

استفاده از مدل سازی دو بعدی حوضه در مطالعه میادین نفتی: مثالی از زاگرس

ارسلان زینل زاده^{۱*}، محمد رضا رضایی^۲

^۱ پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۲ دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران ایران

* مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: zeinalzadeha@ripi.ir

(دریافت: ۸۸/۱۰/۲۰؛ پذیرش: ۸۹/۲/۲۹)

چکیده

تولید هیدروکربن از سنگ منشأ، حاصل فرایندهای فیزیکی و شیمیایی متعددی در مقیاس زمان زمین‌شناسی می‌باشد، که پس از تشکیل و مهاجرت، در مخزن تجمع یافته است. مدل سازی حوضه، ابزاری برای شبیه سازی این فرایندها بوده و در برگزیده محاسبات پیچیده‌ای است که با استفاده از نرم افزارهای مدل ساز حوضه رسوبی انجام می‌شود. مزایا و نتایج این نوع مطالعه، موجب استفاده گسترده از آن در صنعت نفت شده است و این امر سبب پیشرفت نرم افزارهای مدل ساز حوضه رسوبی گشته است. در این مطالعه، یک مقطع زمین‌شناسی از تاق‌دیس‌های زاگرس انتخاب شده و با استفاده از نرم افزار مدل سازی دو بعدی و داده‌های زمین‌شناسی، مدل دو بعدی آن تهیه گردید. در مدل به دست آمده، فرایندهای هیدرودینامیک، انتقال حرارت، نفت زایی و مهاجرت هیدروکربن شبیه سازی شده و میزان اشباع شدگی، وضعیت دما، مسیرهای مهاجرت و همچنین تجمع هیدروکربن در مقطع مورد مطالعه مشخص گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی، میادین نفتی حوضه زاگرس، نفت‌زایی، مهاجرت، تجمع هیدروکربن

مقدمه

ناحیه‌ای از روش مدل سازی سه بعدی استفاده می‌شود. مدل سازی سه بعدی، پتانسیل قابل توجهی در تعیین اندازه و حجم هیدروکربن به تله افتاده دارد (Higley et al. 1997).

در مدل سازی با مقایسه سناریوهای مختلف، امکان انتخاب مناسب‌ترین سناریو وجود دارد. نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی و شناخت موجود از منطقه، مقایسه می‌شود و صحیح‌ترین سناریو به دست می‌آید (Bordenave 2008, Makhouss & Galushkin 2005).

پیشرفت‌های اخیر در نرم افزارها و سخت افزارهای کامپیوتر، امکان مدل‌سازی وضعیت‌های پیچیده زمین‌شناسی مانند حرکت گنبد‌های نمکی را فراهم آورده است. اکنون استفاده از مدل سازی حوضه یک بعدی و دو بعدی، جهت کاهش ریسک در اکتشاف، در بیشتر شرکت‌های نفتی معمول شده و در حال گسترش است (Higley et al. 2006, Pitman et al. 2003).

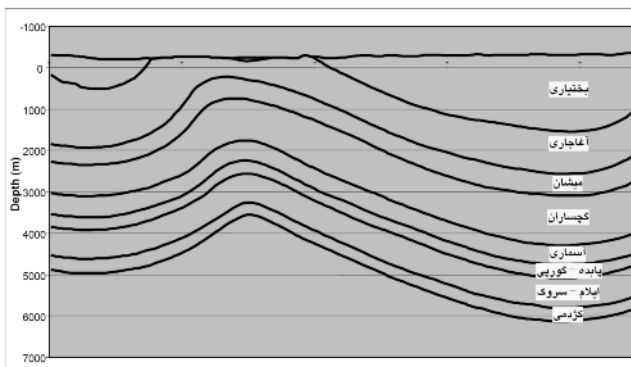
استفاده از نرم افزار مدل سازی، مزیت‌های زیادی نسبت به دیگر روش‌های آزمایشگاهی دارد. تئوری‌های مختلف که در طی این سال‌ها به دست آمده، به شکل نرم افزار ارائه شده است. با استفاده از نرم افزار می‌توان تئوری‌ها و معادلات را در مدت زمان اندک و صرف هزینه

