



ارائه نشانگرهای کاربردی لرزه‌نگاری چهاربعدی جهت محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از برداشت و تزریق مخازن نفت و گاز

رضا فلاحت^۱؛ کالین مک بت^۲؛ اصغر شمس^۳

۱. استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. استاد؛ انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه هریوت‌وات، ادینبورگ، انگلستان

۳. استادیار؛ انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه هریوت‌وات، ادینبورگ، انگلستان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۳/۱۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۹/۱۶

واژگان کلیدی	چکیده
لرزه‌نگاری چهاربعدی، فیزیک سنگ، وارون‌سازی، نشانگر تغییرات فشار، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی	تخمین و محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از تولید و تزریق مخازن نفت و گاز، یکی از کاربردهای اصلی لرزه‌نگاری چهاربعدی است. تخمین این پارامترها در مقیاس مخزن، کمک شایانی به برورسانی مدل‌های شبیه‌ساز مخازن نفت و گاز و همچنین مدل‌های ژئومکانیکی آن‌ها می‌کند. روش‌های متعددی در سال‌های اخیر با هدف تخمین تغییرات فشار و اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی ارائه شده است که معمولاً اثر تغییرات فشار و اشباع‌شدگی را به صورت خطی تجزیه می‌کنند. جهت واسنجی (<i>Calibration</i>) معادلات ارائه شده، معمولاً داده‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی فیزیک سنگی و یا داده‌های چاه به همراه مدل‌های شبیه‌ساز در مقیاس مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه این روش‌ها جواب‌های نسبتاً قابل قبولی به همراه داشته‌اند، کاربرد آن‌ها به تنظیمات و واسنجی‌های نسبتاً پیچیده و زیادی نیاز دارند که طبیعتاً نیاز به زمان و هزینه زیادی نیز خواهند داشت. با استفاده از روابط فیزیک سنگی و پتروفیزیکی، در این مقاله دو نشانگر مستقل، توسعه و معرفی می‌شوند که به صورت جداگانه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی را محاسبه می‌کنند. از نقطه نظر کاربردی، هر دو معادله بسیار ساده بوده و قابل کاربرد در مدت زمان کمتر از یک روز هستند و علاوه بر آن تفاسیر ساده‌ای دارند. اگر چه نشانگرهای پیشنهاد شده توانسته‌اند جواب‌های قابل قبولی در مخزن مورد مطالعه در دریای شمال ارائه دهند؛ هر دوی این نشانگرها ماهیت کیفی جهت نمایش تغییرات فشار و اشباع‌شدگی دارند. بنابراین ادامه این کار تحقیقاتی جهت کمی کردن این نشانگرها پیشنهاد می‌گردد.

۱. مقدمه

۱.۱ لرزه‌نگاری چهاربعدی

گاز مورد استفاده قرار گرفته است. شرکت نفتی استات اویل (*Statoil*) گزارش افزایش ضریب بازیافت (*Recovery Factor*) تا ۳۰ درصد از مخازن نفت دریای شمال را با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی داده است (*Fayemendy, 2015*). در حالت کلی، با انجام تولید و یا تزریق مخازن، مشخصات الاستیکی سنگ و سیال آن‌ها تغییر می‌کند که در نهایت منجر به تغییر ضریب بازتاب در بالا و پایین مخازن می‌گردد. این تغییرات در داده‌های لرزه‌نگاری و توسط نشانگرهای متعددی از قبیل تغییر دامنه، تغییر زمان افقها (*Time shift*) و حتی تغییرات حاصله بر روی محتوای

در سال‌های اخیر، هدف اصلی ژئوفیزیک از تفاسیر کیفی و ساختمانی با هدف اکتشاف در سطح ناحیه‌ای به سمت شناسایی بیشتر مخازن در حال تولید، و پایش (*Monitoring*) آن‌ها در حال تغییر بوده است. لرزه‌نگاری چهاربعدی که به صورت تکرار لرزه‌نگاری سه‌بعدی در طول زمان قابل تعریف است، در سال‌های اخیر توسط شرکت‌های نفتی بین‌المللی با هدف پایش تولید و تزریق مخازن نفت و

چهاربعدی را تنها به تغییر اشباع‌شدگی نفت وارون‌سازی کردند. در یک مخزن نسبتاً پیچیده‌تر (Landrø, 2001) با استفاده از معادلات فیزیک سنگی و AVO روشی را ارائه نمود که توسط آن می‌توان داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی را به تغییرات اشباع‌شدگی و فشار مخازن وارون‌سازی نمود. برای واسنجی معادلات ارائه شده، ایشان از نتایج کارها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی استفاده نمودند. (MacBeth, Soldo, & Floricich, 2004) روش کاربردی‌تری ارائه کردند که متد (Landrø, 2001) را توسط داده‌های چاه و مدل شبیه‌ساز مخزن واسنجی می‌نماید. (Falahat, Shams, & MacBeth, 2013) اظهار نمود که تغییرات فشار و اشباع‌شدگی مخازن تنها پارامترهای تأثیرگذار بر روی نشانک‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی نیستند؛ به طوری که اثر ضخامت و حجم فضای خالی اشغال شده توسط این تغییرات باید به عنوان ضریبی در اثر تغییرات فشار و اشباع‌شدگی اعمال شود تا وارون‌سازی دقیقی حاصل گردد.

اعمال اثر ضخامت و حجم فضای خالی اشغال شده توسط تغییرات فشار و اشباع‌شدگی منتج به ارائه روابط خطی و همچنین محاسبات کمی و دقیق‌تر شد. اگرچه روش‌های توضیح داده شده نتایج قابل قبولی در مخازن مورد مطالعه این روش‌ها داشته است؛ ولی تمامی این روش‌ها نیاز به مراحل آماده‌سازی و واسنجی زیادی دارند که نیازمند زمان و هزینه است. هدف این تحقیق، ارائه نشانگرهای لرزه‌نگاری چهاربعدی حساس به فشار و اشباع‌شدگی (به صورت جداگانه) که با داده‌های موجود منطبق شده و در کمترین زمان ممکن قابل اجرا باشند.

۳.۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

برای فهم بهتر روشی که در این مقاله ارائه خواهد شد، اقدام به معرفی اجمالی منطقه مورد مطالعه می‌گردد. این منطقه یکی از مخازن توربیدیتی ماسه سنگی^۴ واقع در دریای شمال است. درجه سنگینی نفت (API) آن ۲۵ بوده و از دو لایه ماسه سنگی که توسط میان لایه شیلی از هم جدا شده‌اند تشکیل یافته است. به دلیل آنکه لایه بالایی محتوای اصلی

فرکانسی افق‌ها قابل شناسایی و ثبت هستند. همچنین داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی توانایی مشاهده تغییرات سطح تماس نفت و آب و یا گاز و آب، شناسایی بلوک‌ها و واحدهای مختلف مخزنی، ارتباط این واحدها با همدیگر و همچنین تأثیر گسل‌ها در حرکت سیال را دارد. این اطلاعات باعث بهینه‌سازی برنامه تولید و تزریق مخازن و نتیجتاً افزایش عمر مخزن و ضریب بازیافت می‌شود. کاربرد لرزه‌نگاری چهاربعدی برای پایش تزریق گاز در یکی از مخازن دریای شمال توسط (Falahat, Shams, & MacBeth, 2011) و برای پایش تزریق آب با هدف کنترل فشار مخزن در دریای شمال توسط (Falahat, Shams, & MacBeth, 2013) و (Obidegwu, Shams & MacBeth, 2014) در مخازن دراگون^۱ و گانت^۲ در دریای نروژ توسط (Koster, et al., 2000) توضیح داده شده‌اند. مثال‌های موفقیت‌آمیز دیگری برای پایش مخازن نفت سنگین توسط (Theune, Schmitt, & Rokosh, 2003) و همچنین تزریق و تولید گاز توسط (Dumont, Fayemendy, Mari, & Huguet, 2001) تشریح گردیده‌اند.

