

مدل سازی بلوغ حرارتی در میدان نفتی رگ سفید، جنوب غرب ایران

بهرام علیزاده*، محدثه جانباز

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

*مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: alizadeh@scu.ac.ir

(دریافت: ۸۸/۷/۱۵؛ پذیرش: ۸۹/۲/۲۹)

چکیده

در این مطالعه بلوغ حرارتی سازندهای پابده، گورپی و کژدمی در چاه های شماره ۱۱۲، ۲، ۳۳، ۹۹ و ۱۸ میدان نفتی رگ سفید واقع در فروافتادگی دزفول جنوبی با داده های راک ایول و انعکاس ویتترینایت مدل سازی شده است. بهینه سازی مدل با داده های Tmax و Ro٪ نشان داد که چاه شماره ۱۱۲ به علت قرار گرفتن بر گسل ایذه - هندیجان و چاه شماره ۹۹ به دلیل قرار گرفتن بر روی paleo high دارای شیب زمین گرمایی بالایی هستند (به ترتیب 31°C/km و 26°C/km که معادل جریان حرارتی 83 mW/m2 و ۷۰ است). در بقیه چاه های مطالعاتی مقدار شیب زمین گرمایی، نرمال (میانگین 23°C/km و میانگین جریان حرارتی 263 mW/m2) می باشد. داده های TOC حاصل از آنالیز راک ایول حاکی از پتانسیل بالای نفت زایی دو سازند پابده و گورپی در میدان رگ سفید است، از طرف دیگر مدل سازی بلوغ به روش Easy %Ro نشان داد که علیرغم فراوانی مواد آلی در این دو سازند درجه بلوغ آنها به پنجره نفتی نرسیده است. اما سازند گدوان ۶ میلیون سال قبل و سازند کژدمی در حدود ۵ میلیون سال قبل به نفت زایی رسیده اند. این در حالیکه سازند کژدمی عمدتاً در فروافتادگی دزفول ۸-۱۰ میلیون سال پیش به نفت زایی رسیده است. تأخیر در نفت زایی این سازند نسبت به کل فروافتادگی دزفول می تواند به دلیل نرخ پایین فرونشست در این میدان باشد. نتایج حاصل از مدل سازی نشان می دهد که بلوغ سازند کژدمی در آغاز پنجره نفتی است. هر چند به علت شیب زمین گرمایی بالا در شمال کوهانک شمال غربی (به واسطه وجود گسل ایذه - هندیجان) و نیز میانه کوهانک جنوب شرقی (به دلیل وجود paleo high) انتظار می رود بلوغ کژدمی به اواخر پنجره نفتی رسیده باشد. با توجه به سن نفت تولیدی در میدان رگ سفید (۵ میلیون سال پیش)، سن سازند

واژه های کلیدی: مدل سازی بلوغ حرارتی، سنگ منشأ، انعکاس ویتترینایت، Tmax، میدان نفتی رگ سفید

۱) مقدمه

FAMM برای ارزیابی بلوغ حرارتی شمال شرقی حوضه Malay در ویتنام استفاده کردند. روند بلوغ تعیین شده برای سنگ منشأ نفت نشان داد که رأس پنجره نفتی در عمق حدود ۲۸۰۰ متری قرار گرفته است. تاریخچه دمایی مدل شده نشان دهنده آغاز تولید هیدروکربن از ۲ میلیون سال قبل تاکنون است که پس از تشکیل نفت گیر می باشد (Petersen et al. 2009). کمالی و همکاران در سال ۲۰۰۶ ژئوشیمی نفت و مدل سازی حرارتی سازند پابده در فروافتادگی دزفول را بررسی نمودند. نتایج مدل سازی حرارتی نشان داد که سازند پابده به سمت جنوب فروافتادگی در ابتدای بلوغ و در شمال غربی فروافتادگی دزفول در مرحله پیک پنجره نفتی است (Kamali et al. 2006). علیزاده و همکاران در سال ۱۳۸۵ پتانسیل هیدروکربورزایی و بلوغ مواد آلی در سنگ های منشأ احتمالی در میدان نفتی مارون را با استفاده از دستگاه پیرولیز راک ایول ۶ ارزیابی نمودند. نتایج بررسی آن ها نشان داد که سازندهای پابده و کژدمی می توانند به عنوان دو سازند مهم تولید هیدروکربن در این میدان ایفای نقش کنند. ضمناً داده های

روش های متعارف برای ارزیابی نوع ماده آلی، غنای ماده آلی و بلوغ حرارتی سنگ های منشأ مستعد به نمونه نیاز دارد، اما حتی در مناطق اکتشافی نیز نمونه های زیرسطحی بسیار محدود هستند. علاوه بر این، این اطلاعات مرحله کنونی تاریخچه حرارتی سنگ ها را که حاصل فرایندهای طولانی مدت و پیچیده است، نشان می دهد (Bordenave 1993). آگاهی از زمان گذشته برای بازسازی وقایع حرارتی و زمین شناسی اهمیت بسزائی در اکتشاف دارد (Barker 1996). این اطلاعات را می توان با مدل سازی تاریخچه زمان - حرارت سنگ منشأ به دست آورد (Hunt 1996). مهم ترین هدف مدل سازی تولید نفت و گاز تعمیم دادهای بلوغ موجود حاصل از چاه ها به همه حوضه با استفاده از اطلاعات زمین شناسی و نیز بازسازی پیشرفت بلوغ در طی زمان براساس فرمول های ریاضی است (Bordenave, 1993).

پترسن و همکاران در سال ۲۰۰۹ از ضریب انعکاس ویتترینایت و آنالیزهای (Fluorescence Alteration of Multiple Macerals))

۳) چینه شناسی

سازندهای رسوبی حفاری شده در میدان رگ سفید مربوط به دو سیستم سنوزوئیک و مزوزوئیک هستند. در سیستم سنوزوئیک این میدان سازندهای آگاجاری، میشان، گچساران (گروه فارس)، آسماری، پابده رسوبگذاری شده است (ظهراپ زاده ۱۳۸۵). ضخامت سازند گورپی از شمال و جنوب شرق به سمت قسمت میانی میدان به صفر کاهش می یابد. نبود یا کاهش شدید ضخامت این سازند در محدوده میدان رگ سفید مربوط به فرایندهای بالآمدگی است (چلداوی ۱۳۸۵). در سیستم مزوزوئیک سازندهای مربوط به گروه خامی و بنگستان دیده می شود. گروه بنگستان در میدان رگ سفید شامل سازندهای سروک و کژدمی است و سازند ایلام رسوبگذاری نشده است. در این میدان فقط تا قسمت تحتانی سازند فهلیان (خامی فوقانی، شامل داریان، گدوان و فهلیان) حفاری شده است، اما با توجه به اطلاعات منطقه احتمالاً خامی تحتانی میدان رگ سفید از سازندهای گرو و سورمه تشکیل شده و سازند هیث در این منطقه رسوبگذاری نشده است (شهابی و علوی ۱۳۶۵).

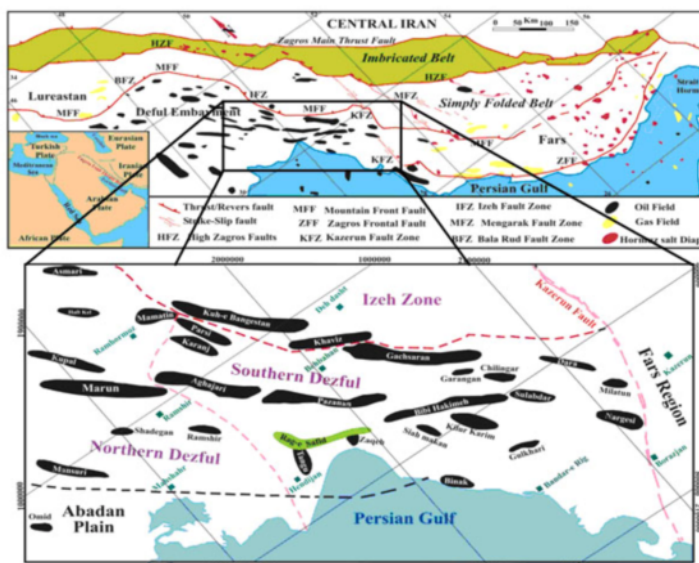
۴) روش مطالعه

برای ارزیابی بلوغ حرارتی و بازسازی تاریخچه تدفین و حرارتی میدان نفتی رگ سفید، نمونه سازندهای پابده، گورپی و کژدمی به عنوان سنگ های منشأ احتمالی در این میدان مورد آنالیز راک ایول قرار گرفته و سپس تعدادی از آن ها برای تهیه مقاطع صیقلی جهت اندازه گیری انعکاس و پترینایت انتخاب شدند. نتایج حاصل از این آنالیزها همراه با داده های چینه شناسی و سنگ شناسی سازندهای حفاری

Tmax کژدمی این سازند را به عنوان سنگ منشأ اصلی میدان مارون معرفی می نماید. بیجاری پور و همکاران در سال ۱۳۸۴ از نرم افزار Winbury برای بازسازی تاریخچه تدفین و مدل سازی حرارتی سنگ منشأ گدوان در ناحیه فارس استفاده نمودند. نتایج نشان داد که سازند گدوان به نفت زایی نرسیده است که با توجه به منحنی های تاریخچه تدفین و حرارتی، به دلیل عمق تدفین کم و پایین بودن گرادیان زمین گرمایی منطقه مورد مطالعه است. زینل زاده و همکاران در سال ۱۳۸۳ از مدل سازی تاریخچه تدفین و حرارتی برای بررسی تأثیرات نهشته شدن رسوبات الیگوسن و جوانتر بر روی سنگ منشأ کژدمی در سیستم نفتی حاشیه شمال شرق فروافتادگی دزفول استفاده نمودند. از آنجا که میدان نفتی رگ سفید میدانی شدیداً تکتونیزه است، مدل سازی بلوغ حرارتی در این میدان می تواند با تخمین مقدار شیب زمین گرمایی در پیشبرد اهداف حفاری موثر باشد. علاوه بر این مدل سازی حرارتی و داده های ژئوشیمیایی میدان رگ سفید و میادین مجاور به شناسایی مکانیزم های مهاجرت و تولید احتمالی هیدروکربن کمک می کند.

۲) زمین شناسی منطقه

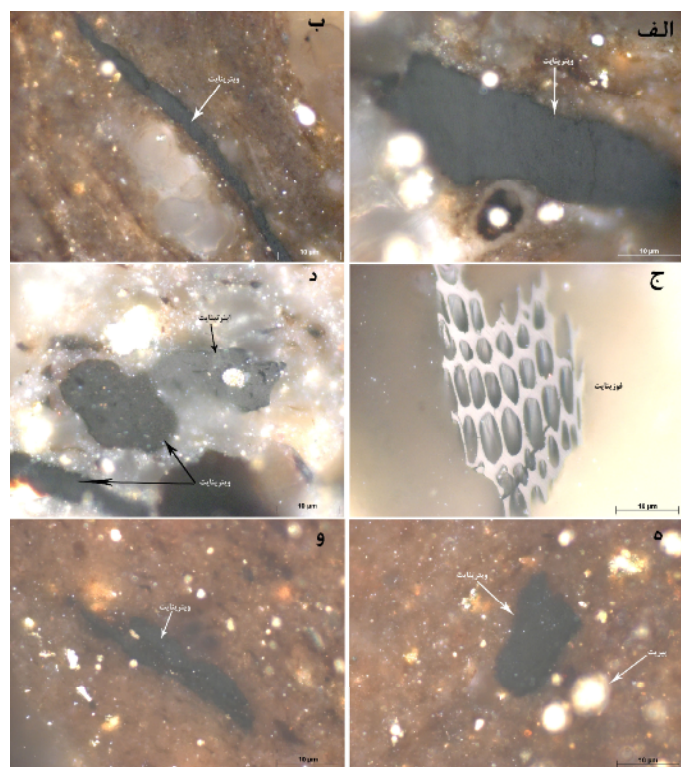
میدان نفتی رگ سفید واقع در فروافتادگی دزفول جنوبی، تاقدیسی بومرنگ شکل به طول ۴۹ Km و پهنای ۷-۵/۴ Km است که در ۱۵۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز و منتهی الیه شمال ساحل خلیج فارس، به عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۰' - ۳۰° ۱۰' شمالی و طول ۵۰° ۲۵' - ۴۹° ۴۰' شرقی در بین میادین نفتی بی بی حکیمه (در جنوب شرق)، پازنان (در شمال شرق)، رامشیر (در شمال غرب)، زاغه، هنديجان، بهرگانسر و تنگو (در جنوب غرب) قرار گرفته است (ظهراپ زاده، ۱۳۸۵). موقعیت میدان رگ سفید در حوضه زاگرس در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت و جایگاه میدان نفتی رگ سفید در حوضه رسوبی زاگرس (اقتباس از Sepehr & Cosgrove 2004).

همراه رابط نرم افزاری MSP 200 انجام شده است. برای کالیبره کردن دستگاه از استانداردهائی که انعکاس آنها بین ۰/۴۳۱-۰/۳۵ درصد می باشد، استفاده شد. عدسی با بزرگنمایی $\times 100$ که در روغن امرسیون غوطه ور می شود برای شناسایی ماده آلی استفاده شد. سه نمونه از ۳۴ نمونه به علت اینکه بسیار دانه ریز بوده اند، مقاطع صیقلی خوبی از آن ها تهیه نشده و اندازه گیری انعکاس بر روی آن ها صورت نپذیرفت. تصاویر دیجیتال با استفاده از Zeiss Axiocam و نرم افزار Axiovision گرفته شد. نتایج این بررسی در جدول (۱) و میکروفوتوگراف برخی از مقاطع در شکل (۳) آورده شده است.

۳-۴) مدل سازی: در این مطالعه از نرم افزار PBM نسخه ۱.۷.۰ ساخت پژوهشگاه صنعت نفت برای مدل سازی استفاده شده است. مدل سازی در دو بخش مدل سازی تاریخچه تدفین و تاریخچه حرارتی صورت گرفته است. انعکاس ویتترینایت و Tmax حاصل از پیرولیز راک ایول برای بهینه سازی مدل استفاده شده است. شماتیک مدل سازی بلوغ حرارتی همراه با داده های ورودی برای آن در شکل (۴) آورده شده است.



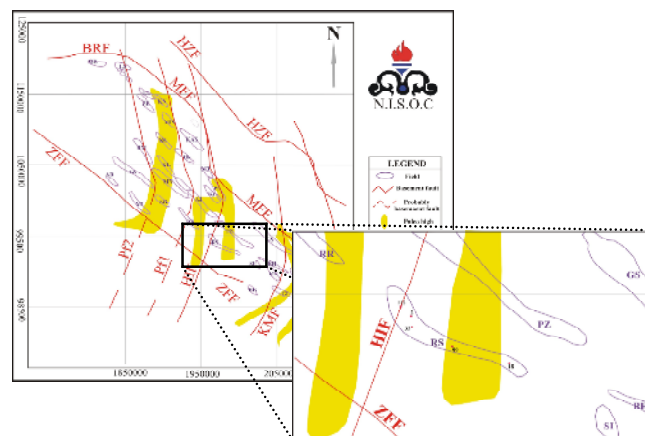
شکل ۳- میکروفوتوگراف مقاطع صیقلی مطالعه شده: (الف و ب) چاه شماره ۲، سازند کژدمی، عمق ۳۴۱۰ متری؛ ج و د) چاه شماره ۳۳، سازند کژدمی، عمق ۲۹۸۰ متری؛ هـ، و) چاه شماره ۱۸، سازند پابده، عمق ۲۷۹۵ متری.

۵) بحث و بررسی

در این بخش ابتدا پتانسیل تولید و سپس مدل سازی بلوغ حرارتی در

شده و نیز داده های حرارتی مانند شیب زمین گرمایی برای بازسازی تاریخچه تدفین و حرارتی در میدان رگ سفید به نرم افزار (PBM Pars Basin Modeler) وارد شده اند.

۱-۴) آنالیز راک ایول: چاه های شماره ۲، ۱۸، ۳۳، ۹۹، ۱۱۲ در میدان نفتی رگ سفید (شکل ۲) برای مطالعه انتخاب شدند. چاه های شماره ۲ و ۳۳ جهت دستیابی به مخزن خامی حفاری شده اند که چاه شماره ۲ به عنوان چاه شاهد انتخاب و از سازندهای احتمالی سنگ منشأ (پابده و کژدمی) با فاصله ۲۰-۱۸ متر و از سازند کژدمی در چاه شماره ۳۳ نیز با همین فاصله و با فواصل ۵۰ متری از سازندهای پابده و گورپی چاه شماره ۱۸ و در چاه های شماره ۹۹ و ۱۱۲ نیز به علت عدم رسوبگذاری گورپی تنها از سازند پابده نمونه برداری صورت گرفته است. در مجموع ۴۵ نمونه برای آنالیز راک ایول انتخاب شدند. آنالیز نمونه ها با دستگاه Rock Eval 6 که برای مطالعات کمی و کیفی ماده آلی ساخته شده، انجام شده است. نتایج این آنالیز در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۲- گسل ها و Paleo high در زاگرس و موقعیت چاه های مطالعاتی میدان رگ سفید (گزارش پ-۶۰۰۸، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب)

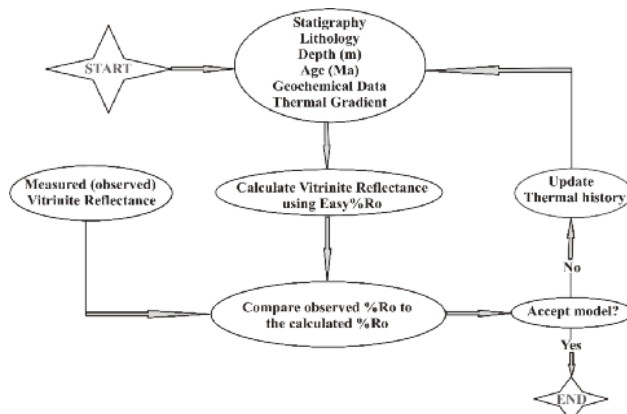
۲-۴) انعکاس ویتترینایت: ۳۴ نمونه خرده حفاری از بین ۵۰ آنالیز راک ایول با توجه به مقدار TOC از سازندهای پابده، گورپی و کژدمی میدان رگ سفید برای تهیه مقاطع صیقلی انتخاب شده اند. خرده های حفاری در قالب های تفلون با قطر ۲/۵ سانتی متر قرار داده شده و سپس مخلوط اپاکسی-رزین روی آن ریخته می شود. قرص ها پس از سرد شدن، با استفاده از کاربراندوم ساییده شده و پس از آن روی یک پارچه ابریشمی با محلول آبکی الکل-آلومینا با قطر به ترتیب ۰/۳ و ۰/۵ میکرومتر صیقل داده می شوند. پتروگرافی آلی با طیف نور به طول موج ۵۴۶ nm و سیستم میکروسکوپی Zeiss Axioplan II مجهز به فتومتر J&M، همچنین یک اسپکترومتر (۱۰۰۰-۲۰۰ نانومتری) به

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز راک ایول و اندازه گیری انعکاس ویتیرینایت در سازندهای پابده، گورپی و کژدمی میدان نفتی رگ سفید. در این جدول عمق بر حسب متر؛ S_1 و S_2 بر حسب mg HC/gr rock ؛ S_3 بر حسب $\text{mg CO}_2/\text{gr rock}$ ؛ HI بر حسب mg HC/gr TOC ؛ OI بر حسب mg HC/gr CO_2 ؛ TOC بر حسب $\text{Wt.}\%$ و $T_{\max}$ بر حسب درجه سانتیگراد و $\%Ro$ درصد انعکاس میانگین ویتیرینایت در روغن امرسیون است (در ستون انعکاس ویتیرینایت خط تیره نمایانگر عدم تهیه مقطع صیقلی از آن عمق به دلیل فقیر بودن نمونه از ماده آلی است).

Well	Formation	Depth	S_1	S_2	HI	OI	TOC	PI	$T_{\max}$	$\%Ro$
۲	پابده	۲۳۶۰/۵	۱/۱۷	۶/۰۷	۴۱۶	۱۴۲	۱/۴۶	۰/۱۶	۴۳۱	۰/۴۹۷۲
		۲۲۸۹	۱/۷۶	۱۵/۹۶	۴۹۴	۷۸	۳/۲۳	۰/۱	۴۳۱	فاقد ویتیرینایت
		۲۴۲۷	۱/۲۲	۵/۱۴	۳۶۲	۱۵۷	۱/۴۲	۰/۱۹	۴۳۱	۰/۵۳۳۹
	کژدمی	۲۴۴۶	۱/۴۴	۱۰/۷۵	۴۸۶	۹۶	۲/۲۱	۰/۱۲	۴۲۹	۰/۵۴۶۸
		۲۴۶۱	۱/۳۳	۵/۷	۳۳۵	۱۲۸	۱/۷	۰/۱۹	۴۲۲	۰/۵۵۸۹
		۲۴۸۲	۱/۵۴	۴/۸۸	۳۷۸	۱۸۱	۱/۲۹	۰/۲۴	۴۲۶	۰/۵۵۲۹
		۲۵۰۰	۱/۳۹	۵/۳۵	۳۲۸	۱۲۴	۱/۶۳	۰/۲۱	۴۲۸	-
		۲۵۱۹	۱/۱۸	۲/۳۲	۳۵۷	۳۶۹	۰/۶۵	۰/۳۴	۴۲۸	-
		۲۵۵۵	۱/۵۵	۶/۵۸	۳۷۴	۱۴۹	۱/۷۶	۰/۱۹	۴۳۲	۰/۵۲۱۶
		۳۳۷۲	۰/۷۸	۳/۴۶	۳۷۰	۱۴۵	۰/۹۴	۰/۱۸	۴۳۲	۰/۶۳۶۴
		۳۳۹۲	۱/۴	۱۳/۳۹	۳۸۵	۵۱	۳/۴۸	۰/۰۹	۴۳۴	۰/۶۴۲
		۳۴۱۰	۱/۴۲	۱۴/۶۱	۴۶۲	۴۶	۳/۱۶	۰/۰۹	۴۳۱	۰/۶۴۵۹
		۳۴۲۹	۱/۴	۹/۰۸	۳۷۵	۷۴	۲/۴۲	۰/۱۳	۴۲۷	۰/۶۶۹۶
		۳۴۴۵	۱/۷۶	۱۵/۴۹	۴۸۱	۴۹	۳/۲۲	۰/۱	۴۳۳	-
		۳۴۶۴	۱/۸۱	۱۶/۶۳	۴۷۹	۵۰	۳/۴۷	۰/۱	۴۲۶	۰/۶۸۰۷
		۳۵۰۲	۰/۴۷	۳/۵۲	۲۰۵	۸۷	۱/۷۲	۰/۱۲	۴۲۸	۰/۷۰۴۶
		۳۵۲۰	۰/۵۷	۳/۹۴	۲۲۸	۷۷	۱/۷۳	۰/۱۳	۴۲۸	-
۳۳	کژدمی	۳۵۳۷	۰/۷۲	۳/۴۵	۲۱۴	۸۱	۱/۶۱	۰/۱۷	۴۳۲	۰/۷۱۲۳
		۳۵۵۵	۰/۵۳	۲/۷۵	۱۷۴	۹۲	۱/۵۸	۰/۱۶	۴۳۲	-
		۳۵۷۳	۰/۴۷	۲/۴۸	۱۸۴	۷۲	۱/۳۵	۰/۱۶	۴۳۴	۰/۷۲۷۲
		۳۵۹۲	۰/۷۸	۴/۹۱	۲۵۶	۷۸	۱/۹۲	۰/۱۴	۴۳۱	-
		۳۶۱۰	۱/۱۱	۱۱/۳۸	۴۲۶	۴۴	۲/۶۷	۰/۰۹	۴۲۷	۰/۷۱
		۳۶۲۴	۱/۱۴	۱۵/۵۵	۴۷۸	۵۳	۳/۲۵	۰/۰۷	۴۳۳	۰/۷۴۲۹
	پابده	۲۸۵۶	۱/۶۴	۲۱/۱۵	۴۳۸	۳۷	۴/۸۳	۰/۰۷	۴۲۶	۰/۵۱۰۹
		۲۸۷۴	۱/۵۲	۱۴/۲۲	۴۲۲	۶۷	۳/۳۷	۰/۱	۴۲۵	۰/۵۰۰۲
		۲۸۹۲	۲/۲۴	۲۵/۳۹	۵۵۸	۷۴	۴/۵۶	۰/۰۸	۴۲۲	فاقد ویتیرینایت
		۲۹۲۴	۰/۹	۴/۳	۱۹۸	۸۹	۲/۱۷	۰/۱۷	۴۳۰	-
		۲۹۶۰	۱	۳/۲۷	۱۵۲	۱۱۸	۲/۱۵	۰/۲۳	۴۳۱	۰/۵۴۹۶
		۲۹۸۰	۰/۷۹	۲/۲۳	۱۷۲	۱۵۵	۱/۳	۰/۲۶	۴۲۸	۰/۵۶
		۳۰۰۲	۱/۱۶	۴/۴	۱۹۹	۱۱۵	۲/۲۱	۰/۲۱	۴۳۲	۰/۵۵۸۱
	گورپی	۳۰۱۸	۰/۹۲	۳/۱۹	۱۴۹	۹۵	۲/۱۴	۰/۲۲	۴۳۴	-
		۳۰۵۶	۱/۵۲	۱۵/۱۸	۴۹۰	۹۱	۳/۱	۰/۰۹	۴۲۷	فاقد ویتیرینایت
		۳۰۷۴	۱/۱۲	۱۵/۰۲	۵۱۸	۶۴	۲/۹	۰/۰۷	۴۳۱	۰/۵۸۰۵
۱۱۲	پابده	۲۳۴۶	۱۱/۲۴	۴/۸	۲۸۲	۳۷	۱/۷	۰/۷	۴۳۳	-
		۲۳۸۵	۳/۳۲	۲/۱۳	۴۳۵	۱۲۴	۰/۴۹	۰/۶۱	۴۳۱	-
	گورپی	۲۴۱۸	۱/۵۲	۱/۸۲	۴۱۱	۱۶۸	۰/۴۴	۰/۴۶	۴۳۶	۰/۶۶
		۲۷۴۴	۰/۹۶	۳/۹۷	۵۰۳	۱۶۳	۰/۷۹	۰/۱۹	۴۲۷	-
	پابده	۲۷۹۵	۲/۸۶	۲۹/۲۲	۵۹۳	۳۹	۴/۹۳	۰/۰۹	۴۱۸	۰/۴۶۹۴
		۲۸۲۲	۲/۹۶	۲۷/۹۴	۵۹۸	۳۷	۴/۶۷	۰/۱	۴۲۳	فاقد ویتیرینایت
	گورپی	۲۸۴۵	۱/۶۷	۱۴/۳۵	۵۵۲	۷۰	۲/۶	۰/۱	۴۱۹	۰/۵۰۲۲
		۲۹۴۲	۱/۱۷	۲/۰۲	۲۷۷	۳۳۶	۰/۷۳	۰/۳۷	۴۳۰	۰/۵۳۶۹
		۳۰۳۳	۰/۶	۱/۹۳	۲۴۴	۳۰۳	۰/۷۹	۰/۲۴	۴۳۳	۰/۵۷۷۹
		۳۲۹۶	۰/۶۱	۵/۶۷	۴۲۶	۲۱۶	۱/۳۳	۰/۱	۴۲۵	-
۹۹	پابده	۲۴۰۰	۰/۵۸	۶/۲۹	۵۳۳	۱۹۴	۱/۱۸	۰/۰۹	۴۲۶	۰/۵۰۴
		۲۴۵۰	۰/۲۸	۱/۵۴	۲۲۶	۳۲۸	۰/۶۸	۰/۱۵	۴۳۲	۰/۵۳۷۶

فاکتور، شیب را تغییر می دهد، اما پیچیدگی های زمین شناسی مانند فرسایش، گسل خوردگی، وجود توده های آذرین نیز آن را تحت تأثیر قرار می دهد (Hunt, 1996).

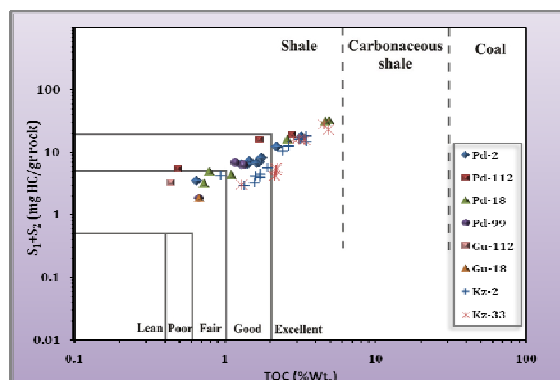
۵-۲-۱) بهینه سازی مدل چاه شماره ۲: شیب زمین گرمایی این چاه به صورت مستقیم اندازه گیری نشده و با توجه به شیب زمین گرمایی چاه شماره ۷۲ که در فاصله کمی در شمال شرقی آن قرار دارد، گرادیان 24°C/km (جریان حرارتی $18/65\text{ mW/m}^2$) برای این چاه در نظر گرفته شده است. شکل (۶الف) نشان می دهد که با اعمال این گرادیان و فرسایش سطحی معادل ۶۰ متر در سازند آغاچاری بین داده های اندازه گیری شده انعکاس ویتترینایت و روند پیش بینی شده آن همخوانی قابل قبولی برقرار می شود. مقدار فرسایش حاصل از ناپیوستگی سنومانین (خروج حوضه رگ سفید به مدت ۲۸ میلیون سال و عدم رسوب گورپی و ایلام) با توجه به انطباق چینه شناسی سازند سروک در میدان رگ سفید و چاه های میادین سیاه مکان، بینک و پازنان حدود ۲۰۰ متر تخمین زده شده است. براساس نظر کاتز و همکاران در سال ۱۹۸۸ زمانی که ناپیوستگی ها دفن شوند، تأثیر فرسایش بر بلوغ نشانگرهای حرارتی در زیر و بالای ناپیوستگی از بین می رود، بنابراین مقدار فرسایش در ناپیوستگی های مدفون شده تأثیری بر روند بلوغ تعیین شده با روش Easy%Ro و Tmax ندارد (Katz et al. 1988). همانطور که در شکل (۶ ب) مشاهده می شود،



شکل ۴- طرح شماتیک مدل سازی بلوغ حرارتی.

سازندهای منشأ مطالعه شده در میدان نفتی رگ سفید مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱) ارزیابی کمیت، یا پتانسیل تولید: نمودار S_1+S_2 در مقابل TOC برای سازندهای مطالعه شده (شکل ۵) نشان می دهد که سازندهای پابده و گورپی از لحاظ مقدار ماده آلی در محدوده متوسط تا عالی و نمونه های سازند کژدمی در محدوده خوب تا عالی قرار دارند.

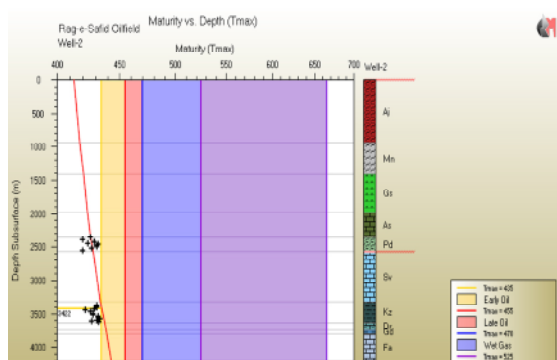
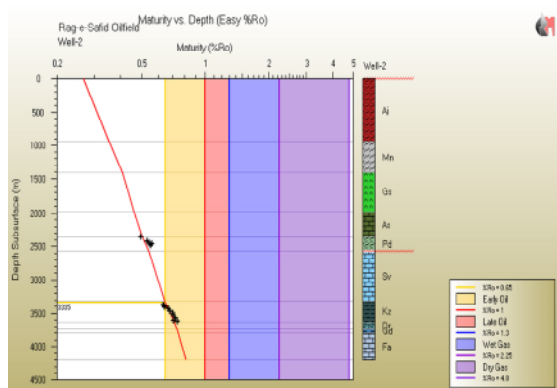


شکل ۵- نمودار S_1+S_2 در مقابل TOC برای ارزیابی مقدار ماده آلی در سازندهای پابده، گورپی و کژدمی، اقتباس از (Huang et al., 2003).

۵-۲) بررسی نتایج حاصل از مدل سازی

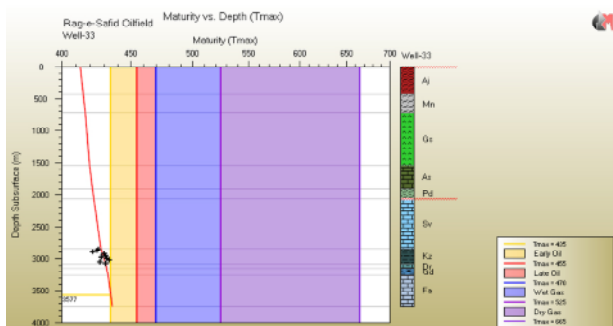
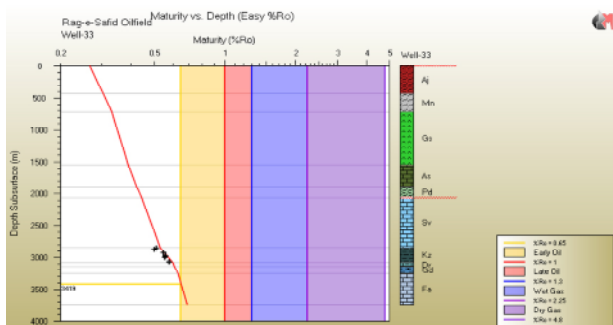
در این بخش ابتدا بهینه سازی مدل در هر یک از چاه های مطالعاتی ارائه شده و سپس تاریخچه تولید نفت در سازندهای منشأ مطالعه شده در میدان نفتی رگ سفید مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۲-۱) بهینه سازی مدل: در این رابطه از داده های اندازه گیری شده انعکاس ویتترینایت و مقایسه آنها با مقادیر محاسبه شده به روش (Easy%Ro) Sweeney & Burnham, 1990 و داده های Tmax استفاده شده است. شیب خط تغییرات انعکاس ویتترینایت در مقابل عمق، متأثر از شیب زمین گرمایی و نرخ رسوبگذاری بوده و با تعیین آن ها، می توان مقدار شیب را به دست آورد. هر گونه تغییر در این دو

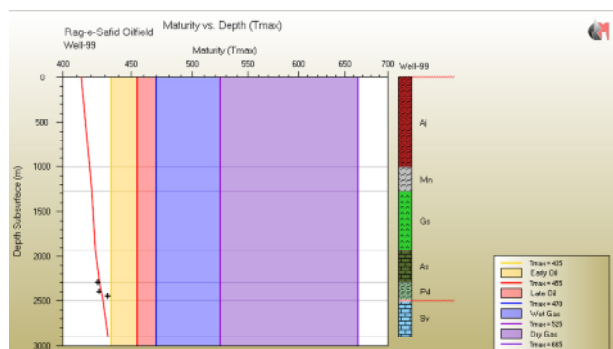


شکل ