



لرزه‌نگاری ۴ بعدی؛ تغییر در پارادایم سنتی مدیریت میادین هیدروکربوری

مجربی کریمی^۱ ■ پژوهشگاه صنعت نفت مجربی قاندي^۲ ■ پژوهشگاه صنعت نفت

◆ مقدمه

امروزه تغییر و تحول و پیشرفت جزء جدایی‌ناپذیر فناوری در صنایع مختلف شده و این تغییر و تحول حتی مرزهای صنعت نفت که زمانی از نظرگاه فناوری و دانش، در حوزه فناوری‌های سنتی جای می‌گرفت را در نوردیده است. تغییر و تحول و به‌روز شدن در حوزه فناوری‌های صنعت نفت گرچه به سرعت تغییر در حوزه فناوری اطلاعات، رایانه و هوافضا نمی‌باشد، اما در نوع خود قابل توجه است. این تغییرات در حال حاضر با سرعت قابل ملاحظه‌ای همراه شده است به طوری که کمتر بخش تحقیق و توسعه مرتبط با صنعت نفت در هر کشور و یا شرکت فعال در این حوزه است که آگاهی از آخرین اخبار، اطلاعات و تغییرات در حوزه فناوری را وظایف هر روزه خود قرار نداده باشد.

زمانی گمان برده می‌شد فناوری‌های اکتشافی به دلیل پایان یافتن نفت، به آخر عمر خود رسیده‌اند، اما معرفی هر ساله و هر چند ماه یکبار یک فناوری در این عرصه، این مدعا را باطل کرده است. یکی از فناوری‌های مطرح در حوزه بالادستی صنعت نفت، فناوری لرزه‌نگاری در بخش اکتشاف منابع هیدروکربوری است که امروزه تحولی اساسی در این فناوری پدید آمده و ظهور فناوری لرزه‌نگاری چهاربعدی را منجر شده است. لرزه‌نگاری ۴-بعدی که تداوم

پیشرفت در لرزه‌نگاری ۳-بعدی است در اواخر دهه گذشته و با به اجرا آمدن در چند میدان به جهان معرفی شد.

زمانی یکی از چشمگیرترین پیشرفت‌ها در اکتشاف به کمک رایانه، توسعه لرزه‌نگاری سه‌بعدی بود و این روش از داده‌های لرزه‌ای منطقه برای ایجاد یک تصویر سه‌بعدی از ساختارها و لایه‌های مختلف زمین‌شناسی منطقه استفاده می‌کرد. در استفاده از لرزه‌نگاری سه‌بعدی از آنجا که این تصویر واقعی می‌توانست برای تخمین وجود لایه‌های هیدروکربنی در منطقه و ویژگی‌های خاص ساختمان این ساختارها بسیار مفید باشد، به زمین‌شناسان در تخمین ذخایر هیدروکربوری با احتمال بسیار بالا کمک می‌کرد. با این حال، لزوم درک به موقع از تغییرات دینامیکی مخزن نظیر جریان سیال و اهمیت مسائلی نظیر کاهش ریسک و هزینه‌های حفاری و تولید، به ظهور فناوری دیگری انجامید که با افزودن یک بعد دیگر به نام زمان به لرزه‌نگاری ۳-بعدی، لرزه‌نگاری ۴-بعدی شکل گرفت.

◆ لرزه‌نگاری ۴-بعدی^۲

عملیات لرزه‌نگاری مهمترین ابزار مهندسان ژئوفیزیک برای اکتشاف نفت و گاز بوده که بر اساس مطالعه شکل امواج صوتی یا ارتعاشی که توسط منبع انرژی به داخل زمین فرستاده می‌شود، استوار است. این امواج پس از عبور از

