نقش مشخصات رخساره رسوبی در رفتار مکانیکی سنگ، مطالعه موردی در سازند آسماری، جنوب- غرب ایران

سجاد قره‌چلو[1]، عبدالحسین امینی*[1]، مژده شیرازی[1]، عباسعلی نیک اندیش[2] و وحید فرجپور[2]

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم پایه، دانشگاه تهران، ایران

۲- بخش زمین‌شناسی، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۲

چکیده

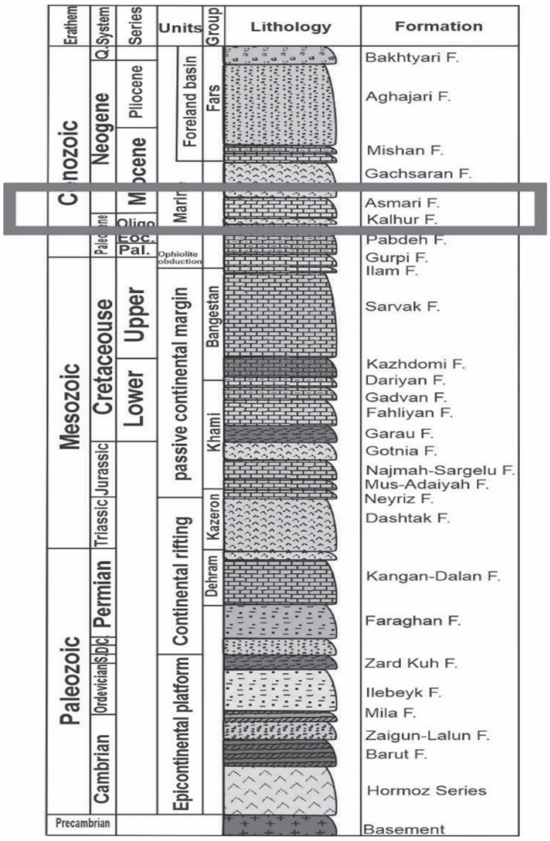
از آنجایی‌که در اکتشاف و تولید نفت به مطالعات ژئومکانیک مخزن توجه ویژه‌ای دارند، در این پژوهش تأثیر رخساره، محیط رسوبی، بافت و دیاژنز بر رفتار ژئومکانیکی سازند آسماری بررسی شده است. داده‌های استفاده شده شامل ۱) داده‌های رسوب‌شناسی مانند پتروگرافی مقطع نازک، تخلخل و چگالی؛ ۲) داده‌های مکانیک سنگ مانند مقاوت تراکمی تک‌محوری و سه‌محرری سنگ، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقاومت کششی سنگ و اندیس شکستگی و حفاری؛ ۳) داده‌های سرعت موج S و P، که برروی ۱۴۰ عدد مغزه رخنمون و چاه انجام شدند. به‌منظور مطالعه رابطه ممکن بین خصوصیات رسوب‌شناسی و مکانیکی سنگی، خصوصیات رسوب شناسی با اندیس رخساره براساس ویژگی‌های بافتی و دیاژنزی رقومی شده‌اند. براساس اندیس رخساره، مقدار تخلخل و مقاومت تراکمی تک محوری سنگ پنج رخساره ژئومکانیکی در سازند آسماری مشخص شد که از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ از رفتار شکل‌پذیر به شکننده تبدیل می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی سنگ توسط محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی کنترل می‌شود که با رقومی کردن خصوصیات رسوب‌شناسی و ایجاد ارتباط با پارامترهای مکانیک سنگی امکان پیش‌بینی مقاومت تراکمی تک محوری سنگ با استفاده از پتروگرافی ایجاد شده است. چنین مطالعاتی کمک موثری در کاهش وقت و هزینه آزمایشات مکانیک سنگ و همچنین در منطقه‌بندی مکانیکی- چینه‌ای مخزن دارد.

کلمات کلیدی: واحدهای ژئومکانیکی، سازند آسماری، مقاومت تراکمی تک محوری، اندیس رخساره، رخساره ژئومکانیکی.

مقدمه

مخزن آسماری به سن الیگومیوسن یکی از مهم‌ترین مخازن کربناته جنوب غرب ایران در حوضه زاگرس است شکل ۱ که تا کنون از نظر رسوب‌شناسی، کیفیت مخزنی، چینه‌نگاری سکانسی و رفتار مکانیک سنگی مورد مطالعات متعددی [۱-۳] قرار گرفته است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی ahamini@ut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4061.2842)



شکل ۱ موقعیت سازند آسماری در ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

بررسی‌های پتروگرافی براساس مقطع نازک نقش اساسی در تعیین خصوصیات بافتی و رخساره‌ای و رابطه میان تاریخچه دیاژنزی/ رخساره‌ای و خصوصیات پتروفیزیکی دارد. رابطه مشخصات رسوب‌شناسی و بافتی با خصوصیات مکانیکی و پتروفیزیکی در برخی مطالعات پیشین بررسی شده است [۴ و ۵]. همچنین مطالعات محدودی در زمینه پیش‌بینی مقاومت تک محوری سنگ با استفاده از پتروگرافی (درصد کانی‌ها) انجام شده است [۵، ۶]. مطالعات مشابهی در سنگ‌های گرانیتی جهت بررسی رابطه‌ای بین مقاومت سنگ و درصد کانی‌های مختلف ارائه شده است [۷]. با این وجود، روابط بین ریزرخساره‌ها و خصوصیات رسوب‌شناسی آنها با رفتار مکانیک سنگی تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. مطالعات ژئومکانیکی مخازن هیدروکربنی نقش مهمی در حفاری، تولید و توسعه میادین دارد [۸]. در این مطالعه، سازند آسماری به واحدهای رخساره ژئومکانیکی[1] تفکیک می‌شود که ناهمگنی‌های مکانیکی سازند را با تغییرات رخساره‌ای و رسوب‌شناسی مرتبط می‌کند. اهداف اصلی این مطالعه شامل: ۱) رقومی کردن پتروگرافی و تعریف اندیس رخساره[2]؛ ۲) ایجاد یک رابطه بین خصوصیات رسوب‌شناسی و مکانیک سنگی براساس مفهوم رخساره ژئومکانیکی و ۳) ارائه یک رابطه تجربی بین خصوصیات پتروگرافی (اندیس رخساره) و مقاومت تراکمی تک محوری سنگ است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این مطالعه تعیین مقاومت تراکمی تک محوری با استفاده از پتروگرافی است.

روش مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از سازند آسماری در دو چاه واقع در یکی از میادین شمال غرب فروافتادگی دزفول و یک رخنمون در نزدیک‌ترین فاصله (حدوداً ۲۰ km) به میدان جمع‌آوری شده‌اند.

1. GeoMechanical Facies (GMF)
2. Facies Index (FI)

در مجموع ۱۴۰ مغزه به ارتفاع ۱۲۰ تا ۸۰ mm و قطر ۵۴/۵ mm از تمامی ریزرخساره‌های سازند آسماری به‌صورت سیستماتیک تهیه شدند. به‌علاوه مقاطع نازک میکروسکوپی و لاگ‌های معمولی از دو چاه نیز جمع‌آوری شدند. آنالیزها به دو بخش اصلی تقسیم می‌شوند: ۱) رسوب‌شناسی شامل مطالعه مقاطع نازک که براساس آن ریز رخساره‌ها، محیط رسوبی، بافت، کانی شناسی، دیاژنز و اندیس رخساره بررسی شده است؛ ۲) آزمایشات مکانیک سنگ شامل آنالیز مقاومت تراکمی تک محوری و سه محوری، مقاومت کششی غیرمستقیم و سرعت موج تراکمی و برشی که براساس این آنالیزها مقاومت تراکمی تک محوری و سه محوری، مقاومت کششی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، اندیس شکنندگی و اندیس حفاری محاسبه شده است.

مقاطع نازک میکروسکپی

مقاطع نازک از بلوک‌های جمع‌آوری شده از رخنمون و دو چاه مورد مطالعه تهیه شدند. به منظور شناسایی تخلخل‌ها، تعدادی از مقاطع با استفاده از اشباع سازی با رزین آبی رنگ تهیه شده و همین‌طور برای شناسایی بلورهای دولومیت بخشی از مقطع نازک با آلیزارین رد- اس رنگ‌آمیزی [۹] و رخساره‌های کربناته براساس طبقه‌بندی دانهام و امبری کلوان طبقه‌بندی شدند. همچنین، محیط رسوبی و ریز رخساره‌های سازند آسماری با رخساره‌های استاندارد تطابق داده شده است [۱۰]. به منظور ایجاد ارتباط میان مشخصات رسوب‌شناسی و خصوصیات مکانیک سنگی، داده‌های توصیفی سنگ‌شناسی توسط اندیس رخساره (FI) کمی سازی شده‌اند. اندیس رخساره براساس ۵ جزء تشکیل‌دهنده سنگ‌های رسوبی یعنی دانه (G)، ماتریکس (M)، تخلخل (P)، سیمان (C) و دولومیت (D) تعریف شده‌اند (رابطه ۱).

$$\text{Facies Index}= G+M+P/C+D \qquad (۱)$$

مقدار هر یک از اجزا به درصد است و مجموع همه اجزا معادل ۱۰۰٪ است. مقاطع نازک در زیر میکروسکوپ نوری، هر یک از اجزا آستانه رنگی متفاوتی دارند که توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر می‌توان درصد هر یک از اجزا را محاسبه کرد. اندیس رخساره غالباً در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ است که مقادیر پایین تأثیر فرآیندهای دیاژنزی سیمانی شدن و دولومیتی شدن را نشان می‌دهد و مقادیر بالا وجود رخساره دانه- غالب با تخلخل یا ریز تخلخل همراه با ماتریکس است.

مقاومت تراکمی سه محوری

۴۵ نمونه از تمامی ریز رخساره‌های سازند آسماری برای انجام این آزمایش انتخاب شدند. نمونه‌ها تحت شرایط استاندارد [۱۱] مورد آزمایش قرار گرفتند، به‌طوری که نسبت طول به قطر آنها در حدود ۲ و دو سر انتهایی استوانه ها کاملاً صاف شده بود. این آزمایش توسط دستگاه سرووکنترل[1] HEI-CO, model NL.502.302 به‌همراه پمپ هیدرولیکی برای ایجاد فشار همه جانبه و تعدادی حسگر اندازه‌گیری واتنش انجام گرفت. از آنجایی‌که مخزن در عمق حدود ۳۴۰۰ m متری قرار داشت به‌منظور شبیه‌سازی شرایط مخزنی فشار همه جانبه ۲۰، ۳۰ و ۴۰ MPa در نظر گرفته شدند.

مقاومت تراکمی تک محوری[2]

۲۲ نمونه برای انجام آنالیز مقاومت تک محوری انتخاب شدند که نمونه‌ها شبیه به آزمایش سه محوری آماده‌سازی شده بودند. این آزمایش نیز توسط دستگاه سرووکنترل HEICO, model NL.502.302 تحت شرایط استاندارد [۱۲] انجام شد.

مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزیلین)

برای اندازه‌گیری غیرمستقیم مقاومت کششی نیز از دستگاه سرووکنترل HEICO استفاده شد. در این آزمایش نمونه‌های دیسکی شکل زیر صفحات بارگذاری قرار می‌گیرند که بعد از بارگذاری به‌طور ناگهانی توسط یک شکستگی برشی راست و مستقیم می‌شکنند.

1. Servo Control
2. Uniaxial Compressive Strength (UCS)

در ایـن آزمایـش، ۴۵ نمونـه بـا قطـر ۵۴/۵ mm و ضخامـت ۲۷ mm بـر طبـق روش‌هـای اسـتاندارد [۱۳] آماده‌سـازی شـدند. نـرخ بارگـذاری بـا سـرعت ثابـت ۱۵ kN/min اعمـال شـد تـا نمونـه شکسـته شـود.

سرعت موج S و P

سـرعت مـوج تراکمـی و برشـی ۴۵ نمونـه در شـرایط آتمسـفر (۱ atm یـا ۰/۱۰۱ MPa) و دمـای اتـاق در آزمایشـگاه بـا دسـتگاه Sonic Viewer model 5217A اندازه‌گیـری شـد. همچنیـن، سـرعت ایـن دو مـوج در چاه‌هـای مطالعاتـی توسـط نگارهـا ثبـت شـده بـود. بـا اسـتفاده از سـرعت مـوج مدول‌هـای کشسـان دینامیکـی، اندیـس شکسـتگی و اندیـس حفـاری تخمیـن زده شـدند.

نتایج

خصوصیات رسوب‌شناسی

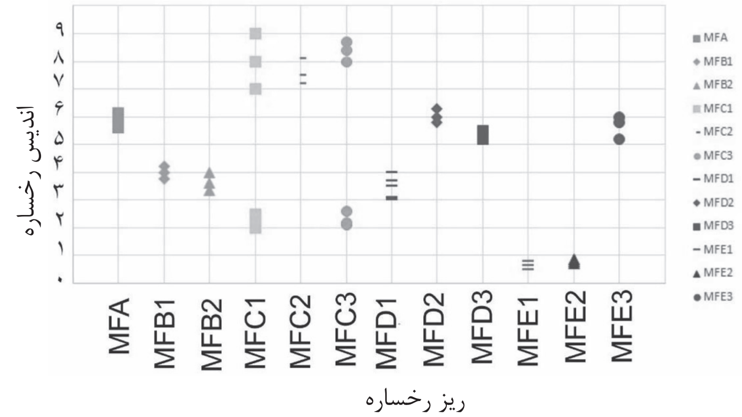
سـازند آسـماری در منطقـه مـورد مطالعـه از نظـر رخسـاره، دیاژنـز، لیتولـوژی و نـوع تخلخـل بسـیار متنـوع اسـت [۱۴]. در مطالعـات قبلـی ایـن میـدان محیـط رسـوبی، رخسـاره‌ها و فرآیندهـای دیاژنـزی سـازند آسـماری به‌طـور دقیـق تعییـن شـده بـود [۲]. براسـاس مطالعـات قبلـی و ایـن مطالعـه ۱۲ ریـز رخسـاره در ۵ کمربنـد رخسـاره‌ای (A to E) از دریـای بـاز تـا پهنـه جـزر و مـدی تعریـف شـدند. بدیـن ترتیـب رخسـاره دریـای بـاز عمیـق (MF A)، دریـای بـاز کـم عمـق (MF A, B)، شـول/ سـد (MF C1, C2, C3)، لاگـون (MF D1, D2, D3) و پهنـه جـزر و مـدی (MF E1, E2, E3) ریـز رخسـاره‌های دریـای بـاز تـا پهنـه جـزر و مـدی سـازند آسـماری هسـتند (جـدول ۱). به‌عـلاوه مهم‌تریـن فرآیندهـای دیاژنـزی سـازند شـامل انحـلال، سـیمانی شـدن، دولومیتـی شـدن، میکرایتـی شـدن و اسـتیلولیتی شـدن اسـت.

اندیس رخساره

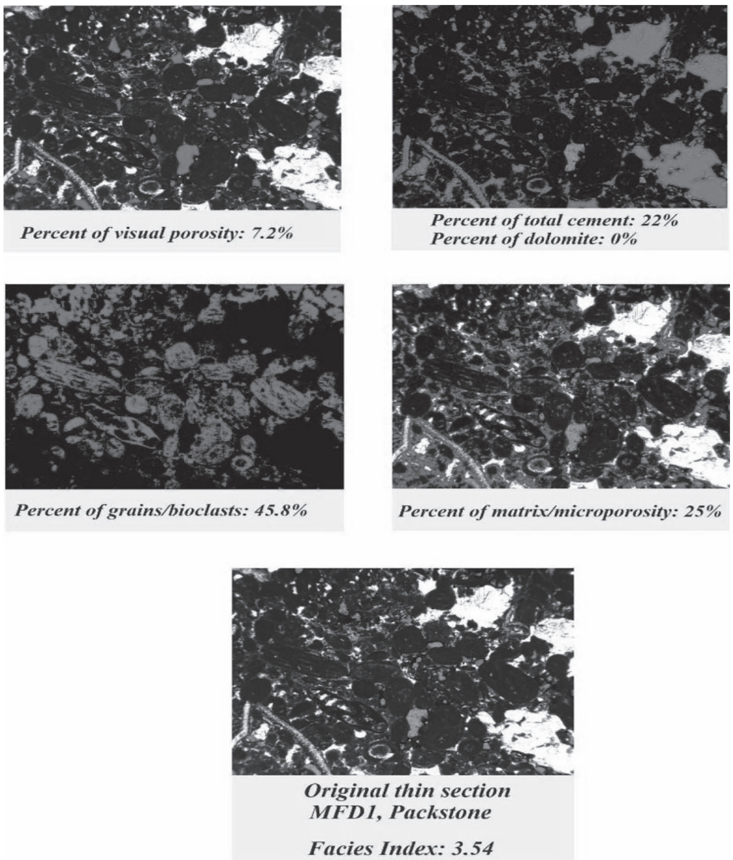
به‌منظـور رقومـی کـردن رخسـاره‌ها از اندیـس رخسـاره اسـتفاده شـد. مقـدار اندیـس رخسـاره در هـر یـک از ۱۲ ریـز رخسـاره سـازند آسـماری براسـاس رابطه ۱ محاسـبه گردیـد (شـکل ۲). بـرای مثـال، اندیـس رخسـاره بـرای ریـز رخسـاره MF D1 بـا اسـتفاده از آنالیـز تصویـر مقطـع نـازک محاسـبه شـد (شـکل ۳). در رخسـاره پرتخلخـل شـول MF C2 مقـدار اندیـس رخسـاره بـالا بـوده اسـت.

جدول ۱ ریز رخساره‌های سازند آسماری

محیط رسوبی	نام رخساره	نام اختصاری
دریای باز عمیق	بایوکلاست وکستون با فرامینیفر پلانکتونیک	MF A
دریای باز کم عمق	بایوکلاست پکستون با فرامینیفرکف زی بزرگ	MF B1
دریای باز کم عمق	بایوکلاست، جلبک قرمز، ایکنودرم، روتالیا پکستون	MF B2
سدی، جلوی شول	اویید گرین استون	MF C1
سدی، مرکز شول	اویید، بایوکلاست گرین استون	MF C2
سدی، پشت شول	بایوکلاست گرین استون	MF C3
لاگون	میلیولید بایوکلاست پکستون	MF D1
مرکز لاگون	میلیولید، دندریتینا وکستون	MF D2
حاشیه لاگون	ایکنویید، جلبک سبز وکستون، مرجان باندستونی	MF D3
سابتایدال	دولومادستون	MF E1
اینترتایدال	دولومادستون ریز لایه با تبخیری	MF E2
سوپرتایدال	جلبک قرمز، استروماتولیت، باندستون/مادستون	MF E3



شکل ۲ مقادیر اندیس رخساره در ۱۲ ریز رخساره سازند آسماری



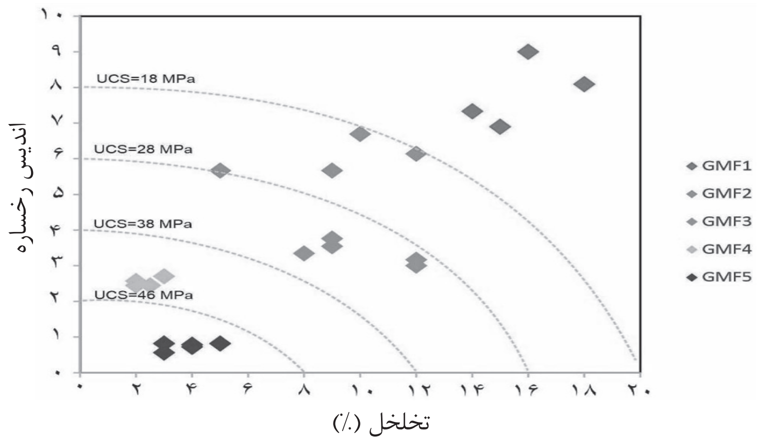
شکل ۳ مثالی از محاسبه پارامترهای اندیس رخساره با استفاده از آنالیز تصویر که مقدار اندیس رخساره در این مقطع نازک برابر ۳/۵۴ می‌باشد

امـا در بعضـی قسـمت‌های حاشـیه‌ای به‌سـوی دریـا و بسـوی لاگـون (MF C1, C3) سـیمانی شـدن شـول موجب کاهش اندیس رخساره شده و توزیع دوقطبی از خـود نشـان می‌دهـد (شـکل ۲). به‌عـلاوه مقـدار اندیس رخساره در ریز رخساره‌های جزر و مدی (MF E1, E2) در اثر فرآیند دولومیتی شدن (دولومادستون) کاهش یافته است و در سایر ریز رخساره‌ها مقادیر متوسط تا بالا نشان می‌دهد (شکل ۲).

