



## بررسی روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری شیل‌های سازند شمشک

مهدی کیانیپور\*، علی ارومی‌پای و ممدرضا نیکودل

گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، Uromia@yahoo.co.uk, m.kian61@yahoo.com

(\* عهده‌دار مکاتبات)

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۱؛ تاریخ دریافت اصلاح شده: ۸۹/۱۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۱۸؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۵/۲۵

### چکیده

در این تحقیق روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری (Uniaxial Compressive Strength, UCS) شیل‌های سازند شمشک با استفاده از شاخص بارنقطه‌ای (Point Load Strength Index,  $I_s(50)$ )، تخلخل (n)، حد روانی (Liquid Limit, LL) و شاخص دوام و وارفتگی - (Durability Index, Id) بررسی شده است. به منظور بدست آوردن روابط موجود، از روش‌های آماری رگرسیون ساده (یک متغیر مستقل و یک متغیر وابسته) و رگرسیون چندمتغیره (دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته) بر روی داده‌های بدست آمده در آزمایشگاه استفاده شده است. نتایج بدست آمده از روش رگرسیون ساده، نشان‌دهنده کارایی بهتر شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ ) و شاخص‌های دوام چرخه‌ی سوم و چهارم ( $Id3-4$ ) نسبت به دیگر ویژگی‌های سنگ در تخمین UCS را است. همچنین در صورت استفاده از رگرسیون چندمتغیره، می‌توان تخمین دقیق‌تری از UCS بدست آورد و بهترین رابطه‌ی چندمتغیره به ازای استفاده از متغیرهای مستقل شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ ) و شاخص دوام چرخه‌ی چهارم ( $Id4$ ) برای کل نمونه‌ها به دست می‌آید. در ادامه نمونه‌ها به سه گروه نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین، مقاومت پایین و مقاومت متوسط تفکیک شدند و روابط موجود در هر گروه مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اخیر با انجام آنالیز چندمتغیره، می‌توان تخمین دقیق‌تری از UCS را در نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین به ازای متغیرهای مستقل شاخص دوام چرخه‌ی چهارم ( $Id4$ ) و حد روانی (LL) و برای نمونه‌های با مقاومت پایین و متوسط به ازای متغیرهای مستقل شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ ) و شاخص دوام چرخه‌ی چهارم ( $Id4$ ) به دست آورد. علاوه بر آن، نتایج بدست آمده نشان‌دهنده افزایش کارایی شاخص بار نقطه‌ای و کاهش کارایی شاخص دوام، حد روانی و تخلخل در تخمین UCS با افزایش مقاومت سنگ است.

**واژه‌های کلیدی:** سازند شمشک، شیل، مقاومت تراکمی تک‌محوری، رگرسیون چندمتغیره.

### ۱- مقدمه

طراحی‌های اولیه دارد. نحوه‌ی اندازه‌گیری این ویژگی توسط هر دو استاندارد آی‌اس آر‌ام (International Society for Rock Mechanics, ISRM 1981) و آی‌اس تی‌ام (American Society of Testing and Materials, ASTM 1984) تعیین گردیده است. انجام دقیق آزمایش تعیین مقاومت تک‌محوری خصوصاً در سنگ‌های رسی و شیل‌ها، بسیار مشکل بوده و مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس است. علاوه بر آن نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. به‌منظور رفع مشکلات

سازند شمشک در مناطق شمالی، مرکزی و شمال شرق (کپه‌داغ) ایران دارای گسترش وسیعی است و عمدتاً از تناوب لایه‌های شیل با دیگر سنگ‌های رسوبی تشکیل شده است. وجود طرح‌های عمرانی متعدد در این سازند (تونل، راه، پل، نیروگاه و ...)، اهمیت شناخت ویژگی‌های مهندسی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌را دو چندان کرده است. مقاومت تراکمی تک‌محوری از کاربردی‌ترین و مرسوم‌ترین این ویژگی‌ها است که کاربرد بسیار زیادی در تعیین خواص سنگ بکر، طبقه‌بندی توده‌ی سنگ، ارزیابی معیارهای شکست و انجام

فوق و تعیین شاخصی برای نشان دادن مقاومت سنگ، آزمایش‌های ساده‌ای همچون آزمایش‌های بار نقطه‌ای، چکش اشمیت، پانچ، سرعت صوت و روش‌های تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری با استفاده از خواص فیزیکی و پتروگرافی توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است (Cargil & Shakoore 1990, Shakoore & Bonelli 1991, Edet 1992, Ulusay et al. 1994, Alvarez Grima & Babuska 1999, Gokceoglu 2002, Faisal et al. 2007, Işık & Gürkan 2008, Işık 2009, Adrian & Russelland 2008, Kamil & Levent 2010).

علی‌رغم تحقیقات بسیاری که در گذشته صورت گرفته است، تنها تعداد معدودی روابط تجربی به منظور تخمین غیرمستقیم مقاومت تراکمی تک‌محوری شیل‌ها ارائه شده است. به لیل تنوع رفتاری شیل‌ها، کاربرد روابط تجربی به دست آمده بسیار محدود است و به همین علت بررسی روش‌های غیر مستقیم تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری برای انواع شیل‌ها در مناطق و سازندهای مختلف با استفاده از ساده‌ترین آزمون‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی آزمون‌های شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ )، تخلخل ( $n$ )، چگالی ( $\rho$ )، حلاّ روانی (LL) و شاخص دوام و وارفنگی (Id) در تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) شیل‌های سازند شمشک در منطقه‌ی سیاه‌بیشه است. برای این منظور، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های شیل سیاه‌بیشه انجام شده است و روابط تجربی موجود بین UCS و دیگر خواص سنگ مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- خواص پتروگرافی شیل‌های مورد مطالعه

شیل‌های مورد مطالعه در نام‌گذاری مقاطع میکروسکوپی تحت عنوان شیل‌های سیلتی و شیل‌های ماسه‌ای نام‌گذاری می‌شوند. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این سنگ‌ها شامل کانی‌های رسی، کوارتز، فلدسپات مسکویت و سیمان ریزبلور است. علاوه بر آن، اجزای فرعی تشکیل دهنده، شامل گلوکونیت و سریسیت، کانی‌های اپک، خرده‌سنگ‌ها، زغال و اکسیدهای آهن است (تصویر ۲).

با وجود تفاوت اندک در اجزای تشکیل‌دهنده‌ی شیل‌های مورد مطالعه، تفاوت‌های زیادی در رفتار مکانیکی این سنگ‌ها مشاهده گردید که این خود نشان‌دهنده‌ی تأثیر به‌سزای تخلخل، چگالی، نوع و میزان سیمان سنگ، نحوه‌ی ارتباط دانه‌ها، وجود و یا عدم وجود شکستگی‌های میکروسکوپی در رفتار مکانیکی این سنگ‌ها است.

### ۴- روش تمقیق

از آنجا که رفتار مکانیکی شیل‌ها به شدت تحت تأثیر ناهمسانگردی این سنگ‌ها قرار می‌گیرد، لذا در این پژوهش به منظور جلوگیری از اثر هرگونه ناهمسانگردی، ۷۲ نمونه‌ی شیل که محور مغزه‌ی حفاری عمود بر جهت لایه‌بندی آنها است (حداکثر زاویه انحراف ۶ درجه)، انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفتند.

موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی آزمون‌های شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ )، تخلخل ( $n$ )، چگالی ( $\rho$ )، حلاّ روانی (LL) و شاخص دوام و وارفنگی (Id) در تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) شیل‌های سازند شمشک در منطقه‌ی سیاه‌بیشه است. برای این منظور، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های شیل سیاه‌بیشه انجام شده است و روابط تجربی موجود بین UCS و دیگر خواص سنگ مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه‌ی سیاه‌بیشه، در ۱۳۰ کیلومتری جاده‌ی کرج-چالوس (۱۰ کیلومتری تونل کندوان) و در دامنه‌های شمالی سلسله جبال البرز واقع شده است. این منطقه از نظر تقسیمات زون‌های زمین‌شناسی ایران در زون البرز قرار می‌گیرد و از نقطه نظر تکتونیکی ناحیه‌ای است که توسط گسل‌های بسیار عمیق با روند شرقی-غربی گسله شده و به صورت بلوک‌هایی که نسبت به هم فرو رفته یا بالا آمده‌اند، درآمده است (تصویر ۱).

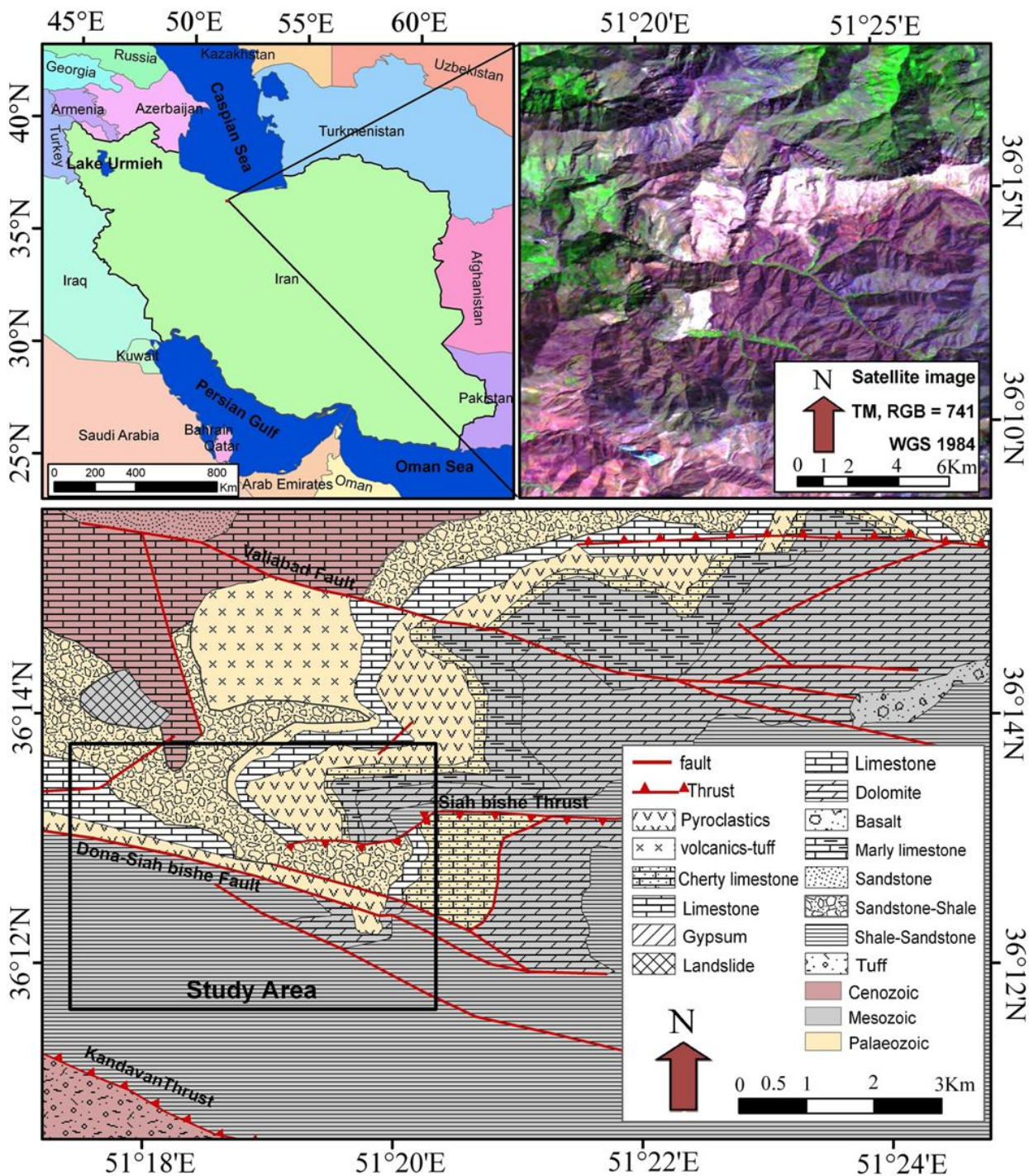
تشکیلات زمین‌شناسی مشاهده شده در این منطقه عمدتاً در محدوده‌ی سنی پالئوزوئیک و مزوزوئیک قرار دارند. سازند شمشک به سن لیاس جوان‌ترین سازند در منطقه‌ی مورد مطالعه است. این سازند با ضخامت ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ متر، متشکل از رسوبات فلیشی شامل ماسه‌سنگ‌های میکایی، سیلتستون، شیل و رس‌سنگ همراه با رگه‌های زغال و باقیمانده‌ی گیاهان است (آقانیاتی ۱۳۸۳).

ماسه‌سنگ‌های تشکیل‌دهنده‌ی این سازند عمدتاً ماسه‌سنگ‌های

آزمایش مطابق با استاندارد آی‌اس‌آر‌ام (ISRM)، شناسایی و از بین داده‌های موجود حذف شدند. همچنین از آنجا که انجام این آزمایش بر روی نمونه‌های با UCS کمتر از ۱۵ مگاپاسکال توصیه نمی‌شود (فهیمی‌فر و سروش ۱۳۸۰).

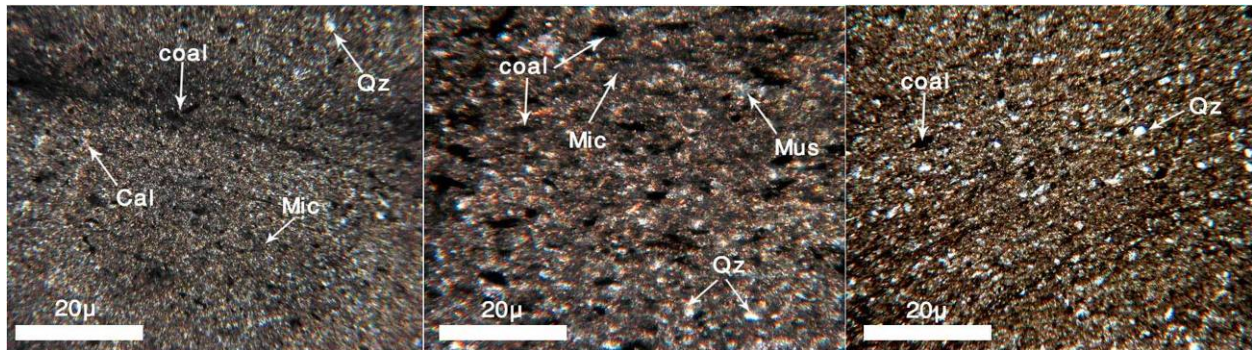
بنابراین کلیه داده‌های مربوط به نمونه‌های با UCS کمتر از ۱۵ مگاپاسکال حذف شدند. سایر آزمایش‌ها مطابق با روش‌های پیشنهادی در استاندارد آی‌اس‌آر‌ام (ISRM) انجام شده‌اند.

تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS)، شاخص بار نقطه‌ای ( $I_{s(50)}$ )، تخلخل (n)، چگالی ( $\rho$ )، سرعت عبور موج فشاری (Pressure wave velocity,  $V_p$ )، مقاومت کششی (Tensile Strength, TS)، حد روانی (LL) و شاخص دوام و وارفتگی (Id)، در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. آزمایش شاخص بار نقطه‌ای ( $I_{s(50)}$ ) بر روی نمونه‌های مورد مطالعه به روش محوری و با جهت بارگذاری عمود بر لایه‌بندی سنگ انجام شد. اشکال شکست نامعتبر در این



تصویر ۱ - محدوده‌ی مورد مطالعه در نقشه‌ی جغرافیایی و زمین‌شناسی: نقشه‌ی ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مرزن‌آباد، وحدتی دانشمند (۱۳۷۹)





تصویر ۲- مقاطع میکروسکوپی نمونه شیل‌های مورد مطالعه (کوارتز=Qz، مسکویت=Mus، زغال=Coal، کلسیت=Cal، سیمان ریزبلور=Mic)

دیر و میلر (Deere & Miller 1965)، نمونه‌ها به ۳ گروه نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین (سست)  $UCS < 25 \text{ MPa}$ ، نمونه‌های با مقاومت پایین  $25 \text{ MPa} < UCS < 50 \text{ MPa}$  و نمونه‌های با مقاومت متوسط  $50 \text{ MPa} < UCS$ ، تقسیم شدند و ضمن بررسی روابط موجود برای کل نمونه‌ها، روابط موجود در هر گروه نیز مورد بررسی قرار گرفت. در تصویر ۳، نمودار توزیع تجمعی UCS شیل‌های مورد مطالعه ضمن تفکیک نمونه‌ها، نشان داده شده است.

#### ۴-۶- بحث

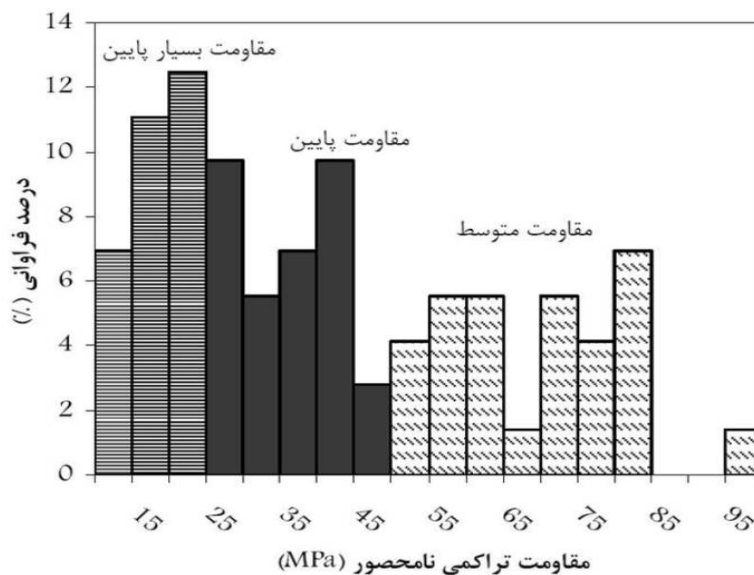
##### ۴-۱-۱- تحلیل‌های آماری اولیه

روابط بین کلیه‌ی خواص به‌دست آمده در آزمایشگاه، با یکدیگر از روش‌های رگرسیون ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین‌منظور علاوه بر معادله‌ی خطی  $(y=ax+b)$ ، معادلات توانی  $(y=ax^b)$ ، نمایی  $(y=aebx)$  و لگاریتمی  $(y=a \ln x + b)$  نیز مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۲، ضرایب همبستگی بین خواص مختلف شیل‌های مورد

رابطه‌ی بین کلیه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی به‌دست آمده در آزمایشگاه با یکدیگر از طریق آزمون ضریب همبستگی مورد بررسی قرار گرفت و ویژگی‌هایی از سنگ بکر که بهترین همبستگی را با UCS نشان می‌دهند و در عین حال تعیین آن‌ها با روش‌های ساده و کم‌هزینه امکان‌پذیر است، شناسایی شدند. در ادامه با استفاده از روش‌های آماری رگرسیون ساده و چندمتغیره روابطی جهت تخمین غیر مستقیم UCS ارائه شده است. تمامی تحلیل‌های ریاضی با استفاده از نرم‌افزار آماری اس‌پی‌اس‌اس (Statistical Package for Social Science, SPSS) صورت گرفته است.

##### ۵-۵- خواص فیزیکی و مکانیکی

در جدول ۱ نتایج آنالیزهای آماری اولیه بر روی داده‌های به‌دست آمده در آزمایشگاه و در پیوست مقادیر این داده‌ها، ارائه شده است. دامنه‌ی تغییرات UCS در شیل‌های مورد مطالعه از ۱۰/۲۱ الی ۹۶/۲ مگاپاسکال متغیر است. با توجه به گستردگی محدوده‌ی تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی شیل‌های مورد مطالعه مطابق با طبقه‌بندی



تصویر ۳- نمودار توزیع تجمعی (هیستوگرام) UCS

جدول ۱- آنالیز آماری داده‌های حاصل از انجام آزمایشات مختلف بر روی ۷۲ نمونه از شیل‌های سیاه‌بیشه

ویژگی	علامت	تعداد نمونه	استاندارد	محدوده‌ی تغییرات	میانگین	انحراف استاندارد	واریانس
مقاومت تک‌محوری (MPa)	UCS	۷۲	ISRM	۹۶/۲ - ۱۰/۲۱	۴۲/۵۱	۲۲/۴۴	۵۰۳/۶۲
شاخص بار نقطه‌ای (MPa)	$I_{s(50)}$	۶۸	ISRM, ASTM	۴/۳۸ - ۰/۷۵	۲/۳۲	۰/۹	۰/۸۱
مقاومت کششی	TS	۶۴	ISRM	۱/۲ - ۱۰/۳۱	۵/۴۱	۲/۳	۵/۳
شاخص دوام چرخه‌ی اول (%)	$Id_1$	۷۲	ISRM	۴۵/۷۶ - ۹۹/۳۶	۷۹/۷۸	۴۱/۱۹	۳۷۶/۸
شاخص دوام چرخه‌ی دوم (%)	$Id_2$	۷۲	ISRM	۴۰ - ۹۹/۱۱	۷۳/۲	۱۸/۶۷	۳۴۸/۸۴
شاخص دوام چرخه‌ی سوم (%)	$Id_3$	۷۲	ISRM	۲۲ - ۹۳/۶۷	۶۲/۶۹	۱۹/۵۴	۳۸۱/۹۲
شاخص دوام چرخه‌ی چهارم (%)	$Id_4$	۷۲	ISRM	۱۷ - ۹۳/۱۵	۵۷/۸۷	۲۰/۸	۴۳۲/۹
سرعت موج فشاری (m/sec)	$V_p$	۷۲	ISRM	۲۱۶۱/۷۵ - ۴۹۲۷/۷۴	۳۵۲۹/۹۵	۷۵۴/۰۷	۵۵۵۱۳۴/۶
حدّ روانی (%)	ll	۷۲	ASTM D4315	۱۸ - ۵۱	۲۹/۶۱	۸/۸۵	۷۸/۴۶
چگالی ( $gr/cm^3$ )	$\rho$	۷۲	ISRM	۲/۴۹ - ۲/۷۹	۲/۶۸	۰/۰۶	۰/۰۰۴
تخلخل (%)	n	۷۲	ISRM	۱/۲ - ۸/۶	۳/۶۳	۱/۸۲	۳/۳۲
درصد رطوبت (%)	$\omega$	۷۲	ISRM	۰/۳۲ - ۳/۴۴۱	۲/۳۴	۱/۸۶	۳/۱۱

جدول ۲- ضرایب همبستگی (r) بین خواص فیزیکی و مکانیکی شیل‌های مورد مطالعه (علامت جدول: مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS)، شاخص بار نقطه‌ای ( $I_{s(50)}$ ), تخلخل (n), چگالی ( $\rho$ ), سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) و مقاومت کششی (TS), حدّ روانی (LL) و شاخص دوام (Id))

TS	$\rho$	LL	n	$V_p$	$Id_4$	$Id_3$	$Id_2$	$Id_1$	UCS
									۱
								۱	۰/۷۵
							۱	۰/۸۹	۰/۸۳
						۱	۰/۹۱	۰/۸۰	۰/۸۵
					۱	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۷۷	۰/۸۶
				۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۶۲
			۱	-۰/۴۷	-۰/۷۹	-۰/۷۷	-۰/۶۷	-۰/۵۵	-۰/۷۲
		۱	۰/۴۹	-۰/۳۱	-۰/۷۸	-۰/۸۱	-۰/۶۸	-۰/۵۹	-۰/۷۴
	۱	-۰/۵۱	-۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۵۹
۱	۰/۵۱	-۰/۵۲	-۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۶۴
۰/۵۲	۰/۵۸	-۰/۶۶	-۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۸۸

در مقابل همبستگی بهتری بین UCS با مشخصه‌های  $I_{s(50)}$ ,  $Id$ , LL و n مشاهده می‌شود. علاوه بر آن تعیین این ویژگی‌ها نیاز به تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ی با شکل هندسی منظم ندارد و با کمترین هزینه و به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشند. این آزمایش‌ها به‌خصوص در مواقعی که امکان تهیه‌ی مغزه حفاری و هرگونه نمونه استوانه‌ای وجود ندارد، تنها روش اندازه‌گیری خواص سنگ به‌شمار می‌روند.

#### ۴-۲- بررسی رابطه‌ی بین UCS و $I_{s(50)}$

آزمایش بار نقطه‌ای، آزمایشی شاخص در تعیین UCS سنگ‌ها می‌باشد. بروج و فرانکلین (Broch & Franklin 1972) به عنوان ابداع‌کنندگان دستگاه اندازه‌گیری  $I_{s(50)}$ ، پیشنهاد کردند که برای مغزه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر، UCS تقریباً معادل با ۲۴ برابر  $I_{s(50)}$  است. (Bieniawski (1975) برای مغزه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر ضریب

مطالعه در بهترین حالت برازش، ارائه شده است. با استناد به نتایج به‌دست آمده از جدول ۲، مشخصه‌هایی مانند  $\rho$ ، TS و  $V_p$  همبستگی پایینی با UCS نشان می‌دهند.

$V_p$  در شیل‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی مانند دانه‌بندی و جهت‌یابی کانی‌های صفحه‌ای، تخلخل، میزان آب بین لایه‌ای، درجه‌ی اشباع از آب، ترکیب کانی‌شناسی، نحوه‌ی توزیع و جهت‌یابی ریزترک‌ها و ضخامت صفحات لایه‌بندی سنگ قرار می‌گیرد.

تمامی این موارد باعث کاهش کارایی آزمایش تعیین  $V_p$  در تخمین UCS شیل‌ها می‌شود. به علاوه تعیین  $V_p$  نیازمند تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ی استاندارد است که این خود بر مشکلات این آزمایش در شیل‌ها می‌افزاید. TS نیز در شیل‌ها تا حدّ زیادی به جهت‌یابی لایه‌بندی سنگ وابسته است و معمولاً در جهاتی که مقاومت فشاری بیشترین مقدار خود را دارد دارای مقدار کمتری است.

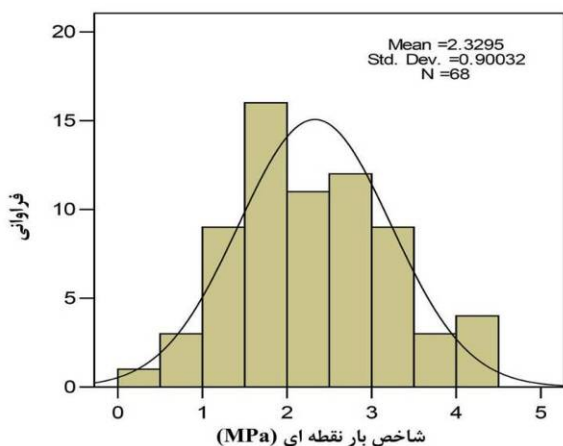
اغلب محققین نظیر رابطه‌ی پیشنهادی آی‌اس‌آرام (ISRM)، از الگوی ساده‌ی  $y=ax$  برای تعیین رابطه‌ی بین  $I_{s(50)}$  و UCS استفاده کرده‌اند. برای نمونه‌های مورد آزمایش، این الگو به صورت روابط (۳) الی (۶) ضمن تفکیک نمونه‌ها بر اساس UCS است.

$$\begin{aligned} \text{مقاومت بسیار پایین (۳)} \quad & r = 0.65 \quad \text{UCS} = 16.3I_{s(50)} \\ \text{مقاومت پایین (۴)} \quad & r = 0.67 \quad \text{UCS} = 18.1I_{s(50)} \\ \text{مقاومت متوسط (۵)} \quad & r = 0.71 \quad \text{UCS} = 22.2I_{s(50)} \\ \text{کل نمونه‌ها (۶)} \quad & r = 0.88 \quad \text{UCS} = 18.4I_{s(50)} \end{aligned}$$

روابط (۳) الی (۶) نشان می‌دهند که میزان مقاومت سنگ تأثیر زیادی در ضریب معادله‌ی به دست آمده دارد. رابطه‌ی به دست آمده برای نمونه‌های با مقاومت متوسط (رابطه‌ی ۵) به رابطه‌ی پیشنهادی توسط آی‌اس‌آرام (ISRM)، نزدیک‌تر است و با کاهش مقاومت سنگ، نسبت بین UCS و  $I_{s(50)}$  در نتیجه شیب خط رگرسیون (خطوط خط‌چین در تصویر ۵) کاهش می‌یابد. برخی از محققین در تحقیقات خود به افزایش نسبت UCS به  $I_{s(50)}$  با افزایش مقاومت سنگ، اشاره کرده‌اند (Tsiambaos & Sabatakakis 2004). بنابراین حتی در یک نوع سنگ با تغییر مقاومت، رابطه‌ی بین  $I_{s(50)}$  و UCS ممکن است تا حد زیادی تغییر کند. این محدودیت با تفکیک نمونه‌ها به گروه‌های مختلف بر اساس مقاومت و ارائه‌ی روابط تجربی برای هر گروه تا حد زیادی برطرف می‌شود. به هر حال در به کارگیری یک نسبت انتخابی برای پیش‌بینی UCS از  $I_{s(50)}$  خطایی تا حدود ۵۰ درصد محتمل است. اشکال این روش علاوه بر اثر مقاومت سنگ، حساسیت نسبت به شکل و اندازه‌ی نمونه‌ها است.

### ۳-۴- بررسی ارتباط بین UCS و Id

هرچندکه تحقیقات بسیاری بر روی دوام و مقاومت شیل‌ها صورت گرفته است، اما تعداد تحقیقاتی که به بررسی ارتباط مقاومت و دوام در این سنگ‌ها پردازد، بسیار اندک می‌باشد.



تصویر ۴- نمودار توزیع تجمعی (هیستوگرام)  $I_{s(50)}$  شیل‌های سیاه‌بیشه

۲۳ را ارائه نمود. پس از آن روابط متعددی توسط محققین مختلف برای انواع سنگ‌ها ارائه گردید. در جدول ۳، فهرستی از این روابط ارائه شده است. به طور کلی نسبت‌های ارائه شده بین UCS و  $I_{s(50)}$  دارای محدوده‌ی گسترده‌ای (کمتر از ۱۰ تا بیش از ۵۰) می‌باشند. دلایل این امر را می‌توان استفاده از سنگ‌هایی با لیتولوژی، تخلخل، درجه‌ی هوازدگی مختلف و عوامل تأثیرگذار در مقاومت سنگ، ذکر کرد. در تصویر ۴ محدوده‌ی تغییرات  $I_{s(50)}$  برای شیل‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۳- روابط ارائه شده بین  $I_{s(50)}$  و UCS (۱۹۶۵ الی ۲۰۰۹)

ارائه کننده	رابطه
D'andrea et al. 1965	UCS = 15.3 Is + 16.3
Deere & Miller 1966	UCS = 20.7 Is + 29.6
Broch & Franklin 1972	UCS = 24 Is
Bieniawski 1975	UCS = 23 Is
Hassani et al. 1980	UCS = 29 Is
Read et al. 1980	UCS = 16 Is
1) Sedimentary rocks	UCS = 20 Is
2) Basalt	
Singh 1981	UCS = 18.7 Is - 13.2
Forster 1983	UCS = 14 Is
ISRM 1985	UCS = 20- 25 Is
Vallejo et al. 1989	UCS = 8.6 - 16 Is
Cargill & Shakoore 1990	UCS = 23 Is + 13
Tsidzi 1991	UCS = 14 - 82 Is
Ghosh & Srivastava 1991	UCS = 16 Is
Grasso et al. 1992	
1) Power relation	UCS = 25.67(Is)0.57
2) Linear relation	UCS = 9.30 Is + 20.04
Ulusay et al. 1994	UCS = 19 Is + 12.7
Chau & Wong 1996	UCS = 12.5 Is
Smith 1997	UCS = 14.3 Is
Kahraman 2001	
1) 22 different rock type	UCS = 8.41 Is + 9.51
2) Coal measure rocks	UCS = 23.62 Is - 2.69
Quane & Russel 2003	
1) Strong rocks	UCS = 24.4 Is
2) Weak rocks	UCS = 3.86 (Is)2 + 5.65 IS
D'andrea et al. 1965	UCS = 15.3 Is + 16.3
Deere & Miller 1966	UCS = 20.7 Is + 29.6
Broch & Franklin 1972	UCS = 24 Is

رابطه‌ی بین UCS و  $I_{s(50)}$  برای شیل‌های مورد مطالعه، با استفاده از آزمون ضریب همبستگی مورد بررسی قرار گرفت. در تصویر ۵، روند تغییرات UCS در مقابل  $I_{s(50)}$  ضمن تفکیک نمونه‌ها به سه گروه با مقاومت بسیار پایین (سست)، مقاومت پایین و مقاومت متوسط، نشان داده شده است. روابط (۱) و (۲) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی روابط خطی و توانی مشاهده شده برای کل نمونه‌ها است که رابطه‌ی خطی کارایی بهتری را نشان می‌دهد.

$$\text{UCS} = 22.09 I_{s(50)} - 6.822 \quad r = 0.88 \quad (۱)$$

$$\text{UCS} = 17.714 I_{s(5)}^{1.036} \quad r = 0.87 \quad (۲)$$

بین این دو ویژگی با افزایش تعداد چرخه‌ی آزمایش است و بیشترین همبستگی بین UCS و  $Id_4$  مشاهده می‌شود.

رابطه‌ی بین UCS و  $Id$  در شیل‌های مورد مطالعه از فرم کلی رابطه‌ی نمایی پیروی می‌کند و مطابق با روابط (۷) الی (۱۰) به ازای چرخه‌های اول تا چهارم آزمایش است.

$$UCS = 3.659e^{0.027Id_1} \quad r = 0.75 \quad (7)$$

$$UCS = 5.759e^{0.025Id_2} \quad r = 0.83 \quad (8)$$

$$UCS = 7.756e^{0.025Id_3} \quad r = 0.85 \quad (9)$$

$$UCS = 9.304e^{0.023Id_4} \quad r = 0.86 \quad (10)$$

با مرور مجددی بر جدول ۲ (ضرایب همبستگی)، متوجه می‌شویم که  $Id_4$  و  $Id_3$  علاوه بر UCS، همبستگی بهتری با دیگر خواص سنگ نسبت به  $Id_1$  و  $Id_2$  نشان می‌دهند. این امر نشان‌دهنده‌ی کارایی بیشتر شاخص‌های دوام چرخه‌های سوم و چهارم در ارزیابی خواص شیل‌های مورد مطالعه است.

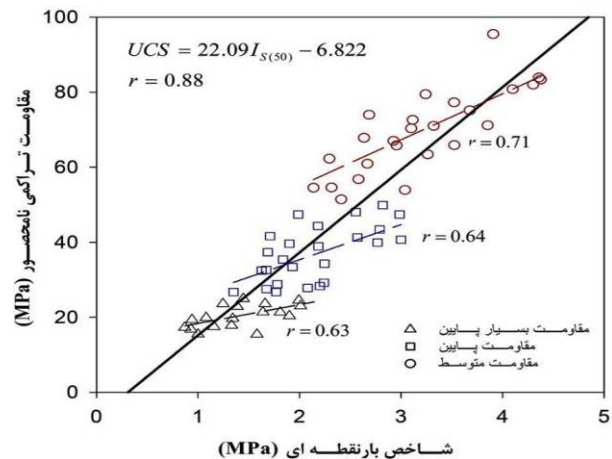
تحقیقات صورت گرفته بر روی سنگ‌های رسی نشان می‌دهد که  $Id_2$  (استاندارد) نمی‌تواند برای طبقه‌بندی شیل‌ها و سنگ‌های رسی کارایی لازم را داشته باشد (Vetzel & Einsele 1991).

برخی محققین پس از تحقیقات بر روی نمونه‌های متعدد شیل،  $Id_3$  (Moon & Beattie 1995)،  $Id_5$  (Ulusay et al. 1995) و  $Id_4$  (Gokceoglu et al. 2000) را به عنوان شاخص‌های دوام واقعی‌تر، برای سنگ‌های رسی پیشنهاد کرده‌اند.

مطالعات صورت گرفته در سال‌های اخیر نیز عمدتاً شاخص‌های دوام پس از چرخه‌ی دوم را برای سنگ‌های رسی و شیل‌ها پیشنهاد کرده‌اند (Moradian et al. 2010).

عکسبردای از نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین و نمونه‌های با مقاومت پایین، پس از طی هر چرخه‌ی آزمایش دوام، نشان می‌دهد که تخریب کلوخه‌های مقاوم شیل‌های مورد مطالعه عمدتاً در طی چرخه‌های سوم و چهارم آزمایش صورت می‌گیرد. این کلوخه‌ها عمدتاً در طی چرخه‌های اول و دوم، پایدار هستند (تصویر ۷). به علاوه بخش رسی این سنگ‌ها در طی چرخه‌های سوم و چهارم کاملاً از بین می‌رود. این تغییرات تا حد زیادی باعث افزایش کارایی  $Id_3$  و  $Id_4$  در تخمین UCS و ارتباط بهتر این شاخص‌ها با دیگر خواص سنگ می‌شود.

حتی در نمونه‌های با مقاومت متوسط که تخریب کلوخه‌ها در طی چرخه‌های سوم و چهارم آزمایش کمتر مشاهده می‌شود، افزایش ضرایب همبستگی با افزایش تعداد چرخه‌ی آزمایش دوام همچنان مشاهده می‌شود.



تصویر ۵- رابطه‌ی بین UCS و  $I_s(50)$  شیل‌های منطقه‌ی سیاه‌بیشه

مون (Moon 1993) با استفاده از مطالعات میکروسکوپی نتیجه‌گیری کرد که فابریک، نحوه‌ی تماس بین ذرات و درجه‌ی قفل‌شدگی ذرات در یکدیگر، کنترل‌کننده‌ی خواص ژئومکانیکی بوده و بر هر دو ویژگی مقاومت و دوام تأثیرگذار هستند.

ایگنبرد (Eigenbord 1972) متوجه شد که با کاهش شاخص دوام نمونه‌ها مقاومت آن‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. تحقیقات صورت گرفته توسط دیگر محققین نیز تأییدکننده‌ی این موضوع است (Aughenbaugh & Bruzewski 1976).

تحقیقات بر روی پیش‌بینی UCS با استفاده از آزمایش سختی و همچنین آزمایش تعیین شاخص دوام نشان داد که اغلب عواملی که دوام سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بر UCS نیز تأثیرگذار هستند (Engin et al. 1999).

تحقیقات جدیدتر نیز نشان می‌دهد که در سنگ‌های رسی و شیل‌ها، اکثر ویژگی‌هایی که مقاومت سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بر شاخص دوام و وارفتگی آن‌ها نیز اثرگذار می‌باشند (Saffet 2010).

برخی مشخصه‌ها مانند جهت‌یابی، شکل و اندازه‌ی دانه‌ها تأثیر کاملاً متفاوتی بر مقاومت و دوام سنگ‌ها نشان می‌دهند. علاوه بر آن نتایج آزمایش UCS تحت تأثیر سرعت بارگذاری و دقت آماده‌سازی نمونه قرار می‌گیرد، در صورتی‌که این عوامل بر شاخص دوام سنگ تأثیری ندارند. با این وجود نقش عواملی که به‌طور مشترک باعث افزایش و یا کاهش UCS و  $Id$  می‌شوند، بسیار بیشتر است (Pedro & António 2010).

بررسی رابطه‌ی بین UCS و  $Id$  در شیل‌های مورد مطالعه، نشان‌دهنده‌ی افزایش UCS با افزایش  $Id$  است (تصویر ۶). علاوه بر آن بررسی روند تغییرات UCS در برابر شاخص‌های دوام چرخه‌های اول تا چهارم ( $Id_1$ - $Id_4$ )، نشان‌دهنده‌ی افزایش ضرایب همبستگی (F)



### ۷- ارتباط تخلخل و مدّ (روانی با مقاومت تک‌محوری

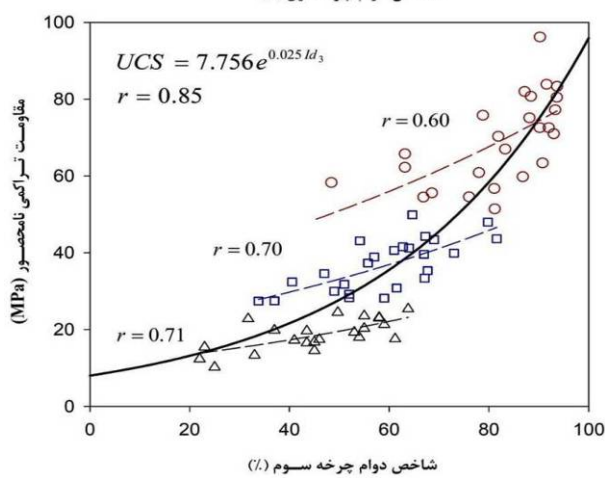
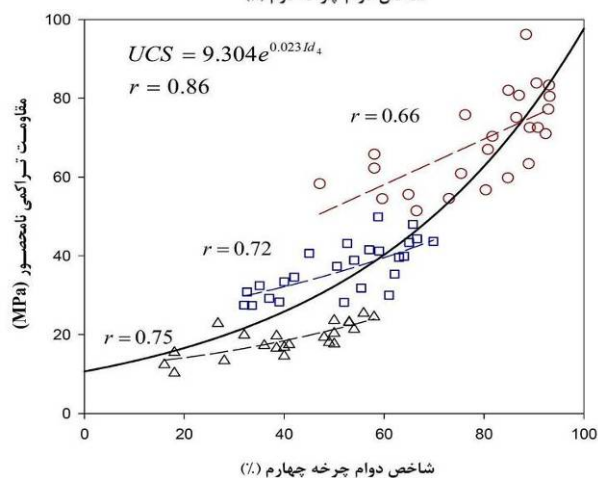
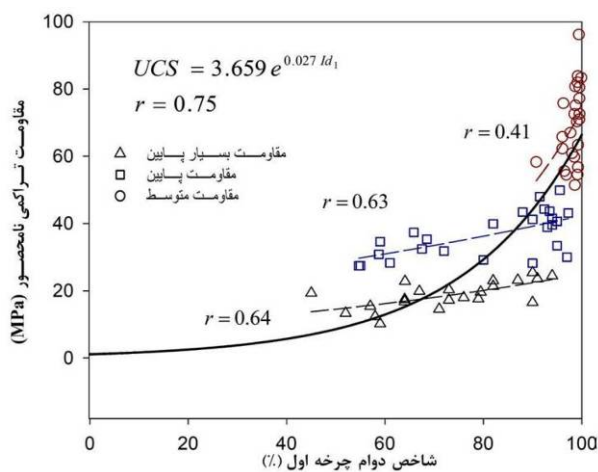
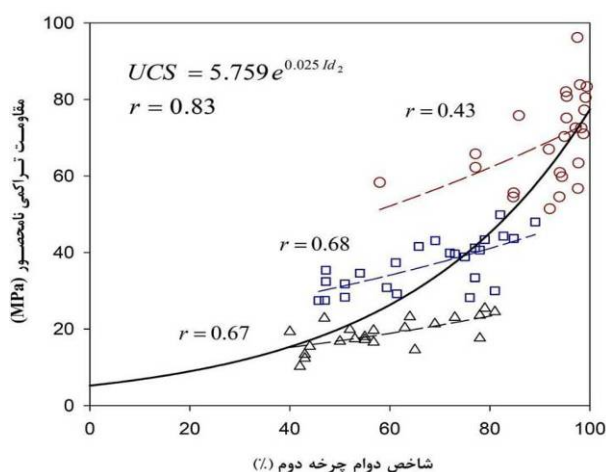
درد (Martin et al. 2009) و همین امر باعث افزایش ضرایب همبستگی با کاهش تخلخل می‌شود. در تصویر ۹، روند تغییرات UCS در مقابل LL شیل‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که نشان‌دهنده کاهش UCS با افزایش LL است. خطوط رگرسیون (خطوط خط‌چین) در تصویر ۹ با کاهش مقاومت، همبستگی بهتری با داده‌ها پیدا می‌کنند. دلیل این امر سیمان‌شدگی کمتر و امکان لغزش کانی‌های رسی بر روی یکدیگر است که باعث افزایش تأثیر کانی‌های رسی و LL بر مقاومت سنگ می‌شود.

با افزایش مقاومت سنگ کارایی مشخصه‌های n و LL در تخمین UCS کاهش می‌یابد و این دو مشخصه همبستگی چندان مطمئنی با مقاومت به‌خصوص در نمونه‌های با مقاومت متوسط نشان نمی‌دهند. با این وجود استفاده از این دو مشخصه به همراه  $I_s(50)$  و  $I_d$ ، در روش‌های رگرسیون چندمتغیره می‌تواند به تخمین هرچه بهتر UCS در شیل‌ها کمک زیادی کند.

به‌طور کلی در سنگ‌های رسوبی با افزایش تخلخل همه‌ی ویژگی‌های مقاومتی کاهش می‌یابند. دلیل این امر توزیع تنش در ریزترک‌های سنگ با افزایش تخلخل است (Howarth & Rowlands - 1986). تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که UCS شیل‌ها با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد (Koncagul & Santi 1999).

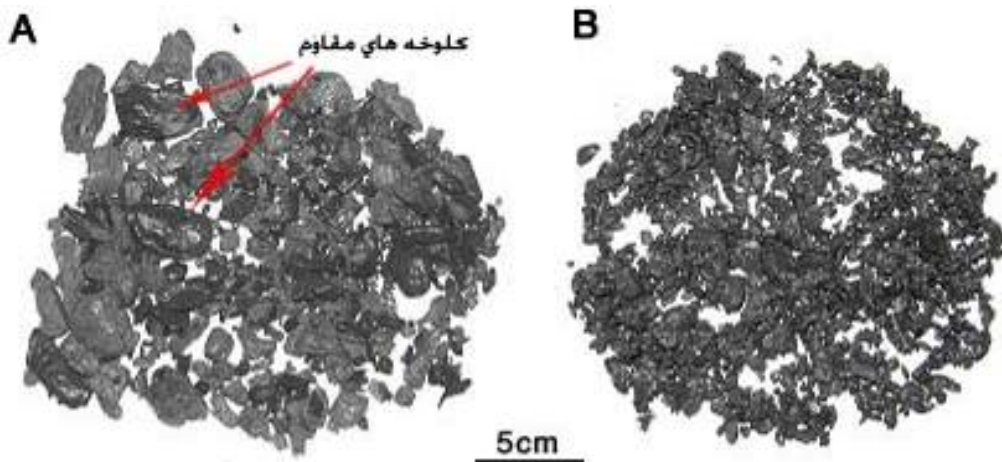
در تصویر ۸، روند تغییرات UCS شیل‌های مورد مطالعه در مقابل n ضمن تفکیک نمونه‌ها بر اساس مقاومت، نشان داده شده است. این شکل به‌خوبی افزایش همبستگی خطوط رگرسیون با داده‌ها را با کاهش مقاومت سنگ نشان می‌دهد.

در واقع بخش عمده‌ای از تخلخل شیل‌های با مقاومت بسیار پایین ناشی از پرشدگی ناقص ریزترک‌های اولیه از سیمان است که تا حدّ زیادی باعث کاهش مقاومت سنگ شده است. این درحالی است که تخلخل نمونه‌های مقاوم‌تر عمدتاً مربوط به منافذ سنگ است که اثر کمتری بر کاهش مقاومت سنگ نسبت به تخلخل مربوط به ریزترک‌ها

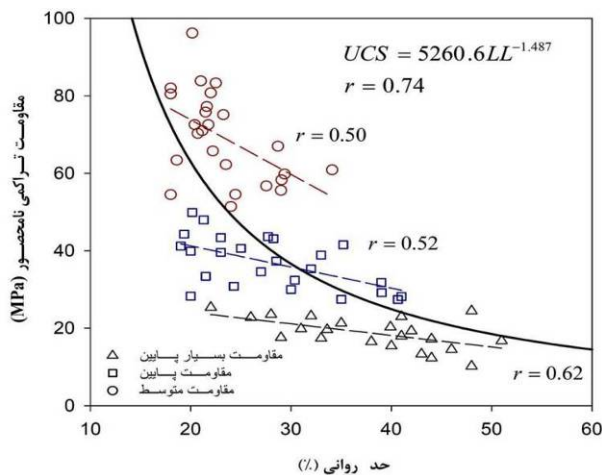


تصویر ۶- روند تغییرات UCS در مقابل  $I_d$  چرخه‌های اول تا چهارم در شیل‌های مورد مطالعه

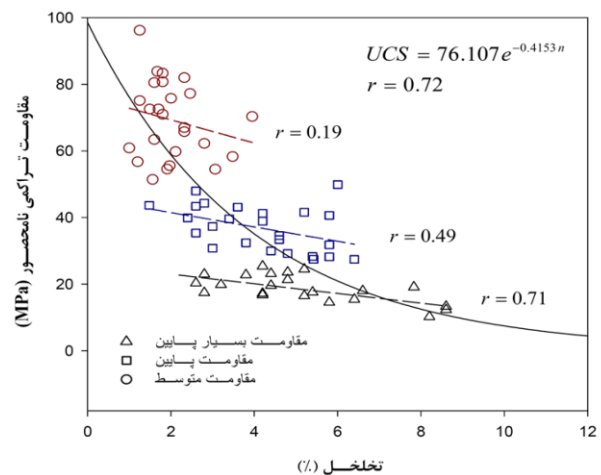




تصویر ۷- نحوه‌ی وارفتگی شیل‌ها در طی سیکل‌های متوالی آزمایش دوام. پس از سیکل دوم (A)، سنگ تخریب ولی کلوخه‌های مقاوم سنگ، تخریب نشده‌اند و پس از سیکل سوم (B)، کلوخه‌ها همگی تخریب شده‌اند.



تصویر ۸- روند تغییرات UCS در مقابل LL



تصویر ۹- روند تغییرات UCS در مقابل n

## ۸- آنالیز چند متغیره

UCS به دست آمده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. UCS تخمین زده شده از رابطه ۱۱، اختلافی از  $22/6 \text{ MPa}$  تا  $13 \text{ MPa}$  با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

در تصویر ۱۲ نمودار توزیع جمعیتی این اختلاف، نشان داده شده است که بیشترین فراوانی‌ها مربوط به نمونه‌هایی است که اختلاف کمی بین UCS تخمینی و آزمایشگاهی در آن‌ها مشاهده می‌شود.

در ادامه آنالیز چندمتغیره برای نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین (سست)، نمونه‌های با مقاومت پایین و نمونه‌های با مقاومت متوسط به تفکیک صورت گرفت. در جدول ۵ روابط اخیر به دست آمده در بهترین حالت برازش، ارائه شده‌اند.

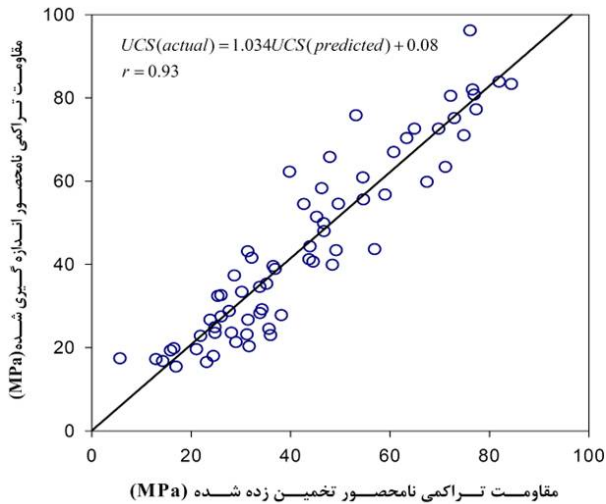
نتایج بدست آمده از جدول ۵ بیانگر وجود روابط قابل قبول بین متغیرهای مستقل  $Id_4$  و LL با UCS برای نمونه‌های با مقاومت بسیار

از آنجا که رگرسیون ساده یک نتیجه‌ی نسبی و تقریبی ارائه می‌دهد، لذا در این تحقیق روش‌های تخمین UCS از طریق آنالیز چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا این آنالیز با استفاده از دو متغیر مستقل و با تعویض متغیرها برای کل نمونه‌ها صورت گرفت. روابط بدست آمده دارای کارایی قابل قبولی هستند (جدول ۴) و بهترین رابطه به ازای دو متغیر مستقل  $Id_4$  و  $I_{s(50)}$  بدست می‌آید (رابطه‌ی ۱۱).

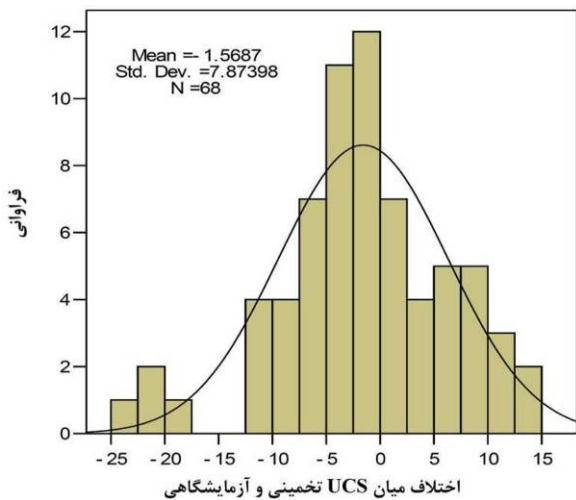
$$UCS = 5.1 + 20.3 I_{s(50)} - 0.53 Id_4 - 1.54 I_{s(50)}^2 + 0.008 Id_4^2 \quad r = 0.93 \quad (11)$$

در تصویر ۱۰، روند تغییرات UCS در مقابل  $Id_4$  و  $I_{s(50)}$  نشان داده شده است.

تصویر ۱۱، رابطه‌ی بین UCS تخمین‌زده شده توسط رابطه‌ی ۱۱ با



تصویر ۱۱- رابطه‌ی بین UCS تخمین زده شده از رابطه‌ی ۱۱ با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

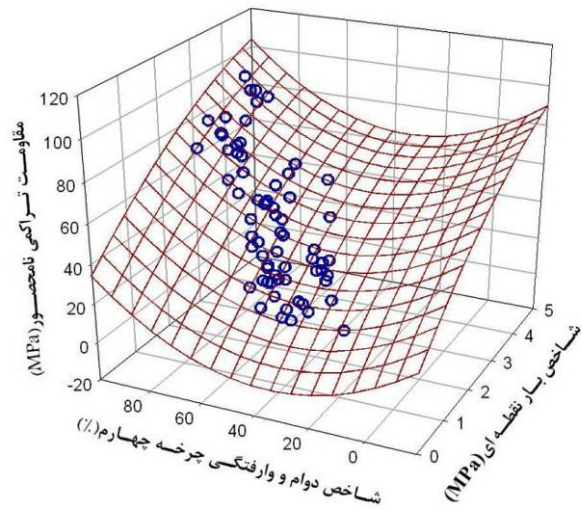


تصویر ۱۲- اختلاف میان مقادیر UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۱۱ با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

پایین (رابطه‌ی ۲۱) است. همچنین برای نمونه‌های با مقاومت پایین و متوسط، بهترین روابط به ازای متغیرهای مستقل  $I_{s(50)}$  و  $Id_4$  به دست می‌آید (روابط ۲۲ و ۲۳).

تصاویر ۱۳ الی ۱۵، نشان‌دهنده‌ی روابط بین UCS تخمین‌زده شده توسط روابط ۲۱ الی ۲۳ با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌باشند.

بطور کلی مقادیر UCS تخمین‌زده شده از روابط ۲۱ الی ۲۳، نسبت به روابط ارائه شده در جدول ۴ اختلاف بسیار کمتری با مقادیر UCS اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهند (تصاویر ۱۶ الی ۱۸) که بیانگر کارایی بهتر روابط چندمتغیره بدست آمده ضمن تفکیک نمونه‌ها است.



