

## برآورد مقاومت فشاری تک محوری ماسه سنگ های سازند کشف رود و شوربچه با استفاده از ویژگی های پتروگرافی و تخلخل

مرجان شاهین فر<sup>۱</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>۲\*</sup>، محمد غفوری<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۲۵

دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۲۳

### چکیده:

در این پژوهش روابط بین مقاومت فشاری تک محوری با تخلخل و خصوصیات پتروگرافی شامل نوع سیمان و مقادیر کوارتز، فلدسپات و خرده-سنگ بر روی ۲۲ نمونه از ماسه سنگ های برداشت شده از سازندهای زون کپه داغ مورد ارزیابی قرار گرفت. استفاده از روابط همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوری با خصوصیات پتروگرافی می تواند کاربردهای بسیاری در تخمین مقاومت فشاری داشته باشد. برای این منظور از ضریب همبستگی پیرسن و رگرسیون های آماری تک متغیره و چندمتغیره استفاده شده است. این نتایج نشان داد که در ماسه سنگ ها تاثیر نوع سیمان (سیلیسی یا آهکی) بر مقاومت این نوع سنگ ها بیشتر از نقش نوع کانی ها و تخلخل می باشد. براساس این نتایج رابطه ای با ضریب همبستگی بالا ( $R^2 = 0.93$ ) برای برآورد مقاومت فشاری ماسه سنگ ها بر اساس نوع سیمان پیشنهاد شده است.

**کلمات کلیدی:** مقاومت فشاری تک محوری، ماسه سنگ، تخلخل، ویژگی های پتروگرافی، رگرسیون تک متغیره، رگرسیون چند متغیره

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، [ma.shahinfar@mail.um.ac.ir](mailto:ma.shahinfar@mail.um.ac.ir)

۲. هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، [lashkaripour@um.ac.ir](mailto:lashkaripour@um.ac.ir)

۳. هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، [ghafoori@um.ac.ir](mailto:ghafoori@um.ac.ir)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی برای ارزیابی مقاومت سنگ است و اصلی‌ترین پارامتر ژئومکانیکی در مسائل ژئوتکنیکی، مهندسی معدن و مخازن نفتی به شمار می‌رود (مهرابی مزیدی و همکاران، ۱۳۹۰). مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها در طراحی پروژه‌های مهندسی و طبقه‌بندی مهندسی آن‌ها کاربرد نسبتاً وسیعی دارد. بنابراین برآورد مقاومت سنگ‌ها براساس سایر آزمون‌های آزمایشگاهی ساده‌تر، از جمله تلاش‌هایی است که در چند دهه اخیر مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است (Tsiambaos and Sabatakakis, 2004). ایجاد همبستگی یک راه غیرمستقیم، اما بسیار مناسب برای تخمین خواص مکانیکی ارائه می‌دهد و در برخی موارد استفاده از آن نیاز به آزمایش‌های بیشتر را کم می‌کند (Lashkaripour, 2002). اگر قطعات استخراج شده از گمانه، قطعات سنگی نامنظم باشند، می‌توان از طریق همبستگی، مقاومت فشاری تک‌محوری را پیدا کرد (Wong et al., 2017). پژوهشگران بسیاری بر روی برآورد مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری تحقیقات انجام داده و روابطی ارائه داده‌اند (جدول ۱). تعدادی از محققان رابطه همبستگی معنی‌داری بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد سیمان ماسه‌سنگ‌ها (Fahy and Guccione, 1979, Shakoor and Bonelli, 1991, Ulusay et al., 1994, Zorlu et al., 2008) و ارتباط بین خواص مکانیکی و تخلخل در ماسه‌سنگ‌ها (Weng and Li, 2012) معرفی کرده‌اند. خانلری و همکاران (۱۳۹۳) پس از بررسی ۸ نمونه از کنگلومراهای سازند قم برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از خواص سنگ شناسی دریافتند که تنها درصد سیمان با ویژگی‌های مهندسی رابطه معنی‌داری دارد و بین ویژگی‌های کانی‌شناسی، چگالی خشک و اشباع و تخلخل ارتباطی وجود ندارد. در نتیجه مشخصه‌های بافتی برای پیش‌بینی ویژگی‌های مهندسی، مهم‌تر از مشخصه‌های کانی‌شناسی می‌باشد. در این بررسی پس انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، تخلخل و تحلیل خصوصیات پتروگرافی بر روی ۲۲ نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از

سازندهای زون کپه‌داغ انجام گردید. سپس روابط همبستگی بین پارامترهای ذکر شده ایجاد و در نهایت رابطه‌ای جهت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری ارائه گردیده است.

## ۲. موقعیت زمین‌شناسی و نمونه برداری

پهنه رسوبی ساختاری کپه‌داغ شامل ارتفاعات هزار مسجد در شمال شرقی ایران است که در راستای NW-SE از شرق دریای خزر آغاز و پس از عبور از ترکمنستان و ایران وارد خاک افغانستان می‌شود و به‌عنوان یک منبع گازی بزرگ بین سه کشور ایران، ترکمنستان و افغانستان مشترک است (نبوی، ۱۳۵۵). سازندهای کشف‌رود و شوربچه سازندهای ماسه‌سنگی در زون کپه‌داغ می‌باشند و به ترتیب سنگ منشا و سنگ مخزن میدان گازی خانگیران به حساب می‌آیند. علاوه بر این به دلیل گسترش این سازندها امکان اجرای پروژه‌های مهندسی از قبیل سد، تونل، جاده و... بر روی ماسه‌سنگ‌های کشف‌رود و شوربچه وجود دارد. بنابراین بررسی این سازندها از نظر اقتصادی مورد توجه است. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

## ۱-۳. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

جهت انجام این پژوهش ۲۲ بلوک ماسه‌سنگی از سازندهای کشف‌رود و شوربچه زون کپه‌داغ برداشت شد (شکل ۱). مقاطع نازک جهت تعیین خصوصیات سنگ‌شناسی تهیه گردید. سپس در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد از بلوک‌های سنگی به‌منظور تهیه مغزه‌های استوانه‌ای NX (قطر ۵۴ میلی‌متر) مغزه‌گیری بعمل آمد. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D2938 بر روی مغزه‌های با نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/۵ انجام گرفت. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و تخلخل بدست آمده در جدول (۳) و رده‌بندی مقاومت تراکمی تک‌محوری بر اساس طبقه‌بندی (Deere and Miller, 1966) در جدول (۲) ارائه شده است.

۳-۲. تعیین تخلخل نمونه ها

دقیق تر تخلخل مورد استفاده قرار گیرد. جهت تعیین تخلخل نمونه ها از روش اشباع و غوطه ور سازی با استاندارد ISRM استفاده شد (Ulusay, 2014).