رخساره ژئومکانیکی

رخساره ژئومکانیکی براساس ترکیبی از خصوصیات رسوب‌شناسی و مکانیک سنگی تعریف شده است. برای تعیین رخساره‌های ژئومکانیکی در ابتدا اندیس رخساره‌ها تعیین می‌شوند. در گام بعدی مقاومت تراکمی تک محوری و مقدار تخلخل هر یک از

رخساره‌ها نیز تعیین می‌شوند. بسیاری از محققان معتقدند تخلخل یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده UCS است [۱۵]. با ترسیم مقدار اندیس رخساره، تخلخل و مقاومت تراکمی تک محوری ۵ رخساره ژئومکانیکی در سازند آسماری قابل تفکیک است (شکل ۴). رخساره ژئومکانیکی GMF1 شامل ریز رخساره پرتخلخل مرکز شول (MFC2) است که مقدار اندیس رخساره بیش از ۷ است. اندیس رخساره در GMF2 بین ۵ تا ۷ بوده و شامل ریز رخساره‌های دریای باز عمیق (MFA)، لاگون (MFD2) و سوپرتایدال (MFE3) هستند. رخساره ژئومکانیکی GMF3 تشکیل شده از ریز رخساره‌های دریای باز کم عمق (MFB)، و حاشیه لاگون (MF D1, MFD3) است. همچنین، مقدار اندیس رخساره بین ۳ تا ۵ است. رخساره ژئومکانیکی GMF4 شامل رخساره‌های بشدت سیمانی شده حاشیه شول است (MF C1, C3). در این رخساره ژئومکانیکی سیمان کلسیتی/ دولومیتی و دولومیتی شدن (جانشینی) موجب کاهش مقدار اندیس رخساره (۱/۵ تا ۳) شده است. رخساره ژئومکانیکی GMF5 محدود به ریز رخساره‌های پهنه جزر و مدی (MF E1, E2) است و مقدار اندیس رخساره به کمتر از ۱/۵ کاهش می‌یابد. خلاصه‌ای از خصوصیات رسوب‌شناسی رخساره‌های ژئومکانیکی سازند آسماری در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۴ تعیین رخساره‌های ژئومکانیکی سازند آسماری با استفاده از اندیس رخساره، تخلخل و مقاومت تک محوری تراکمی

جدول ۲ خصوصیات رسوب‌شناسی رخساره‌های ژئومکانیکی

اندیس رخساره	نوع منافذ	فرآیندهای دیاژنزی	رخساره/ محیط رسوبی	بافت	رخساره‌های ژئومکانیکی
FI>۷	بین‌ذره‌ای، قالبی	انحلال	شول/ سد (MF C1 تا MF C3)	اوبید/بایوکلاست/ میلیولیدگرین‌استون	رخساره ژئومکانیکی ۱
۵<FI<۷	ریزتخلخل	میکرایتی شدن، فشردگی	لاگون، (MF D2) دریای عمیق (MF A) سوپرتایدال، (MF E3)	مادستون/ باندستون	رخساره ژئومکانیکی ۲
۳<FI<۵	بین ذره‌ای، قالبی، حفره‌ای	سیمانی شدن، انحلال و فشردگی	کانال جزر و مدی، حاشیه شول- لاگون (MF D1, D3) دریای باز کم عمق (MF B2)	پکستون تا وکستون	رخساره ژئومکانیکی۳
۲<FI<۳	ریز تخلخل، حفره‌ای	سیمانی شدن	پشت و جلوی شول (MF C1, C3)	گرین‌استون تا پکستون	رخساره ژئومکانیکی ۴
FI<۱	ریز تخلخل	دولومیتی شدن	پهنه جزر و مدی (MF E1, E2)	مادستون	رخساره ژئومکانیکی ۵

مطالعات ژئومکانیکی

مقاومت تراکمی تک محوری

مقاومت تراکمی تک محوری مواد مختلف از دو طریق قابل اندازه‌گیری است. روش اول اندازه‌گیری مستقیم در آزمایشگاه و روش دوم با استفاده از روابط تجربی و به‌صورت غیرمستقیم است. در این مطالعه، هم از روش آزمایشگاهی و هم روش غیرمستقیم با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوری سنگ استفاده شده است.

مقاومت تراکمی سه محوری[1]

از آنجایی‌که مخزن آسماری در میدان مورد مطالعه در عمق ۳۴۰۰ m قرار دارد با احتساب اینکه به‌طور میانگین حدود ۱۵ MPa/km فشار همه جانبه در شرایط زیر سطح به‌وجود می‌آید در آنالیزهای سه محوری فشار همه جانبه در شرایط بدون زهکشی و حداکثر ۴۰ MPa در نظر گرفته شد. در شکل ۵ نمودارهای تنش- واتنش با فشار همه جانبه ۲۰، ۳۰ و ۴۰ MPa برای ۵ رخساره ژئومکانیکی نشان داده شده است.

آزمایش برزیلین

مقاومت کششی یکی از پارامترهای کنترل کننده در شکستگی هیدرولیکی، گسترش شکستگی و باز شدن مود یک[2] (mod شکستگی است. از آنجایی‌که روش مستقیم آزمایش مقاومت کششی سنگ هزینه بر و روش آماده‌سازی نمونه در آن بسیار دشوار است، از آزمایش برزیلین به‌عنوان یک روش غیرمستقیم برای به‌دست آوردن مقاومت کششی سنگ استفاده می‌شود. مقاومت کششی برای ۵ رخساره ژئومکانیکی در شکل ۶ نشان داده شده است به‌طوری‌که از GMF1 تا GMF5 مقدار مقاومت کششی افزایش می‌یابد. GMF1 به دلیل بافت دانه غالب و تخلخل بالا دارای مقاومت کششی پایینی است. GMF2 با بافت گل غالب و وجود ریزتخلخل در ماتریکس و درصد سیمان پایین مقاومت کششی پایینی دارد اما نسبت به GMF1 مقاومت بالاتری نشان می‌دهد. پکستون‌ها در GMF3 مقاومت کششی متوسطی را نشان می‌دهند اما در GMF 4, 5 به دلیل سیمانی شدن شدید و بلورهای ریز دولومیت مقاومت کششی بالایی را نسبت به سایر رخساره‌های دیگر سازند آسماری از خود نشان می‌دهند.

اندیس شکستگی

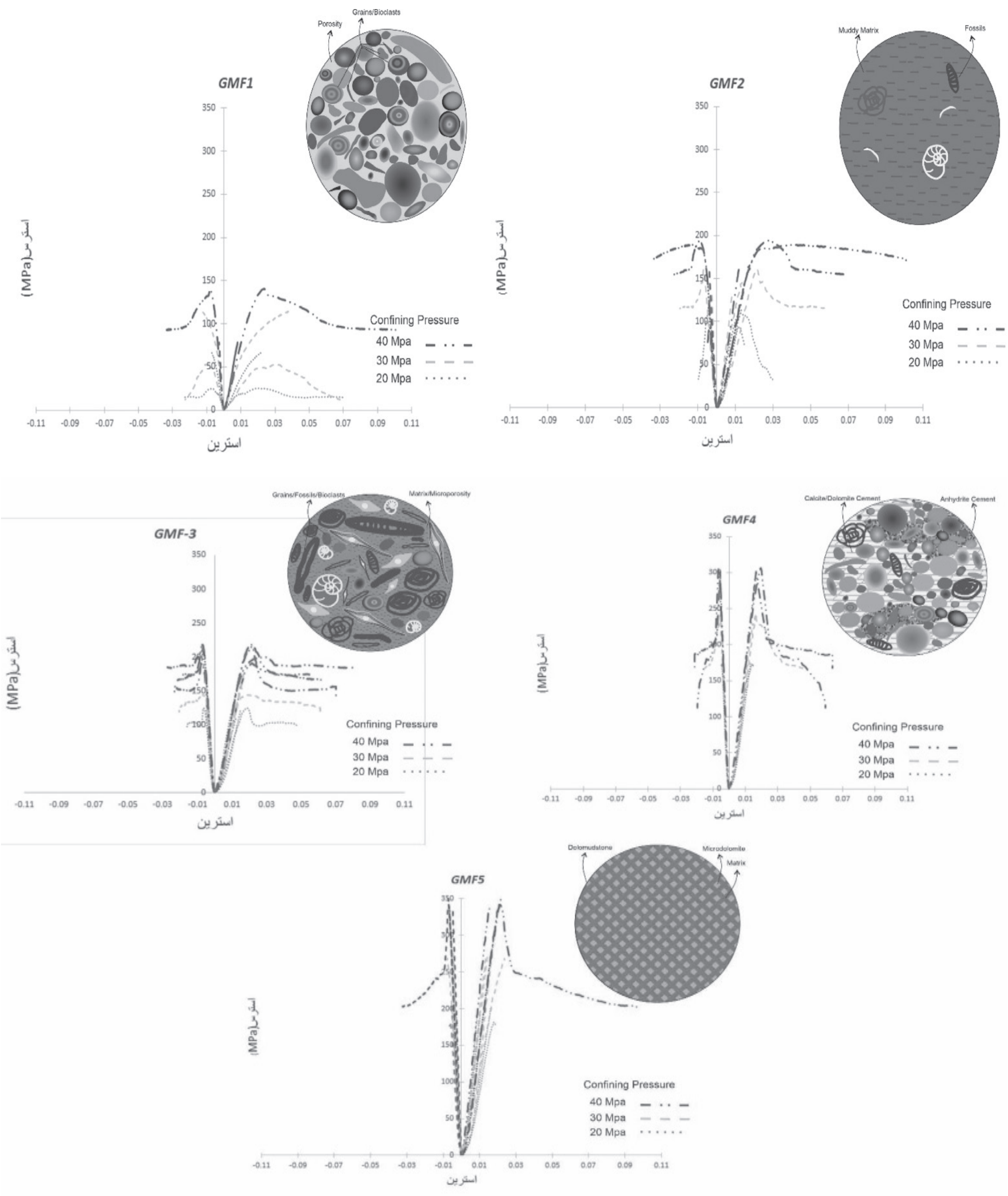
اندیس شکستگی اصطلاح رایجی است که در مهندسی و زمین‌شناسی برای شناسایی امکان شکست در سنگ استفاده می‌شود [۱۶]. روش‌های مختلفی برای اندیس شکستگی سنگ براساس پارامترهای متفاوت ارائه شده است [۱۷] که در این مطالعه از سرعت موج تراکمی و برشی استفاده می‌شود. با استفاده از سرعت موج S و P مقادیر ثابت $\lambda\rho$ و $\mu\rho$ محاسبه شدند. با کراس پلات $\lambda\rho$– $\mu\rho$ اندیس شکستگی قابل پیش بینی است. این کراس پلات به ۴ بخش تقسیم می‌شود که از چپ به راست از حالت شکننده به شکل‌پذیر تبدیل می‌شود. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است GMF1 در منطقه شکل‌پذیر و GMF5 در منطقه شکننده قرار دارد و سایر رخساره‌های ژئومکانیکی در بین این دو محدوده قرار دارند. محدوده گسترده رفتار شکننده تا شکل‌پذیر در ریز رخساره‌های سازند آسماری نشان دهنده تنوع بافتی و دیاژنزی رخساره‌ها است.