۲.۱ وارون‌سازی تغییرات اشباع‌شدگی و فشار

یکی از مهم‌ترین کاربردهای داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی، تخمین تغییرات اشباع‌شدگی و فشار مخزن به صورت سه‌بعدی و مابین چاه‌ها است. (Falahat, Shams & MacBeth, 2013) نشان دادند که تغییرات فشار و اشباع‌شدگی مخازن نفت و گاز، پارامترهای الاستیکی نفت، گاز، آب و سنگ را تحت تأثیر و تغییر قرار می‌دهد. بر روی داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی، نشانک^۳ اثر فشار همپوشانی قابل توجهی با نشانک اثر اشباع‌شدگی دارد که باعث پوشاندن و گاهی از بین بردن اثر همدیگر می‌شود؛ بنابراین لازم است که اثر هر کدام از این پارامترها بر روی داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی تخمین و یا محاسبه گردند. (Tsuneyama & Mavko, 2007) نشان دادند که در مخزن مورد مطالعه آن‌ها، کاهش فشار مخزن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی داده‌های لرزه‌نگاری نداشته است؛ بنابراین آن‌ها داده‌های لرزه‌نگاری

¹ Draugen

² Gannet

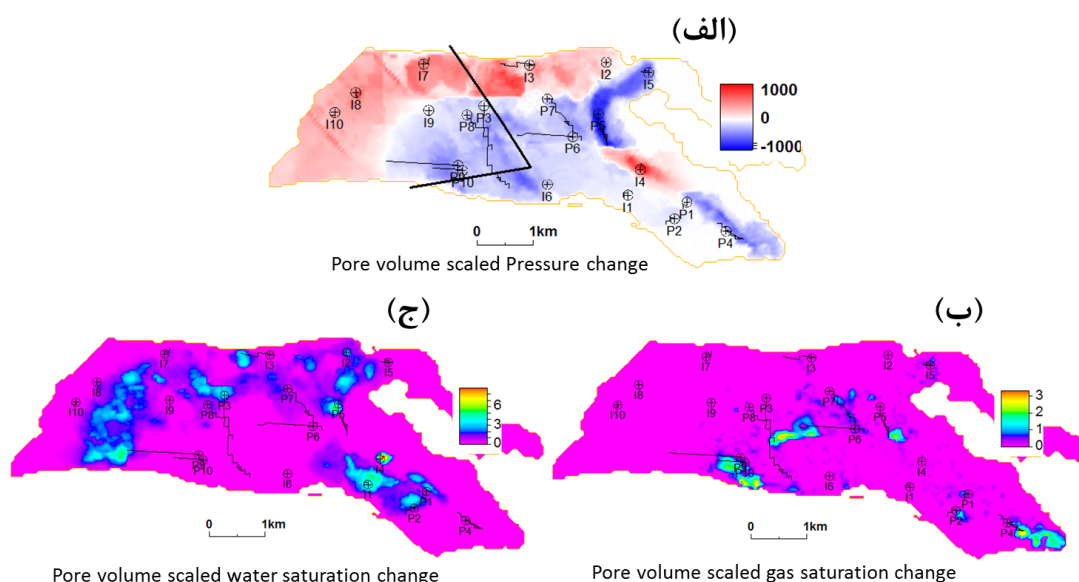
³ Signal

⁴ Turbidite Sandstone

ارائه نشانگرهای کاربردی لرزه‌نگاری چهاربعدی جهت محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از برداشت و تزریق

۴ سال تولید و تزریق، به صورت نمایش نقشه‌ای نشان داده است. اکثر چاه‌های تزریقی در قسمت غربی و شمالی مخزن و نزدیک به سطح تماس آب و نفت واقع شده‌اند و اکثر چاه‌های تولیدی در قسمت‌های مرکزی و شرقی متمرکز شده‌اند. تغییرات اشباع‌شدگی گاز به دلیل کاهش فشار مخزن زیر فشار نقطه حباب و آزاد شدن گاز از نفت بوده است، بنابراین در قسمت‌های مرکزی و در کنار چاه‌های تولیدی مشاهده می‌شود. تغییرات اشباع‌شدگی آب عمدتاً در کنار چاه‌های تزریق آب قرار دارد. افزایش فشار عمدتاً در کنار چاه‌های تزریق آب و در قسمت‌های شمالی و غربی اتفاق افتاده است در حالی که کاهش فشار در کنار چاه‌های تولیدی و در قسمت‌های مرکزی و شرقی مشاهده می‌شود.

نفت درجا را تشکیل می‌دهد، در این مطالعه به لایه ماسه سنگی بالایی تمرکز شده است. فشار اولیه مخزن نزدیک فشار نقطه حباب بوده است، بنابراین جهت کنترل افت فشار مخزن، روش تزریق آب از همان ابتدا برنامه‌ریزی گردید. با وجود این، به دلیل عدم ارتباط مناسب بخش‌های مختلف مخزن بین چاه‌های تزریقی و تولیدی، فشار مخزن در بخش‌های اعظم مخزن به زیر فشار نقطه حباب کاهش پیدا کرد که باعث آزاد شدن گاز از نفت از همان روزهای ابتدایی تولید شد. به این دلیل، برنامه تزریق آب تغییر پیدا کرد تا جلوی کاهش فشار و آزاد شدن گاز را بگیرد. برای بهینه‌سازی برنامه تزریق آب، از داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی استفاده شد که نشانک آن منتج از تغییرات فشار، اشباع‌شدگی گاز، آب و نفت است. شکل شماره ۱ تغییرات فشار، اشباع‌شدگی آب و گاز را بعد از



شکل شماره ۱. (الف) تغییرات فشار، (ب) اشباع‌شدگی گاز و (ج) آب بعد از ۴ سال تولید و تزریق. مقیاس بندی حجم فضای خالی در این نقشه‌ها به معنی حاصل ضرب تغییرات فشار و اشباع‌شدگی میانگین داخل لایه در ضخامت و تخلخل مؤثر اشغال شده توسط این پارامترها است.

ارائه شده توسط پروژه چهاربعدی ادینبورگ^۵ (Amini, 2014) استفاده شد. این روش برای شروع از مدل شبیه‌ساز مخزن که به طرز مناسبی توسط داده‌های تولید و تزریق چاه‌ها

جهت داشتن کنترل بهتر بر روی نشانک‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی و تجزیه اثر فشار و اشباع‌شدگی گاز و آب، لرزه‌نگاری مصنوعی سه‌بعدی تولید شد. برای این کار از روش

⁵ Edinburgh Time Lapse Project-ETLP

کرده است در حالی که افزایش اشباع‌شدگی گاز، نشانک شیف‌ت زمانی منفی (خط رنگ قرمز) ایجاد نموده است. به دلیل آنکه شیف‌ت زمانی حاصل از تغییرات فشار و اشباع‌شدگی گاز از لحاظ عددی تقریباً یکسان هستند (ولی با علامت‌های مختلف)، فلذا توانسته‌اند اثر همدیگر را خنثی نمایند به طوری که در قسمت‌های جنوبی مخزن با وجود افت شدید فشار و افزایش قابل توجه اشباع‌شدگی گاز، نشانک قابل توجه شیف‌ت زمانی در شکل شماره ۳ (د - رنگ سیاه) دیده نمی‌شود که نشانگر آن است که نشانک اثر فشار توانسته است نشانک اثر اشباع‌شدگی گاز را به صورت قابل توجهی خنثی نماید. مثال دیگری را می‌توان در قسمت‌های مرکزی منطقه مشاهده نمود که نشانک اثر فشار توانسته است نشانک اثر اشباع‌شدگی گاز را کاهش دهد که تفسیر را با مشکل مواجه نموده است.

۲. معرفی روش کار و کاربردهای آن

۱.۲ نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی^{۱۰}

مشابه الگوریتم‌های عددی مرسوم (به عنوان مثال روش‌های ارائه شده توسط (Avseth, Mukerji, & Mavko, 2005))، اقدام به فهم حساسیت پارامترهای الاستیکی به تغییرات اشباع‌شدگی شد. در مرحله اول، حساسیت پارامترهای سرعت طولی و عرضی و همچنین چگالی به تغییرات اشباع‌شدگی و فشار از روی مطالعات پیشینه بررسی گردید. سپس ترکیبات منطقی متفاوتی از سرعت طولی و عرضی به صورت عددی ایجاد گردید. در مرحله بعدی حساسیت هر کدام از این ترکیبات به تغییرات اشباع‌شدگی و فشار محاسبه و بررسی شد. برای انجام این محاسبات عددی از روش تشریح شده در مرحله قبل استفاده گردید که برای محاسبه پارامترهای صوتی سیال و گاز از معادل (Batzle & Wang, 1992) و برای ترکیب سنگ و سیال از معادله (Gassmann, 1951) استفاده می‌کند. محدوده تغییرات فشار و اشباع‌شدگی متناسبی با منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد که محدوده تقریبی تغییرات فشار $psi \pm 2000$ و تغییرات اشباع‌شدگی

بروزرسانی شده است استفاده می‌کند. پارامترهای صوتی نفت، گاز و آب توسط معادلات (Batzle & Wang, 1992) محاسبه گردید. در مرحله بعد و با استفاده از معادله (Gassmann, 1951)، سیال و سنگ با هم مخلوط شدند. نهایتاً یک موجکی که از داده‌های لرزه‌نگاری و بعد از گره‌زدن به چاه^۶ استخراج شده بود با روش همگشت^۷ یک بعدی اعمال شد تا رد لرزه‌های^۸ تولید شوند. لرزه‌نگاری مصنوعی تولید شده انطباق خوبی با داده‌های لرزه‌نگاری واقعی دارند. شکل شماره ۲ نشانگر تغییرات دامنه و شیف‌ت زمانی^۹ را بعد از ۴ سال تولید و تزریق مخزن نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است (در مقایسه با شکل شماره ۱)، نشانگرهای لرزه‌نگاری نمایشگر تغییرات اشباع‌شدگی گاز، آب و فشار مخزن هستند. با وجود این، نشانک‌های منتسب به تغییرات فشار با نشانک‌های حاصله از تغییرات اشباع‌شدگی گاز و آب همپوشانی قابل توجهی دارند که باعث شده در برخی موارد اثر همدیگر را خنثی نمایند.

این مورد تفسیر نقشه‌های لرزه‌نگاری را مشکل و همراه با خطا می‌کند. برای تشریح این مسئله مقطعی در امتداد خط AA' واقع در شکل شماره ۲ بر روی هر دو نقشه نشانگر تغییرات دامنه و شیف‌ت زمانی تولید شد و در شکل شماره ۳ به نمایش درآمده است. در این شکل، نشانگر شیف‌ت زمانی در قسمت (د) با رنگ سیاه نشان داده شده است. نشانگر شیف‌ت زمانی مربوط به اثر فقط تغییرات اشباع‌شدگی گاز، تغییرات اشباع‌شدگی آب و تغییرات فشار در شکل شماره ۳ (الف) تا (ج) به تصویر درآمده است. به عنوان مثال، برای محاسبه نشانک تغییرات اشباع‌شدگی گاز، تمامی تغییرات اشباع‌شدگی آب و فشار در شرایط اولیه مخزن و بدون تغییر در نظر گرفته شدند تا نشانک لرزه‌نگاری مربوط به فقط تغییرات اشباع‌شدگی گاز تولید شود. به همین ترتیب نشانک لرزه‌نگاری مربوط به اثر فقط تغییرات اشباع‌شدگی آب و فشار مخزن محاسبه شد. با تمرکز بر شکل شماره ۳ (د) می‌توان دریافت که در قسمت‌های جنوبی (نزدیک به A')، کاهش فشار مخزن نشانک شیف‌ت زمانی مثبتی (خط رنگ فیروزه‌ای) ایجاد

⁶ Well-Tie analysis

⁷ Convolution

⁸ Seismic Trace

⁹ Timeshift

¹⁰ Saturation Change Attribute

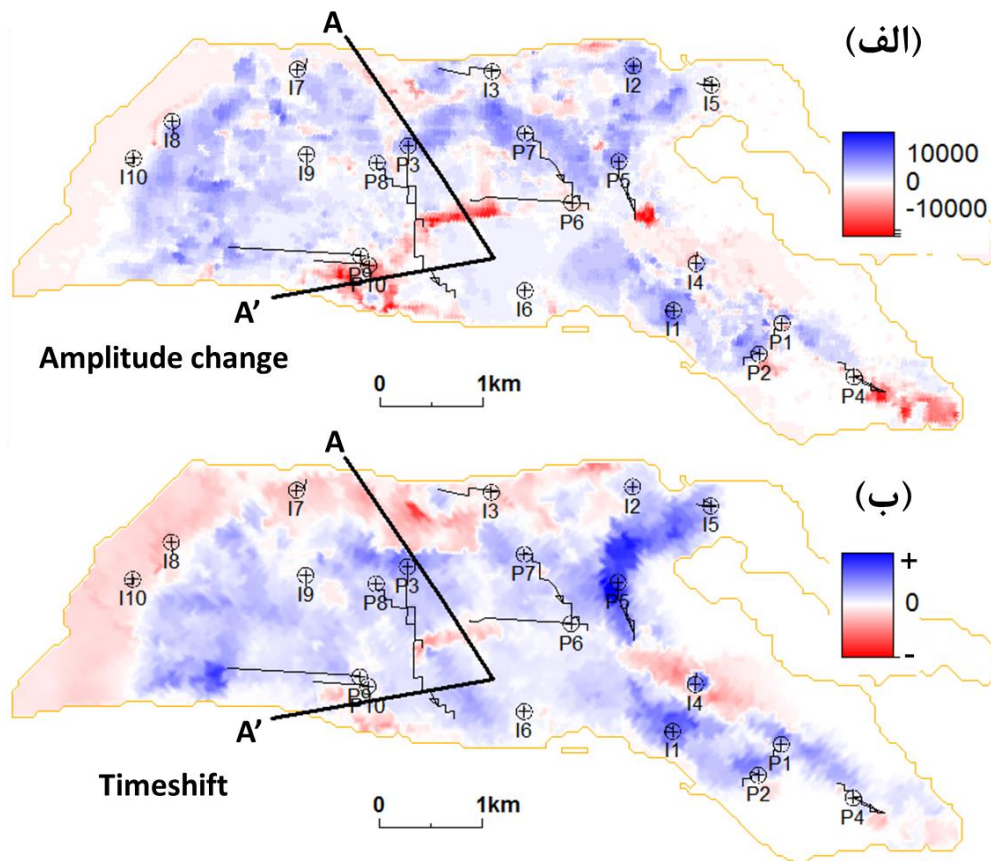
ارائه نشانگرهای کاربردی لرزه‌نگاری چهاربعدی جهت محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از برداشت و تزریق

در این معادله، V_p و V_s میانگین سرعت طولی و عرضی سنگ مخزن هستند. ΔV_p و ΔV_s اختلاف سرعت طولی و عرضی بین سنگ مخزن و پوش‌سنگ می‌باشند و ΔT نمایانگر تغییرات در طول زمان است. جهت تسهیل روند محاسبه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی و کاربرد مستقیم داده‌های لرزه‌نگاری بدون انجام وارون‌سازی لرزه‌ای (به عنوان مثال کاربرد مستقیم داده‌های لرزه‌نگاری شیب/ضریب زاویه^{۱۱} و یا داده‌های لرزه‌نگاری زاویه دور/نزدیک^{۱۲}، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی توسط اصول فیزیک سنگی مشروح در پیوست به محدوده لرزه‌نگاری تبدیل شد.

