

یادداشت فنی

تخمین مقاومت تراکمی تک محوری آهک های مارنی سازند آبدراز

با استفاده از خصوصیات فیزیکی

معصومه خلیلی^{۱*}، غلامرضا لشکری پور^۲، محمد غفوری^۳، محمد خانه باد^۳، پوریا دهقان^۴

پذیرش مقاله: ۹۲/۱۲/۰۷

دریافت مقاله: ۹۲/۰۴/۰۵

چکیده

هدف از این تحقیق ارائه و بررسی روابط ساده و چندمتغیره برای تخمین مقاومت فشاری نمونه هایی از سنگ آهک های مارنی سازند آبدراز است. بر روی این سازند پروژه های مهندسی زیادی مانند سد، تونل و جاده در شمال استان خراسان رضوی احداث شده است. برای این منظور بر روی ۳۹ نمونه سنگ آهک مارنی سازند آبدراز مطابق با استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ، آزمایش های مربوط به تعیین خصوصیات فیزیکی شامل تخلخل، دانسیته، جذب آب انجام شد و روابطی چند متغیره برای تخمین مقاومت فشاری به دست آمد. نتایج به دست آمده از روش رگرسیون ساده، نشان دهنده کارایی بهتر دانسیته نسبت به دیگر ویژگی های سنگ در تخمین مقاومت تراکمی تک محوری است. بهترین رابطه چندمتغیره نیز به ازای استفاده از متغیرهای مستقل دانسیته و جذب آب برای کل نمونه ها به دست آمد.

کلید واژه ها: خصوصیات فیزیکی، مقاومت فشاری تک محوری، آهک مارنی، سازند آبدراز

۱. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد khalily.masomeh@yahoo.com

۲. استاد گروه زمین شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار گروه زمین شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد

۴. دانشجوی دوره دکتری زمین شناسی مهندسی پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

سازند آبدراز در حوضه رسوبی کپه‌داغ از گسترش چشمگیری در شمال استان خراسان رضوی و استان خراسان شمالی برخوردار است. وجود طرح‌های عمرانی متعدد (مانند سد درونگر، سد دوستی، سد گل‌مندره و غیره) و تونل‌ها و جاده‌های اجرا شده و در حال اجرا در این سازند اهمیت شناخت ویژگی‌های مهندسی اجزای تشکیل دهنده آن را 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 طراحی‌های اولیه دارد. روش اندازه‌گیری این ویژگی توسط هر دو استاندارد (ISRM 1981, ASTM 2002) تعیین گردیده است. تهیه نمونه‌های مناسب برای انجام آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری خصوصاً در سنگ‌های رس‌دار، مارن‌ها، و حتی آهک‌های مارنی بسیار مشکل می‌باشد. علاوه بر این نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. به منظور رفع مشکلات فوق آزمایش‌های ساده‌ای همچون چکش اشمیت، بارنقطه‌ای، سرعت صوت و روش‌های تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری با استفاده از خصوصیات فیزیکی مانند دانسیته، تخلخل، جذب آب توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است (Cargill and Shakoor, 1990, Edet, 1992, Alvarez Grima and Babuska, 1999, Lashkaripour, 2002, Gokceoglu, 2002, Faisal et al., 2007, Işık, 2009, Adrian and Russeland, 2008, Kamil and Levent, 2010).

علی‌رغم تحقیقات بسیاری که در گذشته صورت گرفته است، تنها تعدادی معدود روابط تجربی به منظور تخمین غیرمستقیم مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ آهک‌های مارنی ارائه شده است. به دلیل تنوع رفتاری مارن‌ها، کاربرد روابط تجربی بسیار محدود می‌باشد به همین دلیل تخمین غیرمستقیم مقاومت تراکمی تک‌محوری برای انواع مارن‌ها در مناطق و سازندهای مختلف با استفاده از ساده‌ترین آزمون‌ها ضروری می‌باشد.

موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی خصوصیات فیزیکی شامل دانسیته، تخلخل و جذب آب در تخمین مقاومت تراکمی

تک‌محوری آهک‌های مارنی سازند آبدراز در گردنه‌ی مزدوران و روستای آبدراز است. برای این منظور، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی آهک‌های مارنی انجام شد و روابط تجربی موجود بین مقاومت تراکمی تک‌محوری و دیگر خصوصیات سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

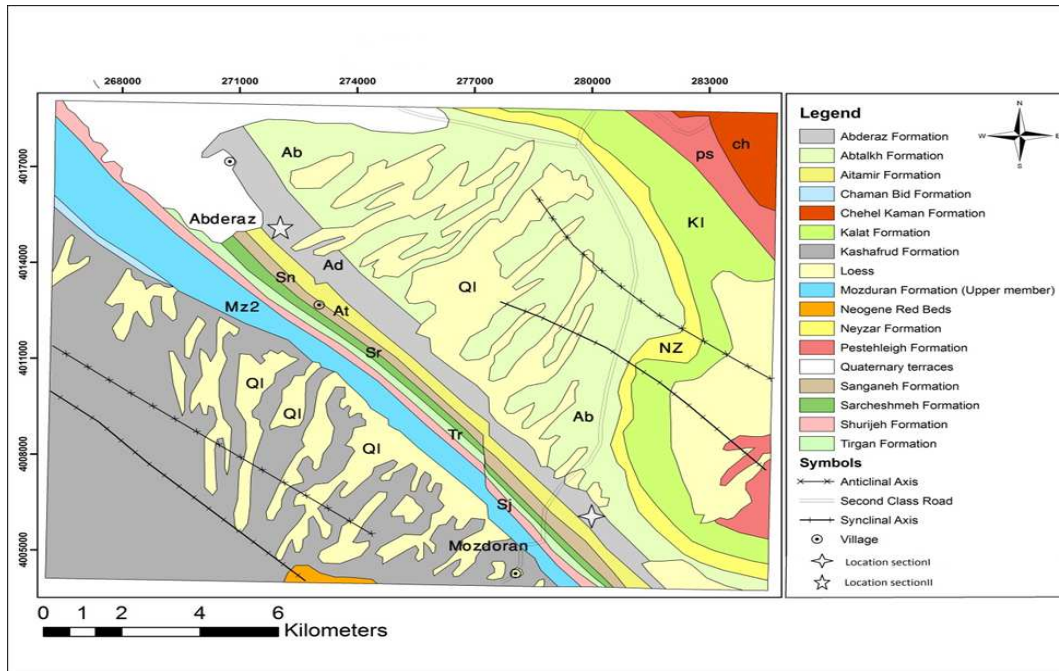
۲. زمین‌شناسی منطقه

سازند آبدراز که در شرق حوضه کپه‌داغ رخنمون بیشتری دارد عمدتاً از مارن، سنگ آهک مارنی، شیل خاکستری تا خاکستری مایل به آبی همراه با سه افق سنگ آهک گچ‌دار تشکیل شده است (شکل ۱). این سازند به طور ناپیوسته فرسایشی بر روی سازند آیتامیر و به طور هم‌شیب مرز تدریجی سازند آب تلخ قرار گرفته است. ضخامت سازند آبدراز در برش گردنه مزدوران ۵۳۰ متر اندازه‌گیری شده است. بر اساس ۵ بایوزون شناسایی شده سن این سازند تورونین میانی تا کامپانین تخمین زده شده است (افشار حرب، ۱۳۷۳).