بحث

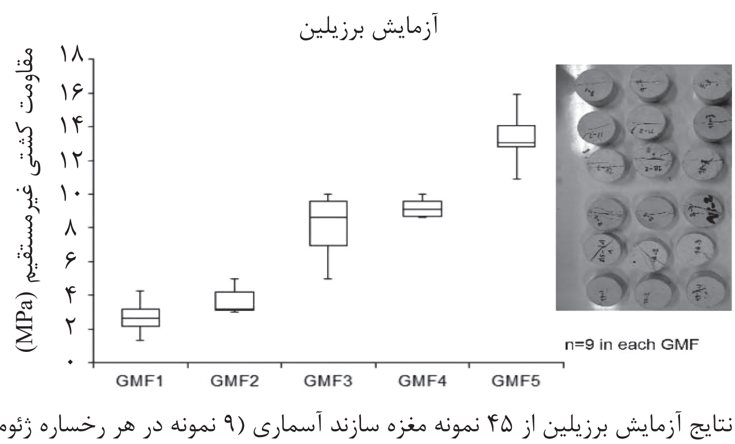
خصوصیات رخساره‌های ژئومکانیکی

براساس نتایج آنالیزها می‌توان اثبات کرد که محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی مهم‌ترین فاکتورهای کنترل کننده خصوصیات ژئومکانیکی سازند آسماری هستند. در این مطالعه براساس اندیس رخساره، مقدار تخلخل و مقاومت تراکمی تک محوری، ۵ رخساره ژئومکانیکی در سازند مورد مطالعه شناسایی شدند که در ادامه در مورد هر یک از آنها بحث خواهد شد.

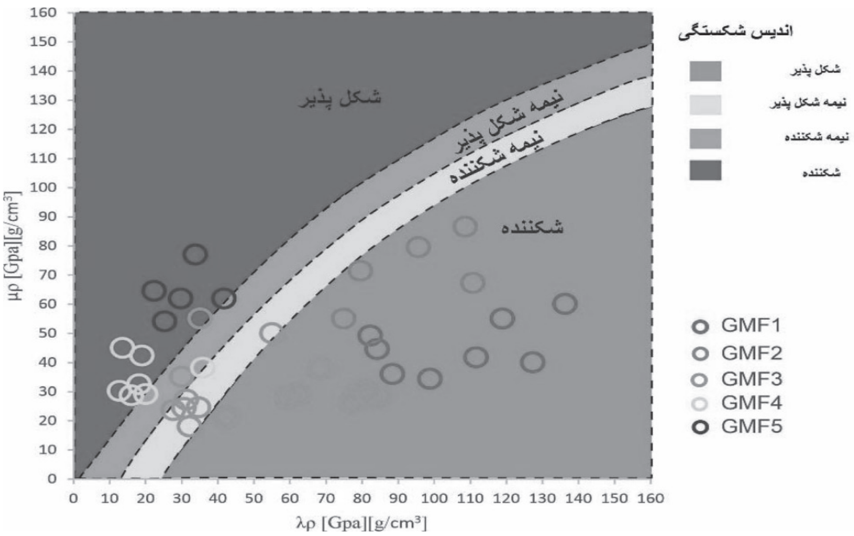
1. Triaxial Compressive Strength
2. Mode I



شکل ۵ نمودارهای تنش- واتنش ۵ رخساره ژئومکانیکی حاصل از آزمایشات مقاومت تراکمی سه محوری سنگ



شکل ۶ نتایج آزمایش برزیلین از ۴۵ نمونه مغزه سازند آسماری (۹ نمونه در هر رخساره ژئومکانیکی)



شکل ۷ نمودار متقاطع لاندو رو- مو رو رفتار شکننده یا شکل‌پذیر رخساره‌های ژئومکانیکی را نشان می‌دهد [۲۳]

رخساره ژئومکانیکی ۱: این رخساره ژئومکانیکی ریزرخساره گرین‌استون اوییدی/بایوکلاستی با بافت دانه غالب که نشان دهنده محیط پرانرژی شول است را در برمی‌گیرد (جدول ۱). رخساره مرکزی شول (MF C۲) ریزرخساره اصلی در این واحد ژئومکانیکی است. اوییدهای بزرگ با جورشدگی خوب با تخلخل بین‌دانه‌ای ۱۹٪ و بدون فرآیندهای دیاژنزی مخرب تخلخل در قسمت مرکزی شول‌ها دیده می‌شوند. در بعضی توالی‌های شول تخلخل قالبی اوییدها حاصل از انحلال وجود دارد. در نتیجه این فرآیندهای رسوبی و دیاژنزی اندیس رخساره بیشتر از ۷ می‌شود (شکل ۲). همچنین مقدار مقاومت تراکمی تک محوری در این رخساره ژومکانیکی کمتر از ۱۸ MPa می‌باشد (شکل ۴). رفتار شکل‌پذیر رخساره ژئومکانیکی ۱ مقدار بسیار کم سیمان در بین دانه‌ها است شکل ۷. به‌علاوه مقدار ماتریکس نیز در این رخساه ژئومکانیکی بسیار کم است و ندرتاً به‌صورت جزئی و ریزتخلخل دیده شده‌اند.

رخساره ژئومکانیکی ۲: محیط‌های کم انرژی مانند دریای باز عمیق، مرکز لاگون و پهنه سوپرتایدال مهم‌ترین محیط‌های رسوبی مرتبط با این رخساره ژئومکانیکی هستند (جدول ۱). همچنین بافت ریز دانه گل غالب همراه با ریز تخلخل از مشخصات این واحد ژئومکانیکی است. فشردگی، استیلولیت و کانی‌های رسی دیاژنزی جزء مهم‌ترین عوارض دیاژنزی هستند. مقدار اندیس رخساره بین ۵ تا ۷ (شکل ۲) و مقدار مقاومت تراکمی تک محوری بین ۱۸ تا ۲۸ MPa (شکل ۴) است. محیط کم انرژی گل غالب همراه با ماتریکس زیاد و ریزتخلخل رفتار شکل‌پذیر را به سنگ القا می‌کند (شکل ۷).

رخساره ژئومکانیکی ۳: رسوبات این واحد ژئومکانیکی شامل محیط رسوبی با انرژی متوسط مانند دریای باز کم عمق، حاشیه لاگون (MF D1, D3) و کانال‌های جزر و مدی هستند (جدول ۱). در بعضی نمونه‌های این واحد ژئومکانیکی باندستون نیز مشاهده شده است ولی به‌طور کلی قطعات بیوکلاست در یک ماتریکس گلی پراکنده شده است (پکستون). سیمان‌های پراکنده، انحلال و میکرایتی شدن فسیل‌ها مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی هستند. مقدار اندیس رخساره بین ۳ تا ۵ و مقاومت تراکمی تک محوری بین ۲۸ تا ۳۸ MPa است (شکل‌های ۲ و ۴). بافت نسبتاً دانه غالب با سیمان جزئی رفتار شکل‌پذیر- شکننده به سنگ القا می‌کند (شکل ۷). رخساره ژئومکانیکی ۴: رخساره

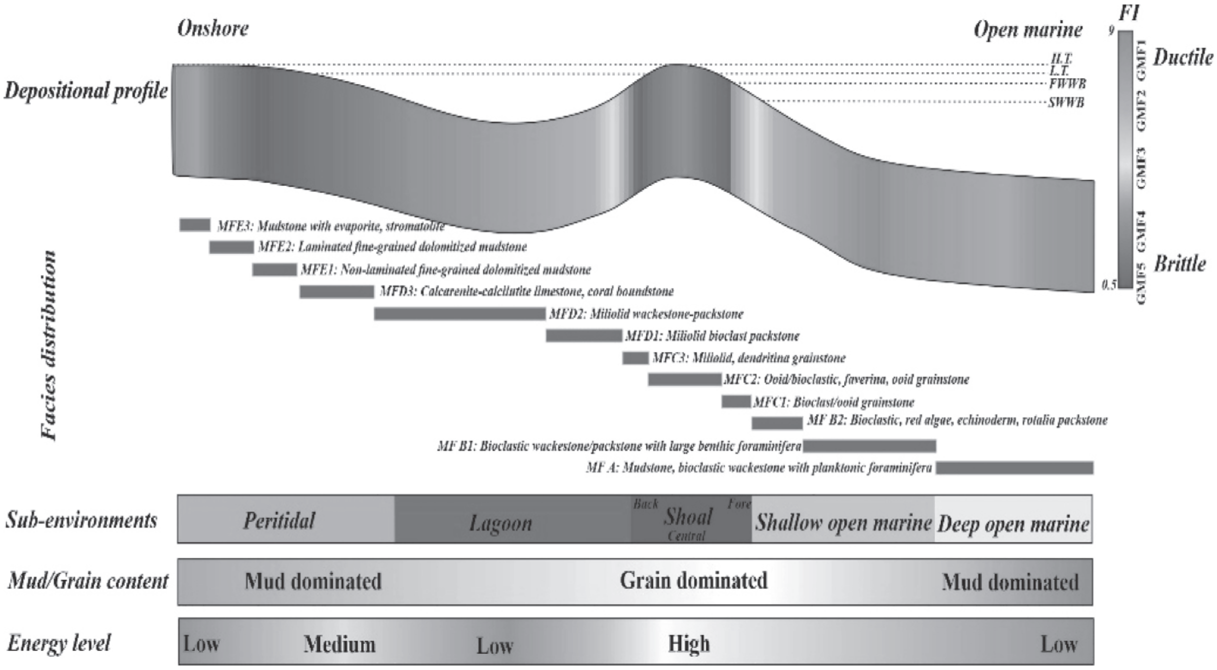
محیط‌های جلوی شول و پشت شول محدود به این واحد ژئومکانیکی می‌شوند (جدول ۱). در محیط جلو و پشت شول و بخصوص در قسمت جلوی شول آب دریا به داخل رسوبات پرتخلخل شول پمپ شده و به دلیل گردش سریع سیالات دیاژنزی در این محیط رخساره گرین استونی بشدت سیمانی می‌شود. نتیجتاً دانه‌ها (اووید/ بایوکلاست) در این زیرمحیط‌ها به‌شدت به یکدیگر سیمان می‌شوند. انواع مختلف سیمان مانند انیدریت، کلسیت و دولومیت در رخساره ژئومکانیکی ۴ دیده می‌شوند. در این واحد تمامی فضای بین دانه‌ای توسط سیمان پر شده و مقدار اندیس رخساره به ۱/۵ تا ۳ کاهش می‌یابد (شکل ۲). همچنین مقدار مقاومت تراکمی تک محوری بین ۳۸ تا ۴۶ MPa است که بستگی به شدت سیمان شدگی دارد (شکل ۴). وجود سیمان در بین دانه‌های سنگ رفتار نیمه شکننده تا شکننده القا می‌کند (شکل ۷).

رخساره ژئومکانیکی ۵: محیط‌های پهنه جزر و مدی و به‌خصوص سابتایدال (MF E1, E2) مشخص این واحد ژئومکانیکی هستند (جدول ۱). در نتیجه ورود شورابه‌های غنی از Mg در رسوبات پهنه گل غالب جزر و مدی مادستون‌ها به دولومادستون تغییر پیدا می‌کنند. وجود بلورهای ریز دولومیت و قفل شدن بلورها در یکدیگر یک چارچوب مقاوم برای سنگ ایجاد می‌کند. مقدار اندیس رخساره در این واحد به کمترین مقدار (<۱/۵) (شکل ۲) و مقاومت تراکمی تک محوری به بیشترین مقدار (>۴۸ MPa) می‌رسند (شکل ۴). همچنین گسترش زیاد بلورهای دولومیت در سنگ نیز رفتار شکننده القا می‌کند (شکل ۷).

