

تعیین خصوصیات مکانیکی و رسوب‌شناسی سنگ مخزن آسماری در یکی از میادین نفتی شمال غرب فروافتادگی دزفول

سپیده سهرابی^{۱*}، سجاد قره‌چلو^۱، علی کدخدایی^۲، حسین رحیم‌پور بناب^۱، غلامحسین منتظری^۲ و سام‌الدین اسماعیلی^۴

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- شرکت نفت زاگرس، شیراز، ایران

۴- شرکت نفت مناطق مرکزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۲۶

چکیده

سازند آسماری مهم‌ترین سازند مخزنی در جنوب ایران است. این سازند در میدان مورد مطالعه ماهیت کربناته-آواری دارد و تغییرات مدول‌های الاستیک آن قابل مقایسه با تغییرات رخساره‌ای است. به‌منظور درک این تغییرات، رابطه بین رخساره، بافت رسوبی و خاصیت مکانیکی سنگ (مدول یانگ) مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب داده‌های سه‌چاه برای بررسی مدول یانگ و رخساره‌های رسوبی استفاده شد. براساس خواص مکانیک سنگی، رخساره، بافت و مشخصات پتروفیزیکی، ۷ رخساره مکانیکی در سازند مورد مطالعه تعریف شد. برای پیش‌بینی تغییرات رخساره‌های مکانیکی به‌صورت جانبی و در مقیاس میدانی، داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای پس از برانبارش مورد استفاده قرار گرفت. به همین منظور مدل سه‌بعدی از توزیع رخساره‌های مکانیکی حاصل شد. توسط این روش، رخساره‌های مکانیکی قابلیت تطابق در بین چاه‌ها و نقشه شدن در مقیاس میدانی را خواهند داشت. در نهایت، توزیع رخساره‌های مکانیکی و مشخصات مربوط به آن‌ها در میدان مورد مطالعه تعیین شدند.

کلمات کلیدی: مکانیک سنگ، مدول یانگ، رخساره، نشانگرهای لرزه‌ای، سازند آسماری.

مقدمه

توسعه میدان و ریسک همراه با برنامه‌های توسعه‌ای، حفاری و پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ تولید می‌شود. علاوه بر این، تصحیح و تفسیر مدل انعکاس لرزه‌ای، تفسیر داده لرزه‌ای و تعیین فشردگی^۱ در سنگ مخزن، دیگر جنبه‌های مهم تعیین خواص الاستیکی سنگ می‌باشند.

شناسایی خواص الاستیکی سنگ مخزن یکی از فاکتورهای مهم در ارزیابی آن است. درک صحیح از مشخصات الاستیکی سنگ موجب کاهش هزینه

روش‌ها و مواد

برای تعیین تأثیر رخساره، بافت، نوع منافذ و تخلخل بر روی تغییرات مدول یانگ در سازند آسماری، سه چاه از میدان مورد نظر برای مطالعه انتخاب شدند. برای رسیدن به این هدف داده‌های مختلفی مانند مقاطع نازک از مغزه، نمودارها، شوت کنترل، سرسازندها و داده‌های سه بعدی لرزه‌ای پس از برانبارش استفاده شده است. مطالعه دقیق مقاطع نازک میکروسکوپی با استفاده از طبقه بندی دانه‌ها [۴] در بخش کربناته و پتی جان و همکاران [۵] در بخش آواری و آنالیز تصاویر، به منظور شناسایی رخساره‌های رسوبی، اجزاء سنگ (ذرات، دانه‌ها، سیمان و گل) و بافت، هم در بخش کربناته و هم آواری سازند انجام شد. همین‌طور نوع منافذ نیز براساس طبقه‌بندی نگار انحراف سرعت تعیین شدند. تعداد ۱۵۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی از سه چاه برای این منظور مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، مدول یانگ پویا^۳ توسط نمودارهای صوتی و چگالی به‌طور پیوسته در امتداد دیواره چاه‌ها برآورد شده است. سپس تغییرات مدول یانگ با تغییرات رخساره‌ای و بافت مورد مقایسه قرار گرفته است. پس از تعیین تغییرات رفتار الاستیکی سنگ در هر یک از رخساره‌ها، مفهوم رخساره مکانیکی (RMF) تعریف شد. با تعیین رخساره‌های مکانیکی و مشخصات مربوطه، از داده‌های سه بعدی لرزه‌ای و نرم‌افزار همسون راسل^۴ جهت تعیین توزیع آن‌ها استفاده شد. سپس ترسیم نقشه‌های توزیع رخساره‌های مکانیکی امکان‌پذیر گردید. داده لرزه‌ای در میدان مورد مطالعه شامل ۷۷۳ خط لرزه‌ای چشمه^۵ و ۲۵۶ خط لرزه‌ای گیرنده^۶ می‌باشد که مساحت ۱۳۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد.

به‌طور کلی فاکتورهای زمین‌شناسی مختلفی مانند تخلخل، اندازه دانه، کانی‌شناسی و سیمان کنترل کننده رفتار الاستیک سنگ می‌باشند [۱]. از طرفی این پارامترهای زمین‌شناسی به نوبه خود تحت کنترل محیط رسوبی و دیاژنز در محیط رسوبی هستند. شمار زیادی از محققان [۱، ۲، ۳] در مورد رابطه مشخصات رسوب شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن نیز بحث کرده‌اند.

بنابراین با توصیف دقیق‌تر مشخصات رسوب شناسی سازند و پارامترهای الاستیکی، تخمین دقیق‌تری از پایداری چاه قبل از حفاری در دیگر قسمت‌های میدان به‌دست می‌آید. در حقیقت تخمین دقیق‌تر مشخصات الاستیکی سازند در مقیاس میدانی منجر به آنالیز صحیح‌تر استرس می‌شود که از هزینه‌های اضافی آینده جلوگیری خواهد کرد. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه دارای لیتولوژی مختلط کربناته-آواری است بطوریکه بخش بالایی سازند (به سن میوسن) کربناته و بخش پایینی سازند (به سن الیگوسن) آواری می‌باشد. در مطالعه حاضر، مشخصات الاستیکی سنگ (مدول یانگ^۱) درون چارچوب رخساره‌ها بررسی شد و سپس رخساره‌های مکانیک سنگی^۲ (RMF) تعریف شده است. رخساره‌های مکانیکی بطور پیوسته در امتداد دیواره چاه‌ها تعیین شده که قابل تطابق در بین چاه‌ها نیز می‌باشند. همچنین به‌منظور تعیین رخساره‌های مکانیکی در کل میدان از نشانگرهای لرزه‌ای نیز استفاده شده است. لذا هدف از این مطالعه، ۱- بررسی تغییرات رخساره‌ای و بافت رسوبات به‌همراه تغییرات مدول یانگ است که در نتیجه آن رخساره‌های مکانیکی تعریف می‌شوند؛ ۲- تعمیم نتایج از محل چاه به کل میدان مورد مطالعه است که با این نگرش جدید می‌توان پارامترهای مکانیک سنگی را درون چارچوب رخساره‌ای بین چاه‌های مورد مطالعه تطبیق داد. از طرفی نیز می‌توان آن را به نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط کرد تا مدل سه بعدی از توزیع رخساره‌های مکانیکی به‌دست آید.

1. Young's Modulus

2. Rock Mechanical Facies (RMF)

3. Dynamic

4. Hapson-Russell

5. X-line

6. In-line

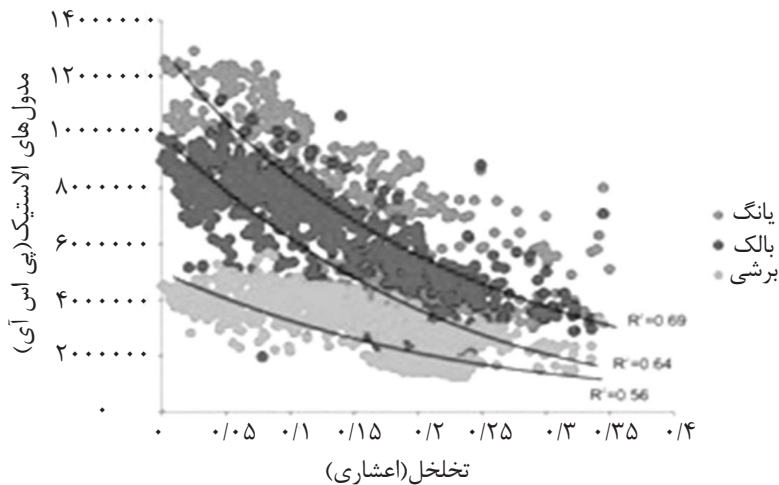
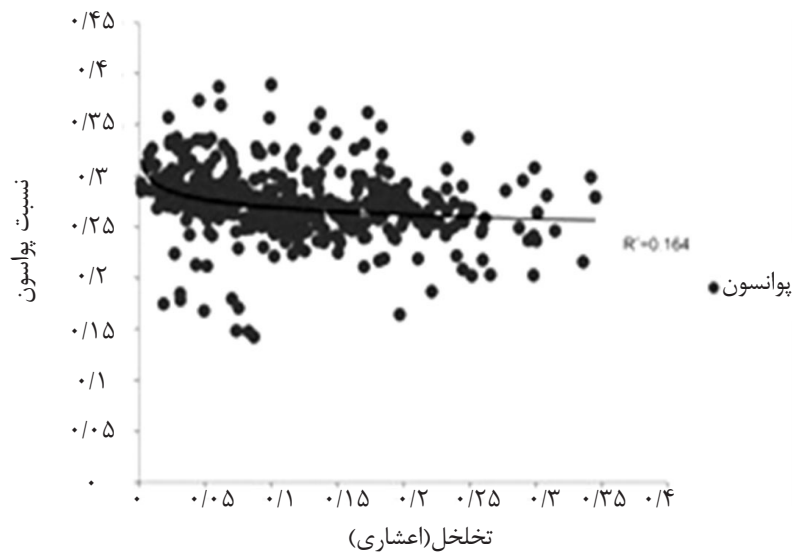
رخساره‌های مکانیک سنگی (RMF)