استفاده از مدل سازی حوضه، در سال‌های اخیر گسترش قابل توجهی داشته است. مدل سازی حوضه در مطالعه مناطق نفت‌خیز ایران مورد توجه قرار گرفته و در مقالاتی استفاده شده است (Bordenave & Rudkiewicz et al. 2007, Zamanzadeh et al. 2009, Hegre 2005, Rabhani & Kamali 2005). نتایج این گونه مطالعات، در جهت شناخت سیستم نفتی منطقه مورد مطالعه است (Allen & Magoon & Dow 1994, Allen 2005).

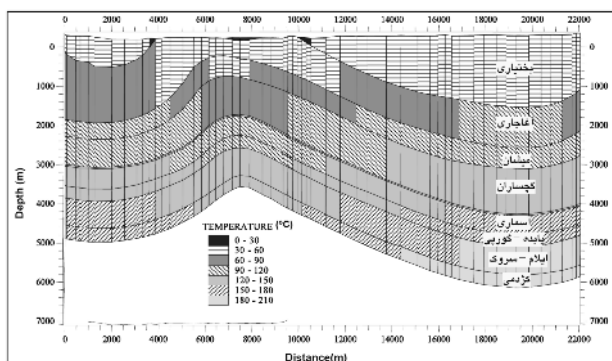
مدل سازی حوضه، دربرگیرنده محاسبات پیچیده زیادی است. به همین دلیل، استفاده از نرم افزار در مدل سازی اجتناب‌ناپذیر است. در این زمینه، نرم افزارهای یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برحسب هدف مطالعه، می‌توان از این نرم افزارها استفاده کرد.

در مدل سازی یک بعدی، فرایند نفت‌زایی از سنگ منشأ، در یک بعد شبیه سازی می‌شود که در اغلب موارد از داده‌های چاه‌های نفت یا گاز استفاده می‌شود (Bordenave 2008). مقاطع زمین‌شناسی یا مقاطع لرزه‌ای، برای مدل سازی دو بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند و شبیه سازی در دو بعد عمق و طول انجام می‌شود. برای مطالعات

حوضه بزرگ زاگرس است و در شمال شرق پلت عربی واقع شده است. تاقدیس‌های فروافتادگی دزفول در زمان پلیوسن- الیگوسن تشکیل شده‌اند (Alavi 2007). مقطع مورد مطالعه دربرگیرنده سازندهای آجاجاری، میشان، گچساران، آسماری، پابده، گورپی، ایلام، سروک و کژدمی است. سنگ منشأ اصلی فروافتادگی دزفول، سازند کژدمی با سن آلبین و سنگ منشأ فرعی، سازند پابده با سن پالتوسن تا الیگوسن است (Ala et al. 1980, Versfelt 2001). سنگ‌های منشأ دارای کروژن نوع دو گوگردی است که در فروافتادگی‌های درون قاره‌ای و در محیط احیایی حاصل از لایه بندی آب دریا نهشته شده‌اند (Bordenave 2002). میدان‌های بزرگ نفتی فروافتادگی دزفول در قسمتی قرار دارند که سازند کژدمی نهشته شده و غنی از ماده آلی است. مطالعات انجام شده، تطابق نفت مخازن آسماری و سروک را با سنگ منشأ کژدمی نشان می‌دهد. نفت میدان‌های شمال شرق فروافتادگی دزفول مانند میدان لفسفید و پر سیاه از سازند پابده منشأ گرفته است (Bordenave & Burwood, 1990 & 1995).