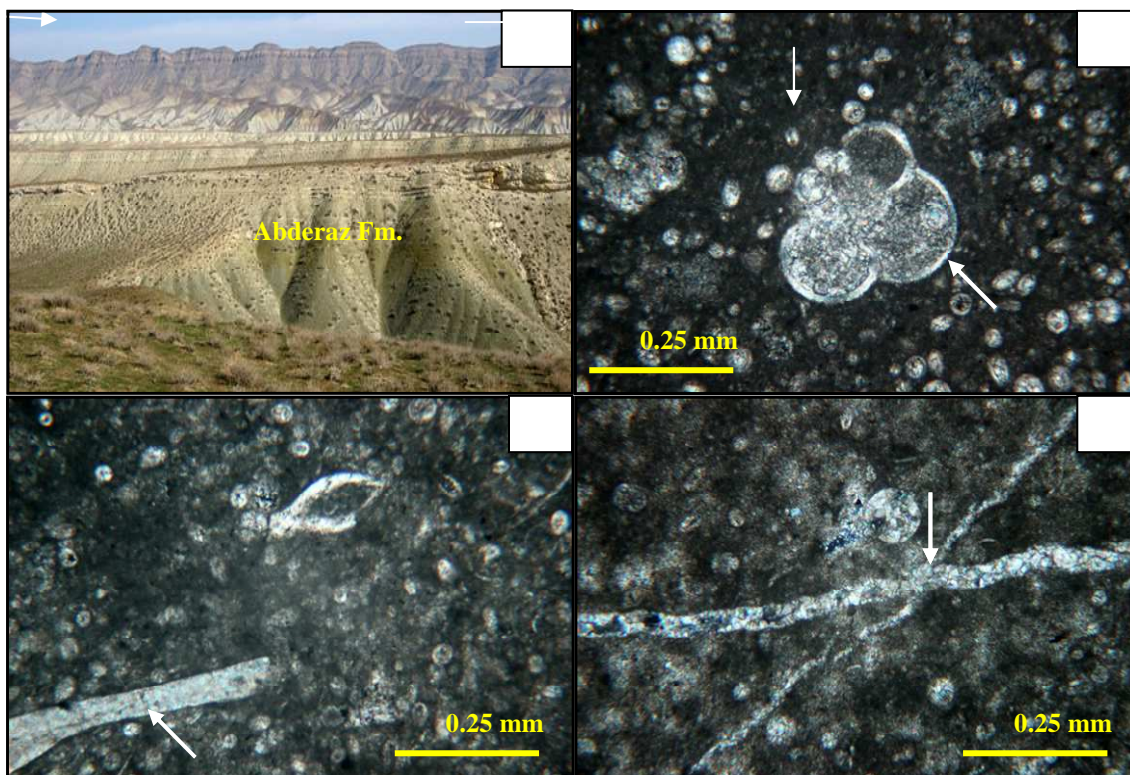
۳. خصوصیات پتروگرافی آهک‌های مارنی مورد مطالعه

سنگ‌های مورد مطالعه از دو مقطع (ایستگاه) متفاوت واقع در گردنه مزدوران (۱۹ نمونه) با مختصات جغرافیایی، طول شرقی ۳۳° و ۶۰° و عرض شمالی ۳۷° و ۳۶° و مقطعی از این سازند در روستای آبدراز (۲۰ نمونه) به طول شرقی ۲۷° و ۶۰° و عرض شمالی ۱۶° و ۳۶° برداشت گردید.

سازند آبدراز در ناحیه مورد مطالعه عمدتاً از شیل و مارن‌های خاکستری رنگ به همراه سنگ آهک‌های گل‌سفیدی (chalky limestone) تشکیل یافته است (شکل ۲ الف). این واحدهای سنگی به طور متناوب نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. اجزای تشکیل‌دهنده سنگ‌های گل‌سفیدی شامل روزن‌داران (شکل ۲ ب)، خرده‌های دوکفه‌ای (شکل ۲ ج)، کلسی‌اسفر و مقداری اکینودرم می‌باشد. در بعضی از مقاطع میکروسکوپی، رگه‌هایی مشاهده می‌شود که توسط کلسیت اسپاری پر شده‌اند (شکل ۲ د). با توجه به آزمون کلسی‌متری که بر روی تعدادی از نمونه‌ها (۲۰ عدد) انجام شده است، میانگین کربنات کلسیم در این سنگ‌ها در حدود ۸۶ درصد است (Khalily et al., 2013).



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه برگرفته شده از نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ سرخس (Afshar-Harb, 1982)



شکل ۲- الف) سازند آبدراز در ناحیه مورد مطالعه که از شیل و مارن‌های خاکستری و سنگ‌های گل سفیدی تشکیل شده است. ب) مقطع میکروسکوپی از سنگ آهک‌های گل سفیدی متشکل از روزن‌داران. ج) خرده دوکفه‌ای در سنگ آهک گل سفیدی. د) رگه‌های متقاطع پرشده توسط کاسیت اسپاری در سنگ آهک‌های گل سفیدی منطقه.

۴. روش تحقیق

در این تحقیق ۳۹ نمونه به صورت بلوک‌های در اندازه‌های حدود $20 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر از منطقه مورد بررسی برداشت گردید. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل مقاومت تراکم تک‌محوری، تخلخل، دانسیته، جذب آب در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. کلیه آزمایش‌ها براساس استاندارد ISRM انجام شدند.

در ادامه روابط بین مقاومت تراکمی تک‌محوری و خصوصیات فیزیکی از طریق آنالیزهای رگرسیون ساده و چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفت و روابطی جهت تخمین غیرمستقیم مقاومت تراکمی تک‌محوری ارائه شده است.

۵. خواص فیزیکی و مکانیکی

در جدول (۱) نتایج آنالیزهای آماری اولیه بر روی داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه ارائه شده است. در این مطالعه مقاومت تراکمی تک‌محوری که نقش مهمی در ارزیابی رفتار مهندسی سنگ بکر ایفا می‌کند. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D2938 و ISRM بر روی ۳۹ که در آن میانگین نسبت طول به قطر نمونه‌ها $2/518$ بود انجام شد. دامنه‌ی تغییرات مقاومت تراکمی تک‌محوری و خصوصیات فیزیکی آهک‌های مارنی مورد مطالعه از $5/7$ تا $120/12$ مگاپاسکال متغیر است. با توجه به طبقه‌بندی دیر و میلر (Deere and Miller, 1965)، نمونه‌ها به ۳ گروه سنگ‌های با مقاومت بسیار پایین $UCS < 25MPa$ ، سنگ‌های با مقاومت پایین $25MPa < UCS < 50MPa$ و نمونه‌های با مقاومت متوسط $50MPa < UCS$ طبقه‌بندی می‌شوند. در شکل (۳)، نمودار توزیع تجمعی UCS آهک‌های مارنی مورد مطالعه نشان داده شده است.

یکی از علت‌های مقاومت بسیار پایین بعضی از نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند ناشی از پرشدگی ناقص ریزترک‌های اولیه از سیمان کلسیتی باشد. این در حالی است که تخلخل نمونه‌ای مقاوم‌تر عمدتاً مربوط به منافذ سنگ است که اثر

کمتری بر کاهش مقاومت سنگ نسبت به تخلخل مربوط به ریزترک‌ها دارد (Marine et al., 2009). بر مبنای طبقه‌بندی Anon (1998) جدول ۲، برای دانسیته و تخلخل، غالب نمونه‌ها در رده با دانسیته بالا ($2/55 - 2/75$) و متوسط ($2/55 - 2/72$) و تخلخل بالا ($15 - 30$) و متوسط ($15 - 5$) قرار گرفته‌اند. به‌طورکلی در این مجموعه با افزایش تخلخل سنگ آهک‌های مارنی دانسیته خشک نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۶. تحلیل‌های آماری

روابط بین خصوصیات به دست آمده با استفاده از روش‌های رگرسیون ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور علاوه بر معادله‌ی خطی، معادله توانی، و معادله نمایی، و لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که بهترین معادله با رگرسیون و معنی‌داری بالا معادله نمایی می‌باشد. در جدول (۳)، ضرایب همبستگی بین خواص مختلف نمونه‌های مورد مطالعه در بهترین حالت برازش، ارائه شده است. با استناد به نتایج به دست آمده از جدول (۳)، تمام خصوصیات فیزیکی همبستگی مناسبی با مقاومت تراکم تک‌محوری نشان می‌دهند.

یکی از دلایل مشابه بودن ضرایب همبستگی به دست آمده می‌تواند به این دلیل باشد که خصوصیات مانند دانه‌بندی و میزان آب بین دانه‌ای و بین لایه‌ای، درجه اشباع آب، ترکیب کانی‌شناسی، نحوه‌ی توزیع و جهت‌یابی ریزترک‌ها و ضخامت لایه‌بندی سنگ بر روی هرکدام از این پارامترها تأثیرگذار است.

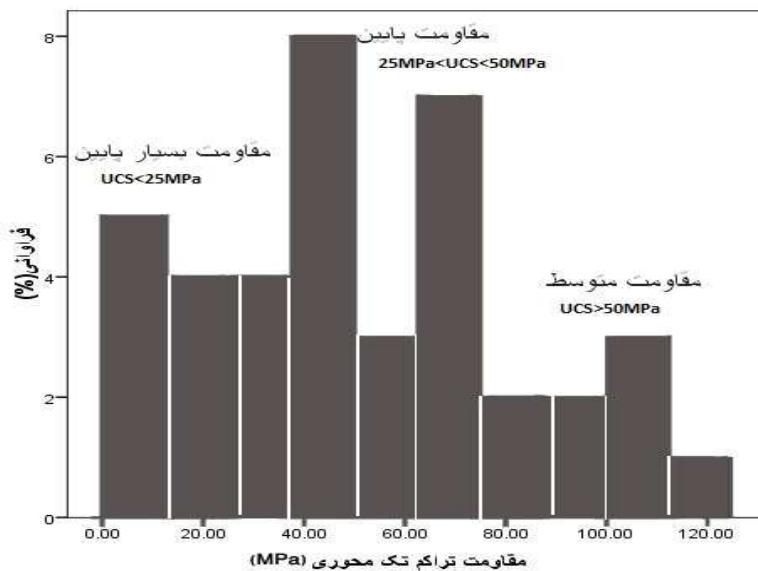
یکی دیگر از علل مناسب بودن این خواص جهت تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری این می‌باشد که نیاز به تهیه و آماده‌سازی نمونه با شکل هندسی منظم نمی‌باشد. این آزمایش‌ها به خصوص در مواقعی که امکان تهیه‌ی مغزه‌ی حفاری و هرگونه نمونه‌ی استوانه‌ای وجود ندارد، می‌تواند در تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری مناسب باشد.

جدول ۱. آنالیز آماری داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های مختلف بر روی ۳۹ نمونه مورد مطالعه

ویژگی	تعداد نمونه	استاندارد	محدوده تغییرات	میانگین	واریانس	انحراف استاندارد
مقاوم تراکمی تک‌محوری (MPa)	۳۹	ISRM(1985)	۱۲۰/۱۲-۵/۷	۵۱/۵۵	۹۴۴/۲۲۷	۳۰/۷۳
چگالی (gr/cm ³)	۳۹	ISRM(1985)	۲/۷۸-۱/۸	۲/۴۱	۰/۰۷	۰/۲۶۶
جذب آب (%)	۳۹	ISRM(1985)	۱۳/۷۸-۰/۷۹	۴/۶۷	۵۶/۶۴۷	۷/۵
تخلخل (%)	۳۹	ISRM(1985)	۲۶/۳۹-۱۰/۰۴	۱۰/۰۴	۱۷/۳۷	۴/۱۶

جدول ۲. طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس دانسیته خشک و تخلخل (Anon,1998)

رده	توصیف	تخلخل	چگالی خشک (تن بر متر مکعب)
۱	سنگ‌های با تخلخل خیلی زیاد	بیش از ۳۰	کمتر از ۱/۸
۲	سنگ‌های با تخلخل زیاد	۱۵-۳۰	۱/۸-۲/۲
۳	سنگ‌های با تخلخل متوسط	۵-۱۵	۲/۲-۲/۵۵
۴	سنگ‌های با تخلخل کم	۱-۵	۲/۷۵-۲/۵۵
۵	سنگ‌های با تخلخل خیلی کم	کوچکتر از ۱	بیش از ۲/۷۵



شکل ۳. نمودار توزیع تجمعی مقاومت تراکمی تک‌محوری

جدول ۳. ضرایب تعیین (r^2) بین خصوصیات فیزیکی و مقاومت تراکمی تک‌محوری نمونه‌های مورد مطالعه

