

زون بندی ژئومکانیکی سازندهای فراقان، زاکین و سرچاهان بر اساس مطالعات رسوب‌شناسی و مکانیک سنگی در یکی از میادین خلیج فارس

مهران کلهری^(۱)، هوشنگ مهرابی^(۱)، ابراهیم سفیداری^(۲)، حسن اشراقی^(۳) و بهنام واعظ لیواری^(۴)

۱. کارشناس ارشد گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۲. استادیار گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۳. کارشناس ارشد گروه زمین‌شناسی، شرکت نفت و گاز پارس

۴. مربی، عضو هیئت علمی پژوهشکده علوم پایه کاربردی

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۲

چکیده

مطالعات ژئومکانیکی در بحث‌های تحلیل پایداری چاه، تکمیل چاه، تعیین جهت‌یابی حفاری چاه، طراحی و اجرای شکاف هیدرولیکی، تولید شن و نشست در میدان‌های هیدروکربوری کاربرد اساسی دارد. پارامترهای مکانیک سنگی با تغییرات سنگ‌شناسی دچار تغییر می‌شوند. در این مطالعه با به دست آوردن پارامترهای مکانیک سنگی به صورت پیوسته، برای سازندهای فراقان، زاکین و سرچاهان در یکی از میادین خلیج فارس، به خوشه‌بندی این پارامترها پرداخته شده است. نتایج خوشه‌بندی منجر به استخراج شش خوشه با ویژگی‌های مکانیک سنگی متفاوت شد. از طرفی با مطالعات سنگ‌شناسی (رخساره‌ها، سیمان شدگی و دیاژنز) پنج رخساره با مشخصات سنگ‌شناسی و سیمان شدگی متفاوت تعیین شد که شامل رخساره‌های ماسه سنگی کواتر آرنایتی و آرکوزی، شیلی، گلسنگ قرمز و کربناته می‌باشد. انطباق بین رخساره‌های رسوبی و ژئومکانیکی برقرار شد. با توجه به مطالعات سنگ‌شناسی و ژئومکانیکی، بازه عمقی مورد مطالعه به هفت بخش تقسیم شد و چگونگی تغییرات پارامترهای مکانیک سنگی با تغییرات لیتولوژی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر تغییر در جنس سنگ، سیمان شدگی و فشردگی بر پارامترهای مکانیک سنگی ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: رخساره‌های رسوبی، مدل مکانیکی زمین، فراقان، زاکین، خوشه‌بندی

مقدمه

خاصی برخوردار است (Zeynali, 2016). میزان فشردگی، سیمان شدگی و ترکیبات سنگ، پارامترهای مؤثری بر مقاومت سنگ‌ها است (Bernab et al., 1992). تغییرات لیتولوژی تأثیر بسیار زیادی بر تغییرات پارامترهای مؤثر بر مقاومت سنگ و به طبع بر پایداری چاه دارد. بررسی مقاومت سنگ از مغزه‌ها و لاگ‌های پتروفیزیکی نشان داده

یکی از مهم‌ترین مسائل در صنعت استخراج نفت و گاز، پایداری چاه می‌باشد. بنابر یک تقریب، سالیانه حدودا یک میلیارد دلار آمریکا، در سراسر جهان برای مسائل ناپایداری چاه پرداخت می‌شود. مطالعه ناپایداری چاه‌ها از اهمیت

* نویسنده مرتبط: mehrankalhari@gmail.com

سازند فراقان با سنگ‌شناسی شیلی و میان لایه‌های ماسه‌ای بر روی سازند زاکین قرار گرفته و در زیر سازند دالان قرار دارد.

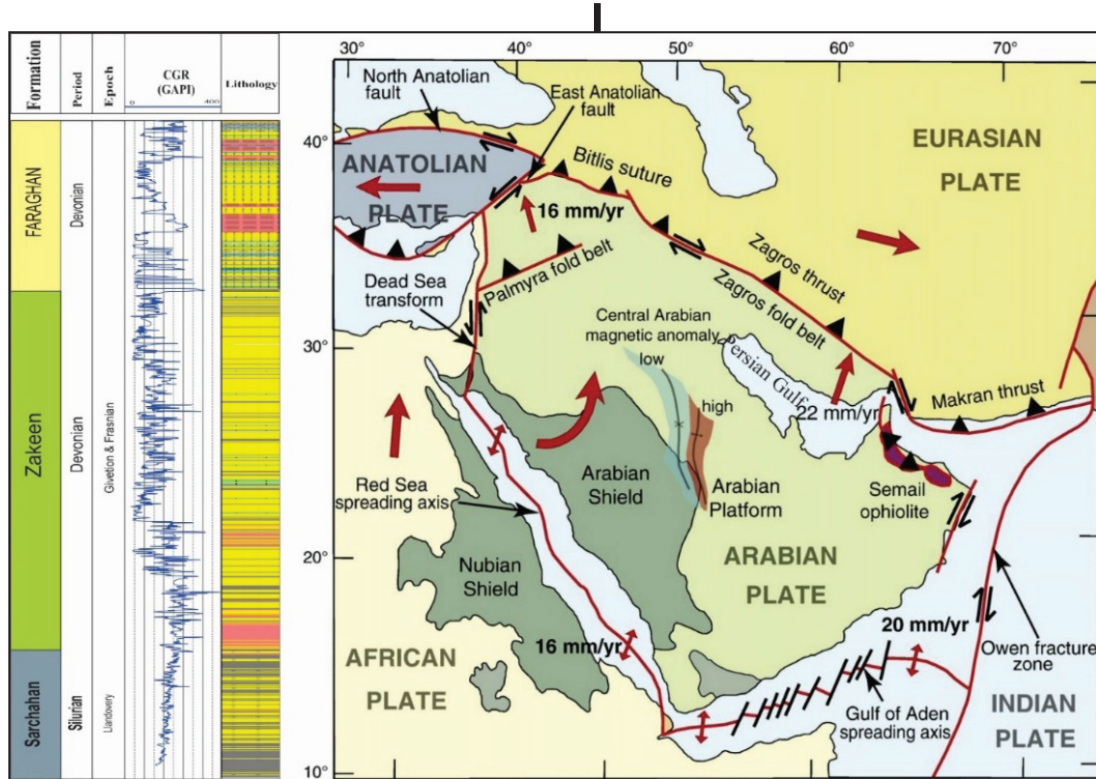
در پایان اردویسین وضعیت آب و هوایی جهان رو به سردی گذاشت و منجر به دوره یخچالی هرنانتین شد (Brenchley et al., 1994)، که نهشته‌های یخچالی شمال آفریقا، آمریکای جنوبی، عربستان و یک سری عوارض جنب یخچالی را در آرموریکا و آلوآیا بر جای گذاشته است (Schandelmeier and Reynolds, 1997). ذوب کلاهایک‌های یخی موجب بالا آمدن سریع آب دریاها در پایان هرنانتین شد. نتایج آن ایجاد شرایط محیطی با اکسیژن پایین در مناطق شلف و رسوب‌گذاری شیل‌های غنی از مواد آلی در شمال آفریقا و صفحه عربی شد (Lüning et al., 2000). این شیل‌ها در عربستان سعودی به اسم شیل‌های قصبه از سازند قلیبا و در ایران به اسم سازند سرچاهان شناخته می‌شود. در ادامه کوهزائی کالدونین اتفاق افتاد و یک ناپیوستگی را در مرز رسوبات دونین با سیلورین شکل داد.

در بخش‌هایی از شمال شرقی زاگرس، توالی همگنی از ماسه سنگ‌های کوارتزی سفید رنگ وجود دارد که بین شیل‌های سرچاهان به سن سیلورین و ردیف کربناتی پرمین قرار دارند. مطالعات قویدل سیوکی (۱۹۹۸) نشان داد که بخش عمده ماسه سنگ‌های منصوب به پرمو-کربونیفر، در واقع سن دونین میانی پسین داشته و جزء کوچک‌تری از بخش بالایی آن متعلق به پرمین پیشین است. برای ردیف‌های آواری دونین بالایی نام سازند زاکین انتخاب شده که در قاعده با میکروکنگومرا آغاز شده و سپس با تناوبی از شیل‌های زغالی تیره و ماسه سنگ پوشیده می‌شود. اما بخش عمده این سازند از ماسه سنگ‌های سفید، خاکستری و گاهی قهوه‌ای تشکیل شده است. این سازند معادل سازندهای طویل، جوف و جبه در عربستان سعودی می‌باشند. سپس نهشته‌های سازند فراقان نهشته شده‌اند که حاوی ماسه‌سنگ با میان لایه‌های شیلی می‌باشد (Ghavidel-Syooki, 1998).

است که کانی‌شناسی، رسوب‌شناسی و زیرساختارهای سنگ شدیداً بر مقاومت سنگ مؤثر هستند (Khaksar et al., 2009). پژوهش‌هایی در راستای بررسی تأثیر پارامترهای سنگ‌شناسی، نظیر سیمان شدگی، فشردگی دانه‌ها و جنس آنها بر مقاومت سنگ انجام گرفته است. پلامپ (Plumb 1994) به بررسی ارتباط میان بافت و ترکیب سنگ‌های آواری و پارامترهای شکست کلمب، مقاومت فشاری تک‌محوره و زاویه اصطکاک پرداخته است. نتایج پژوهش نشان‌دهنده وابستگی مقاومت فشاری تک‌محوره به تخلخل، میزان رس و سیمانی شدن است. در پژوهشی که Yo-Ming Hsieh و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام داده‌اند به بررسی تأثیر ویژگی‌های میکروسکوپی سنگ بر پارامترهای مکانیک سنگی پرداخته و نتایج حاکی از تأثیر بالای نحوه قرارگیری ذرات و چسبندگی آنها بر پارامترهای مکانیک سنگی است (Hsieh et al., 2008). در مطالعه‌ای Cantisani و همکاران (Cantisani et al., 2013) ارتباط کانی‌شناسی، پتروگرافی، فیزیک و مکانیکی ماسه سنگ‌های سازند Firenzuola بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که حضور سیمان‌های کربناته، سبب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره و همچنین میزان رس بالا سبب افزایش خلل و فرج و تخلخل و کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره می‌شود پژوهش چارسکی و همکاران (Charsky et al., 2017). به بررسی ناهمگنی و ناهمسانگردی مشخصات سنگ در یک محیط رسوبی، به تعیین استراتیگرافی مکانیکی پرداخته‌اند با شناسایی عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر چینه‌نگاری مکانیکی، به پیش‌بینی‌های رفتار سنگ پرداخته می‌شود که برای تحلیل‌های پایداری چاه، شکاف هیدرولیکی، نشست زمین کارایی دارد.

زمین‌شناسی منطقه

توالی مورد مطالعه به ترتیب از پایین به بالا شامل سازندهای سرچاهان، زاکین و فراقان در میدانی در جنوب ایران می‌باشد. در این میدان سازند سرچاهان شامل شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد. سازند زاکین که به‌صورت ناپیوسته بر روی سازند سرچاهان در میدان مورد مطالعه قرار گرفته، شامل ماسه‌سنگ و میان لایه‌های شیلی است. همچنین



شکل ۱. ستون لیتولوژی و سن سازندهای مورد مطالعه (چپ). نقشه صفحه عربی، مرزهای آن، عوارض زمین‌شناسی و بردار حرکت قاره‌ها (برگرفته شده از (Stern and Johnson, 2010))

روش مطالعه

داده‌های موجود در این چاه شامل لاگ‌ها، مغزه و خرده‌های حفاری می‌باشد. در ابتدا به مطالعه لیتولوژی چاه و تعیین رخساره‌های موجود توسط طبقه‌بندی پتی جان (Pettijohn, 1975) (برای نمونه‌های آواری) و طبقه‌بندی دانهام (Dunham, 1962) (در صورت نیاز برای نمونه‌های کربناته) پرداخته شد (تعداد ۶۵۰ مقطع نازک تهیه شد). سپس با استفاده از روابط موجود و با به‌کارگیری لاگ‌های چاه پارامترهای مکانیک سنگی دینامیکی (شامل مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν)، مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)) محاسبه شده‌اند. برای تبدیل این مقادیر به حالت استاتیکی بایستی رابطه‌ای میان مقادیر دینامیک و استاتیک برقرار شود. برای این منظور بر روی نمونه‌های حاصل از مغزه‌های چاه، تست‌های تک‌محوره و سه‌محوره و چکش‌اشمیت انجام گرفته است (برای اطمینان از سالم بودن نمونه‌ها از

آنها تصاویر CT-Scan تهیه شده است) و با به دست آوردن روابط تجربی اقدام به تبدیل مقادیر دینامیک پارامترهای مکانیک سنگی به حالت استاتیکی شده است. با انجام خوشه‌بندی بر روی پارامترهای مکانیک سنگی و شناسایی رخساره‌های رسوبی فاصله عمقی مورد مطالعه تقسیم‌بندی شد. برای واحدهای به‌دست‌آمده با توجه به همبستگی میان پارامترهای مکانیک سنگی و لیتولوژی، به بررسی تأثیرات لیتولوژی بر پارامترهای مکانیکی سنگ پرداخته شده است.

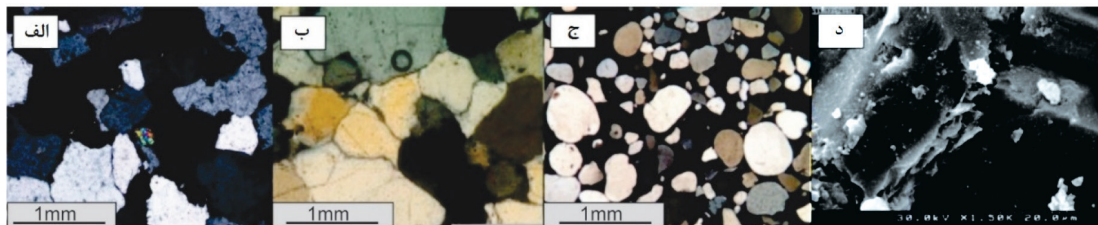
رخساره‌های زمین‌شناسی

با توجه به مطالعات پتروگرافی چاه (۶۵۰ نمونه مقطع نازک) و بررسی آنالیزهای صورت گرفته بر روی نمونه‌های شیلی و ماسه‌سنگی مانند SEM و XRD در مجموع این سه سازند به پنج رخساره (شامل چهار پتروفاسیس و یک میکروفاسیس) تقسیم‌بندی شدند (شکل ۱۲).