رابطه میان سنگ‌شناسی و چینه‌نگاری واحدهای مخزنی با مشخصات مکانیکی سنگ از دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط شرکت نفت انگلستان^۱ مورد توجه قرار گرفت. تفسیر رفتار مکانیک سنگ در کنار تغییرات رسوب‌شناسی و رخساره‌ای موجب درک بهتر ویژگی‌های مخازن پیچیده مستعد شکستگی و کالیبراسیون دقیق‌تر مدل استاتیک و دینامیک مخزن می‌شود. همچنین در اجراء پروژه‌های ژئومکانیکی مانند طراحی شکستگی هیدرولیکی، آنالیز پایداری دیواره چاه، ارزیابی استرس درجا^۲، پاسخ سنگ مخزن به تغییرات فشار منفذی و استرس، بررسی مدول‌های الاستیک و ضریب پواسون در سنگ مخزن از اهمیت بالایی برخوردار است. مشخصات الاستیکی سنگ‌های رسوبی مستقیماً با لیتولوژی، نوع منافذ و مدول الاستیکی سیال منفذی مرتبط‌اند. علاوه بر این، رفتار الاستیکی سنگ مخزن تحت تأثیر رخساره و فرآیندهای دیاژنزی نیز می‌باشد، زیرا این ۲ پارامتر در سنگ‌های رسوبی کنترل کننده اکثر خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ مخزن هستند.

در این مطالعه برای بررسی خواص مکانیکی سنگ از مدول دینامیکی (محاسبه شده از داده نمودار چاه‌پیمایی) استفاده شده است. زیرا در این روش مدول یانگ به‌طور پیوسته در امتداد چاه قابل محاسبه می‌باشد. محاسبه پیوسته پارامترهای الاستیکی در امتداد چاه دارای ۲ مزیت است: (۱) قابلیت تطابق در بین چاه‌ها و (۲) قابلیت ایجاد ارتباط با نشانگرهای لرزه‌ای: زیرساخت نمایشی مخزن توسط نشانگرهای لرزه‌ای نیازمند پارامتری پیوسته در امتداد چاه می‌باشد (ماهیت نمودار چاه‌پیمایی). در صورتی که پارامترهای الاستیکی حاصل از آنالیز مغزه در آزمایشگاه (روش استاتیک) تمام چاه را پوشش نمی‌دهند، به همین جهت در این مطالعه مدول دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

در سنگ مخزن، تخلخل یکی از پارامترهای اصلی پتروفیزیکی است که به‌شدت تحت کنترل نوع رخساره و فرآیندهای دیاژنزی می‌باشد. از طرفی مدول‌های الاستیک نیز تحت تأثیر تخلخل قرار دارند. به‌عبارت دیگر مشخصات رسوب‌شناسی و بافت رسوبی اثر خود را از طریق تخلخل بر روی مدول‌های الاستیک می‌گذارند. بنابراین مدول‌های الاستیک تحت تأثیر تخلخل نیز قرار دارند. با ترسیم مقادیر تخلخل در مقابل پارامترهای الاستیک (یانگ، حجمی^۳، برشی^۴ و ضریب پواسون^۵) (شکل ۱) نتایج نشان داد که مدول یانگ بیشترین تطابق را با مقادیر تخلخل دارد. در واقع بین مدول یانگ با بافت رسوبی و نسبت ذره یا دانه به سیمان یا گل، تطابق بیشتری وجود دارد. در حالی که نوع لیتولوژی نیز بر پارامترهای الاستیکی از جمله ضریب پواسون تأثیرگذار می‌باشد. در حقیقت، تغییرات لیتولوژی می‌تواند یک عدم تطابق^۶ بین ضریب پواسون و تغییرات بافت و رخساره ایجاد کند. برای مثال، با افزایش مقدار انیدریت ضریب پواسون بدون توجه به نوع بافت رسوبی افزایش می‌یابد، در حالی که هدف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات الاستیکی سنگ در چارچوب رخساره و بافت رسوبی است. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه از نظر لیتولوژی ماهیت متفاوتی دارد که شامل آهک، دولومیت، آهک دولومیتی، انیدریت، ماسه سنگ و شیل ماسه‌ای/سیلتی می‌باشد. این تنوع لیتولوژیکی به‌نظر می‌رسد که عامل عدم تطابق ضریب پواسون با تغییرات بافت رسوبی و رخساره‌ها است. بر این اساس مدول یانگ به دلیل تطابق بیشتر با مقدار تخلخل و رخساره‌ها، برای تعیین رخساره‌های مکانیکی انتخاب شد.

1. BP Company
2. In Situ Stress
3. Bulk
4. Shear
5. Poisson's Ratio
6. Discrepancy



شکل ۱ تطابق بین پارامترهای الاستیک و تخلخل در رخساره‌های مختلف. مدول یانگ دارای بیشترین تطابق با تخلخل است.

نیرو در اینچ مربع می‌باشد. مدول دینامیکی یانگ با استفاده از نمودارهای صوتی (برشی و فشارشی) و چگالی کل، از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$E_{(psi)} = \left(\frac{\rho_b}{\Delta t_s^2}\right) \left(\frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}\right) 1.34 \times 10^{10} \quad (1)$$

