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش‌های سختی چکش اشमित، دوام و ارتفگی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کشش برزیلی و سرعت موج قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی منجر به تغییر در خصوصیات مکانیکی آن‌ها شده است. با استفاده از آنالیزهای رگرسیون نرم‌افزار Excell، ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پریدوتیت‌ها تعیین شد. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان انطباق بیش‌تری بین نتایج خصوصیات مکانیکی در حالت خشک نسبت به اشباع وجود دارد. بیش‌ترین انطباق بین آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS) با سختی اشमित (SHV) در حالت خشک است که میزان ضریب تعیین ( $r^2$ ) برابر ۰/۹۵ است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات سنگ‌شناسی، خصوصیات فیزیکی، خصوصیات مکانیکی، پریدوتیت، هرسین.

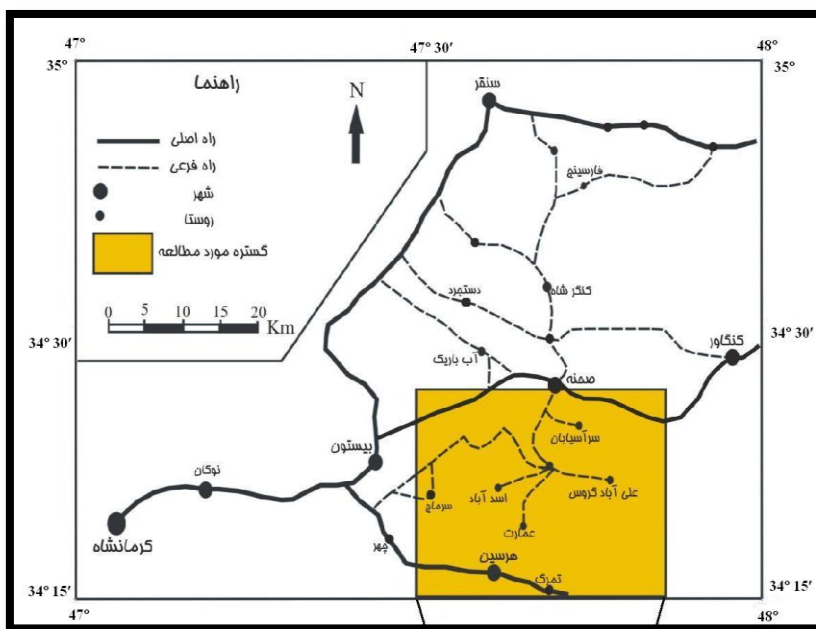
### مقدمه

پریدوتیت‌ها از سنگ‌های سری افیولیتی هستند. مباحث مربوط به سرزمین‌های افیولیتی و از جمله بررسی کاربردی کانی‌شناسی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پریدوتیت‌ها به دلیل اهمیت سنگ‌شناختی، زمین‌شناسی مهندسی و کاربردهایی که در صنایع دارد مورد علاقه زمین‌شناسان است. پریدوتیت‌ها به دلیل تنوع در ترکیب سنگ‌شناسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بسیار متغیری دارند [۴۳]. به همین دلیل آگاهی از خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل آن‌ها به پیش‌بینی رفتار مهندسی این سنگ‌ها کمک می‌کند. سال ۲۰۰۰ ارزیابی خصوصیات مکانیکی سنگ با استفاده از چکش اشمیت مورد توجه کاتز و همکاران<sup>۱</sup> قرار گرفت. نامبردگان، روابطی را برای سنجش ویژگی‌های مکانیکی سنگ مانند مقاومت بر اساس عدد سختی‌اشمیت ارائه کردند [۳۴]. داکال و همکارانش<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) روابط بین دوام و شکستگی سنگ را با خصوصیات کانی‌شناسی مورد توجه قرار دادند [۲۸]. قهرمان و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) اثر تخلخل روی روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت بار نقطه‌ای را بررسی کردند [۳۵]. چانگ و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۶) روابط تجربی بین مقاومت و خصوصیات فیزیکی سنگ ارائه کردند [۲۴]. در این پژوهش وابستگی مقاومت و دوام‌پذیری به درصد تخلخل، رابطه بین خصوصیات کانی‌شناسی با مقاومت و دوام مشخص شده است. به علت گسترش زیاد سنگ‌های آذرین به‌ویژه پریدوتیت در زاگرس، شمال شرق و ایران مرکزی، توجه به خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی آن‌ها ضروری است. احداث سازه در درون و یا روی پریدوتیت‌ها و انتخاب به‌منظور منابع قرضه سنگی به شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی آن وابسته است. در این مقاله ضمن بررسی صحرائی و آزمایشگاهی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌ها بررسی شده است.

- 
1. Katez and et al
  2. Dhakal and et al
  3. Kahraman and et al
  4. Chang and et al

### موقعیت جغرافیایی و اقلیم

شهرستان هرسین در جنوب شرقی استان کرمانشاه واقع شده است که از جنوب به شهرستان دلفان در استان لرستان، از شمال به شهرستان صحنه، از غرب به شهرستان کرمانشاه و از شرق به نهاوند محدود می‌شود. مرکز این شهرستان شهر هرسین است. این شهرستان از دو بخش مرکزی (به مرکزیت شهر هرسین) و بیستون (به مرکزیت شهر بیستون) تشکیل شده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۵۴۹ متر است. فاصله هرسین از تهران ۵۶۶ کیلومتر است. طول جغرافیایی هرسین ۴۷ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض جغرافیایی آن ۳۴ درجه و ۱۶ دقیقه نسبت به نصف‌النهار گرینویچ است. هرسین منطقه‌ای کوهستانی است، ارتفاعات موجود که بیش‌تر در جهت شمال غربی و جنوب شرقی امتداد یافته این شهرستان را محصور کرده‌اند. دامنه‌های کم‌شیب، دره‌های عریض، جلگه‌های آبرفتی و سراب‌ها از مهم‌ترین ویژگی‌های طبیعی منطقه هرسین به‌شمار می‌روند [۱]. در شکل ۱ نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده

## زمین‌شناسی منطقه

منطقه هرسین از نظر موقعیت زمین‌شناسی در محدوده زون زاگرس واقع است که مشتمل بر واحدهای سنگی گوناگون از زون‌های سندج- سیرجان و زاگرس چین‌خورده است. واحدها عمدتاً نابرجا است و از نظر رخساره باهم متفاوت هستند. واحدهای سنگی موجود در این ورقه عبارت است از:

۱. واحدهای چینه‌ای زون زاگرس چین‌خورده
۲. واحدهای چینه‌ای زون سندج- سیرجان الف) مجموعه افیولیتی ب) واحدهای رسوبی سندج- سیرجان ج) واحدهای رسوبی آتشفشانی سنوزویک د) واحدهای رسوبی بیستون ه) واحدهای رسوبی دگرگونی سنقر کنگاور [۱].

## مجموعه افیولیتی کرمانشاه

افیولیت کرمانشاه یک کمپلکس افیولیتی در غرب ایران است که از سیستم کوهزایی زاگرس تبعیت می‌کند. این مجموعه افیولیتی نزدیک به انتهای شمال غربی رشته‌کوه زاگرس واقع گردیده است. این افیولیت‌ها بخشی از افیولیت زاگرس عمان است که آن نیز خود جزئی از کمربند افیولیتی آلپ- هیمالیا است. در واقع افیولیت‌های کرمانشاه، نیریز و اسفندقه در ایران، هاتای، قزل داغ و کیلو در ترکیه و افیولیت‌های بارباسیت در سوریه پوسته اقیانوسی تیبسی هستند که در امتداد زون جوش‌خورده زاگرس- بتلیس، افیولیت‌های ایران- عمان در آسیا را به افیولیت ترودوس در مدیترانه متصل می‌کند. فرورانش افیولیت‌ها در زاگرس، در اثر برخورد جزایر قوسی با حاشیه عربی صورت گرفته است. به این ترتیب بی‌نظمی موجود در حاشیه قاره را مرتبط با زایش افیولیت‌ها و برگشت مجدد آن‌ها به حاشیه قاره می‌دانند. این مسئله ممکن است ماهیت ناپیوسته زیر زون‌های افیولیتی، که تنها در کرمانشاه و نیریز برون‌زد دارد را توضیح دهد [۶]، [۷]. افیولیت‌های کمربند زاگرس در امتداد بلافضل جنوب باختری راندگی اصلی زاگرس در دو بخش پهن و از هم جدا از مجموعه افیولیتی- رادیولاریتی رخنمون دارد که هر بخش به‌صورت کمانی و دارای تحذب به‌سمت جنوب‌غرب است. یکی کمان پشت‌کوه در کرمانشاه و دیگری کمان فارس در نیریز

[۷]. از نظر ترکیب و ساخت افیولیت‌های کرمانشاه و نی‌ریز با مجموعه افیولیتی- رادیولاریتی کوه‌های عمان و با افیولیت‌های حاشیه عربستان شباهت زیادی دارد و چنان‌که در بالا اشاره شد این دو کمان افیولیتی بخشی از نوار افیولیتی به‌طول تقریبی ۳۰۰۰ کیلومتر است که به‌طور متوسط از سوریه شروع و پس از گذر از جنوب ترکیه و زاگرس به عمان می‌رود [۷].

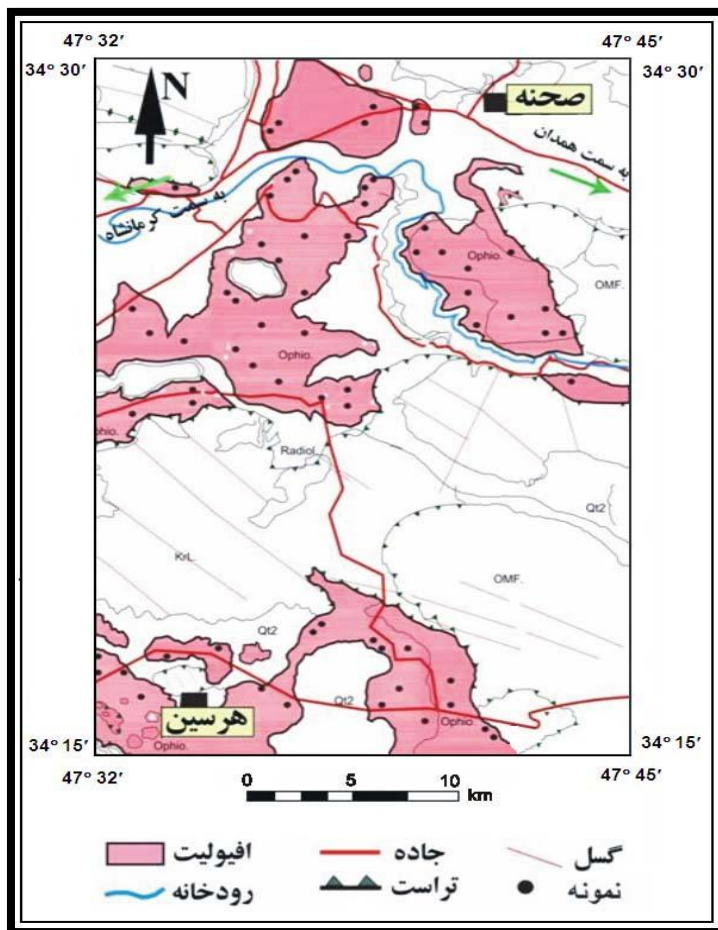
به نظر برو (۱۹۸۹) فرارانش افیولیت‌های کرمانشاه به آشکوب ماستریشترین محدود می‌شود [۶]. در حالی‌که به نظر حلم (۱۹۷۶) و ریکو (۱۹۷۴)، نقل از (محجل و همکاران، ۲۰۰۳)، فرارانش افیولیت‌های نی‌ریز مربوط به آشکوب کامپانین است. افیولیت‌ها در منطقه کرمانشاه در ناحیه صحنه و هرسین رخنمون دارند و تحت عنوان (افیولیت‌های صحنه- هرسین) نام‌گذاری شده‌اند [۲]. برو (۱۹۷۰) معتقد است که این کمان شامل سه برونزد است:

- اولین برونزد در شمال شرق کرمانشاه (ناحیه صحنه) متشکل از سنگ‌های اولترابازیک دانه‌ای، پدیدت‌ها، هارزبورژیت‌ها و گابروها است.
- دومین برونزد در جنوب شرق مجموعه قبلی یعنی در مرحله ارگانا رخنمون دارد که برخلاف برونزد قبلی به‌شدت تکتونیزه است.
- سومین برونزد در ناحیه هرسین متشکل از یک توده سرپانتینیت است که در آن ورقه‌هایی از آهک‌های باز تبلور یافته و احتمالاً متعلق به تریاس وجود دارد [۲]، [۷].

در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه بررسی شده نشان داده شده است [۵].

## مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی خصوصیات زمین‌شناسی پدیدت‌های منطقه هرسین، تعداد ۱۵ بلوک مناسب انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شدند. بر این اساس از نمونه‌های سنگی جمع‌آوری شده، تعداد ۱۵ مغزه استوانه‌ای به قطر ۵۴ میلی‌متر تهیه و آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مطابق با دستورالعمل (ISRM, 2007) و (ASTM, 2001) روی آن‌ها انجام شد. در راستای این پژوهش، پس از نمونه‌برداری از منطقه بررسی شده و تهیه مغزه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها با تهیه مقاطع نازک از آن‌ها و بررسی با میکروسکوپ پلاریزان پرداختیم. هم‌چنین، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پدیدت‌ها تعیین شد. در جدول ۱ علامت‌های اختصاری استفاده شده در این پژوهش آورده شد.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه بررسی شده [اقتباس از نقشه ۱:۵۰۰۰۰ هرسین]

### بررسی‌های سنگ‌شناسی

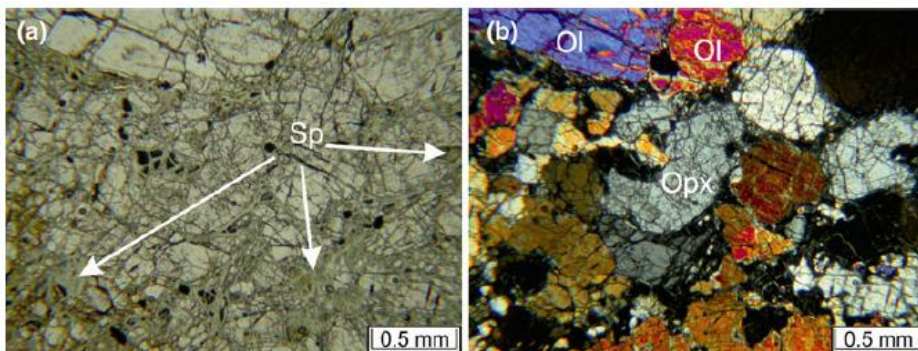
پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها نه تنها تحت تأثیر مجموعه کانی‌شناسی و جهت‌یابی کانی‌ها در نمونه سنگی است، بلکه عواملی مانند ریزترک‌ها نیز، در این ویژگی‌ها تأثیرگذار است. به همین علت این قسمت به بررسی نمونه‌های میکروسکوپی (شکل ۳) اختصاص یافته است. در شکل ۳ مقطع نازک این سنگ‌ها نشان داده شده که در

## جدول ۱. علامت‌های اختصاری استفاده شده در این تحقیق

شماره	علامت اختصاری	توصیف
۱	SHV	آزمون چکش اشمیت
۲	E	مدول الاستیسیته
۳	UCS	مقاومت فشاری تک‌محوری
۴	n%	درصد تخلخل
۵	$\omega\%$	درصد رطوبت
۶	G <sub>S</sub>	وزن مخصوص قسمت جامد
۷	$\gamma_d$	وزن واحد حجم خشک
۸	$\gamma_{Sat}$	وزن واحد حجم اشباع
۹	V <sub>S</sub>	سرعت موج عرضی
۱۰	V <sub>p</sub>	سرعت موج طولی
۱۱	BTS	مقاومت کششی برزیلی
۱۲	I <sub>S50</sub>	شاخص بار نقطه‌ای
۱۳	Er	نسبت مدولی
۱۴	Avg	میانگین

ادامه بررسی می‌شود. پریدوتیت‌های هرسین از نوع هارزبورژیت است. رنگ هارزبورژیت در نمونه دستی سبز بوده که در بعضی نقاط به سیاهی می‌گراید. وجود بلورهای درخشان انستاتیت و برنزیت در زمینه سیاه رنگ این نمونه‌ها، آن‌ها را از دونیت‌های سرپانتینیزه متمایز می‌سازد [۴]. ترکیب کانی‌شناسی این سنگ‌ها شامل الیوین (۸۵-۷۰ درصد)، ارتوپیروکسن (۲۵-۱۰ درصد)، کلینوپیروکسن و اسپینل غنی از کروم (۵-۲ درصد) است. الیوین‌ها، غنی از منیزیم، ارتوپیروکسن‌ها در محدوده انستاتیت - برنزیت، کلینوپیروکسن دیوپسیدی - اوژیت دیوپسیدی و اسپینل غنی از کروم هستند. به‌طور کلی بافت آن‌ها میلونیتی و پورفیروکلاستیک است که حالت خردشدگی و تبلور مجدد را می‌توان در بلورهای الیوین مشاهده کرد. پورفیروکلاست‌ها عمدتاً از ارتوپیروکسن‌ها تشکیل یافته‌اند که دارای اکسولوشن‌هایی از کلینوپیروکسن، ساختار کینگ‌باند و خمیدگی هستند. الیوین و ارتوپیروکسن سرپانتینی شده، به‌طوری‌که الیوین به کریزوتیل، آنتی‌گوریت و یا لیزاردیت تبدیل شده و رگه‌های آزبستی را در امتداد شکستگی‌ها تشکیل داده‌اند. نوع سرپانتین حاصل از ارتوپیروکسن، باستیت است [۴]. برخی از بلورهای الیوین با خاموشی موجی، خواص دگرشکلی از خود به نمایش

می‌گذارند. گاهی تیغه‌های جدایشی کلینوپیروکسن در ارتوپیروکسن در نمونه‌های هارزبورژیتی دچار خمیدگی گشته‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی مقطع نازک هارزبورژیت در نور **ppl** (a) و **xpl** (b) با بزرگ‌نمایی ۴۰×؛ **Ol** (الیوین)، **Sp** (سرپانتین)، **Opx** (ارتوپیروکسن)

### خصوصیات فیزیکی

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی نمونه‌های پریدوتیت هرسین مطابق استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) انجام شده است. این ویژگی‌ها شامل وزن واحد حجم ( $\gamma$ )، درصد رطوبت ( $\omega\%$ )، درصد تخلخل ( $n\%$ ) و وزن مخصوص قسمت جامد ( $G_s$ ) است. در جدول ۲ نتایج خصوصیات فیزیکی آورده شده است.

### دوام وارفنگی

دوام وارفنگی معرف میزان مقاومت سنگ در برابر هوازدگی است که از طریق آزمایش دوام وارفنگی با قرار دادن کلوخه‌های سنگی در آب طی دو سیکل اندازه‌گیری می‌شود [۱۷]. در این تحقیق، به منظور ارزیابی اثر افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک‌شدگی روی دوام پریدوتیت‌های هرسین و پیش‌بینی رفتار دراز مدت آن‌ها در طی فرایند هوازدگی، این آزمون در ۱۵ سیکل انجام شده است. گمبل (۱۹۷۱)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام دو مرحله‌ای و فرانکلین و چاندرا (۱۹۷۲)، سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله طبقه‌بندی کرده‌اند. نتایج آزمایش دوام وارفنگی در جدول ۳ آمده است.

## جدول ۲. نتایج آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های پریدوتیت منطقه بررسی شده

نمونه	(G <sub>s</sub> )	$\gamma_{sat}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_t$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	% $\omega$	(n%)
۱	۲/۸۷	۲/۸۶	۲/۸۵	۲/۸۳	۰/۸۷	۲/۱
۲	۲/۸۸	۲/۸۴	۲/۸۳	۲/۸۲	۰/۹۰	۲/۱
۳	۲/۸۳	۲/۸۰	۲/۷۸	۲/۷۶	۰/۹۲	۲/۱
۴	۲/۷۶	۲/۷۵	۲/۷۴	۲/۷۲	۰/۹۵	۲/۱
۵	۲/۹۰	۲/۸۸	۲/۸۶	۲/۸۵	۰/۹۴	۲/۲
۶	۲/۹۱	۲/۸۸	۲/۸۷	۲/۸۵	۰/۹۷	۲/۱
۷	۲/۸۴	۲/۸۲	۲/۸۰	۲/۷۸	۰/۹۵	۲/۲
۸	۲/۸۰	۲/۷۸	۲/۷۷	۲/۷۵	۰/۹۸	۲/۲
۹	۲/۸۹	۲/۸۸	۲/۸۶	۲/۸۵	۰/۹۰	۲/۱
۱۰	۲/۸۱	۲/۷۹	۲/۷۷	۲/۷۶	۰/۹۰	۲/۱
۱۱	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۲	۲/۸۰	۰/۸۵	۲/۱
۱۲	۲/۸۱	۲/۸۰	۲/۷۸	۲/۷۶	۰/۸۴	۲/۱
۱۳	۲/۸۹	۲/۸۷	۲/۸۵	۲/۸۴	۰/۸۸	۲/۱
۱۴	۲/۸۷	۲/۸۸	۲/۸۶	۲/۸۴	۰/۸۰	۲/۰
۱۵	۲/۸۳	۲/۸۰	۲/۷۹	۲/۷۸	۰/۸۷	۲/۱
Avg	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۱	۲/۸۰	۰/۸۹	۲/۱

## جدول ۳. نتایج آزمایش دوام و ارتفگی در ۱۵ سیکل روی پریدوتیت‌های آزمایش شده

تعداد سیکل	نمونه	Id(%)
۱	پریدوتیت	۹۹/۷۸
۲	پریدوتیت	۹۹/۷۰
۳	پریدوتیت	۹۹/۶۲
۴	پریدوتیت	۹۹/۵۸
۵	پریدوتیت	۹۹/۵۴
۶	پریدوتیت	۹۹/۵۰
۷	پریدوتیت	۹۹/۴۲
۸	پریدوتیت	۹۹/۳۰
۹	پریدوتیت	۹۹/۲۶
۱۰	پریدوتیت	۹۹/۲۲
۱۱	پریدوتیت	۹۹/۱۶
۱۲	پریدوتیت	۹۹/۱۲
۱۳	پریدوتیت	۹۹/۱۰
۱۴	پریدوتیت	۹۹/۰۶
۱۵	پریدوتیت	۹۹/۰۲

### سرعت سیر موج

به منظور اندازه‌گیری سرعت موج  $p$  در پریدوتیت‌ها از دستگاه سرعت صوت و مغزه‌های سنگی با قطر  $NX$  استفاده شده است [۱۲]. 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 استفاده می‌شود. عوامل زیادی مانند نوع سنگ، بافت، دانسیته، تخلخل، درصد رطوبت، فشار محصورکننده و دما بر سرعت انتشار امواج صوتی و ثابت الاستیک- دینامیک مؤثرند. به علاوه زون‌های هوازدگی و دگرسانی، صفحات لایه‌بندی و خصوصیات درزه‌ها (زبری، پرشدگی به وسیله آب، مواد پرکننده، شیب و امتداد) تأثیر مهمی بر سرعت لرزه‌ای دارد. برای محاسبه مقدار  $V_s$  از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۶]. در جدول ۴ نتایج آزمایش سرعت موج در حالت خشک و در جدول ۵ نتایج آزمایش سرعت موج در حالت اشباع آورده شده است

$$V_s = 0.4V_p + 0.691 \quad (1)$$

جدول ۴. نتایج آزمایش سرعت موج پریدوتیت‌های هرسین در حالت خشک

شماره نمونه	$V_p$ (Km/S)	$V_s$ (Km/S)	نسبت پواسون	K(GPa)	G(GPa)
۱	۵/۲۳۸	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۳/۹۸۰	۱۹/۷۴۲
۲	۵/۲۳۹	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۴/۰۰۷	۱۹/۷۴۲
۳	۵/۲۳۶	۲/۸۱۶	۰/۳۱	۴۵/۸۹۱	۲۰/۳۰۰
۴	۵/۲۷۶	۲/۷۹۲	۰/۳۰	۴۴/۷۱۹	۱۹/۹۵۵
۵	۵/۳۲۷	۲/۸۱۲	۰/۳۱	۴۵/۷۲۲	۲۰/۲۴۲
۶	۵/۲۸۳	۲/۷۹۴	۰/۳۰	۴۴/۸۶۲	۱۹/۹۹۶
۷	۵/۳۳۶	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۳/۹۸۰	۱۹/۷۴۲
۸	۵/۲۳۸	۲/۸۱۶	۰/۳۱	۴۵/۸۹۱	۲۰/۳۰۰
۹	۵/۳۲۷	۲/۸۱۲	۰/۳۱	۴۵/۷۲۲	۲۰/۲۴۲
۱۰	۵/۳۳۶	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۳/۹۸۰	۱۹/۷۴۲
۱۱	۵/۲۳۸	۲/۸۱۶	۰/۳۱	۴۵/۸۹۱	۲۰/۳۰۰
۱۲	۵/۲۳۸	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۳/۹۸۰	۱۹/۷۴۲
۱۳	۵/۲۳۹	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۴/۰۰۷	۱۹/۷۴۲
۱۴	۵/۳۳۶	۲/۸۱۶	۰/۳۱	۴۵/۸۹۱	۲۰/۳۰۰
۱۵	۵/۲۷۶	۲/۷۹۲	۰/۳۰	۴۴/۷۱۹	۱۹/۹۹۵
Avg	۵/۲۹۰	۲/۷۹۵	۰/۳۰	۴۴/۸۳	۱۹/۹۳

## جدول ۵. نتایج آزمایش سرعت موج پریدوتیت‌های هرسین در حالت اشباع

شماره نمونه	$V_p$ (Km/S)	$V_s$ (Km/S)	نسبت پواسون	GPa(K)	GPa(G)
۱	۵/۲۳۹	۲/۸۱۳	۰/۳۰	۴۶/۱۱۴	۲۰/۴۱۵
۲	۵/۳۷۷	۲/۸۳۲	۰/۳۱	۴۴/۴۷۰	۲۰/۶۹۲
۳	۵/۵۵۱	۲/۹۰۲	۰/۳۱	۵۰/۶۰۱	۲۱/۷۲۷
۴	۵/۳۲۱	۲/۸۱۰	۰/۳۱	۴۵/۹۵۲	۲۰/۳۷۱
۵	۵/۴۶۹	۲/۸۶۹	۰/۳۱	۴۸/۹۲۳	۲۱/۲۳۶
۶	۵/۴۰۹	۲/۸۴۵	۰/۳۱	۴۷/۸۰۶	۲۰/۸۸۸
۷	۵/۳۲۱	۲/۸۱۰	۰/۳۰	۴۵/۹۵۲	۲۰/۳۷۱
۸	۵/۵۵۱	۲/۹۰۲	۰/۳۱	۵۰/۶۰۱	۲۱/۷۲۷
۹	۵/۳۲۱	۲/۸۱۰	۰/۳۰	۴۵/۹۵۲	۲۰/۳۷۱
۱۰	۵/۳۳۶	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۳/۹۸۰	۱۹/۷۴۲
۱۱	۵/۴۶۹	۲/۸۶۹	۰/۳۱	۴۸/۹۲۳	۲۱/۲۳۶
۱۲	۵/۴۰۹	۲/۸۴۵	۰/۳۱	۴۷/۸۰۶	۲۰/۸۸۸
۱۳	۵/۲۳۹	۲/۷۷۷	۰/۳۰	۴۴/۰۰۷	۱۹/۷۴۲
۱۴	۵/۳۳۹	۲/۸۱۳	۰/۳۰	۴۶/۱۱۴	۲۰/۴۱۵
۱۵	۵/۳۷۷	۲/۸۳۲	۰/۳۱	۴۷/۴۴۰	۲۰/۶۹۲
Avg	۵/۳۸	۲/۸۳۳	۰/۳۰	۴۷/۱۴	۲۰/۶۴

## خصوصیات مکانیکی

خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها نیز مطابق استاندارد (ISRM.,2007) تعیین شده است. شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی برزیلی پریدوتیت‌های هرسین اندازه‌گیری شدند. آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع انجام شده است. مقاومت کشش برزیلی پریدوتیت‌ها نیز با استفاده از مغزه‌هایی با نسبت طول به شعاع بزرگ‌تر از یک تعیین شده است.

بر اساس رده‌بندی ارائه شده دیر و میلر (۱۹۶۶) طبق جدول ۶ می‌توانیم سنگ‌ها را بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری در پنج دسته طبقه‌بندی کنیم:

## جدول ۶. 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> )	شرح 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

از فاکتور دوم یعنی مدول الاستیسیته به صورت یک عدد بی‌بعد به نام نسبت مدولی استفاده شده است که عبارت است از نسبت مدول الاستیسیته به مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ [۶]. براساس نسبت مدولی، سنگ‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند که در جدول ۷ ارائه شده است.

## جدول ۷. رده‌بندی سنگ بکر بر اساس نسبت مدولی [دیر و میلر ۱۹۶۶]

رده	وضعیت نسبت مدولی	نسبت مدولی
H	بالا	>۵۰۰
M	متوسط	۲۰۰-۵۰۰
L	پایین	<۲۰۰

## تعیین سختی واجهشی اشمیت

سختی واجهشی اشمیت یکی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف مقاومت سنگ به کار می‌رود [۱۱]. برای این منظور از چکش اشمیت استفاده می‌شود. آزمون سختی اشمیت یک آزمون ارزان، سریع، غیرتخریبی و قابل اجرا در صحرا و آزمایشگاه است. در این پژوهش از چکش اشمیت نوع L استفاده شده است. در تمام موارد سختی واجهشی نمونه‌ها در حالت قائم نسبت به سطح سنگ اندازه‌گیری شد. در جدول ۸ نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی در حالت خشک و در جدول ۹ نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی در حالت اشباع آورده شده است.

## جدول ۸. نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی و رده‌بندی مهندسی سنگ بکر در حالت خشک

ردۀ سنگ	Er	SHV	Is <sub>50</sub> (MPa)	Elastic modulus(GPa)	UCS(MPa)	BTS(MPa)	نمونه
CH	۷۶۵/۲۵	۵۰	۳/۵	۶۵/۲	۸۵/۳	۴/۵۴	۱
BH	۶۷۵/۴۳	۵۶	۱/۴	۷۴/۵	۱۱۰/۳	۶	۲
CH	۶۰۴/۳۷	۵۴	۳/۶	۶۰/۸	۱۰۰/۶	۶/۷۳	۳
BH	۵۷۱/۶۸	۶۲	۳/۸	۶۳	۱۱۰/۲	۳/۶۲	۴
CH	۶۳۵/۸۳	۶۳	۲/۶	۵۴/۳	۸۵/۴	۶/۰۴	۵
CH	۷۶۷/۴۸	۶۶	۲/۹	۶۵/۲	۸۲/۹	۳/۶۰	۶
CH	۸۴۱/۶۴	۵۲	۲/۶	۶۷/۵	۸۰/۲	۶/۴۱	۷
CH	۷۱۴/۲۸	۵۰	۳/۱	۵۴	۷۵/۶	۷/۲۰	۸
CH	۶۸۷/۹۰	۴۳	۲/۵	۵۲/۹	۷۶/۹	۲/۳۴	۹
CH	۵۵۷/۴۰	۵۴	۳/۵	۶۰/۲	۱۰۸	۳/۶۵	۱۰
CH	۶۷۳	۵۸	۳/۴	۶۷/۳	۱۰۰	۵/۱۳	۱۱
BH	۶۲۴/۸۰	۵۶	۴/۵	۷۵/۶	۱۲۱	۷/۲۰	۱۲
CH	۷۴۲/۸۵	۶۳	۳/۲	۶۵	۸۷/۵	۲/۳۴	۱۳
CH	۷۶۴/۹۰	۶۴	۳/۵	۶۸	۸۸/۹	۳/۶۵	۱۴
CH	۷۰۴/۷۷	۶۵	۴/۰	۶۳/۵	۹۰/۱	۴/۵۴	۱۵
CH	۶۸۰/۵۵	۵۷	۳/۴	۶۳/۷	۹۳/۶	۴/۸۶	Avg

## جدول ۹. نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی و رده‌بندی مهندسی سنگ بکر در حالت اشباع

ردۀ سنگ	Er	Is <sub>50</sub> (MPa)	Elastic modulus(GPa)	UCS(MPa)	BTS(MPa)	نمونه
CH	۷۱۴/۲۸	۲/۵	۵۴	۷۵/۶	۵/۴۰	۱
CH	۷۰۴/۴۴	۳/۹	۶۳/۴	۹۰	۳/۸۶	۲
CH	۷۵۴/۳۲	۴/۵	۶۰/۸	۸۰/۶	۶/۲۶	۳
CH	۷۰۴/۴۴	۴	۶۳/۴	۹۰	۶/۴۵	۴
CH	۸۳۰/۲۷	۲/۵	۵۴/۳	۶۵/۴	۳/۷۴	۵
CH	۷۴۲/۴۴	۳/۱	۴۶/۷	۶۲/۹	۴/۱۳	۶
CH	۷۴۷/۱۲	۲/۱	۴۵/۵	۶۰/۹	۵/۶۲	۷
CH	۸۲۳/۱۷	۲/۱	۵۴	۶۵/۶	۵/۶۷	۸
CH	۸۳۳/۰۸	۲/۵	۵۴/۹	۶۵/۹	۲/۹۸	۹
CH	۷۳۸/۶۳	۲/۵	۶۵	۸۸	۴/۰۹	۱۰
CH	۸۴۳/۷۵	۳/۰	۶۷/۵	۸۰	۴/۸۲	۱۱
CH	۶۹۷/۸۰	۳/۵	۶۳/۵	۹۱	۶/۴۵	۱۲

نمونه	BTS(MPa)	UCS(MPa)	Elastic modulus(GPa)	I <sub>S50</sub> (MPa)	Er	رده سنگ
۱۳	۲/۹۸	۸۰	۶۲	۳/۱	۷۷۵	CH
۱۴	۵/۴۰	۶۶/۵	۵۴	۲/۸	۸۱۲/۰۳	CH
۱۵	۳/۸۶	۷۰/۱	۴۵/۵	۳/۰	۶۴۹/۰۷	CH
Avg	۴/۷۷	۷۴/۶۲	۵۶/۹۶	۳/۱	۷۶۳/۳۳	CH

### ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پدیدوتیت‌ها با ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها ارتباط مشخصی دارد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، ارتباط این پارامترها با هم بررسی شد. این موضوع در شکل‌های ۴ تا ۱۸ برای سنگ‌های منطقه بررسی شده نشان داده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت در نمونه‌های پدیدوتیت هرسین مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، شاخص بارنقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد رطوبت فشار آب منفذی افزایش می‌یابد که ناپایداری سطوح ضعف موجود در سنگ را به‌همراه دارد. در مقابل افزایش درصد رطوبت افزایش سرعت موج طولی را موجب شده است به‌دلیل آن است که سرعت موج طولی از میان آب بیش‌تر از هوا است. بنابراین زمانی که حفرات به‌وسیله آب اشغال می‌شوند، افزایش سرعت موج طولی را به‌همراه دارد. سرعت امواج صوتی در سنگ با خصوصیات سنگ‌شناسی و ویژگی‌های الاستیک سنگ بکر در ارتباط است [۳۱].

به‌منظور ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ارائه شده در این پژوهش از پارامتر مجذور ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

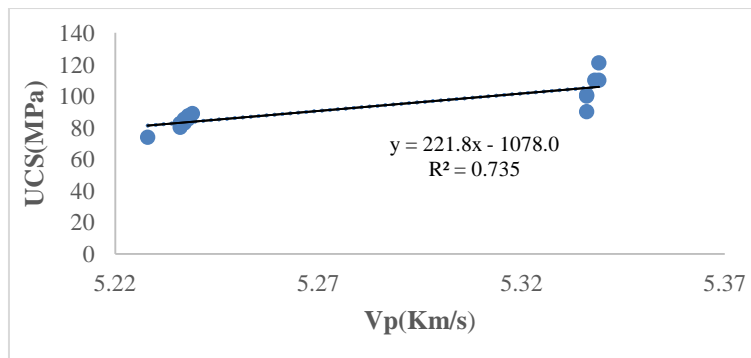
$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x}_i)^2)(\sum(y_i - \bar{y}_i)^2)}} \quad (2)$$

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

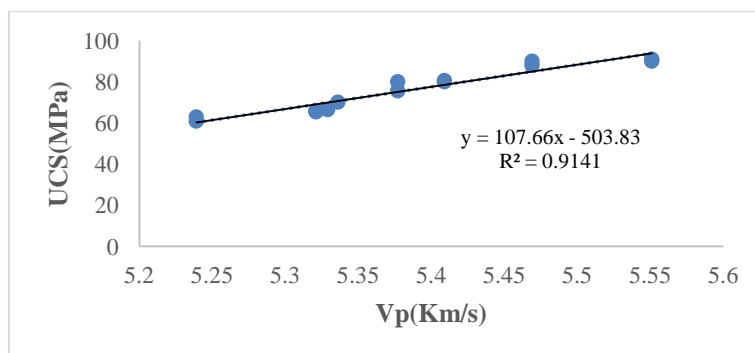
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{N}} \quad (3)$$

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

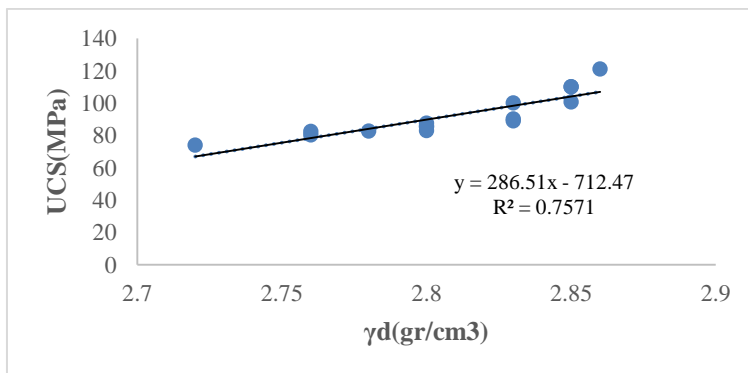
بیش‌ترین انطباق بین آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS) با چکش‌اشمیت (SHV) در حالت خشک است. که میزان ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۵ است. البته بین آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS) و وزن واحد حجم خشک ( $\gamma_d$ ) رابطه قابل قبولی دیده می‌شود که میزان ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۳ است. در شکل ۲۰، ۲۱ و ۲۲ منحنی RMSE بر حسب تعداد نمونه‌های تحت آزمایش برای متغیرهای  $V_p$ ، SHV، BTS،  $Is_{50}$  و Id رسم شده است. چنان‌که در هر سه شکل مشخص است با افزایش تعداد نمونه‌ها میزان خطای بین دو مقدار پیش‌بینی شده و واقعی کاهش می‌یابد و مقدار پیش‌بینی شده به مقدار واقعی همگرا می‌شود.



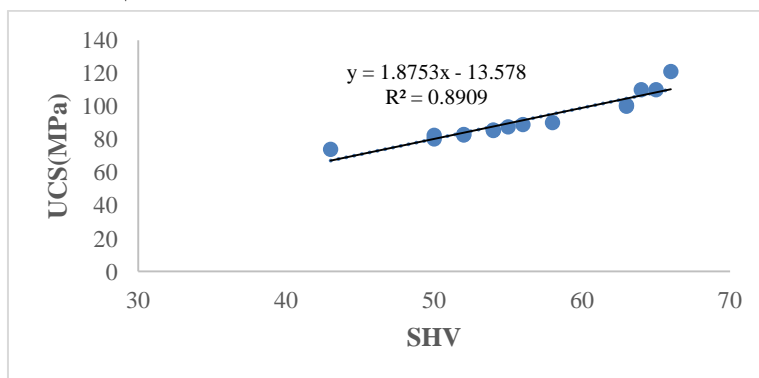
شکل ۴. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج طولی در حالت خشک



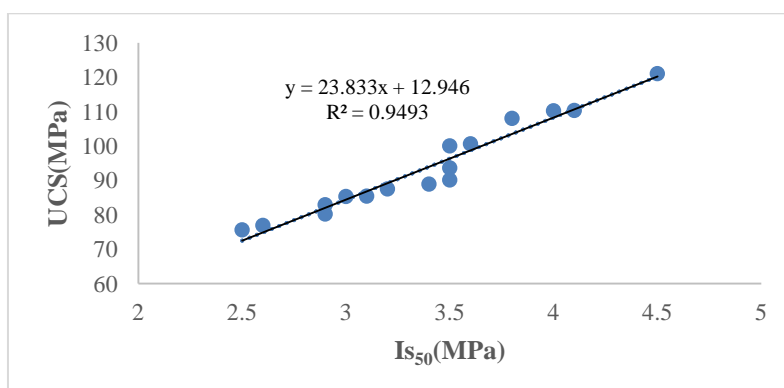
شکل ۵- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج طولی در حالت اشباع



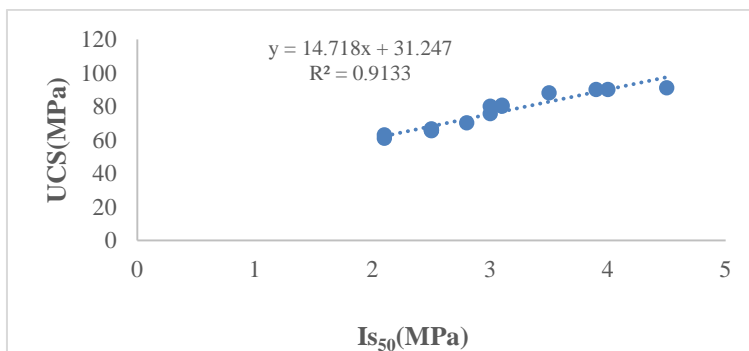
شکل ۶. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک



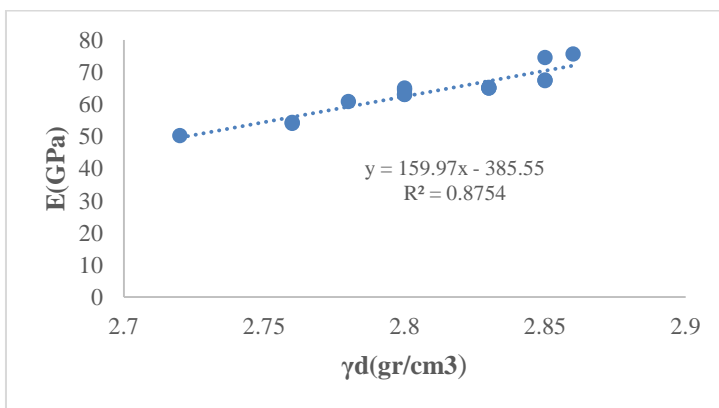
شکل ۷. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوریا چکش‌اشمیت در حالت خشک



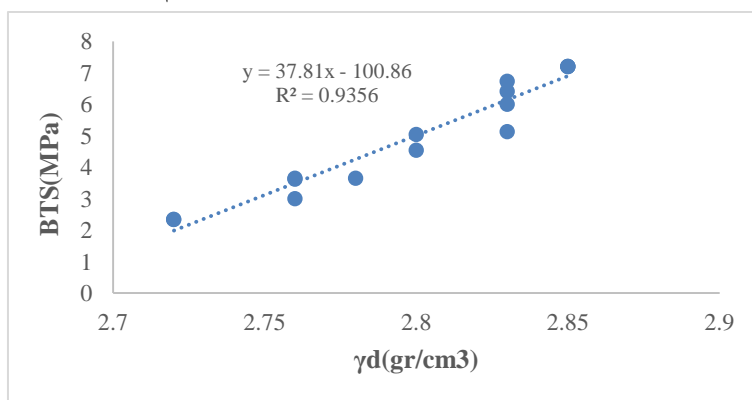
شکل ۸. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص بارنقطه‌ای در حالت خشک



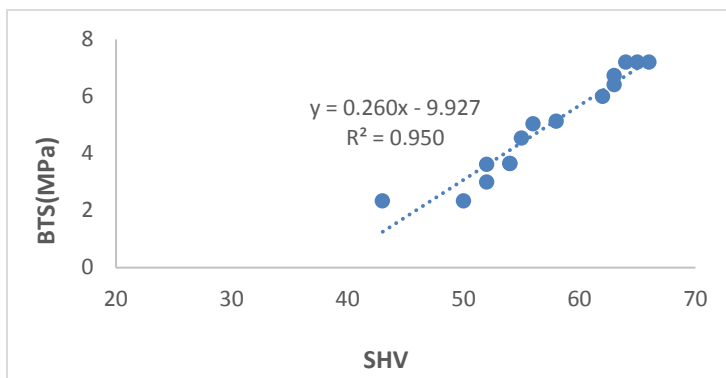
شکل ۹. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص بارنقطه‌ای در حالت اشباع



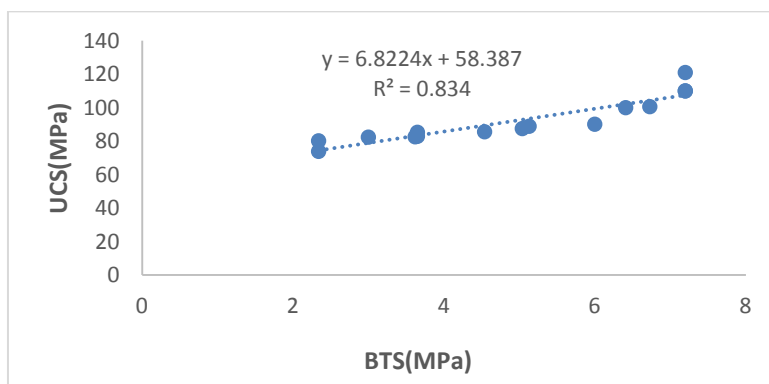
شکل ۱۰. رابطه بین مدول الاستیسیته با وزن واحد حجم خشک



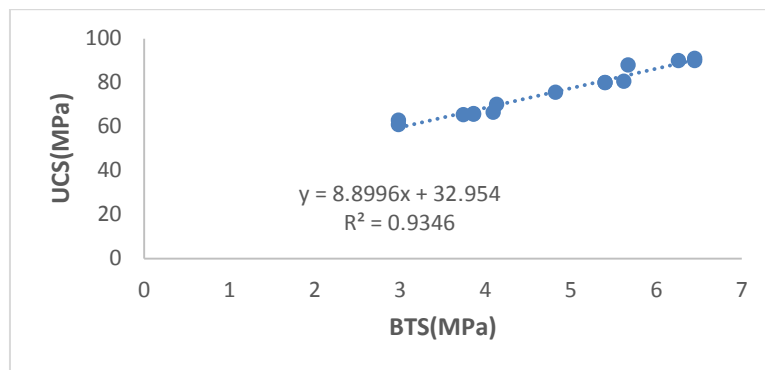
شکل ۱۱. رابطه بین مقاومت کششی برزیلین با وزن واحد حجم خشک



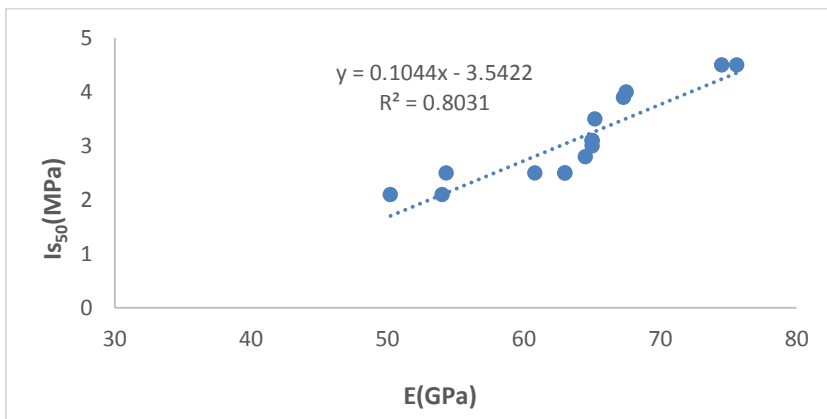
شکل ۱۲. رابطه بین مقاومت کششی برزیلین با چکش اشمیت در حالت خشک



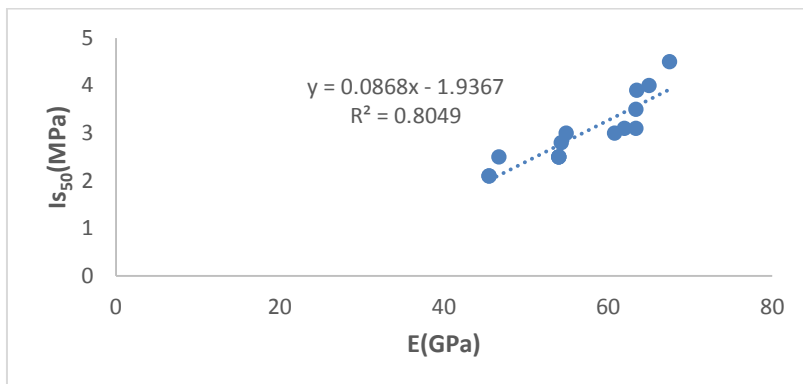
شکل ۱۳. رابطه بین مقاومت کششی برزیلین با مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک



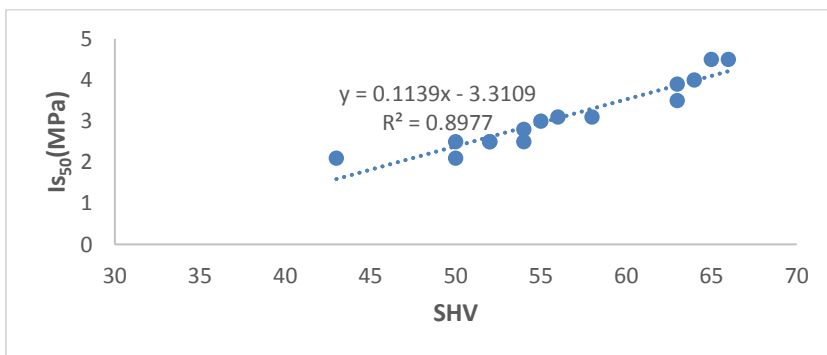
شکل ۱۴. رابطه بین مقاومت کششی برزیلین با مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت اشباع



