



تأثیر خواص بافتی بر ویژگی های مهندسی کنگلومراهای منطقه فامنین،

شمال خاوری استان همدان

غلامرضا خانلری^{1*}، مجتبی حیدری¹، مهران نوری²، بهروز رفیعی¹، موسی اسفندیاری³

پذیرش مقاله: 93/3/27

دریافت مقاله: 92/12/6

چکیده

برای درک ارتباط میان ویژگی های مهندسی با ویژگی های سنگ شناسی، تعداد هشت نمونه از کنگلومراهای سازند قم در منطقه فامنین واقع در شمال خاور استان همدان گردآوری شد. نمونه ها برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، شاخص مقاومت بار نقطه ای، مدول الاستیسیته، تخلخل و چگالی خشک و اشباع تحت آزمون های آزمایشگاهی قرار گرفتند. همچنین برش های نازک میکروسکوپی نمونه ها، برای تعیین ویژگی های سنگ شناسی، پارامترهای بافتی و کانی شناسی، مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش بر پایه نتایج تجزیه و تحلیل های آماری، روابط پیش بینی کننده چندمتغیره برای برآورد ویژگی های فیزیکی و مکانیکی با به کارگیری ویژگی های سنگ شناسی و بافتی توسعه داده شده اند. این مطالعه نشان می دهد که تاثیر پارامترهای بافتی بر روی ویژگی های مهندسی، مهم تر از ترکیب کانی شناسی می باشد. همچنین مشخص گردید که آرایش هم جوار (P_p , Packing Proximity)، آرایش چگالی (P_d , Packing Density)، شکل دانه ها، میانگین اندازه دانه ها و مقدار سیمان و زمینه، ویژگی های بافتی هستند که تاثیر چشمگیری بر روی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه ها دارند. در مطالعه حاضر رگرسیون چندمتغیره خطی در چهار گام مختلف، شامل ترکیبات مختلفی از ویژگی های سنگ شناسی به عنوان پارامترهای ورودی برای هر ویژگی مهندسی، مورد استفاده قرار گرفته است. سرانجام بهترین رابطه ها برای پیش بینی ویژگی های مهندسی ارائه شده است.

کلید واژه ها: کنگلومرا، ویژگی های سنگ شناسی و مهندسی، رگرسیون چندمتغیره خطی، سازند قم، فامنین، همدان

1. عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان، Khanlari_reza@Yahoo.com

2. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی گروه زمین شناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3. کارشناس ارشد، رسوب شناسی و سنگ شناسی رسوبی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* مسئول مکاتبات

1. مقدمه

سنگ‌های تخریبی آواری گروه متنوعی از سنگ‌های رسوبی را تشکیل می‌دهند که از رس‌سنگ‌های دانه‌ریز، تا ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهای دانه‌درشت در تغییر هستند. کنگلومراها عمدتاً از خرده‌ها یا قطعاتی با اندازه بزرگ‌تر از 2 میلی‌متر تشکیل شده‌اند که از سنگ‌های قدیمی‌تر (آذرین درونی و بیرونی، دگرگونی و رسوبی) منشاء گرفته‌اند. دانه‌های آواری بر اثر فرآیندهای هوازدگی شیمیایی و فیزیکی از خاستگاه خود آزاد شده و سپس به حوضه رسوبی حمل و در آنجا ته‌نشین می‌شوند. بافت سنگ‌های تخریبی آواری بازتاب‌کننده فرآیندهای رسوب‌گذاری است، از این رو برای تعیین خصوصیات بافتی آنها، بسیاری از رسوبات عهد حاضر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تغییرات زیاد در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آواری به تغییرات مشخصه‌های بافتی نسبت داده شده‌اند (Howarth and Rowlands, Bell, 1978; Shakoor and Bonelli, 1991; 1986). علاوه بر ویژگی‌های شاخص مهندسی، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و بافتی نیز در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Zorlu et al., 2008). تعیین دقیق برخی از خواص شاخص مهندسی سنگ‌ها، به زمان و هزینه قابل توجهی برای جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های مناسب و آزمون‌های آزمایشگاهی نیاز دارد. علاوه بر آن نتایج حاصل، وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. با توجه به موارد گفته شده و همچنین عدم امکان تهیه نمونه مناسب از سنگ‌های ضعیف، متورق و خردشده، برای به حداقل رساندن زمان و هزینه می‌توان از روابط تجربی که به طور گسترده‌ای برای برآورد خواص پیچیده سنگ‌ها از داده‌های حاصل از روش‌های آسان بهره می‌گیرد، استفاده نمود. هدف از این مطالعه، تعیین خواص مهندسی سنگ کنگلومرا، با استفاده از ارتباط میان ویژگی‌های بافتی و سنگ‌شناسی سنگ با خصوصیات مهندسی آن می‌باشد. با توجه به اینکه تعیین ویژگی‌های بافتی و سنگ‌شناسی نسبت به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، به زمان و هزینه کمتری نیاز دارد و با

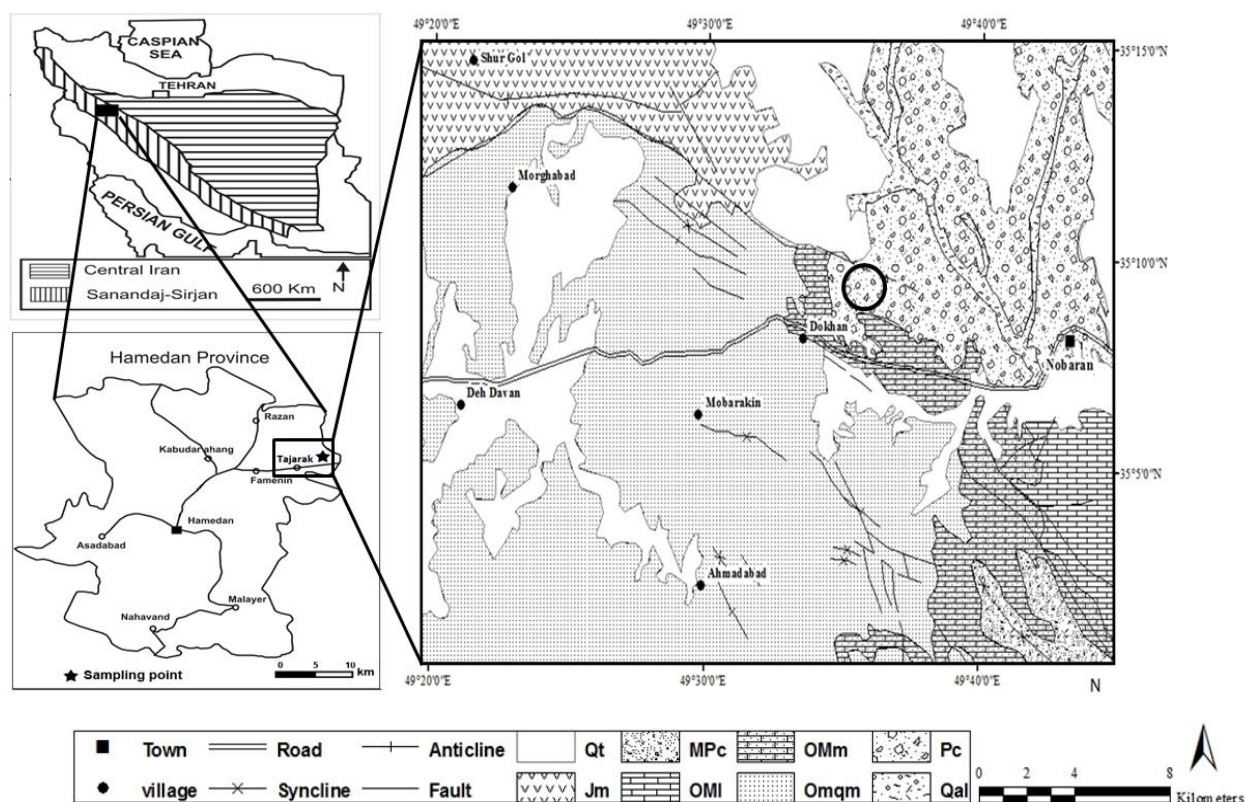
سهولت بیشتری انجام می‌پذیرد، بنابراین تعیین خواص مهندسی سنگ با استفاده از ویژگی‌های بافتی و سنگ‌شناسی ضروری به نظر می‌رسد. ویژگی‌های سنگ‌شناسی که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند شامل اندازه دانه، شکل دانه، درجه درهم قفل شدگی دانه‌ها، نوع تماس‌ها، آرایش چگالی، آرایش هم‌جوار، ترکیب کانی‌شناسی، مقدار و نوع سیمان و زمینه است. ویژگی‌های یاد شده را می‌توان به آسانی با مطالعه برش‌های نازک در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. پاره‌ای از پارامترهای مهم در طراحی‌های مهندسی که به سختی به دست می‌آیند را می‌توان به‌طور غیرمستقیم با بکارگیری روابط میان ویژگی‌های آماری و دینامیکی سنگ‌ها به دست آورد (Sarkar et al., 2009). آنالیز به شیوه رگرسیون تک‌متغیره و چندمتغیره یکی از روش‌هایی است که به‌طور موفقیت‌آمیزی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های گوناگون به کار گرفته شده است (Ulusay et al., 2001; Gunes). در این پژوهش ویژگی‌های سنگ‌شناسی و بافتی شامل ترکیب کانی‌شناسی دانه‌ها و مقدار زمینه، میانگین اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، ماهیت تماس بین دانه‌ها، نوع تماس بین دانه‌ها و آرایش دانه‌ها در کنگلومراهای سازند قم مورد بررسی قرار گرفته است. سپس داده‌های به دست آمده از مطالعات بافتی و آزمایش‌های ژئوتکنیکی با استفاده از رگرسیون تک‌متغیره خطی و رگرسیون چندمتغیره خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سرانجام با بکارگیری داده‌های حاصل از مطالعه برش‌های نازک که به طور چشمگیری با ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی ارتباط داشتند، مدل‌های پیش‌بینی کننده تجربی برای برآورد ویژگی‌های مهندسی، ارائه شده است.

2. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، (تجرک) در 40 کیلومتری جاده فامنین - ساوه و در مسیر بزرگراه همدان - ساوه واقع است (شکل 1). این محدوده مطالعاتی بین طول جغرافیایی $49^{\circ} 20'$ و $49^{\circ} 23'$

مارنی سازند قم، سبب شده تا نواحی یاد شده ژرف‌ترین بخش دریای قم دانسته شوند (آقاباتی، 1385). مجموعه سنگ‌های رسوبی الیگومیوسن در منطقه مورد مطالعه شامل طیف گسترده‌ای از واحدهای ماسه‌سنگی و کربناته می‌باشد که از لحاظ استحکام از سنگ‌های به طور کامل تحکیم یافته و صخره‌ساز تا رسوب‌های سست و منفصل را دربر می‌گیرد (شکل 1). در برخی از برش‌های مطالعه شده مرز زیرین سنگ‌های هم‌ارز سازند قم را سازند قرمز زیرین با سن الیگومیوسن تشکیل می‌دهد. در برخی مکان‌ها نیز لایه‌های الیگومیوسن به صورت دگرشیب و یا گسله بر روی رسوبات قدیمی‌تر (کرتاسه و یا ژوراسیک) قرار گرفته است (همکاران، 1384).

و عرض جغرافیایی $35^{\circ}08'$ و $35^{\circ}10'$ قرار گرفته است. منطقه تجرک از نظر تقسیم بندی زون‌های زمین شناسی ایران در زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد (آدابی، 1366). سازند قم در این منطقه با سن اولیگومیوسن بیشترین رخمون را دارد. از نظر سنگ‌شناسی این سازند در منطقه مورد نظر دربردارنده کنگلومرا، ماسه سنگ، سیلتستون و مارن است. بلندی‌های جنوبی قم (دو چاه، دو برادر، نرداقی و ...) از جمله مناطقی هستند که در آن‌ها سازند قم گسترش چشمگیری دارد. از منطقه‌ی قم به سوی باختر و شمال باختر، سازند قم در مناطق ساوه و همدان گسترش و ستبرای زیادی دارد، به طوری که در باختر ساوه، ستبرای این سازند به 3600 متر می‌رسد و یا در شمال همدان (آب‌گرم، رزن، نوبران) نهشته‌های ستبر



شکل 1. موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه تجرک (نقشه زمین شناسی 1:250000 با اصلاحات)، (بلورچی، 1358).

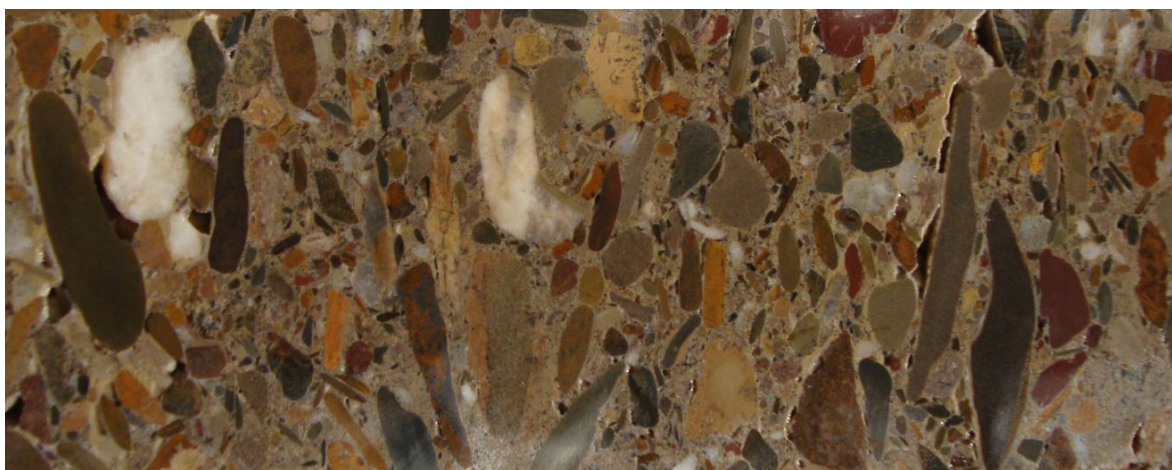
Pc: نهشته‌های کنگلومرای، OMm: مارن، آهک ماسه‌ای و آهک مارنی، MPc: کنگلومرا و ماسه سنگ قرمز، Qt: آبرفت‌ها و تراس‌های آبرفتی، Qal: پادگانه‌های آبرفتی، Omqm: مارن، ماسه سنگ و آهک، Oml: رسوبات مارنی و آهک مارنی، Jm: سنگ‌های دگرگونی

خفیف اسلیتی

3. مواد و روش‌ها

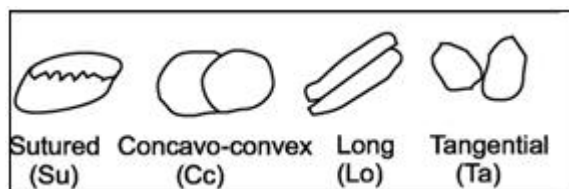
در این تحقیق ضمن بازدید صحرایی از منطقه، رخنمون‌های مناسبی از سنگ کنگلومرا مشخص شده‌اند. از آنجایی که نمونه‌های موجود در منطقه به لحاظ ظاهری و اندازه دانه‌های تشکیل دهنده، متفاوت بودند، نمونه‌های اخذ شده (تعداد 8 بلوک سنگی از نقاط مختلف منطقه) به گونه‌ای انتخاب شدند که تا حد امکان معرف کل نمونه‌های موجود در منطقه باشند. پس از انتقال بلوک‌های سنگی به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا، اقدام به مغزه‌گیری از آنها گردید. از بلوک‌های سنگی مغزه‌های استوانه‌ای شکل با حداقل طول 135 میلی‌متر و قطر 54 میلی‌متر تهیه شده است که برای انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. برای مطالعه ویژگی‌های بافتی و سنگ‌شناسی کنگلومراهای منطقه، نمونه‌های دستی و مقاطع نازک نمونه‌ها تهیه گردید. ترکیب کانی‌شناسی خرده

سنگ‌های کنگلومرای مورد مطالعه با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مطالعه گردید. مقادیر اجزا تشکیل دهنده کنگلومراهای مورد مطالعه با شمارش دانه‌های هر نمونه به روش معرفی شده توسط Hutchinson (1974). مشخص گردیده است. مطالعات بافتی کنگلومراهای منطقه به دو روش مطالعه نمونه‌های دستی و مطالعه برش‌های نازک انجام شده است. مطالعه پارامترهای میانگین اندازه دانه‌ها و گردشگری دانه‌ها به دلیل درشت‌دانه بودن سنگ، بر روی نمونه‌های دستی انجام شده است (شکل 2). مطالعه برخی از پارامترها شامل ماهیت و انواع تماس بین دانه‌ها و آرایش دانه‌ها بر روی برش‌های نازک انجام شده است. برای تعیین میانگین اندازه دانه‌ها، نمونه‌های دستی با ابعاد $140\text{mm} \times 54\text{mm}$ و با سطح صیقلی تهیه شده‌اند (شکل 2). سپس بیش از 300 ذره در هر نمونه در امتداد خط‌های پیمایش گوناگون با خط‌کش اندازه‌گیری شده‌اند.