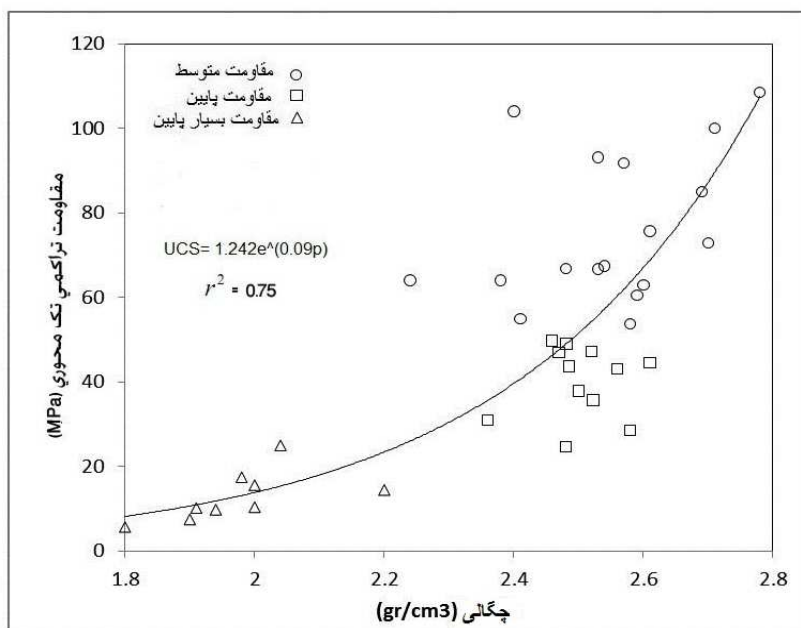
پارامترهای مورد بررسی	UCS	r	N	Wa
مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa)	۱			
چگالی (gr/cm ³)	۰/۷۵	۱		
(%) تخلخل	۰/۶۱	۰/۷	۱	
(%) جذب آب	۰/۷	۰/۷۵	۰/۹	۱

۶-۲. آنالیز چندمتغیره

از آنجا که رگرسیون ساده نتیجه‌ی نسبی و تقریبی ارائه می‌دهند، لذا در این تحقیق روش‌های تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری 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 به دست آمده از این آنالیزها در جدول (۴) ارائه شده‌اند. میزان خطای استاندارد پارامتری است که به تعداد نمونه‌ها بستگی دارد (نسبت انحراف استاندارد به جذر تعداد نمونه‌ها) و هر قدر تعداد نمونه‌ها افزایش یابد مقدار آن به حداقل می‌رسد. شکل (۵)، (۶)، (۷) رابطه‌ی بین UCS تخمین زده شده توسط روابط به ترتیب (۱)، (۲)، (۳) با UCS به دست آمده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۶-۱. ارتباط تخلخل، دانسیته و جذب آب با مقاومت تک‌محوری به طور کلی در سنگ‌های رسوبی با افزایش تخلخل و جذب آب ویژگی‌های مقاومتی کاهش می‌یابند. دلیل این امر توزیع تنش در ریزترک‌های سنگ با افزایش تخلخل است (Howarth and Rowlands, 1986). تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که UCS مارن‌ها و شیل‌ها با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد (Koncagul and Santi 1999).

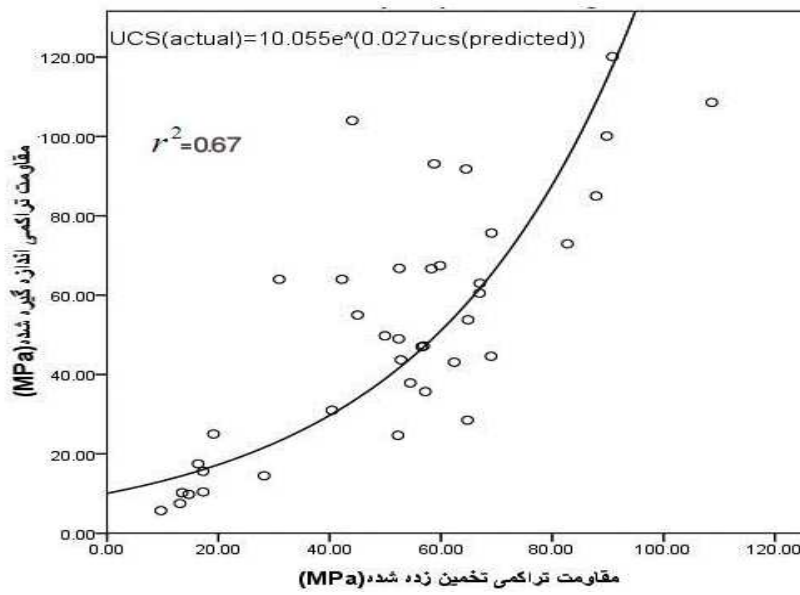
در شکل (۴) رابطه مقاومت تراکمی تک‌محوری در مقابل دانسیته نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش وزن دانسیته سنگ مقاومت تراکم تک‌محوری افزایش می‌یابد و یکی از دلایل آن این است که با کاهش تخلخل دانسیته افزایش یافته در نتیجه توزیع تنش در سنگ کاهش می‌یابد.