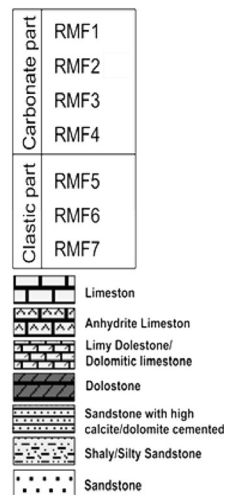
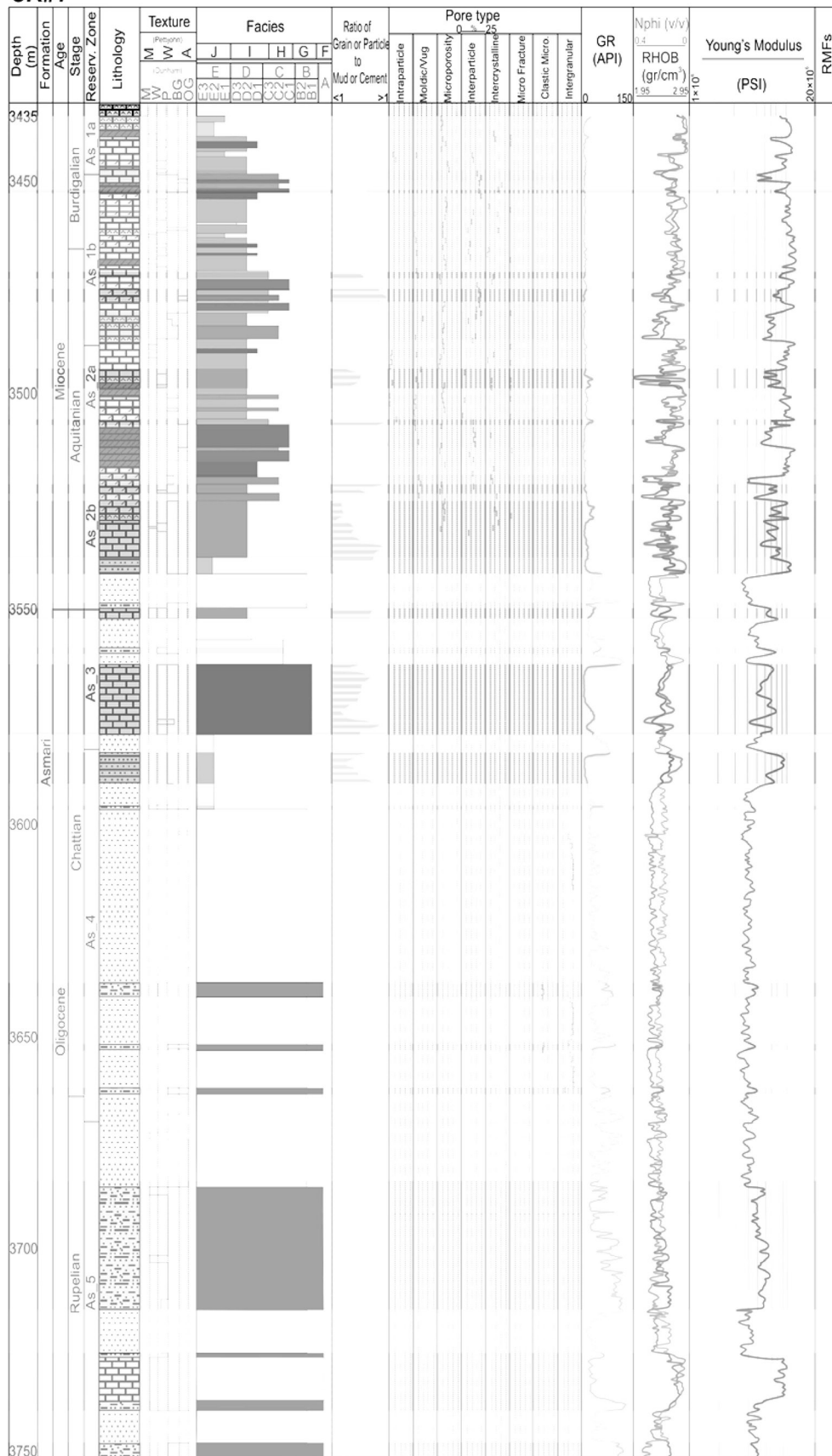
رفتار تغییر شکل سنگ‌های رسوبی توسط مدول‌های الاستیک مانند یانگ مشخص می‌شود. اشباع شدگی آب، بافت رسوبی و تخلخل، مدول‌های الاستیک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین مطالعات قبلی نشان می‌دهند که مشخصات الاستیک سنگ‌های رسوبی به شدت تحت کنترل نوع منافذ می‌باشند.

رابطه میان مدول یانگ با تغییرات رسوب‌شناسی (رخساره، بافت و نوع منافذ) در یکی از چاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده که در هر یک از رخساره‌ها، مدول یانگ و مشخصات پتروفیزیکی آن تعیین شده‌اند. براساس این نتایج، شناخت ۷ رخساره مکانیکی در سازند آسماری امکان‌پذیر شد.

مدول یانگ متعلق به گروهی از ضرایب است که به نام مدول‌های الاستیکی نام‌گذاری شده‌اند. مدول یانگ در تعریف عبارت است از اندازه‌گیری سختی^۱ نمونه یا مقاومت نمونه در برابر فشردگی حاصل از استرس تک محوری می‌باشد که واحد آن نیز

1. Stiffness

CK#1



شکل ۲ توزیع ۷ رخساره مکانیکی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه. در هر رخساره مکانیکی نسبت دانه به گل، سطح انرژی محیط رسوبی و نوع منافذ تعیین شده است.

رخساره‌های غنی از گل^۲، شاخصی از محیط‌های کم انرژی می‌باشد. این رخساره مکانیکی در محیط‌های جزر و مدی، لاگون (D2, D3) و محیط‌های دریایی باز دیده می‌شود. نوع منافذ در این محیط‌ها به دلیل کم بودن انرژی غالباً از نوع ریز تخلخل^۳ است. مقادیر مدول یانگ در این رخساره مکانیکی بالا و تخلخل پایین می‌باشد (جدول ۱).

RMF2

این رخساره مکانیکی در محیطی با انرژی بالاتر نسبت به RMF1 تشکیل شده است. بطوریکه دارای قطعات اسکلتی و اینتراکلاست می‌باشد که جور شدگی کمی دارند (شکل ۳-ب). آنها دانه ریز تا متوسط با بافت پکستون، ندرتاً گرین استون و باندستون مرجانی می‌باشند. قسمت داخلی رمپ کربناته شامل طیف وسیعی از رسوبات حاشیه حوضه است که انرژی متوسط تا بالایی دارند.

از طرفی نوع منافذ نیز خود وابسته به رخساره و دیاژنز است. در این مطالعه ۷ رخساره‌های مکانیکی (RMF) در سازند آسماری بر اساس محیط رسوبی، بافت، نوع منافذ، مشخصات پتروفیزیکی و مدول الاستیک تعریف شده‌اند (جدول ۱). رخساره‌های مکانیکی ۱ تا ۴ مربوط به بخش کربناته و ۵ تا ۷ مربوط به بخش آواری سازند می‌باشند که در ذیل توصیف شده‌اند.

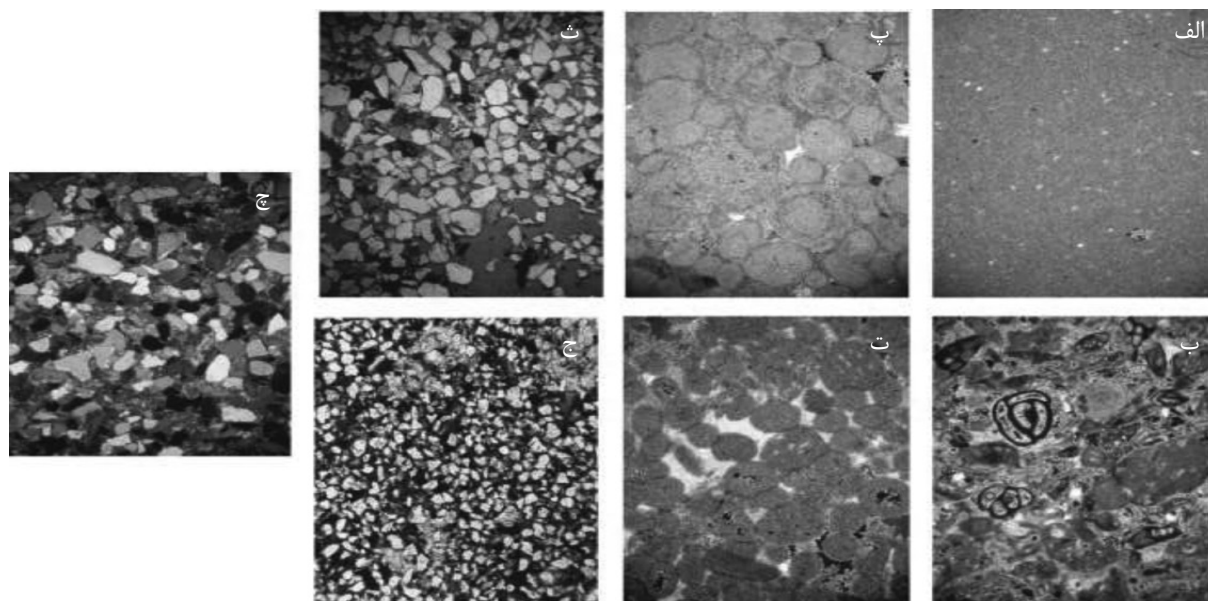
RMF1

این رخساره مکانیکی از نظر لیتولوژیکی شامل سنگ آهک و دولومیت ریز بلور همراه با تکه‌های^۱ انیدریت می‌باشد (شکل ۳-الف). مادستون‌های فشرده فاقد سیمان هستند که تنها در مواردی به بلورهای دانه ریز دولومیت تبدیل شده‌اند (دولومادستون). بافت‌های رسوبی در این رخساره مکانیکی، مادستون و وکستون می‌باشند. حضور

جدول ۱ جدول توصیفی از ۷ رخساره مکانیکی در میدان مورد مطالعه. در هر رخساره مکانیکی میانگینی از پارامترها و توصیفی از رخساره‌ها آورده شده است. (P=particle; G=grain; C=cement; M=mud)

RMFs	میانگین $\times 10^6$ یانگ (psi)	میانگین تخلخل (%)	میانگین تراوایی (mD)	P or G C or M	سطح انرژی محیط	نوع منافذ	بافت و رخساره
۱	۱۰	۷	۱	۱ >	پایین	ریز تخلخل	مادستون/دولومادستون و وکستون، بین جزرومدی، لاگون (D2, D3) و دریایی عمیق
۲	۸	۱۵	۵۰	۱	متوسط	حفرات انحلالی و بین ذره‌ای و بین بلوری ریز کم عمق	وکستون و پکستون، پشت شول، کانالهای جزرومدی، لاگون (D1)، لاگون بسمت دریای باز
۳	۴	۲۰	۳۵۰	۱ <	بالا	بین ذره‌ای و بین بلوری درشت	اوبید، اینتراکلاست و گریناستون بایوکلاستی، شول
۴	۱۱/۵	۳	۰/۱	۱ >	بالا	ریز تخلخل و مولدیک و واگ	پکستون تا گریناستون، پشت شول و شول
۵	۴	۲۲	۱۲۰۰	۱ <	بالا	بین دانه‌ای درشت	آرنایت، سد و کانال‌های پر شده
۶	۵	۱۲	۱۵۰	۱	متوسط تا پایین	بین دانه‌ای ریز	کوارتز وک، مادستون ماسه‌ای، از ساحل تا دریای باز
۷	۸/۵	۵	۰,۵	۱ >	متوسط	ریز تخلخل	لیتیک آرنایت/روک، پرکننده کانال، سد، ساحل

1. Patch
2. Mud dominated
3. Microporosity



شکل ۳ تصویر مقاطع نازک میکروسکوپی از مغزه برای هر یک از رخساره‌های مکانیکی. الف) مادستون: RMF1؛ ب) وکستون: RMF2؛ پ) گرین‌استون: RMF3؛ ت) گرین‌استون انحلال یافته و سیمانی شده: RMF4؛ ث) ماسه سنگ دانه درشت و تمیز: RMF5؛ ج) ماسه سنگ دانه ریز و کثیف: RMF6؛ چ) ماسه سنگ سیمانی شده: RMF7.

بلوری را نیز ایجاد کرده‌اند. در هر صورت مقادیر تخلخل و تراوایی در این رخساره بسیار بالا می‌باشد. در بعضی موارد نیز اثر فشردگی فیزیکی در بین دانه‌های اوییدی دیده می‌شود. بافت رسوبی در این رخساره مکانیکی گرین‌استون تا پکستون است که دارای مقادیر مدول یانگ پایین و تخلخل بالا می‌باشد (جدول ۱).

RMF4

این رخساره مکانیکی شبیه RMF3 است با این تفاوت که فضاهای خالی بین دانه‌ها توسط سیمان انیدریتی و کلسیتی پر شده‌اند (شکل ۳-ت). سیمانی شدن و انحلال از فرآیندهای رایج دیاژنزی در RMF4 می‌باشد. به طوری که انحلال اویدها باعث ایجاد تخلخل اوومولدیک^۱ شده است و در فرآیندهای بعدی دیاژنزی توسط سیمان‌های کلسیتی و انیدریتی پر شده‌اند. مقادیر تخلخل و تراوایی در این RMF اثر سیمانی شدن کاهش و مدول یانگ به شدت افزایش یافته است (جدول ۱).

این رخساره مکانیکی در محیط‌های پشت شول، حاشیه شول-لاگون، جزرومدی، لاگون (D1)، لاگون باز و دریای باز کم عمق نهشته شده است. منافذ غالب در این رخساره مکانیکی شامل بین ذره‌ای و بین بلوری ریز منفذ^۱ و متوسط منفذ^۲ می‌باشند. این منافذ در بعضی موارد توسط سیمان کلسیتی و انیدریتی پر شده و گاهی نیز سیمان انیدریتی منجر به دولومیتی شدن نیز شده است. مقادیر مدول یانگ و تخلخل در این رخساره متوسط می‌باشد (جدول ۱).

RMF3

این رخساره مکانیکی شامل توالی گرین‌استون‌های اوییدی ریز تا درشت دانه و با جورشدگی خوب و ندرتا پکستون می‌باشند (شکل ۳-پ). این RMF براساس بافت دانه‌ای، جورشدگی خوب و حضور اویدها، اینتراکلاست‌ها، بیوکلاست میلیولیدها، نشان از رسوب‌گذاری در آب‌های کم عمق و با انرژی متوسط و بالا می‌باشد. اگرچه منافذ بین‌ذره‌ای در این RMF فراوانند ولی در بعضی توالی‌ها اویدها به بلورهای دولومیت تبدیل شده‌اند و منافذ بین

1. Micropore
2. Mesopore
3. Oomoldic

RMF5

نهبشته و ماسه سنگ‌ها با سیمان کلسیتی در قاعده رسوبات کانالی سیمان شده‌اند. این سیمان فضای خالی منفذی را به‌طور کامل پر کرده و موجب کاهش کیفیت مخزنی شده است. مدول یانگ در این رخساره مقادیر بالایی را نشان می‌دهد (جدول ۱). در بعضی از رخساره‌های کربناته، مدول یانگ نشان‌دهنده ناهنجاری‌هایی می‌باشد. یکی از دلایل اصلی در ایجاد این ناهنجاری‌ها در رفتار مکانیکی سنگ، حضور شکستگی‌ها هستند که موجب کاهش مقادیر مدول یانگ می‌شود. خصوصیات الاستیکی سنگ‌های رسوبی با مقادیر تخلخل دارای روند معکوس می‌باشند. با پلات کردن مقادیر مدول یانگ در برابر تخلخل در هر RMF (شکل ۴)، پراکندگی داده‌ها نشان‌دهنده تفاوت در رخساره‌های رسوبی، بافت و نوع منافذ است. سرعت موج صوتی در سنگ‌های رسوبی خصوصاً در کربنات‌ها به نوع منافذ نیز وابسته می‌باشد. از این رو نوع منافذ نیز کنترل کننده مدول الاستیک می‌باشد. در شکل ۲ توزیع رخساره‌های مکانیکی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه میدان نشان داده شده است که در هر RMF، بافت، رخساره، نسبت ذرات یا دانه به سیمان یا گل، نوع منافذ، تخلخل و مدول یانگ مشخص شده است. این نگرش جامع به رخساره‌های مکانیکی، توصیفی از مشخصات رسوبی، پتروفیزیکی و الاستیکی سنگ مخزن مورد مطالعه می‌باشد.

ارائه مدل سه بعدی از توزیع رخساره‌های مکانیکی

تعیین رخساره‌های مکانیکی با استفاده از لاگ، توانایی پیش‌بینی آنها را در مقیاس میدانی امکان‌پذیر می‌سازد. با ایجاد ارتباط بین روشهای آماری میان نشانگرهای لزره‌ای و مدول یانگ (محاسبه شده از نمودار چاه‌پیمایی) می‌توان نتایج را از محل چاه به کل میدان انجام می‌پذیرد.

این رخساره مکانیکی شامل ماسه‌سنگ‌های متوسط و درشت دانه به همراه گراول است (شکل ۳-ز). این ماسه‌سنگ‌های تمیز فاقد سیمان بوده و سست می‌باشند. به‌علاوه این ماسه سنگ‌های آرنایتی دارای جورشدگی خوب و گردشدگی کمی هستند. مشخصات رسوب‌شناسی آنها نشان می‌دهد که در محیط کانال‌های پرشده^۱ و ندرتا جزایر سدی، نهبشته شده‌اند. منافذ بین دانه‌ای مرتبط باعث ایجاد تخلخل و تراوایی بالایی شده است. مقادیر مدول یانگ در این RMF پایین می‌باشد (جدول ۱).

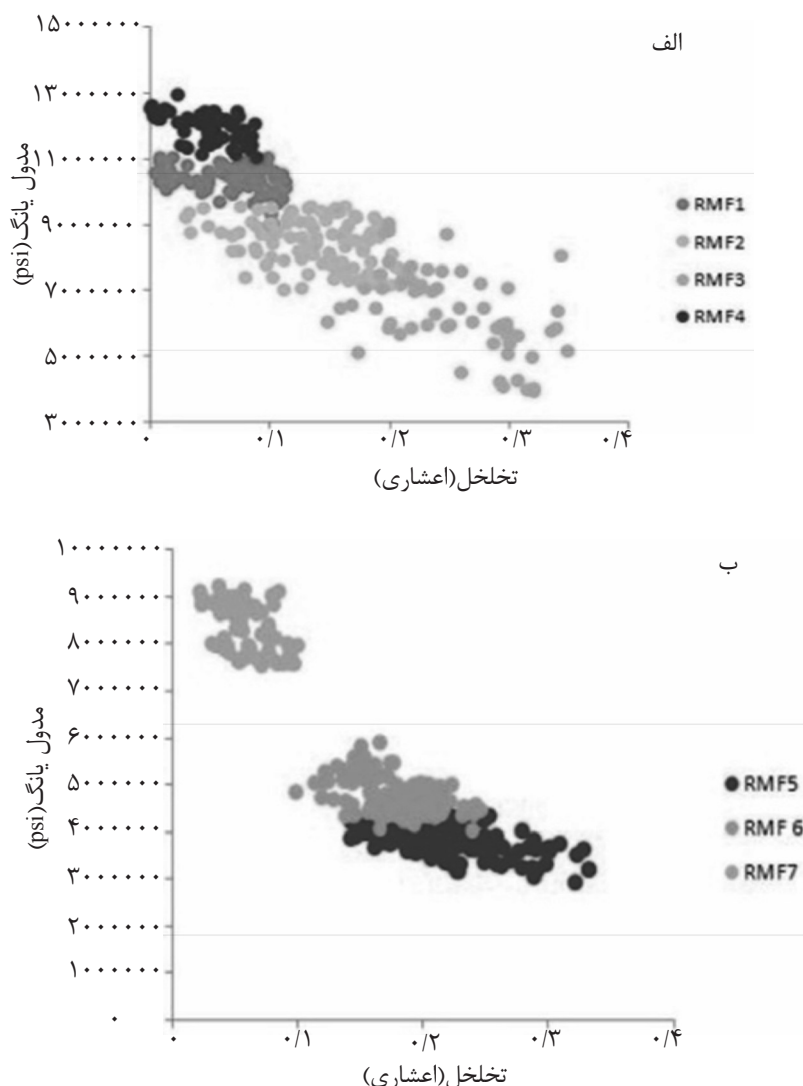
RMF6

این رخساره مکانیکی شامل ماسه‌های سیلتی/شیلی همراه با ریز تخلخل بین دانه‌ای می‌باشد (شکل ۳-ج). کوارتز وک بافت غالب در این RMF است. دانه‌های ماسه، سیمانی نشده‌اند اما کانی‌های رسی به‌صورت دیاژنزی یا فیلتره شدن در بین دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند. ماسه‌های دانه ریز سیلتی با میان لایه‌های نازک شیلی حاکی از آن هستند که این رسوبات در محیط‌های جزر و مدی، پهنه ساحلی و دور از ساحل نهبشته شده‌اند. ماسه‌های دانه ریز به‌همراه خمیره گلی باعث کاهش کیفیت مخزنی در این RMF شده‌اند. مدول یانگ نیز در این RMF نسبت به سایر RMF های دیگر در بخش آواری سازند مقادیر متوسطی را نشان می‌دهند (جدول ۱).

RMF7

ماسه سنگ‌های سیمانی شده در بخش آواری سازند ضخامت بسیار کمی دارند (شکل ۳-چ). این رخساره مربوط به بخش حاشیه حوضه با بافت لیتیک آرنایت/وک می‌باشد. تنها ۲ نوع سیمان یعنی کلسیت و دولومیت دانه‌های ماسه را به یکدیگر چسبانده است. موقعیت چینه‌شناسی این واحدها نشان می‌دهد که ماسه‌سنگ‌ها با سیمان دولومیتی در پهنه ساحلی و جزایر سدی

1. Incised Valley Filled



شکل ۴ رسم مقادیر مدول یانگ در مقابل تخلخل در هر یک از رخساره‌های مکانیکی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه الف- رخساره‌های کربناته و ب- رخساره‌های آواری.

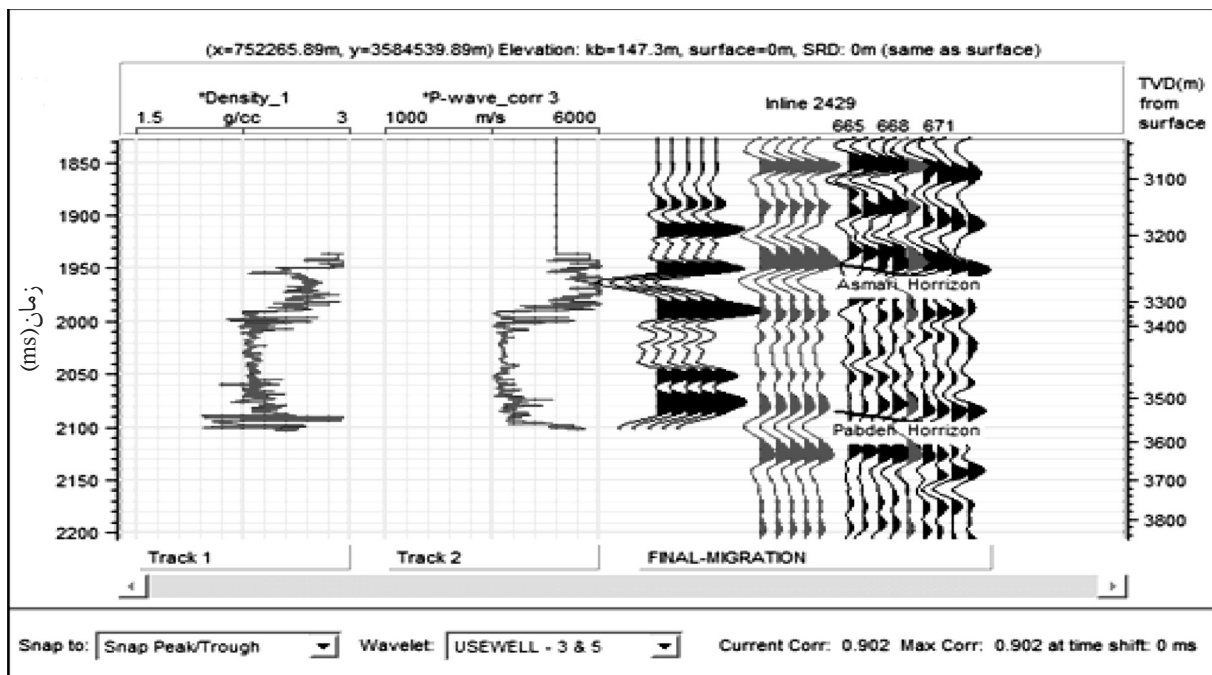
عمق به زمان و بهینه‌سازی آن اجازه می‌دهد که نمودارها و سرسازندها با داده‌های لرزه‌ای در مقیاس زمان تطبیق پیدا کنند.

وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای

برای ساخت حجم سه بعدی امپدانس صوتی، ابتدا یک مدل اولیه فرکانس پایین با استفاده از داده‌های نمودار و الگوریتم‌های مختلف ساخته می‌شود. در میان الگوریتم‌های مختلف وارون‌سازی، الگوریتم وارون‌سازی بر پایه مدل^۲ در این مطالعه انتخاب شده است.

داده‌های با کیفیت لرزه‌ای روشی مناسب برای ارزیابی پارامترهای مکانیکی (مدول یانگ) در مقیاس میدانی با نگرش ژئوفیزیکی می‌باشد. داده‌های لازم مانند شوت کنترل، داده لرزه‌ای سه بعدی پس از برانبارش و نمودار هدف (مدول یانگ و تخلخل) به همراه نمودارهای صوتی و چگالی در سه چاه از میدان مورد مطالعه در دسترس بودند. برای تبدیل عمق نمودار به زمان، شوت کنترل اعمال می‌شود. بهینه‌سازی تطابق داده‌های نمودار با داده لرزه‌ای، توسط ساخت لرزه نگاشت مصنوعی انجام می‌گیرد (شکل ۵). لرزه نگاشت مصنوعی از هم‌میخت^۱ موجک لرزه‌ای و ضریب بازتاب‌پذیری حاصل می‌شود. فرآیند تبدیل

1. Convolution
2. Mode-based



شکل ۵ پنجره‌ای از ارتباط دادن داده چاه به داده لرزه‌ای (گره زدن) به وسیله لرزه نگاشت مصنوعی در چاه شماره ۵.

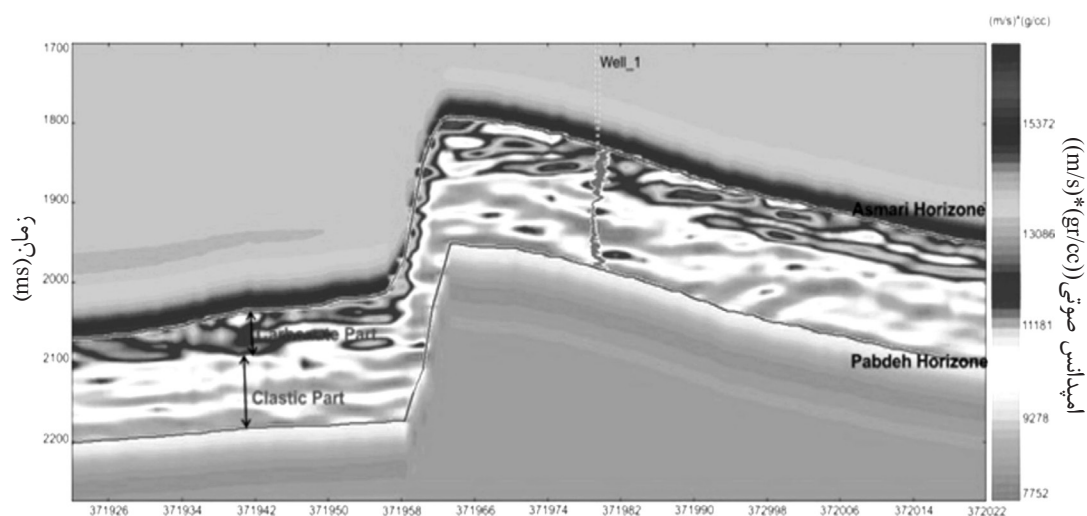
به‌دست آمد (شکل ۶). امپدانس صوتی مهم‌ترین نشانگری است که در تخمین مدول یانگ و تخلخل به‌کار می‌رود.