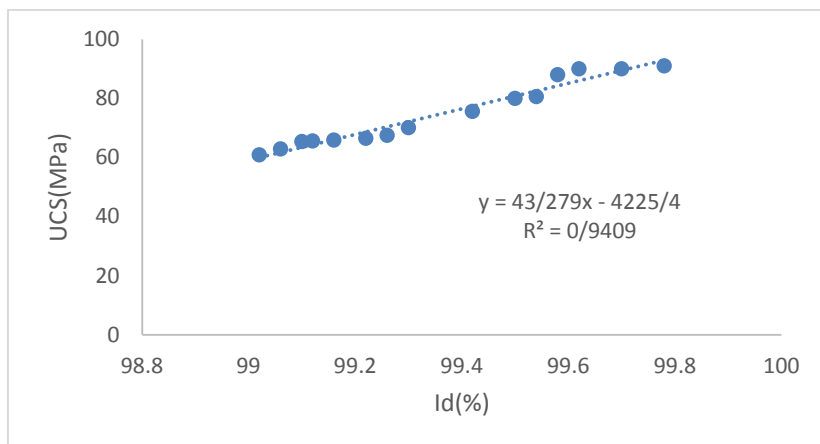
شکل ۱۵. رابطه مدول الاستیسیته با بارنقطه‌ای در سنگ‌های پریدوتیتی در حالت خشک



شکل ۱۶. رابطه مدول الاستیسیته با بارنقطه‌ای در سنگ‌های پریدوتیتی در حالت اشباع



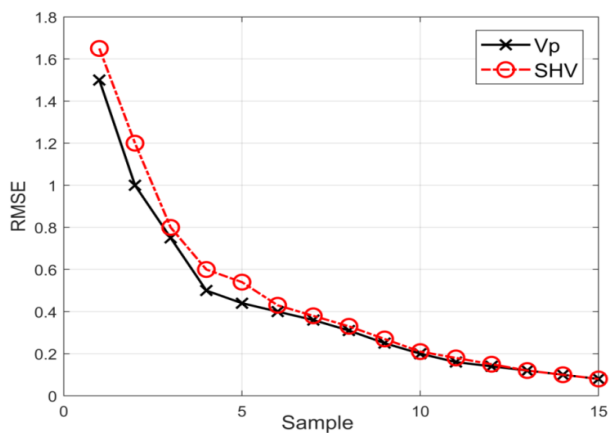
شکل ۱۷. رابطه آزمون سختی اشمیت با بارنقطه‌ای در سنگ‌های پریدوتیتی در حالت خشک



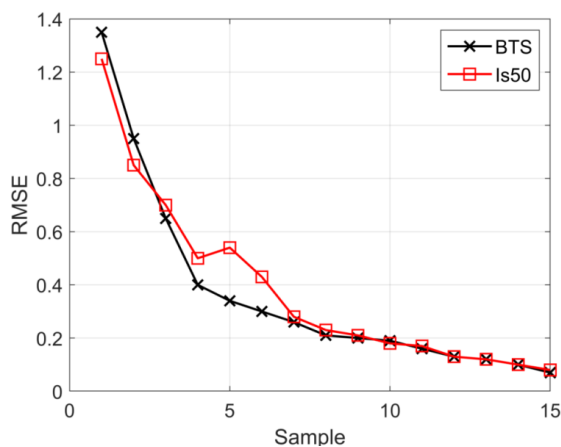
شکل ۱۸. رابطه دوام و ارتنگی با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های پریدوتیتی در حالت اشباع

جدول ۱۰. معادلات پیشنهادی و رگرسیون‌های به‌دست آمده در این پژوهش

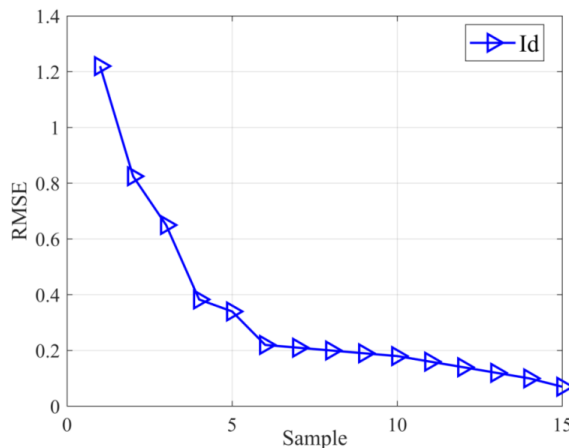
ردیف	نمونه	حالت	معادلات	رگرسیون (r <sup>2</sup> )
۱	پریدوتیت	خشک	UCS = 221.8Vp - 1078.0	۰.۷۳
۲	پریدوتیت	اشباع	UCS = 107.66Vp - 503.83	۰.۹۱
۳	پریدوتیت	خشک	UCS = 286.51γd - 712.47	0.75
۴	پریدوتیت	خشک	UCS = 1.8753 SHV - 13.578	0.89
۵	پریدوتیت	خشک	UCS = 23.833Is <sub>50</sub> + 12.946	۰.۹۴
۶	پریدوتیت	اشباع	UCS = 14.718Is <sub>50</sub> + 31.247	۰.۹۱
۷	پریدوتیت	خشک	E = 159.97γd - 385.55	0.87
۸	پریدوتیت	خشک	BTS = 37.81γd - 100.86	۰.۹۳
۹	پریدوتیت	خشک	BTS = 0.260 SHV - 9.927	۰.۹۵
۱۰	پریدوتیت	خشک	UCS = 6.8224 BTS + 58.387	0.83
۱۱	پریدوتیت	اشباع	UCS = 8.8996BTS + 32.954	0.93
۱۲	پریدوتیت	خشک	Is <sub>50</sub> = 0.1044 E - 3.5422	0.80
۱۳	پریدوتیت	اشباع	Is <sub>50</sub> = 0.0868 E - 1.9367	0.80
۱۴	پریدوتیت	خشک	Is <sub>50</sub> = 0.1139 SHV - 3.3109	۰.۸۹
۱۶	پریدوتیت	اشباع	UCS = 43/279 Id(%) - 4225/4	0.94



شکل ۱۹. تغییر خطاها در پارامترهای مختلف



شکل ۲۰. تغییر خطاها در پارامترهای مختلف



شکل ۲۱. تغییر خطاها در پارامترهای مختلف

### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، تحلیل و بررسی نمودارهای رسم شده در مورد پریدوتیت‌های هرسین، استان کرمانشاه بدین گونه می‌توان اظهار نظر کرد که افزایش درصد کانی‌های الیوین و پیروکسن در سنگ باعث کاهش مقاومت و ایجاد سطوح ضعف می‌شود. علت آن ساختار ضعیف کانی الیوین و پیروکسن است. براساس آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی، طبق طبقه‌بندی آنون درصد تخلخل در پریدوتیت‌های هرسین پایین و به طبع مقدار شاخص جذب آب نیز کم است. هم‌چنین مقدار وزن مخصوص قسمت جامد و وزن واحد حجم خیلی زیاد است. براساس رده‌بندی گمبل، تمامی پریدوتیت‌ها در رده دوام وارفنگی خیلی مقاوم و براساس رده‌بندی فرانکلین و چاندررا تمام نمونه‌ها در رده شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد با افزایش رطوبت نمونه‌های پریدوتیت مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد رطوبت فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. که ناپایداری سطوح ضعف را به همراه دارد. در سال ۲۰۰۴ طغرل<sup>۱</sup> نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها با افزایش شاخص دوام وارفنگی آن‌ها به صورت خطی افزایش می‌یابد [۴۱]. اگر چه

نتایج این تحقیق نیز بر وجود چنین رابطه‌ای صحت گذاشت. براساس نظر گودمن<sup>۱</sup> ۱۹۸۹ افزایش درصد رطوبت در پریدوتیت‌ها افزایش سرعت موج را موجب شده است. این موضوع به دلیل آن است که سرعت امواج از میان آب بیش‌تر از هوا است. بنابراین، زمانی که حفرات با آب اشغال می‌شوند، افزایش سرعت موج را به‌همراه دارند و سرعت امواج در سنگ با خصوصیات سنگ‌شناسی و ویژگی‌های الاستیک سنگ بکر در ارتباط است [۳۱]. به‌همین دلیل مقادیر سرعت امواج در سنگ‌ها و خصوصیات مکانیکی آن‌ها قابل انطباق هستند. طبق رده‌بندی آنون از نظر سرعت عبور موج طولی از درون سنگ، پریدوتیت‌ها در رده خیلی بالا قرار دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که بین سرعت موج طولی با مقاومت فشاری تک‌محوری پریدوتیت‌های هرسین ارتباط نزدیکی برقرار است. با توجه به این‌که سختی سنگ به نوع کانی‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها و مقاومت سنگ بستگی دارد. پریدوتیت‌های بررسی شده از نظر سختی برگشتی اشمیت مقاومت قابل قبولی را نشان داده‌اند. براساس رده‌بندی دیر و میلر مقاومت سنگ‌ها در رده BH و CH قرار می‌گیرد. با توجه به مدول به‌دست‌آمده سنگ‌های پریدوتیتی در حالت خشک در رده CH و در حالت اشباع در رده CH است. علت آن تخلخل و جذب آب پایین در این سنگ است. بیش‌ترین انطباق بین آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS) با چکش‌اشمیت (SHV) در حالت خشک است. که میزان ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۵ است. البته بین آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS) و وزن واحد حجم خشک ( $\gamma_d$ ) رابطه قابل قبولی دیده می‌شود که ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۳ است. هم‌چنین بین آزمون دوام وارفنگی و مقاومت فشاری تک‌محوری رابطه قابل قبولی دیده می‌شود که ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۴ است. با توجه به رگرسیون‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی انطباق خوبی را با هم نشان می‌دهد و اکثر معادلات دارای ضریب تعیین قابل قبولی هستند. با توجه به نمودارهای ضریب تعیین بین پارامتر وزن واحد حجم با مقاومت رابطه مثبت و مستقیمی وجود دارد به این صورت که با افزایش وزن واحد حجم میزان مقاومت افزایش و با کاهش وزن واحد حجم مقاومت کاهش می‌یابد. خصوصیات مکانیکی این پریدوتیت‌ها نسبت به خصوصیات فیزیکی انطباق بیش‌تری را نشان می‌دهد. در شکل ۲۰، ۲۱ و ۲۲ منحنی RMSE