توزیع اندیس رخساره در رمپ آسماری

محیط رسوبی با سطوح متفاوت انرژی باعث ته‌نشست رسوبات با خصوصیات متفاوت بافتی و فیزیکی می‌شود که این خصوصیات بعداً کنترل کننده فرآیندهای دیاژنزی نیز هستند. اندیس رخساره پارامتری است که هم پارامترهای بافتی و هم فرآیندهای دیاژنزی مهم که بر رفتار مکانیک سنگ تأثیر می‌گذارند را در بر می‌گیرد. لذا به‌نظر می‌رسد می‌توان توزیع اندیس رخساره را به محیط رسوبی ارتباط داد. در این مطالعه رمپ آسماری به محیط پر انرژی، متوسط انرژی و کم انرژی تقسیم شده است که در زیر به تفسیر آن می‌پردازیم. محیط پر انرژی: در رمپ میانی جایی که رخساره‌های شول گسترش دارند یکی از پرانرژی‌ترین محیط‌های رمپ است. در محیط‌های جلو و پشت شول (MF C1, C3) اینتراکلاستها، دوکفه‌ای‌ها، ایکنوییدها، گاستروپودها و قطعات فسیلی دیگر رایج هستند. همچنین اویسترها در اندازه پبل و جلبک‌های قرمز در اندازه ماسه و فرامینیفرهای بنتیک جزء فراوانترین دانه‌های این محیط‌ها هستند. این آلوکم ها معمولاً در اطراف سطح تأثیر موج‌های آرام[1] فراوانی بیشتری دارند. این رخساره‌ها تحت تأثیر موج و جزر و مد به‌صورت دانه غالب گسترش می‌یابند. رسوبات پرتخلخل دانه غالب که تحت تأثیر امواج قرار دارند در اثر پمپاژ آب دریا و گردش سیالات دیاژنزی در محیط ائو و مزو دیاژنز سیمانی می‌شوند. سیمان انیدریتی با بافت پویکیلوتوپیک و دولومیت جانشینی از نوع انتخاب فابریک نیز فراوان هستند. در زیر محیط پشت و جلوی شول سیمانی شدن و دولومیتی شدن یکی از رایج‌ترین فرآیندهای دیاژنزی هستند که موجب کاهش اندیس رخساره شده است (شکل ۸). در قسمت میانی شول (MF C2) اوییدگرین استون همراه با اوییدهای در اندازه ماسه و قطعات فسیلی مانند دوکفه‌ای، گاستروپود، ایکنودرم و اینتراکلاست‌ها به مقدار کمتر دیده می‌شوند. همچنین، بایوکلاست مادستون تا فلوتستون و هگزاکورال ها نشانه‌هایی از ریف‌های کومه‌ای هستند که به‌صورت محلی اطراف FWWB قرار دارند. رخساره مرکزی شول تحت تأثیر دیاژنز متئوریک با ایجاد بافت انحلال قالبی در اوییدها موجب افزایش تخلخل شده است.

1. Fair Weather Wave Base (FWWB)



شکل ۸ توزیع اندیس رخساره در رمپ آسماری.

به‌علاوه، میکرایتی شدن اوییدها ندرتاً دیده می‌شود. در محیط پر انرژی وجود درصد بالای دانه و تخلخل و گسترش بسیار کم سیمان باعث افزایش اندیس رخساره در این محیط شده است (شکل ۸).

محیط انرژی متوسط: محیط‌های انرژی متوسط رمپ آسماری شامل دریای باز کم عمق (MF B1, B2) و حاشیه لاگون (MF D1, D3) هستند. مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده دریای باز قطعات فسیلی اندازه گراول تا ماسه (مانند دو کفه‌ای، بریوزآ، ایکنودرم و جلبک پیسونلیا) که در زیر سطح اثر موج‌های طوفانی[1] قرار دارند. محیط حاشیه لاگون غالباً از قطعات فسیلی در اندازه گراول و ایکنوئیدها که در ماتریکس گلی تشکیل شده است. در قسمت رو به دریای لاگون مولوسک قطعات فسیلی (دوکفه‌ها و گاستروپود) و میلیولید هم در ماتریکس دیده می‌شوند. بیوکلاست‌ها تخلخلی در حدود ۱۴٪ نشان می‌دهند و فرآیندهای دیاژنزی مانند سیمان کلسیتی با فابریک حاشیه‌ای، دروزی، فیبری، پرکننده حفرات و میکرایتی شدن آلوکم ها فراوان است. چنین خصوصیتی باعث شده مقدار اندیس رخساره در این محیط‌ها بین ۳ تا ۵ باشد (شکل ۸).

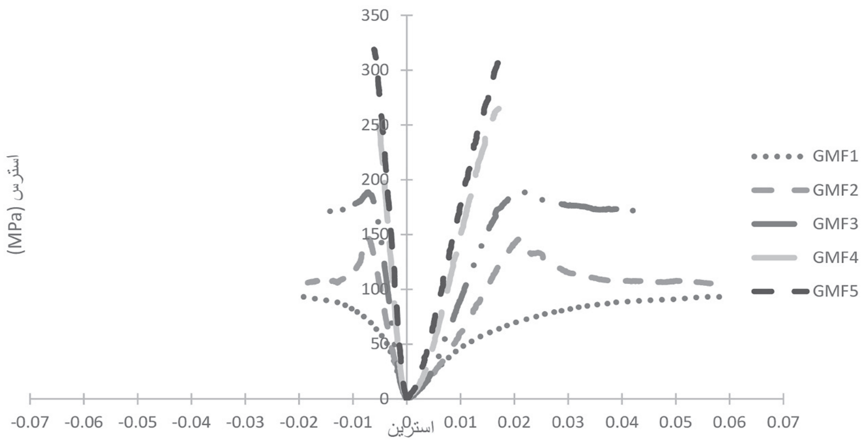
محیط کم انرژی: دریای باز عمیق در قسمت بیرونی رمپ، مرکز لاگون و پهنه گلی بالای جزر و مدی جز محیط‌های کم انرژی سازند آسماری محسوب می‌شوند. وجود ماتریکس گلی در رخساره‌های کم انرژی بسیار رایج است به‌طوری که فرامینیفرهای پلانکتونیک دریای باز درون ماتریکس گلی یافت می‌شوند. یکی دیگر از محیط‌های کم انرژی در رمپ داخلی، رسوبات مرکز لاگون (MF D2) است که در توالی رسوبی ضخامت زیادی دارند. در این رخساره روتالیدها و استراکدها جزء فراوان ترین قطعات فسیلی هستند. وکستون و مادستون های این رخساره ها گاهی دارای زیست آشفتگی و استیلولیت هستند. به‌علاوه، میکرایتی شدن و فسیل‌های لاگون و پلوئیدهای درون ماتریکس گلی جزء مهم‌ترین مشخصاتشان است. محیط بالای جزر و مدی یکی دیگر از محیط‌های کم انرژی بوده که شامل رخساره‌های گل غالب با ساخت فنسترال است. همچنین ندرتاً بافت استروماتولیت و انیدریت به‌صورت محلی نیز دیده می‌شود.

1. Storm Wave Base (SWB)

وجود ماتریکس زیاد و بافت گل غالب موجب شده مقدار اندیس رخساره بین ۵ تا ۷ باشد (شکل ۸).

رفتار مکانیک سنگی رخساره‌های ژئومکانیکی

نمودارهای تنش- واتنش رخساره‌های ژئومکانیکی نشان می‌دهد که پیک تنش از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ از ۱۴۰ MPa به ۳۵۰ MPa می‌رسد (شکل ۵). به‌علاوه، از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۳ این نمودارها روند افزاینده ملایم[1] دارند که مشخصات سنگ‌های نرم بوده ولی در رخساره ژئومکانیکی ۴ و ۵ روند افزایشی تند[2] دارد که مشخصه سنگ‌های صلب[3] است. تغییر رفتار مکانیکی سنگ از حالت نرم به صلب مرتبط با اندیس رخساره است. مساحت زیر نمودار تنش- واتنش نشان‌دهنده انرژی مصرف شده (کار) برای شکست سنگ است [۱۸] که این انرژی از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ افزایش می‌یابد. این افزایش در انرژی را می‌توان به کاهش اندیس رخساره ارتباط داد. میانگین نمودار تنش-واتنش نشان می‌دهد که از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ مقدار انرژی الاستیک افزایش یافته و مقدار انرژی پلاستیک کاهش می‌یابد (شکل ۹). محدوده اندیس رخساره و پارامترهای مکانیک سنگ رخساره‌های ژئومکانیکی در جدول ۳ ارائه شده است. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ دو پارامتر مکانیک سنگ است که از معیار مور- کولمب به‌دست آمده‌اند. مقادیر پارامترهای ذکر شده و UCS در مقابل اندیس رخساره رابطه معکوسی نشان می‌دهد.



شکل ۹ نمودارهای استرس- استرین میانگین برای رخساره‌های ژئومکانیکی سازند آسماری. مساحت زیر نمودارها نشان‌دهنده مجموع انرژی الاستیک و پلاستیک یا کار می‌باشد

جدول ۳ محدوده مقادیر اندیس رخساره، مقاومت تک محوری، مقاومت کششی، و اندیس شکستگی در هر یک از رخساره‌های ژئومکانیکی

رخساره‌های ژئومکانیک	اندیس رخساره	مقاومت تک محوری (MPa)	مقاومت کششی*(MPa)	اندیس شکستگی
رخساره ژئومکانیکی ۱	FI ≥ ۷	<۱۸	۱-۴	خیلی شکل‌پذیر
رخساره ژئومکانیکی ۲	۵ ≤ FI<۷	۱۸-۲۸	۳-۵	شکل‌پذیر
رخساره ژئومکانیکی ۳	۳<FI <۵	۲۸-۳۸	۵-۸/۵	نیمه شکل‌پذیر- شکننده
رخساره ژئومکانیکی ۴	۲<FI ≤ ۳	۳۸-۴۵	۸/۵-۱۰	شکننده
رخساره ژئومکانیکی ۵	FI<۱	>۴۵	۱۰-۱۵	خیلی شکننده

1. Smooth Softening
2. Sharp Softening
3. Stiff

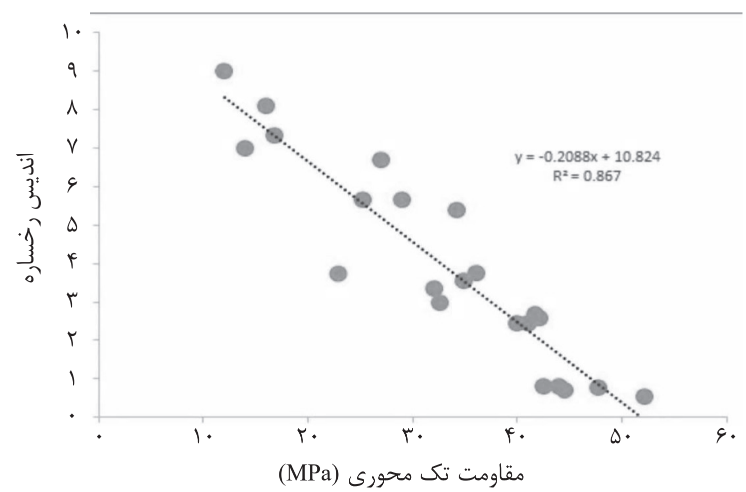
با کاهش مقدار اندیس رخساره به عبارتی، افزایش سیمان و دولومیت مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز افزایش می‌یابد. به‌علاوه، مقدار مقاومت کششی سنگ نیز از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ افزایش می‌یابد و رابطه معکوسی با اندیس رخساره دارد (شکل ۶).