انتخاب نشانگر بهینه

امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به‌عنوان نشانگر خارجی به‌همراه دیگر نشانگرهای داخلی جهت ساخت ترکیبی بهینه از نشانگرهای لرزه‌ای برای تخمین پارامترهای مدول یانگ و تخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطای تخمین در مدل سه بعدی با ایجاد رابطه منطقی میان نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف در محل چاه‌ها، کاهش می‌یابد. برای ایجاد رابطه منطقی بین داده‌های ورودی (نشانگرهای لرزه‌ای) و داده‌های خروجی (پارامتر هدف) و انتخاب ترکیبی بهینه از نشانگرها، روش‌های هوشمند و آماری استفاده شده است. در روش رگرسیون خطی، انتخاب ترکیب بهینه‌ای از نشانگرها توسط رگرسیون مرحله‌ای^۱ انجام می‌پذیرد.

وارون‌سازی بر پایه مدل یک روش الگوریتم وارون‌سازی خطی تعمیم یافته^۱ است که در آن هر ردلرزه (اثر)^۲ از لرزه نگاشت مصنوعی به وسیله امپدانس تخمینی اولیه و موجک به‌دست می‌آید. در طی فرایند وارون‌سازی، امپدانس صوتی به‌طور پیوسته تصحیح می‌شود تا زمانی که ردلرزه مصنوعی قابل مقایسه با ردلرزه واقعی (ردلرزه مرکب) در محل چاه‌ها باشد. برای رسیدن به این هدف کاربر کنترل می‌کند که الگوریتم چه مقدار از تخمین اولیه فاصله بگیرد تا با داده واقعی تطابق پیدا کند. سپس ردلرزه برآورد شده از نتیجه وارون‌سازی با ردلرزه مرکب مورد مقایسه قرار می‌گیرد که کمتر بودن خطای میان ردلرزه مرکب و ردلرزه مصنوعی، نشان دهنده سازگاری بیشتر ردلرزه امپدانس صوتی با موجک و ردلرزه مرکب می‌باشد و وارون‌سازی از لحاظ ریاضی به خوبی انجام شده است. برای نمونه، مقدار تطابق بین ردلرزه مصنوعی و ردلرزه مرکب در یکی از چاه‌های میدان حدود ۰/۹۰۲ می‌باشد که تطابق قابل قبولی است (شکل ۵). مدل اولیه وارون‌سازی با برون‌یابی^۳ داده نمودار در حجم سه بعد ساخته شد و در نهایت یک حجم سه بعدی از امپدانس صوتی

1. Generalized linear Inversion
2. Trace
3. Extrapolate
4. Stepwise Regression



شکل ۶ مقطعی از امپدانس صوتی وارون سازی شده از سازند آسماری در میدان مورد مطالعه. نقاط عمقی مشترک

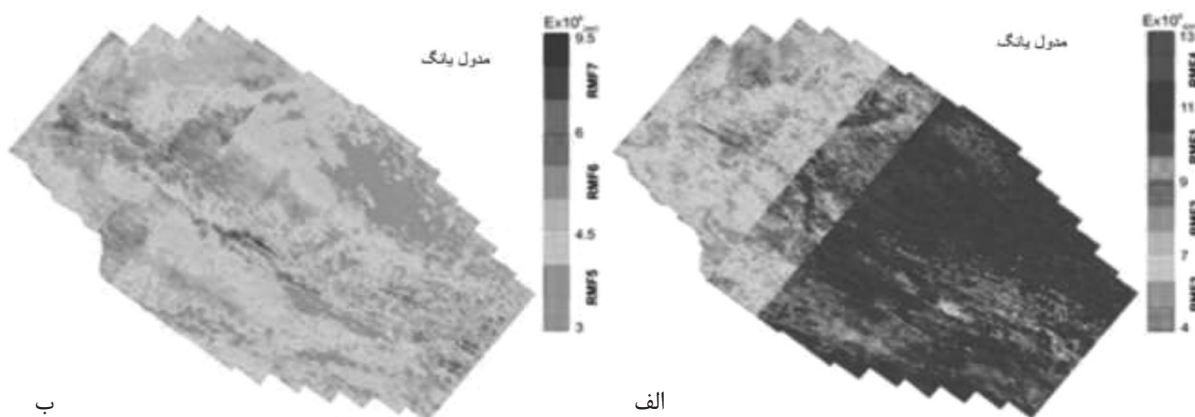
برای دو پارامتر مدول یانگ و تخلخل، اولین نشانگر که نشان دهنده بیشترین تطابق با پارامترهای هدف می باشد، مربع نتیجه وارون سازی^۱ یا مربع امپدانس صوتی می باشد. توسط رگرسیون مرحله ای، ترکیب بهینه از نشانگرها با بالاترین دقت در تخمین پارامترهای هدف تعیین شدند. برای تخمین این پارامترها با استفاده از ترکیب بهینه نشانگرهای به دست آمده در کل میدان از روش های شبکه عصبی استفاده شد. سه نوع الگوریتم شبکه عصبی شامل احتمالی^۲، پیش خورند چندلایه^۳ و تابع پایه شعاعی^۴ برای تخمین نمودارهای هدف از نشانگرهای بهینه به کار گرفته شد که در بین آنها شبکه عصبی احتمالی با دقت بالاتر، دارای بهترین عملکرد در برآورد پارامترها بود. رابطه بین نشانگرهای لرزه ای و نمودار پیچیده و غیر خطی است، به همین دلیل شبکه عصبی با توجه به ماهیت غیر خطی خود نسبت به روش های آماری دیگر دارای توانایی تخمین بالاتری است. در نهایت مدول یانگ و تخلخل توسط نشانگرهای لرزه ای به صورت سه بعدی در میدان مورد مطالعه برآورد و نقشه های توزیع این پارامترها ترسیم شدند (شکل های ۷ و ۸).

1. Inversion result
2. Probabilistic
3. Multilayer feed forward
4. Radial basis function

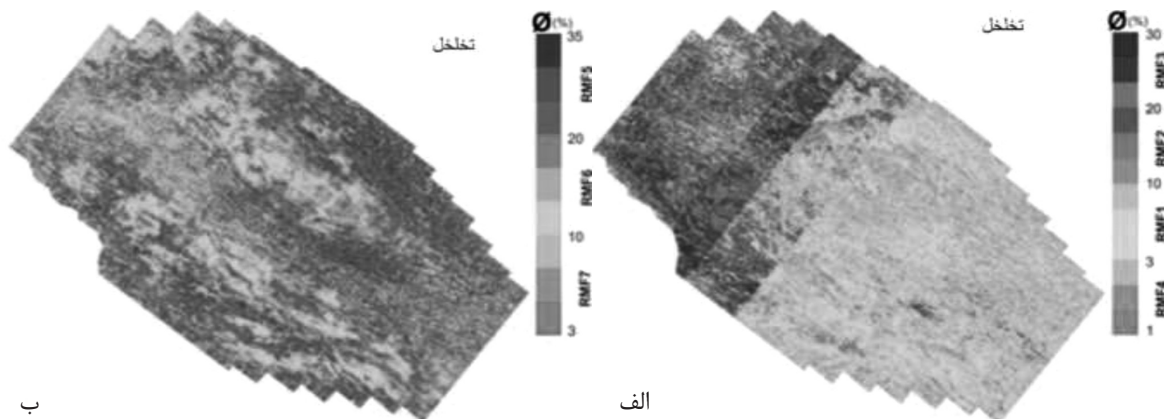
در رگرسیون مرحله ای، ابتدا بهینه ترین نشانگر که دارای کمترین خطای تخمین پارامتر هدف است، تعیین می شود. مرحله بعد انتخاب ترکیبی دو نشانگری با استفاده از نشانگر بهینه می باشد که دارای کمترین خطای تخمین در مرحله آموزش می باشد. سپس در هر مرحله نشانگری به ترکیب مرحله قبل اضافه می شود به طوری که ترکیب جدید کمترین خطای تخمین آموزش را نتیجه دهد. بر این اساس، ترکیب نشانگرها که به صورت افزایش در تعداد آنها و کاهش در خطای تخمین پارامتر هدف (مرحله آموزش) می باشد در جدولی لیست می شود (جدول ۲). بر خلاف خطای تخمین در مرحله آموزش که با افزایش تعداد نشانگرها کاهش می یابد، خطا در مرحله ارزیابی تا رسیدن به ترکیبی خاص که همان ترکیب بهینه نشانگرها در تخمین پارامتر هدف می باشد، کاهش می یابد و پس از آن افزایش می یابد. در جدول حاصل از رگرسیون مرحله ای برای مدول یانگ، مشاهده می کنیم که پس از نشانگر شماره ۲ مقدار خطا در مرحله ارزیابی افزایش می یابد، پس ترکیب ۲ نشانگری بهینه می باشد. همچنین برای پارامتر تخلخل پس از نشانگر شماره ۶ مقدار خطای ارزیابی افزایش می یابد، پس ترکیب ۶ نشانگری بهینه است. بر اساس جداول به دست آمده از رگرسیون مرحله ای