پتروفاسیس کوارتز آرنایت

اندازه دانه‌های تشکیل دهنده این پتروفاسیس از ماسه ریز تا ماسه متوسط تغییر می‌کند. جورشدگی در بخش پایینی نهشته‌ها خوب، در بخش مرکزی متوسط و در بخش بالایی ضعیف می‌باشد. دانه‌های کوارتز در غالب نمونه‌ها آرایشی کاملاً بسته داشته و متراکم شده‌اند (شکل ۲، الف، ب)، به‌گونه‌ای که غالباً مرز دانه‌ها در هم رفته و از نوع محذب-مقعر و مضرس می‌باشد. سیمان‌ها در این پتروفاسیس

غالباً از نوع سیلیسی و کربناته هستند و در موارد اندکی سیمان پیریتی و اکسید آهن نیز مشاهده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حضور اندک کانی‌های رسی و سیمان سرپسیتی را نشان می‌دهد که حاصل تجزیه ذرات ناپایدار (فلدسپار) هستند (شکل ۲، د). در مطالعات پرتو ایکس نمونه‌های این پتروفاسیس، آثاری از سیمان‌های کلسیت و سیدریت دیده می‌شود.



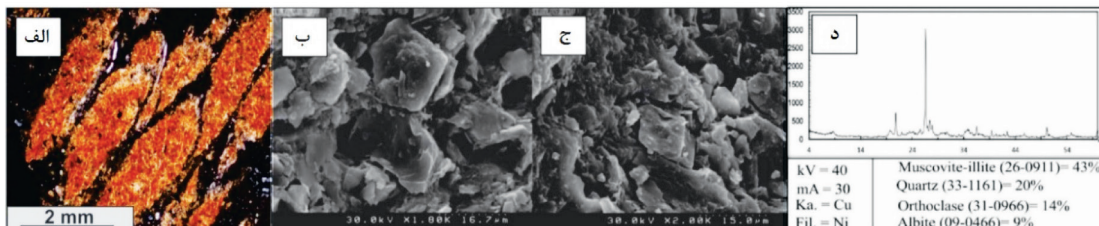
شکل ۲. الف) مقطع نازک سازند سرچاهان، سیمان سیلیسی و فشرده‌گی مضرس ذرات کوارتز به همراه کانی زیرکن، نور پلاریزه، ب) مقطع نازک سازند زاکین، فشرده‌گی و سیمانی شدن ذرات کوارتز، نور پلاریزه، ج) مقطع نازک بخش بالایی سازند زاکین، انفصال ذرات کوارتز، نور پلاریزه، د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سازند فراقان، حضور کانی رسی و سیمان سرپسیتی

پتروفاسیس گل‌سنگ قرمز

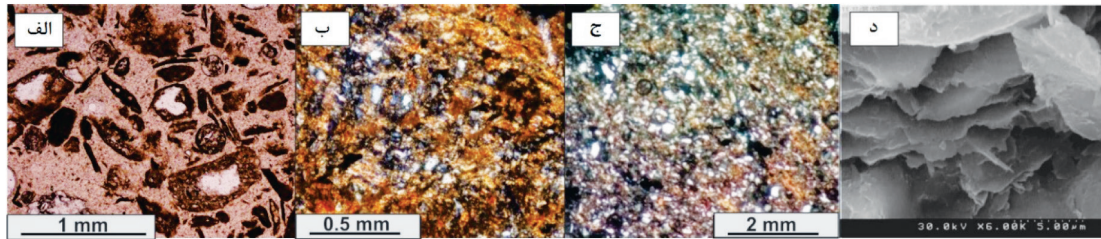
ذرات تشکیل دهنده این پتروفاسیس در اندازه سیلت و رس هستند که گسترش آن بیشتر به بخش‌های بالایی توالی مورد بررسی محدود می‌شود. گسترش اکسید آهن در برخی از بازه‌ها سبب گسترش افق‌های غنی از آهن با رنگ تیره شده است (شکل ۳-الف). بر اساس مطالعات اشعه ایکس، کانی‌های رسی در این پتروفاسیس بیشتر از نوع ایلیت-مسکوویت و به مقدار کمتر کائولینیت است (شکل ۳-د). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز علاوه بر کانی‌های رسی، اندازه متفاوت ذرات تشکیل دهنده و همچنین حضور دولومیت نیز در این رخساره را نشان می‌دهد (شکل ۳-ب، ج).

پتروفاسیس شیل

این پتروفاسیس شامل ذرات بسیار ریز رسی و در مواردی قطعات کوارتز (بسیار اندک) است. این پتروفاسیس در بخش پایینی سازند سرچاهان میزان کل مواد آلی بالا (شکل ۴-الف) و در دیگر بخش‌ها دارای ذرات کوارتز فراوان تری می‌باشد (شکل ۴-ب، ج). نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌ها، نشان دهنده حضور کانی‌های رسی از نوع ایلیت و کائولینیت می‌باشد (شکل ۴-د). کانی‌های رسی جزء اصلی تشکیل دهنده این پتروفاسیس هستند. در مواردی ذرات پراکنده کوارتز سیلتی نیز حضور دارند. آنالیزهای ژئوشیمیایی میزان کل مواد آلی این بخش را نیز بیشتر از دیگر پتروفاسیس‌ها تعیین کرد.



شکل ۳. الف) تصویر مقطع نازک رخساره گل‌سنگ قرمز، نور پلاریزه، ب) ج) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از گل‌سنگ‌ها، د) آنالیز اشعه ایکس رخساره گل‌سنگی



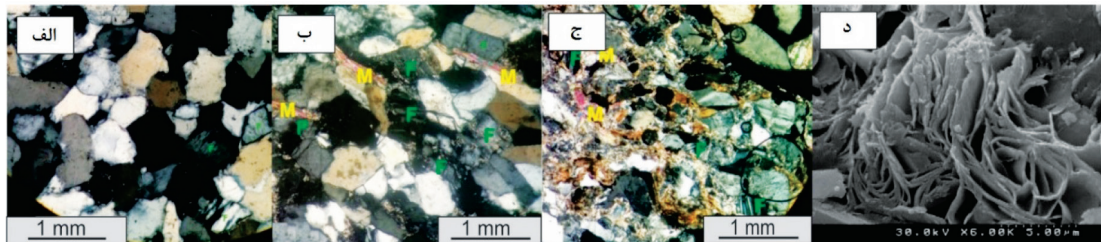
شکل ۴. الف) تصویر مقطع نازک رخساره شیل (بخش‌های تیره)، نور پلاریزه، ب) نور پلاریزه، ج) تصویر مقاطع نازک پتروفاسیس شیل ماسه‌ای، نور پلاریزه، د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کانی‌های رسی ایلیت

میکروفاسیس‌های کربناته

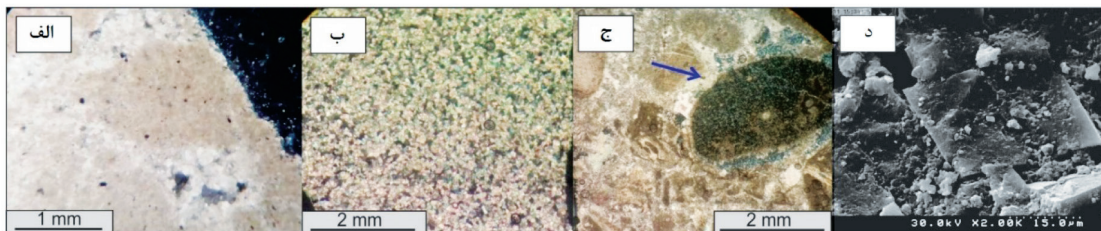
میکروفاسیس‌های کربناته بیشتر از نوع مادستون هستند (شکل ۶-الف، ج). این میکروفاسیس‌ها در بخش مرکزی سازند زاگرس و بخش پایینی سازند فراقان وجود دارند. این میکروفاسیس‌ها طی دیاژنز تبلور مجدد یافته و درشت بلورتر شده‌اند (نئومورفیسم) (شکل ۶-ب). با توجه به این‌که کربنات‌ها با لایه‌های شیلی موجود در این توالی‌ها به صورت بین لایه‌ای هستند، Mg حاصل از تبدیل کانی‌های رسی منیزیم سهم مهمی در تولید منیزیم مورد نیاز برای دولومیتی شدن گل‌های کربناته ایفا نموده است که در آنالیز XRD کاملاً مشخص می‌باشد (Moor, 1989). نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌هایی از این سنگ‌های کربناته نشان از حضور کلسیت به مقدار بالا و دولومیت به مقدار کم در آنها است و همچنین در SEM نیز بلور دولومیت واضح می‌باشد (شکل ۶-د).

پتروفاسیس ساب آرکوز

در این پتروفاسیس علاوه بر غلبه دانه‌های کوارتز حدود ۵ تا ۱۰ درصد دانه‌های فلدسپار حضور دارند. فلدسپارها از هر دو نوع پتاسیم‌دار و پلاژیوکلاز با فراوانی نسبتاً برابر مشاهده شده‌اند. این گروه از سنگ‌ها نسبت به کوارتز آرنایت‌ها جورشدگی بدتری دارند. گردشگی ذرات نیز از نیمه زاویه‌دار تا نیمه گرد متغیر است. به طور کلی، از لحاظ آرایش، ذرات در ساب آرکوزها نیز مانند کوارتز آرنایت‌ها درهم رفته و فضای کمی برای سیمانی شدن باقی مانده است (شکل ۵-الف). با توجه به آنالیز پرتو ایکس کانی کوارتز و فلدسپار در این پتروفاسیس حضور دارد. (شکل ۵-ب). تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که عمده کانی‌های رسی که در این پتروفاسیس حضور دارند از نوع ایلیت است که نتیجه تجزیه فلدسپارها هستند (شکل ۵-د). بعلاوه این تصاویر وجود مسکوویت را نیز تایید می‌کنند (شکل ۵-ب و ج).



شکل ۵. الف) تصویر مقطع نازک از پتروفاسیس ساب آرکوز با دانه‌های در هم رفته، نور پلاریزه، ب) نور پلاریزه، ج) حضور کانی فلدسپار و مسکوویت، نور پلاریزه، د) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، کانی ایلیت



شکل ۶. الف) تصویر میکروسکوپی از گل کربناته موجود در نهشته‌های سازند زاگرس، نور پلاریزه، ب) میکروفاسیس گل کربناته تبلور مجدد یافته، نور پلاریزه، سازند فراقان، ج) قطعه دوکفه‌ای و جلبکی، نور پلاریزه، د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دولومیت

$$UCS=135.9\exp(-4.8\phi) \quad (5)$$

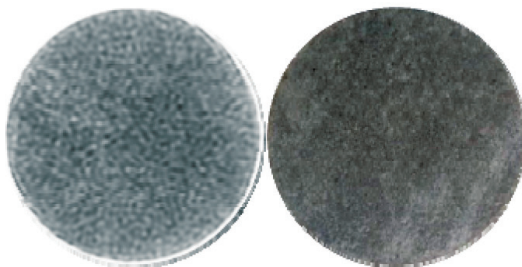
$$UCS=277\exp(-10\phi) \quad (6)$$

روابط ۴، ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به شیل، کربنات و ماسه سنگ می‌باشند. رابطه زیر برای برآورد زاویه اصطکاک داخلی شیل با استفاده از سرعت موج فشاری ارائه شده است (Zoback, 2010):

$$\phi = \sin^{-1} [(V_p - 1000)/(V_p + 1000)] \quad (7)$$

ب- پارامترهای مکانیک سنگی استاتیک

برای تبدیل پارامترهای دینامیکی به مقادیر استاتیک بایستی از روابط تجربی استفاده کرد. برای این منظور لازم است تا با انجام تست‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های حاصل از چاه، مقادیر استاتیک این پارامترها در عمق‌های مشخص، به دست آید و سپس با برقراری ارتباط میان مقادیر دینامیک و استاتیک این پارامترها، روابط تجربی را به دست آورد. برای این منظور بر روی مغزه‌های این چاه، در ۱۰۷ نقطه تست چکش اشمیت انجام گرفته است. ۸ نمونه (پلاگ) از مغزه‌های این چاه تهیه شد و برای اطمینان از سالم بودن از آنها تصاویر CT-Scan تهیه شد که تصاویر حاصله حاکی از سالم بودن نمونه‌ها بود (شکل ۷). همچنین بر روی چهار نمونه حاصل از مغزه‌های این چاه، تست مقاومت تک محوره (شکل ۸) و بر روی چهار نمونه دیگر تست مقاومت سه محوره (شکل ۹) انجام گرفت. با استفاده از نتایج این تست‌ها و مقادیر حاصل از روابط بالا، روابط موجود در جدول ۱ برای تبدیل مقادیر دینامیکی به استاتیکی به دست آمد (شکل ۱۲). در شکل ۹ نمودار مربوط به همبستگی پارامترهای دینامیکی و استاتیکی آورده شده است.



شکل ۷. الف) تصویر ماکروسکوپی نمونه تهیه شده از مغزه چاه، ب) تصویر CT-SCAN همان نمونه

پارامترهای مکانیک سنگی

الف- پارامترهای مکانیک سنگی دینامیک

خواص مکانیک سنگی از جمله مدول یانگ، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با استفاده از روابط تحلیلی و تجربی و با به‌کارگیری اطلاعات سرعت امواج فشاری، برشی و چگالی، قابل محاسبه هستند، که در اصطلاح خواص ژئومکانیکی دینامیک نامیده می‌شوند. لازم به ذکر است که در فواصلی که سرعت موج برشی در دسترس نبوده است با استفاده از لیتولوژی سازندها و با به‌کارگیری رابطه تجربی گرینبرگ-کاستاگنا اقدام به برآورد سرعت موج برشی شده است. رابطه ارائه گردیده توسط گرینبرگ و کاستاگنا به صورت زیر است (Detournay and Cheng, 1988):

$$V_s = \frac{1}{2} \left\{ \left[\sum_{i=1}^L X_i \sum_{j=1}^{N_i} a_{ij} V_p^j \right] + \left[\sum_{i=1}^L X_i \left(\sum_{j=1}^{N_i} a_{ij} V_p^j \right)^{-1} \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^L X_i = 1$$

از اجزا سنگی، ضرایب رگرسیون تجربی، N_i ترتیب چند جمله‌ای برای جزء N_i ام، V_p^j سرعت موج فشاری برای رخساره سنگی زام در حالت اشباع از آب شور و V_s سرعت موج برشی برای سنگ چند کانیایی برحسب km/s است. روابط برخی از پارامترهای مکانیکی سنگی با استفاده از اطلاعات سرعت امواج و چگالی به صورت زیر می‌باشد (Fjar, 2008):

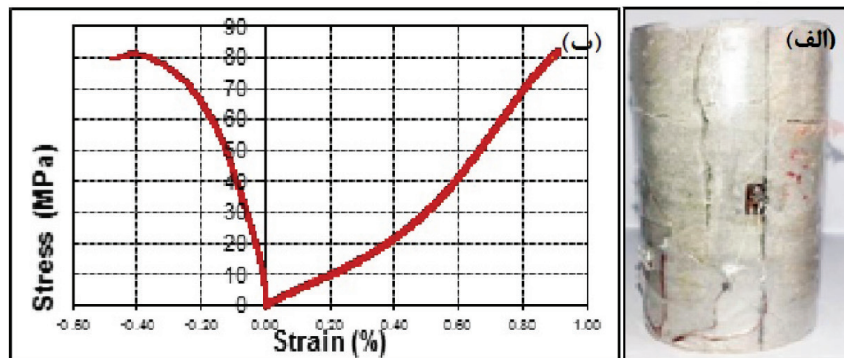
$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

که در این روابط E_{dyn} مدول یانگ دینامیک، ν_{dyn} ضریب پواسون دینامیک، p چگالی سنگ، V_p سرعت موج فشاری و V_s سرعت موج برشی می‌باشد.

برای محاسبه پارامترهای مقاومت تک محوره فشاری، زاویه اصطکاک داخلی از روابط زیر استفاده شده است (Zoback, 2010):

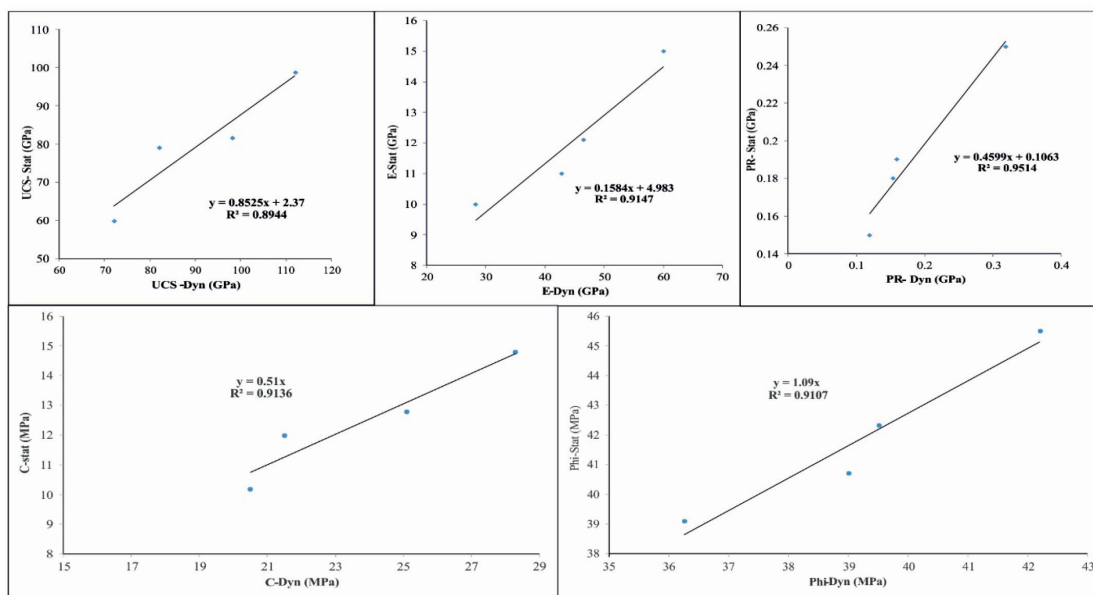
$$UCS=1.001\phi^{-1.143} \quad (4)$$



شکل ۸. الف) تصویر نمونه شکسته شده، ب) نمودار تنش-کرنش آزمایش تک محوره بر روی یک نمونه

جدول ۱. روابط استخراج شده از همگام‌سازی داده‌های آزمایشگاهی و دینامیکی برای تبدیل مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی دینامیکی به استاتیکی

ردیف	پارامتر مورد نظر	رابطه تبدیل
۱	مقاومت فشاری تک‌محوره	$UCS(Static) = 0.85 * UCS(Dyn)$
۲	مدول یانگ	$E(Static) = 0.1584 * E(Dyn) + 4.983$
۳	نسبت پواسون	$PR(Static) = 0.4599 PR(Dyn) + 0.1063$
۴	زاویه اصطکاک داخلی	$\Phi(Static) = 1.09 * \Phi(Dyn)$
۵	چسبندگی ذاتی	$C(Static) = 0.51 * C(Dyn)$



شکل ۹. نمودار مربوط به همبستگی پارامترهای دینامیکی و استاتیکی

این مطالعه استخراج واحدهای ژئومکانیکی بر اساس روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی بر روی نمودارهای پیوسته مکانیک سنگی تعمیم یافته به کل چاه انجام شده است (Revelle, 1979).

خوشه‌بندی پارامترهای مکانیک سنگی
در مطالعات گذشته، استخراج واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی یا نمودارهای پیوسته پارامترهای مکانیک سنگی مخزن انجام شده است. در

بسته به هدف مطالعه و داده‌های مورد نظر متفاوت است و می‌توان با توجه به نیاز، سطح مختلفی را تعیین کرد و در نتیجه خوشه‌بندی‌های متفاوتی را انجام داد.

تعیین واحدهای ژئومکانیکی در محل چاه

بعد از آماده کردن داده‌ها برای خوشه‌بندی و تعیین واحدهای ژئومکانیکی، مرحله بعد اعمال روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای تعیین خوشه‌های بهینه می‌باشد. برای این منظور نمودارهای مقاومت تک‌محوره، مدول یانگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شد. شکل ۱۰ متغیرهای ورودی خوشه‌بندی را نشان می‌دهد.

بعد از انتخاب متغیرهای ورودی با استفاده از روش اقلیدوسی فاصله بین زوج داده‌ها با همدیگر محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و فاصله محاسبه شده بین زوج داده‌ها در مرحله قبلی، زوج‌ها به همدیگر ارتباط داده شدند. در ادامه درخت خوشه‌ای برای داده‌های مورد مطالعه چاه تهیه شد (شکل ۱۱). با استفاده از درخت خوشه‌ای، شماره تعداد گونه‌های سنگی بهینه مشخص شد. همان‌طور که از شکل ۱۱ دیده می‌شود شش خوشه به‌عنوان تعداد خوشه‌های بهینه انتخاب گردید. مرحله آخر خوشه‌بندی با تعیین حد برش و انتخاب تعداد خوشه‌ها (۶ خوشه بهینه در این مطالعه) انجام گرفت.