رابطه بین اندیس رخساره و مقاومت تک محوری تراکمی

در مطالعات قبلی رابطه بین خصوصیات رسوب‌شناسی با مدول‌های کشسان سنگ بررسی شده بود [۱۹] ولی در این مطالعه به بررسی رابطه بین اندیس رخساره و مقاومت تراکمی تک محوری سنگ از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن[1] استفاده شده است. این تطابق براساس یک روش آماری غیرپارامتری[2] است که ارتباط بین دو مؤلفه را بررسی می‌کند [۲۰]. در این روش اگر مقدار R^2 به یک نزدیک شود و مقدار P نیز کمتر از ۰/۰۵ باشد، دو پارامتر رابطه قوی با یکدیگر دارند. نتیجه این تطابق نشان می‌دهد که ارتباط قوی معکوسی بین دو پارامتر FI و UCS وجود دارد (جدول ۴ و شکل ۱۰). از آنجایی‌که مقدار FI از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ کاهش می‌یابد مقدار دانه‌ها و تخلخل نیز کاهش یافته و برعکس، مقدار سیمان و دولومیت افزایش می‌یابد که درنتیجه این تغییرات بافتی و دیاژنزی، مقدار UCS از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ افزایش می‌یابد. با توجه به تطابق ۸۷٪ و رابطه خطی که بین دو پارامتر وجود دارد، می‌توان مقاومت تراکمی تک محوری سنگ را با استفاده از پتروگرافی و محاسبه اندیس رخساره به‌دست آورد (جدول ۴).

جدول ۴ نتایج همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن رابطه خوب (مقدار P کمتر از ۰/۰۵) (تطابق ۸۷٪) بین اندیس رخساره و مقاومت تک محوری سنگ را نشان می‌دهد

<table>
<tr><td>Variables</td><td colspan="2">Spearman rank correlation</td><td>Sample size</td><td></td></tr>
<tr><td>FI and UCS</td><td>P: 1.479e-08</td><td></td><td>22</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Predicted equation</td><td colspan="3">Correlation coefficient</td></tr>
<tr><td colspan="2">FI = -0.2088UCS + 10.824</td><td colspan="3">R²: -0.867</td></tr>
</table>



شکل ۱۰ نمودار متقاطع اندیس رخساره در مقابل مقاومت تک محوری و رابطه خطی بین دو پارامتر

1. Spearman’s Rank Correlation
2. Nonparametric
3. Discrepancy

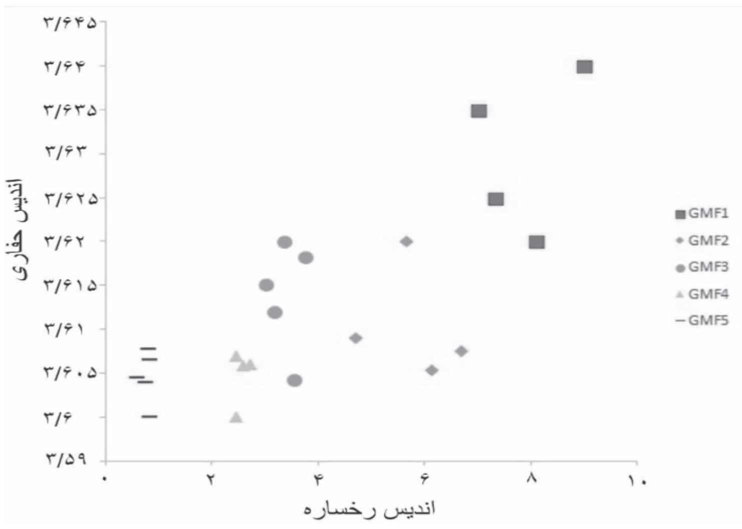
در مطالعات قبلی نیز نشان داده شده بود که رابطه معکوسی بین تخلخل و UCS وجود دارد [۲۱]. با این وجود تاحدودی عدم تطابق۳ بین داده‌ها وجود داشت که نشان می‌دهد به‌غیر از تخلخل سنگ رسوبی، پارامترهای دیگری مانند بافت و دیاژنز نیز بر UCS تأثیرگذار می‌باشند.

کاربردهای مخزنی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای مطالعات مکانیک سنگ در نفت پیش‌بینی نرخ نفوذ مته در طی حفاری است. قابلیت حفاری عبارت است از توانایی مقاومت سنگ در برابر خرد شدن به‌وسیله مته حفاری [۲۲]. در صورت نبود اطلاعات از خصوصیات مکانیک سنگی سازند ممکن است موجب اشتباه در انتخاب سرمته مناسب شود. همچنین برای افزایش راندمان حفاری و کاهش هزینه‌ها، مطالعه رفتار مکانیک سنگی سازندها اهمیت بالایی دارد که اندیس قابلیت حفاری[1] یکی از مهم‌ترین خصوصیات مکانیک سنگی است. در این مطالعه، از نگارهای صوتی برای پیش‌بینی اندیس حفاری در سازند آسماری استفاده شده است. بآیی رابطه‌ای برای محاسبه اندیس حفاری با استفاده از سرعت موج تراکمی (P) ارائه داده است (رابطه ۲):

$$DI=0.2390\times(808.0800\times e^{0.003\times V_p}) \ 0.4043 \qquad (۲)$$

در اینجا DI اندیس حفاری و V_p سرعت موج تراکمی است. اندیس حفاری در ۵ رخساره ژئومکانیکی سازند آسماری با استفاده از رابطه بالا هم در مغزه‌ها و هم توسط نگار صوتی دوقطبی (DSI) در چاه محاسبه شد. به‌منظور بررسی رابطه اندیس رخساره با اندیس حفاری با رسم کردن این دو پارامتر نتایج نشان داد که یک رابطه مستقیم بین دو پارامتر وجود دارد (شکل ۱۱). با افزایش مقدار اندیس رخساره در واقع درصد دانه، تخلخل و ماتریکس (ریزتخلخل) افزایش می‌یابد. بنابراین، نرخ نفوذ مته نیز در رخساره‌های ژئومکانیکی ۱ و ۲ زیاد است. متعاقباً با کاهش اندیس رخساره درصد سیمان و دولومیت در سنگ افزایش یافته که نتیجتاً نرخ نفوذ مته در رخساره‌های ژئومکانیکی ۴ و ۵ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ رابطه بین اندیس رخساره و اندیس حفاری.

1. Drillability Index

نتیجه‌گیری

سازند آسماری یکی از ناهمگن‌ترین سازندهای مخزنی در جنوب غرب ایران است. این سازند دارای تنوع رخساره‌ای از دریای باز عمیق تا پهنه بالای جزر و مدی به‌همراه فرآیندهای متفاوت دیاژنزی است. این تنوع در رخساره و دیاژنز موجب تنوع در رفتار ژئومکانیکی سازند نیز شده است. مهم‌ترین نقطه قوت این مقاله ایجاد ارتباط بین پارامترهای رسوب‌شناسی و مکانیک سنگی است و از طرفی، نقطه ضعف این مطالعه وجود شکستگی یا ریزشکستگی در سنگ‌های کربناته است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

۱- در این مطالعه رخساره‌ها توسط اندیس رخساره رقومی شده‌اند. اندیس رخساره براساس تشکیل‌دهنده‌های اصلی سنگ رسوبی تعریف و به‌روش آنالیز تصویر محاسبه می‌شوند. مقدار اندیس رخساره در سازند آسماری در محدوده ۰/۱ تا ۹ است. بیشترین مقدار آن مربوط به رخساره پرتخلخل اویید گرین استون شول است و در رخساره‌های دریای باز، مرکز لاگون و پهنه جزر و مدی مقدار اندیس رخساره متوسط تا بالا، و دریای باز کم عمق، حاشیه لاگون متوسط می باشد. در رخساره‌های قسمت جلو و پشت شول بدلیل سیمانی شدن شدید مقدار اندیس رخساره پایین است و کمترین مقدار اندیس رخساره مربوط به دولومادستون‌های بالای پهنه جزر و مدی است.

۲- براساس مقادیر اندیس رخساره، مقاومت تراکمی تک محوری و تخلخل سازند آسماری به ۵ رخساره ژئومکانیکی تقسیم شد. GMF1 مربوط به رخساره پرانرژی شول با FI>7 و مقدار UCS بین ۱۲ تا MPa ۱۸ است. در قسمت جلو و پشت رخسار پرانرژی شول بر اثر سیمانی شدن تخلخل خود را از دست داده و مقدار FI بین ۱/۵ تا ۳ بوده و مقدار UCS بین ۳۸ تا MPa ۴۶ است (GMF4). در رخساره‌های انرژی متوسط مانند دریای باز کم عمق و حاشیه لاگون مقدار FI بین ۳ تا ۵ و مقدار UCS ۲۸ تا MPa ۳۸ است (GMF3). رخسارهای گل غالب محیط کم انرژی مانند دریای باز و مرکز لاگون مقدار FI بین ۵ تا ۷ و مقدار UCS بین ۱۸ تا MPa ۲۸ بوده است (GMF2). در GMF5 رخساره‌های گل غالب بالای جزر و مدی در اثر فرآیندهای دیاژنزی به دولومادستون‌ها با FI<1 و بیشترین مقاومت تراکمی تک محوری (UCS>46) است.

۳- این مطالعه نشان داد که اندیس رخساره با تطابق ۸۷٪ رابطه معکوس با UCS دارد. بر این اساس رابطه خطی بین FI و UCS به‌دست آمد که با استفاده از پتروگرافی و آنالیز تصویر می‌توان UCS را تخمین زد. همچنین سایر پارامترهای مکانیک سنگی روند معکوسی را با اندیس رخساره نشان می‌دهند.

۴- مقادیر دو پارامتر دیگر مکانیک سنگ مانند اندیس شکنندگی و حفاری از رخساره ژئومکانیکی ۱ تا ۵ افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه در منطقه‌بندی دقیق‌تر سازند از نظر واحدهای مکانیکی- چینه‌ای مفید و مؤثر باشد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهش‌گران با شماره طرح: ۹۶۰۱۳۱۴۷ و امکانات آزمایشگاهی دانشگاه تهران، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و تربیت مدرس انجام شده است. از مسئولین بخش پژوهش و توسعه شرکت نفت مناطق مرکزی ایران بابت داده‌های یکی از میادین و اجازه چاپ داده‌ها تشکر می‌نماییم.

مراجع

[1]. Gharechelou S, Daraei M, Amini A (2016) Pore types distribution and their reservoir properties in the sequence stratigraphic framework: a case study from the Oligo-Miocene Asmari Formation, SW Iran, Arabian Journal of Geosciences, 9, 3: 194.

[2]. Honarmand J, Amini A (2012) Diagenetic processes and reservoir properties in the ooid grainstones of the

Asmari Formation, Cheshmeh Khush Oil Field, SW Iran, Journal of Petroleum Science and Engineering, 81: 70-79.
[3]. Gharachelou S, Amini A, Kadkhodaei A, Hosseini Z, Honarmand J (2018) Rock typing and reservoir zonation based on the NMR logging and geological attributes in the mixed carbonate-siliciclastic Asmari Reservoir, Geopersia, 8, 1:77-98.
[4]. Descamps F, Gomord OF, Vandycke S, Schroeder C, Swennen R, Tshibangu JP (2017) Relationships between geomechanical properties and lithotypes in NW European chalks, The Geological Society of London, Special Publications, 458: 227-244, .
[5]. Ozturk CA, Nasuf E (2013) Strength classification of rock material based on textural properties, Tunnelling and Underground Space Technology, 37: 45–54, .
[6]. Ajalloeian R, Mansouri H, Baradaran E (2017) Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76, 1: 295-307.
[7]. Irfan TY, Dearmann WR (1978) The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England, Quarterly Journal of Engineering Geology, 11: 233–244.
[8]. Garcia RA, Saavedra NF, Calderon-Carrillo Z, Mateus D (2008) Development of experimental correlations between indentation parameters and unconfined compressive strength (UCS) values in shale samples, CT&F-Ciencia Tecnología y Futuro, 3: 61–81.
[9]. Dickson JAD "A modified staining technique for carbonate in thin section". Nature 205:587, 1965.
[10]. Flügel E (2012) Microfacies analysis of limestones: analysis, interpretation and application, Springer Verlag, Berlin, 976: 1965.
[11]. ASTM D2664-04, Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
[12]. ASTM D7012-14e1, Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
[13]. ASTM D3967-16, Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
[14]. Gharechelou S, Amini A, Kadkhodaie-Ilkhchi A, Moradi B (2015) An integrated approach for determination of pore-type distribution in carbonate-siliciclastic Asmari Reservoir, Cheshmeh-Khosh Oilfield, SW Iran, Journal of Geophysics and Engineering, 12, 5: 793-809.
[15]. Chang C, Zoback MD, Khaksar A (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks, Journal of Petroleum Science and Engineering, 51: 223–237.
[16]. Glorioso JC, Rattia A (2012) Unconventional reservoirs: Basic petrophysical concepts for shale gas, In SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition-From Potential to Production.
[17]. Meng F, Zhou H, Zhang C, Xu R, Lu J (2015) Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress–strain curves, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48: 1787–1805.
[18]. Goodman RE (1989) Introduction to rock mechanics, 2 edition. John Wiley and Sons, 2.
[19]. Gharechelou S, Sohrabi S, Kadkhodaie A, Rahimpour-Bonab H, Honarmand J, Montazeri Gh (2016) A seismic-driven 3D model of rock mechanical facies: An example from the Asmari reservoir, SW Iran, Journal of Petroleum Science and Engineering, 146: 983–998.
[20]. Hauke J, and Kossowski T (2011) Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data, Quaestiones geographicae, 30, 2: 87-93.
[21]. Duperret A, Taibi S, Mortimore RN, Daigneault M (2005) Effect of groundwater and sea weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France, Engineering Geology, 78, 3-4: 321-343.
[22]. Gharechelou S, Amini A, Bohloli B, Swennen R, Nikandish A, Farajpour V (2020) Distribution of geomechanical units constrained by sequence stratigraphic framework: Useful data improving reservoir characterization, Marine and Petroleum Geology, 104398.
[23]. Yishan L, Yequan J (2006) Rock Mechanics and Petroleum Engineering, Petroleum Industry Press, Beijing, 191.
[24]. Perez M, Close D, Goodway B, Purdue G (2011) Developing templates for integrating quantitative geophysics and hydraulic fracture completions data: Part I-Principles and theory, In SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1794-1798..

Petroleum Research
Petroleum Research 2020 (October-November), Vol. 30, No. 113, 23-26
DOI: 10.22078/pr.2020.4061.2842

Role of Sedimentary Microfacies Characteristics in Rock Mechanical Behavior, a Case Study in Asmari Formation, SW Iran

Sajjad Gharechelou[1], Abdolhossein Amini[1], Mozhdeh Shirazi[1], Abbasali Nikandish[2] and Vahid Farajpour[2]
[1] Department of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran
[2] Iranian Central Oilfields Company, Division of Geology, Iran
ahamini@ut.ac.ir
DOI: 10.22078/pr.2020.4061.2842

Received: January/26/2020 Accepted: June/05/2020

Introduction
Geomechanical studies of hydrocarbon reservoirs play a crucial role, particularly in their exploration, production, and development (Garcia et al., 2008). Petrographic studies on core-based thin sections provide high-resolution micro-textural data which are the key-link between the rock depositional/diagenetic history and its physical properties. Furthermore, sedimentological and textural characteristics have been correlated to petrophysical and rock mechanical behavior [e.g. 2, 3, 4, 5, ,6 ,7].
In this study, we develop a Geomechanical Facies (GMF) concept that addresses the mechanical heterogeneity of the Asmari reservoir. The latter allows to characterize and better understand which sedimentological features control the mechanical behavior and its distribution throughout the formation. The main objectives of this study are; (1) establishing a relationship between sedimentological and geomechanical characteristics according to a GMF concept, (2) creating an empirical correlation between petrographycal features (Facies index) and key rock mechanical parameter (UCS).

Methodology
In the research, data collected from outcrop and subsurface. The 22 blocks cover all the sedimentary facies present in this formation. Out of the 22 blocks, 140 core samples with a length of 80 to 120 mm and a diameter of 54.5 mm were extracted. Furthermore, 15 core plugs, standard thin sections and conventional well logs (neutron, density and sonic) were available from the wells #A & #B.

Petrography
Based on a quantitative image analysis of the sedimentological features a "Facies Index" (FI) was defined. The FI is calculated based on five components; G (grain), M (matrix / microporosity), P (visual porosity), C (cement) and D (dolomite), all expressed in percentage (Eq. 1). Here, G (grain) include bioclasts, ooids/peloids, intraclasts (shell fragments), etc.

$$Facies\ Index\ \frac{G+M+P}{C+D} \tag{1}$$

Summation of all the five components is equal to 1. Based on a color threshold of components (grain, matrix, porosity, cement and dolomite) in the thin section, JMicroVision software allowed to quantify the amount of components. A low FI value indicates high influence of diagenesis on the facies, i.e. very cemented or dolomitized facies with low porosity while a high FI value reflects the high percentage of grains, matrix or (micro) porosity of a facies.

Triaxial/Uniaxial Compression Tests
A total number of 45 core specimens were selected for triaxial and 22 for uniaxial test from all the constituent facies of the Asmari Formation. The specimens were tested in a triaxial compression test set up following the [8]. The experiments were performed using a

hydraulic, servo-controlled stiff testing system manufactured by HEICO, model NL.502.302 that comprises a hydraulic pump unit, a data logger and various measurement sensors. The tests were carried out on NX size, solid cylinders with a diameter of 54.5 mm and a length/diameter ratio of about 2.

Brazilian Tensile Strength Test

In the Brazilian test, a disc shaped rock specimen is loaded by two opposing normal strip loads at the disc periphery. Forty-five cylindrical specimens were used with a diameter (D) of 54.5 mm and a thickness (T) of 27 mm, maintaining a T/D ratio of 0.5, according to ASTM D3967.

Results and Discussion

In this study, Geomechnical Facies (GMF) is defined based on a combination of sedimentary facies and rock mechanical properties. For the determination of GMF of these rocks, the FI for all microfacies are calculated. Subsequently, the uniaxial compressive strength (UCS) of rocks and porosity of the microfacies are determined. By plotting the FI versus porosity and UCS, 5 GMFs (GMF1 to GMF5) are distinguished within the Asmari Formation (Figure 1).

Triaxial Compressive Strength Test

Asmari Formation in the studied oilfield is in the depth of 3400 m below surface. The samples were subjected to stresses equivalent to in-situ conditions, with a maximum confining stress of 40 MPa. The tests were carried out under undrained conditions. Results of the triaxial tests at confining pressures of 20, 30 and 40 MPa are presented in figure 2, where stress-strain curves for the 5 GMFs are illustrated.

The Mohr-Coulomb failure criterion is utilized in the interpretation of triaxial test results. Based on six core samples of GMF1, nine core samples of GMF2, twelve core samples of GMF3, six core samples of GMF4 and twelve core samples of GMF5, Mohr circles are plotted for each group of samples.

A best-fit tangent to these circles is drawn based on which the values of φ and C are obtained. The results show C values which range from 3.46 MPa for GMF1 to 8.12 MPa for GMF5. Furthermore, it seems that cohesion increases with an increase in grain contact and cementation of the samples.

The friction angle ranges from 31.7 degrees for GMF1 to 49.8 degrees for GMF5.

Indirect Tensile Strength

The tensile strength is increased from GMF1 to GMF5. Grainy texture with different grains (ooid, peloid and various shell fragments) and low cement content likely explains the low tensile strength of GMF1. Also, the GMF2 with partially compacted matrix and low content of grains shows a higher tensile strength than GMF1. The main reason for a higher tensile strength for GMF4 and GMF5 is the increase in the amount of cement and dolomite.

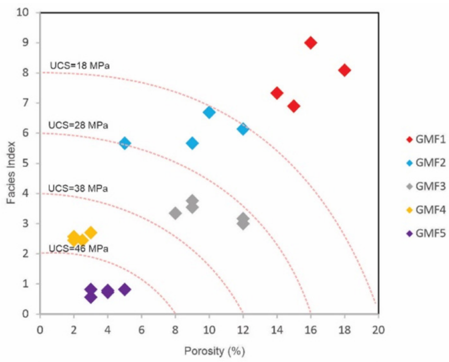


Fig. 1 Determination of GMFs within the Asmari Formation based on three parameters: 1- facies index, 2- porosity and 3- UCS.