جدول ۲ جدول حاصل از رگرسیون مرحله‌ای. ترکیبی از ۱۰ تا ۱۰۰ نشانگر برای تخمین مدول یانگ (بالا) و تخلخل (پایین) نشان داده شده است. ترکیب ۲ نشانگری برای تخمین مدول یانگ و ترکیب ۶ نشانگری برای تخلخل مناسب می‌باشد. خطای مراحل آموزش و ارزیابی عبارت است از جذر میانگین مربعات خطا (Rmse) در تخمین پارامترهای مذکور برحسب واحد آنها که برای مدول یانگ پوند بر اینچ مربع (psi) و برای تخلخل کسری (Fracion) می‌باشد.

شمار	هدف	نشانگر نهایی	خطای آموزشی	خطای ارزیابی
۱	مدول یانگ	(Inversion Result)**2	۸۰۱۳۹۰/۳۲	۸۷۰۴۱۳/۲۰
۲	مدول یانگ	Instantaneous Phase	۷۳۸۴۱۴/۴۰	۸۶۷۲۶۶/۱۰
۳	مدول یانگ	Instantaneous Frequency	۶۴۹۵۰۷/۵۹	۱۴۹۲۹۴۹/۶۸
۴	مدول یانگ	Integrated Absolute Amplitude	۶۰۹۳۶۵/۸۸	۱۶۴۳۰۵۷/۹۸
۱	تخلخل	(Inversion Result)**2	۰/۰۲۹	۰/۰۳۱
۲	تخلخل	Derivate Instantaneous Amplitude	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹
۳	تخلخل	Integrated Absolute Amplitude	۰/۰۲۶	۰/۰۳۰
۴	تخلخل	Instantaneous Frequency	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹
۵	تخلخل	Filter 25/30-35-40	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹
۶	تخلخل	Raw Seismic	۰/۰۲۴	۰/۰۲۹



شکل ۷ الف: یک نقشه از توزیع مدول یانگ با پنجره میانگین ۳۰ میلی ثانیه پایین تر از افق آسماری. این نقشه، توزیع ۴ رخساره مکانیکی را در بخش کربناته سازند نشان می‌دهد. ب: یک نقشه از توزیع مدول یانگ با پنجره میانگین ۴۰ میلی ثانیه بالاتر از افق پابده. این نقشه توزیع ۳ رخساره مکانیکی در بخش آواری سازند را نشان می‌دهد.



شکل ۸ الف: یک نقشه از توزیع تخلخل با پنجره میانگین ۳۰ میلی ثانیه پایین تر از افق آسماری (بخش کربناته)، ب: یک نقشه از توزیع تخلخل با پنجره میانگین ۴۰ میلی ثانیه بالاتر از افق پابده (بخش آواری). این نقشه‌ها نشان می‌دهند که مدول یانگ با تخلخل دارای رابطه معکوس هستند که این دو پارامتر به خوبی توزیع ۷ رخساره مکانیکی را در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهند.

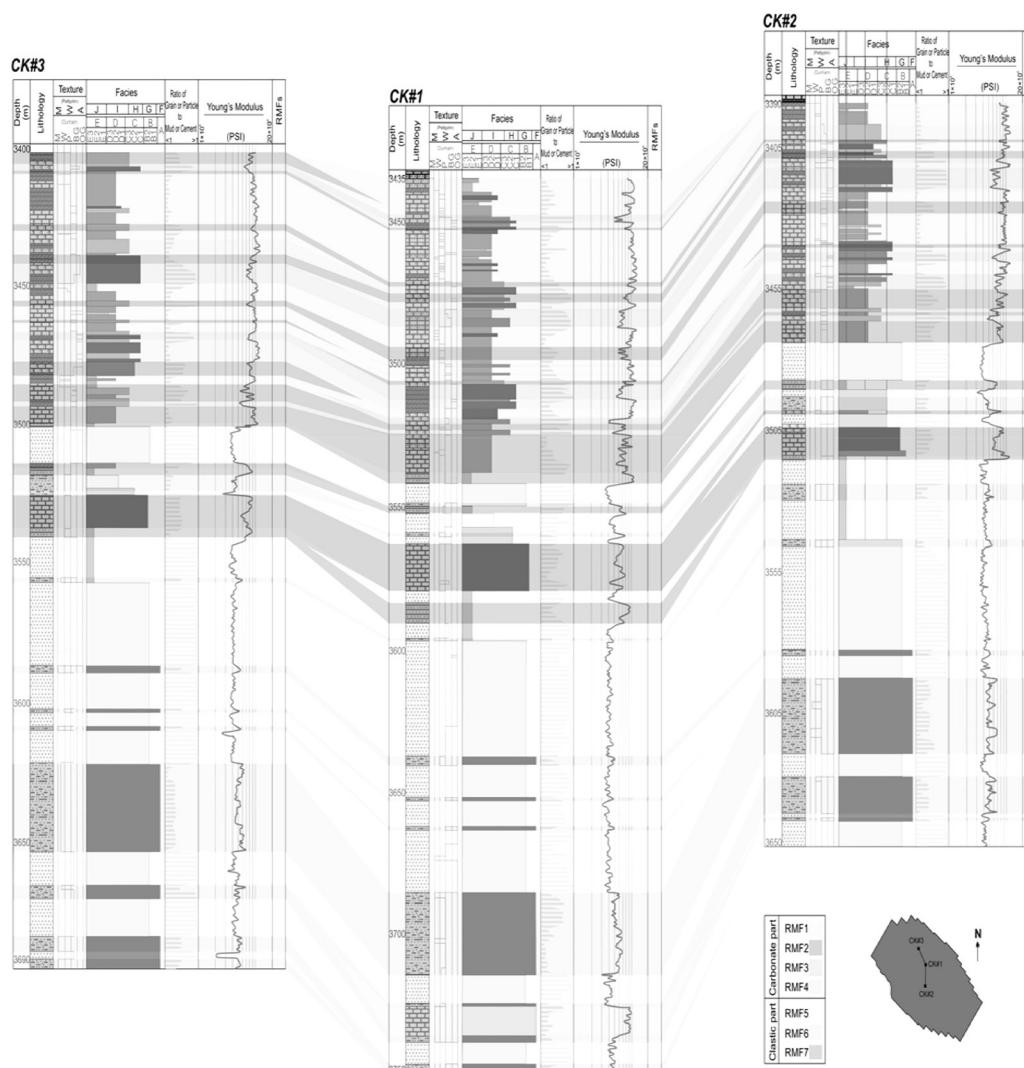
بحث و نتایج

در مطالعات قبلی، رابطه میان مدول‌های الاستیک و تخلخل، نوع منافذ، جانشینی سیال^۱ و اشباع شدگی مطالعه شده بود [۷،۶]. در سنگ‌های رسوبی، ریزساخت‌ها^۲ بیشترین تأثیر را بر مدول‌های الاستیک می‌گذارند. در این تحقیق، تلاش شد تا رابطه‌ای میان رخساره، بافت و مدول الاستیکی ایجاد شود. در هر رخساره خصوصیات رسوب‌شناسی مانند بافت، محیط رسوبی، نوع منافذ، تخلخل و تراوایی و سیمان یا خمیره مورد توجه قرار گرفت. براساس این مشخصات و مدول الاستیک، رخساره‌های مکانیکی تعریف شدند. در واقع همین مشخصات رسوب‌شناسی در کنار یکدیگر باعث سفت شدگی^۳ و نرمی^۴ سنگ‌های رسوبی می‌شوند. سه چاه از میدان برای تعیین رخساره‌های مکانیکی و تطابق در بین چاه‌ها انتخاب شدند (شکل ۹). ۱۲ رخساره در بخش کربناته و ۵ رخساره در بخش آواری تعیین و توصیف شدند. در سنگ‌های رسوبی، خصوصیات الاستیک و تراوایی به‌شدت تحت کنترل ذرات/دانه و سیمان/گل می‌باشند. در حقیقت نسبت ذرات یا دانه به سیمان/گل، انرژی محیط رسوبی را نشان می‌دهد. با افزایش این نسبت مقدار مدول یانگ کاهش می‌یابد (پوک شوندگی) و با کاهش این نسبت مقدار مدول یانگ افزایش می‌یابد (سخت شوندگی). در بخش کربناته سازند در رخساره‌های پر انرژی مانند شول پر تخلخل که فاقد سیمان شدگی هستند، مدول یانگ پایین می‌باشد. در بعضی قسمت‌های این توالی فضای بین دانه‌ای شول توسط سیمان انیدریت و کلسیت پر شده است که به‌شدت مدول یانگ را افزایش می‌دهد. در رخساره‌های با انرژی متوسط حاشیه لاگون-شول با نسبت Particle/Cement=1 مقدار مدول یانگ نیز متوسط است. سرانجام، در رخساره‌های کم انرژی رمپ مانند دولومادستون و مادستون سخت^۵ که متعلق به محیط جزر و مدی، لاگون بسته و محیط دریای باز می‌باشند،