جدول ۲ خصوصیات مکانیک سنگی هر یک از خوشه‌های ژئومکانیکی را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ خوشه‌های ژئومکانیکی را در کنار رخساره‌های رسوبی، خواص مکانیک سنگی پیوسته و نمودارهای چاه‌پیمایی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود انطباق مناسبی بین رخساره‌های زمین‌شناسی با خوشه‌های ژئومکانیکی استخراج شده وجود دارد. به این صورت که GMU_1,2,3,5 منطبق با بخش ماسه سنگی هستند و مقاومت سنگی بالایی دارند. البته GMU_5 در این مجموعه به این دلیل با Sub Arkose منطبق می‌باشد که رخساره ماسه سنگی ساب آرکوزی در این بخش از چاه حالت لوزا و بدون سیمان می‌باشد و مقاومت بسیار پایینی را نسبت به دیگر ماسه سنگ‌ها

روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی داده‌ها را در گروه‌های مجزا تقسیم‌بندی می‌کند که داده‌های موجود در این گروه‌ها بیشترین شباهت را با همدیگر و بیشترین تفاوت را با داده‌های موجود در گروه‌های دیگر دارا می‌باشند. روش گفته شده در طی چهار مرحله به شرح زیر انجام می‌گیرد.

محاسبه شباهت بین هر دو زوج داده خاص: این شباهت بر اساس بردار فاصله محاسبه می‌شود. برای این منظور الگوریتم‌های زیادی در کارهای گذشته پیشنهاد شده است که از میان آنها می‌توان به روش اقلیدوسی، اقلیدوسی استاندارد و منهتن اشاره کرد. معادله زیر روش اقلیدوسی را برای محاسبه فاصله بین دو زوج داده خاص نشان می‌دهد (Sfidari et al., 2014).

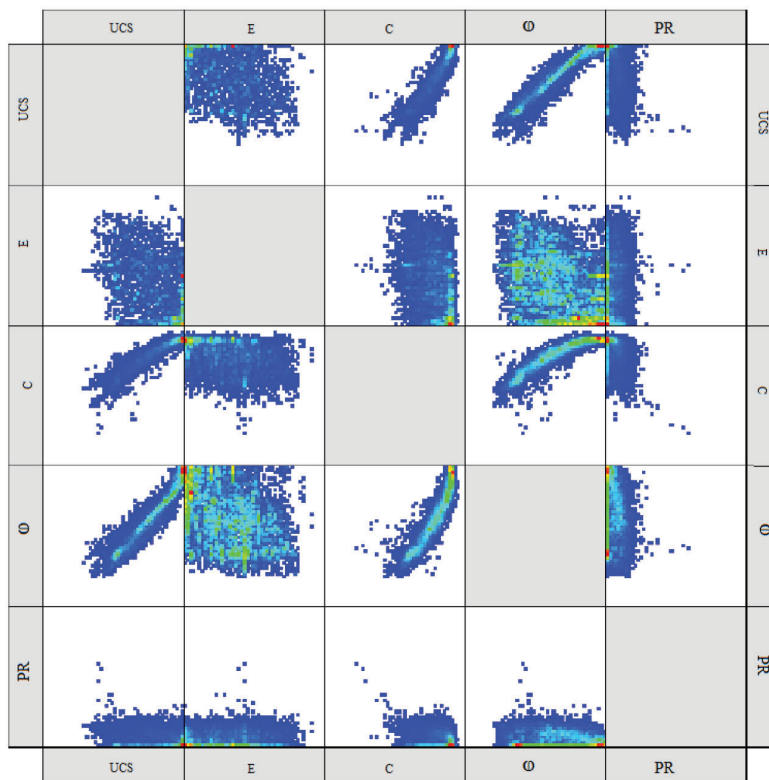
$$d_{rs} = \left\{ \sum_{j=1}^n |x_{rj} - x_{sj}|^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

که x_{rj} و x_{sj} به ترتیب مشاهده شماره j در خوشه r و s می‌باشند.

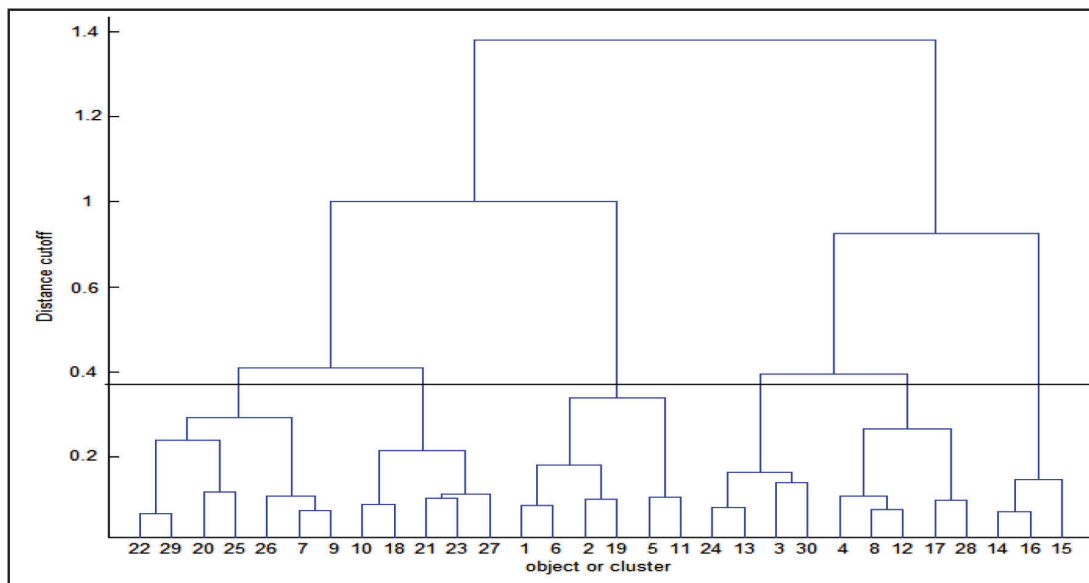
برقراری ارتباط میان اجزای مربوط به فواصل: در این مرحله لازم است تعیین شود که کدامیک از زوج‌های تشکیل شده باید در یک خوشه قرار گیرند. توابع مختلفی برای برقراری ارتباط بین داده‌ها و گروه‌بندی آن‌ها وجود دارد، به‌طوری‌که حداکثر فاصله بین اجزاء، حداقل فاصله، میانگین فاصله بین مرکز ثقل همه اجزای بردار می‌توانند در این تابع قرار گیرند.

تشکیل درخت خوشه‌ای (دندروگرام): در این مرحله با استفاده از اطلاعات حاصل از درجه ارتباط داده‌ها که آن‌ها را در گروه‌های مربوطه قرار می‌دهد، درخت خوشه‌ای تشکیل می‌شود. درخت خوشه‌ای متشکل از مجموعه خوشه‌های مختلف بوده، به‌طوری‌که هر یک از خوشه‌ها به یکدیگر مرتبط می‌باشند تا اینکه در نهایت کل داده‌ها در یک خوشه قرار می‌گیرند. در این نوع درخت محور افقی شامل تعداد داده‌ها و محور عمودی مقادیری را نشان می‌دهد که خوشه‌های مختلف برای تشکیل خوشه‌های جدیدتر به یکدیگر می‌پیوندند.

تعیین حد برش و استخراج خوشه‌ها: در این مرحله از آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی، پس از رسم درخت خوشه‌ها، می‌توان با تعریف یک سطح خاص به‌عنوان حد برش خوشه‌های دلخواه بزرگ یا کوچک را تعریف نمود. تعیین تعداد خوشه‌ها



شکل ۱۰. متغیرهای ورودی خوشه‌بندی و ترسیم دوبعدی آنها با همدیگر

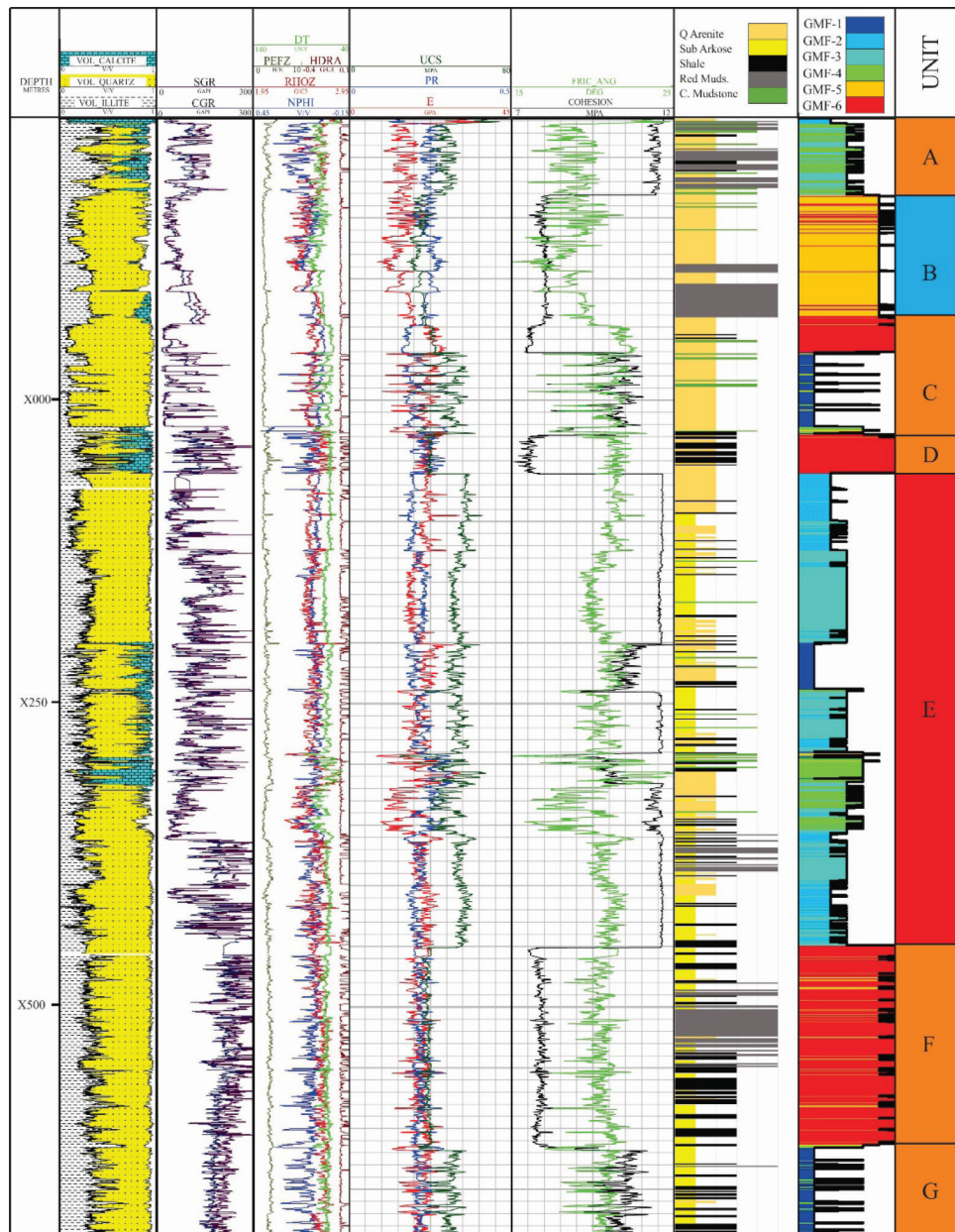


شکل ۱۱. درخت خوشه‌ای برای متغیرهای انتخاب شده به‌عنوان ورودی تعیین گونه‌های سنگی در چاه مورد مطالعه

نشان می‌دهد. همچنین GMU_4,6 با رخساره‌های شیلی در این مطالعه به دلیل بین لایه‌ای بودن با نهشته‌های شیلی نهشته‌های مورد مطالعه که دارای مقاومت سنگی پایین‌تری هستند، منطبق می‌باشند. میکروفاسیس کربناته نهشته‌ها و ضخامت بسیار کمی که دارد با GMU_4 منطبق شده است.

جدول ۲. میانگین خصوصیات پارامترهای مکانیک سنگی را در هر خوشه ژئومکانیکی و رخساره‌های زمین‌شناسی معادل

GMU	E	UCS	ϕ	PR	C	Equivalent Geo.Fancies
GMU_1	۲۱	۵۱/۲۰	۲۰/۶۷	۰/۲۰	۱۰/۲۵	Q. Arenite
GMU_2	۲۲/۴۱	۵۸/۱۴	۲۱/۰۱	۰/۱۹	۱۱/۲۳	Sub Arkose
GMU_3	۱۸/۲۲	۵۲/۵۴	۲۰/۱۲	۰/۲۳	۱۱/۱۷	Q. Arenite
GMU_4	۱۴/۱۲	۴۳/۶۸	۱۹/۲۱	۰/۲۷	۱۰/۱۲	Shale-C. Mudstone
GMU_5	۱۵/۱۳	۳۴/۷۸	۱۹/۱۲	۰/۲۵	۸/۲۱	Sub Arkose
GMU_6	۲۰/۴۳	۳۹/۲۸	۲۰/۵۵	۰/۲۲	۷/۹۴	Red Mud



شکل ۱۲. انطباق لاگ‌های پتروفیزیکی، نمودار خواص پیوسته مکانیک سنگی استاتیک، رخساره‌های زمین‌شناسی و واحدهای ژئومکانیکی تعیین‌شده برای سازندهای فراقان، زاکین و سرچاهان