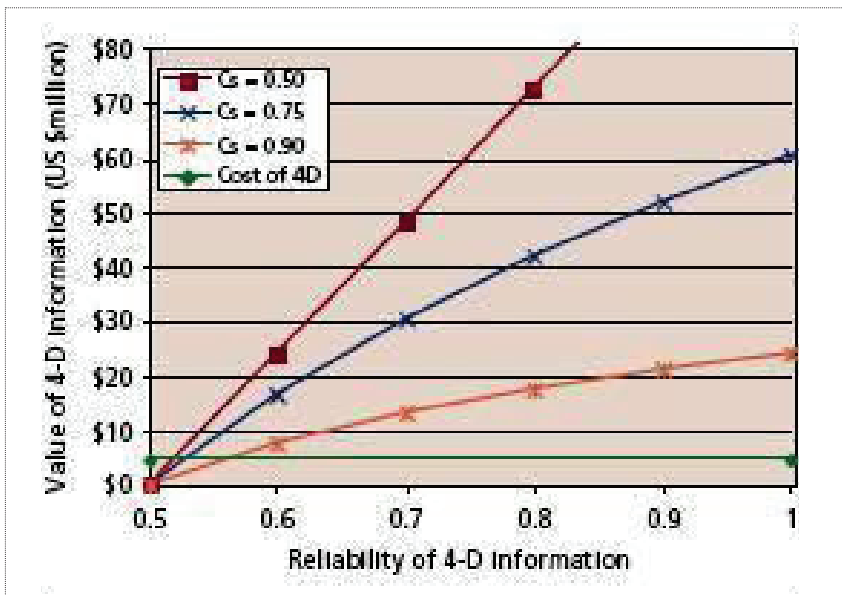
لایه‌های متفاوت، قسمتی از آن به سمت منبع یا نقطه‌ای مشخص (سطح زمین) انعکاس می‌یابد. امواج در اثر اختلاف چگالی و سرعت صوت در لایه‌های مختلف ژئوفیزیکی انعکاس‌های گوناگون دارند و توسط ژئوفون‌ها (در خشکی) و هیدروفون‌ها (در دریا) جذب می‌شوند. تفاوت در انعکاس امواج از لایه‌های مختلف به زمین‌شناسان امکان می‌دهد که محدوده و عمق سنگ‌های متخلخل را که احتمالاً حاوی نفت و گاز هستند، تخمین بزنند [۱].

بعد از ایجاد موج در لرزه‌نگاری نوبت به دریافت و تفسیر داده‌ها می‌رسد. مهمترین روش‌ها برای ترسیم داده‌ها به صورت دو بعدی، سه بعدی و چهار بعدی می‌باشد. در گذشته هدف کلی لرزه‌نگاری ۳-بعدی تعیین قدرت تفکیک بهتر زمین‌شناسی منطقه نسبت به لرزه‌نگاری دوبعدی بود. در لرزه‌نگاری سه‌بعدی برداشت داده‌ها منحصر به یک صفحه عمودی شامل چشمه و گیرنده نبوده بلکه گیرنده‌ها در سطح زمین به صورت یک صفحه مشبک قرار می‌گرفتند. بنابراین در این روش یک حجم از داده‌های لرزه‌ای بدست می‌آمد. توسعه تکنیک‌های لرزه‌نگاری ۳-بعدی در دهه ۱۹۷۰ از یک سو باعث موفقیت‌های چشمگیری در

¹ Mojtabaz.karimi@gmail.com

² ghaedimojtaba@yahoo.com

³ 4-D Seismic



شکل ۱ | نمایش ارزش اطلاعات لرزه‌نگاری ۴-بعدي به عنوان تابعی از شانس موفقیت بدون D-۴ [۵]

مزایای لرزه‌نگاری چهار بعدی بیان کرد که به طور خلاصه می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود؛

- شامل تمامی مزایای لرزه‌نگاری ۳-بعدي (چراکه تکرار لرزه‌نگاری ۳-بعدي محسوب می‌شود)

- مشاهده جبهه حرکت سیال مخزن
- مشاهده مکان‌های جاروب نشده یا کنار زده شده در میدان

- مشاهده تغییرات سیال مخزن
- مشاهده جبهه حرکت سیال تزریقی در مخزن

- ارزیابی فرآیند ازدیاد برداشت در مخزن
- تعیین مکان چاه‌های جدید در مخزن
- بهبود تصمیمات مدیریتی مخزن
- کمک به مدیریت آینده مخزن و جلوگیری از رخدادهای فاجعه‌آمیزی مثل تولید آب زود هنگام

- اتخاذ استراتژی بهینه تخلیه مخزن
- افزایش بازافت نفت
- پیش‌بینی آینده تولید نفت
- افزایش بازدهی حفاری [۳]

⁴ Chance of Success (CS)

از ۱۱/۵ میلیون بشکه نفت در روز، مشارکت دارد [۵]. به هر حال لزوم انجام برآوردهای اقتصادی قبل از انجام عملیات لرزه‌نگاری ۴-بعدي، ضروری به نظر می‌رسد.