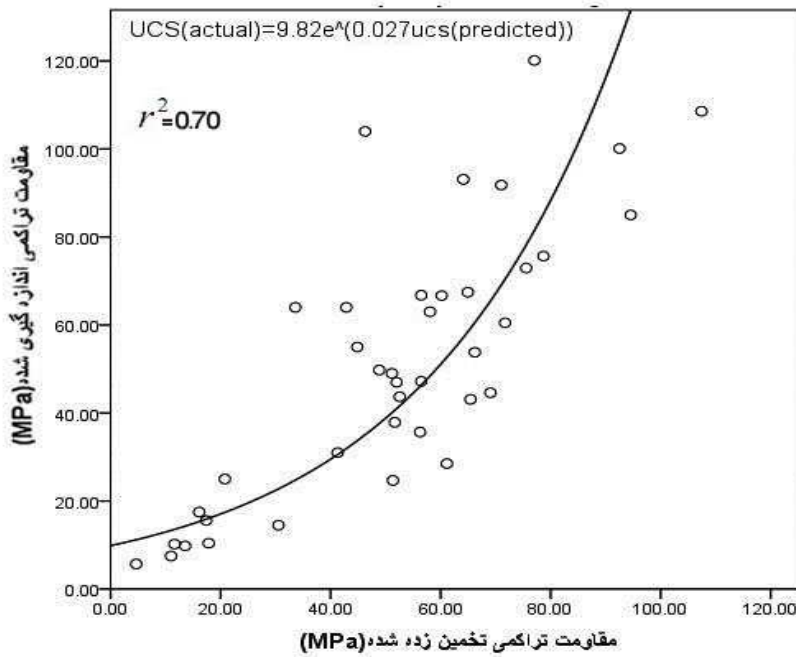
شکل ۴. رابطه‌ی چگالی در مقابل مقاومت تراکمی تک‌محوری

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

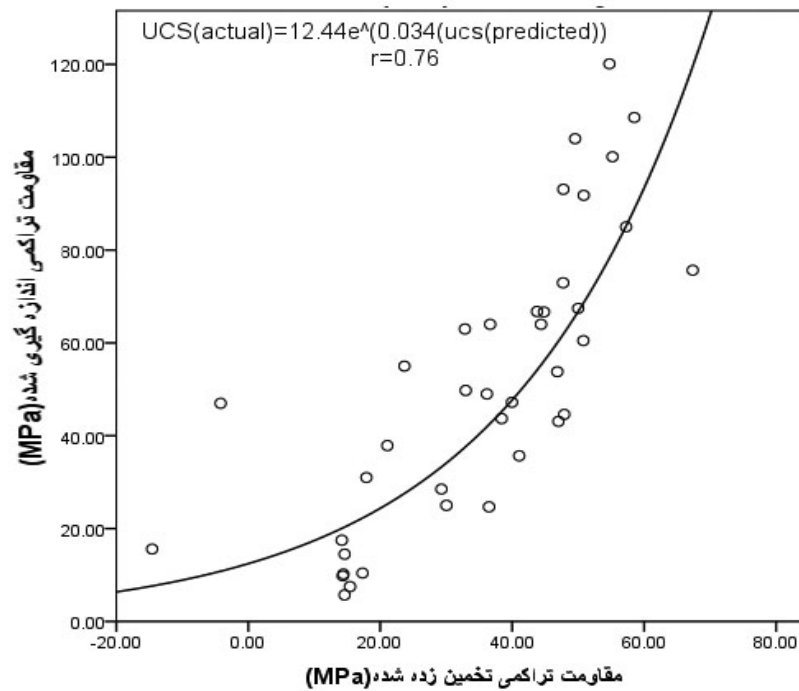
متغیرهای مستقل	شماره	رابطه آماری چند متغیره	r^2	St.d.Error
چگالی و تخلخل	۱	$UCS = -7.232 + 0.615e^{(1.844 p)} + 130.486e^{(1.130n)}$	۰/۶۲	20.17
چگالی و جذب آب	۲	$UCS = 454.565 + 358.851e^{(0.137P)} - 95.279e^{(1.204 Wa)}$	۰/۸	19.97
تخلخل و جذب آب	۳	$UCS = 19.108 + 160e^{(0.109n)} - 208.431e^{(0.281Wa)}$	۰/۷۹	21.98



شکل ۵. رابطه بین مقاومت تراکمی تک‌محوری تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۱ با مقادیر مقاومت تراکمی تک‌محوری اندازه‌گیری شده



شکل ۶. رابطه بین مقاومت تراکمی تک‌محوری تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۲ با مقادیر مقاومت تراکمی تک‌محوری اندازه‌گیری شده



شکل ۷. رابطه بین مقاومت تراکمی تک محوری تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۳ با مقادیر مقاومت تراکمی تک محوری اندازه‌گیری شده

۷. نتیجه‌گیری

انجام آزمایش تعیین مقاومت تراکم تک محوری آهک‌های مارنی سازند آبدراز مشکل و مستلزم بهره‌گیری از دستگاه گران قیمت و زمان‌بر است. علاوه بر این نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. به منظور رفع مشکلات فوق و تعیین روابط تجربی برای تخمین مقاومت سنگ، با استفاده از آزمایش‌های ساده نظیر دانسیته، تخلخل، جذب آب، نتایج ذیل حاصل گردید:

- ۱- مقادیر مقاومت تراکم تک محوری آهک‌های مارنی سازند آبدراز، بیشترین همبستگی را به ترتیب با دانسیته ($r^2 = 0.75$)، جذب آب ($r^2 = 0.67$)، تخلخل ($r^2 = 0.6$)، نشان می‌دهند.
- ۲- نتایج به دست آمده نشان‌دهنده رابطه نسبتاً خوب پارامتر دانسیته نسبت به پارامترهای دیگر مورد بررسی در تخمین مقاومت تراکمی تک محوری است.

۳- علت نزدیکی ضریب تعیین این سه پارامتر با مقاومت تراکمی تک محوری، رابطه‌ی نزدیک این خصوصیات در سنگ با یکدیگر می‌باشد.

۴- با توجه به میزان اختلاف کم بین مقاومت تراکم تک محوری تخمینی و اندازه‌گیری شده در اغلب نمونه‌ها و ضرایب همبستگی محاسبه شده، روابط تجربی به دست آمده از کارایی نسبتاً قابل قبولی در تخمین مقاومت تراکم تک محوری و کاهش هزینه‌ها، برای آهک‌های مارنی سازند آبدراز برخوردار هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از شرکت مهندسين مشاور جهدازما به دليل انجام آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری تشکر و قدردانی نمایند

منابع

- افشار حرب، ع.، ۱۳۷۳. زمین‌شناسی ایران، زمین‌شناسی کپه‌داغ، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، طرح تدوین زمین‌شناسی ایران، ۲۷۵.
- Adrian, R., Russell, D. M. W., 2008. Point load tests and strength measurements for brittle spheres rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (2): 272-280.
- Afshar-Harb, A., 1982. Geological map of Sarakhs area. Ministry of Petroleum, NIOC Exploration and Production. Teheran, 1 sheet.
- Alvarez Grima M., Bwauska, R., 1999. Fuzzy strength of rock samples, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (2): 339-349.
- ASTM (D2938-95), 2002. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.
- Cargill, J. S., Shakoor, A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27(2): 503-95.
- 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*, 33: 71-80.
- Faisal, I. S., Edward, J., Omar H. A., 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests, *International Journal Engineering Geology*, 90 (3-4): 138-147.
- Gokceoglu, C., 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographic composition, *Engineering Geology*, 66(4): 39-54.
- 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*, 9: 169-179.
- Işık, Y., 2009. A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (8): 1349- 1357.
- ISRM Suggested methods, 1985. Suggested method for determining point load strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22: 53-60.
- ISRM Suggested methods, 1981. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomech. Abstr.*, 16: 135-140.
- Kamil, K. and Levent, S., 2010. Nail penetration test for determining the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (2), 265-271.
- Khalily, M., lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., Khanehbad, M., Dehghan, P., 2013. Durability Characterization of Abderaz Marly Limestone in the Kopet- Dagh Basin, NE of Iran, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3: 50-56.
- 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, *Engineering Geology*, 38: 138-157.
- Lashkaripour, G. R., 2002. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59 (2): 73-77.
- 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, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (2): 250-261