دارای محدوده وسیعی از مقاومت تک محوری سنگ هستند. مقاومت فشاری تک محوره سنگ به لیتولوژی وابسته است که تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله جنس سنگ، سیمان شدگی، فشردگی و جورشدگی ذرات و اندازه ذرات تشکیل دهنده می باشد. بررسی تغییرات لیتولوژی در این هفت واحد نشان دهنده این است که بیشترین مقاومت سنگ مربوط به ماسه سنگ های با سیمان سیلیسی است که هرچه میزان فشردگی آنها بیشتر بوده مقاومت بالاتری را نشان می دهند و کمترین میزان مقاومت سنگ مربوط به ماسه سنگ های فاقد سیمان بدون میان لایه شیلی است. مطالعه انجام گرفته در یک چاه انجام گرفته است. انجام مطالعات مشابه در چاه های اکتشافی آینده و انطباق آن با نتایج این مطالعه منجر به تهیه یک چارچوب مشخص ژئومکانیکی مشخص برای میدان می گردد. این چارچوب زمین شناسی مشخص بعداً در کارهای دقیق تر ژئومکانیکی از قبیل تهیه مدل سه بعدی ژئومکانیک مخزن، پایداری چاه، مسیر بهینه حفاری چاه و طراحی شکاف هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Bernab, Y., Frye, D. and Hayes, J., 1992. The Effect of Cement on the Strength of Granular Rocks. *Geophysical Research Letters*, 19, 1511-1514.
- Brenchley, P., Marshall, J., Carden, G., Robertson, D.B.R., Long and Anderson, T., 1994. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period. *Geology*, 22,4, 295-298.
- Cantisani, E., Garzonio, C., Ricci, M. and Vettori, S., 2013. Relationships between the petrographical, physical and mechanical properties of some Italian sandstones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 321-332.
- Charsky, A., Pyles, D. and Sonnenberg,

نتیجه گیری

با مقایسه تغییرات لیتولوژی و نمودارهای پارامترهای مکانیک سنگی می توان نتیجه گرفت که پارامترهای چسبندگی، مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوره نسبت به ضریب پواسون و زاویه اصطکاک داخلی، حساسیت بیشتری به تغییر لیتولوژی نشان می دهند. با توجه به نتایج حاصل از تغییرات پارامترهای مقاومتی سنگ و همچنین رخساره های زمین شناسی، فاصله عمقی مورد مطالعه به هفت واحد قابل تقسیم است که هر واحد روند مشخصی از نظر تغییرات لیتولوژی و مکانیک سنگی دارد (شکل ۱۱).
 واحد A: شامل بخش شیلی با میان لایه های کربناته و ماسه سنگی است. میزان میانگین مقاومت فشاری برای این بازه برابر ۴۷/۵۱ مگاپاسکال می باشد. واحد B: شامل ماسه سنگ های فاقد سیمان می باشد و فشردگی آن بسیار پایین است و ماسه سنگ های سست را تشکیل داده اند که میزان متوسط مقاومت فشاری تک محوره آن ۳۴/۸۱ مگاپاسکال است. واحد C: به دلیل حضور سیمان سیلیسی در لایه های ماسه سنگی، مقاومت سنگ افزایش یافته است و مقاومت آن به ۴۶/۴۹ مگاپاسکال رسیده است. واحد D: محدوده شیلی دارای زغال و بدون سیمان را شامل می شود که مقاومت فشاری تک محوره آن برابر ۴۰/۲۹ مگاپاسکال است. واحد E: بیشتر شامل ماسه سنگ های است که سیمان آنها از جنس سرسیت و سیلیس می باشد به صورتی که میزان سیمان سیلیسی و فشردگی با افزایش عمق در حال افزایش است. مقاومت فشاری تک محوره برای این بخش برابر ۵۳/۳۲ مگاپاسکال است. واحد F: شامل تناوبی از لایه های ماسه سنگی با سیمان سیلیسی و سرسیتی، شیل های قرمز و سیاه می باشد، این تناوب شیل ها باعث کاهش مقاومت سنگ نسبت به واحد E شده است و مقاومت تک محوری آن به ۳۸/۷ مگاپاسکال رسیده است. واحد G: حضور لایه های ماسه سنگی در آن بیشتر از لایه های شیلی است و سیمان شدگی و فشردگی بسیار بالاتری دارد، در نتیجه میزان مقاومت سنگ افزایش یافته است و میزان مقاومت فشاری تک محوره به ۴۹/۵۷ مگاپاسکال رسیده است. ماسه سنگ ها با میزان سیمان و فشردگی متفاوت،

- S., 2017. Integrating Mineralogy, Process Sedimentology and Geomechanics for Development of a Mechanical Stratigraphy Model of the Bakken Formation. Unconventional Resources Technology Conference. Austin, Texas, USA: SPE.
- Detournay, E. and Cheng, A.D., 1988. Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field, in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 171-182.
 - Dunham, R. J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir.
 - Fjar, E. H., 2008, Petroleum Related Rock mechanics, Elsevier, 337.
 - Ghavidel-Syooki, M., 1998. Investigation on the upper Paleozoic Strata in Tang-e-Zakeen, and introducing Zakeen Formation, Kuh-e Faraghan Zagros Basin, South Iran. Geosciences, 29, 54-73.
 - Hsieh, Y.M., Li, H.H., Huang, T.H. and Jeng, F.S., 2008. Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of sandstone affected by microscopic properties-Revealed by bonded-particle model. Engineering Geology, 99, 1-10.
 - Khaksar, A., Taylor, P., Fang, Z., Kayes, T., Salazar, A. and Rahman, K., 2009. Rock Strength from Core and Logs: Where We Stand and Ways to Go . SPE 121972.
 - Lüning, S., Craig, J., Loydell, D., Štorch, P. and Fitches, B., 2000. Lower Silurian hot shales' in North Africa and Arabia: regional distribution and depositional model. Earth-Science Reviews, 49,1, 121-200.
 - Pettijohn, F., 1975. Sedimentary Rocks. Harper and Row, New York , 599.
 - Plumb, R., 1994. Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. Eurock SPE/ISRM Rock Mechanics. Delft, Netherlands: SPE.
 - Revelle, W., 1979. Hierarchical cluster analysis and the internal structure of tests. Multivariate Behavioral Research, 14,1, 57-74.
 - Schandelmeier, H. and Reynolds, P., 1997. Paleogeographic-Paleotectonic Atlas of North-Eastern Africa. Arabia and Adjacent Areas. Rotterdam, Netherlands, Balkema.
 - Sfidari, E., Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rahimpour-Bbonab, H. and Soltani, B., 2014. A hybrid approach for litho-facies characterization in the framework of sequence stratigraphy: A case study from the South Pars gas field, the Persian Gulf basin. Journal of Petroleum Science and Engineering, 121, 87-102.
 - Stern, R. and Johnson, P., 2010. Continental lithosphere of the Arabian Plate: a geologic, petrologic, and geophysical synthesis, Earth-Science Reviews, 101(1), 29-67.
 - Zare-Reisabadi, M., Kaffash, A. and Shadizadeh, S., 2012. Determination of optimal well trajectory during drilling and production based on borehole stability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 56, 77-87.
 - Zeynali, M. E., 2016. Mechanical and physico-chemical aspects of wellbore stability during drilling operations, Journal of Petroleum Science and Engineering, 82-83, 120-124.
 - Zoback, M., 2010. Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press, 489.