

# امکان‌سنجی بهره‌برداری از مطالعات لرزه‌نگاری چهار بعدی مخزن سروک در میدان آزادگان

پژوهش‌نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۸

۱۳۹۳

صفحه، ۱۱۷-۱۲۶

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۱۲/۱

ایرج مداحی<sup>\*</sup>، سعید قاضی‌نژاد<sup>۱</sup>، اصغر نادری<sup>۱</sup>، سجاد اسماعیل پور<sup>۱</sup> و مصطفی حیدری<sup>۱</sup>

۱- پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

برخوردار نمی‌باشد. نهایت اینکه احتمال مصورسازی تغییرات ناشی از جابه‌جایی سیال برای مخزن مورد مطالعه به تنهایی اندک ارزیابی می‌گردد با این حال اثرات توام تغییرات فشار و جابه‌جایی سیال روی داده‌های لرزه‌ای موج تراکمی (داده‌های لرزه‌ای موجود) حدود ۱۳٪ برآورد می‌گردد که از نظر عملی امکان تفسیر آن محتمل بوده و لذا انجام مطالعات چهار بعدی لرزه‌ای مخزن سروک در حین توسعه میدان آزادگان توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مصورسازی لرزه‌ای، امکان‌سنجی لرزه‌ای، لرزه‌نگاری چهار بعدی، تغییرات سیال و تغییرات مخزن

## مقدمه

تکنولوژی لرزه‌نگاری چهار بعدی در واقع، تفسیر و مقایسه برداشت‌های تکراری داده‌های لرزه‌ای سه بعدی (و یا دو بعدی) در زمان‌های متوالی در زمان بهره‌برداری از مخزن می‌باشد و شامل فرآیند گسترده‌ای از مطالعات امکان‌سنجی تا طراحی برداشت داده‌ها، پردازش، وارون‌سازی و تفسیر داده‌های لرزه‌ای است که با تلفیق نتایج حاصل از اطلاعات تولیدی، امکان تعیین تغییرات مخزن در طول تولید و ازدیاد برداشت را ممکن می‌نماید. تفاوت موجود بین داده‌های

## چکیده

پس از انتخاب سازند سروک به‌عنوان سازند هدف تعداد ۳۱ نمونه از پلاگ‌های تهیه شده از مغزه چاه‌های حفر شده از آهک‌های سازند سروک، برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به مرکز تحقیقات و تکنولوژی (TRC) ژاپن فرستاده شدند و سرعت امواج تراکمی و برشی در شرایط مخزن و تحت مقادیر مختلف اشباع سیال، فشار و دما مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. پاسخ‌های لرزه‌ای سازند سروک از دو منظر سرعت و دامنه امواج مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات آنها نسبت به تغییر شرایط مخزن مورد تجزیه تحلیل و مدل‌سازی واقع گردید، با انجام اعتبارسنجی مدل گاسمن برای سازند مذکور که خطای نسبی کمتر از ۴٪ را نشان می‌دهد، استفاده از مدل مذکور در مطالعات چهار بعدی توجیه‌پذیر نمود. نتایج حاصل نشان داد که اثر تغییرات فشار موثر برای مخزن مورد مطالعه قابل پیگیری بوده و تغییر سرعت موج تراکمی ۱۲٪ و برای سرعت موج برشی ۲۱٪ و برای تغییر ضریب انعکاس موج تراکمی معادل ۶٪ بوده است ولی اثر تغییرات اشباع سیال بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای به میزان کمتر از ۲٪ بوده است که برای مطالعات لرزه‌ای چهار بعدی از اعتبار لازم

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی

maddahie@ripi.ir

که با برداشت مجدد داده‌های لرزه‌ای و صرف هزینه‌های زیادی همراه است، بررسی امکان سنجی آن به‌عنوان فاز اول این نوع مطالعات در جهت تعیین میزان تاثیر پاسخ‌های لرزه‌ای از تغییرات احتمالی مخزن و درجه اعتبار آن برای مخزن مورد مطالعه، امری ضروری به‌شمار می‌رود [۱]. مهم‌ترین عوامل موثر در تغییر پاسخ‌های لرزه‌ای مخزن شامل تغییر در میزان اشباع سیال، فشار موثر و درجه حرارت مخزن می‌باشد که در ذیل بررسی شده است [۳].

### سیال منفذی

در سنگ اشباع از سیال، تقابل میان فازهای سیال و جامد می‌تواند بیشترین تاثیر را روی پاسخ‌های لرزه‌ای داشته باشد که این وابستگی متاثر از فرکانس نیز می‌باشد. به‌طوری‌که در سنگ‌های اشباع از آب، این وابستگی فرکانسی در زیر ۱۰۰۰ Hz به‌صورت می‌نیم در می‌آید، ولی در سنگ‌های اشباع از نفت این وابستگی فرکانسی تا فرکانس‌های پایین‌تر نیز ادامه می‌یابد. به‌گونه‌ای که در محدوده فرکانسی پایین، حرکت جامد و سیال به‌صورت هم فاز با یکدیگر می‌باشد و در این محدوده معادلات گاسمن نیز معتبر بوده و این اجازه را می‌دهند تا مدول‌های الاستیک سنگ‌های اشباع از طریق مطالعات محیط مؤثر محاسبه گردد [۴]:

$$K_U = K_D + \frac{\left(1 - \frac{K_D}{K_S}\right)^2}{\frac{\phi}{K_F} + \frac{1-\phi}{K_S} + \frac{K_D}{K_S^2}} \quad (1)$$

$$\mu_v = \mu_d \quad (2)$$

در این معادله  $K_U$  مدول بالک اشباع سنگ،  $\phi$  تخلخل،  $K_S$  مدول بالک ماتریکس سنگ،  $K_D$  مدول بالک خشک سنگ،  $\mu_D$  مدول برشی خشک سنگ و  $K_F$  مدول بالک سیال می‌باشد. شایان ذکر است که مدول برشی در حالت خشک و اشباع تقریباً یکسان است، چرا که اثر تغییر سیال منفذی بر روی سرعت موج برشی فقط ناشی از تغییرات دانسیته بوده و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. ولی مدول بالک سنگ با ورود سیال منفذی افزایش می‌یابد که اساساً به‌دلیل بسته شدن حفرات و سخت شدن سنگ می‌باشد. بدین ترتیب به کمک این روابط می‌توان مدول بالک موثر سیال را در معادله گاسمن وارد کرده و سرعت‌های امواج الاستیک را به‌دست آورد.

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \quad (3)$$

لرزه‌ای متوالی از نظر سرعت امواج، جابه‌جایی افقی‌ها و ضرایب بازتاب را می‌توان به‌عنوان تغییرات اشباع سیال و فشار مخزن در حین تولید و یا ازدیاد برداشت تفسیر نمود، با این حال موفقیت یک پروژه چهاربعدی لرزه‌نگاری به خواص سیال و سنگ، مقادیر فشار، حرارت، روش‌های برداشت، پردازش و تفسیر داده‌ها بستگی دارد [۱]. با استفاده از مطالعات امکان‌سنجی ابتدا باید تردیدهای موجود در به‌کارگیری این روش و نیز میزان کارایی آن را تعیین نمود تا در صورت منفی بودن نتایج، از اتلاف سرمایه در تکرار عملیات جلوگیری شود [۲].

رشد کاربردهای این تکنولوژی از سال ۱۹۹۶ در نتیجه بهبود روش‌های بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای و مصورسازی لرزه‌ای مخزن به‌طور روز افزون ادامه داشته است [۱] به‌طوری‌که فناوری مصورسازی لرزه‌ای چهاربعدی اکنون گسترش جهانی یافته و هم‌زمان با کاوش‌های جدید در سواحل خلیج مکزیک حوزه‌کنگو، دریای شمال، استرالیا، برزیل و جنوب شرق آسیا، در پژوهشگاه صنعت نفت نیز امکان‌سنجی این نوع مطالعات در چند میدان نفتی کشورمان (میدان اهواز - ۱۳۸۵، میدان آتیمور - ۱۳۸۹، میدان مارون - ۱۳۹۰) به انجام رسیده است [۳].

### ویژگی مخزن و عوامل موثر بر پاسخ‌های لرزه‌ای

ماهیت تغییرپذیری نسبی مخازن هیدروکربوری ناشی از پارامترهای مختلف از قبیل، میزان اشباع، محتوای سیال منفذی، تخلخل، نفوذپذیری و ویژگی‌های سنگ‌شناسی آن می‌باشد. شناخت این پارامترها و تغییر آنها به‌صورت تابعی از زمان، در ارزیابی میزان تولید، پیش‌بینی فرآیندهای تولید و مدیریت بهینه مخزن امری ضروری می‌باشد.

تغییرات فوق، هدف اصلی در مطالعات مخزنی بوده و شناسایی اثر هر یک از آنها در پاسخ‌های لرزه‌ای نیز هدف اصلی مطالعات لرزه‌نگاری ۴ بعدی می‌باشد. بنابراین، مسأله اصلی در رابطه با چگونگی این ارتباط و وابستگی بین پارامترهای مخزن و پاسخ‌های لرزه‌ای است که مسلماً رابطه یکتایی برای تمام مخازن هیدروکربوری وجود ندارد. به‌همین دلیل پیش از انجام فاز اصلی مطالعات لرزه‌نگاری

$$dK_d/dP = 0.372 \exp(-0/0791P) \quad (7)$$

### درجه حرارت

تغییرات درجه حرارت با تغییر دادن مدول‌های الاستیک قسمت‌های جامد و سیال سنگ، موجب تغییر در مقادیر مدول‌های بالک و برشی سنگ می‌شود، به طوری که افزایش درجه حرارت باعث افزایش حجم حفرات و بازشدگی ترک‌های جدید به ویژه در مرز دانه‌ها شده و با کاهش ویسکوزیته سیال باعث آزاد شدن دانه‌ها و در نتیجه کاهش مدول‌های بالک و برشی و به دنبال آن کاهش میزان سرعت امواج لرزه‌ای می‌شود [۷].

در درجه حرارت‌های بالاتر، باز شدگی ترک‌ها با نرخ‌ی بالغ بر  $1^\circ\text{C}/\text{MPa}$  به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این رفتار غیرخطی در داده‌های آزمایشگاهی در درجه حرارت‌های زیر  $2000^\circ\text{C}$  به حالت خطی تبدیل می‌شود. با این حال برای درجه حرارت‌های متداول مخزن، می‌توان یک تقریب خطی برای تغییرات مدول‌های الاستیک با دما در نظر گرفت. وانگ و نور در سال ۱۹۸۹ برای یافتن شیب این رفتار خطی، رابطه زیر را برحسب تغییرات مدول‌های الاستیک خشک ( $K_d$ ) و درجه حرارت (T) ارائه کردند که در سال ۱۹۹۹ توسط آزمایش‌های بنتلی و ژانگ مورد تأیید قرار گرفت [۷]:

$$dK_d/dT = 0.0155 \quad (8)$$

$$d\mu_d/dT = 0.0065 \quad (9)$$

### داده‌ها و اطلاعات

میدان مورد مطالعه میدان آزادگان متعلق به حوزه رسوبی زاگرس می‌باشد که در جنوب غربی ایران واقع شده است. سازند کربناته سروک نیز به‌عنوان مخزن اصلی این میدان و لایه شیلی لافان پوش سنگ آن محسوب می‌شود [۸]. برای انجام مطالعات امکان‌سنجی لرزه‌ای چهار بعدی ابتدا تعداد ۳۱ نمونه از پلاگ تهیه شده از مغزه (شکل شماره ۱: الف) چاه‌های حفر شده در میدان که همگی از آهک‌های سازند سروک می‌باشند (جدول شماره ۱)، برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به مرکز تحقیقات و تکنولوژی ژاپن (TRC) فرستاده شدند تا سرعت امواج P و S در شرایط مخزن تحت مقادیر مختلف اشباع سیال، فشار و دما اندازه‌گیری شود.

$$V_S = \sqrt{\mu/\rho} \quad (4)$$

در این روابط،  $\rho$  معرف چگالی و  $\mu$  معرف مدول برشی می‌باشد. با صرف نظر کردن از حداکثر اشباع شدگی گاز، زمانی که میزان اشباع آب افزایش می‌یابد سرعت موج برشی به‌علت افزایش دانسیته از یک طرف و عدم حساسیت مدول برشی به سیال سنگ از طرف دیگر کاهش می‌یابد (معادله ۴). در صورتی که افزایش اشباع آب باعث افزایش مدول بالک سیال شده و به‌نوبه خود باعث افزایش مدول بالک موثر و در نتیجه افزایش سرعت موج طولی آن می‌گردد [۵ و ۶].

### فشار

ساختارهای ریز حفرات و پیچیدگی موجود در سنگ‌ها باعث می‌شود سرعت‌های لرزه‌ای و میرایی آنها حساسیت بسیار بالایی به تغییرات تنش موثر داشته باشد. افزایش فشار محصورکننده باعث افزایش سرعت‌ها و کاهش میرایی آنها می‌گردد به طوری که:

۱- افزایش فشار محصورکننده همواره با بسته شدن حفرات و به‌خصوص ترک‌ها همراه بوده و باعث استحکام بیشتر سنگ و افزایش سرعت امواج می‌گردد.

۲- افزایش فشار محصورکننده در محل تماس ذرات و دانه‌ها باعث فشردگی محکم و اتصال بهتر و سخت‌تر آنها به یکدیگر و در نتیجه افزایش سرعت امواج می‌شود.

۳- تنش (فشار) موثر به‌صورت اختلاف بین فشار محصورکننده و فشار منفذی تعریف و معادله زیر برای آن در نظر گرفته می‌شود که در آن فشار موثر، فشار محصورکننده و فشار منفذی است [۵ و ۶]:

$$P_{\text{eff}} = P_c - nP_p \quad (5)$$

n ضریب عددی است که معمولاً در تخمین سرعت برابر واحد در نظر گرفته می‌شود. سرعت امواج لرزه‌ای، مدول بالک و برشی سنگ‌های خشک با بالا رفتن میزان فشار موثر افزایش می‌یابد [۴]. برای محاسبه اثرات فشار موثر، گریگوری مدل فیزیک سنگی زیر را با محاسبه مدول‌های الاستیک و سرعت امواج تدوین کرد که توسط بنتلی و ژانگ مورد آزمایش و تأیید قرار گرفت که در آن مدول‌های الاستیک به شکل نمایی و به‌صورت تابعی از فشار موثر (P) تغییر می‌کنند [۷]:

$$dK_d/dP = 0.746 \exp(-0/0773P) \quad (6)$$

جدول ۱- تغییرات ضرایب بازتاب در اثر جایگزینی سیال و تغییرات فشار

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	سرعت موج برشی (Km/S)	سرعت موج تراکمی (Km/S)	
۲/۰۵	۲/۱۵	۳/۵	لایه اول (پوش سنگ)
۲/۵	۲/۶۵	۴/۷	لایه دوم (مخزنی) پیش از تولید
۲/۴۹	۲/۳۹	۴/۶	لایه دوم (مخزنی) پس از تولید

آزمایشگاه پتروفیزیک پژوهشگاه صنعت نفت تعیین شد.  
۲- مدول‌های بالک و برشی سنگ خشک نیز از روابط زیر محاسبه قرار گردید:

$$K_D = \rho (Vp^2 - 4/3V_s^2) \quad (10)$$

$$\mu_D = \rho Vp^2 \quad (11)$$

۳- با توجه به این که اجزای جامد سنگ مخزن مورد مطالعه از سه کانی اصلی (کوارتز، کلسیت و دولومیت) تشکیل شده و رابطه بین درصد حجمی اجزای جامد (S) و نیز مدول بالک (K) آنها در کتاب‌های مرجع فیزیک سنگ موجود می‌باشد، با بهره‌گیری از روابط ذیل مدول بالک قسمت جامد سنگ محاسبه شد:

$$K_{Voigt} = K_{Quartz} S_{Quartz} + K_{Calcite} S_{Calcite} + K_{Dolomite} S_{Dolomite} \quad (12)$$

$$S/K_{Reuss} = S_{Quartz}/K_{Quartz} + S_{Calcite}/K_{Calcite} + S_{Dolomite}/K_{Dolomite} \quad (13)$$

$$K_{Hill} = 1/2 (K_{Voigt} + K_{Reuss}) \quad (14)$$

لازم به ذکر است سیال نمونه‌های سنگ در حالت اشباع، آب نمک می‌باشد. بنابراین، مدول بالک سیال (K<sub>fl</sub>) در این محاسبات مدول آب نمک در نظر گرفته شد [۳].

۴- در ادامه با استفاده از رابطه گاسمن مدول بالک زه‌کشی نشده سنگ محاسبه گردید.

همچنین به موازات آن مقدار تخلخل نمونه‌های مغزه و لاگ‌های پتروفیزیکی در پژوهشگاه صنعت نفت مورد مطالعه و اندازه‌گیری قرار گرفت (شکل شماره ۱: ب).