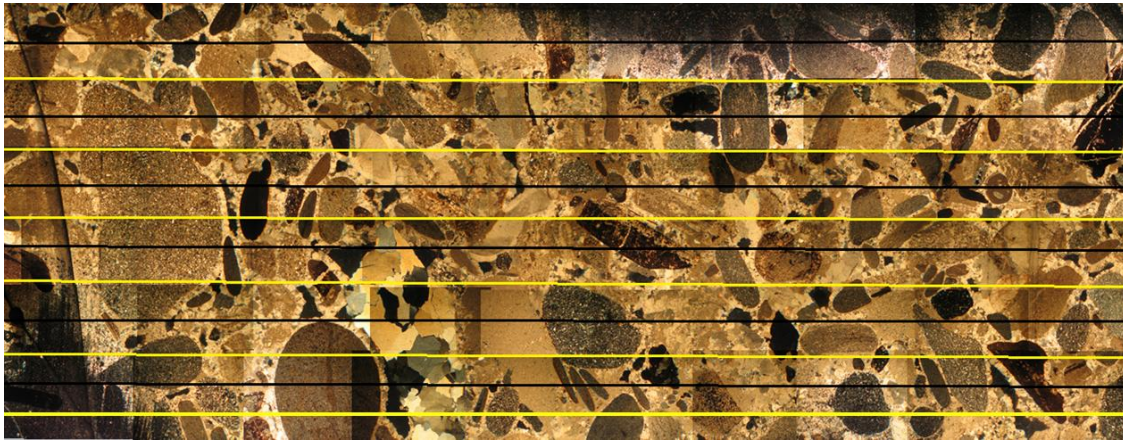
شکل 2. تصاویر نمونه‌های دستی کنگلومراهای منطقه جهت مطالعات بافتی

عکس نوع تماس‌ها در طول خط‌های پیمایش شمردن شده‌اند (شکل 4).



شکل 3. انواع تماس بین دانه‌ها (Smart et al., 1982)

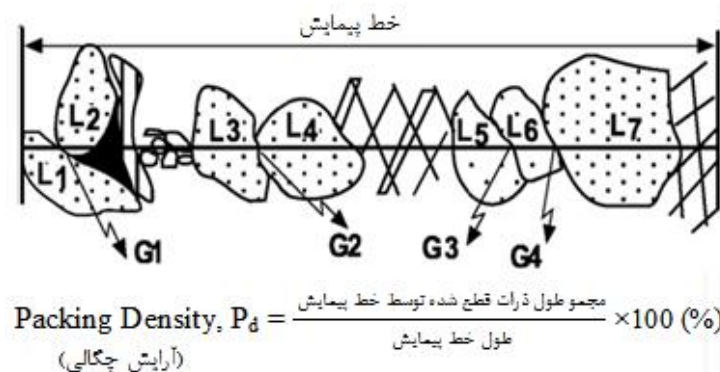
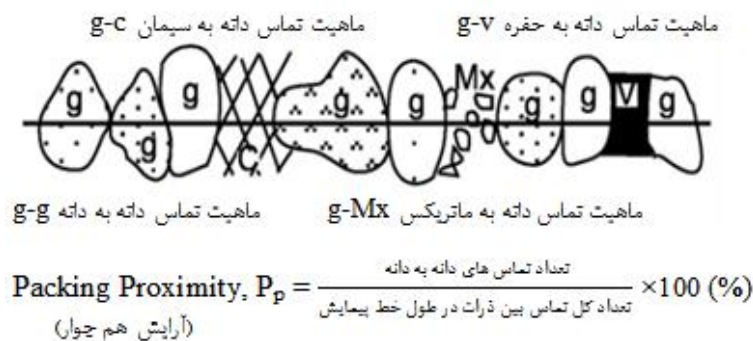
طبیعت تماس بین دانه‌ها نیز در این پژوهش با شمردن تعداد تماس دانه به دانه، دانه به سیمان، دانه به ماتریکس، حفره به سیمان و ماتریکس به حفره به‌دست آورده شده است. برای به‌دست آوردن نوع تماس بین دانه‌ها (شکل 3) و طبیعت تماس بین دانه‌ها از تمام میدان‌های دید هر برش نازک، عکس گرفته شده است. سپس از کنار هم قرار دادن تمام عکس‌ها، تصویر برش نازک به طور کامل بازسازی گردیده و در هر



شکل 4. تصویر کامل برش نازک و خطوط پیمایش کنگلومراهای مورد مطالعه

که در روی یک خط فرضی قرار دارند به تعداد کل تماس بین دانه‌ها (شامل دانه به سیمان، دانه به حفره و دانه به ماتریکس) به دست می‌آید و آرایش چگالی از نسبت بین جمع طول دانه‌های قطع شده توسط خط فرضی به طول کل خط فرضی به دست می‌آید (شکل 5).

گردش‌دگی بیانگر مقدار خمیدگی یا تیزی گوشه‌های ذره است (اهری پور و مصدق، 1385). گردش‌دگی دانه‌ها با مقایسه دانه‌ها با مقیاس پاورس (Powers)، به دست آورده شده است (اهری پور و مصدق، 1385). همچنین آرایش هم‌جوار و آرایش چگالی به روش پیشنهادی (Kahn 1956) تعیین شده‌اند. آرایش هم‌جوار از نسبت بین تعداد تماس دانه به دانه



شکل 5. نحوه محاسبه آرایش هم‌جوار و آرایش چگالی (Tamrakar et al., 2007)

4. نتایج و بحث

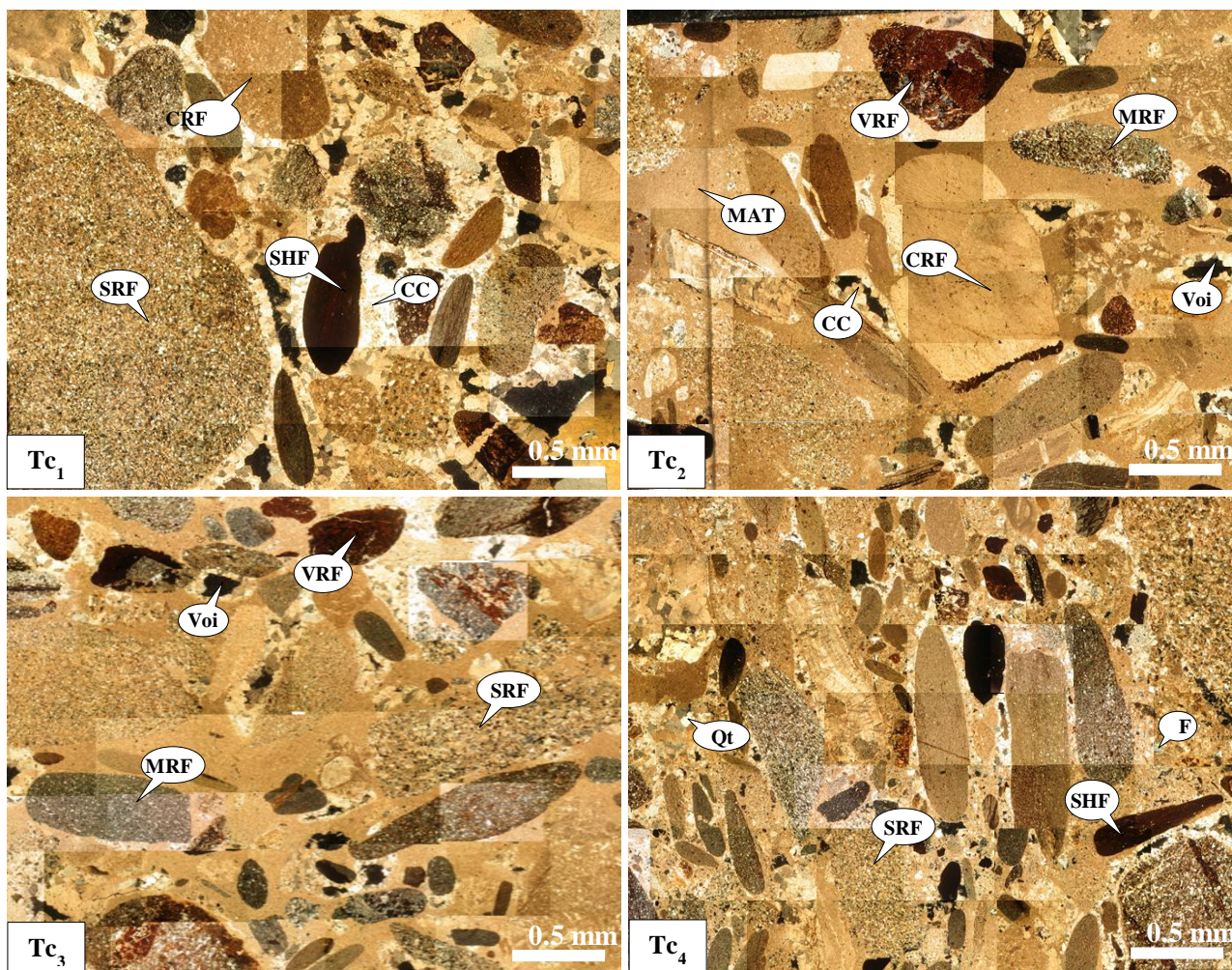
4-1. ترکیب کانی شناسی

به منظور انجام مطالعات سنگ شناسی، تعداد 8 برش نازک از کنگلومراهای منطقه تهیه شده است (شکل 6). با مطالعه برش های نازک درصد کانی ها و اجزای تشکیل دهنده کنگلومراها شناسایی گردیدند که نتایج به دست آمده در جدول 1 ارائه شده است. این کنگلومراها عمدتاً از خرده سنگ ها (کربناته، آذرین، ماسه سنگی، دگرگونی و شیلی) و مقدار اندکی کواتز و فلدسپار تشکیل شده اند. تغییرات مقدار خرده سنگ ها از 54-66، سیمان 7-22 و زمینه 17-25 درصد می باشد. این سنگ با توجه به رده بندی های رایج کنگلومراها، یک پاراکنگلومرای پلی میکتیک است (Pettijohn, 2000). تغییرات میزان حفره نیز از 2-8 درصد می باشد. سیمان این کنگلومراها عمدتاً از نوع کلسیتی است که دانه را به یکدیگر متصل کرده است. در پاره ای از حفره ها، مرکز حفره کاملاً با سیمان پر نشده و تخلخل بین دانه ای حفظ شده است. خرده های سنگی موجود بیشتر از نوع خرده های آهکی و دگرگونی می باشند که در ماتریکس کربناته قرار گرفته اند.

ویژگی های مهندسی از قبیل وزن واحد خشک و اشباع، شاخص مقاومت بار نقطه ای، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری و مدول مماسی کنگلومراهای مورد مطالعه، به روش های پیشنهادی (ISRM (1981) تعیین شده اند. متغیرهای مهم و معنادار روابط خطی، در رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم افزار SPSS 21، برای درک رابطه میان متغیرهای سنگ شناسی و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته اند. برای به دست آوردن نتایج مطلوب تر از طریق رگرسیون چندمتغیره خطی نمونه ها باید زیاد و دقیق باشند. زیرا این روش در مقابل اطلاعات نادرست، حساسیت بالایی دارد و ورود چنین داده هایی ممکن است منجر به بروز خطاهای بزرگی در نتایج به دست آمده شوند (Balan, 1995). علاوه بر این، برای استفاده از این روش، متغیرها باید پراکندگی نرمال داشته باشند و تغییر آنها از یک رابطه خطی پیروی کند. رگرسیون چندگانه ارتباط میان پارامترهای پیش بینی کننده را با متغیر پاسخ مورد نظر بیان می کند (Balan, 1995).

جدول 1. نتایج به دست آمده از بررسی سنگ شناسی کنگلومراهای مورد مطالعه

شماره بلوک	کواتز (%)	فلدسپار (%)	خرده سنگ (%)	سیمان کلسیتی (%)	ماتریکس کربناته (%)	حفره (%)
Tc ₁	1	1	66	7	18	7
Tc ₂	1	0	58	13	22	6
Tc ₃	1	0	53	18	25	3
Tc ₄	1	0	53	22	22	2
Tc ₅	1	1	64	10	17	7
Tc ₆	1	1	63	11	18	6
Tc ₇	1	1	63	7	20	8
Tc ₈	1	0	61	15	19	4
حداقل	1	0	54	7	17	2
حداکثر	1	1	66	22	25	8
میانگین	1	0/5	59/62	12/87	20/12	5/37



شکل 6. تصویر میکروسکوپی برش‌های نازک کنگلومراهای مورد مطالعه

(MAT: ماتریکس، SRF: خرده ماسه سنگی، CRF: خرده سنگ آهکی، MRF: خرده سنگ دگرگونی، VRF: خرده سنگ آذرین، CC: سیمان کلسیتی، SHF: خرده شیلی، Voi: حفره، Qt: کوارتز و F: فلدسپار)

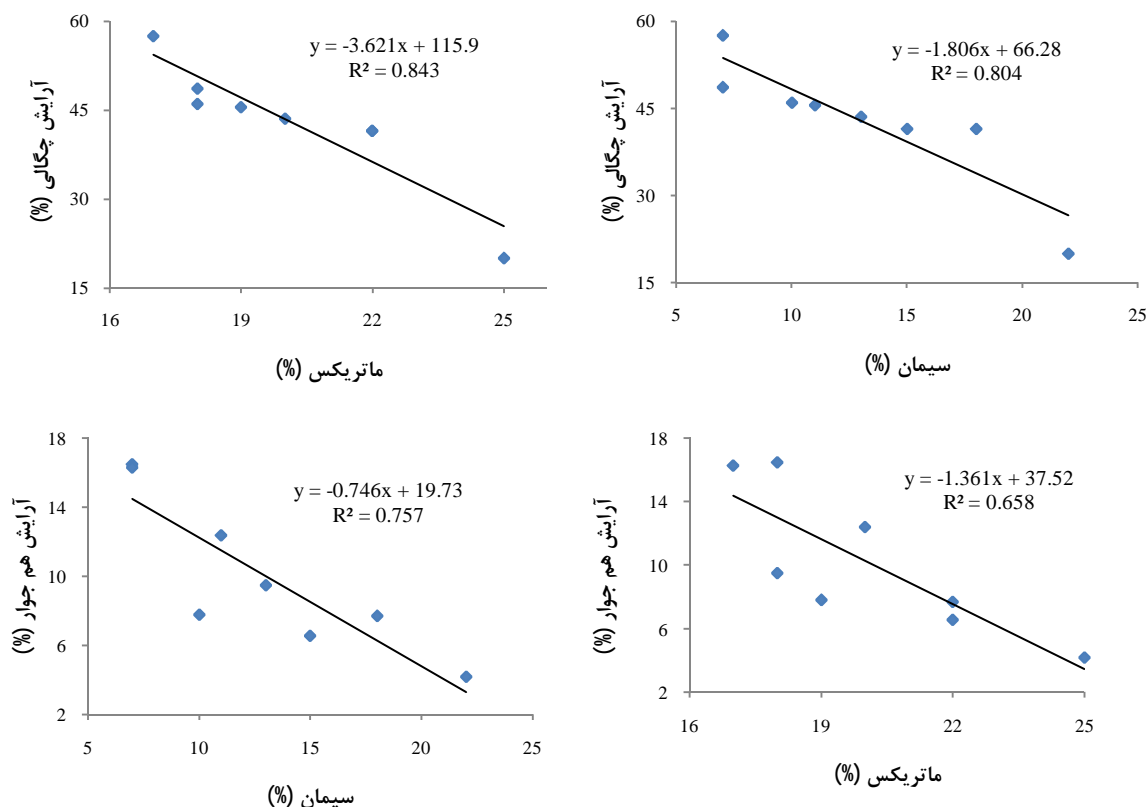
دارند و هیچ‌گونه خرده‌شدگی و انحلال در میان آن‌ها دیده نمی‌شود. در تماس محدب - مقعر دانه سخت‌تر به درون دانه نرم‌تر نفوذ کرده به طوری که نوعی انحلال و خرده‌شدگی در یک قسمت دانه (قسمت مقعر) به وجود می‌آید. این گونه تماس نشان دهنده فشردگی و تراکم بین دانه‌های تشکیل دهنده سنگ است. در تماس مضرس با افزایش شدت تراکم و انباشتگی دانه‌ها، دانه‌ها در یکدیگر نفوذ کرده و خرده‌شدگی دو طرفه را به وجود می‌آورند. در نتیجه محل تماس بین دانه‌ها به صورت مضرس دیده می‌شود. در این حالت میزان

2-4. نتایج مطالعات بافتی

نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های بافتی در جدول 2 ارائه شده است. متوسط اندازه دانه‌ها $6/3 \text{ mm}$ با جورشدگی متوسط و شکل دانه‌ها گردشده تا نیمه گردشده می‌باشد. تماس بین دانه‌ها به انواع طولی، محدب - مقعر، مضرس و نقطه‌ای طبقه‌بندی می‌شود که در سنگ‌های با جورشدگی خوب حضور سه نوع تماس یا بیشتر نشان می‌دهد که تخلخل بوسیله انحلال فشاری کاهش یافته است (Bell, 1978). در تماس نقطه‌ای، دانه‌ها نسبت به یکدیگر در یک نقطه تماس

کنگولمرهای مورد مطالعه، با توجه به ماتریکس پشتیبان بودن آنها، میزان تماس بین دانه‌ها پائین می‌باشد و غالب تماس‌ها از نوع نقطه‌ای می‌باشند. مقادیر بالای آرایش چگالی و آرایش هم‌جوار، محتوی پائین سیمان و ماتریکس را نشان می‌دهند که دانه‌ها در هم محکم شده‌اند (Ulusay et al., 1994). در پژوهش حاضر ارتباط معکوسی میان مقدار سیمان و ماتریکس با آرایش چگالی و آرایش هم‌جوار وجود دارد (شکل 7).