در شکل ۱ ارزش اطلاعات لرزه‌نگاری ۴-بعدي برای یک میدان نفتی در نوژ در دریای شمال محاسبه شده است. در این میدان هزینه برنامه لرزه‌نگاری ۴-بعدي حدود ۴/۶ میلیون دلار (آمریکا) محاسبه شده و شانس موفقیت عملیات حفاری با و بدون اطلاعات لرزه‌نگاری ۴-بعدي تعیین شده است. ارزش لرزه‌نگاری ۴-بعدي بیشتر از هزینه آن در یک محدوده وسیع است و این به معنی آن است که لرزه‌نگاری ۴-بعدي اغلب اوقات دارای ارزش اقتصادی است. وقتی که شانس موفقیت^۴ پایین (CS=۰.۵) داده‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدي از ارزش بیشتری برخوردار میگردند پس زمانی که اطلاعات مخزن کامل است (CS=۱) دیگر نیازی به اطلاعات جدید نمی‌باشد (اگر چه این به ندرت اتفاق می‌افتد) [۵،۶].

● مزایای لرزه‌نگاری چهار بعدی

موارد زیادی را می‌توان به عنوان

اکتشاف و توصیف مخزن و از سویی دیگر به توسعه بهتر مخزن و عملکرد اقتصادی آن منجر شد. اما هم‌اکنون فن آوری ۴-بعدي به عنوان بهترین شیوه در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود. بر روی بیش از ۱۸۰ میدان نفتی و گازی، لرزه‌نگاری‌ها برای تعیین داده‌های بیشتر تکرار شده است [۳].

لرزه‌نگاری ۴-بعدي شامل جمع آوری، پردازش و تحلیل لرزه‌نگاری‌های پی‌درپی یک میدان هیدروکربوری در حال تولید است. هدف این نوع لرزه‌نگاری تعیین تغییرات در مخزن با مقایسه داده‌هاست که این تغییرات می‌تواند ناشی از تولید هیدروکربن یا تزریق آب یا گاز در مخزن باشد [۲].

فن آوری لرزه‌نگاری ۴-بعدي در تمام عمر مخزن از ابتدای تولید، برای تعیین فشارمخازن، تا اواسط عمر مخزن، برای مشاهده جبهه حرکت آب و حتی در اواخر عمر مخزن، برای مشخص کردن مکان‌های نفت جاروب نشده و کنار زده شده، کاربرد دارد [۳].

زمانی که عدم قطعیت زیادی وجود دارد، استفاده از این فن آوری مفید خواهد بود. فاکتورهای زیادی در اینکه سیگنال‌ها در مخزن می‌توانند در مراحل مختلف اندازه‌گیری به خوبی دریافت شوند، وجود دارد که شامل سنگ مخزن، ماهیت و سرعت تغییر سیال تولیدی یا تزریقی مخزن می‌شود. این دو عامل با هم قدرت نسبی سیگنال‌های لرزه‌نگاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لرزه‌نگاری همچنین باید توانایی تکرار دقیق بررسی قبلی را داشته باشد [۳].

هزینه لرزه‌نگاری ۴-بعدي ۱ تا ۲ دلار در هر بشکه (۱-۲\$/bbl) تخمین زده شده است [۴،۵]. اگر چه کاهش ریسک تولید از مخزن و افزایش برداشت ۲۰ تا ۳۰ درصدی که گفته می‌شود با استفاده از این فن آوری حاصل می‌شود، ولی هزینه‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدي را به خوبی جبران می‌کند. بر اساس ارزیابی‌های مستقل انجام شده تا سال ۲۰۲۰، لرزه‌نگاری ۴-بعدي در تولید بیش