### روش تحقیق و مراحل مطالعات

برای انجام مطالعات لرزه نگاری چهار بعدی در میدان مذکور، ابتدا فاز امکان سنجی آن مطرح گردید. که موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد. طی این فاز، پاسخ‌های لرزه‌ای سازند سروک از دو منظر زمان سیر و دامنه امواج مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات آنها نسبت به تغییر شرایط مخزن به صورت مراحل ذیل بررسی و مدل‌سازی شد:

#### اعتبارسنجی مدل گاسمن برای مخزن مورد مطالعه

محاسبه پارامترهای تخلخل، مدول‌های بالک و برشی زه‌کشی شده و همچنین مدول‌های بالک ذرات جامد و سیال در مخزن مورد مطالعه این امکان را به وجود آورد که با به‌کارگیری معادله گاسمن، ابتدا مدول بالک زه‌کشی نشده سنگ مخزن را محاسبه کرده و سپس آنرا در تعیین سرعت‌های لرزه‌ای به شرح زیر مورد بهره‌برداری قرار دهیم:  
۱- مقادیر تخلخل (φ) برای نمونه‌های سنگی که در

	Well	Z- ۱	
	عمق	۳۷۸۳/۱	m
	سازند	گدوان	
	نوع سنگ	آهک	
	جهت پلاک‌گیری	عمودی	
	چگالی ذرات	۲/۶۴	g/cc
	چگالی کلی	۲/۴۰	g/cc
	تخلخل	۸/۹	%
	ضریب بالک (۶۴۰۰psi)	-	mD
	ضریب بالک افقی	۰/۲۲۹	mD
	سرعت موج تراکمی در حالت خشک (۶۴۰۰psi)	۴/۶۲	km/s
	سرعت موج برشی در حالت خشک (۶۴۰۰psi)	۲/۵۷	km/s



شکل ۱- الف) پلاگ نمونه سنگ شماره ۵ و ب) خلاصه اطلاعات پتروفیزیکی سنگ

جدول ۲- لیست پلاگ‌های مغزه (نوع سنگ آهک در سازند سروک)

نمونه	عمق حفاری (متر)
۱ AZ	۲۸۸۱/۱
۲ AZ	۲۷۷۳/۰
۳ AZ	۲۸۹۲/۵
۴ AZ	۲۸۹۴/۲
۵ AZ	۲۷۶۵/۲
۶ AZ	۲۷۷۰/۰
۷ AZ	۲۸۷۰/۰
۸ AZ	۲۸۷۸/۰
۹ AZ	۲۸۸۲/۴
۱۰ AZ	۲۷۸۱/۴
۱۱ AZ	۲۷۸۸/۰
۱۲ AZ	۲۷۸۹/۳
۱۳ AZ	۲۸۰۲/۶
۱۴ AZ	۲۸۰۸/۲
۱۵ AZ	۲۸۱۱/۵
۱۶ AZ	۲۸۱۴/۲
۱۷ AZ	۲۸۱۷/۴
۱۸ AZ	۲۸۱۹/۱
۱۹ AZ	۲۸۳۲/۳
۲۰ AZ	۲۸۴۲/۳
۲۱ AZ	۲۸۴۵/۹
۲۲ AZ	۲۸۴۹/۷
۲۳ AZ	۲۶۳۸/۴
۲۴ AZ	۲۶۴۲/۴
۲۵ AZ	۲۶۴۸/۶
۲۶ AZ	۲۶۵۴/۵
۲۷ AZ	۲۶۵۶/۰
۲۸ AZ	۲۶۶۰/۱
۲۹ AZ	۲۶۷۶/۷
۳۰ AZ	۲۶۸۴/۳
۳۱ AZ	۲۶۹۴/۱

دو روش (اندازه‌گیری مستقیم و محاسبه از مدل گاسمن) قابل اغماض بوده و در نهایت مدل گاسمن برای محاسبه سرعت‌های لرزه‌ای در این میدان از درجه اعتبار قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

#### محاسبه اثر تغییر پارامترهای مخزن بر زمان سیر موج

##### اثر تغییر اشباع سیال بر زمان سیر امواج لرزه‌ای

با اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای تخلخل، مدول بالک و برشی زه‌کشی شده، مدول‌های بالک جامد سنگ و سیال در حالت‌های مختلف اشباع (آب، نفت و یا مخلوطی از آنها) و با استفاده از معادله گسمن ابتدا مدول بالک زه‌کشی نشده سنگ و سپس سرعت‌های لرزه‌ای در شرایط مختلف اشباع محاسبه گردید که نتایج آن به صورت ذیل می‌باشد. با اندازه‌گیری دانسیته و سرعت موج P در هر جزء مخزن، برای هیدروکربور مخزن دانسیته برابر  $0.81 \text{ g/cm}^3$  و مدول بالک معادل  $1/4 \text{ GPa}$  برآورد گردید. به منظور محاسبه تغییرات خواص لرزه‌ای مخزن در اثر تغییر اشباع سیال، ابتدا سرعت امواج تراکمی و برشی در حالت‌های اشباع ۰ و ۱۰۰٪ هیدروکربور در فشار موثر ثابت (۴۴۰۰ psi) اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد تغییرات سرعت موج P در حدود ۲٪ بوده است (جدول ۲). البته برای تغییرات کم در اشباع و در نتیجه جابه‌جایی‌های کم سیال این عدد کمتر نیز می‌باشد، به طوری که به ازای ۳۰٪ تغییر اشباع سیال (از ۸۰٪ اشباع نفت به ۵۰٪ نفت)، میزان تغییرات سرعت موج P تنها در حدود ۰/۵٪ خواهد بود. همچنین تغییرات سرعت موج S بسیار کمتر از آن می‌باشد که این موضوع نیز دور از انتظار نیست چرا که مدول برشی به تغییرات سیال سنگ حساس نبوده و تنها به دلیل اثر افزایش دانسیته سیال، مقدار سرعت موج S به میزان ناچیزی کاهش یافته است.

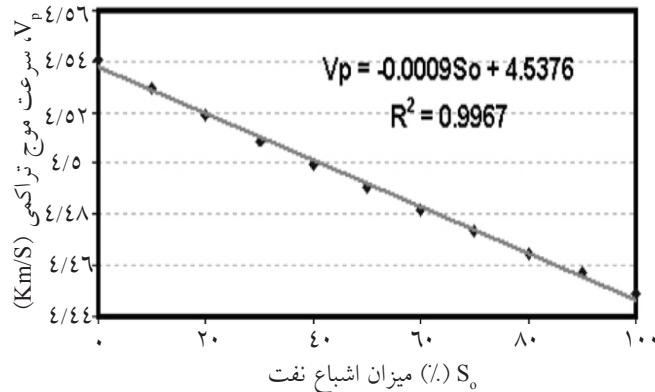
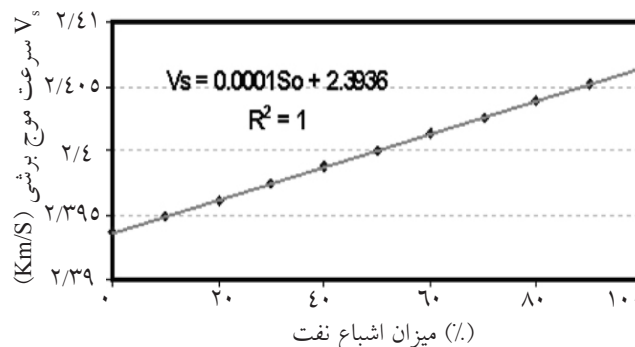
تغییرات سرعت موج P و S در حالت‌های مختلف اشباع نفت مخزن کربناته مورد مطالعه (بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی) در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد اشباع نفت، سرعت موج P به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. در حالی که سرعت موج S با روند خطی، اندکی افزایش نشان می‌دهد.

سپس با استفاده از مدول بالک و برشی زه‌کشی نشده حاصل از مدل گاسمن و دانسیته سنگ حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، سرعت‌های لرزه‌ای سنگ در حالت اشباع از آب نمک به دست آمد.

۵- پس از بررسی‌های مقایسه‌ای، بین مقادیر اندازه‌گیری و مقادیر محاسبه شده توسط مدل گاسمن، مشخص شد که میزان انحراف نسبی سرعت‌های امواج P و S بین این

جدول ۳- تغییرات سرعت امواج برشی (S) و تراکمی (P) در نتیجه تغییرات سیال مخزن

نوع سرعت صوت (m/s)	سرعت امواج در حالت اشباع نفت	سرعت امواج در حالت اشباع آب	درصد تغییر سرعت
$V_p$ (m/s)	۴۴۵۰	۴۵۴۰	۲
$V_s$ (m/s)	۲۴۱۰	۲۳۹۰	۱

شکل ۲- تغییر سرعت موج  $V_p$  در اثر جابه‌جایی سیالشکل ۳- تغییر سرعت موج  $V_s$  در اثر جابه‌جایی سیال

جامد سنگ را محاسبه نموده و سپس با قرار دادن این مقادیر در فرمول گاسمن و با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، به محاسبه تغییرات سرعت در حرارت‌های مختلف پرداخت. بر این اساس و در ادامه لازم است فشار موثر اولیه مخزن به‌دست آید که این مقدار از طریق آزمایش‌های تولید برابر با ۵۱۵۰ psi معادل ۳۵/۵ MPa برای این مخزن به‌دست آمد. با محاسبات انجام گرفته در این قسمت مشاهده گردید که تغییرات سرعت ناشی از کاهش فشار موثر مخزن تا مقدار عددی صفر، برای موج برشی برابر با ۲۲٪ و برای موج تراکمی حدود ۱۲٪ می‌باشد که از لحاظ عددی قابل توجه بوده و در مطالعات چهار بعدی و در تفاسیر عملی لرزه نگاری قابل پیگیری می‌باشد (جدول ۳). نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مدل حاصل از کاهش فشار در فرآیند تولید بر روی سرعت امواج P و S در شکل‌های ۴ و ۵ نشان شده است.

#### اثر تغییرات فشار موثر مخزن بر زمان سیر امواج لرزه‌ای

به‌دلیل عدم وجود داده‌های مربوط به تغییرات فشار در میدان مورد مطالعه، برای محاسبه اثرات فشار موثر، ناگزیر از مدل فیزیک سنگ که توسط گنورگی در سال ۱۹۷۶ ارائه شده، است استفاده گردید [۹]. با حل این معادله می‌توان روابط زیر را به‌منظور تعیین مدول بالک و برشی سنگ خشک بر حسب فشار موثر استخراج کرد:

$$K_{dn} = -9.561 [\exp(-0.0773p_n) - 1] + K_{d0} \quad (15)$$

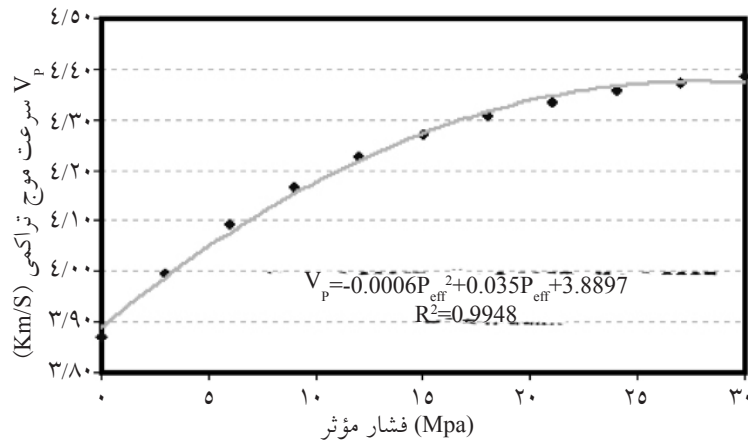
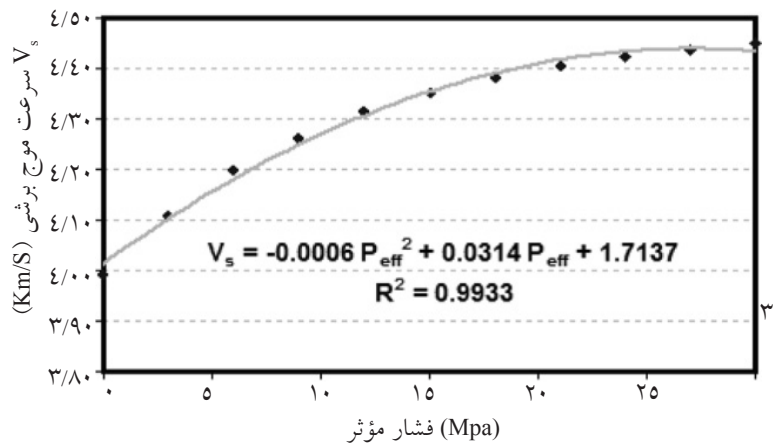
$$\mu_{dn} = -9.561 [\exp(-0.0773p_n) - 1] + \mu_{d0} \quad (16)$$

که در آنها  $K_{d0}$  و  $\mu_{d0}$  به‌ترتیب مدول‌های بالک و برشی در فشار ۰ می‌باشد. و بنابر مطالعات صورت گرفته در سال ۱۹۹۹ توسط بنتلی و زانگ مقادیر این پارامترها به‌ترتیب برابر ۲/۸۹۸۳ و ۶/۹۸۰۸ (Gpa) ارائه شده است [۷].

بدین ترتیب می‌توان مقادیر مدول بالک و برشی قسمت‌های

جدول ۳- تغییرات سرعت امواج برشی (S) و تراکمی (P) در نتیجه تغییرات فشار مخزن

نوع سرعت صوت (m/s)	سرعت امواج در فشار مؤثر (۵۱۵۰ psi) $P_e$	سرعت امواج در فشار مؤثر (psi) $P_e$	درصد تغییر سرعت
$V_p$ (m/s)	۴۳۹۰	۳۸۷۰	۱۲
$V_s$ (m/s)	۲۱۵۰	۱۶۹۰	۲۱

شکل ۴- تغییر سرعت موج  $V_p$  در اثر تغییرات فشار مؤثرشکل ۵- تغییر سرعت موج  $V_s$  در اثر تغییرات فشار مؤثر

پارامترها به ترتیب برابر ۷/۱۷ و ۹/۹۲ (Gpa) برآورد شده است [۱۰].

بدین ترتیب می‌توان مقادیر مدول بالک و برشی قسمت‌های جامد سنگ را محاسبه نموده و با قرار دادن این مقادیر در فرمول گاسمن با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، به محاسبه تغییرات سرعت در درجه حرارت‌های مختلف پرداخت.

ابتدا با استفاده از اطلاعات تولیدی و چاه معلوم شد که درجه حرارت اولیه مخزن مورد مطالعه برابر ۲۰۵ °F (۹۶ °C) می‌باشد. بدیهی است که در فرآیند تولید، فشار

اثر تغییرات درجه حرارت مخزن بر زمان سیر امواج لرزه‌ای برای محاسبه اثر تغییر درجه حرارت، از مدل فیزیک سنگ تدوین شده توسط وانگ و نور در سال ۱۹۸۹ استفاده شده است. با حل این معادلات می‌توان روابط زیر را به منظور تعیین مدول بالک و برشی خشک بر حسب درجه حرارت استخراج کرد:

$$\mu_d = -0/0056T - \mu_{d0} \quad (17)$$

$$K_d = -0/0056T - K_{d0} \quad (18)$$

که در آن  $\mu_{d0}$  و  $K_{d0}$  به ترتیب مدول‌های بالک و برشی خشک در دمای °C می‌باشد. که بنابر مطالعات صورت گرفته در سال ۱۹۹۹ توسط بتلی و ژانگ مقادیر این

سرعت موج  $P(\alpha_2)$  همانند سرعت موج  $S(\beta_1)$  و دانسیته  $(\rho_1)$  در لایه اول در حالت‌های پیش از تولید و پس از تولید، به صورت ثابت باقی می‌ماند. در حالی که در لایه دوم که یک لایه مخزنی است، این پارامترها تغییر کرده و برای پیش از تولید به ترتیب  $\alpha_2$  و  $\beta_2$  و  $\rho_2$  برای یک حالت پس از تولید مقادیر  $\alpha_2$ ،  $\beta_2$  و  $\rho_2$  در نظر گرفته می‌شود. در ادامه برای محاسبه ضرایب انعکاس در محل برخورد سنگ پوش و سنگ مخزن از روابط زیر استفاده شد که به نسبت به اسمیت و گیدلو می‌باشد [۱۱].

$$\Delta R^F(\theta) \approx 1/2 \left( \frac{\Delta \rho^F}{\rho} + \frac{\Delta \alpha^F}{\alpha} \right) + \frac{\Delta \alpha^F}{2\alpha} \cdot \tan^2 \theta \quad (19)$$

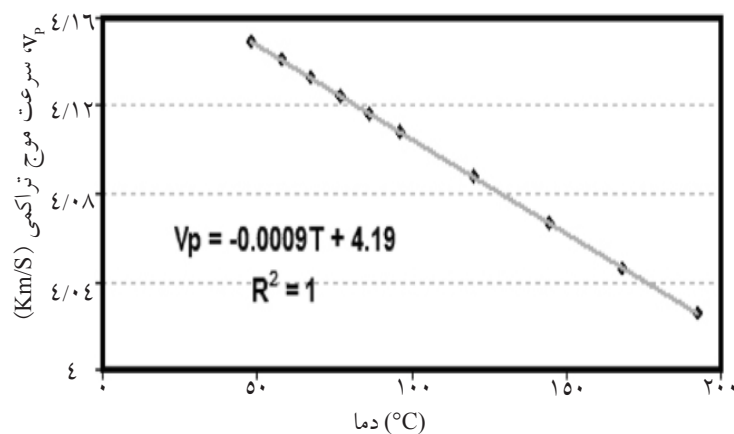
$$\Delta R^P(\theta) \approx 1/2 \frac{\Delta \alpha^P}{\alpha} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \cdot \frac{\Delta \beta^P}{\beta} \cdot \sin^2 \theta + \frac{\Delta \alpha^P}{2\alpha} \cdot \tan^2 \theta \quad (20)$$

درون مخزن کاهش می‌یابد و بر اساس قانون بویل-ماریوت، مخزن با کاهش دما مواجه می‌شود. طبق محاسبات انجام شده در این قسمت مشاهده گردید تغییرات سرعت ناشی از تغییر درجه حرارت بین ۴۸ تا ۹۶ °C از نظر عددی کوچک بوده و برای موج S کمتر از ۲٪ و برای موج P، حدود ۱٪ به دست آمد (جدول ۴) که نتایج آن به صورت مدل تجربی در شکل‌های ۶ و ۷ رسم شده است.

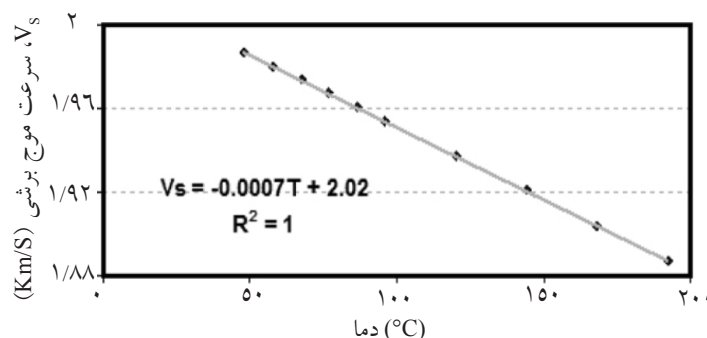
**محاسبه اثر تغییرات مخزن بر ضرایب انعکاس امواج لرزه‌ای**  
جهت انجام این قسمت از تحقیق ابتدا مدل دو لایه‌ای فرض شد که لایه به عنوان پوش سنگ بر روی لایه دوم یعنی لایه مخزنی واقع شده است. در این جا فرض می‌گردد که تغییرات اشباع سیال تنها در لایه دوم صورت می‌گیرد.

جدول ۴- تغییرات سرعت امواج برشی (S) و تراکمی (P) در نتیجه تغییرات دمای مخزن

درصد تغییر سرعت	سرعت امواج در دمای ۴۸ °C	سرعت امواج در دمای ۹۶ °C	نوع سرعت صوت (m/s)
۱	۴۱۵۰	۴۱۱۰	$V_p$ (m/s)
۲	۱۹۹۰	۱۹۵۰	$V_s$ (m/s)



شکل ۶- تغییر سرعت موج  $V_p$  در اثر تغییر درجه حرارت



شکل ۷- تغییر سرعت موج  $V_s$  در اثر تغییر درجه حرارت



این مطالعه محدوده تغییرات فشار کمی اغراق آمیز بوده (جهت پوشش تغییرات فشار در ازدیاد برداشت) با این حال مقادیر برآوردی تغییرات به اندازه‌ای بوده است که برای تغییرات فشاری کمتر از آن نیز امکان تفاسیر عملی آن در داده‌های لرزه‌ای وجود داشته باشد.

تغییرات درجه حرارت نشان می‌دهد که تغییرات سرعت از لحاظ مقداری بسیار کوچک و ناچیز (کمتر از ۱٪ برای موج P و ۲ درصد برای موج S) بوده (جدول شماره ۵) و امکان مشاهده آن از نظر عملی در داده‌های لرزه‌ای وجود نخواهد داشت.

مطالعات مربوط به ضرایب بازتاب در اثر جایگزینی کامل آب به جای نفت، تغییراتی برابر با ۱/۵٪ و برای تغییرات فشار مقادیر حدود ۶٪ را نشان می‌دهد (جدول شماره ۱) که در مطالعات عملی امکان تفسیر آن محتمل به نظر می‌رسد.

با در نظر گرفتن میزان دقت روش‌های لرزه‌نگاری انعکاسی و شرایط عمقی مخزن مورد مطالعه و نیز با توجه به مطالعات امکان‌سنجی در مخازن مشابه، می‌توان انتظار داشت که تغییرات سرعت بیشتر از ۶ تا ۷٪ را بتوان در مقاطع لرزه‌نگاری تفسیر نمود. نهایت اینکه در یک مطالعه چهار بعدی لرزه‌ای، عملاً نتایج ناشی از جابه‌جایی سیال و تغییرات فشار معمولاً به صورت توامان اثرگذار بوده و مشترکاً مورد تفسیر قرار می‌گیرند لذا با توجه به اصل برهم نهی و نتایج این پروژه، به نظر می‌رسد که تغییرات کلی سرعت و ضرایب انعکاس در مخزن مورد مطالعه دارای اندازه کافی برای تفاسیر عملی بوده و در نتیجه مطالعات امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی برای این مخزن مثبت ارزیابی می‌شود و پیشنهاد می‌گردد که از روش‌های لرزه‌ای در جهت مدل‌سازی تغییرات و مدیریت تولید در طول عمر این مخزن استفاده شود.

نمادهای F برای اشباع سیال و P برای فشار سیال می‌باشد. طبق اطلاعات موجود در این میدان، سرعت موج P در لایه اول ( $\alpha_1$ ) برابر  $3/5 \text{ km/s}$  و سرعت موج S ( $\beta_1$ ) معادل  $2/15 \text{ km/s}$  و دانسیته این لایه ( $\rho_1$ ) هم برابر  $2/05 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد که برای حالت‌های پیش از تولید و پس از تولید ثابت باقی می‌ماند. در لایه دوم که لایه مخزنی ما است، پارامترهای پیش از تولید  $\alpha_2$ ،  $\beta_2$  و  $\rho_2$  به ترتیب از نظر عددی برابر  $4/7 \text{ km/s}$ ،  $2/65 \text{ km/s}$  و  $2/5 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد که در اثر تغییر اشباع سیال، پس از تولید به مقادیر  $\alpha_{20}$ ،  $\beta_{20}$  و  $\rho_{20}$  معادل  $4/6 \text{ km/s}$ ،  $2/39 \text{ km/s}$  و  $2/49 \text{ g/cm}^3$  تغییر یافتند. با جای‌گذاری مقادیر این پارامترها در روابط فوق، تغییر ضریب انعکاس در مرز مربوطه تعیین گردید که نشان‌دهنده مقدار اندک تغییر یعنی حدود ۱/۶٪ بوده است (جدول ۵).