۸۰ درصد را دارد. آنالیز حساسیت بر اساس مدل‌سازی عددی تشریح شده، آشکار کرد که معادله شماره (۱) در بین چندین ترکیب و معادله در نظر گرفته شده، کمترین حساسیت را به تغییرات فشار (کمتر از یک درصد) و بیشترین حساسیت را به تغییرات اشباع‌شدگی دارد.

Saturation Change Attribute (۱)

$$= \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)}$$



شکل شماره ۲. نقشه (الف) تغییرات دامنه و (ب) شیفت زمانی لرزه‌نگاری بعد از ۴ سال تولید و تزریق مخزن

¹¹ Gradient/Intercept

¹² Near/Far

تغییرات اشباع‌شدگی حساسیت بسیار اندک و قابل اغمازی به تغییرات فشار دارد. در حالی که نشانگرهای دامنه و شیفت زمانی حساسیت قابل توجهی برای تغییرات فشار دارند که قابل مقایسه با حساسیت این نشانگرها به تغییرات اشباع‌شدگی است. جهت ارزیابی و صحت سنجی نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی (شکل شماره ۴-الف) با شکل شماره ۱ مقایسه می‌گردد که در آن نقشه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی گاز و آب به تصویر در آمده است که این نقشه‌ها از روی مدل شبیه‌ساز مخزن که با داده‌های تولید و تزریق چاه‌ها انطباق داده شده است تولید گشته‌اند. همان‌طور که از شکل شماره ۴-الف قابل مشاهده است، نشانک قابل توجهی در نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی در قسمت‌های غربی و شمالی منطقه دیده نمی‌شود که منطبق با تاریخچه تغییر فشار مخزن است چرا که در این قسمت‌ها تنها تغییرات به وجود آمده در اثر تولید و تزریق مخزن، تغییر فشار است (شکل شماره ۱)؛ که نشانگر اشباع‌شدگی حساسیتی به فشار ندارد. همان‌طور که ذکر شد، اعداد مثبت بر روی نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی به احتمال زیاد گویای افزایش اشباع‌شدگی گاز است.

جهت بررسی صحت این مورد، می‌توان نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی (شکل شماره ۴-الف) را با نقشه تغییرات اشباع‌شدگی گاز (شکل شماره ۱-ب) مقایسه کرد که منجر به مشاهده ارتباط و هماهنگی خوبی با مقادیر مثبت نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی و افزایش اشباع‌شدگی گاز می‌شود. در این مخزن، افزایش اشباع‌شدگی گاز به دلیل کاهش فشار زیر فشار نقطه حباب و آزاد شدن گاز از نفت است. افزایش اشباع‌شدگی گاز عمدتاً در مناطق مرکزی و شرقی که اکثر چاه‌های تولیدی واقع شده‌اند دیده می‌شود. در جهت دیگر، مقادیر منفی در نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی نمایانگر افزایش اشباع‌شدگی آب است.

افزایش اشباع‌شدگی آب عمدتاً در کنار چاه‌های تزریق آب و در قسمت‌های غربی و شمالی قابل‌رؤیت است. انطباق خوبی بین نقشه اشباع‌شدگی آب (شکل شماره ۱-ج) و مقادیر منفی (با رنگ آبی) در نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی (شکل شماره-الف) وجود دارد. انطباق بین نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی و تاریخچه تولید و تزریق مخزن را می‌توان به عنوان ابزار صحت سنجی قابل قبولی برای نشانگر معرفی شده

با استفاده از تقریبات ارائه شده توسط (Shuey, 1985) برای معادلات (Zoeppritz, 1919) و همچنین تقریبات معرفی شده توسط (Wiggins, Kenny & McClure, 1983) نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی قابل تبدیل به پارامترهای لرزه‌ای شیب و ضریب زاویه (معادله شماره ۲) و پارامترهای لرزه‌ای دامنه زاویه نزدیک و دور (معادله شماره ۳) است:

$$\begin{aligned} \text{Saturation Change Attribute} & \quad (2) \\ &= \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)} \\ &\approx \frac{1.6 \cdot \Delta R(0)^2}{\Delta R(0) - \Delta G} \end{aligned}$$

که در آن ΔR و ΔG تغییرات شیب (Gradient) و ضریب زاویه لرزه‌ای در طول زمان می‌باشند.

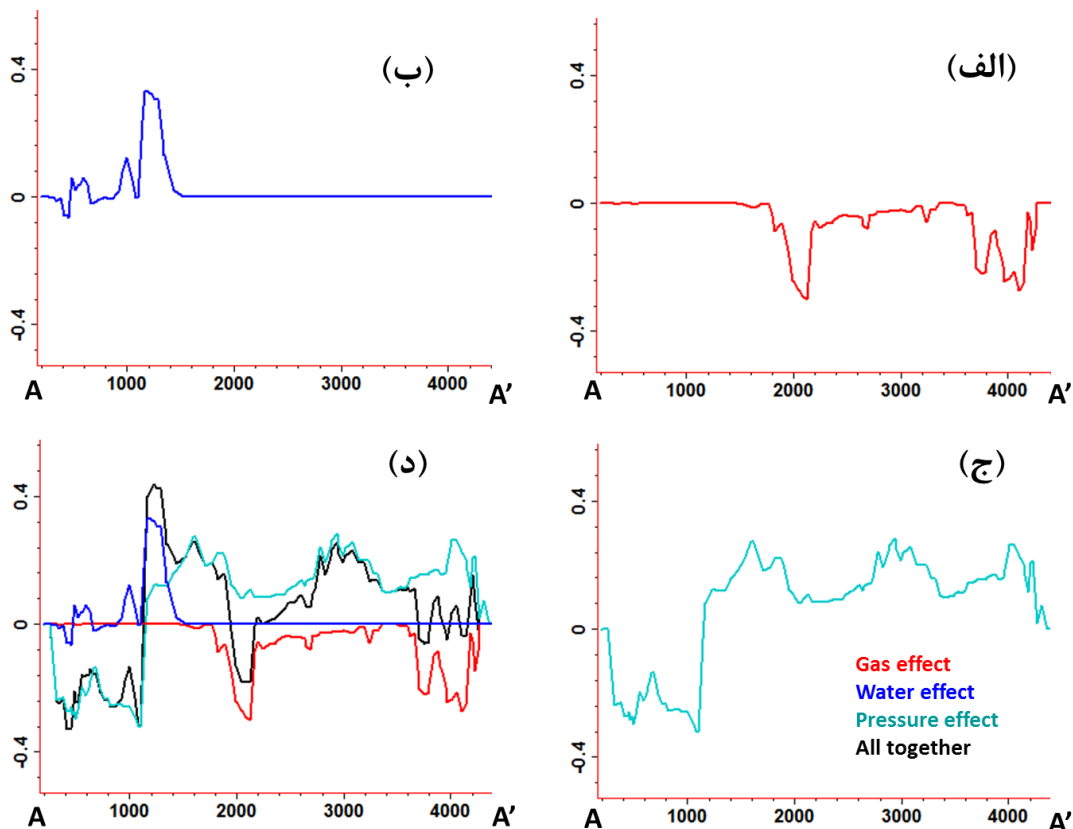
$$\begin{aligned} \text{Saturation Change Attribute} & \quad (3) \\ &= \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)} \\ &\approx \frac{2.56 \Delta N^2}{\Delta N - \Delta(F - N)} \end{aligned}$$