ماتریکس به شدت کاهش پیدا می‌کند (پروین، 1385). روند تغییر تماس نقطه‌ای تا مضرس بیانگر روند افزایش فشار و تراکم در رسوبات است. در تماس مضرس حداکثر تراکم ایجاد شده است به طوری که در مرز بین دانه‌ها فرآیند انحلال شیمیایی (Pressure dissolution) صورت می‌گیرد. به این نوع فشردگی، تراکم شیمیایی (Chemical compaction) می‌گویند (پروین، 1385). تماس از نوع مضرس بر دیاژنز و عمق دفن زیاد دلالت دارد، در مقابل تماس از نوع طولی و محدب - مقعر بر عمق متوسط دلالت دارد (Bell, 1978). در



شکل 7. ارتباط درصد سیمان و ماتریکس با آرایش چگالی و آرایش هم‌جوار

مقدار متوسط 15/6 درصد در رده بعدی قرار دارند و تماس مضرسی با 2/7 درصد کمترین نوع تماس می‌باشد.

در کنگولمرهای مورد مطالعه، تماس‌های نقطه‌ای با مقدار متوسط 72/43 درصد بیشترین نوع تماس، تماس‌های طولی با

جدول 2. ویژگی‌های بافتی کنگلومراهای مورد مطالعه

شماره نمونه	Mgs (mm)	شکل دانه‌ها (%)		نوع تماس بین دانه‌ها (%)				ماهیت تماس بین دانه‌ها (%)					آرایش دانه‌ها (%)	
		Ang	Rou	Lo	Cc	Su	Ta	GG	GC	GM	VC	MV	Pd	Pp
Tc ₁	2	21/6	78/3	19/5	5	4	71	7/62	13/14	47/61	5/53	7/73	41/5	7/7
Tc ₂	4	22/2	77/8	5/9	2/7	1/8	89/5	5/82	29/61	63/40	9/97	12/65	20	6/57
Tc ₃	7	23/8	76/2	8/2	7/2	1	86/5	3/00	58/95	54/98	22/46	18/40	46	12/4
Tc ₄	6	14/5	85/4	17	15/4	1/25	66/25	1/60	49/77	60/15	13/70	6/87	45/5	9/5
Tc ₅	7	6/3	93/6	22/1	19/3	2/14	56/42	7/43	26/97	22/84	9/57	9/16	48/6	16/3
Tc ₆	10	7/7	92/3	25/5	2	2/5	70	8/23	19/00	32/80	11/64	5/80	57/5	16/5
Tc ₇	12	5/4	94/6	10	6/6	8/3	75	11/12	12/79	41/77	7/12	10/16	43/6	7/8
Tc ₈	3	12/5	87/5	16/6	16	1/38	64/78	10/44	35/20	5/36	12/00	4/45	41/5	4/2
Min	2	5/4	76/2	5/9	2	1	56/42	1/60	12/80	5/36	5/53	4/45	20/5	4/2
Max	12	23/8	94/6	25/5	19/3	8/3	89/5	11/10	58/90	63/4	22/4	18/40	57/5	16/5
Ave	6/37	14/3	85/6	15/6	9/27	2/7	72/43	6/78	31/70	38/90	12/00	10/13	42/2	10/35

Mgs: میانگین اندازه دانه‌ها، Ang: زاویه دار، Rou: گرد شده، Lo: طولی، Cc: محدب - مقعر، Ta: نقطه‌ای، GG: دانه به دانه، GC: دانه به سیمان، GM: دانه به مگر، MV: حفره به سیمان، VC: حفره به حفره، Pd: آرایش چگالی، Pp: آرایش هم‌جوار

شده $I_{s(50)}$ از 5/75 MPa تا 3/96 تغییر می‌کند که مقدار میانگین آن 4/82 MPa می‌باشد. بر پایه مقادیر مدول یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری، کنگلومراهای مورد مطالعه در حالت خشک دارای مقاومت فشاری تک‌محوری کم تا متوسط و نسبت مدولی متوسط هستند که در رده‌بندی Deere and Miller (1966) در رده DM تا CM قرار می‌گیرند. با توجه به شاخص بار نقطه‌ای خشک و رده‌بندی (Deere (1968)، کنگلومراهای منطقه در رده مقاومتی متوسط تا بالا قرار می‌گیرند.

3-4. ویژگی‌های مهندسی

همانطوری که در جدول 3 نشان داده شده است، دامنه تغییرات چگالی خشک نمونه‌ها 2/53 - 2/60 و چگالی اشباع 2/57 - 2/64 گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. مقادیر تخلخل موثر از 2/43 - 3/87 درصد متغیر است. مقادیر اندازه‌گیری شده UCS از 68/13 MPa تا 37/48 تغییر می‌کند و مقدار میانگین آن 50/24 مگاپاسکال می‌باشد. در حالی که مقادیر اندازه‌گیری شده E از 27 تا 10 GPa تغییر می‌کند و مقدار میانگین آن 15/11 GPa می‌باشد. همچنین مقادیر اندازه‌گیری

جدول 3. ویژگی‌های مهندسی کنگلومراهای مورد مطالعه

شماره نمونه	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n (%)	$I_{s(50)}$ (MPa)	UCS (MPa)	E_t (GPa)
Tc ₁	25/30	25/50	2/45	3/96	46/20	16/66
Tc ₂	25/20	25/50	2/89	5/75	48/08	16/95
Tc ₃	25/50	25/90	3/87	5/16	58/21	14/4
Tc ₄	25/40	25/70	2/51	4/91	68/13	27
Tc ₅	24/91	25/30	3/32	4/03	44/31	12/6
Tc ₆	24/81	25/21	3/54	4/85	46/83	10
Tc ₇	24/91	25/21	3/28	5/05	37/48	9/69
Tc ₈	25/30	25/60	2/43	4/85	52/73	14
Min	24/81	25/21	2/43	3/96	37/48	10
Max	25/50	25/90	3/87	5/75	68/13	27
Ave	25/11	25/40	3	4/82	50/24	15/11

5. تحلیل آماری داده‌ها

برای درک رابطه میان ویژگی‌های بافتی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، همبستگی خطی میان آنها و روش رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. همچنین رگرسیون خطی چندمتغیره گام به گام برای کاهش تعداد متغیرهای ورودی در روابط رگرسیون چندمتغیره، بدون کاهش قابلیت پیش‌بینی، به کار برده شده است.

5-1. رگرسیون خطی و تجزیه تحلیل همبستگی

در این پژوهش تعداد 18 متغیر بافتی به‌طور جداگانه برای ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده قرار

گرفته است که نتایج آن در جدول 4 ارائه شده است. برخی از پارامترها همبستگی آشکاری را با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشان می‌دهند. چگالی خشک با فراوانی دانه‌های گرد شده به دلیل کاهش تخلخل با افزایش گرد شدگی دارای ارتباط وارون ($r = -0/52$)، و با فراوانی دانه‌های زاویه‌دار به دلیل افزایش تخلخل با زاویه‌دار بودن دانه‌ها دارای ارتباط مستقیم ($r = 0/55$) می‌باشد. همچنین چگالی خشک همبستگی معنادار و مستقیمی با آرایش هم‌جوار ($r = 0/80$) دارد.