بر حسب تعداد نمونه‌های تحت آزمایش برای متغیرهای  $V_p$ ، SHV، BTS،  $Is_{50}$  و Id رسم شده است. چنان‌که در هر سه شکل مشخص است با افزایش تعداد نمونه‌ها میزان خطای بین دو مقدار پیش‌بینی شده و واقعی کاهش می‌یابد و مقدار پیش‌بینی شده به مقدار واقعی همگرا می‌شود.

### تشکر و قدردانی

از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا به دلیل فراهم کردن امکانات لازم برای تهیه مغزه‌های سنگی و مقاطع نازک میکروسکوپی تشکر و قدردانی می‌کنیم.

### منابع

۱. آقاباتی ع، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳).
۲. بابایی ف، "بررسی افیولیت‌های منطقه صحنه (استان کرمانشاه) از دید زمین‌شناسی اقتصادی و سنگ‌شناسی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۱).
۳. خانلری غ. ر، "اصول مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، چاپ دوم (۱۳۹۴).
۴. دارایی‌زاده ز، "مطالعه کمپلکس افیولیتی شمال شرق کرمانشاه با تکیه ویژه بر ژئوشیمی و پترولوژی دایک‌های منطقه هرسین، صحنه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پترولوژی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (۱۳۹۰).
۵. سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، "نقشه زمین‌شناسی چهارگوش هرسین"، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تهران.
۶. فهیمی فر ا، سروش ح، "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول (۱۳۸۰).
۷. قبادی م. ح، آلبانی ف، امیری م، "بررسی تأثیر تعداد و زمان سیکل‌ها بر روی رفتار دوام‌پذیری پریدوتیت‌های هرسین، استان کرمانشاه" و دومین کنفرانس بین‌المللی ژئوهش‌های نوین در عمران، معماری مدیریت شهری و محیط‌زیست (۱۳۹۷) ۳۶-۲۵.
۸. موسوی ا، "پتروگرافی و ژئوشیمی بازالت‌ها و پیلولاواهای وابسته به سکانس افیولیتی کرمانشاه (صحنه-هرسین)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پترولوژی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (۱۳۹۰).
۹. مولایی ا، "مطالعه پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های لوکوکرات مجموعه افیولیتی کرمانشاه (صحنه-هرسین)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پترولوژی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (۱۳۹۲).

۱۰. محجل م. سهندی م.، "تکامل تکتونیکی پهنه سنندج-سیرجان، در نیمه شمال باختری و معرفی زیر پهنه‌های جدید در آن"، فصلنامه علوم زمین (۱۳۷۸) ۳۲-۳۱.
11. Aydin A., Basu A., "The Schmidt hammer in rock material characterization", *Engineering Geology*, Vol. 81(2005) 1-14.
  12. ASTM., "Standard method for determination of the point load strength index of rock", *ASTM Standards on Disc 04.08.; Designation D5731* (2001).
  13. ASTM, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens" D3967 (2001).
  14. ASTM., "Annual Book of ASTM Standard-Natural Building Stone", *Soil and Rock*, part 19 . ASTM Publication office. Philadelphia (2001).
  15. Amaral P. M., Guerra R. L., Cruz F. J., "Determination of Schmidt rebound hardness consistency in granite", *Rock mechanics and Mining science* (1999) 833-837.
  16. Anon., "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part: Rock and soil materials", *Report of the Commission of Engineering Geological Mapping, Bulletin International Association of Engineering Geology*, 19 (1979) 364-371.
  17. Bell F. G., "Engineering properties of soils and rocks", *Blackwell Science*(2000) 482.
  18. Bryson L.S., Gomez-Gutierrez I. C., Hopkins T. C. "Development of a new durability index for compacted shale", *Engineering Geology*, Vol. 139-140 (2012) 66-75.
  19. Bieniawski Z. T., "The point load test in geotechnical practice", *Engineering Geology*, Vol. 9 (1975) 1-11.
  20. Boggs S., "Petrology of sedimentary rocks", *Cambridge university press, London, England* (2009).

21. BS 812, Methods for determination of aggregate impact value(AIV), British Standard Institute, London, England (1990).
22. Brown E.T., "Rock characterization testing & monitoring ISRM suggested methods", Pergamon Press (1981).
23. Cargill J. S., Shakoor A., "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, Vol. 27, No: 6 (2004) 495-503.
24. Chang C., Zoback M. D., Khaksar A., "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 51 (2006) 223-237.
25. Deer F., Howie K., Zussman A., "an introduction to the rock forming minerals", John Wiley & Sons, 526 (1970).
26. Deere D. U., "Geological Considerations, In Rock Mechanics in Engineering (1968).
27. Deere D. U., Miller R. P., "Engineering classification and index properties for intact rock", Technical report AFWLTR- 65116, A.F. Weapons Laboratory, Kirtland AFB, NM (1966).
28. Dhakal G., Yoneda T., Kato M., Kaneko K., "Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks", Engineering Geology, Vol. 65 (2002) 31-45.
29. Franklin J. A., Chandra A., "The Slake durability test", Int.J.Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9 (1972) 325-341.
30. Gamble J. C., "Durability plasticity classification of shale and other argillaceous rocks". P.h.D. Thesis University of Illinois (1971).
31. Goodman R. E., "Introduction to rock mechanics", John Wiley & Sons, New York, USA (1989).

32. Heidari, M., Mohseni H., Jalali H, "Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Some Sedimentary Rocks by Regression Models", *Geotechnical and Geological Engineering.*, vol. 36 (2018) 401-412.
33. ISRM, "The Complete ISRM, Suggested Methods for Rock characterization testing and monitoring", International Society of rock mechanics (2007).
34. Katez O.,Reches Z., Roegiers J., "Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, (2000) 723-728.
35. Kahraman S., Gunayin O., Fener M., "The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 42 (2005) 584-589.
36. Marquse A. D. A., Paes B. S. D., Marques E. A. G., Pereira L. C., "Correlation between uniaxial compressive strength and point load strength for some Brazilian high- grade metamorphic rocks", *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental* (2015).
37. Ricou L. E., "Evolution structuralke des Zagrides. La région clef de Neyriz (Zagrosiranien)", *Mem. Soc. Geol., France N.S.* 55, 125 (1976) 140.
38. Ricou L. E., "Lcmetamorphisme au contact des peridotites de Neyriz(Zagros interne, Iran): Developpement de skarns a pyroxene (1971).
39. Ricou L. E., Braud J., Brunn J. H., *Le Zagros*, In: *Livre à la mémoire de A.F de Lapparent*", *Soc. géol. France, Paris* (1977) 33-52.
40. Tarun S., Ashwani J., K S. Rao, "Rock Failure Pattern Under Uniaxial, Triaxial compression and Brazillian loading Conditions"., *Geotechnical*

- applications., Lecture Notes in Civil Engineering LNCE, volume 13., (2018) 241-249.
41. Tugrul A., "The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from", Turkey. Engineering Geology, Vol. 75, No. 3-4 (2004) 215-227.
  42. Undul O., Tugrul A., "The Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dunites", Rock Mech., Rock Eng., Vol. 45 (2012) 225-239.
  43. Ulusay R., Tureli K., Ider M. H., "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariable statistical techniques", Engineering Geology, Vol. 37, (1994) 135-157.
  44. Wang M., Cao P. "Numerical Study on Flattened Brazilian Test and Its Empirical Formula", EJGE., vol. 20 (2015) 122111-12224.