شکل ۱: مقطع رقومی بازسازی شده



شکل ۲: مقطع مورد مطالعه و دمای لایه‌ها برحسب درجه سانتیگراد

روش کار

در این بررسی، مدل‌سازی دو بعدی مقطع به دست آمده از مطالعات لرزه نگاری و زمین شناسی یکی از میدان‌های زاگرس انجام شده است. برای وارد کردن یک مقطع، در نرم افزار Temis2D لازم است که مقطع مورد مطالعه، رقومی شود. شکل (۱) نشان دهنده مقطع رقومی

کمتر، جهت مطالعه، مورد بهره برداری قرار داد و فرایندهای پیچیده‌ای را که در طول میلیون‌ها سال رخ داده، بازسازی کرد. این مطالعه با استفاده از نرم افزار Temis2D نسخه ۴/۰/۴ سال ۲۰۰۶ انجام شده است.

در این مطالعه، یکی از میدان‌های بزرگ فروافتادگی دزفول، جهت مدل سازی حوضه رسوبی انتخاب شده است. از آنجا که برخی از داده‌های استفاده شده و نتایج بدست آمده در این مطالعه، محرمانه می‌باشد، از ذکر نام تاقدیس خودداری شده است. هدف از این مطالعه، بررسی فرایند نفت‌زایی از سنگ منشأ و بدست آوردن وضعیت دما، پختگی و مسیرهای مهاجرت در مقطع یکی از میدان‌های نفتی زاگرس با استفاده از مدل سازی دو بعدی حوضه است. در مدل سازی حوضه، تاریخچه حوضه رسوبی بازسازی شده و فرایندهایی که منجر به تشکیل و تجمع هیدروکربن شده، شبیه سازی شده است. از جمله فرایندهای شبیه سازی شده: ۱- هیدرودینامیک ۲- انتقال حرارت ۳- هیدروکربن زایی، خروج هیدروکربن از سنگ منشأ و مهاجرت آن است.

در سال‌های اخیر، روش‌های مدل سازی تغییرات عمده ای پیدا کرده و در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی دو بعدی حوضه رسوبی، روشی است که اکنون به خوبی رشد یافته و نرم افزارهای پیشرفته‌ای جهت مشخص کردن مسیر مهاجرت نفت، گاز و آب در طول مجراهای مهاجرت، ارائه شده است. فیزیک فرایندهای زایش و مهاجرت نفت به خوبی شناخته شده و با استفاده از قانون دارسی، می‌توان چگونگی مهاجرت هیدروکربن در مسیر مهاجرت را به درستی تعیین نمود و با استفاده از قانون سینتیکی آرنیوس، فرایند نفت و گاز زایی را شبیه سازی کرد (Frederic, Ungerer et al. 1990). (2003).

در مدل سازی دو بعدی، فرایندهای فیزیکی و ژئوشیمیایی که منجر به تشکیل، مهاجرت و تجمع هیدروکربن شده، شبیه سازی می‌شوند این شبیه سازی، در یک مقطع زمین شناسی انجام می‌شود که از لحاظ شکل هندسی، چینه شناسی و سنگ شناسی شناخته شده باشد.

در نرم افزار دو بعدی، مقطع زمین‌شناسی از دیدگاه عددی تعریف می‌شود. مقطع مورد مطالعه، با مش‌هایی در دو بعد تعریف می‌شود، که در طول زمان زمین شناسی تغییر می‌کند. این تغییرات شامل عمق تدفین، میزان فشردگی و قابلیت هدایت حرارتی است. در حقیقت مش‌ها واحد شبیه سازی عددی است. هر ردیف خانه، یک سازند یا لایه را توصیف می‌کند که در یک دوره زمانی نهشته شده است (شکل ۲).

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، مقطع زمین شناسی یک میدان نفتی در فروافتادگی دزفول مورد مطالعه قرار گرفته است. فروافتادگی دزفول بخشی از

مطالعه انجام شده است. در این مرحله داده‌های گرادیان حرارتی وارد محاسبات شده است.

پس از فرایند نفت‌زایی، فرایند مهاجرت و تجمع نفت بازسازی شده است. مرحله مهاجرت هیدروکربن، با استفاده از تاریخچه حرارتی و پختگی به دست می‌آید و در انتها، نتایج مختلف به دست آمده، تلفیق و در قالب مدل ارائه شده است.