جدول 4. همبستگی خطی میان ویژگی‌های بافتی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کنگلومراها

ویژگی‌های سنگ‌شناسی	ویژگی‌های فیزیکی			ویژگی‌های مکانیکی		
	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n (%)	$I_s(50)$ (MPa)	UCS (MPa)	E_t (GPa)
میانگین اندازه دانه‌ها (mm)	-0/05	-0/10	0/42	0/43	-0/52	-0/18
گرد شده	-0/52	-0/68	0/52	-0/57	-0/39	-0/52
زاویه‌دار	0/55	0/64	-0/22	0/17	0/18	0/47
دانه به دانه	0/07	0/21	0/08	0/14	0/28	0/00
دانه به سیمان	-0/06	-0/44	-0/02	0/04	0/09	0/12
دانه به ماتریکس	0/06	0/04	0/02	0/00	0/24	-0/02
حفره به سیمان	0/04	0/05	-0/09	0/03	0/02	0/01
ماتریکس به حفره	-0/00	-0/15	0/05	0/06	0/14	-0/09
طولی	-0/27	-0/23	0/03	0/08	-0/08	-0/17
محدب - مقعر	0/27	0/24	-0/22	-0/12	0/06	0/03
مضرس	-0/08	-0/07	0/14	-0/09	-0/08	0/26
نقطه‌ای	0/12	0/12	0/11	0/08	0/09	0/09
آرایش چگالی	0/67	0/61	-0/59	0/61	0/53	0/68
آرایش هم‌جوار	0/80	0/77	-0/73	0/69	0/57	0/74
خرده‌سنگ	-0/17	-0/04	0/17	0/13	-0/09	0/01
سیمان	0/49	0/02	-0/24	0/43	0/36	0/39
ماتریکس	-0/14	0/00	-0/21	-0/09	0/06	0/11
حفره	0/16	0/01	0/78	-0/17	-0/13	0/07

آرایش چگالی ($r = -0/59$) و آرایش هم‌جوار ($r = -0/73$) نشان می‌دهد که هرچه دانه‌ها به هم نزدیک‌تر باشند، مقدار تخلخل کمتر می‌شود. ویژگی‌های بافتی که با مقاومت فشاری تک‌محوری همبستگی معناداری نشان می‌دهند شامل آرایش

بطور کلی آرایش هم‌جوار و آرایش چگالی، همبستگی معناداری با وزن واحد حجم با درجه اطمینان 95% نشان می‌دهند، لذا می‌توان از متغیرهای یاد شده برای برآورد وزن واحد حجم استفاده نمود. همبستگی معکوس میان تخلخل و

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (3)$$

در روابط فوق X_i : مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، X : متوسط مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Y_i : مقادیر واقعی، Y_i : مقادیر واقعی و n : تعداد مشاهدات می‌باشد. برای ارزیابی سطح اطمینان، تجزیه و تحلیل‌های رگرسیون چندمتغیره، آزمون t با درجه اطمینان 95% نیز انجام شده است. رابطه آزمون t عبارت است از نسبت اختلاف میان دو مقدار متوسط یا میانگین به تنوع و پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده (Sharma et al., 2001). آزمون t با استفاده از رابطه 4 محاسبه می‌گردد:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\left(\frac{s_p^2}{n_1} + \frac{s_p^2}{n_2} \right)}} \rightarrow s_p^2 = \frac{SS_1 + SS_2}{df_1 + df_2} \quad (4)$$

در رابطه 4، M_1 و M_2 مقادیر متوسط گروه‌های 1 و 2 می‌باشند، s_p^2 واریانس مشترک، SS_1 و SS_2 مجموع مربعات برای هر گروه، n_1 و n_2 تعداد محاسبات هر گروه و df_1 و df_2 درجه آزادی هر گروه می‌باشند ($df_1 = n_1 - 1$, $df_2 = n_2 - 1$). اگر مقدار متوسط گروه 1 بزرگتر از مقدار متوسط گروه 2 باشد، مقدار t مثبت و اگر مقدار متوسط گروه 1 کوچکتر از مقدار متوسط گروه 2 باشد، مقدار t منفی می‌باشد. اگر مقدار t محاسبه شده بیشتر از مقدار پارامتر باشد درجه اطمینان کمتر از 0/05 می‌باشد که در این حالت متغیر به صورت قابل ملاحظه‌ای در موفقیت مدل در پیش‌بینی، موثر است. نتایج رگرسیون چندمتغیره گام به گام و مقدار t محاسبه شده برای هر مشخصه در جدول‌های 5 و 6 ارائه شده است. ضرایب همبستگی رگرسیون چندمتغیره گام به گام برای پارامترهای تخلخل، مدول الاستیسیته و چگالی خشک در مقایسه با دیگر پارامترها بالاتر می‌باشد. چگالی اشباع، شاخص مقاومت بارنقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری، ضریب همبستگی متوسطی را نشان می‌دهند. بنابراین، زمانی که متغیرهای بافتی به صورت چندگانه در نظر گرفته شدند، مشاهده گردید که مدول الاستیسیته، تخلخل و چگالی خشک در مقایسه با دیگر

هم‌جوار ($r = 0/55$) و آرایش چگالی ($r = 0/52$) می‌باشد. زیرا با افزایش آرایش چگالی و آرایش هم‌جوار، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد (Bell, 1978a). میانگین اندازه دانه‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری رابطه معکوسی ($r = -0/52$) را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری با کاهش اندازه دانه‌هاست. ویژگی‌های بافتی که بیشترین تاثیر را بر روی مدول الاستیسیته دارند عبارتند از آرایش هم‌جوار ($r = 0/74$)، آرایش چگالی ($r = 0/68$)، گردش‌دگی دانه‌ها ($r = -0/52$)، زاویه‌دار بودن دانه‌ها ($r = 0/47$) و درصد سیمان ($r = 0/39$). همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش دو پارامتر نخست، مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد و با توجه به این که گردش‌دگی موجب درهم فشردن بیشتر دانه‌ها و تراکم (افزایش کرنش) می‌گردد، از این‌رو رابطه معکوس با مدول الاستیسیته دارد.

2-5. رگرسیون چندمتغیره خطی به روش گام به گام با توجه به اینکه روش رگرسیون تک‌متغیره ارتباط بین ویژگی‌های سنگ‌شناسی و ویژگی‌های مهندسی را به روشنی نشان نمی‌دهد، متغیرهای مهم و معنادار روابط خطی، به‌منظور درک ارتباط متغیرهای بافتی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، مورد بررسی قرار گرفتند تا این ارتباط به‌وسیله متغیرهای چندگانه به روشنی نشان داده شود. اجرای روش گام به گام در این مطالعه بسط داده شده است. در این مطالعه، همچنین ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، با استفاده از روابط 1، 2 و 3 برای کنترل قابلیت پیش‌بینی مدل‌های پیشنهادی محاسبه شده‌اند.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این سه متغیر پیش‌بینی کننده‌های مناسبی برای Is_{50} می‌باشند. در حالی که دو متغیر آرایش هم‌جوار و آرایش چگالی Is_{50} را با $R=0/78$ پیش‌بینی کرده‌اند، لذا کاهش از سه متغیر به دو متغیر، موجب کاهش ناچیزی در توانایی پیش‌بینی می‌گردد. برای ویژگی‌های دیگر نیز ارزیابی مشابهی وجود دارد (جدول 5). شاخص‌های ارزیابی عملکرد آماری روش رگرسیون چندمتغیره خطی برای ویژگی‌های مهندسی در جدول‌های 5 و 6 ارائه شده است.

پارامترها به شکل مناسب‌تری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در مورد مدول الاستیسیته همان‌طور که جدول 5 نشان می‌دهد، دو متغیر در گام اول Et را با ضریب همبستگی $R=0/86$ ، پیش‌بینی می‌نمایند. برای چگالی اشباع، افزایش تعداد دو متغیر ورودی به پنج متغیر، تنها در حدود $0/01$ در ضریب همبستگی، افزایش نشان می‌دهد. وقتی که Is_{50} با سه متغیر آرایش هم‌جوار، آرایش چگالی و گردشگی دانه‌ها، رگرسیون گرفته می‌شود، ضریب همبستگی آن $R=0/79$ می‌باشد،

جدول 5. شاخص‌های ارزیابی عملکرد آماری روش رگرسیون چندمتغیره خطی گام به گام در پیش‌بینی ویژگی‌های مهندسی

γ_d (kN/m ³)				γ_{sat} (kN/m ³)			
متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE	متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE
(i)= Pp, Pd	0/81	0/017	0/012	(i)= Pp, Round	0/74	0/014	0/011
(ii)= Pp, Pd, Angular	0/82	0/019	0/013	(ii)= Pp, Round, Angular	0/74	0/011	0/007
(iii)= Pp, Pd, Angular, Round	0/84	0/021	0/011	(iii)= Pp, Round, Angular, Pd	0/75	0/006	0/003
(iv)= Pp, Pd, Angular, Round, Cem	0/84	0/016	0/088	(iv)= Pp, Round, Angular, Pd, G-C	0/75	0/005	0/002

n(%)				$Is_{(50)}$ (MPa)			
متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE	متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE
(i)= Pp, Pd	0/82	0/321	0/211	(i)= Pp, pd	0/78	0/448	0/330
(ii)= Pp, Pd, VOi, ,	0/82	0/214	0/100	(ii)= Pp, pd, Round	0/79	0/494	0/275
(iii)= Pp, Pd, VOi, Round	0/83	0/199	0/086	(iii)= Pp, pd, Round, Mz	0/79	0/509	0/257
(iv)= Pp, Pd, VOi, Round, Mz,	0/85	0/241	0/090	(iv) = Pp, pd, Round, Mz, Cem	0/79	0/611	0/238