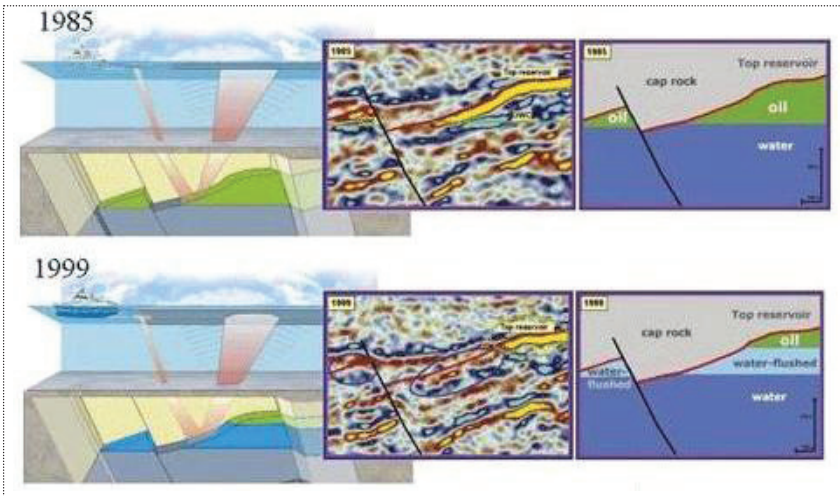


● تاریخچه استفاده از لرزه‌نگاری ۴- بعدی و شرکت‌های فعال در این زمینه

در سال ۱۹۹۵ بررسی‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدی به عنوان پروژه مشترک شرکت‌های استات اوایل و شلمبرژر بر روی میدان گولفاکس^۵ در دریای شمال مورد استفاده قرار گرفت. در طول انجام این کار پتانسیل اقتصادی این فن آوری با شناسایی نواحی تخلیه نشده این میدان، و شناسایی بسته‌های باقیمانده نفت و گاز مشخص شد. علاوه بر میدان گولفاکس این فن آوری در میدان‌های اسپرگ^۶، نرن^۷، گانت^۸، فورتیز^۹ و تزل^{۱۰} با موفقیت به کار گرفته شد [۷]. شکل ۲ استفاده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی در میدان نفتی گولفاکس را نشان می‌دهد. این شکل موقعیت نسبی آب و نفت را بعد از ۱۴ سال تولید از مخزن به تصویر می‌کشد [۹].

میدان نفتی مارلیم پتروبراس^{۱۱} در حوزه کامپوس^{۱۲} در برزیل نمونه‌های بسیار خوبی از اینکه چگونه فن آوری لرزه‌نگاری ۴-بعدی می‌تواند در تصمیمات مدیریتی مخزن مشارکت داشته باشد را نشان می‌دهد. قابلیت‌های تصویربرداری ۴-بعدی شرکت وسترن جکو^{۱۳} در این میدان، مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی را بهبود داد و قابلیت پایش حرکت آب و نفت در مخزن را با دقت و اطمینان بیشتری ممکن ساخت. همچنین به فرآیند پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار مخزن در آینده کمک شایانی نمود [۷].

شرکت استات اوایل هیدرو به تنهایی در سال ۲۰۰۶ بیش از بیست مطالعه ۴-بعدی را انجام داد. به‌تازگی توجهات به سمت توسعه تکنیک‌هایی برای استخراج اطلاعات کمی از مخزن متمایل شده است. به این صورت که داده‌های لرزه‌نگاری را با دیگر اطلاعات موجود ترکیب کنند (مغزه‌ها، چاه‌ها، تولید و شبیه‌سازی مخزن) [۹]. گام بعدی در لرزه‌نگاری ۴-بعدی ارتباط دادن این فن آوری با "تاریخچه تولید" است که اگر به موفقیت برسد پیش‌بینی از رفتار آینده مخزن و به روز نمودن مدل‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی مخزن را بشدت بهبود خواهد



شکل ۲ | استفاده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی در میدان نفتی گولفاکس [۹].

پیچیدگی‌های این میدان، فن آوری لرزه‌نگاری ۴-بعدی در فهم بهتر از الگوهای تخلیه مخزن و تغییر ساختاری مخزن موثر بوده و با تصاویر ترسیم شده با کیفیت بالای این مخزن می‌توان مکان‌های جاروب نشده مخزن و محل چاه‌های جدید را در این مخزن تعیین کرد [۱۰].

● مورد مطالعه دوم: بررسی سیلاب زنی با CO₂ در میدان نفتی وی‌پرن^{۱۵} کانادا

از دیگر استفاده‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدی که بر روی میدان وی‌پرن در کانادا انجام شده است، استفاده از این فن آوری در سیلاب زنی با گاز CO₂ می‌باشد. میدان نفتی وی‌پرن در شمال حوزه ویلیستون^{۱۶} در کانادا واقع شده است. نزدیک به ۱۰۰۰ چاه در این مخزن حفر شده است که ۱۳۷ عدد به صورت افقی می‌باشد و ۲۴٪ از ۱/۴ میلیارد نفت در جای آن تا کنون برداشت شده است. تزریق ۳ تا ۷ میلیون فوت مکعب دی‌اکسید

بخشید [۹]. در ادامه چند نمونه موفق استفاده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی در موارد مختلف اشاره می‌گردد.

● مورد مطالعه اول: تعیین محل چاه‌های جدید در میدان نفتی اکوفیسک^{۱۷} نروژ

در یک مطالعه الگوهای تزریق و تولید میدان اکوفیسک، بزرگترین میدان نفتی نروژ، با استفاده از لرزه‌نگاری با دقت بالا ترسیم شده است. این میدان نفتی که در سال ۱۹۹۶ کشف شده در زیر دریای شمال واقع شده است که از حدود ۳۰۰ چاهی که در این میدان حفر گردیده است، ۱۰۰ چاه آن هنوز به صورت فعال در تولید نفت و یا تزریق آب هستند. مقدار نفت درجا و قابل استحصال این مخزن به ترتیب حدود ۶/۷ و ۳/۲ میلیارد بشکه تخمین زده شده است. تا اواخر سال ۲۰۰۸ حدود ۷۹۰/۶ میلیون بشکه از نفت قابل برداشت باقیمانده است. کاهش فشار مخزن به دلیل تولید و همچنین ضعیف شدن ساختار سنگ آهکی مخزن با تزریق آب باعث شده است که سنگ مخزن با فرونشست زمین فشرده شود. از دیگر پیچیدگی‌های این مخزن، می‌توان به محبوس شدن گاز در طبقات بالایی اشاره کرد که گفته می‌شود به دلیل مهاجرت گاز از مخزن به طبقات بالایی رخ داده است. با وجود