فرایند نفت‌زایی شامل چندین واکنش موازی و مستقل است. برای هر واکنش، نرخ نفت زایی متناسب با ثابت (K) است که با افزایش دما، مقدار آن بیشتر می‌شود. شبیه سازی فرایند نفت زایی با استفاده از رابطه آرنیوس صورت می‌گیرد (۱):

$$(K(T)=A \exp -(E/ RT) \quad (1)$$

A فاکتور فراوانی یا ضریب آرنیوس است. E انرژی فعال سازی، R ثابت گازها و T دمای بر حسب درجه کلون است. فرایند نفت زایی در دمای متغیری رخ می‌دهد و مقدار K همراه با دما تغییر می‌کند.

برای محاسبه میزان پختگی یک لایه، دما و مدت زمانی که یک لایه در دماهای مختلف قرار گرفته است در محاسبات وارد می‌شود. در این مطالعه از فرمول زیر در نرم افزار مدل‌سازی استفاده شده که در حقیقت روش تغییر یافته شاخص زمان - دما است و معادل انعکاس ویتترینیت است (Falvey & Middleton 1981).

Ro مقدار انعکاس ویتترینیت به درصد

$$\gamma = 5/635$$

$$a = 2/7 * 10 - 6$$

τ زمان به میلیون سال از رسوب گذاری

$$\alpha = 0/0068 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

T درجه حرارت به درجه سانتی‌گراد

Co درجه پختگی اولیه مواد آلی که معمولاً ۰/۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مقادیر ثابت جهت تطابق بهتر مقادیر محاسبه شده با واقعیت استفاده می‌شود.

تشکیل نفت با چندین واکنش درجه اول موازی، بر اساس قانون

آرنیوس تشریح می‌شود:

$$dx_n/dt = A_n \exp^{(-E_n/RT)} x_n$$

x_n پتانسیل نفتی باقیمانده نسبت به واکنش (mg/g org.C)

A_n ثابت آرنیوس (s⁻¹)

E_n انرژی فعال سازی واکنش n

$$\text{cal/mol.K} \cdot 2R$$

T دما (K)

t زمان

مقدار کمی نفت توسط فرمول زیر حساب میشود:

$$(q = \phi n (x_{n0} - x_n)$$

بازسازی شده است. پس از بازسازی، مقطع در نرم افزار مدل سازی وارد شده و پس از مش بندی به سلول‌های مختلف تقسیم شده است.

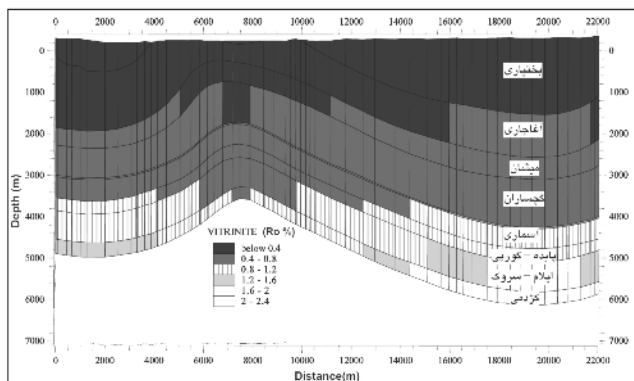
اولین قدم برای شبیه سازی دو بعدی، تعریف مش و تقسیم بندی مقطع به سلول‌های مختلف است. معمولاً سلول‌ها از بالا و پائین محدود به مرز لایه‌ها می‌شوند. لایه‌ها را می‌توان به چند لایه کوچکتر تقسیم کرد که با این کار تعداد سلول‌ها افزایش یافته و ابعاد سلول‌ها کاهش می‌یابد و زمان انجام محاسبات، افزایش قابل توجهی می‌یابد. شکل هندسی لایه‌ها و مش بندی مقطع مورد مطالعه، ابعاد سلول‌ها را تعیین می‌کند. در نرم افزار Temis2D، شکل هندسی مقطع زمین شناسی، براساس داده‌های ورودی ویرایش می‌شود. مقطع بازسازی و مشخصات چینه شناسی و سنگ شناسی لایه‌ها وارد می‌شود. با وارد کردن این داده‌ها، تغییرات شکل هندسی لایه‌ها در طی زمان زمین شناسی، شبیه سازی و نمایش داده می‌شود.