روش های میکروسکوپی که برای برآورد حجم منافذ سنگ استفاده می شوند نمی توانند مقدار دقیقی برای تخلخل سنگ ارائه دهند. بنابراین باید روش های آزمایشگاهی برای تعیین

جدول ۱. تعدادی از روابط ارائه شده جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوری

Source	Equation	Lithology	Number
Atapour and Mortazavi, 2018	$UCS=f(cc/n \times D50)$	Sandstone	1
Manouchehrian et al., 2012	$UCS=38-352.26n-5.3Cfc+10.67Cf+93.15M$	Sandstone	2
Taba, 1392	$UCS= -390.40+4.033Pd+0.98Cement+1.45 Angular + 0.22 Pp$	Sandstone	3
Zorlu et al., 2008	$UCS=0.476(PDn)- 0.017(CCN)-0.049(Qn)+0.065$	Sandstone	4
Zorlu et al., 2004	$UCS=18.15(Q)^{0.3729} (r=0.52)$	Sandstone	5
Lashkaripour., 2002	$UCS=210.128n^{-0.821}$	Mud Rock	6
Gokceoglu., 2002	$UCS=1976.2-19.5PA-19.1BA-19.8T(r=0.87)$	Volcanic rock	7
Bashir gonbadi, 1388	$UCS=29.76(Q \%) +18.8658 (R.F \%)$	Sandstone	8
Walderhaug et al., 2000	$IGV= IGV_{min}+(\alpha_0+IM-IGV_{min}) e^{-\beta \square}$	Sandstone	9

Cc: Percentage of cementation, D50: Average particle size, n: Porosity, CF: Hematity cement percentage, CFC: Calcite Cement percentage, M: Mica percentage, Pd: Density arrangement, Pp: adjacent arrangement, PDn: Density arrangement, CCn: Convex Conjugate Contact Particles, Qn: Percentage of contact of quartz particles, Q: Percentage of contact of quartz particles, BA: Percentage of quartz particles, PA: Pink andesite percentage, T: Black Andesite, RF: Tuff Percentage, IM: Percentage of Rockfragment, IGV: Matrix percentage,  $\alpha_0$ : Available porosity of cement, QFR: Quartz and feldspar percentage

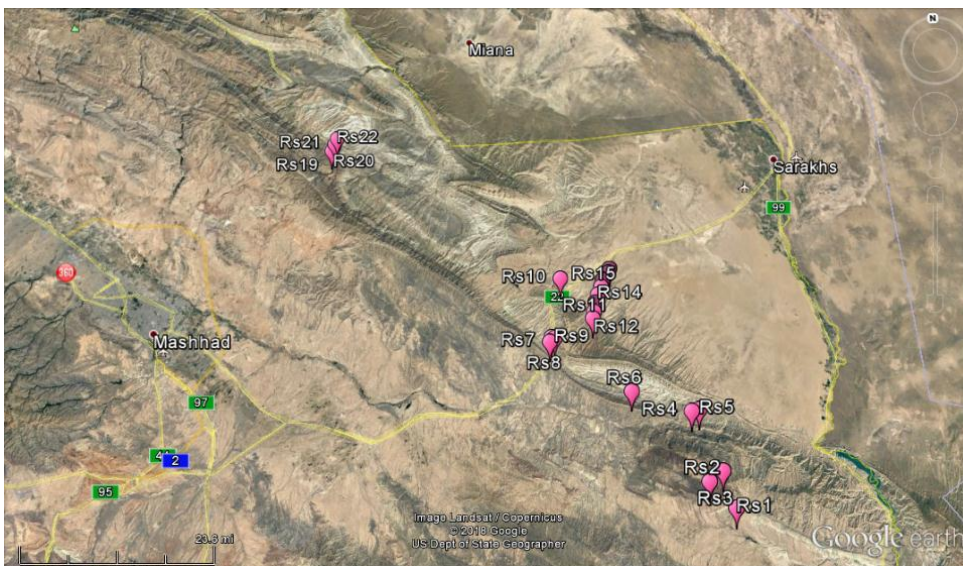
جدول ۲. رده بندی مقاومت فشاری تک محوری سازند شورجه و کشف رود.

Descriptions	Rock category (ISRM, 1979)	(Mpa)UCS	Number	Number of formation
Very low	D	14.140	minimum	Shurijeh Formation
Very high	A	205.550	maximum	
high	B	88.580	Average	
high	B	83.910	minimum	Kashafrud Formation
high	B	163.050	maximum	
high	B	98.310	Average	

۳-۳. مطالعه خصوصیات پتروگرافی نمونه ها

پیشنهاد شده توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) استفاده شده است. در ادامه به شرح آزمایش های انجام شده پرداخته می شود.

تعیین خواص مهندسی سنگ ها، مهم ترین بخش در هر پروژه زمین شناسی مهندسی می باشد. در این پژوهش، جهت اندازه گیری خواص فیزیکی و مکانیکی از روش استاندارد



شکل ۱. محل برداشت نمونه‌ها. مختصات محل برداشت نمونه‌های مورد مطالعه از جاده مشهد - سرخس و نمونه‌های برداشت شده از صالح‌آباد در زون کیه‌داغ

جدول ۳. مقادیر تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مورد مطالعه

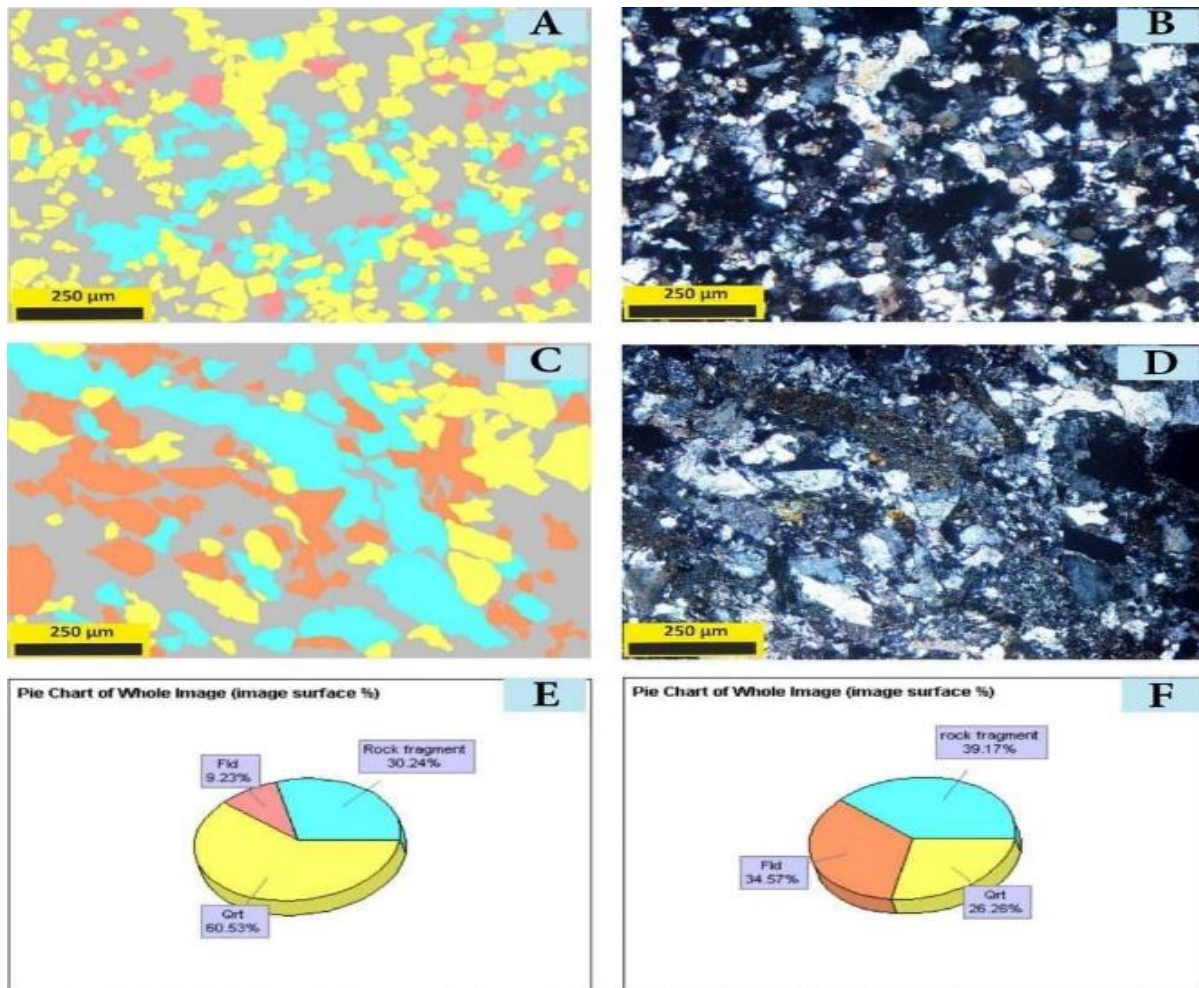
UCS (MPa)	Porosity (%)	Number
106.043	2.4	RS1
73.019	11.8	RS2
83.911	6.6	RS3
90.442	2.6	RS4
164.056	2.7	RS5
78.304	6.3	RS6
92.435	4.2	RS7
148.546	3.3	RS8
92.720	2.3	RS9
205.558	4.0	RS10
132.193	2.3	RS11
87.765	3.0	RS12
159.514	2.0	RS13
151.231	3.4	RS14
53.971	7.7	RS15
44.548	8.8	RS16
14.130	11.3	RS17
50.973	8.6	RS18
62.966	2.2	RS19
18.419	17.0	RS20
47.546	4.5	RS21
58.683	7.5	RS22

اندازه‌گیری اجزای تصویر با دقت بالا کاربرد دارد. پس از تعیین مرز دانه‌ها به صورت دستی، دانه‌ها به صورت پلی‌گون-هایی با رنگ‌های از پیش تعریف شده برای نرم‌افزار از

تصاویر به دست آمده حاصل از عکس‌برداری مقاطع میکروسکوپی جهت تجزیه و تحلیل وارد محیط نرم‌افزار J Micro Vision گردید. این نرم‌افزار جهت آنالیز تصاویر و

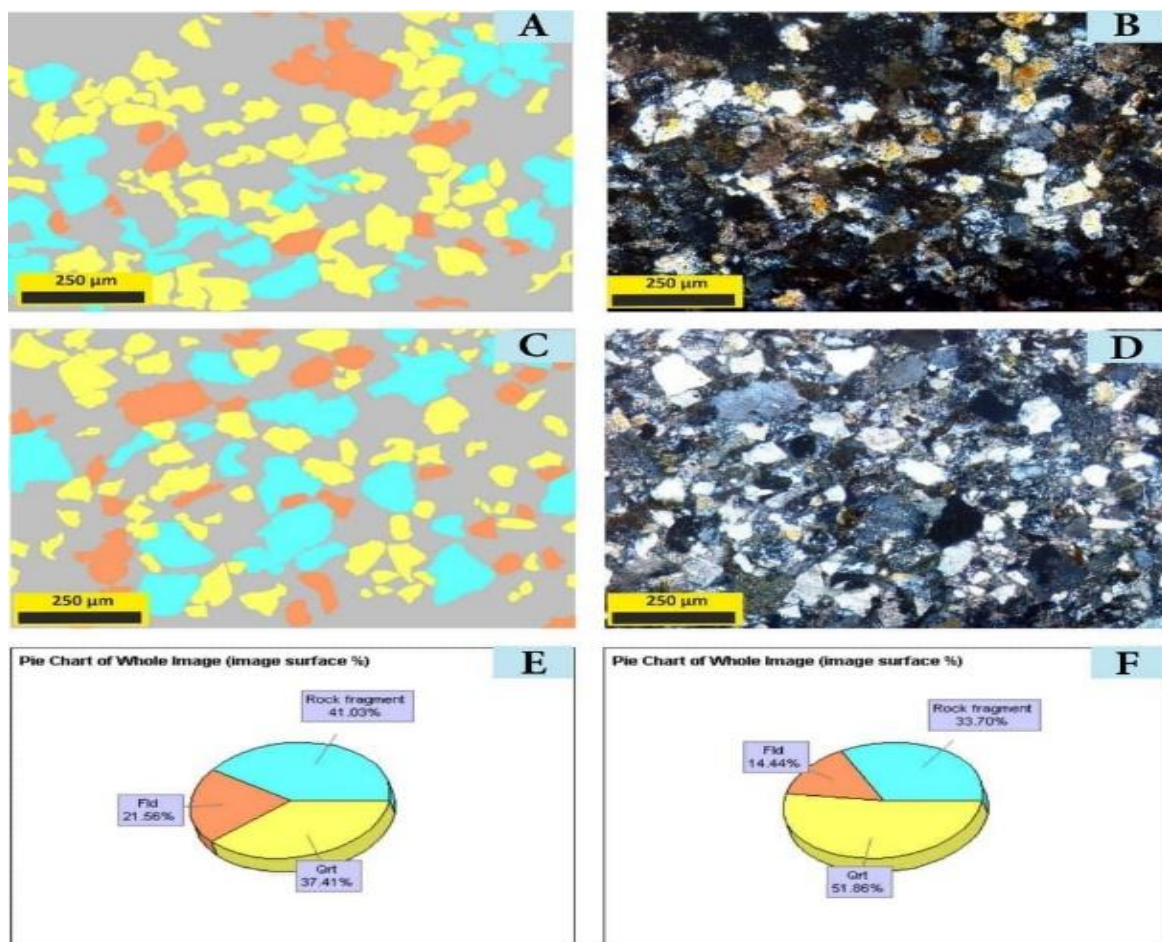
که ماسه سنگ های سازند کشف رود بر اساس طبقه بندی فولک (Folk, 1980) لیت آرنایت (Litharenite)، ساب لیت آرنایت (Sublitharenite) و فلدسپاتیک لیت آرنایت (Feldspathic Litharenite) و ماسه سنگ های سازند شوربچه لیت آرنایت، ساب لیت آرنایت و لیتیک آركوز هستند (شکل ۴). در سازندهای ذکر شده سیمان آهکی و سیلیسی مشاهده می شود. خرده سنگ چرتی و دگرگونی در مقاطع مشاهده شد. تماس بین دانه ها از نوع طولی، نقطه ای، محدب-مقعر و مقدار کمی مضرسی است

یکدیگر مجزا می شوند و نتایج بر روی Pie Chart نمایش داده می شوند (شکل ۲ و ۳). سپس با استفاده از نرم افزار Triplot درصد کانی های تشکیل دهنده در هر مقطع بر روی این نمودار پلات شده و در نهایت نام گذاری ماسه سنگ ها از نظر ترکیبی و پنج گانه بر اساس طبقه بندی فولک (Folk, 1980) انجام و بر روی دیاگرام قرار گرفت (شکل ۴). یکی از مزیت های نرم افزار J Micro Vision آن است که تمامی داده های حاصل از آن قابل انتقال به نرم افزارهای آماری می باشند. در نتیجه می توان به تجزیه و تحلیل دقیق آماری ویژگی های حاصل از این نرم افزار پرداخت. بررسی مقاطع نازک نشان داد



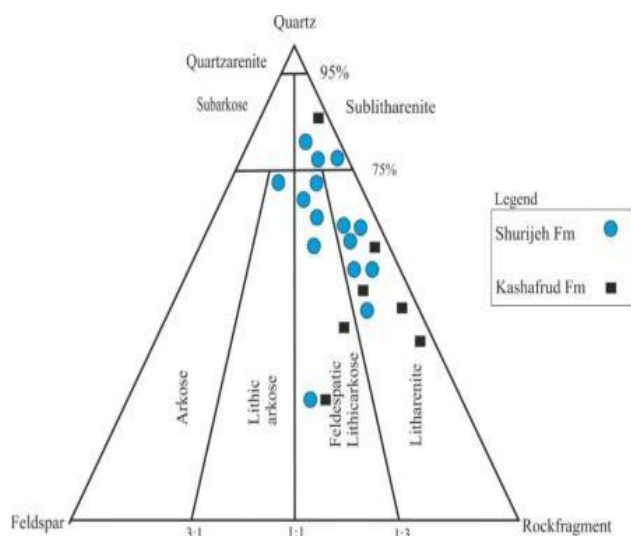
شکل ۲. مقاطع نازک میکروسکوپی ماسه سنگ های سازند کشف رود، (B و D) عکس دو نمونه از مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سازند کشف رود. (A و C) تعیین مرز دانه ها و تشکیل پلی گون در مقاطع میکروسکوپی. (E و F) نمایش نتایج تحلیل مقاطع در نرم افزار J

Pie Chart بصورت نمودار



شکل ۳. مقاطع نازک میکروسکوپی ماسه سنگ‌های سازند شورجه، B و D) عکس دو نمونه از مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سازند شورجه. A و C) تعیین مرز دانه‌ها و تشکیل پلی گون در مقاطع میکروسکوپی. E و F) نمایش نتایج تحلیل مقاطع در نرم افزار J Micro

View به صورت نمودار Pie Chart



شکل ۴. دیاگرام نام گذاری ماسه سنگ‌های سازند کشف رود و شورجه بر اساس طبقه بندی فولک (Folk, 1980) در این پژوهش

## ۳-۳-۱. بررسی آماری

ثابت ۱ را نشان می دهد زیرا رابطه ی هر متغیر با خودش را بیان می کند. برای بررسی رابطه ی متغیرهایی که ضریب همبستگی آن ها نزدیک به ۱ است باید مدل خطی را پیشنهاد داده و تا حد امکان آن را بهبود بخشیم (با افزایش یا کاهش اعداد ثابتی به متغیرها) و برای مدل کردن متغیرهایی که این ضرایب به صفر نزدیک است باید مدلی غیرخطی را به گونه ای پیدا کرد که مقادیر  $P$  (P Value) مینیمم شود. کوچک بودن این آماره (statistic) به تنهایی نمی تواند موید یافتن مدل مناسب باشد زیرا در مدل های بدیهی این آماره همواره روی صفر ثابت می شود (Casella and Berger, 2002).

جدول مقایسه ضرایب همبستگی که در (جدول ۴) مشاهده می شود، معیار خوبی برای بررسی رابطه ی خطی بین انواع متغیرهاست. ضریب همبستگی فارغ از علامت هرچه به ۱ نزدیک تر باشد نشانه ی همبستگی خطی بیشتر و هرچه به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده عدم همبستگی خطی است. ضرایب مثبت بین دو متغیر نشان دهنده آن است که با افزایش مقدار هریک از متغیرها بر مقدار متغیر متناظر هم افزوده می شود و ضرایب منفی بین دو متغیر نشان دهنده آن است که با کاهش مقدار هریک از متغیرها بر مقدار متناظر هم افزوده می شود. بدیهی است که در این جدول قطر اصلی همواره عدد

جدول ۴. بررسی میزان رابطه خطی بین متغیرها تا ۳ رقم اعشار جهت مدل بندی آن ها توسط نرم افزار

Rock fragment	Feldspar	Quartz	Porosity	Silica cement	Calcite cement	UCS	ariables
1.000	-0.305	-0.619	-0.134	0.279	-0.570	-0.173	Rock fragment
-0.305	1.000	-0.566	-0.018	-0.149	0.380	0.152	Feldspar
-0.619	-0.566	1.000	0.124	-0.116	0.192	0.263	Quartz
-0.134	-0.018	0.124	1.000	-0.288	0.163	-0.438	Porosity
0.279	-0.149	-0.116	-0.288	1.000	-0.496	-0.294	Silica cement
-0.570	0.380	0.192	0.163	-0.496	1.000	0.294	Calcite cement

## ۳-۳-۲. مقاومت فشاری تک محوری

رابطه خطی معناداری بین پارامترهای ذکر شده با مقاومت فشاری تک محوری یافت نشد و باید از تبدیلاتی جایگزین برای مدل بندی این متغیرها به شرح زیر استفاده شود.

## ۴-۱. آنالیز رگرسیون چند متغیره

اگر فرض شود که بخواهیم رابطه ی بین  $n$  متغیر مستقل را بر روی یک متغیر پاسخ بررسی کنیم. تعداد حالات مختلفی که می شود برای هر کدام از انواع مدل های ریاضی استفاده کرد  $2n$  مورد است. رایج ترین این مدل سازی ها رگرسیون خطی است که رابطه ی خطی بین پارامترهای منسوب به متغیرهای مستقل را بررسی می کند. بسته به تعداد متغیرهای مستقل که وارد مدل می شوند، رگرسیون نیز با همان تعداد متغیر نامیده میشود. رگرسیون چند متغیره تمام حالت های قبلی را شامل

مثال خوبی از این مدل ها زوج های (۶ و ۳)، (۴ و ۲)، (۱ و ۲) می باشند. بنابراین هر چند که این آماره برای مدل  $y=0.5x$  دقیقاً صفر می باشد ولی کار محقق در پیدا کردن این مدل فاقد ارزش به نظر می رسد. در جدول های ۵، ۶ و ۷ انواع مدل ها با مقدارهای  $P$  مختلف پیشنهاد و توضیح داده شده است. در آنجا سعی در بهینه کردن این آماره شده و مدل های پیشنهادی نیز ارائه شده است. در این مدل ها تمام این آماره ها را نمی توان به صفر نزدیک کرد، وابسته به مطلوب محقق می توان مدلی را برگزید (منظور از مطلوب محقق برقراری رابطه بین چند متغیر معین و از پیش تعیین شده نیست بلکه برقراری روابط میان متغیرهایی است که به نظر او مهم تر و بااهمیت تر بنظر می رسند). به عنوان نتیجه ی کلی این جدول می توان گفت که

می‌شود و از لحاظ پیچیدگی و سخت بودن کار با آن نیز بر رگرسیون‌های قبلی برتری دارد. واضح است که بررسی رگرسیون چندگانه بر بقیه رگرسیون‌ها اولویت دارد و نمای کلی از متغیرهای اصلی را نمایان می‌سازد. ساده‌ترین نوع رگرسیون، حالت تک‌متغیره است که رابطه‌ی یک متغیر مستقل را با متغیر پاسخ اندازه‌گیری می‌کند. در ادامه انواع مختلف این رگرسیون‌ها شامل تکی، دوگانه و سه‌گانه به صورت‌های مختلفی محاسبه شده‌اند و معیارهای متفاوتی از کیفیت هر کدام ارائه شده است.