UCS (MPa)				Et (GPa)			
متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE	متغیرهای ورودی	R	RMSE	MAE
(i)= Pp, Pd	0/76	7/47	4/416	(i)= Pp, Pd	0/86	5/81	3/308
(ii)= Pp, Pd, Mz	0/77	7/85	4/528	(ii)= Pp, Pd, Round	0/87	5/25	3
(iii)= Pp, Pd, Mz, Round	0/77	8/65	4/225	(iii)= Pp, Pd, Round, Angular	0/88	4/65	2/233
(iv) = Pp, Pd, Mz, Round, Cem	0/78	9/68	4/416	(iv)= Pp, Pd, Round, Angular, Cem	0/88	1	0/278

Pp: آرایش هم‌جوار، Pd: آرایش چگالی، Angular: درصد زاویه‌دار بودن، Round: درصد گردشگی، Cem: درصد سیمان، VOi: درصد حفره، Mz: متوسط اندازه دانه‌ها، G-C: ماهیت تماس دانه به سیمان.

می‌تواند برآورد قابل پذیرشی را از مدول الاستیسیته ارائه دهد. نتایج آزمون t ، پیش‌بینی کننده متوسطی ($t = 2/20$) را برای مقاومت فشاری تک‌محوری با ضریب همبستگی ($R = 0/76$) نشان می‌دهد که خیلی قابل توجه نمی‌باشد. تخلخل دارای یک پیش‌بینی کننده مهم با ($t = 5/54$) می‌باشد که ضریب همبستگی قابل توجهی ($R = 0/82$) را ارائه می‌نماید.

نتایج آزمون t در پنج گام برای ویژگی‌های مهندسی در جدول 6 ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، مقادیر t محاسبه شده با درجه اطمینان 95% در گام اول بزرگتر از مقادیر این پارامتر در گام‌های دیگر می‌باشد. بر پایه نتایج آزمون t ، مدول الاستیسیته دارای یک پیش‌بینی کننده مناسب با ($t = 11/86$) می‌باشد که دارای ضریب همبستگی ($R = 0/86$) می‌باشد. بنابراین رابطه پیش‌بینی کننده Et ،

جدول 6. مقادیر t محاسبه شده پارامترها برای ویژگی‌های مهندسی در پنج گام

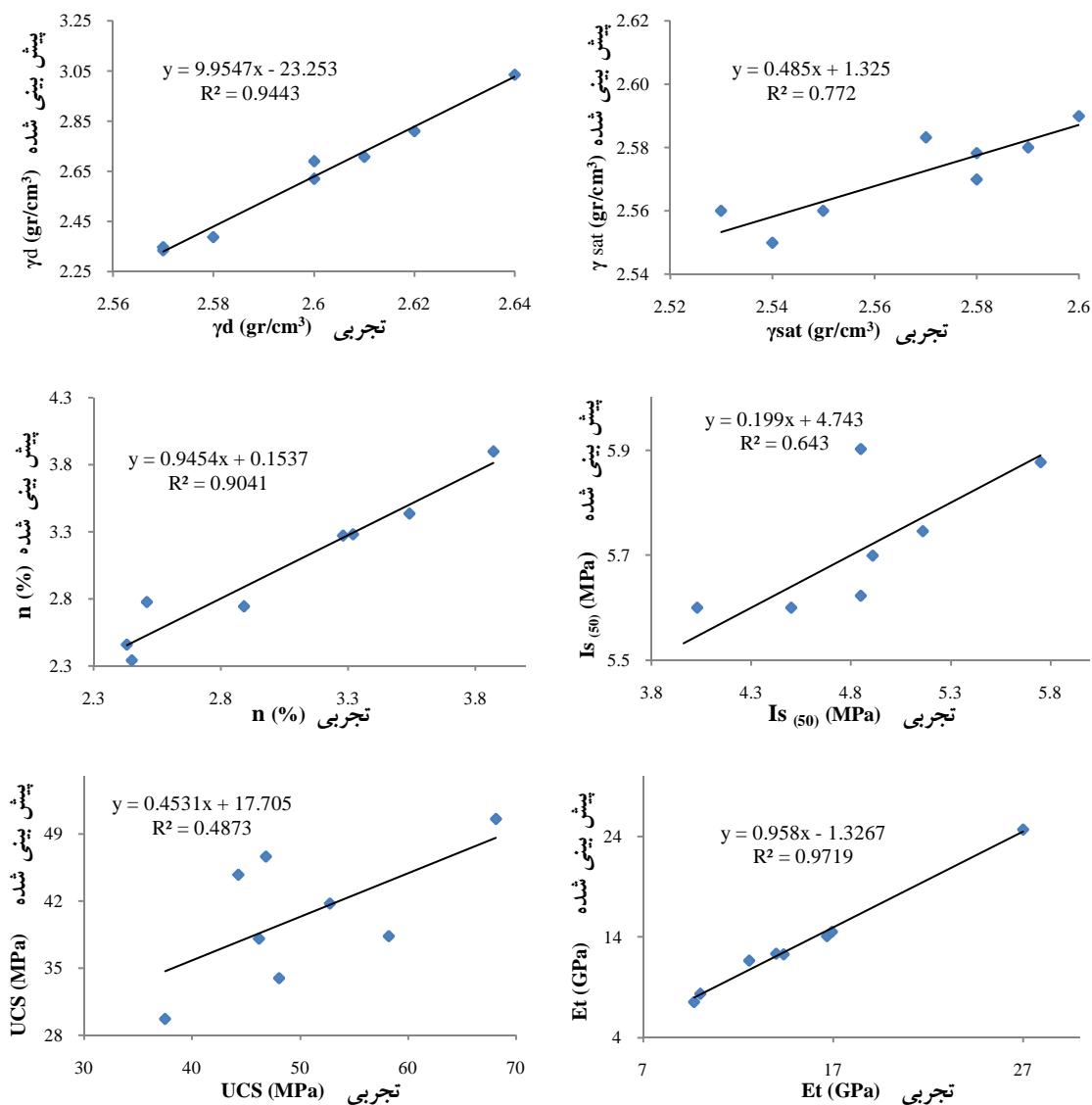
گام‌ها	ویژگی‌های مهندسی	ویژگی‌های سنگ‌شناسی								
		Constant	PP	Pd	Angular	Round	Cem	G-C	Voi	Mz
steps (i)	γ_d	-5/15	5/16	-	-	-	-	-	-	-
	γ_{sat}	2/84	9/58	-	-	-	-	-	-	-
	n	7/85	6/64	-	-	-	-	-	-	-
	$Is_{(50)}$	-4/63	5/79	-	-	-	-	-	-	-
	UCS	2/90	-5/26	-	-	-	-	-	-	-
	Et	11/33	9/58	-	-	-	-	-	-	-
steps (ii)	γ_d	-4/77	5/12	-1/54	-	-	-	-	-	-
	γ_{sat}	2/69	3/14	-	-	-2/40	-	-	-	-
	n	5/54	6/39	0/50	-	-	-	-	-	-
	$Is_{(50)}$	-3/82	5/08	-0/42	-	-	-	-	-	-
	UCS	2/20	-2/61	-1/06	-	-	-	-	-	-
	Et	11/86	8/57	-0/83	-	-	-	-	-	-
steps (iii)	γ_d	-3/59	3/96	-0/09	1/52	-	-	-	-	-
	γ_{sat}	2/64	2/39	-	2/40	0/26	-	-	-	-
	n	4/30	4/41	-1/69	-	-	-	-	0/62	-
	$Is_{(50)}$	-2/75	3/78	0/29	-	-0/66	-	-	-	-
	UCS	3/28	-3/01	-0/98	-	-	-	-	-	-0/52
	Et	9/25	5/88	0/68	-	-1/07	-	-	-	-
steps (iv)	γ_d	-1/34	3/35	-0/09	1/22	-1/51	-	-	-	-
	γ_{sat}	0/71	2/84	-1/12	1/88	0/61	-	-	-	-
	n	3/71	3/66	-2/20	-	2/09	-	-	0/25	-
	$Is_{(50)}$	-2/17	2/86	0/37	-0/69	-	-	-	-	-
	UCS	1/12	-3/42	-0/74	-	0/25	-	-	-	0/44
	Et	8/67	4/23	0/66	1/07	-0/71	-	-	-	-0/46
steps (v)	γ_d	-0/42	3/02	-0/04	1/68	0/50	1/43	-	-	-
	γ_{sat}	0/47	2/76	-1/09	1/22	0/14	-	0/89	-	-
	n	3/44	3/18	-1/82	-	0/06	-	-	0/92	1/52
	$Is_{(50)}$	-0/58	3/15	0/41	-	-0/47	1/81	-	-	0/88
	UCS	0/21	-2/25	-0/68	-	0/51	-0/46	-	-	-0/59
	Et	5/58	4/06	0/57	0/93	-1/10	0/53	-	-	-

رگرسیون چندمتغیره گام به گام و مقادیر تجربی به دست آمده در آزمون‌های آزمایشگاهی همبستگی معناداری وجود دارد (شکل 8).