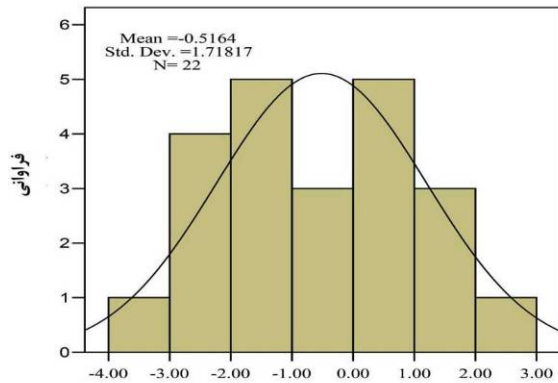
تصویر ۱۰- روند تغییرات UCS در مقابل  $I_{s(50)}$  و  $Id_4$

جدول ۴- روابط به دست آمده به منظور تخمین UCS با استفاده از دو متغیر مستقل (برای کل نمونه‌ها)

St.d. Error	$ra^2$	$r^2$	$r$	رابطه‌ی آماری چند متغیره	شمار	متغیرهای مستقل
۸/۰۱	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۹۳	$UCS = 5.1 + 20.3 I_{s(50)} - 0.53 Id_4 - 1.54 I_{s(50)}^2 + 0.008 Id_4^2$	(۱۱)	شاخص بار نقطه‌ای و شاخص دوام
۹/۰۷	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۹۱	$UCS = 13.15 + 18.45 I_{s(50)} - 3.44 n$	(۱۲)	شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل
۹/۰۱	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۹۲	$UCS = 23 + 19.34 I_{s(50)} - 9.87 n - 0.32 I_{s(50)}^2 + 0.85 n^2$	(۱۳)	شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل
۹/۵۲	۰/۸۱	۰/۸۱۵	۰/۹۰	$UCS = 15.595 + 18.89 I_{s(50)} - 0.528 LL$	(۱۴)	شاخص بار نقطه‌ای و حد روانی
۹/۵۵	۰/۸۰۸	۰/۸۲	۰/۹۱	$UCS = 38.93 + 15.29 I_{s(50)} - 1.766 LL + 0.61 I_{s(50)}^2 + 0.018 LL$	(۱۵)	شاخص بار نقطه‌ای و حد روانی
۸/۴۲	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۹۲	$UCS = -15.59 + 13.59 I_{s(50)} + 0.47 Id_4$	(۱۶)	شاخص بار نقطه‌ای و شاخص دوام
۹/۶۹	۰/۸۱۳	۰/۸۲	۰/۹۰	$UCS = 20.35 - 0.72 LL + 0.75 Id_4$	(۱۷)	شاخص دوام و حد روانی
۸/۸۳	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۹۲	$UCS = 52.3 - 0.95 LL - 0.32 Id_4 + 0.003 LL^2 + 0.009 Id_4^2$	(۱۸)	شاخص دوام و حد روانی
۱۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۸۸	$UCS = -3.13 - 1.23 n + 0.86 Id_4$	(۱۹)	شاخص دوام و تخلخل
۱۰/۱	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۹	$UCS = 29.03 - 0.94 n - 0.31 Id_4 + 0.094 n^2 + 0.009 Id_4^2$	(۲۰)	شاخص دوام و تخلخل

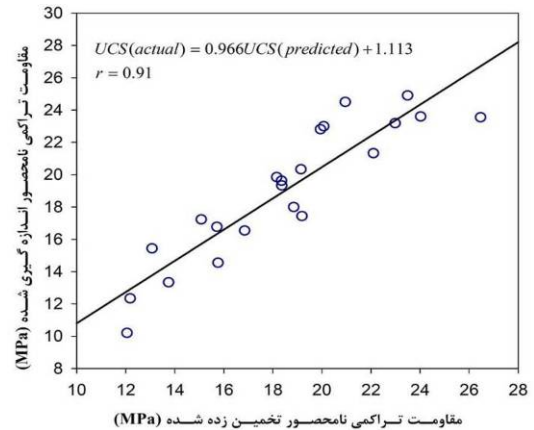
جدول ۵- روابط به‌دست آمده به منظور تخمین UCS با استفاده از دو متغیر مستقل (نمونه‌های با مقاومت متفاوت)

مقاومت سنگ	شماره	رابطه‌ی آماری چند متغیره	$r$	$r^2$	$ra^2$	خطای استاندارد
مقاومت بسیار پایین	(۲۱)	$UCS = 42.627 - 1.277LL - 0.0236Id_4 + 0.0134LL^2 + 0.00323Id_4^2$	۰/۹۱	۰/۸۳	۰/۷۹	۱/۸۹
مقاومت پایین	(۲۲)	$UCS = 6.096 + 5.758I_{S(S)} + 0.438Id_4 + 0.152I_{S(S)}^2 - 0.00184Id_4^2$	۰/۸۴	۰/۷۰	۰/۶۱	۵/۱۳
مقاومت متوسط	(۲۳)	$UCS = 107.92 - 13.135I_{S(S)} - 1.329Id_4 + 3.119I_{S(S)}^2 + 0.0117Id_4^2$	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۵۸	۷/۴۴

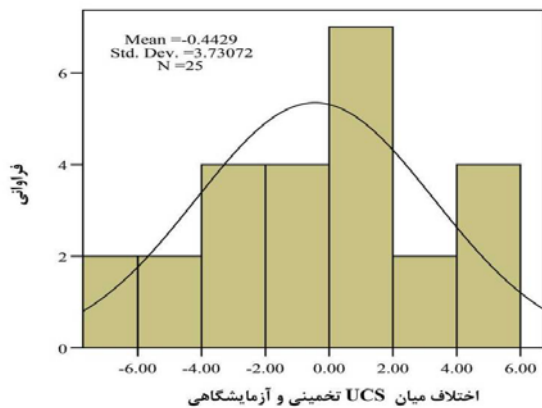


اختلاف میان UCS تخمینی و آزمایشگاهی

تصویر ۱۶- اختلاف میان UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۱ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین)

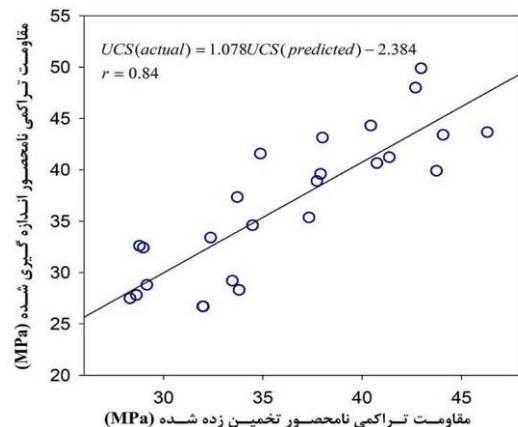


تصویر ۱۳- رابطه‌ی بین UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۱ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین)

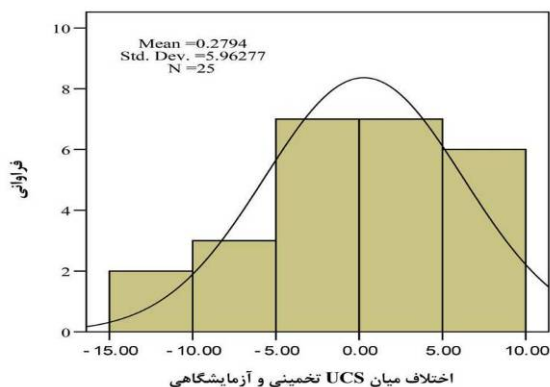


اختلاف میان UCS تخمینی و آزمایشگاهی

تصویر ۱۷- اختلاف میان UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۲ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت پایین)

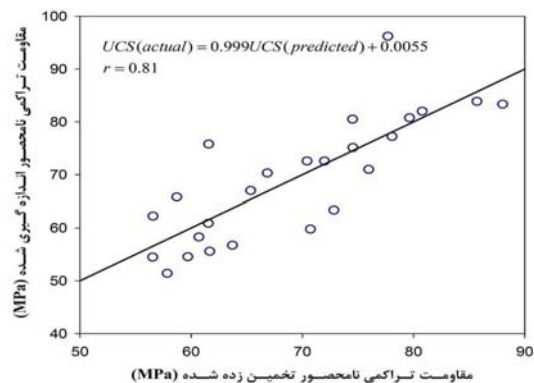


تصویر ۱۴- رابطه‌ی بین UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۲ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت پایین)



اختلاف میان UCS تخمینی و آزمایشگاهی

تصویر ۱۸- اختلاف میان UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۳ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت متوسط)



تصویر ۱۵- رابطه‌ی بین UCS تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲۳ با مقادیر حقیقی (نمونه‌های با مقاومت متوسط)

## ۹- نتیجه‌گیری

۱- مقادیر UCS شیل‌های منطقه‌ی سیاه‌بیشه، بیشترین همبستگی را به ترتیب با  $I_s(50)$  ( $r=0.88$ )،  $Id_3$  ( $r=0.85$ )،  $Id_4$  ( $r=0.86$ )، LL ( $r=0.74$ ) و  $n$  ( $r=0.72$ )، نشان می‌دهند.

۲- تفکیک نمونه‌ها به گروه‌های مختلف بر اساس مقاومت نشان می‌دهد که با کاهش UCS شیل‌های مورد مطالعه، کارایی  $I_s(50)$  در تخمین UCS کاهش و کارایی مشخصه‌های  $Id$ ، LL و  $n$  افزایش می‌یابد.