شبیه سازی در نرم افزار Temis2D، از زمان رسوب گذاری در حوضه رسوبی شروع می‌شود. اطلاعات ورودی به نرم افزار در قالب سلول‌ها وارد می‌گردد. بر اساس اطلاعات وارد شده برای هر سلول، محاسبات انجام شده و سپس سلول‌ها به ترتیب زمان زمین شناسی به مقطع اضافه شده و در محاسبات لحاظ می‌شود. با رسوب گذاری یک لایه، ردیف‌های جدید بر روی ردیف‌های قبلی اضافه می‌شود. اطلاعات وارد شده برای سلول‌ها، شامل حوادث زمین شناسی در طول زمان است. از جمله حوادث زمین‌شناسی، رسوب گذاری لایه جدید با سنگ شناسی خاص و همچنین حوادثی مانند فرسایش و حذف شدن یک لایه یا وقوع وقفه رسوب گذاری است. این داده‌ها را می‌توان در قالب اعداد در مقطع مورد مطالعه وارد کرد. سن‌های زمین‌شناسی مورد استفاده در این مطالعه از گزارش کوپ و اربل بدست آمده است (Koop & Orbell 1977). داده‌های شیب زمین گرمایی، از نقشه شیب زمین گرمایی زاگرس (Orbell 1977) و عمق پی سنگ، از نقشه عمق پی سنگ زاگرس (Koop 1977) بدست آمده است.

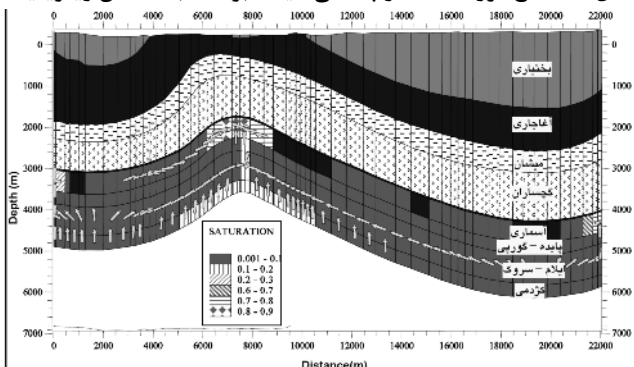
در نرم افزار مدل سازی، ابتدا داده‌های مربوط به وضعیت مقطع در زمان حال وارد شده، سپس وضعیت گذشته مقطع در طول زمان زمین شناسی، شبیه سازی شده است. نرم افزار، برای انجام محاسبات، شکل گیری حوضه رسوبی را بازسازی کرده، برای این کار، لایه‌ها یکی یکی برداشته می‌شود و تغییرات رسوب گذاری و چینه شناسی به دست می‌آید. در این مرحله تغییراتی مانند فشردگی لایه‌ها بر اثر وزن طبقات بالایی و شکل گیری گسل‌ها، در نرم افزار شبیه سازی می‌شود. در مرحله بعد، فشار هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک و جریان آب در لایه‌ها شبیه سازی شده است. کلیه محاسبات، در طول زمان زمین‌شناسی صورت گرفته سپس تاریخچه حرارتی و پختگی سنگ منشاء، بازسازی شده و محاسبه میزان جریان حرارت در مقطع مورد