که در آن N و F دامنه لرزه‌نگاری زاویه نزدیک (Near) و دور (Far) می‌باشند و Δ نمایانگر تغییرات در طول زمان است. معادلات شماره ۲ و ۳ قابل تولید در مدت زمان کوتاهی بوده و تقریب خوبی از تغییرات اشباع‌شدگی را ارائه می‌نماید. به دلیل آنکه افزایش اشباع‌شدگی گاز مقاومت صوتی را کاهش می‌دهد (soften) و افزایش اشباع‌شدگی آب مقاومت صوتی را می‌افزاید (harden)، در هر دو معادله شماره ۲ و ۳، مقادیر مثبت گویای افزایش اشباع‌شدگی گاز و مقادیر منفی نمایانگر افزایش اشباع‌شدگی آب است. شکل شماره ۴-الف، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی را که توسط معادله شماره ۳ و بر روی داده‌های منطقه مورد مطالعه محاسبه شده است را نشان می‌دهد. همچنین، جهت مقایسه بهتر با نشانگرهای دامنه (شکل شماره ۴-ب) و شیفت زمانی (شکل شماره ۴-ج)، مقطع عمودی نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی در امتداد خط AA' در شکل شماره ۴-د به نمایش درآورده شده است. همان‌طور که در شکل شماره ۴-د آورده شده است، نشانگر

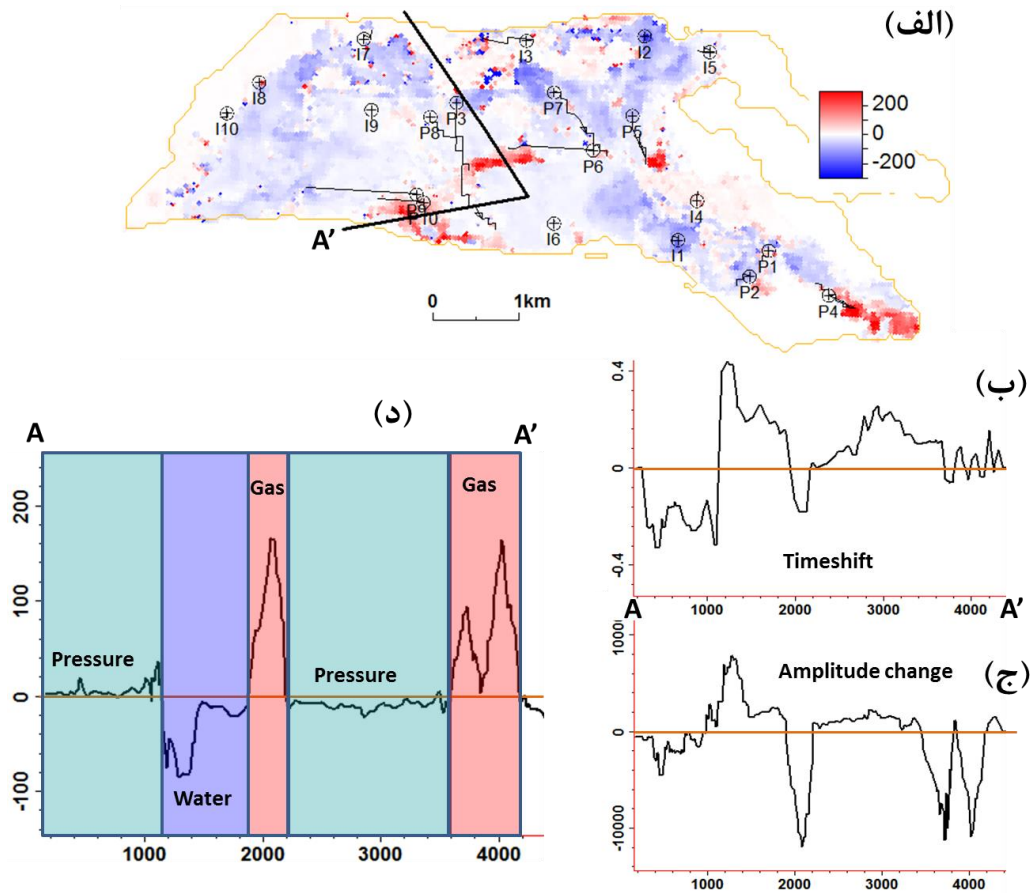
ارائه نشانگرهای کاربردی لرزه‌نگاری چهاربعدی جهت محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از برداشت و تزریق

یکی از نشانگرهای کاربردی لرزه‌نگاری جهت درک سریع در طی یک مطالعه دفتری از تغییرات اشباع‌شدگی مخزن معرفی نمود.

در این مقاله در نظر گرفت. از طرف دیگر، با توجه به قابلیت محاسبه و تولید سریع این نشانگر و همچنین انجام تفسیر آسان آن، می‌توان نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی را به عنوان



شکل شماره ۳. نشانگر شیفت زمانی بر حسب دهم میلی‌ثانیه که به صورت تجزیه شده برای اثر پارامتر (الف) تغییر اشباع‌شدگی گاز، (ب) تغییر اشباع‌شدگی آب، (ج) تغییر فشار و (د) اثر تمامی آن‌ها با همدیگر آورده شده است. شیفت زمانی کلی با خط سیاه رنگ نمایش داده شده است. شکل (د) اثر پارامترهای مختلف را باهم مقایسه می‌کند.



شکل شماره ۴. (الف) نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی که با استفاده از معادله شماره (۳) و برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شده است. (ب)، (ج) و (د) مقطع نشانگر شیفت زمانی و دامنه لرزه‌نگاری و نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی در امتداد خط AA' را نمایش می‌دهند. همان‌طور که از (د) می‌توان مشاهده نمود، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، تقریباً حساسیتی به تغییرات فشار ندارد. در این نشانگر، مقادیر مثبت که با رنگ قرمز نشان داده شده است، نمایانگر افزایش اشباع‌شدگی گاز بوده و مقادیر منفی به رنگ آبی گویای افزایش اشباع‌شدگی آب است.