بهترین روابط پیشنهاد شده توسط رگرسیون چندمتغیره خطی، برای پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در جدول 7 ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بین مقادیر پیش‌بینی شده ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی با روش

جدول 7. روابط پیشنهاد شده توسط رگرسیون چندمتغیره خطی، برای پیش بینی ویژگی های مهندسی

شماره	رابطه	R ²
1	$\gamma_d \text{ (kN/cm}^3\text{)} = -63.12 - 0.003 Pp + 1.17 Pd + 1.18 \text{ Angular} - 0.005 \text{ Round} - 0.004 \text{ Cem}$	0/94
2	$\gamma_{sat} \text{ (kN/cm}^3\text{)} = 17.53 - 0.13 Pp - 0.092 \text{ Round} - 0.138 \text{ Angular} - 0.082 Pd - 0.006 G-C$	0/77
3	$n \text{ (\%)} = -8.6 - 0.092 Pp + 0.267 Pd - 0.031 \text{ VOi} + 0.013 \text{ Round} + 0.015 Mz$	0/90
4	$I_s \text{ (MPa)} = -1.44 + 0.043 Pp + 0.069 Pd + 0.047 \text{ Round} + 0.036 Mz + 0.079 \text{ Cem}$	0/64
5	$UCS \text{ (MPa)} = 284.68 - 1.90 Pp - 1.43 Pd - 1.55 Mz - 1.89 \text{ Round} - 4 \text{ Cem}$	0/48
6	$Et \text{ (GPa)} = 63090.3 - 1928 Pp - 1925 Pd - 17.3 \text{ Round} + 1.82 \text{ Angular} + 1.49 \text{ Cem}$	0/97



شکل 8: مقایسه بین ویژگی های مهندسی پیش بینی شده توسط رگرسیون چندمتغیره گام به گام با مقادیر تجربی آنها

6. نتیجه‌گیری

دارند، بهبود یابند. مقادیر پیش‌بینی شده مدول یانگ، چگالی خشک و تخلخل اختلاف بسیار کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده آنها نشان می‌دهند، بنابراین می‌توان از روابط ارائه شده، برای برآورد این پارامترها استفاده نمود.

• استفاده از رگرسیون چندمتغیره گام به گام موجب کاهش تعداد ویژگی‌های سنگ‌شناسی از 18 متغیر به تعداد متغیر کمتری که بیشترین تأثیر را بر روی ویژگی‌های مهندسی دارند، گردیده است. آرایش هم‌جوار و آرایش چگالی پیش‌بینی کننده‌های مناسبی هستند که از آنها برای توضیح چگالی خشک، تخلخل، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته می‌توان استفاده نمود.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی کمی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی توسط متغیرهای سنگ‌شناسی، امکان‌پذیر است. این متغیرهای مستقل، صرفاً پیش‌بینی کننده‌هایی برای کنگلومراهای مورد مطالعه می‌باشند و استفاده از روابط پیش‌بینی کننده بدست آمده، برای کنگلومراهای دیگر مناطق توصیه نمی‌شود.

• در میان 18 ویژگی سنگ‌شناسی بررسی شده در این پژوهش، آرایش هم‌جوار، آرایش چگالی، گردش‌دگی دانه‌ها، زاویه‌دار بودن دانه‌ها، میانگین اندازه دانه‌ها و درصد سیمان، همبستگی قابل توجهی با ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها نشان می‌دهند.

• از ویژگی‌های کانی‌شناسی کنگلومراهای مورد مطالعه، تنها درصد سیمان با ویژگی‌های مهندسی (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت بار نقطه‌ای و مدول الاستیسیته) رابطه‌ی معناداری دارد. بین ویژگی‌های کانی‌شناسی و چگالی خشک و اشباع و تخلخل ارتباطی وجود ندارد. این تحقیق نشان می‌دهد که مشخصه‌های بافتی برای پیش‌بینی ویژگی‌های مهندسی، مهم‌تر از مشخصه‌های کانی‌شناسی می‌باشد.

• روش رگرسیون چندمتغیره گام به گام برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده چندجمله‌ای استفاده شده است تا روابط پیش‌بینی کننده با انتخاب برخی ویژگی‌های سنگ‌شناسی که همبستگی معناداری با ویژگی‌های مهندسی

منابع

- آدابی، م.ح.، 1366. سنگ‌های رسوبی شیمیایی - بیوشیمیایی. انتشارات آستان قدس رضوی، 344ص.
- آقاباتی، س.ع.، 1385. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم، 586ص.
- اهری پور، ر.، مصدق، ح.، 1385. مبانی رسوب‌شناسی. انتشارات سازمان آموزشی فرهیختگان علوی.
- بلورچی، م.ح.، 1358. نقشه زمین‌شناسی کبودرآهنگ، مقیاس 1:250000. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- پروین، ح.، 1385. سنگ‌شناسی رسوبی. انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ پنجم، 302 صفحه.
- ساداتی، س.م.، خدابخش، س.، محسنی، ح.، 1384. واحدهای سنگی الیگومیوسن در شمال زون سنندج - سیرجان: مطالعه موردی در شرق و شمال شرق همدان، مجله علوم دانشگاه بوعلی، جلد2، شماره1، ص14-22.
- Balan, B., Mohaghegh, S., Ameri, S., 1995. State- of- Art- in permeability determination from well log data: Part 1- A comparative study. Model development. SPE, 30978: 17-25.
- Bell, F.G., 1978a. The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones, Northumberland, England. Engineering Geology, 12: 1-29.
- Bell, F.G., 1978b. Petrographical factors relating to porosity and permeability in the Fell Sandstone. Quaterly Journal of Engineering Geology, 11(2): 113-126.
- Deere, D.U., 1968. Geological considerations in rock mechanics in engineering practice (eds. Stagg K.G. and Zienkiewicz, O.C.), Chapter. Practice 1-20. London: John Wiley and Sons.

- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. U.S. Air Force Systems Command, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico, Technical Report, AFWL-TR, pp. 65–116.
- Gong, Q.M., Zhao, J., 2009. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46(1): 8–18.
- Gunes Yilmaz, N., Yurdakul, M., Goktan, R.M., 2007. Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 44(6): 962–970.
- Howarth, D.F. and 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.
- Hutchinson, C.S., 1974. Laboratory handbook of petrography techniques. Wiley, New York, p 527.
- Kahn, J.S., 1956. The analysis and distribution of the properties of packing in sand size sediments. *Journal of Geology*, 64: 385–395.
- Pettijohn, F.J., 2000. Sedimentary Rocks. CBS Pup., New Delhi, 628p.
- Sarkar, K., Singh, T.N., Reddy, D.V., 2009. Prediction of strength parameters by dynamic wave. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2(1) :12–19.
- Shakoor, A., and Bonelli, R. E., 1991. Relationship between petrographic characteristics engineering index properties and mechanical properties of selected sandstone. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 28 : 55-71.
- Sharma, P.K., Khandelwal, M., Singh, T.N., 2011. A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity. *International Journal of Earth Sciences*, 100 :189–195.
- Smart, B.D., Rowlands, N. and Isaac, A.K., 1982. Progress towards establishing relationships between the mineralogy and physical properties of coal measures rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 19 : 81-89.
- Tamrakar, N.K., Yokota, S., and Shrestha, S.D., 2007. Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal Sub-Himalayas. *Engineering Geology*, 90: 105-123.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Sulukcu, S., 2001. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 :1113–1119.
- Ulusay, R., Tureli, K., and Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariable statistical techniques. *Engineering Geology*, 37 : 135-157.
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H.A., Acikalin, S., 2008. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology*, 96: 141–158.