هیدروکربن افزایش یافته و موجب افزایش نیروی رانش هیدروکربن به سمت بالا شده است. شکافها و ترک‌هایی که حاصل چین خوردگی و خمش لایه‌ها در خط راس تاقدیس است، مسیرهایی برای مهاجرت عمودی هیدروکربن فراهم نموده است. این شکافها و ترکها همراه با افزایش نیروی رانش در بالاترین نقطه تاقدیس، مهاجرت عمودی از میان سازندهای پایده و گورپی را امکان پذیر ساخته است. هیدروکربن پس از عبور از سازندهای پایده و گورپی وارد سازند کربناته آسماری شده است. در یال‌ها، عدم وجود اشباع شدگی بالا و وجود ترکها و شکافهای کمتر نسبت به قسمت بالایی تاقدیس امکان کمتری را برای مهاجرت هیدروکربن درون سازندهای پایده و گورپی فراهم کرده است. در بالاترین جای سازند آسماری، در زیر سازند گچساران هیدروکربن تجمع یافته است. بر روی سازند آسماری، سازند گچساران واقع شده این سازند از انیدریت، ژپس و لایه های نمک تشکیل شده و خاصیت پلاستیکی قابل توجهی نسبت به دیگر سازندها دارد. شکافها و گسل‌های موجود در سازند گچساران، بر اثر خواص پلاستیکی عموماً غیر تراوا هستند. تراوایی بسیار کم موجب شده هیدروکربن به سختی از آن عبور می‌کند. بنابراین هیدروکربن در زیر سازند گچساران و درون سازند آسماری تجمع پیدا کرده است.

در یال سمت چپ تاقدیس (شکل ۴) علاوه بر مسیر مهاجرت درون سازندهای ایلام و سروک، مسیر مهاجرت دیگری نیز درون سازند



شکل ۳: مقطع مورد مطالعه و پختگی لایه‌ها بر حسب انعکاس ویتترینیت



شکل ۴: مسیر های مهاجرت و میزان اشباع شدگی از هیدروکربن در مقطع مورد مطالعه.

q مقدار نفت تولید شده است (mg/g org.C).

x_{no} پتانسیل نفتی اولیه نسبت به واکنش n (mg/g org.C)

x_n پتانسیل نفتی باقیمانده نسبت به واکنش n (mg/g org.C)

بحث

مدل بدست آمده در این مطالعه، دمای لایه‌ها را برحسب درجه سانتیگراد نشان می‌دهد (شکل ۲). همان گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، دمای سازند کژدمی در قسمتهای مختلف متفاوت است، به طوری که در خط راس تاقدیس، در دمای ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد قرار دارد و به سمت اطراف این دما در محدوده ۱۸۰ تا ۲۱۰ درجه سانتیگراد است. این تغییرات دما تاثیر زیادی در فرایند نفت زایی می‌گذارد. عمده فرایند نفت زایی، در دمای بالای ۷۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد.

میزان پختگی سازندها، برحسب انعکاس ویتترینیت، در شکل (۳) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، پختگی سازندها با افزایش عمق در ناودیس‌ها افزایش یافته است. سازند کژدمی در خط راس تاقدیس دارای پختگی ۰/۴ تا ۰/۸ انعکاس ویتترینیت است، که ابتدای زون زایش نفت را نشان می‌دهد. در حالی که به سمت ناودیس‌ها، میزان پختگی در حد ۲ تا ۲/۴ انعکاس ویتترینیت است که پنجره نفت زایی و گاز زایی را طی کرده است.

میزان اشباع شدگی سازندها از هیدروکربن در شکل ۴ نشان داده شده که نسبت حجم هیدروکربن به فضای تخلخل سنگ است (شکل ۴). این پارامتر، پراکندگی و محل‌های تجمع هیدروکربن را در مقطع نشان می‌دهد.