⁵ Gullfaks

⁶ Oseberg

⁷ Norne

⁸ Gannet

⁹ Forties

¹⁰ Troll

¹¹ Petrobras' Marlim

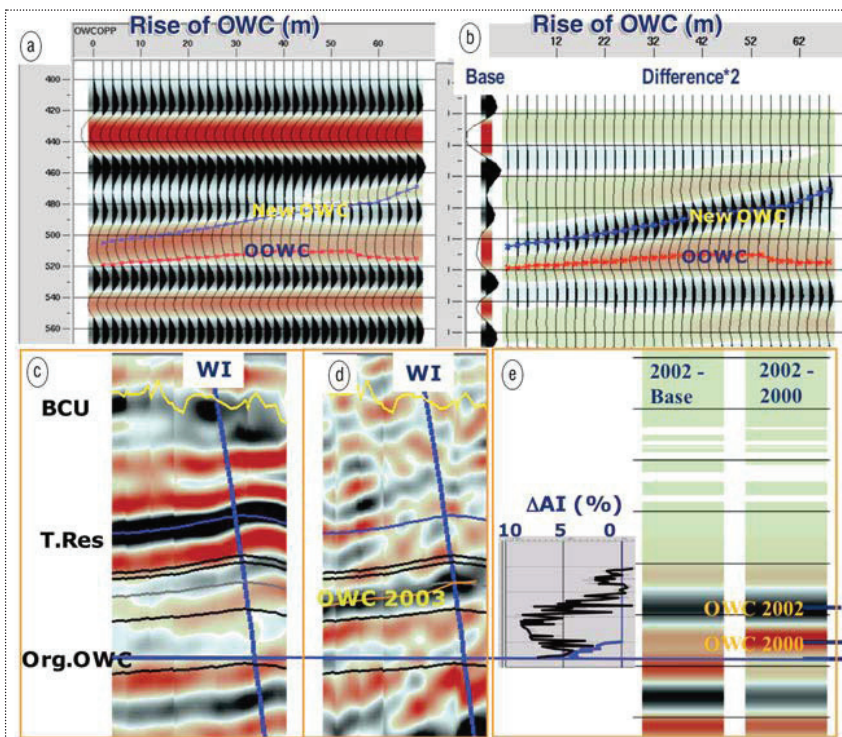
¹² Campos

¹³ WesternGeco

¹⁴ Ekofisk

¹⁵ Weyburn

¹⁶ Williston



شکل ۱۳ | سطح تماسهای آب-نفت در سالهای ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ در میدان نورن که با استفاده از تفاوت در داده‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدی بدست آمده است [۱۳].

در این شکل نواحی قرمز رنگ، نواحی آب با اشباع بالا را نشان می‌دهد [۱۳].

● مورد مطالعه پنجم: بررسی دینامیک رفتار شکاف‌ها

در فرآیندهای تزریق بسیار مهم است که به فشار شکست سازند نرسیده و استحکام چاه حفظ شود. مثلاً در تزریق CO₂ در مخزن باید اثرهای ژئومکانیکی در اطراف چاه به خوبی کنترل شود تا از شکسته شدن سازند جلوگیری شود. فن آوری لرزه‌نگاری ۴-بعدی در این زمینه در کنترل نواحی شکسته شده و مانیتور اثرهای ژئومکانیکی بکار گرفته شده است. در مواردی حتی به بررسی شکست‌های انجام شده در پوش سنگ و میزان سیال آزاد شده از طریق این شکستگی‌ها، با استفاده از فن آوری لرزه‌نگاری ۴-بعدی پرداخته شده است [۱۴، ۱۵].

¹⁷ Marlim
¹⁸ Nordland

کربن در روز در هر چاه از اکتبر ۲۰۰۰ آغاز شده است. هدف از تزریق CO₂ افزایش تولید به میزان ۱۵٪ است [۱۱].

لرزه‌نگاری در این میدان برای مشاهده چهار الگوی تزریق CO₂ با دقت بالا انجام شد. در طول انجام عملیات برداشت، تمام تلاش‌ها برای قرار دادن منبع‌ها و گیرنده‌ها در مکانهای قبلی بکار گرفته شد. عملیات لرزه‌نگاری در پاییز سال ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ انجام شد. با وجود کمتر بودن ضخامت این مخزن نسبت به طول موج‌های لرزه‌نگاری، طراحی درست انجام عملیات لرزه‌نگاری ۴-بعدی در کنترل آنالیز سیلاب‌زنی با CO₂ در این میدان نفتی مفید موثر واقع شده است [۱۱].

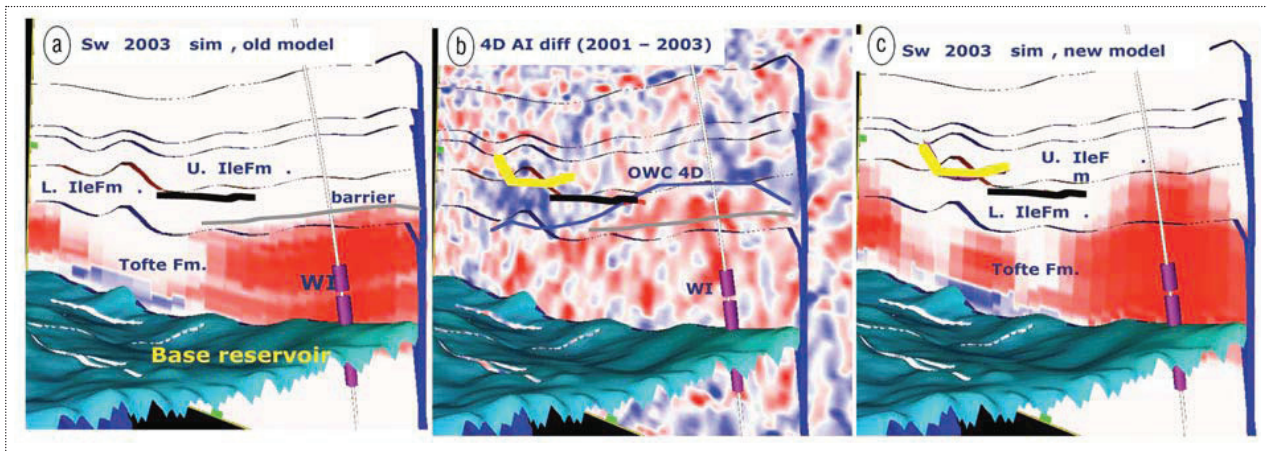
● مورد مطالعه سوم: مطالعه میدان نفت سنگین مارلیم^{۱۷} در برزیل