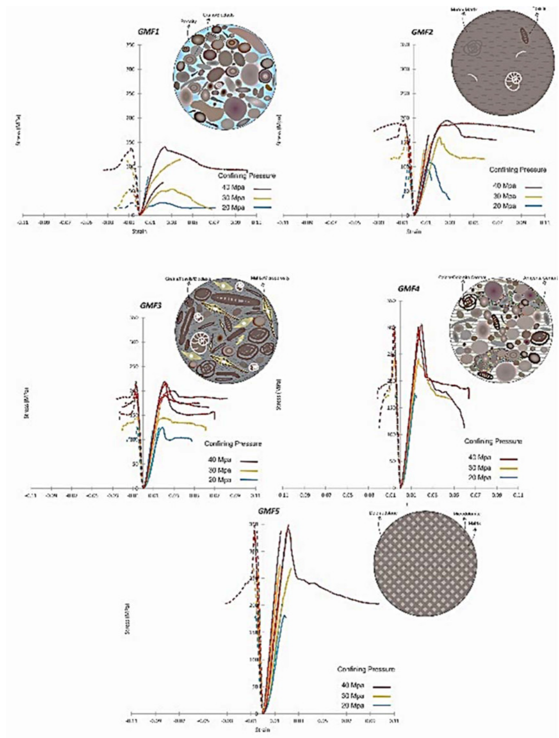


Fig. 2 Triaxial compression curves of each GMF. From GMF1 to GMF5 stress-strain curves changed from smooth softening to sharp softening.

Brittleness

In this study, by using P-wave, S-wave and density of the tested samples, LambdaRho ($\lambda\rho$) and MuRho ($\mu\rho$) were determined. Moreover, the $\lambda\rho$–$\mu\rho$ template has been used (by us) to predict BI from the sonic wave velocity for the core samples (*Figure 3*).

Some petrophysical parameters of reservoir rocks can be estimated from λρ-μρ cross-plots [7].

The cross plot is divided into four sectors that show brittle to ductile behavior from left to right.

As shown in Figure 3, samples from GMF1 are clearly plotted in the ductile field, and samples from GMF5 are clearly plotted in the brittle field respectively, while the other GMFs plot in between.

The wide range of the brittleness, i.e. from ductile to brittle, reflects the digenetic and microfacies heterogeneity of the Asmari Formation.

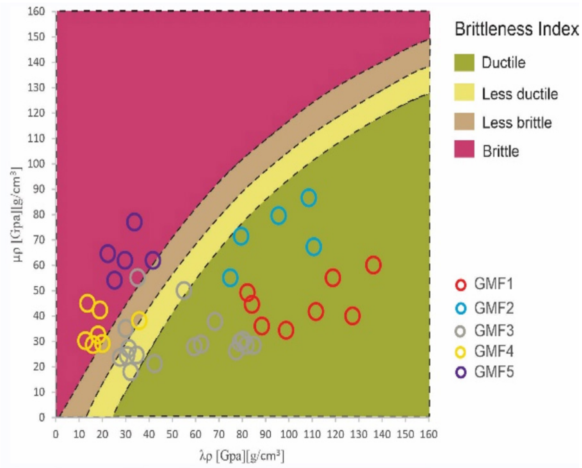


Fig. 3 $\lambda\rho$-$\mu\rho$ cross plot showing brittle and ductile fields and the positioning of the analysed GMF samples (template based on [7]).

The main rock mechanical properties of GMFs are presented in Table 1.

Relationship Between Facies Index and UCS

The correlation coefficient of Spearman indicates a strong reverse relationship between FI and UCS (Table 2). If R^2 is close to 1, and the probability value, P, is below 0.05, the two variables under investigation (in our case FI and UCS) display a strong relationship. By plotting FI versus UCS based on five GMFs, a strong relationship is observed between sedimentological/digenetic and mechanical properties.

As FI decreases from GMF1 to GMF5, the quantity of particles as well as particle size also decreases, and the amount of cement and dolomite increases. This implies that an increase in particle results in a decrease in UCS. By the increased amount of calcite and dolomite, the value of FI decreases, and inversely, the amount of UCS increases. Because of the shear resistance of a rock is the result of friction as a function of interlocking grains and particles, and cementation. For creating a relation between parameters statistical methods is used [8]. By plotting FI versus UCS, a linear regression best fit curve can be derived allowing to predict UCS from petrographical observations (Figure 4). The latter is statistically significant at 87% confidence level. Therefore, the linear regression empirical equation can be used to predict UCS based on microfacies characteristics (Table 2).

The FI values of facies from various depositional conditions clearly show that the environmental condition (i.e. energy and water circulation) are important factors that controls the geomechanical characteristics of the studied rocks (Figure 5).

Table 2 Results of Spearman's rank correlation indicating a strong relationship between FI and UCS. Empirical equations for predicting mechanical properties based on FI (petrography).

Variables	Spearman rank correlation	Sample size
FI and UCS	P: 1.479e-08	22
Predicted equation		Correlation coefficient
FI = -0.2088UCS + 10.824		R: -0.867

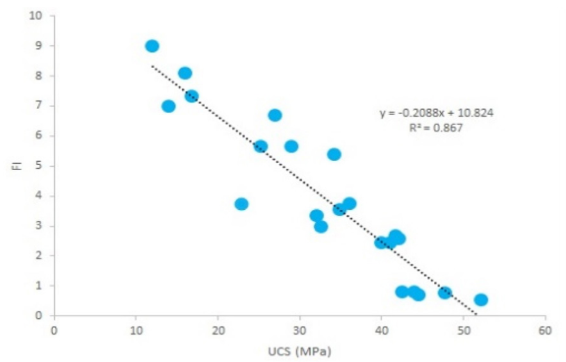


Fig. 4 Plot of FI versus UCS allowing to construct an empirical equation between both parameters.

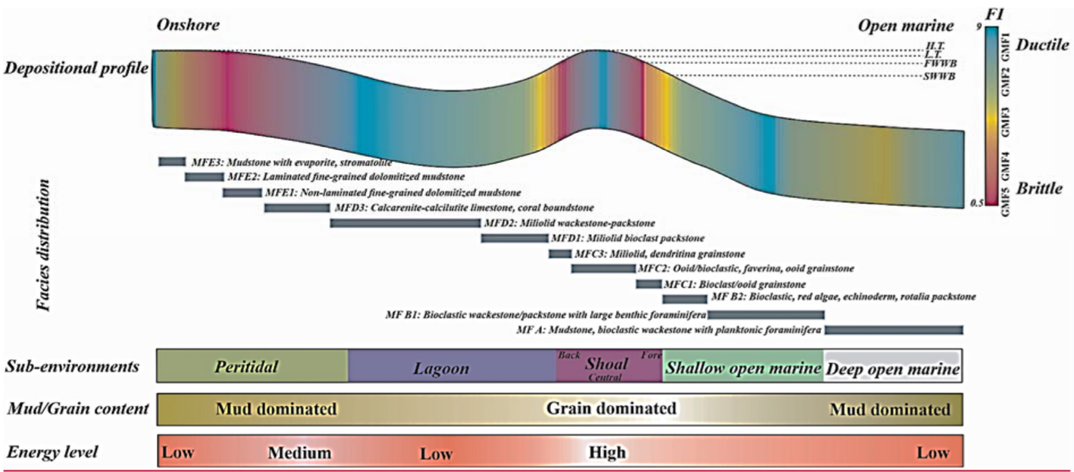


Fig. 5 Facies index distribution model in the Asmari ramp. The FI changes display good correlation with the energy level of environments and facies changes.

Conclusions

According to the study which has been carried out, the following results are obtained:

1- A major finding of this study is the quantification of facies based on the calculation of the "Facies Index" (FI). This index takes the main components of sedimentary rocks into account based on image analysis. FI for the Asmari Formation varies between 0.1 to 9. Moreover, the value of FI is highest in porous shoal grainstone facies, based on the high frequency of grains and interparticle porosity. For the deep marine, central lagoon and supratidal sediments, FI is moderate to high while for the shallow open marine and margin of the lagoon facies, it is moderate. In the seaward and leeward shoal facies, because of the high rate of calcite cementation, FI is low. Finally, the lowest FI-values were encountered in the restricted to dolomudstone tidal flat facies.

2- In the Asmari Formation the high energy shoal environments within porous grainy lithologies and FI > 7, the UCS is between 12 to 18 MPa (GMF1). For lithologies that reflect back and front shoal environments that are cemented, FI varies between 1 to 3 and UCS is rather high (38 to 46 MPa) (GMF4). For lithologies that reflect medium energy environments such as shallow open marine and margin of a lagoon, FI values vary between 3 to 5 and UCS between 28 to 38 MPa (GMF3). For the lithologies deposited in low energy environments with mud/microporosity dominated facies such as deep marine, central lagoon and the muddy parts of tidal flats, FI increases from medium to high (5 to 7), and it is inversely correlated to UCS that is about 18 to 28 MPa (GMF2).

3- Facies index and UCS show a good reverse correlation (R^2 = -0.87). Thus, UCS can be predicted based on petrographical analysis. Other mechanical parameters such as tensile strength, cohesion and friction angle display a similar trend with facies index as that for UCS.

Nomenclatures

FI: Facies index
GMF: Geomechnical Facies
UCS: Uniaxial compressive strength

References

1. Garcia RA, Saavedra NF, Calderon-Carrillo Z, Mateus D (2008) Development of experimental correlations between indentation parameters and unconfined compressive strength (UCS) values in shale samples, CT&F-Ciencia Tecnología y Futuro, 3: 61–81.
2. Gharechelou S, Amini A, Kadkhodaie-Ilkhchi A, Moradi B (2015) An integrated approach for determination of pore-type distribution in carbonate-siliciclastic Asmari Reservoir, Cheshmeh-Khosh Oilfield, SW Iran, Journal of Geophysics and Engineering, 12, 5: 793-809.
3. Andersen, P. Ø., Wang, W., Madland, M. V., Zimmermann, U., Korsnes, R. I., Bertolino, S. R. A., Minde, M., Schulz, B., Gilbricht, S., 2018. "Comparative study of five outcrop chalks flooded at reservoir conditions: chemo-mechanical behaviour and profiles of compositional alteration". Transport in Porous Media, 121 (1), 135-181.
4. Faÿ-Gomord, O., Verbiest, M., Lasseur, E., Caline, B., Allanic, C., Descamps, F., Vandycke, S. and Swennen, R., 2018. "Geological and mechanical study of argillaceous North Sea chalk: Implications for the characterisation of fractured reservoirs". Marine and Petroleum Geology, 92, 962-978.
5. Gharechelou S, Amini A, Bohloli B, Swennen R, Nikandish A, Farajpour V (2020) Distribution of geomechanical units constrained by sequence stratigraphic framework: Useful data improving reservoir characterization, Marine and Petroleum Geology, 104398.
6. ASTM D7012-14e1, Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
7. Perez M, Close D, Goodway B, Purdue G (2011) Developing templates for integrating quantitative geophysics and hydraulic fracture completions data: Part I-Principles and theory, In SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1794-1798.
8. Hosseini Z, Gharechelou S, Nakhaei M, Gharechelou S (2016) Optimal design of BP algorithm by ACO R model for groundwater-level forecasting: A case study on Shabestar plain, Iran, Arabian Journal of Geosciences, 9, 6: 436.