در شکل (۴) مسیرهای مهاجرت هیدروکربن از سنگ منشأ تا تجمع در سنگ مخزن مشخص شده است. مسیر مهاجرت براساس اشباع‌شدگی هیدروکربن محاسبه می‌شود و از قانون دارسی پیروی می‌کند. همان گونه که دیده می‌شود، هیدروکربن پس از تولید از سازند کژدمی به علت سبکتر بودن نسبت به سیالات درون سنگ منشأ که عمدتاً آب است، وارد سازندهای سروک و ایلام شده و به صورت مورب با مؤلفه‌های افقی و عمودی مهاجرت کرده است. هیدروکربن در سازندهای ایلام و سروک، به سمت خط راس تاقدیس، که نسبت به سطح دریا در بالاترین قسمت قرار دارد، مهاجرت کرده است. سازندهای ایلام و سروک، کربناته هستند و دارای تراوایی بیشتری نسبت به سازندهای شیلی و مارنی پایده و گورپی است. این وضعیت موجب شده هیدروکربن در یال‌ها وارد سازند پایده و گورپی نشده و به صورت جانبی، درون سازندهای ایلام و سروک به سمت خط راس تاقدیس حرکت کند. اما بالاترین نقطه تاقدیس وضعیت متفاوتی با یال‌ها دارد و در سازندهای ایلام و سروک میزان اشباع شدگی

تاقدیس حفاری می‌شود و عمده داده‌های در دسترس از این قسمت تاقدیس است. از آنجا که نمونه‌های قسمت‌های عمیق تاقدیس‌ها در دسترس نیست، مدل سازی دو بعدی حوضه، ابزار مفیدی جهت بررسی این قسمت‌ها است.

مسیر مهاجرت هیدروکربن و میزان اشباع شدگی از هیدروکربن، نشان دهنده چگونگی تشکیل و محل منابع هیدروکربنی است. مسیر مهاجرت، یکی از عناصر سیستم هیدروکربنی است که موجب تشکیل ذخیره هیدروکربنی شده و در عملیات اکتشافی منابع هیدروکربنی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه نشان می‌دهد با داشتن اطلاعات کافی و صحیح و با استفاده از نرم افزار مدل‌سازی حوضه در دو بعد، بسیاری از اطلاعات مهم نظیر مسیر مهاجرت و محل انباشت اقتصادی نفت و گاز را می‌توان مشخص کرد. مسلماً این نوع مطالعه ریسک حفاری چاه‌های نفت و گاز را به مقدار زیاد کاهش می‌دهد.

آساماری دیده می‌شود، که از محور خمش ناودیس منشأ گرفته است. در محور خمش ناودیس، بر اثر شدت تغییر شکل‌های اعمال شده بر اثر چین خوردگی، شکاف‌های عمودی بوجود آمده است که امکان مهاجرت عمودی از سازند کژدمی به سازند آساماری را فراهم نموده است. هیدروکربن پس از عبور از سازند پابده و گورپی، از درون سازند آساماری به سمت خط راس تاقدیس حرکت کرده است.

نتیجه گیری

در این مطالعه تغییرات دما، میزان پختگی مواد آلی، میزان اشباع شدگی و مسیرهای مهاجرت در یکی از تاقدیس‌های فروافتادگی دزفول به دست آمده است.

نتایج به دست آمده در این بررسی نشان می‌دهد میزان دما و پختگی مواد آلی در قسمت‌های مختلف یک تاقدیس تغییرات زیادی دارد. چاه‌های نفت و گاز عمدتاً در قسمت‌های بالایی و نزدیک به خط راس

منابع:

مطیعی ه. ۱۳۷۲: زمین‌شناسی ایران، زمین‌شناسی نفت زاگرس، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- Ala M.A., Kinghorn R.R.F., Rahman M. 1980 Organic geochemistry and source rock characteristics of the Zagros petroleum province, Southwest Iran. *J. Pet. Geol.* **3**: 61-89.
- Alavi M., 2007: Structures of the zagros fold-thrust belt in Iran. *Ame. Jou. of Sci.* **307**: 1064-1095
- Allen P.A., Allen J.R. 2005: Basin analysis, principles and applications. (2nd edition) New Jersey Wiley-Blackwell, 500 p.
- Bordenave M.L. 2008: The origin of the Permo-Triassic gas accumulations in the Iranian Zagros foldbelt and contiguous offshore areas: a review of the Palaeozoic petroleum system. *J. Pet. Geol.* **31**: 3-42.
- Bordenave M.L., 2002: Gas Prospective Areas in the Zagros Domain of Iran and in the Gulf Iranian Waters. AAPG Annual Meeting, March 10-12, 2002, Houston, Texas.
- Bordenave M.L., Hegre J.A. 2005: The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros foldbelt, Iran. *J. Pet. Geol.* **28**: 339-368.
- Bordenave M.L., Huc A.Y., 1995: The Cretaceous source rocks in the Zagros Foothills of Iran: an example of a large size intracratonic basin. *Rev. Inst. Fr. Petr.* **50**: 727-753.
- Bordenave M.L., Burwood R., 1990: Source rock distribution and maturation in the Zagros oeganic belt: Province of Asmari and Bangestan reservoir oil accumulation. *Org. Geochem.* **16**: 369-387.
- Falvey D.A., Middleton M.F. 1981: Passive Continental Margins: Evidence for a Prebreakup Deep Crustal Metamorphic Subsidence Mechanism. *Oceanologica ACTA*, 103-114.
- Frederic S. 2003: Modeling multiphase flow of petroleum at the sedimentary basin scale. *J. Geochemical Exploration*, **78-79**: 693-696.
- Higley D.K., Lewan M., Roberts L. N.R., Henry M.E. 2006: Petroleum System Modeling Capabilities for Use in Oil and Gas Resource Assessments. Open-File Report 2006-1024, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (<http://pubs.usgs.gov/of/2006/1024/>)
- Higley D.K., Pantea M.P., Slatt R.M. 1997: 3-D reservoir characterization of the House Creek oil field, Powder River Basin, Wyoming. V 1.00: U.S. Geological Survey Digital Data Series 33, (<http://pubs.usgs.gov/dds/dds-033/USGS-3D/homepage.htm>).
- Koop W.J., 1977: Basement depth map. Oil Service Company of Iran, Drawing No. 32661.
- Koop W.J., Orbell, (1977) Regional chronostratigraphic thickness and facies distribution maps of SW Iran Area (Permian and younger) Oil Service Company of Iran Geological Report No. 1269 (Unpub).
- Magoon L.B., Dow W.G. 1994: The petroleum system, in Magoon, L.B., Dow, W.G., eds., *The Petroleum System – From Source to Trap*. *AAPG Memoir.* **60**: 3-23.
- Makhous M., Galushkin Yu. I. 2005: Basin analysis and modeling of the burial, thermal and maturation histories, Editions Technip, PP. 394.
- Orbell G., 1977: Geothermal gradient map. Oil Service Company of Iran, Drawing No. 327091.
- Pitman J. K., Steinshouer D. W., Lewan M.D. 2003: Generation and migration of petroleum in Iraq: a 2 1/2-D and 3-D modeling study of Jurassic source rocks. U.S. Geological Survey Open-File Report 03-192, 17p. (<http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-192/>)

- 192).
- Rabbani A.R., Kamali M.R. 2005: Source rock evaluation and petroleum geochemistry, offshore SW Iran. *J. Pet. Geol.* **28**: 413-425.
- Rudkiewicz J.L., Sherkati S., Letouzey J. 2007: Evolution of Maturity in Northern Fars and in the Izeh Zone (Iranian Zagros) and Link with Hydrocarbon Prospectivity. In: O. Lacombe, J. Lavé, F. Roure, J. Verges, (eds.), Thrust Belts and Foreland Basins, From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems. Springer, 1-17.
- Ungerer P., Burrus J., Doligez B., Chenet P. Y., Bessis F. 1990: Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration. *AAPG Bull.* **74**: 309-335.
- Versfelt J.P.L., 2001: Major hydrocarbon potential in Iran. In Downey M.W., Threet J.C., Morgan W.A., (eds.), Petroleum Provinces of the Twenty First Century. *AAPG Memoir.* **74**: 417-427.
- Zamanzadeh S.M., Amini A., Kamali M.R. 2009: Burial History Reconstruction Using Late Diagenetic Products In The Early Permian Siliciclastics Of The Faraghan Formation, Southern Zagros, Iran. *J. Pet. Geol.* **32**: 171-192.