تغییرات اشباع‌شدگی و فشار از روی مطالعات پیشینه بررسی گردید. سپس ترکیبات منطقی متفاوتی از سرعت طولی و عرضی به صورت عددی ایجاد گردید. در مرحله بعدی حساسیت هر کدام از این ترکیبات به تغییرات فشار و اشباع‌شدگی محاسبه و بررسی شد. برای انجام این محاسبات (Batzle & Wang, 1992) و برای ترکیب سنگ و سیال از معادله (Gassmann, 1951) استفاده می‌کند. همان‌گونه که

۲.۲ نشانگر تغییرات فشار^{۱۳}

مشابه روش ارائه شده برای نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، از روش‌های عددی برای مطالعه حساسیت پارامترهای الاستیکی به تغییرات فشار استفاده شد. در مرحله نخست، حساسیت پارامترهای سرعت طولی و عرضی و همچنین چگالی به عددی از روش تشریح شده در مرحله قبل استفاده گردید که برای محاسبه پارامترهای صوتی سیال و گاز از معادلات

¹⁴ Pressure Change Attribute

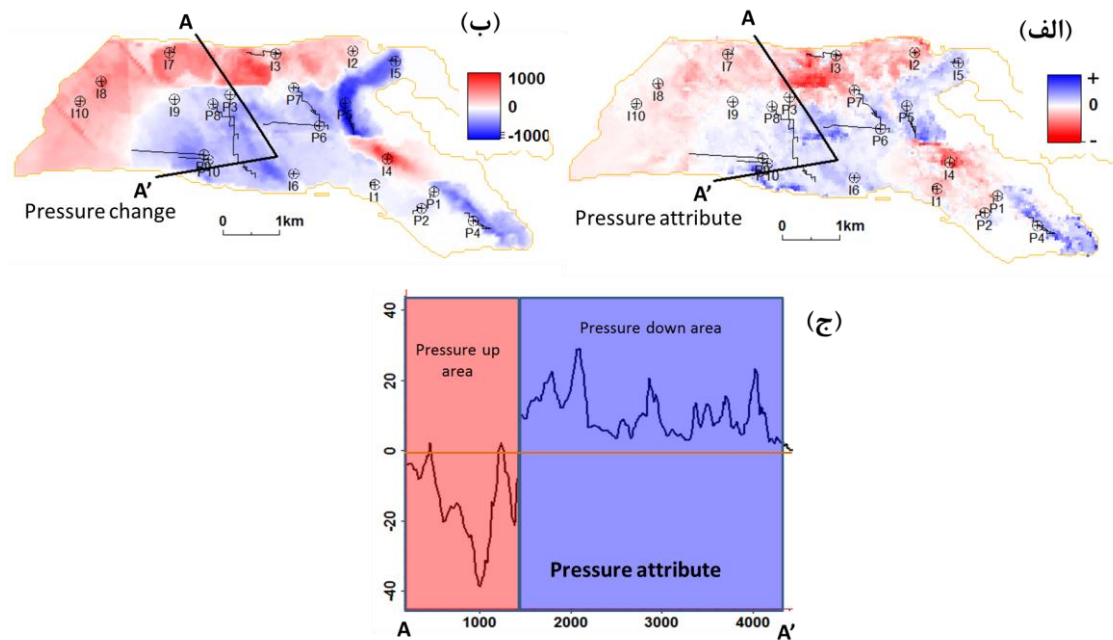
اشباع‌شدگی آب جلوگیری نموده و باعث ثبت سریع و ساده افزایش فشار شده است. سناریوی مشابهی برای مناطق کنار چاه‌های تولید نفت وجود دارد. در این مناطق، به دلیل کاهش فشار زیر فشار نقطه حباب، گاز از نفت آزاد شده است. در نشانگر تغییرات فشار، افزایش اشباع‌شدگی گاز (جایگزینی نفت توسط گاز) و کاهش فشار با علامت منفی (کاهش) مشاهده می‌گردد. شکل شماره ۱ نقشه نشانگر تغییرات فشار را با نقشه تغییرات فشار مقایسه می‌کند. مقطع مشابهی نظیر شکل شماره ۴ در این شکل تهیه شده است (AA'). نقشه نشانگر تغییرات فشار تطابق خوبی با نقشه تغییرات فشار تولید شده از روی مدل شبیه‌ساز منطقه نمایش می‌دهد که مدل شبیه‌ساز با تاریخچه تولید و تزریق چاه‌ها مطابقت و برورسانی شده است.

همان‌طور که در بخش‌های شمالی و غربی منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است، افزایش فشار در این قسمت‌ها و در کنار چاه‌های تزریق آب دیده می‌شود که این افزایش فشار در نشانگر ارائه شده در این مقاله (شکل شماره ۱-الف) با رنگ قرمز نمایش داده شده است. کاهش فشار در نقشه نشانگر تغییرات فشار با رنگ آبی به نمایش درآورده شده است که به طور کلی در کنار چاه‌های تولیدی در مناطق مرکزی و شرقی دیده می‌شود. به طور کلی، تطابق خوبی بین نقشه تغییرات فشار و نشانگر تغییرات فشار در اکثر مناطق دیده می‌شود ولی همان‌طور که در شکل شماره ۱ دیده می‌شود، در منطقه جنوب شرقی و کنار چاه تزریقی II این تطابق وجود ندارد. جهت فهم دلیل عدم تطابق، داده‌های تاریخچه فشار این چاه مرور شدند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تزریق آب توسط این چاه باعث افزایش فشار کنار این چاه شده است، ولی مدل شبیه‌ساز منطقه تطابق قابل قبولی با داده‌های چاه II ندارد و این قسمت را با کاهش فشار نشان می‌دهد. با وجود این، نشانگر تغییرات فشار معرفی شده در این مقاله، قادر بوده است که افزایش فشار در کنار این چاه را به درستی نشان دهد. این مشاهده نیاز به به‌روزرسانی مجدد مدل شبیه‌ساز منطقه را آشکار می‌سازد.

در بخش قبلی اشاره گردید محدوده تغییرات فشار و اشباع‌شدگی متناسبی با منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد که محدوده تقریبی تغییرات فشار $psi \pm 2000$ و تغییرات اشباع‌شدگی ۸۰ درصد را دارد. آنالیز حساسیت بر اساس مدل‌سازی عددی تشریح شده، آشکار کرد که معادله شماره (۴) در بین چندین ترکیب و معادله در نظر گرفته شده، کمترین حساسیت را به تغییرات اشباع‌شدگی و بیشترین حساسیت را به تغییرات فشار دارد. با استفاده از تقریب‌های مطرح شده برای نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، معادله شماره (۴) بر حسب دامنه لرزه‌نگاری زاویه نزدیک ($Near$) و دور (Far) تبدیل گردید.

$$\begin{aligned} \text{Pressure Change Attribute (PA)} & \quad (4) \\ &= \frac{1}{1.6} \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \\ &- \Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right) \approx \Delta(F - N) \end{aligned}$$

آنالیز حساسیت انجام شده در این مطالعه گویای آن است که حساسیت نشانگر تغییرات فشار به تغییرات فشار تقریباً برابر حساسیت آن نسبت به تغییرات اشباع‌شدگی است. با وجود این، جهت و علامت ($polarity$) حساسیت این نشانگر به تغییرات فشار و اشباع‌شدگی، آن را قابل استفاده می‌کند. در کنار چاه‌های تزریق آب، معمولاً فشار مخزن و اشباع‌شدگی آب افزایش می‌یابد. در نشانگر دامنه و شیفت زمانی لرزه‌نگاری، افزایش اشباع‌شدگی آب کنار چاه تزریق آب (جایگزینی نفت توسط آب)، باعث افزایش مقاومت صوتی سنگ و نتیجتاً این نشانگرها می‌شود. در طرف دیگر افزایش فشار کنار چاه‌های تزریق آب، باعث کاهش مقاومت صوتی سنگ‌ها می‌شود. این مورد باعث همپوشانی و احتمالاً خنثی نمودن اثر همدیگر در داده‌های لرزه‌نگاری معمولی خواهد شد. ولی در نشانگر تغییرات فشار، همان‌طوری که در آنالیز حساسیت مشاهده گردید، افزایش اشباع‌شدگی آب و فشار کنار چاه‌های تزریق آب باعث افزایش در جهت مثبت این نشانگر می‌شود که این مورد از خنثی کردن اثرات فشار و



شکل شماره ۱. (الف) نقشه نشانگر تغییرات فشار که از روی داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدي محاسبه شده است و (ب) نقشه تغییرات فشار حاصله از مدل شبیه‌ساز منطقه که با داده‌های چاه مطابقت داده شده است. تطابق خوبی بین این دو نقشه قابل مشاهده است. (ج) مقطعی در امتداد خط AA' از نشانگر تغییرات فشار که جهت مقایسه با شکل شماره آورده شده است. بر روی نشانگر تغییرات فشار، کاهش فشار به صورت مقادیر مثبت و افزایش فشار به صورت مقادیر منفی نمایش داده شده است.

اشباع‌شدگی و فشار با نقشه تغییرات اشباع‌شدگی و فشار که از مدل شبیه‌ساز منطقه تهیه شده مقایسه گردید که تطابق خوب و قابل قبولی نمایان شد. قابل ذکر است که مدل شبیه‌ساز منطقه با داده‌های تاریخیچه تولید و تزریق چاه‌ها، انطباق و بروزرسانی شده است. هر دوی این نشانگرها، به دلیل محاسبه شدن مستقیم از روی دامنه لرزه‌نگاری، قابل محاسبه در مدت زمان کم هستند و همچنین تفسیر نسبتاً ساده‌ای دارند. بر روی نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، افزایش اشباع‌شدگی گاز با مقادیر مثبت و افزایش اشباع‌شدگی آب با مقادیر منفی نمایانگر می‌شوند. بر روی نشانگر تغییرات فشار، کاهش فشار با علامت مثبت و افزایش فشار با علامت منفی به تصویر در می‌آیند. بر خلاف نشانگرها و الگوریتم‌های مرسوم

۳. بحث و نتیجه‌گیری

پایش^{۱۴} تغییرات فشار و اشباع‌شدگی، یکی از کاربردهای اصلی داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی است. با استفاده از روش عددی و همچنین مفاهیم فیزیک سنگ و پتروفیزیک، دو نشانگر مستقل اشباع‌شدگی و فشار در این مقاله معرفی شدند که تغییرات فشار و اشباع‌شدگی را با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدي تخمین و محاسبه کنند.

در هر دوی این نشانگرها، به صورت مستقیم از داده‌های دامنه لرزه‌نگاری زاویه نزدیک و دور^{۱۵} و یا شیب و ضریب زاویه^{۱۶} بدون انجام وارون‌سازی لرزه‌نگاری استفاده می‌گردد. جهت صحت‌سنجی آن‌ها، این نشانگرها در یکی از مخازن نفت دریای شمال بررسی گردید و نقشه نشانگرهای تغییرات

¹⁵ Monitoring

¹⁶ Near/Far angle amplitude

¹⁷ Intercept/Gradient data

۵. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۱. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
ΔP	<i>Psi</i>	تغییرات فشار
ΔS	<i>fraction</i>	تغییرات اشباع‌شدگی
V_p	<i>m/s</i>	سرعت صوت طولی
V_s	<i>m/s</i>	سرعت صوت عرضی
ρ	<i>gr/cm3</i>	چگالی
R	نسبی	<i>Intercept Amplitude</i>
G	نسبی	<i>Gradient Amplitude</i>
F	نسبی	<i>Far Angle Amplitude</i>
N	نسبی	<i>Near Angle Amplitude</i>
θ	نسبی	زاویه فرود
Δ	نسبی	تغییرات بر حسب زمان

۶. پیوست

الف: استخراج نشانگرهای تغییرات اشباع‌شدگی و فشار مشابه الگوریتم‌های عددی مرسوم (به عنوان مثال روش‌های ارائه شده توسط (Avseth, Mukerji, & Mavko, 2005))، اقدام به فهم حساسیت پارامترهای الاستیکی به تغییرات اشباع‌شدگی شد. در مرحله اول، حساسیت پارامترهای سرعت طولی و عرضی و همچنین چگالی به تغییرات اشباع‌شدگی و فشار از روی مطالعات پیشینه بررسی گردید. سپس ترکیبات منطقی متفاوتی از سرعت طولی و عرضی به صورت عددی ایجاد گردید. در مرحله بعدی حساسیت هر کدام از این ترکیبات به تغییرات اشباع‌شدگی و فشار محاسبه و بررسی شد. برای انجام این محاسبات عددی از روش تشریح شده در بخش ۲.۱ استفاده گردید که برای محاسبه پارامترهای صوتی سیال و گاز از معادلات (Batze & Wang, 1992) و برای ترکیب سنگ و سیال از معادله (Gassmann, 1951) استفاده می‌کند. محدوده تغییرات فشار و اشباع‌شدگی متناسبی با منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد که محدوده

لرزه‌نگاری چهاربعدی که در آن‌ها مشکل علامت و جهت مخالف^{۱۸} تأثیر فشار و اشباع‌شدگی دیده می‌شود، در نشانگرهای ارائه شده در این مقاله این پیچیدگی وجود ندارد. علیرغم آن، نویسندگان این مقاله معتقد هستند که قبل از عمومی‌سازی این نشانگرها، نیاز مبرمی به آزمایش آن‌ها در مناطق مختلف با زمین‌شناسی‌های متفاوت وجود دارد. علاوه بر آن، نشانگرهای ارائه شده در این مقاله ایده‌ای کیفی از افزایش و کاهش اشباع‌شدگی گاز و آب (نفت در داخل آن مستتر است) و فشار را می‌دهد. به دلیل غیر خطی بودن شدید این نشانگرها به وجود گاز، محاسبه کمی تغییرات اشباع‌شدگی و فشار در این مرحله امکان‌پذیر نیست. برای کمی کردن این نشانگرها نیاز به ادامه این پژوهش جهت فهم عمیق‌تر نشانک‌های اشباع‌شدگی وجود دارد.

در نهایت برخی برجستگی^{۱۸} به صورت الگوی نقطه‌ای در نقشه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی مشاهده می‌شود که به دلیل غیر خطی بودن شدید این نشانگرها به وجود گاز است. همچنین به دلیل وجود بخش تقسیم در معادله اشباع‌شدگی، تقسیم بر مقادیر خیلی کوچک، باعث به دست آمدن این برجستگی‌ها در نقشه اشباع‌شدگی می‌گردد. اگر چه با یک فیلتر ساده (*de-spiking*) می‌توان مشکل مذکور را برطرف نمود، نویسندگان این مقاله ترجیح دادند که نتایج این نشانگرها بدون هیچ‌گونه تغییراتی به نمایش درآیند چرا که اعتقاد بر این است که این اسپیک‌ها تأثیری در تفاسیر کیفی نمی‌گذارند.

۴. سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت نفتی *BP* به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پروژه قدردانی می‌نمایند. همچنین حامیان مالی پروژه *ETLP* نیازمند قدردانی و تشکر هستند.

¹⁸ polarity confusion

¹⁹ spike

در این معادله، ρ چگالی و $\Delta\rho$ اختلاف چگالی بین مخزن و لایه پوش سنگ می‌باشد. با استفاده از معادله (Gardner,)
(Gardner & Gregory, 1974) رابطه زیر با تقریب قابل قبولی برای مخازن صادق است:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 0.25 \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (\text{الف ۴})$$

با ترکیب معادله (الف ۳) و (الف ۴) می‌توان به معادله شماره (الف ۵) رسید:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} \approx \frac{8}{5} R(0) \quad (\text{الف ۵})$$

(Wiggins, Kenny, & McClure, 1983) نشان دادند که تقریب زیر بین ضریب زاویه و شیب دامنه لرزه‌نگاری قابل استنباط است:

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} \approx R(0) - G \quad (\text{الف ۶})$$

که در این معادله، R و G به ترتیب ضریب زاویه و شیب هستند. با استفاده از مباحث بالا، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی در معادله شماره (الف ۱) قابل تبدیل به معادله شماره (الف ۷) است:

$$\begin{aligned} \text{Saturation Change Attribute} \quad (\text{الف ۷}) \\ &= \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)} \\ &\approx \frac{1.6 \cdot \Delta R(0)^2}{\Delta R(0) - \Delta G} \end{aligned}$$

در معادله شماره (الف ۷)، ΔR و ΔG به ترتیب نمایش‌دهنده تغییرات ضریب زاویه و شیب در طول زمان هستند. با استفاده از تقریب معرفی شده در معادله شماره (الف ۸) می‌توان معادله شماره (الف ۷) را بر حسب دامنه لرزه‌نگاری زاویه نزدیک (Near) و دور (Far) به صورت معادله شماره (الف ۹) نوشت:

تقریبی تغییرات فشار $\pm 2000 \text{ psi}$ و تغییرات اشباع‌شدگی ۸۰ درصد را دارد. آنالیز حساسیت بر اساس مدل‌سازی عددی تشریح شده، آشکار کرد که معادله (الف ۱) در بین چندین ترکیب و معادله در نظر گرفته شده، کمترین حساسیت را به تغییرات فشار (کمتر از یک درصد) و بیشترین حساسیت را به تغییرات اشباع‌شدگی دارد.

Saturation Change Attribute (الف ۱)

$$= \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)}$$

در این معادله، V_p و V_s میانگین سرعت طولی و عرضی سنگ مخزن هستند. ΔV_p و ΔV_s اختلاف سرعت طولی و عرضی بین سنگ مخزن و پوش‌سنگ می‌باشند ΔT نمایانگر تغییرات در طول زمان است. جهت تسهیل روند محاسبه نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی و کاربرد مستقیم داده‌های لرزه‌نگاری بدون انجام وارون‌سازی لرزه‌ای (به عنوان مثال داده‌های لرزه‌نگاری شیب/ضریب زاویه^{۱۹} و یا داده‌های لرزه‌نگاری دامنه زاویه دور/نزدیک)، نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی توسط اصول فیزیک سنگی مشروح در زیر به محدوده لرزه‌نگاری تبدیل شد. معادله (الف ۲) تقریب ارائه شده توسط (Shuey, 1985) برای معادلات (Zoeppritz, 1919) می‌باشد.

$$\begin{aligned} R(\theta) \approx R(0) + G \sin^2 \theta \\ + F \tan^2 \theta \\ - \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (\text{الف ۲})$$

که در آن θ زاویه فرود، $R(0)$ ، G و F به ترتیب ضریب زاویه، شیب و ترم سوم معادله (Shuey, 1985) می‌باشند. می‌توان $R(0)$ را به صورت زیر و بر حسب سرعت صوت و چگالی نوشت (Avseth, Mukerji, & Mavko, 2005):

$$\begin{aligned} R(0) \quad (\text{الف ۳}) \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \end{aligned}$$

²⁰ Gradient/Intercept

ارائه نشانگرهای کاربردی لرزهنگاری چهاربعدی جهت محاسبه تغییرات فشار و اشباع‌شدگی حاصل از برداشت و تزریق

نمایش می‌دهد. مشابه روش ارائه شده برای نشانگر تغییرات اشباع‌شدگی، مراحل فوق برای نشانگر تغییرات فشار طی گردید و در نهایت معادله شماره (الف ۱۰) به صورت زیر استحصال شد:

$$\begin{aligned} & \text{Pressure Change Attribute} \quad (\text{الف } 10) \\ & = \frac{1}{1.6} \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) - \Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right) \\ & \approx \Delta(F - N) \end{aligned}$$

$$R(0) \approx N (F - N) \quad (\text{الف } 8)$$

$$\begin{aligned} & \text{Saturation Change Attribute} \quad (\text{الف } 9) \\ & = \frac{\Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \cdot \Delta T \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}{\Delta T \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right)} \\ & \approx \frac{2.56 \Delta N^2}{\Delta N - \Delta(F - N)} \end{aligned}$$

در این معادله، F و N به ترتیب دامنه لرزهنگاری زاویه نزدیک (*Near*) و دور (*Far*) هستند و Δ تغییرات نسبت به زمان را

۷. مراجع

- Amini, H. (2014). *A pragmatic approach to simulator to seismic modelling for 4D seismic interpretation*. PhD thesis, Heriot-Watt University.
- Avseth, P., Mukerji, T., & Mavko, G. (2005). *Quantitative Seismic Interpretation*. Cambridge University Press.
- Batzle, M., & Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, Vol. 57, No. 11, P:1396-1408. .
- Dumont, M. H., Fayemendy, C., Mari, J. L., & Huguet, F. (2001). Underground gas storage: estimating gas height and saturation with time lapse seismic. *Petroleum Geoscience*, 7, 155-162.
- Falahat, R., Obidegwu, D., Shams, A., & MacBeth, C. (2014). The interpretation of amplitude changes in 4D seismic data arising from gas exsolution and dissolution. *Petroleum Geoscience*, Vol 20, No. 3, P: 303-320.
- Falahat, R., Shams, A., & MacBeth, C. (2011). Towards quantitative evaluation of gas injection using time-lapse seismic data. *Geophysical Prospecting*, Vol. 59, No. 2, P: 310–322.
- Falahat, R., Shams, A., & MacBeth, C. (2013). Adaptive scaling for an enhanced dynamic interpretation of 4D seismic data. *Geophysical Prospecting*, Vol. 61, No. 1, P: 231–247.
- Fayemendy, C. (2015). *Time-Lapse Seismic: A Multidisciplinary Tool for Reservoir*. EAGE Short Course, EAGE Education B. V.
- Gardner, G. H., Gardner, L. W., & Gregory, A. R. (1974). Formation velocity and density: The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770–780.
- Gassmann, F. (1951). Ueber die Elastizität poröser medien, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft, Zürich*, 96, 1-23 (English translation from <http://sepwww.stanford.edu/sep/berryman/PS/gassmann.pdf>).
- Koster, K., Gabriels, P., Hartung, M., Verbeek, J., Deinum, G., & Staples, R. (2000). Timelapse seismic

- surveys in the North Sea and their business impact. *The Leading Edge*, 19-03, P: 286-293.
- Landrø, M. (2001). Discrimination between pressure and fluid saturation changes from timelapse seismic data. *Geophysics*, 66, May edition, 836-844.
- MacBeth, C., Soldo, J., & Floricich, M. (2004). Going quantitative with 4D seismic. *74th SEG Annual International Meeting*, (pp. 2283-2286).
- Shuey, R. T. (1985). A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 50, 609-614. .
- Theune, U., Schmitt, D., & Rokosh, D. (2003). Feasibility study of time-lapse seismic monitoring for heavy oil reservoir development - The rock-physical basis. *73rd SEG Annual International Meeting*, (pp. 1418-1421).
- Tsuneyama, F., & Mavko, G. (2007). Quantitative detection of fluid distribution using time lapse seismic. *Geophysical Prospecting*, 55, 169-184.
- Wiggins, R., Kenny, G. S., & McClure, C. D. (1983). A method for determining and displaying the shear-velocity reflectivities of a geologic formation. *European Patent Application*, 0113944.
- Zoeppritz, K. (1919). Erdbebenwellen VIII B, Ueber Reflexion and Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflaechen. *Goettinger Nachrichten*, I, 66-84. .