مقدار مدول یانگ بالا می‌باشد. در قسمت آواری، ماسه‌سنگ‌های جور شده، درشت دانه و تمیز در بخش سدی و کانال‌های پر شده، نسبت به ماسه سنگ‌های ریز دانه و کثیف^۶ در بخش پایین پهنه ساحلی تا دور از ساحل و بخش بالایی تا جزر و مدی دارای مقادیر بالاتری از مدول یانگ هستند. همچنین در بعضی از قسمت‌های توالی آواری، ماسه‌سنگ‌ها توسط سیمان کلسیتی و دولومیتی سیمانی شده‌اند که موجب افزایش در مدول یانگ شده است. بر طبق خصوصیات رسوب شناختی و مکانیک سنگی، ۷ رخساره مکانیکی در سازند مورد مطالعه شناسایی شدند که این رخساره‌های مکانیکی بخوبی قابل تطابق در بین چاه‌های مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۹). همین‌طور این مطالعه نشان می‌دهد که مفهوم رخساره‌های مکانیکی روش کاربردی برای تطابق خصوصیات مکانیک سنگی در بین چاه‌های میدان مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۹).

در این تحقیق علاوه بر تطابق بین چاهی رخساره‌های مکانیکی بر اساس خصوصیات رسوب‌شناسی، سعی شد یک مدل سه بعدی لرزه‌ای از رخساره‌های مکانیکی نیز ارائه شود. با استفاده از این مدل سه بعدی رخساره‌های مکانیکی نیز می‌توان توزیع آنها را در میدان پیش بینی کرد. یک نقشه از مدل سه بعدی مدول یانگ در توالی کربناته سازند آسماری (بخش بالایی سازند) توزیع ۴ رخساره مکانیکی (RMF1 تا RMF4) را نشان می‌دهد (شکل الف-۷). به‌علاوه، یک نقشه از قسمت آواری سازند آسماری (بخش پایینی سازند) توزیع ۳ (RMF5 تا RMF7) رخساره مکانیکی را در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد (شکل ب-۷).

1. Fluid substitution
2. Microstructure
3. Stiffening
4. Softening
5. Tight
6. Dirty Sandstone



شکل ۹ تطابق رخساره‌های مکانیکی شناسایی شده به وسیله بافت، رخساره و مدول یانگ در سه چاه مطالعاتی. همان‌طور که در پنجره اصلی دیده می‌شود، تطابق قابل قبولی بین رخساره‌های مکانیکی در چاه‌های میدان وجود دارد.

در بهینه کردن تعداد چاه‌ها و محل صحیح‌تر حفاری نیز کمک کند.

نتیجه‌گیری

مقایسه آنالیز رخساره‌ها، محیط رسوبی، بافت، نوع منافذ، نسبت ذره یا دانه به سیمان یا گل و تخلخل با تغییرات مدول یانگ، نتایج زیر را نشان می‌دهد. به وسیله این پارامترها، ۷ رخساره مکانیکی در سازند مورد مطالعه تعیین شدند. این رخساره‌های مکانیکی ابزار مناسبی برای تطابق در بین چاه‌ها و گسترش نتایج در مقیاس میدانی می‌باشند.

از آنجایی که بین مدول‌های الاستیک و تخلخل با یک روند معکوس رابطه منطقی وجود دارد، نقشه‌های توزیع تخلخل از سازند، نتایج مشابهی را در توزیع رخساره‌های مکانیکی نشان می‌دهند (شکل الف-۸ و ب). این نقشه‌ها (مدول یانگ و تخلخل) توزیع رخساره‌های مکانیکی و خصوصیات مرتبط با آنها را در مقیاس میدانی نشان می‌دهند. تعیین توزیع خصوصیات مکانیکی سازند و پیش‌بینی آن در مقیاس میدانی باعث ایجاد نگرش صحیح‌تر در توسعه میدانی می‌شود. به‌علاوه، یک مدل ژئومکانیکی با استفاده از نشانگرهای لزره‌ای می‌تواند

از محل چاه تا مقیاس میدانی تعیین کرد. تعیین و تطابق رخساره‌های مکانیکی در بین چاه‌ها و ارائه مدل سه بعدی توسط نشانگرهای لزره‌ای منجر به گسترش نتایج و تفسیر ناهمگنی‌ها در مخزن می‌شود. این تفسیر، زمانی که پیش‌بینی شبیه‌سازی و رفتار چاه‌ها در میدان مقایسه می‌شوند، بسیار ارزشمند است. انتظار می‌رود که این نگرش جامع در این مطالعه بیانگر توزیع زون‌های پوک و سخت در سنگ مخزن آسماری باشد.

تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم اداره پژوهش و توسعه شرکت نفت مناطق مرکزی ایران جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها و همکاری‌های لازم در انجام این پروژه، کمال تشکر و قدردانی را داریم. برای انجام این پروژه از امکانات آزمایشگاهی دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران نیز استفاده شده است.

این پژوهش نشان می‌دهد که مدول الاستیک یانگ با تغییرات خصوصیات رسوب‌شناسی سنگ مخزن تطابق دارد. به طوری که در بخش کربناته سازند با افزایش سطح انرژی در محیط رسوبی از بافت مادستونی تا گرین‌استونی (RMF1 تا RMF3) مقدار مدول یانگ نیز افزایش می‌یابد. همچنین در بعضی از قسمت‌های توالی، رخساره پراورزی شول تحت تأثیر سیمان کلسیتی یا انیدریتی قرار گرفته است که به شدت مقدار مدول یانگ افزایش می‌یابد (RMF4). به علاوه در بخش آواری سازند با کاهش سطح انرژی محیط (یعنی از ماسه دانه درشت تا ماسه دانه ریز و گلی) (RMF5 تا RMF6) مدول یانگ افزایش می‌یابد. در بعضی از قسمت‌های توالی آواری، ماسه‌های دانه درشت به شدت توسط سیمان کلسیتی و دولومیتی سیمانی شده‌اند که باعث افزایش مدول یانگ شده است (RMF7). با تعریف رخساره‌های مکانیکی، بهتر می‌توان توزیع خصوصیات رسوب‌شناسی، پتروفیزیکی و مکانیکی را

مراجع

- [1]. Hussain M., El Hassan W.M. and Abdurraheem A., "Controls of grain-size distribution on geomechanical properties of reservoir rock-A case study: Cretaceous Khafji Member, Zuluf Field, Offshore Arabian Gulf", Marine and Petroleum Geology., Vol. 23, pp. 703-713, 2006.
- [2]. Jeng F. S., Weng M. C., Lin M. L. and Huang T. H., "Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of Tertiary sandstones from Taiwan," Engineering Geology., Vol. 73, pp. 71-91, 2004.
- [3]. Williams M. P., Edwards H. E. and Bratli R. K., "Rock mechanical facies, classification and use in carbonate reservoirs, Offshore Abu Dhabi," SPE Paper, No. 161524, 2012.
- [4]. Dunham R.J., "Classification of carbonate rocks according to depositional texture," AAPG Mem. 1, pp. 108-121, 1962.
- [5]. Pettijohn F. J., Potter P. E. and Siever R., Sand and Sandstone, Springer-Verlag, p. 553, 1987.
- [6]. Verwer K., Eberli G., Baechle G. and Weger R., "Effect of carbonate pore structure on dynamic shear moduli," Geophysics., Vol. 75 (1), pp. 1-8, 2010.
- [7]. Baechle G. T., Eberli G. T., Weger R. J. and Massaferrero J. L., "Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution," Geophysics., Vol. 74 (3), pp. 135-147, 2009.