همان‌گونه که در بخش قبلی مشاهده شد، رابطه‌ی خطی مناسب بین انواع متغیرها با مقاومت فشاری تک‌محوری برقرار نیست. در این بخش به بررسی متغیرهایی پرداخته می‌شود که بر میزان مقاومت فشاری تک‌محوری اثرگذار هستند. انواع مختلف معیارهای آماری برای پیدا کردن این روابط استفاده شده‌اند. هدف از این بررسی دربخش اول رابطه‌ی

۱-۱-۴. بررسی تاثیر رابطه سه متغیر کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ بر مقاومت فشاری تک‌محوری  
در این زیر بخش با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22 انواع آزمون‌های رگرسیونی چند متغیره برای متغیرهای کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ در مقابل متغیر پاسخ مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده است. به‌علاوه با استفاده از نرم‌افزار R فاصله اطمینان تجربی ۷۸ درصدی (این فاصله اطمینان در ذیل شکل ۶ به صورت کامل تشریح شده است) برای برآورد تک‌متغیره هر یک از این متغیرها انجام شده است.

جدول ۵. تاثیر سه متغیر کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری Coefficientsa

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		t	Sig.
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	-242.792	310.227			-.783	.444
1 quartz	3.341	3.075	1.057		1.086	.292
feldspar	4.115	3.266	.904		1.260	.224
rock fragment	3.115	3.349	.789		.930	.365

a. Dependent Variable: UCS<sub>dry</sub>

#### الف - سه متغیره

فشاری تک‌محوری پرداخته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود عرض از مبدا نسبتاً زیاد می‌باشد و حساسیت مدل پیشنهادی کم می‌باشد و مقدار توان آزمون برای دو ضریب و عرض از مبدا این آزمون حدود ۴۹٪ است، مشاهده می‌شود عرض از مبدا بسیار زیاد و حساسیت مدل پیشنهادی خیلی کم می‌باشد، بدین معنی که با افزایش متغیرهای مستقل تغییرات ایجادشده در متغیر وابسته اندک است. از طرفی مقدار توان آزمون برای دو ضریب و عرض از مبدا این آزمون حدود ۲۶٪ و در نتیجه دسترسی به مدلی که ارائه خوبی از متغیرهای مستقل داشته باشد امکان‌پذیر نیست. اکنون با کاستن تعداد داده‌ها سعی در بهبود مدل ارائه شده می‌شود.

همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود مقدار توان آزمون برای سه ضریب پایین (۰/۶۶) و مقدار عرض از مبدا بدون در نظر گرفتن علامت آن بسیار بزرگ (۲۴۲/۷۹۴) است. در نتیجه این آزمون هیچ‌توان قابل قبولی ندارد و باید به دنبال مدلی بهتر بود. برای بررسی چند مدل متفاوت با مقادیر P که به‌تنهایی حاکی از بهتر بودن مدل نیستند، با استفاده از معیار توان مدل، مدل بهتر انتخاب می‌شود. توان مدل عددی بین ۰ و ۱ است و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد به معنی انتخاب مدل شایسته‌تر است. نحوه‌ی محاسبه‌ی معیار توان مدل 1-maximum(Sig) می‌باشد. ب- دو متغیره در ادامه رگرسیون دو متغیره بررسی شده است. ابتدا از طریق داده‌های خام به بررسی رابطه دو متغیر کوارتز و فلدسپات بر روی مقاومت



جدول ۶. تاثیر دو متغیر کوارتز و فلدسپات بر روی مقاومت فشاری تک محوری Coefficientsa

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	40.222	60.246		.668	.512
1 quartz	.586	.825	.186	.711	.486
feldspar	1.287	1.188	.283	1.084	.292

a. Dependent Variable: UCS<sub>dry</sub>

جدول ۷. تاثیر دو متغیر کوارتز و خرده سنگ بر روی مقاومت فشاری تک محوری Coefficientsa

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	133.007	86.761		1.533	.142
2 quartz	-.333	.993	-.105	-.335	.741
Rock fragment	-.814	1.241	-.206	-.656	.520

a. Dependent Variable: UCS<sub>dry</sub>

جدول ۸. تاثیر دو متغیر فلدسپات و خرده سنگ بر روی مقاومت فشاری تک محوری Coefficientsa

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	92.597	30.828		3.004	.007
3 feldspar	.752	1.044	.165	.720	.480
Rock fragment	-.389	.906	-.099	-.430	.672

a. Dependent Variable: UCS<sub>dry</sub>

به ترتیب تاثیر کوارتز و فلدسپات، کوارتز و خرده سنگ و سپس فلدسپات و خرده سنگ مورد بررسی قرار می-گیرد (جدول های شماره ۶، ۷ و ۸). مشاهده می شود که نتایج دو متغیر نیز نامناسب می باشد ولی همانطور که در معادله زیر) بدست آمده از محاسبات تجربی این پژوهش) دیده میشود، متغیرهایی که سیمان سیلیسی وجود دارد P value بدست آمده مقدار کوچک تری داشته و جواب رگرسیون مناسب تر است.

$$UCS = 351.7 \sqrt{SilicaCement} \quad (1)$$

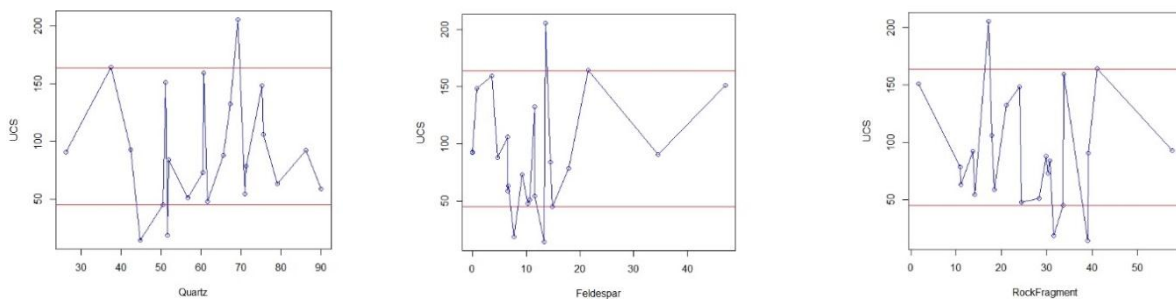
$$P\text{-value} = 0/00937 \quad (2)$$

در محاسبه تاثیر رگرسیون سه متغیره به بررسی تاثیر متغیرهای کوارتز، فلدسپات و خرده سنگ بر روی متغیر وابسته مقاومت

مشابه جدول بالا عرض از مبدا بسیار زیاد و حساسیت مدل پیشنهادی خیلی کم می باشد. از طرفی مقدار توان آزمون برای دوز ضریب و عرض از مبدا این آزمون حدود ۳۳٪ و در نتیجه دسترسی به مدلی که ارائه خوبی از متغیرهای مستقل داشته باشد امکان پذیر نمی باشد. در اینجا با کاستن تعداد داده ها سعی در بهبود مدل ارائه شده می شود. با توجه به اینکه سه متغیر مستقل و یک متغیر وابسته وجود دارد. بدیهی است که ابتدا از رگرسیون چند متغیره و سپس رگرسیون تک متغیره استفاده می شود تا ابتدا تاثیر چند متغیر و سپس تاثیر تک به تک متغیرها بر روی مقاومت فشاری تک محوری به درستی مورد بررسی قرار گیرد. منطقی است که ابتدا تاثیر سه متغیر بررسی می شود (جدول شماره ۵). طبق جدول مشاهده می شود که نتایج به دست آمده مناسب نمی باشد. سپس تاثیر دو متغیر

قبلی رابطه‌ی تک‌متغیره هر یک از متغیرها را توسط نمودارهای پراکنش متناظر در جداول ذیل (شکل ۵) مشاهده می‌کنید. در هر یک از این سه نمودار پراکنش، محور افقی و عمودی نمایان‌گر مقدار مشاهده شده متغیر ذکر شده به ترتیب در نمونه گیری اول تا بیست و دوم است.

فشاری تک‌محوری پرداخته می‌شود. این بررسی در ابتدا توسط داده‌های خام انجام شده است تا کیفیت رفتار این رگرسیون مورد بررسی قرارگیرد سپس تا حد امکان توسط نرم‌افزار R سعی در بهبود مدل ارائه شده می‌شود. ج-تک متغیره با توجه به نامناسب بودن رگرسیون‌های چند متغیره



شکل ۵. تاثیر تک‌متغیرهای کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری.

پراکنش استفاده از خطوط موازی مفیدتر بنظر می‌رسد. در شکل (۵)، خطوط پیشنهاد شده به صورت عملی قابل مشاهده است. داده‌های انتخابی ما در این مبحث عبارتند از ۴۵.۰۰۰۰۰۰ و ۱۶۴.۰۰۰۰۰ که با خطوط قرمز نمایش داده شده‌اند. فاصله اطمینان تجربی به دست آمده ۸۶.۳۶۳٪ است که به وضوح فاصله اطمینان مناسبی به نظر می‌رسد. به علاوه اگر زوایای درونی پراکنش‌ها از بالا به صورت یکسان در نظر گرفته شوند تنها حالتی که وجود یک روند در آن تایید می‌شود نمودار کوارتز در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوری است که در این نمودار زوایای درونی سیر نزولی دارند. بنابراین برای کوارتز دارای بیش از ۵۰٪ فراوانی مقاومت فشاری تک‌محوری مشاهده شده بزرگتر، خود نیز روند صعودی دارد. از این رو با افزایش کوارتز می‌توان شاهد بیشتر شدن مقاومت فشاری - تک‌محوری بود.

همان‌طور که در نمودارهای پراکنش مشاهده می‌شود رابطه خاصی بین هریک از متغیرهای مستقل و مقاومت فشاری تک-محوری دیده نمی‌شود و نمودارها شباهت بیشتری به سری-های زمانی دارند. در این حالت‌ها استفاده از رگرسیون خطی خیلی منطقی به نظر نمی‌رسد. بنابراین بهتر است از مدلی دیگر استفاده شود. در این بخش پیشنهاد می‌شود از مدل‌های فاصله اطمینان تجربی استفاده شود.

در مدل‌های فاصله اطمینان تجربی دو خط موازی بر اساس داده‌های انتخابی کمینه و بیشینه رسم می‌شود و فاصله این دو خط به عنوان فاصله اطمینان تجربه شده برای هریک از مدل‌ها تعیین می‌گردد. انتخاب نقاط کمینه و بیشینه در این مدل به تجربه محقق و مقادیر مشاهده شده آزمایش‌هایی که انجام شده است وابسته می‌باشد. در حالت کلی لزومی ندارد که دو خط انتخابی موازی باشند اما در اینجا با توجه به نمودارهای

جدول ۹. مقادیر P برای رگرسیون سه‌متغیره دربرآورد متغیر وابسته برای انواع گوناگون مدل‌ها.

$$f(\text{UCS}) = \text{Constant} + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \gamma_i$$

Regression coefficients	Model type	P Value	Number of Model
Constant=146.69 $\alpha_1 = -8.95000$ $\alpha_2 = -139.71000$ $\alpha_3 = 84.53000$	$f(x)=x$ $\gamma_1 = P$ $\gamma_2 = S$ $\gamma_3 = L$	P.=0.00011 P1= 0.03176 P2=0.34054 P3=0.15287	Model 1
Constant=162 $\alpha_1 = -0.00039$ $\alpha_2 = -0.95500$ $\alpha_3 = 0.50200$	$f(x)=x$ $\gamma_1 = e^P$ $\gamma_2 = e^S$ $\gamma_3 = e^L$	P.=0.40000 P1=0.24000 P2=0.51000 P3=0.33000	Model 2
Constant=169.5 $\alpha_1 = -51.40000$ $\alpha_2 = -140.90000$ $\alpha_3 = 131.70000$	$f(x)=x$ $\gamma_1 = \ln P$ $\gamma_2 = \ln(S + 1)$ $\gamma_3 = \ln(L + 1)$	P.=0.00018 P1= 0.01986 P2= 0.38264 P3= 0.08028	Model 3
Constant=1225.3 $\alpha_1 = -136.60000$ $\alpha_2 = -301.40000$ $\alpha_3 = 190.20000$	$f(x)=x$ $\gamma_1 = \sqrt{(P + 50)}$ $\gamma_2 = \sqrt{(S + 1)}$ $\gamma_3 = \sqrt{(L + 1)}$	P.=0.07000 P1=0.02900 P2= 0.33900 P3= 0.15200	Model 4
Constant=6.432 $\alpha_1 = -0.40900$ $\alpha_2 = -2.53000$ $\alpha_3 = 1.55000$	$f(x)=\log(x)$ $\gamma_1 = \sqrt{(P)}$ $\gamma_2 = \sqrt{(S + 1)}$ $\gamma_3 = \sqrt{(L + 1)}$	P.= 0.05310 P1= 0.00920 P2= 0.28050 P3= 0.12170	Model 5
Constant=3.228 $\alpha_1 = -0.32500$ $\alpha_2 = -0.28600$ $\alpha_3 = 1.37600$	$f(x)=\sqrt[4]{x}$ $\gamma_1 = \sqrt{(P)}$ $\gamma_2 = e^{(S+1)}$ $\gamma_3 = \sqrt{(L + 1)}$	P.= 0.04000 P1= 0.01200 P2=0.31100 P3=0.09800	Model 6
Constant=0.01254 $\alpha_1 = -0.01827$ $\alpha_2 = -0.00860$ $\alpha_3 = 0.01237$	$f(x)=\frac{1}{x}$ $\gamma_1 = \frac{1}{P}$ $\gamma_2 = \frac{1}{(S+1)}$ $\gamma_3 = \frac{1}{L+1}$	P.= 0.38860 P1=0.00440 P2=0.46440 P3= 0.05210	Model 7
Constant=4.02220 $\alpha_1 = 1.52750$ $\alpha_2 = -0.05810$ $\alpha_3 = -1.3352$	$f(x)=\sqrt[4]{x}$ $\gamma_1 = \frac{1}{P}$ $\gamma_2 = \frac{1}{(S+1)}$ $\gamma_3 = \frac{1}{L+1}$	P.=0.00000 P1= 0.01300 P2= 0.53000 P3= 0.03100	Model 8
Constant= 4.02220 $\alpha_1 = 1.52750$ $\alpha_2 = -0.05810$ $\alpha_3 = -1.33520$	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{x}}$ $\gamma_1 = \frac{1}{(P+10)}$ $\gamma_2 = S+1$ $\gamma_3 = L+1$	P.= 0.00000 P1= 0.01300 P2= 0.48700 P3= 0.03100	Model 9

