

برآورد مقاومت فشاری و کششی سنگ‌های کربناته با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای و همبستگی آن‌ها با ارزش ضربه‌ای سنگدانه (مطالعه موردی: سنگ‌های کربناته جاده کرمانشاه-ایلام)

محمدحسین قبادی^۱، حسن محسنی^۲ و سجاد احمدی^{۳*}

۱، ۲ و ۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: sajadahmadi1990@gmail.com*

دریافت: ۹۷/۲/۲۸ پذیرش: ۹۷/۵/۱۴

چکیده

تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز در طراحی سازه‌های واقع در توده‌سنگ یکی از مسائل عمده در زمین‌شناسی مهندسی، عمران و معدن است، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی از جمله این پارامترها هستند که به طور گسترده‌ای در طراحی سازه‌ها در توده سنگ استفاده می‌شوند. با توجه به این که آزمایش بار نقطه‌ای از یک سو هزینه و دشواری کمتری نسبت به آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و کششی دارد و هم‌چنین می‌تواند در محل پروژه و روی نمونه‌های با هندسه نامنظم نیز انجام شود، لذا می‌توان از آن به عنوان معیاری برای برآورد اولیه مهندسی در رابطه با مقاومت‌های کششی و فشاری سنگ‌ها استفاده نمود. در این پژوهش ارتباط میان این پارامترها با تحلیل‌های آماری بررسی شده و بهترین روابط تجربی برای آن‌ها ارائه گردیده است. هم‌چنین به علت گستردگی سنگ‌های کربناته در کشور و کاربرد آن‌ها در پروژه‌های عمرانی مختلف، ارتباط مقاومت‌های فشاری تک‌محوری، کششی و بار نقطه‌ای با ارزش ضربه‌ای سنگدانه که یکی از شاخص‌های بررسی کیفیت مصالح سنگی می‌باشد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در رگرسیون تک متغیره بالاترین ضریب تعیین به مقدار ۰/۸۹۷، مربوط به رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک و کمترین ضریب تعیین به مقدار ۰/۶۵۳، مربوط به رابطه بین مقاومت کششی برزلی با ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک است، هم‌چنین استفاده از رگرسیون چند متغیره منجر به تخمین بسیار بهتری از مقاومت فشاری تک‌محوری شده است.

واژه‌های کلیدی: مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزلی، شاخص بار نقطه‌ای، ارزش ضربه‌ای سنگدانه، سنگ کربناته

۱- مقدمه

آشامیدنی از طریق منابع کارستی کربناته تأمین می‌شود، بیش از ۱۱ درصد مساحت ایران را سنگ‌های کربناته پوشش می‌دهند (رئیزی و کوثر، ۱۹۹۷). مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های توصیف رفتار مقاومتی سنگ است که به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی سازه‌ها، به ویژه در حفاریات زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخلاف ظاهر ساده آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، انجام دقیق آن بسیار مشکل می‌باشد، زیرا پارامترهای زیادی روی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها مؤثرند. تعیین این پارامتر با استفاده از روش‌های مستقیم زمان بر و پرهزینه است و گاه آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد در بسیاری از سنگ‌ها دشوار است. در چنین مواردی، اجرای آزمون‌های غیرمخرب ساده و استفاده از روابط تجربی می‌تواند سرعت ارزیابی را افزایش و هزینه‌ها را کاهش دهد (رجبی و همکاران، ۲۰۱۷).

بیش از ۷۰ درصد از سنگ‌هایی که در سطح زمین رخنمون دارند را سنگ‌های رسوبی تشکیل می‌دهند. این سنگ‌ها از یک طرف خاستگاه منابع طبیعی مهمی مثل نفت و زغال‌سنگ و از طرف دیگر تأمین‌کننده مصالح ساختمانی اصلی مانند سیمان، گچ، آهک و غیره هستند. نظر به این که مهندسان در زمان احداث سازه‌های مهندسی مانند سد، تونل و راه بیش از همه با سنگ‌های رسوبی روبرو می‌شوند، لذا شناسایی این سنگ‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای حل مشکلات مربوط به آن‌ها باشد (معمارپان، ۱۳۹۵).

یک گروه مهم از سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های کربناته می‌باشند. امروزه اهمیت اقتصادی سنگ‌های کربناته عمدتاً در رابطه با خواص مخزنی آن‌ها می‌باشد، چون حدود نیمی از مخازن نفتی جهان در این سنگ‌ها قرار دارد (تاکر، ۲۰۰۱). هم‌چنین بخش مهمی از منابع آب

نمونه‌هایی از این روابط ارائه شده است. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای به ترتیب از طریق روابط ۱ تا ۳ اندازه‌گیری می‌شوند.

$$UCS = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$BTS = \frac{2P}{\pi dt} = 0.636 \frac{P}{dt} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (3)$$

در روابط بالا P بر حسب نیوتن، مقدار نیرویی است که موجب گسیختگی نمونه سنگ می‌شود، A سطح مقطع نمونه بر حسب سانتی‌متر مربع، d قطر نمونه بر حسب سانتی‌متر، t ضخامت نمونه بر حسب سانتی‌متر و De قطر معادل نمونه بر حسب سانتی‌متر می‌باشد، همچنین در رابطه ۳ اگر قطر مغزه بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از ۵۰ میلی‌متر باشد، شاخص بار نقطه‌ای (Is) به دست آمده در یک ضریب، به نام ضریب تصحیح اندازه نمونه ضرب می‌شود (رابطه ۴). همچنین مقادیر De و F به ترتیب از روابط ۵ و ۶ به دست می‌آیند. در روابط زیر F ضریب تصحیح اندازه نمونه، W قطر نمونه بر حسب سانتی‌متر (در حالت محوری) و D ضخامت نمونه بر حسب سانتی‌متر می‌باشد (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

$$I_{SS0} = F.I_s \quad (4)$$

$$De^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (5)$$

$$F = \left(\frac{De}{50} \right)^{0.45} \quad (6)$$

با توجه به این که آزمایش بار نقطه‌ای از یک سو هزینه و دشواری کمتری نسبت به انجام آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی دارد و از سویی دیگر این آزمایش به دلیل قابلیت حمل دستگاه می‌تواند در محل پروژه و روی نمونه‌هایی با شکل هندسی نامنظم نیز انجام گردد، لذا بسیاری از پژوهشگران سعی در ارائه روش‌های تجربی برای تخمین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای داشته‌اند.

آزمایش بارگذاری نقطه‌ای، روشی مناسب برای تخمین مقاومت فشاری سنگ‌هاست. به طور متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری حدود ۲۰ الی ۲۵ برابر شاخص مقاومتی بار نقطه‌ای است اما آزمایش‌های انجام شده روی سنگ‌های مختلف به ویژه سنگ‌های ناهمسان نشان می‌دهند که این نسبت می‌تواند بین ۱۵ تا ۵۰ تغییر کند (هوک و بری، ۲۰۰۵). بنابراین از نتایج این آزمایش به عنوان شاخصی برای طبقه‌بندی ماده سنگ استفاده می‌گردد و نباید از آن به منظور طراحی استفاده نمود.

آزمایش شاخص بار نقطه‌ای یکی از چند آزمایش مورد استفاده برای تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها به طور غیرمستقیم است که اولین بار توسط براش و فرانکلین در سال ۱۹۷۲ ارائه شد. این آزمایش به دلیل سادگی و قابل حمل بودن دستگاه آن مورد توجه مهندسين بوده است. یکی دیگر از کاربردهای این آزمایش تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌هاست. برای این منظور پژوهشگران زیادی روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص بار نقطه‌ای را بررسی کرده‌اند. در جدول ۱

جدول ۱. برخی از روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای

رابطه	ضریب همبستگی	مرجع	جنس سنگ
$UCS = 20.71I_{SS0} + 29.6$	-	(Deer and Miller, 1966)	Limestone, Granite, Basalt
$UCS = 16I_{SS0}$	-	(Read et al, 1980)	Sedimentary
$UCS = 23I_{SS0} + 13$	-	(Cargil and Shakoor, 1990)	Sandstone, Limestone
$UCS = 8.4I_{SS0} + 9.51$	$R^2 = 0.85$	(Kahraman, 2001)	Dolomite, Limestone
$UCS = 28I_{SS0}$	$R^2 = 0.72$	(Sabatakakis et al, 2009)	Limestone, Sandstone
$UCS = 22.3I_{SS0}$	$R^2 = 0.68$	(Singh et al, 2012)	Limestone
$UCS = 22.7I_{SS0}$	$R^2 = 0.82$	(Singh et al, 2012)	Dolomite
$UCS = 10.99I_{SS0} + 7.042$	$R^2 = 0.92$	(Heidari et al, 2012)	Gypsum; (axial)
$UCS = 11.96I_{SS0} + 10.94$	$R^2 = 0.94$	(Heidari et al, 2012)	Gypsum; (diametric)
$UCS = 13.29I_{SS0} + 5.251$	$R^2 = 0.90$	(Heidari et al, 2012)	Gypsum; (irregular)
$UCS = 10.53I_{SS0} - 7.61$	$R^2 = 0.91$	(Tondon and Gupta, 2014)	Dolomite

در این پژوهش از نوع سنگ‌های رسوبی کربناته هستند و از سازندهای این منطقه شامل سازندهای آسماری، پابده و آهک‌های ژوراسیک در بخش زاگرس مرتفع (به احتمال فراوان هم‌ارز سازند سورمه)، نمونه‌برداری شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند (درویش‌زاده، ۱۳۸۹). در شکل ۱ موقعیت نقاط نمونه‌برداری و کد اختصاری هر نمونه سنگ بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص شده است.

رخنمون سنگ‌های کربناته منطقه مورد مطالعه به ترتیب از قدیم به جدید شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- رادیولاریت‌های کرمانشاه: این بخش شامل رخساره‌های ژرف کربناتی- رادیولاریتی که معرف بخش‌های ژرف زاگرس رورانه است که به ویژه در دو ناحیه نیریز و کرمانشاه، به صورت فلس‌های رانده شده نابرجا رخنمون دارند، که می‌توان آن را معادل سازند سورمه در نظر گرفت.

۲- سازند سروک: این سازند شامل دو رخساره کم عمق و عمیق می‌باشد. در محل برش الگو و فارس ساحلی، رخساره‌های کم عمق این سازند گسترش دارد. در لرستان نیز می‌توان رخساره‌های عمیق سازند سروک را دید.

۳- سازند ایلام: این سازند نیز شامل دو رخساره کم عمق و عمیق می‌باشد. رخساره عمیق این سازند شامل ۱۹۰ متر سنگ آهک‌های رسی دانه‌ریز پلاژیک خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و میان لایه‌های نازک شیل است.

۴- سازند گورپی: در بیش‌تر نواحی زاگرس، سازند گورپی شامل مارن، شیل‌های خاکستری مایل به آبی است که میان لایه‌های از سنگ‌های نازک رسی دارد و به دلیل زود فرسا بودن، سیمای آن فرسوده است.

۵- سازند پابده: از نظر سنگ‌شناسی از شیل و آهک‌های رسی تشکیل شده است.

۶- سازند تله‌زنگ: از نظر سنگ‌شناسی از آهک‌های دانه متوسط تا توده‌ای به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای تشکیل شده است که به طور هم‌شیب بر روی سازند امیران و زیر سازند کشکان قرار دارد و سن آن پالئوسن تا ائوسن میانی است.

۷- سازند شهبازان: از نظر سنگ‌شناسی دارای دولومیت و آهک‌های دولومیتی سفید تا قهوه‌ای حفره‌دار است. گسترش سازنده شهبازان محلی است و بیش‌تر در نواحی

هم‌چنین برخی از پژوهشگران به بررسی روابط میان شاخص‌های مقاومتی سنگ‌ها با شاخص‌های کیفی مصالح پرداخته‌اند. از شاخص‌های بررسی کیفیت مصالح سنگی می‌توان به ارزش ضربه‌ای سنگدانه^۱ (AIV)، ارزش سایش لوس آنجلس^۲ (LAV)، افت وزنی در برابر سولفات سدیم (ساندس) و ارزش صیقلی سنگ^۳ (PSV) اشاره نمود. از پژوهش‌های صورت گرفته در این باره می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- (کارگیل و شکور، ۱۹۹۰) به ارزیابی رابطه مقاومت فشاری تک‌محوری با ارزش سایش لوس آنجلس پرداخته‌اند.

- (قهرمان و فتر، ۲۰۰۷) به همبستگی مناسبی بین ارزش سایش لوس آنجلس و مقاومت فشاری تک‌محوری دست یافته‌اند.

- (احمد و همکاران، ۲۰۱۷) در بخشی از پژوهش خود رابطه میان AIV و I_{s50} را برای سه گروه سنگی آذرین و دگرگونی و رسوبی مورد بررسی قرار داده‌اند و به رابطه ۷ با ضریب تعیین ۰/۷۷۴ دست یافته‌اند.

$$I_{s50} = 25.005 - 6.512 \ln(AIV) \quad (۷)$$

به علت گسترش سنگ‌های کربناته در کشور و کاربرد وسیع این سنگ‌ها در پروژه‌های عمرانی به عنوان Rip-Rap در سدهای خاکی، موج شکن‌های ساحلی، سنگدانه برای راه‌آهن و زیرسازی مسیر راه‌ها و سنگدانه بتن و هم‌چنین با توجه به اینکه تا کنون مطالعات زیادی درباره یافتن ارتباط بین ارزش ضربه‌ای سنگدانه (AIV) با مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای انجام نشده است، در این پژوهش این پارامتر نیز با سایر خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در غرب ایران قرار دارد که بخشی از حوضه رسوبی- ساختاری زاگرس است که در دو بخش زاگرس مرتفع و چین‌خورده و در حد فاصل شهرهای کرمانشاه و ایلام قرار گرفته است. سنگ‌های مورد مطالعه

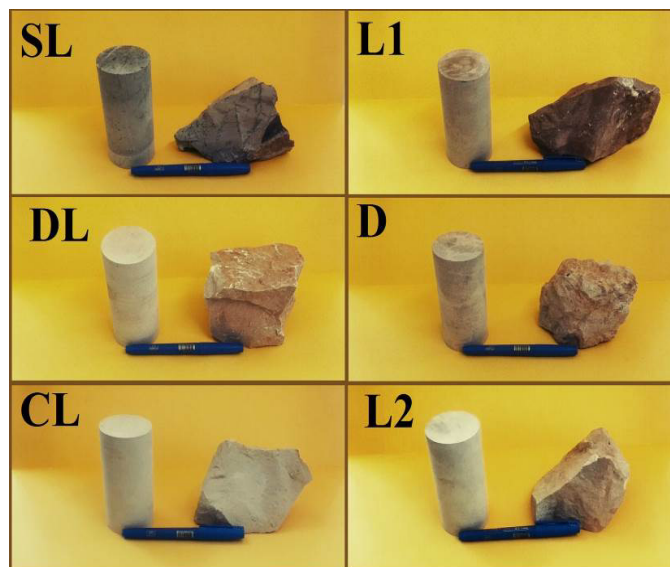
¹ Aggregate Impact Value

² Los Angeles Abrasion Value

³ Polished Stone Value

جدول ۲. مشخصات و مختصات جغرافیایی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

کد نمونه سنگ	سازند	نام سنگ	طبقه‌بندی دانه‌ها ۱۹۶۲	موقعیت جغرافیایی	
				عرض	طول
SL	هم‌ارز سازند سورمه ؟	آهک سیلیس‌دار	گل‌سنگ	۳۴° ۱۶' ۳۵"	۴۷° ۴' ۵"
L1	سازند آسماری	آهک	بایوکلست و کستون-پکستون	۳۳° ۴۹' ۹"	۴۶° ۴۱' ۵۲"
DL	سازند آسماری	آهک دولومیتی شده	بایوکلست پکستون دولومیتی شده	۳۳° ۴۹' ۱۳"	۴۶° ۴۱' ۲۶"
D	سازند آسماری	دولومیت	دولستون	۳۳° ۴۶' ۵۸"	۴۶° ۴۰' ۱۹"
CL	سازند پایده	آهک رس‌دار	گل‌سنگ	۳۳° ۳۹' ۳۲"	۴۶° ۲۷' ۱۴"
L2	سازند پایده	آهک	بایوکلست پکستون	۳۳° ۳۹' ۲۹"	۴۶° ۲۷' ۳"



شکل ۲. نمونه‌های دستی و استوانه‌ای شکل مورد مطالعه: آهک سیلیسی: SL، آهک: L1, L2، آهک دولومیتی: DL، دولومیت: D، آهک رس‌دار: CL

۴-۱- خصوصیات فیزیکی سنگ‌های کربناته
شناخت خواص فیزیکی سنگ‌ها از ابتدایی‌ترین مرحله مطالعه سنگ‌هاست، زیرا این خواص تقریباً با سایر بخش‌های دیگر از قبیل طبقه‌بندی، حفاری، استخراج و اکتشاف معادن، پایداری سازه‌های سنگی، لرزه‌شناسی، مقاومت توده‌های سنگی و روش‌های اجرایی به نحو کاملاً چشمگیری ارتباط دارند (وفائیان، ۱۳۹۱). این خواص برای هر نمونه سنگ پنج مرتبه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل از آن‌ها، اندازه‌گیری شد و میانگین نتایج به شرح جدول ۳ می‌باشد.

۴-۲- میزان کربنات کلسیم (CaCO_3)

مطابق با شکل ۳ مقدار کربنات کلسیم موجود در سنگ‌های مورد پژوهش با آزمون کلسی‌متری به روش تیتراسیون مشخص گردید، برای انجام این آزمون از هر

۴-۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های آماری

در این پژوهش مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای بر اساس استاندارد ISRM 2007^1 تعیین گردیده و برای تعیین مقاومت سنگدانه‌ها در برابر خرد شدن در اثر ضربه از آزمایش ارزش ضربه‌ای سنگدانه به روش پیشنهادی استاندارد BS 812:112^2 استفاده گردیده است، همچنین برای شناخت خواص شیمیایی بررسی مقاطع نازک، آزمایش XRD و کلسی‌متری انجام شد و تحلیل‌های آماری داده‌ها با نرم‌افزار Minitab انجام شده است.

¹ International Society for Rock Mechanics

² British Standards

(SL) چون نمونه حاوی ندول‌های چرتی می‌باشد تا حد امکان سعی شد که پودر سنگ از بخش غیرسیلیسی تهیه شود، زیرا نمونه دستی این سنگ به طور تقریبی دارای ده تا بیست درصد چرت می‌باشد.

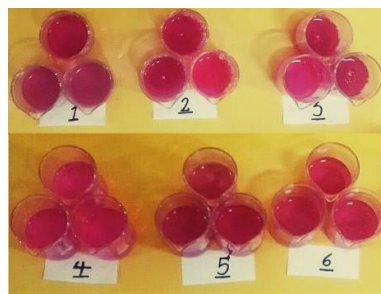
نمونه به مقدار کافی پودر سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ تهیه شد. این آزمون برای هر نمونه سنگ سه بار انجام شد که میانگین نتایج آن به شرح جدول ۴ می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است در نمونه مادستون

جدول ۳. میانگین خصوصیات فیزیکی سنگ‌های کربناته مورد مطالعه

کد نمونه سنگ	$\gamma_{dry} \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$	$\gamma_{sat} \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$	n (%)	IV (%)
SL	2.64	2.65	0.3	0.07
L1	2.60	2.63	2.7	0.335
DL	2.58	2.61	3.02	0.759
D	2.74	2.76	1.45	0.441
CL	2.48	2.56	7.35	1.15
L2	2.59	2.63	3.48	0.433

جدول ۴. میزان کربنات کلسیم نمونه سنگ‌ها

ایستگاه	کد نمونه سنگ	درصد کربنات کلسیم			
		شماره آزمایش			میانگین
		۱	۲	۳	
S1	SL	67.6	70.7	63.2	67.2
S2	L1	94	95.2	96.5	95.2
S3	DL	85	87.5	86	86.2
S4	D	79	72.5	78.5	76.7
S5	CL	81	80.5	83	81.5
S6	L2	85.5	84	83.5	84.3



(ت)



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳. مراحل انجام آزمایش کلسیمتری؛ الف) پودر سنگ عبوری از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر)، ب) واکنش کربنات کلسیم موجود در پودر سنگ با اسید کلریدریک یک نرمال (HCl 1N) و افزودن معرف فنول‌فتالین به محلول، پ) افزودن سود به محلول و اندازه‌گیری میزان اسید مصرفی پس از تغییر رنگ محلول به صورتی مایل به ارغوانی، ت) تعداد آزمون انجام شده برای هر نمونه سنگ

۴-۳- خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ‌ها

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها پایه‌ای برای بررسی و تجزیه و تحلیل‌های مهندسی بر روی آن‌ها می‌باشد. ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها به عوامل مختلفی وابسته است، به عنوان مثال لیتولوژی یکی از فاکتورهای مهم زمین‌شناسی است که روی خواص مکانیکی سنگ‌ها تأثیر به سزایی دارد (خانلری، ۱۳۹۴). به منظور تعیین این خواص آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری^۱ (UCS)، مقاومت بار نقطه‌ای^۲ (PLT) و مقاومت کششی برزیلی^۳ (BTS) روی سنگ‌های مورد مطالعه انجام گرفت. لازم به ذکر است که این آزمایش‌ها برای هر تیپ سنگ در دو حالت خشک و اشباع و بر روی ۱۰ نمونه استوانه‌ای

مطابق با استاندارد ISRM 2007 انجام شد و میانگین نتایج این خواص به شرح جدول ۵ می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری مقاومت ضربه‌ای سنگدانه‌ها (AIV) از آزمایش ارزش ضربه‌ای سنگدانه، مطابق با استاندارد BS 812:112 استفاده شد، مقدار AIV به صورت درصدی از نسبت مصالح عبوری از الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلی‌متر) به وزن اولیه سنگدانه تعریف می‌شود. این آزمون سه بار روی سنگدانه‌های هر نمونه سنگ انجام شد که نتایج یکی از این آزمون‌ها در جدول ۶ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۴ برخی از تجهیزات بکار رفته در این پژوهش و در شکل ۵ سنگدانه‌های مورد مطالعه و مصالح خرد شده بعد از آزمایش AIV ملاحظه می‌گردد.



(ت)



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۴. دستگاه‌های مکانیکی استفاده شده در این پژوهش؛ (الف) دستگاه تعیین مقاومت کششی برزیلی، (ب) دستگاه اعمال بار نقطه‌ای، (پ) دستگاه تعیین ارزش ضربه‌ای سنگدانه، (ت) دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری

جدول ۵. میانگین خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ‌ها

نوع و تعداد هر آزمایش ایستگاه و کد نمونه سنگ		UCS (MPa)		BTS (MPa)		PLT [IS ₅₀ (MPa)]	
		خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
		۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
S1	SL	116.32	91.33	11.15	9.56	6.31	5.89
S2	L1	105.28	86.39	8.67	6.43	4.71	4.23
S3	DL	96.81	75.4	8.06	5.91	4.32	3.75
S4	D	111.75	88.46	9.64	8.81	5.24	4.9
S5	CL	86.5	58.9	7.72	5.35	4.1	3.1
S6	L2	88.84	65.87	8.46	6.72	4.23	4

¹ Uniaxial Compressive Strength² Point Load Test³ Brazilian Tensile Strength



شکل ۵. نمونه‌های آزمایش ارزش ضربه‌ای؛ الف) سنگدانه‌ها قبل از انجام آزمایش ب) مصالح خرد شده عبوری از الک شماره ۸ پس از آزمایش

جدول ۶. نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای برای نمونه سنگ‌ها

ایستگاه	کد نمونه سنگ	وزن اولیه (gr)	وزن عبوری از الک شماره ۸ (gr)	AIV (%)
S1	SL	530	44.6	8.41
S2	L1	522.8	46.1	8.82
S3	DL	536.7	56.9	10.60
S4	D	505.6	44.8	8.86
S5	CL	520.9	67.1	12.88
S6	L2	530	57.1	10.77

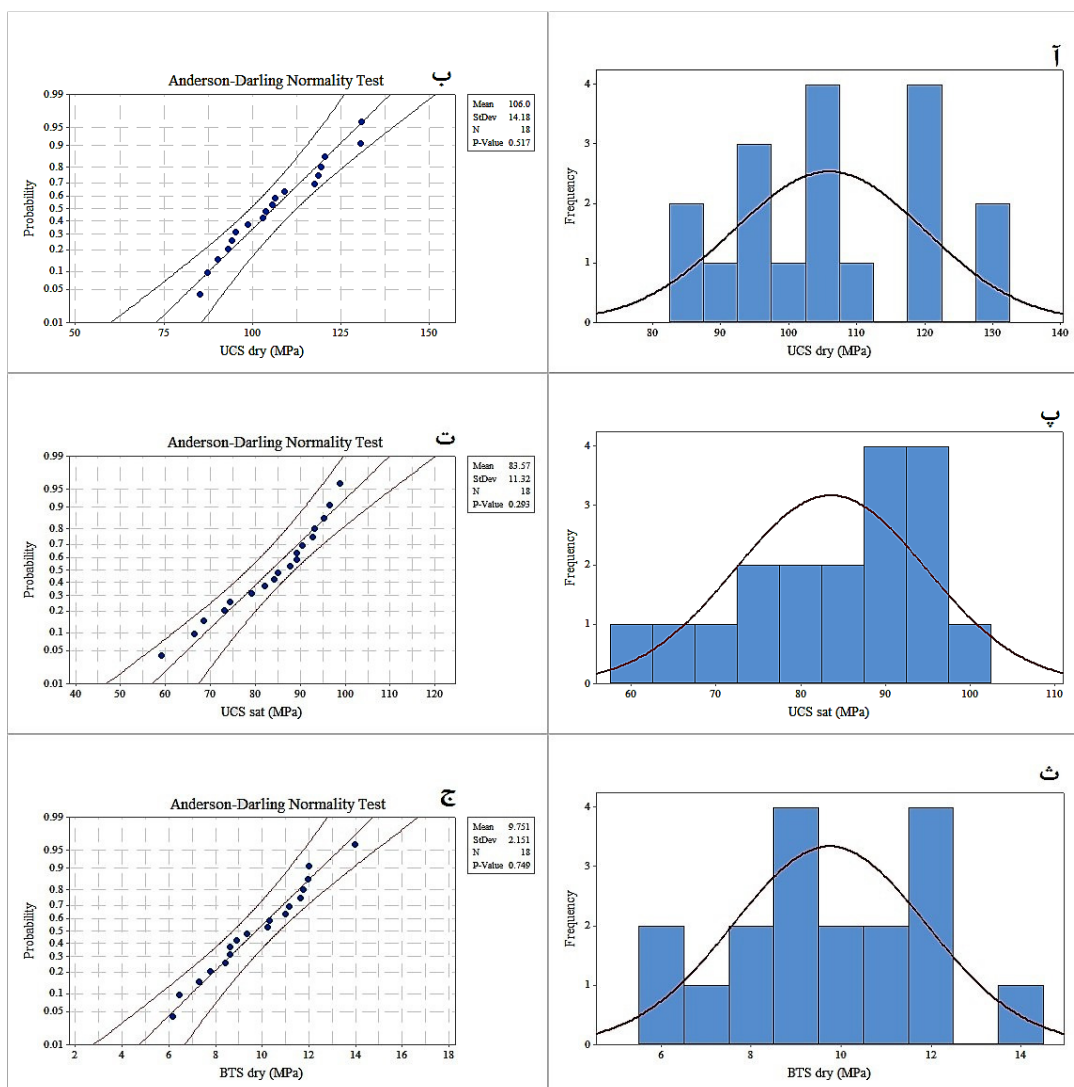
توزیع آماری مناسب را برای داده‌های مورد مطالعه پیدا کرد. اگر سطح معنی‌داری (P-value) به دست آمده از سطح معنی‌داری مبنا، که مقادیر آن برابر با ۰/۰۵ است بیش‌تر باشد، داده‌ها توزیع نرمال دارند و در غیر این صورت توزیع داده‌ها نرمال نخواهد بود. مطابق با شکل ۶ برای تمامی داده‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، شاخص بار نقطه‌ای و ارزش ضربه‌ای سنگدانه، سطح معنی‌داری به دست آمده از سطح معنی‌داری مبنا بیش‌تر است. بنابراین فرض نرمال بودن داده‌ها با فاصله اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌شود. همچنین از روی شکل و نحوه توزیع منحنی چگالی فراوانی نسبی و آزمون‌های نرمال بودن، می‌توان به ویژگی‌های جامعه آماری دست یافت. مطابق با شکل ۶ با استفاده از نرم‌افزار Minitab هیستوگرام فراوانی و منحنی چگالی فراوانی نسبی داده‌ها ترسیم شده است. تقارن هیستوگرام فراوانی و مقادیر P-value در آزمون اندرسون-دارلینگ نشان‌دهنده توزیع نرمال در تمامی داده‌ها می‌باشد، در جدول ۹ خلاصه آنالیزهای آماری آزمون اندرسون-دارلینگ آمده است.

۴-۴- بررسی و تحلیل آماری داده‌ها

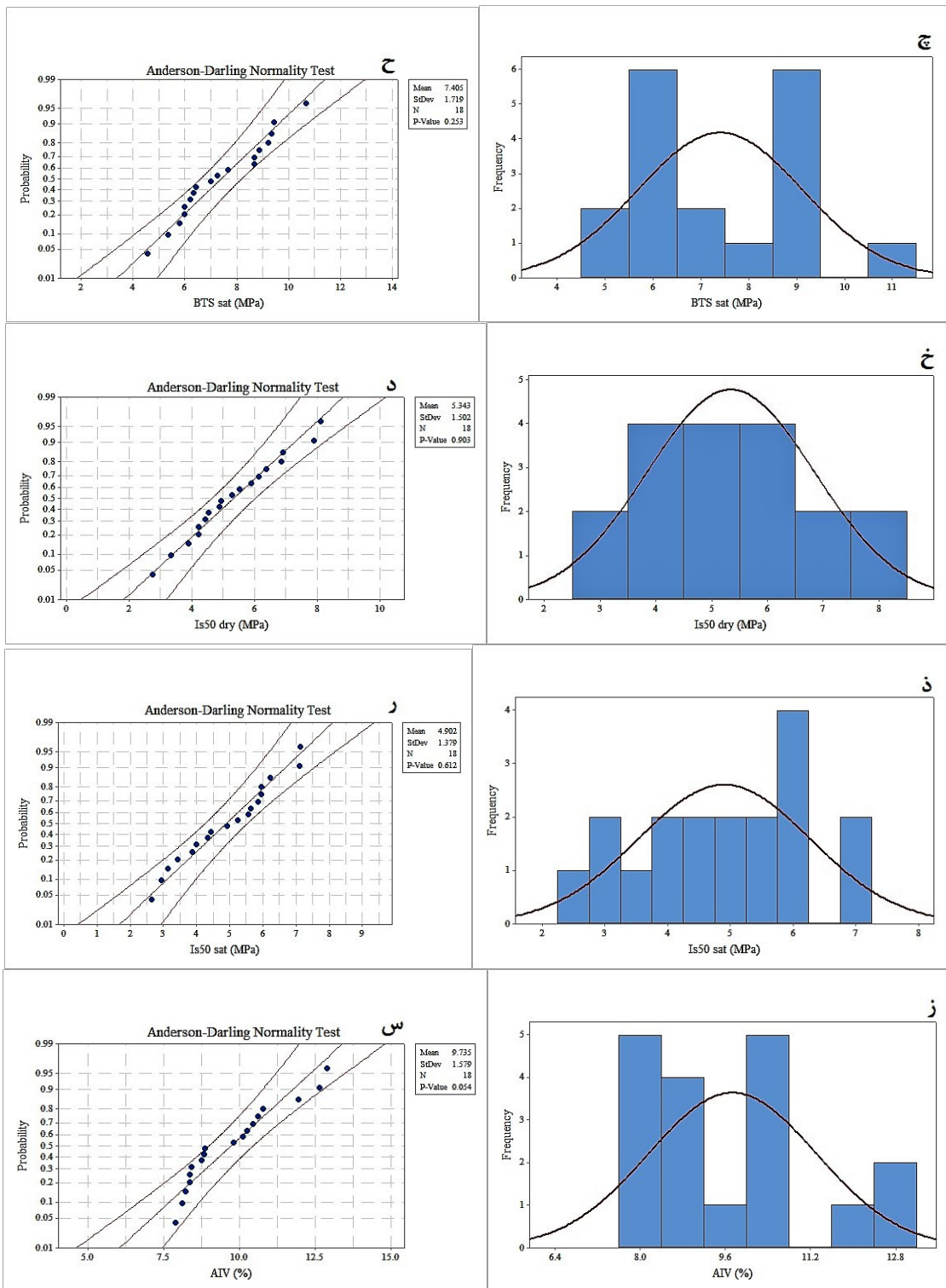
به منظور داشتن جامعه آماری مناسب و تحلیل‌های آماری برای هر نمونه سنگ، از هر آزمایش نتیجه سه مورد از آن برای بررسی روابط میان خواص مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری تک‌محوری، کششی برزیلی، بار نقطه‌ای و ارزش ضربه‌ای سنگدانه در نظر گرفته شد، در جدول ۷ داده‌های مورد بررسی مشاهده می‌شوند. همچنین شاخص‌های آماری محاسبه شده داده‌ها به شرح جدول ۸ است. در ادامه با استفاده از آزمون اندرسون-دارلینگ داده‌های استخراج شده برای بررسی توزیع نرمال توسط نرم‌افزار Minitab بررسی شده‌اند (استیونز، ۱۹۷۴). این آزمون فرض، آزمونی است که فرض نرمال بودن داده‌ها را بررسی می‌کند. آزمون اندرسون-دارلینگ دقیق‌ترین و قوی‌ترین روش برای مطمئن شدن از نرمال بودن داده‌ها می‌باشد، چون تابع توزیع تجمعی تجربی مشاهدات را با تابع توزیع تجمعی نرمال مقایسه می‌کند. آزمون اندرسون-دارلینگ برای برازش کلیه تابع توزیع‌ها به کار می‌رود و دقیق‌ترین آزمون فرض برای برازش داده‌ها می‌باشد (امیری و کرمی، ۱۳۹۴). در نرم‌افزار Minitab با استفاده از آزمون اندرسون-دارلینگ می‌توان

جدول ۷. داده‌های مورد استفاده برای آنالیزهای آماری

ایستگاه	کد نمونه سنگ	UCS(MPa)		BTS(MPa)		IS ₅₀ (MPa)		AVI dry (%)
		خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
S1	SL	130.45	96.48	13.97	10.67	7.9	7.1	7.90
S1	SL	120.32	93.13	11.97	9.35	6.85	5.94	8.23
S1	SL	118.4	89.12	11.62	9.22	5.9	5.62	8.41
S2	L1	109.03	92.75	10.23	7.65	6.38	5.86	8.36
S2	L1	106.41	89.13	9.34	7.23	4.93	4.91	8.74
S2	L1	103.69	84.99	8.9	6.98	4.54	4.56	8.82
S3	DL	102.89	87.71	10.3	6.32	5.53	5.23	9.81
S3	DL	98.62	84.13	8.6	5.97	4.42	3.87	10.24
S3	DL	95.21	79.14	7.3	5.34	4.21	3.43	10.60
S4	D	130.67	98.72	12	9.42	8.12	7.12	8.12
S4	D	119.42	95.26	11.76	8.87	6.9	6.21	8.35
S4	D	117.5	90.41	10.99	8.67	6.14	5.94	8.86
S5	CL	93.13	73.06	8.63	6.2	4.89	3.98	11.94
S5	CL	90.14	68.42	7.76	5.78	3.34	2.93	12.65
S5	CL	87.25	59.12	6.14	4.54	2.73	2.65	12.88
S6	L2	105.63	82	11.16	8.68	5.29	5.56	10.12
S6	L2	94.13	74.25	8.42	6.43	4.21	4.32	10.43
S6	L2	85.12	66.42	6.43	5.97	3.9	3.13	10.77



شکل ۶. هیستوگرام فراوانی و منحنی توزیع نرمال برای داده‌های: (آ) مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک، (ب) مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت اشباع، (ث) مقاومت کششی برزیلی در حالت خشک، (ج) مقاومت کششی برزیلی در حالت اشباع.



ادامه شکل ۶. چ) مقاومت کششی برزیلی در حالت اشباع، خ) شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک، د) شاخص بار نقطه‌ای در حالت اشباع، ز) ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک، و نمودار آزمون اندرسون-دارلینگ برای توزیع نرمال در داده‌های؛ ج) مقاومت کششی برزیلی در حالت اشباع، د) شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک، ر) شاخص بار نقطه‌ای در حالت اشباع، س) ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک

جدول ۸. بررسی شاخص‌های آماری نتایج آزمایشات

AIV (%)	UCS (MPa)		BTS (MPa)		I _{s50} (MPa)		اطلاعات آماری
	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
18	18	18	18	18	18	18	تعداد
12.88	130.67	98.72	13.97	10.67	8.12	7.12	بیشینه
7.90	85.12	59.12	6.14	4.54	2.73	2.56	کمینه
4.98	45.55	39.6	7.83	6.13	5.39	4.56	دامنه تغییرات
9.73	106.00	83.57	9.75	7.40	5.34	4.90	میانگین
-	-	-	-	5.97	4.21	5.94	مد
9.33	104.66	86.35	9.78	7.10	5.11	5.07	میانه
2.49	201.09	128.08	4.63	2.96	2.26	1.90	واریانس
1.58	14.18	11.32	2.15	1.72	1.50	1.38	انحراف معیار
0.162	0.134	0.135	0.221	0.232	0.281	0.281	ضریب تغییرات

جدول ۹. خلاصه آنالیزهای آماری آزمون اندرسون - دارلینگ

پارامترهای مکانیکی	شرایط آزمایش	نوع منحنی توزیع آماری	مقدار P-value
UCS	خشک	نرمال است	۰/۵۱۷
UCS	اشباع	نرمال است	۰/۲۹۳
BTS	خشک	نرمال است	۰/۷۴۹
BTS	اشباع	نرمال است	۰/۲۵۳
IS ₅₀	خشک	نرمال است	۰/۹۰۳
IS ₅₀	اشباع	نرمال است	۰/۶۱۲
AIV	خشک	نرمال است	۰/۰۵۴

۵- بحث

از آنجایی که آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون‌های آزمایشگاهی مشکل و انجام آن‌ها نیازمند وقت و هزینه فراوان است، لذا همه روابط میان خواص مکانیکی به دست آمده در آزمایشگاه از طریق رگرسیون ساده (تک متغیره) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند، به این منظور علاوه بر معادله خطی، معادلات توانی، نمایی و لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بر حسب بهترین برازش در شکل ۷ و جدول ۱۰ ارائه شده است.

همچنین برای ارزیابی کارایی هر معادله رگرسیون، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) (رابطه ۸)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (رابطه ۹) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) (رابطه ۱۰) محاسبه شده است که بسیاری از پژوهشگران برای پیش‌بینی کارایی مدل‌ها از آن‌ها استفاده کرده‌اند که برای نمونه می‌توان به (فینول و همکاران، ۲۰۰۱)، (گوکچه اوغلو، ۲۰۰۲) و (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴) اشاره نمود.

$$VAF = \left(1 - \frac{VAR(A_{imeas} - A_{ipred})}{VAR(A_{imeas})} \right) \times 100 \quad (۸)$$

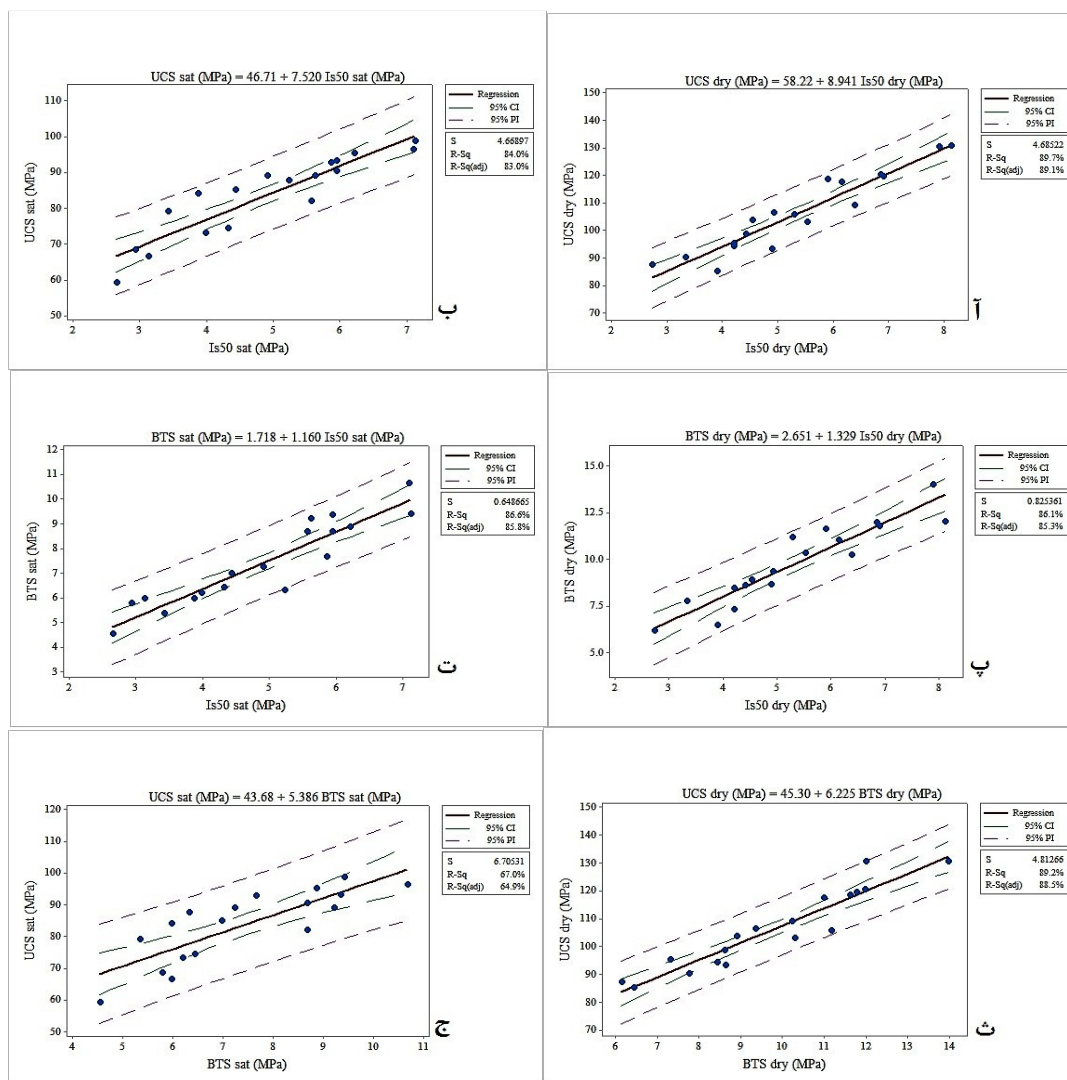
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_{imeas} - A_{ipred})^2} \quad (۹)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{imeas} - A_{ipred}| \quad (۱۰)$$

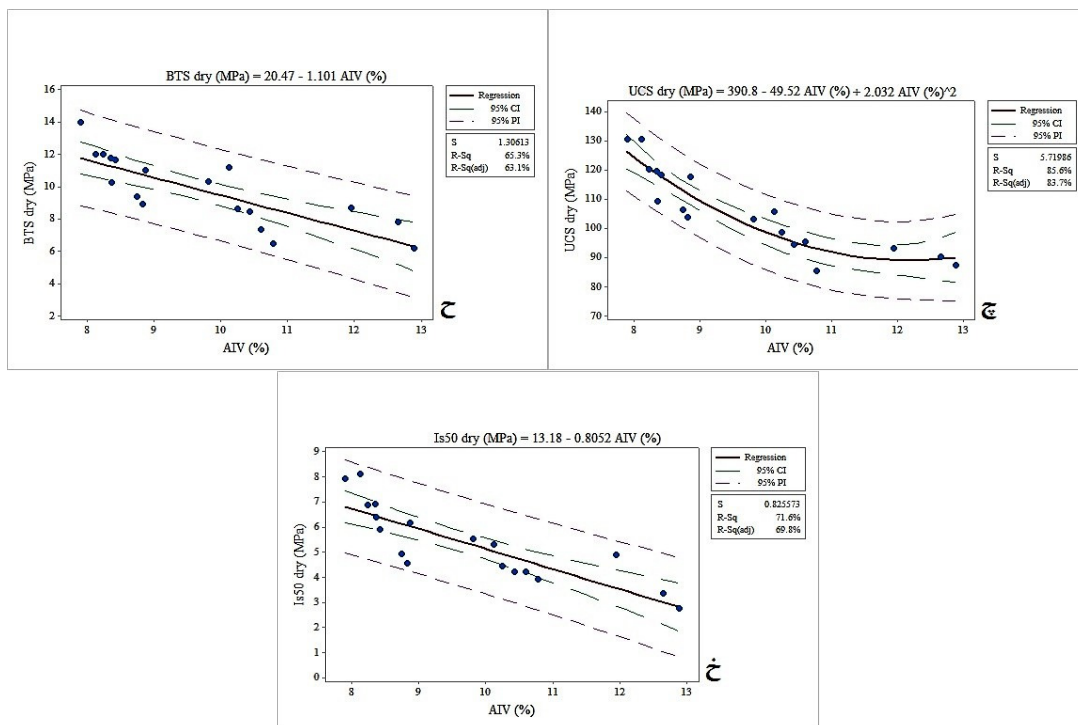
در روابط فوق A_{imeas} ، A_{ipred} ، i مین جزء محاسبه شده و A_{ipred} ، i مین جزء پیش‌بینی شده از معادله رگرسیون و N تعداد داده‌ها می‌باشد. هرچه مقدار VAF بزرگ‌تر و RMSE و MAE کوچک‌تر باشد، معادله پیش‌بینی کننده برآورد بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین اگر R^2 و VAF به ترتیب برابر با یک و ۱۰۰ و RMSE و MAE برابر صفر باشند معادله به دست آمده، بهترین برآورد را ارائه خواهد کرد.

جدول ۱۰. روابط تک متغیره میان ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های کربناته منطقه مورد مطالعه

روابط پیشنهادی	MAE	RMSE	VAF (%)	R ²	متغیرها
UCS=58.2+8.9IS ₅₀	3.429	4.417	89.73	0.897	UCS-IS ₅₀ (dry)
UCS=46.7+7.5IS ₅₀	3.647	4.402	83.98	0.840	UCS-IS ₅₀ (sat)
BTS=2.6+1.33IS ₅₀	0.600	0.778	86.14	0.861	BTS-IS ₅₀ (dry)
BTS=1.72+1.16IS ₅₀	0.490	0.611	87.35	0.866	BTS-IS ₅₀ (sat)
UCS=45.3+6.22BTS	3.427	4.537	89.16	0.892	UCS-BTS (dry)
UCS=43.7+5.39BTS	5.685	6.321	66.96	0.670	UCS-BTS (sat)
BTS=20.47-1.1AIV	1.043	1.231	65.29	0.653	BTS-AIV (dry)
IS ₅₀ =13.18-0.8AIV	0.617	0.778	71.57	0.716	IS ₅₀ -AIV (dry)
UCS=390.8-49.52AIV+2.032(AIV) ²	4.110	5.222	85.64	0.856	UCS-AIV (dry)



شکل ۷. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک با: (آ) شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک، (ب) مقاومت کششی برزیلی در حالت خشک، (پ) شاخص بار نقطه‌ای در حالت اشباع، (ج) مقاومت کششی برزیلی در حالت اشباع، و رابطه مقاومت کششی برزیلی در حالت خشک با: (ب) شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک، (ت) رابطه مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای در حالت اشباع



ادامه شکل ۷. چ) ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک، و رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت اشباع، ج) ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک، خ) رابطه شاخص بار نقطه‌ای و ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک

مگاپاسکال می‌شود که منطقی به نظر نمی‌رسد که علت این امر را می‌توان به وجود ناهمسانی در برخی از نمونه‌های مورد آزمایش دانست. همچنین این مساله در رابطه سایر محققین از جمله رابطه دیر و میلر (۱۹۹۶) نیز مشهود است چنانچه اگر در رابطه دیر و میلر (رابطه ۱۱) مقدار شاخص بار نقطه‌ای ۱ مگاپاسکال باشد مقدار مقاومت تراکمی تک‌محوری حدود ۵۰ مگاپاسکال می‌شود.

$$UCS = 20.71IS50 + 29.6 \quad (11)$$

همچنین استفاده از رگرسیون چند متغیره منجر به تخمین بهتری از مقاومت تراکمی تک‌محوری می‌شود و می‌توان از این روابط برای ارزیابی مقدماتی خواص مکانیکی سنگ‌های کربناته منطقه استفاده کرد.

با توجه به این که رگرسیون تک‌متغیره یک نتیجه تقریبی ارائه می‌دهد، لذا در این پژوهش روش تخمین از طریق آنالیز چند متغیره نیز مورد بررسی قرار گرفت. این آنالیز با استفاده از دو متغیر مستقل و با تعویض متغیرها انجام شد، همچنین برای ارزیابی کارایی معادله‌ها مقادیر R^2 ، VAF، RMSE و MAE محاسبه گردیده و در جدول ۱۱ روابط به دست آمده ارائه شده است.

با توجه به روابط به دست آمده از رگرسیون تک‌متغیره می‌توان گفت که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای نمی‌تواند معیار مناسبی جهت پیش‌بینی دقیق مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ‌های مورد مطالعه باشد، به طور مثال اگر در رابطه میان شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت تراکمی تک‌محوری در حالت خشک، مقدار شاخص بار نقطه‌ای ۱ مگاپاسکال باشد میزان مقاومت تراکمی تک‌محوری ۶۷

جدول ۱۱. روابط دو متغیره میان ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های کربناته منطقه مورد مطالعه

متغیر مستقل	$R^2(adj)$	VAF(%)	RMSE	MAE	روابط پیشنهادی
$BTS_{(dry)} - IS50_{(dry)}$	92.78	92.78	3.702	3.118	$UCS_{(dry)} = 50.02 + 3.1BTS_{(dry)} + 4.83IS50_{(dry)}$
$BTS_{(dry)} - AIV_{(dry)}$	95.42	95.41	2.952	2.212	$UCS_{(dry)} = 227.9 + 3.789BTS_{(dry)} - 28.31AIV_{(dry)} + 1.201(AIV_{(dry)})^2$
$BTS_{(dry)} - AIV_{(dry)}$	88.80	88.80	0.488	0.373	$IS50_{(dry)} = 3.11 - 0.263AIV_{(dry)} + 0.492BTS_{(dry)}$

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های خصوصیات فیزیکی، ضعیف‌ترین ویژگی‌های فیزیکی مربوط به نمونه گل‌سنگ (CL) می‌باشد، مقادیر تخلخل، جذب آب و دانسیته خشک برای این نمونه به ترتیب برابر با ۷/۳۵ درصد، ۱/۱۵ درصد و ۲/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. همچنین کمترین خواص مکانیکی نیز مربوط به همین نمونه می‌باشد به گونه‌ای که مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای اندازه‌گیری شده برای این نمونه، به ترتیب برابر با ۸۶/۵، ۷/۷۲، ۴/۱ مگاپاسکال است که علت این امر وجود کانی رسی ایلیت در این نمونه می‌باشد.

نمونه گل‌سنگ (SL)، بالاترین خواص مکانیکی در میان سایر نمونه‌ها را داراست، به گونه‌ای که مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای اندازه‌گیری شده برای این نمونه، به ترتیب برابر با ۱۱۶/۳۲ و ۱۱/۱۵ و ۶/۳۱ مگاپاسکال است که عامل آن را می‌توان به وجود گرهک‌های چرتی، بافت ریز میکرایتی و تخلخل پایین این سنگ نسبت داد.

با توجه به نتایج آزمایش کلسی‌متری بالاترین میزان کربنات کلسیم با میانگین ۹۵/۲ درصد مربوط به بایوکلس و کستون-پکستون سازند آسماری می‌باشد که نشان دهنده پتانسیل بالای کارستی شدن در سنگ‌آهک آسماری نسبت به سایر نمونه‌هاست (قبادی، ۱۳۸۸). همچنین کمترین میزان آهک مربوط به نمونه گل‌سنگ (SL) با میانگین ۶۷/۲ درصد است که علت آن عدم امکان تفکیک کامل بخش چرتی از بخش کربناته می‌باشد.

میزان AIV برای تمامی نمونه‌ها کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد. با توجه به این پارامتر می‌توان گفت که کیفیت این سنگ‌ها به عنوان مصالح سنگی خوب و مناسب است. اما در مورد استفاده از این سنگ‌ها به عنوان مصالح باید به چند مورد توجه نمود؛ نمونه مادستون (SL) دارای چرت است و نباید از این سنگ به عنوان سنگدانه در بتن استفاده نمود، زیرا با توجه به واکنش شیمیایی که قبل از سخت شدن بتن بین محیط آلكالین بتن و چرت اتفاق می‌افتد، مقاومت بتن به شدت کاهش یافته و حساسیت آن در برابر خرد شدن در مقابل یخ زدن افزایش می‌یابد (قبادی، ۱۳۹۰).

با توجه به مقدار (P-value) بیش‌ترین و کمترین توزیع نرمال در آزمون اندرسون-دارلینگ به دست آمده به ترتیب با مقادیر ۰/۰۵۴ و ۰/۹۰۳ مربوط به داده‌های شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک و ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک می‌باشد.

در رگرسیون تک‌متغیره بالاترین ضریب تعیین به مقدار ۰/۸۹۷، مربوط به رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک و کمترین ضریب تعیین به مقدار ۰/۶۵۳، مربوط به رابطه بین مقاومت کششی برزیلی با ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک است.

استفاده از رگرسیون چندمتغیره منجر به تخمین بسیار بهتری از مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود، در این حالت بهترین معادله چند متغیره برازش شده با مقادیر $R^2(\text{adj})$ (ضریب تعیین تعدیل شده)، VAF، RMSE، MAE به ترتیب ۹۵/۴۲، ۹۵/۴۲، ۲/۲۱۲، ۲/۹۵۹، ۲/۲۱۲ مربوط به رابطه مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت کششی برزیلی و ارزش ضربه‌ای سنگدانه در حالت خشک می‌باشد.

منابع

- امیری، م.، کرمی، ش (۱۳۹۴) کنترل کیفیت و تحلیل آماری با Minitab، انتشارات کیان، چاپ دوم، ۶۰۰ ص.
- خانلری، غ. ر (۱۳۹۴) اصول مکانیک سنگ، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، چاپ دوم، ۴۸۶ ص.
- درویش‌زاده، ع (۱۳۸۹) زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیر کبیر تهران، چاپ چهارم، ۴۳۴ ص.
- فهمی‌فر، ا. و سروش، ح (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها جلد اول (آزمون‌های آزمایشگاهی)، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، دانشگاه امیر کبیر، چاپ اول، ۷۴۰ ص.
- قبادی، م. ح (۱۳۸۸) زمین‌شناسی مهندسی کارست، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، چاپ دوم، ۳۰۴ ص.
- قبادی، م. ح (۱۳۹۰) مبانی زمین‌شناسی مهندسی، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، چاپ سوم، ۴۰۸ ص.
- محمدی، س. د.، مهدی‌آبادی، ن.، ساعدی، ب (۱۳۹۴) بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی رادیولاریت‌های چرتی جنوب شهر کرمانشاه، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، شماره ۳ و ۴، ص ۱۶-۱.
- معماریان، ح (۱۳۹۵) زمین‌شناسی برای مهندسين، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ ششم، ۷۶۸ ص.

- Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 p.
- Kahraman, S (2001) The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (3): 345-353.
- Kahraman, S., & Fener, M (2007) Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength, *Mater. Lett*, 61: 4861-4865.
- Raeisi, E., & Kowsar, N (1997) Development of Shahpour Cave, southern Iran, *Cave and Karst Science*, 24 (1): 27-34.
- Rajabi, A., Hosseini, A., & Heidari, A (2017) The New Empirical Formula to Estimate the Uniaxial Compressive Strength of Limestone; North of Saveh a Case Study, *Journal of Engineering Geology*, 11 (3) 159-180.
- 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*.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., & Papanakil, S (2009) Consolidation on strength of intact sedimentary rocks, *Engineering Geology*, 72: 261-273.
- Singh, T. N., Kainthola, A., & Venkatesh, A (2012) Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45: 259-264.
- Stephens, M. A (1974) EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, *Journal of the American Statistical Association*, 69: 730-737.
- Tondon, S., & Gupta, V (2014) Estimation of strength from Schmidt hammer rebound, point load index and compressional wave velocity, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Tucker, M. E (2001) *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*, Blackwell science, 262 p.
- نقشه زمین‌شناسی پلنگه (۱۹۷۴)، ۱:۱۰۰۰۰۰، شرکت ملی نفت ایران.
- نقشه زمین‌شناسی کرمانشاه (۱۹۹۹)، ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- نقشه زمین‌شناسی ایلام (۱۹۹۹)، ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- وفائیان، م (۱۳۹۱) خواص مهندسی سنگ‌ها (تئوری‌ها و کاربردهای اجرایی)، انتشارات ارکان دانش، چاپ چهارم، ۴۴۶ ص.
- Ahmad, M., Ansari, M. K., Sharma L. K., Singh, R., & Singh, T. N (2017) Correlation between Strength and Durability Indices of Rocks- Soft Computing Approach, *Procedia Engineering*, 191: 458 – 466.
- ASTM (2005) Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.
- British Standards Institution (1975) *Methods for determination of mechanical properties*, B.S.812: Part 3, London.
- Cargil, J., & Shakoor, A (1990) Evaluation of empirical method for measuring the uniaxial compressive strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 27: 495-503.
- Deer, D., & Miller, R (1996) *Engineering classification and index properties for intact rocks*, Tech Rep no. AFNL-TR. Air force weapons lab. WrightPatterson Air Force Base, 30.
- Dickson, J. A. D (1965) A modified staining technique for carbonate in thin section, *Nature*, V. 205, 587 p.
- Finol, J., Guo, Y. K., & Jing, X. D (2001) A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29: 97–113.
- Gokceoglu, C (2002) A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographic composition, *Engineering Geology*, 66: 39–51.
- Heidari, M., Khanlari, G., Torabi-kaveh, M., & Kargarian, S (2012) Predicting the uniaxial compressive and tensile strength of gypsum rock by point load testing, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45 (2): 256-273.
- Hoek, E., & Bray, J. W (2005) *Rock Slope Engineering*, 4th edition 2005, Spon press, 431 p.
- ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006, In: Ulusay, R., & Hudson, J. A., (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, International Society for Rock

Estimation of compressive strength and tensile strength of carbonate rocks using point load index test and their correlation with aggregate impact value (case study: Kermanshah-Ilam Road carbonate rocks)

M. H. Ghobadi¹, H. Mohseni² and S. Ahmadi^{3*}

1, 2, 3- Dept., of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

*sajadahmadi1990@gmail.com

Recieved: 2018/5/18 Accepted: 2018/8/4

Abstract

Determination of geotechnical parameters required for design of rock mass structures are one of the major issues in the engineering geology, civil and mining. Uniaxial compressive strength and tensile strength are among of these parameters which are widely used in the design of structures in rock mass. Among them, the point load index test not only has less cost and difficulty than uniaxial compressive strength and tensile strength tests; but also can be carried out at the site of the project and on samples with irregular geometry; therefore, it can be used as a criterion for the initial engineering judgment regarding tensile and compressive strength of rocks. In the research, the relationship between these parameters is analyzed with statistical analysis and the best experimental relations are presented. Moreover, due to the vast spatial occurrences of carbonate rocks in the country and their application in various development projects, the relationship between uniaxial compressive strengths, tensile strength and point load strength with aggregate impact value is also studied, which is one of the indicators for assessing the quality of materials stone. In the bivariate equations, the highest coefficient of determination is 0.897, that related to the relationship between the uniaxial compressive strength and the point load index in dry condition and the lowest coefficient of determination is 0.653, that relates to the relationship between the Brazilian tensile strength and the aggregate impact value in dry condition, also the use of multivariate regression leads to a much better estimate of uniaxial compressive strength.

Keywords: Uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, point load index, Aggregate impact value, Carbonate rock