۳- استفاده از روش‌های رگرسیون چندمتغیره منجر به تخمین بسیار بهتری از UCS می‌شود، در این حالت بهترین رابطه‌ی چندمتغیره‌ی برازش شده برای کل نمونه‌ها، معادله‌ی درجه‌ی دوم با دو متغیر مستقل  $Id_4$  و  $I_s(50)$  است. ضریب همبستگی این رابطه  $0.93$  و میزان اختلاف UCS تخمینی با UCS آزمایشگاهی از  $22/6$  MPa - الی  $13$  MPa + متغیر است.

۴- در صورت تفکیک نمونه‌ها بر اساس UCS به گروه‌های با مقاومت بسیار پایین، پایین و متوسط و بررسی روابط موجود در هر گروه، بهترین رابطه‌ی چندمتغیره برای نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین، به ازای متغیرهای مستقل LL و  $Id_4$  با ضریب همبستگی  $0.91$  و برای نمونه‌های با مقاومت پایین و متوسط به ازای متغیرهای مستقل  $I_s(50)$  و  $Id_4$  به ترتیب با ضرایب همبستگی  $0.84$  و  $0.81$  به دست می‌آید.

در این حالت میزان اختلاف UCS تخمینی و آزمایشگاهی برای نمونه‌های با مقاومت بسیار پایین از  $3/55$  MPa - الی  $2/92$  MPa +، برای نمونه‌های با مقاومت پایین از  $6/91$  MPa - الی  $5/5$  MPa + و برای نمونه‌های با مقاومت متوسط از  $14/22$  MPa - الی  $10/92$  MPa + بدست می‌آید که نسبت به روابط به دست آمده برای کل نمونه‌ها اختلاف کمتری مشاهده می‌شود.

۵- با توجه به میزان اختلاف کم بین UCS تخمینی و اندازه‌گیری شده در اغلب نمونه‌ها و ضرایب همبستگی محاسبه شده، مدل‌های به دست آمده در این تحقیق از کارایی قابل قبولی در تخمین غیرمستقیم UCS، برخوردار هستند.

## مراجع

- آقائباتی، ع.، ۱۳۸۳، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۱۶ ص.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۲، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات امیرکبیر، ۹۰۲ ص.
- فهیمی‌فر، الف، سروش، ح.، ۱۳۸۰، "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها"، ج ۱، انتشارات تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۹، "نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مرزن‌آباد"، سازمان زمین‌شناسی.

Adrian, R. & Russeland, D. M. W., 2008, "Point load tests and strength measurements for brittle spheres rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46 (2): 272-280.

Alvarez Grima M. & Babuska, R., 1999, "Fuzzy strength of rock samples", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36 (2): 339-349.

American Society for Testing and Materials, 1984, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Soil and Rock, Building Stones: Annual Book of ASTM Standards 4.08, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM.*

American Society for Testing and Materials, 2000, "Standard test method for determination of the point load strength index of rock", *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04(8): 1442-1448.*

Aughenbaugh, N. B. & Bruzewski, R. F., 1976, "Humidity effect on coal mine roof stability", *Open file report 5-78. U.S. department of interior, bureau of mines, Washington, D.C. 1976, 161p.*

Bieniawski, Z. T., 1975, "Point load test in geotechnical practice", *Eng. Geol.*, Vol. 9 (1): 1-11.

Broch, E. & Franklin, J. A., 1972, "Point load strength test", *Int. J. Rock Mech. Min.Sci.*, Vol. 9(6): 669-697.

Cargill, J. S. & Shakoar, A., 1990, "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 27(2): 495-503.

Chau, K. T. & Wong, R. H. C., 1996, "Uniaxial compressive strength and point load strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 33: 183-188.*

D'andrea, D. V., Fischer, R. L. & Fogelson, D. E., 1965, "Prediction of compressive strength from other rock properties", *US Bureau of Mines Report of Investigations 6702.*

Deere, D. U. & Miller, R. P., 1966, "Engineering classification and index properties for intact rock", *Air Force Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland base, New Mexico. 300 p.*

Edet, A., 1992, "Physical properties and indirect estimation of microfractures using nigerian carbonate rocks as examples", *Engineering Geology, Vol. 33: 71-80.*

Eigenbord, KD., 1972, "Progressive failure in overconsolidated clays and mudstones", *Ph.D. Dissertation, University of Alberta, Edmonton, Canada 1972: 295 pp.*

Engin, C. Koncagul, E. C. & Santi, P.M., 1999, "Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, shore hardness and rock structural properties", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 36: 139-153.

Faisal I. S., Edward, J. & Omar H. A., 2007, "Estimation of rock engineering properties using hardness tests", *Int. J. Eng. Geol.*, Vol. 90(3-4): 138-147.



- structural properties, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 36: 139-153.
- Martin P. J. Schöpfer, S. A., Conrad C. & John J. W., 2009**, "The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modeling", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46 (2): 250-261.
- Moon V. G., 1993**, "Microstructural controls on geomechanical behavior of ignimbrite", *Eng. Geol.*, Vol. 35: 19-31.
- Moon, V.G. & Beattie, A.G., 1995**, "Textural and microstructural influences on the durability of Waikato coal measures mudrocks", *Eng. Geol. Vol.* 28, 303-312.
- Moradian, Z.A., Ghazvinian, A.H. Ahmadi, M. & Behnia, M., 2010**, Predicting slake durability index of soft sandstone using indirect tests", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 47 (4): 666-671.
- Pedro, S. A. & António, A. S., 2010**, "Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 69, (2): 207-214.
- Quane, S. L. & Russel, J. K., 2003**, "Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits", *Eur. J. Mineral*, Vol. 15: 855-864.
- Read, J. R. L., Thornten, P. N. & Regan, W. M., 1980**, "A rational approach to the point load test", *In: Proceedings of the third Australian-New Zealand m Geomechanics Conference, Wellington: New Zealand institution of engineers Vol. 2: 35-39.*
- Saffet, Y., 2010**, "Correlation between slake durability and rock properties for some rocks", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, First Published on: 27 August 2010 (iFirst).*
- Shakoor, A. & Bonelli, R. E., 1991**, "Relationship between petrographic characteristics, engineering Index properties and mechanical properties of selected sandstone", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. 28: 55-71.
- Smith, H. J., 1997**, "The point load test for weak rock in dredging applications", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34 (3/4): 702.
- Tsiambaos, G. & Sabatakakis, N., 2004**, "Considerations on strength of intact sedimentary rocks", *Eng. Geol.*, Vol. 72: 261-273.
- Tsidzi, K. E. N., 1991**, "Point load-uniaxial compressive strength correlation", *In: Wittke W. Proceedings of the Seventh ISRM Congress, Rotterdam: Balkema, Vol. 1: 637-639.*
- Ulusay, R., Arikan, F., Yoleri, M. F. & Çaglan, D., 1995**, "Engineering geological characterization of coal mine waste Mate-Various Mudrocks", *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. Vol.44: 89-100.*
- Ulusay, R., Tureli, K. & Ider, M. H., 1994**, "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using
- Folk, R. L. 1962**, "Spectral subdivision of limestone types, classification of carbonate rocks", *Symp. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 62-84.
- Forster, I. R., 1983**, "The influence of core sample geom-etry on the axial point load test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 20(29):1-295.
- Ghosh, D. K. & Srivastava, M., 1991**, "Point load strength: an index for classification of rock material", *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, Vol. 44(3): 27-33.
- Gokceoglu, C., 2002**, "A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographic composition", *Eng. Geol.*, Vol. 66(4): 39-51.
- Gokceoglu, C., Ulusay, R. & Sonmez, H., 2000**, "Factors Affecting the Durability of Selected Weak and Claybearing Rocks from Turkey, with Particular Emphasis on the Influence of the Number of Drying and Wetting Cycles", *Eng. Geol. Vol.* 57(3): 215-237.
- Grasso, P., Xu, S. & Mahtab, A., 1992**, "Problems and promises of index testing of rocks", *In: Tillerson J. R, Wawersik WRr, editors, Proceedings of the 33rd US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema, 879-888.*
- Hassani, F. P., Scoble, M. J. & Whittaker, B. N., 1980**, "Application of point load index test to strength determination of rock and proposals for new size-correction chart", *In: D. A. summers Editor, Proceeding of the 21<sup>st</sup> US symposium on rock mechanics, Rolla, 543-64.*
- Howarth, D. F. & Rowlands, J. C., 1986**, "Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 9: 169-179.
- Işık, Y. & Gürkan, Y., 2008**, "Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46 (4): 803-810.
- Işık, Y., 2009.**, "A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46 (8): 1349-1357.
- ISRM Suggested Methods, 1981**, "Rock characterization testing and monitoring", *Oxford: Pergamon Press: x, 211p.*
- ISRM Suggested methods, 1985**, "Suggested method for determining point load strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 22: 53-60.
- Kahraman, S., 2001**, "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38: 981-994.
- Kamil, K. & Levent, S., 2010**, " Nail penetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 47 (2): 265-271.
- Koncagul, E. C. & Santi, P.M., 1999**, "Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability", *shore hardness and rock*

correlation and multivariate statistical techniques", *Eng. Geol., Vol. 38: 138-157.*

**Vallejo, L. E., Welsh, R. A. & Robinson, M. K., 1989,**"Correlation between unconfined compressive and point load strength for Appalachian rocks", *In: Khair A. W. (ed.), Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema: 461-468.*

**Vetzel, A. & Einsele, G., 1991,** "Physical Weathering of Various Mudrocks. Bull", *Int. Assoc. Eng. Geol., Vol. 44(3): 89-100.*