۴-۲. بررسی تاثیر سه متغیر سیمان سیلیسی، سیمان آهکی

و تخلخل بر مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت فشاری تک‌محوری را بر اساس متغیرهای دیگر مدل-بندی کرد. اکنون درصدد ایجاد رابطه بین متغیرهای مستقل تخلخل، سیمان آهکی و سیمان سیلیسی بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشیم. در جدول پیش رو انواع مختلف

با توجه به مطالب گذشته رابطه خاصی بین هریک از متغیرهای کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ دیده نمی‌شود و به صورت کلی می‌توان گفت مدل‌بندی این متغیرها از حساسیت مقادیر برآورد شده می‌کاهد و در نتیجه باید متغیر وابسته

سیلیسی هستند. مدل تجربی نهایی به دست آمده در این پژوهش جهت محاسبه این رگرسیون عبارت است از:

$$UCS = 98.0454 - 10.8987 * \sqrt{S} + 62.2186 * \sqrt{L} \quad (3)$$

در معادله فوق UCS مقاومت فشاری تک محوری، S سیمان سیلیسی و L سیمان آهکی می باشد. شایان ذکر است که در این نرم افزار انتخاب مدل صورت نمی گیرد و بسته به آشنایی محقق با انواع روش های مدل سازی و کار بر روی داده ها مدل های بهتر انتخاب و پس از مشاهده توان این مدل ها مدل شایسته انتخاب می شود. اکنون در نمودار سه بعدی چگونگی رفتار مدل برازش شده را مشاهده می کنید (شکل ۶). این مدل در واقع صفحه ای است که به صورت مورب و اریب به سمت چپ و متمایل به بالا می باشد. رسم این نمودار با استفاده از نرم افزار R و با استفاده از پکیج scatterplot3d انجام شده است. برای نشان دادن کارایی مدل علاوه بر آنچه قبلاً نشان داده شده است می توان از نمودار Q-Q نیز استفاده کرد (شکل ۷). این نمودار میزان نرمال بودن باقیمانده های برآورد را نشان می دهد. هرچه باقیمانده ها به خط نزدیک تر و حول آن پراکنده تر باشند نرمال بودن باقیمانده ها بهتر نشان داده می شود.

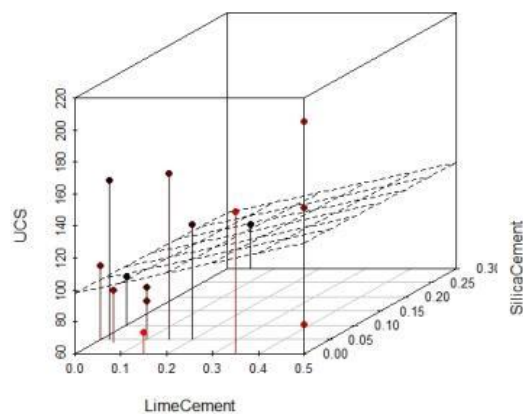
مقادیر P متناظر با ۱۰ مدل متفاوت قابل مشاهده است. ۹ مدل در جدول ۹ ارائه شده و مدل برتر در توضیحات بخش ۴-۲ به صورت مفصل تشریح شده است. توضیح مبسوط هر یک از این مدل های ۹ گانه، مشابه همین مدل برگزیده نهایی است. رابطه کلی در عنوان جدول ۹ ذکر شده و مقادیر جزئی به دست آمده در هر مدل نیز قابل مشاهده می باشد. روابط رگرسیونی متنوعی از هر سه متغیر مورد مطالعه در این بخش در مقابل متغیر پاسخ ارائه شده است. نمادهای P, S, L به ترتیب نمایانگر سیمان آهکی، سیمان سیلیسی و تخلخل می باشند که توسط فرمول کلی که در عنوان جدول ۹ ذکر شده به انواع گوناگونی مدل بندی شده اند. ضرایب رگرسیونی و مقدارهای P متناظر نیز برای هر یک از مدل ها نمایه شده است.

## ۲-۴ ارائه رابطه پیشنهادی جهت تخمین مقاومت فشاری

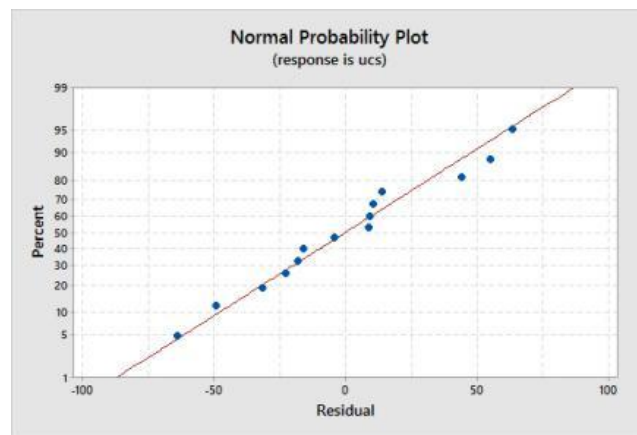
### تک محوری

اکنون با توجه به این که رگرسیون سه متغیره در انواع و اقسام مدل های بالا حداکثر دارای توانی حدود ۷۵٪ است سعی در برازش رگرسیون دو متغیره می کنیم. مشابه روش های قبلی می توان به این نتیجه رسید که دو متغیر اصلی اثرگذار بر متغیر پاسخ مقاومت فشاری تک محوری سیمان آهکی و سیمان

نمودار سه بعدی متغیر پاسخ در مقابل دو عامل اثرگذار به همراه مدل پیشنهادی



شکل ۶. نمودار سه بعدی مدل برازش شده در نرم افزار R



شکل ۷. نمودار Q-Q مدل برازش شده

### ۵. نتیجه‌گیری

۱. نتایج بدست آمده نشان داد که در تعیین ارتباط بین متغیرهای مورد مطالعه استفاده از رگرسیون چندمتغیره مناسب‌تر از رگرسیون تک‌متغیره می‌باشد. بطور کلی براساس نتایج حاصل از رگرسیون چندمتغیره همبستگی بالایی میان مقاومت فشاری تک‌محوری با خصوصیات شاخص (سیمان سیلیسی و سیمان آهکی) وجود دارد.

۲. توان مدل‌های آماری چندمتغیره که از ویژگی‌های شاخص جهت برآورد مقاومت به‌عنوان متغیرهای شهودی مستقل استفاده می‌کنند بسیار بالاتر از مدل‌هایی است که از ویژگی‌های دیگر به‌عنوان متغیرهای شهودی مستقل استفاده می‌کنند. ۳. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده آن است که روش پتروگرافی استفاده شده در این تحقیق نیز جهت برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری روشی با دقت بالا در تعیین مقاومت ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد.

۴. از بین ویژگی‌های بررسی شده درصد مقادیر کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ رابطه معناداری با مقاومت فشاری تک‌محوری نداشته و تنها تاثیر درصد سیمان سیلیسی و آهکی و تخلخل بر مقاومت فشاری تک‌محوری معنادار می‌باشد. ۵. با توجه به اینکه تاثیر عامل سیمان بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری بیشتر از عامل تخلخل است و هم‌چنین بر مبنای نتایج آماری بدست آمده از این پژوهش، سیمان سیلیسی و سیمان آهکی انتخاب‌های همزمان (Joint Choices) خوبی

در این رگرسیون واضح است که نمی‌توان یکی از مدل‌ها را به صورت قطعی انتخاب و بقیه را نادیده گرفت. دقت هر یک از مدل‌ها بسته به کارایی که محقق انتظار دارد می‌تواند متفاوت باشد. به‌عنوان مثال مدل‌های پنجم و ششم (جدول شماره ۹) نیز جایگزین‌های مناسبی به‌نظر می‌رسند. زیرا با دقت بسیار خوبی توانسته‌اند از مدل‌کردن توامان متغیرهای مستقل برخوردار باشند. این فرضیه به‌وضوح در ستون مقادیر P آن‌ها قابل مشاهده است. در حالت کلی برازش مدلی که درگیر متغیرهای زیادتری باشد مشکل‌تر به‌نظر می‌رسد ولی توان آزمون رگرسیونی هر کدام از مدل‌های بالا حدود ۷۰ درصد است که توان نسبتاً خوبی به حساب می‌آید، بدین معنی که استفاده از هر یک از این مدل‌ها در جای خود می‌تواند منطقی محسوب شود و لازم نیست برای مناسب‌تر کردن مدل به‌دنبال حذف برخی متغیرها بود. حساسیت بالای این مدل‌ها نیز نکته‌ی قابل تامل دیگری است که قابل‌ذکر است، یعنی هرگونه تغییری در هر یک از متغیرها می‌تواند اثر نسبتاً قابل توجهی بر روی متغیر پاسخ (مقاومت فشاری تک‌محوری) بگذارد. به‌علاوه از این مدل‌ها می‌توان تحت مبحثی مانند توامان مدل‌کردن استفاده کرد و مدل توام جدید را برپایه‌ی هر یک از این مدل‌ها گذاشت.

حاصل از آن برای ماسه‌سنگ‌های دیگر مناطق توصیه نمی‌شود.

#### تشکر و قدردانی

مقاله حاضر، استخراج شده از پایان‌نامه با کد تصویب‌نامه طرح پژوهشی درون دانشگاهی ۴۵۰۶۱ می‌باشد و با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری در ماسه‌سنگ‌ها هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی کمی ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها توسط متغیرهای سنگ-شناسی با دقت خوبی امکان‌پذیر است. این متغیرهای مستقل، صرفاً پیش‌بینی کننده‌هایی برای ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش بوده‌اند و استفاده از مدل‌سازی و روابط

#### منابع

- بشیر گنبدی، م.، ۱۳۸۸. ارزیابی خواص مهندسی سنگ‌های سازند شمشک، رساله دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۵۲ ص.
- تابا، ه.، ۱۳۹۲. تاثیر خواص بافتی و پتروگرافی بر رفتار مکانیکی ماسه‌سنگ‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک استان‌های همدان و قزوین، رساله کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، ۸۹ ص.
- خانلری، غ.، حیدری، م.، نوری، م.، رفیعی، ب.، اسفندیاری، م.، ۱۳۹۳. تاثیر خواص بافتی بر ویژگی‌های مهندسی کنگلومراهای منطقه فامین، شمال خاوری استان همدان. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد هفتم، شماره ۳، ۴، ۲۷-۲۴ ص.
- فهمی، فر.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها. جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک. چاپ اول. تهران. ۷۱۹ ص.
- مهرابی مزیدی، ص.، هفتانی، م.، بهلولی، ب.، چشمی، ا.، ۱۳۹۰. تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری برخی از سنگ‌های آهکی با استفاده از مغزه‌های بازسازی شده حاصل از خرده‌های سنگی. هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران.
- نبوی، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- Atapour, H. and Mortazavi, A., 2018. The influence of mean grain size on unconfined compressive strength of weakly consolidated reservoir sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, pp.63-70.
- Casella, G. and Berger, R.L., 2002. *Statistical inference* (Vol. 2). Pacific Grove, CA: Duxbury
- Deere, D.U. and Miller, R.P., 1966. *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois University at Urbana Department of Civil Engineering.
- Fahy, M.P. and Guccione, M.J., 1979. Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 16(4), pp.467-485.
- Folk, R.L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*, Hemphill Publishing Company.
- Gokceoglu, C., 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*, 66(1-2), pp.39-51.
- Ulusay, R. (ed.), 2014. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. Springer.
- Lashkaripour, G.R., 2002. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(1), pp.73-77.
- Manouchehrian, A., Sharifzadeh, M. and Moghadam, R.H., 2012. Application of artificial neural networks and multivariate statistics to estimate UCS using textural characteristics. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(2), pp.229-236.
- R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>
- Shakoor, A. and Bonelli, R.E., 1991. Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 28(1), pp.55-71.
- Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N., 2004. Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 72(3-4), pp.261-273.

- Tuğrul, A. and Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(4), pp.303-317.
- Ulusay, R., Türeli, K. and Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 38(1-2), pp.135-157.
- Ulusay, R. & Hudson, J. 2007. *ISRM (2007) the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Commission on Testing Methods. International Society of Rock Mechanics. Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628.
- Walderhaug, O., Lander, R.H., Bjørkum, P.A., Oelkers, E.H., Bjørlykke, K., Nadeau, P.H., Worden, R.H. and Morad, S., 2000. Modelling quartz cementation and porosity in reservoir sandstones: examples from the Norwegian continental shelf. In *Quartz cementation in sandstones (Vol. 29, pp. 39-49)*. Special Publication 29: International Association of Sedimentologists.
- Wang, H., Lin, H. and Cao, P., 2017. Correlation of UCS rating with Schmidt hammer surface hardness for rock mass classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1), pp.195-203.
- Weng, M.C. and Li, H.H., 2012. Relationship between the deformation characteristics and microscopic properties of sandstone explored by the bonded-particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, pp.34-43.
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H.A. and Acikalin, S., 2008. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology*, 96(3-4), pp.141-158.
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H.A. and Acikalin, S., 2008. Prediction uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology*, 96(3-4), pp.141-158.
- Zorlu, K., Ulusay, R., Ocakoglu, F., Gokceoglu, C. and Sonmez, H., 2004. Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp.93.