مورد مطالعه بعدی میدان مارلیم است که در اعماق آب‌های دریا در برزیل واقع شده است. این میدان ۵۵۰۰۰۰ بشکه در روز از بیش از ده سکوی ثابت دریایی تولید می‌کند. مطالعه لرزه‌نگاری ۴-بعدی در این میدان توسط وسترن جکو انجام شده است. تصویر برداری ۴-بعدی در این مخزن به شناسایی دقیق حرکت آب و نفت و گاز در این مخزن منجر شده است. این مطالعه به مدل‌سازی بهتر استاتیکی و دینامیکی مخزن کمک کرده است و همچنین باعث شده است که پیش‌بینی با اطمینان بیشتری برای آینده مخزن انجام شود. بنابراین ریسک پروژه‌های حفر چاه‌های جدید را کاهش داده است. این مطالعه همچنین به مکان‌یابی دقیق ذخیره‌های باقیمانده در این مخزن و در نتیجه بهینه کردن محل چاه‌های جدید کمک شایانی کرده است [۱۲].

● مورد مطالعه چهارم: مشاهده جبهه حرکت سیال در میدان نفتی نورن نوژ

از دیگر استفاده‌های لرزه‌نگاری ۴-بعدی میدان نورن است که در بخش جنوبی ناحیه نوردلند^{۱۸} واقع شده است. این مخزن ماسه‌سنگی

و مربوط به اواسط دوره ژوراسیک است که مخزنی با کیفیت مطلوب با تخلخل ۲۳-۲۵ درصد و تراوایی حدود ۲۰۰-۲۰۰۰ میلی دارسی (mD) است. اولین مطالعه لرزه‌نگاری در این مخزن در سال ۱۹۹۲ انجام شده است. عملیات لرزه‌نگاری در این مخزن در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ تکرار شده است. بنابراین اولین بار لرزه‌نگاری ۴-بعدی در این میدان در سال ۲۰۰۱ انجام شده است. اطلاعات بدست آمده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی به طور فعال در مدیریت مخزن مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی در این مخزن به بهینه‌سازی محل دقیق‌تر حفاری‌های جدید و بدست آوردن مدل بهتری در شبیه‌سازی مخزن کمک شایانی کرده است. شکل ۳ سطح تماسهای جدید آب-نفت را در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ که با استفاده از فن آوری از تفاوت لرزه‌نگاری ۴-بعدی بدست آمده است را نشان می‌دهد. شکل ۴ مکان‌های اشباع آب را در سالهای مختلف نشان می‌دهد که



شکل ۴ | مکان‌های اشباع آب که نواحی قرمز رنگ، نواحی آب با اشباع بالاست [۱۳].

● مورد مطالعه ششم: بررسی دینامیک رفتار شکافها

از دیگر موارد استفاده از لرزه‌نگاری ۴-بعدی، استفاده از این فن آوری در بررسی دینامیک رفتار شکاف‌ها یا سیستم شکاف‌هاست که مطالعات گوناگونی در این زمینه انجام شده است [۱۶].