از طرف دیگر، در صورتی که پس از تغییر فشار ناشی از تولید، سرعت امواج P و S و دانسیته مخزن به ترتیب به مقادیر  $3/87 \text{ km/s}$ ،  $1/87 \text{ km/s}$  و  $2/49 \text{ g/cm}^3$  برسد، تغییر ضریب انعکاس به رقم حدود ۶٪ خواهد رسید.

### تحلیل و تفسیر

درصد تغییرات سرعت موج P ناشی از جایگزینی سیال آب بجای کل اشباع شدگی سیال نفت)  $S_0$  (در حدود ۲ درصد بوده و لذا به نظر می‌رسد که تفسیر مجزای تغییرات در اثر جایگزینی سیال در زمان‌های متوالی عمر مخزن مقدور نبوده و یا اینکه شانس کاربردی کمی خواهد داشت و البته این امکان در مطالعات مربوط به موج S از شانس کمتری نیز برخوردار خواهد بود (جدول شماره ۳).

تغییرات فشار موثر مخزن، مقادیر عددی بالایی را برای تغییرات سرعت هر دو موج P و S به ترتیب ۱۲ و ۲۱ درصد نشان می‌دهد (جدول شماره ۴)، هرچند که در

جدول ۵- تغییرات ضرایب بازتاب در اثر جایگزینی سیال و تغییرات فشار

چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	سرعت موج برشی (Km/S)	سرعت موج تراکمی (Km/S)	
۲/۰۵	۲/۱۵	۳/۵	لایه اول (پوش سنگ)
۲/۵	۲/۶۵	۴/۷	لایه دوم (مخزنی) پیش از تولید
۲/۴۹	۲/۳۹	۴/۶	لایه دوم (مخزنی) پس از تولید

## نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- درصد تغییرات سرعت موج P و S ناشی از جایگزینی آب اشباع شدگی سیال نفت ( $S_0$ )، کمتر از ۲٪ بوده و امکان تفسیر مجزای این تغییرات در زمان های متوالی برای این مخزن وجود ندارد.

۲- اثر تغییرات فشار موثر مخزن در سرعت امواج P و S به ترتیب ۱۲ و ۲۱٪ بوده و از نظر عملی تفسیر آن در داده های لرزه نگاری تکراری امکان پذیر می باشد. لازم به ذکر است که در این مطالعه محدوده تغییرات فشار وسیع و اغراق آمیز بوده است.

## مراجع

- [1]. Lumley D. E., Behrens R. A. and Wang Z., "Assessing the technical risk of a 4-D seismic project", The Leading Edge, 16(9), pp. 1287-1291, 1997.
- [2]. Wang Z., "Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring: The physical basis", TLE, 16, pp. 1327-1329, 1997.
- ۳- نادری ا.، حیدری م.، مداحی ا.، مدل سازی معکوس با استفاده از روابط کاستر و توکسوز جهت تخمین درصد حفره ها و نوع آنها در سنگ های کربناته: زمین شناسی نفت ایران، شماره ۳، ص ۱-۱۵، ۱۳۹۱.
- [4]. Gregory A. R., "Aspects of rock physics from laboratory and log data that are important to seismic interpretation", AAPG, Memoir 26, pp. 15-46, 1977.
- [5]. Maddahi I. and Hassanzadeh E. "Detection of over pressure reservoir with variation of poisson's ratio at carbonate samples at one of the south-west fields of iran" Journal of Science University of Tehran, Vol. 30, No.2, Winter, 2005.
- [6]. Castagna J., Han D. and Batzle M. L., Issues in rock physics and implications for DHI, interpretation, The Leading Edge, August 1995.
- [7]. Bentley L. R., Zhang J. J. and Han-xing Lu, "4D seismic monitoring feasibility", The CREWES report, pp. 777-786, 1999.
- ۸- مطیعی ه.، زمین شناسی ایران: زمین شناسی نفت زاگرس ۱ و ۲، سازمان زمین شناسی ایران، ۱۰۰۹ ص. ۱۳۷۴.
- [9]. Gregory A. R., "Aspects of rock physics from laboratory and log data that are important to seismic interpretation", AAPG, Memoir 26, pp. 15-46, 1977.
- [10]. Bentley L. R., Zhang J., and Lu H.- X. "Evaluating feasibility of seismic fluid monitoring", SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000: pp. 1595-1598, 2000.  
doi: 10.1190/1.1815718
- [11]. Landrø, Martin, Discrimination between pressure and fluid saturation changes from time lapse seismic data Geophysics, Soc. Of Geophysics, 66,5-8, 2001.

۳- اثر تغییرات درجه حرارت در تغییرات سرعت از لحاظ مقداری بسیار کوچک و ناچیز بوده و امکان مشاهده آن از نظر عملی در داده های لرزه ای وجود ندارد.

۴- اثر جای گزینی سیال و تغییرات فشار بر ضرایب بازتاب به ترتیب برابر ۱/۵ و ۶٪ گزارش گردید که از نظر عملی، تفسیر آن در داده های لرزه نگاری تکراری امکان پذیر می باشد.

۵- با در نظر گرفتن نتایج فوق، از نظر عملی تفسیر لرزه ای تغییرات سرعت و ضرایب انعکاس در مخزن مورد مطالعه امکان پذیر است و پیشنهاد می گردد که از روش های لرزه نگاری چهار بعدی برای مدل سازی تغییرات و مدیریت تولید در زمان بهره برداری از این مخزن مورد استفاده قرار گیرد.