◆ نتیجه‌گیری

فن آوری لرزه‌نگاری در چند دهه اخیر به موفقیت‌های شگفت‌انگیزی در زمینه اکتشاف و تولید دست‌یافته است. لرزه‌نگاری و تصویر برداری ۳-بعدی و لرزه‌نگاری ۴-بعدی از مهمترین پیشرفت‌ها در این فن آوری محسوب شده و قابلیت پایش تغییرات خصوصیات مخزن مثل سیال، دما و تغییر فشار را در طول عمر مخزن فراهم کرده است. قطعاً لرزه‌نگاری ۴-بعدی آخرین حلقه از فناوری مدرن در این زمینه نخواهد بود و هم‌اکنون شرکت‌های بزرگ نفتی به معرفی فناوری‌هایی با قابلیت بهتر و پایش سریع‌تر جریانات هیدروکربوری نظیر لرزه‌نگاری حین حفاری^{۱۹} اقدام کرده‌اند. گرچه این مقاله تنها به معرفی یک فناوری در حوزه اکتشاف نفت و ارائه چند کاربرد و استفاده از آن‌ها در مناطق مختلفی از جهان پرداخت، اما هدف آن نه فقط معرفی یک فناوری که نشان‌دادن سیر تحولات شگرف در حوزه‌ای مانند اکتشاف نفت بود. هدف دیگر آن، کمک به استفاده و عملیاتی کردن این فناوری در میدان نفتی کشور عزیزمان می‌باشد، همچنین قرار است اولین پروژه لرزه‌نگاری ۴-بعدی در شرکت نفت فلات قاره در میدان سروش، ابودر و نوروژ به حجم ۵۰۰ کیلومتر مربع آغاز شود [۱۷].

July 2003.

[12] Paul Johann, Rui Sansonowski, Rildo Oliviera, "4-D Seismic in heavy oil turbidite reservoir offshore Brazil", The Leading Edge, v. 28, no. 6, p. 718-729, June 2009.

[13] Bård Osdal, Oddvar Husby, Hans A. Aronsen, Nan Chen, and Trine Alsos, "Mapping the fluid front and pressure build up using 4-D seismic in Norne field", The Leading Edge, v. 25, no. 9, pp. 1134-1141, September 2006.

[14] Jarle Haukas, Jan Qystein, Havvig Bakke, Lars Sonneland, "Well performance diagnostics by integrating 4-D seismic in a coupled fluid flow/geo mechanical model", SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, 2009.

[15] Michael Nickel, Lars Sonneland, "Well performance analysis using 4-D Seismic", SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, 2009.

[16] Hilde Grude Borgos, Berengere savary-Sismondini, Michel Nickel, Lars Sonneland, "Analysis of dynamic fracture behavior using 4-D seismic", SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, 2009.

[۱۷] پورتال شرکت ملی نفت ۱۳۸۹/۲/۸- گفت و گوی مدیر عامل عملیات اکتشاف نفت با پایگاه شرکت ملی نفت در مورد پروژه لرزه‌نگاری ۴-بعدی

[۱۸] گزارش فناوری‌های نوین در حوزه بالادستی صنعت نفت-مرکز ایده پردازان جوان-پژوهشگاه صنعت نفت ۱۳۸۹

[19] www.Rasadenaft.com

و همین امر، آشنایی هرچه بیشتر مهندسين مرتبط با این نوع فناوری‌ها و کسب دانش فنی مورد نیاز جهت عملیاتی کردن آن را می‌طلبد.

◆ منابع

- [1] <http://andishkadeh.pina.ir/?ID=34>
- [2] <http://www.westerngeco.com/technology/4d.aspx>
- [3] <http://www.epmag.com/archives/features/4298.htm>
- [4] <http://naft.itan.ir>
- [5] Steve Pickering, John Wagoner, "Time-lapse has multiple impacts," Exploration and production Magazine, P.37-38, March 2003.
- [6] "Seismic Applications throughout the Life of the Reservoir," Oilfield Review Magazine, V.14, pp. 48-65, Summer 2002.
- [7] <http://www.offshore-technology.com/features/feature43561/>
- [8] <http://www.slb.com>
- [9] <http://www.statoil.com/>
- [10] Rob Ross, Ed Palmer and Andy Thompson, from WesternGeco comp; and Haakan Haugvaldstad, from ConoPhilips Skandinavia AS comp., "Time-lapse helps site new Ekofisk wells", Exploration and Production Magazine, P. 61-63, July 2009.
- [11] Robert R. Kendall, Robert Winarsky, Thomas L. Davis, Robert D. Benson, "9C, 4-D Seismic Processing for the Weyburn Flood, Saskatchewan, Canada", The Leading Edge, v. 22, no. 7, p. 696-697,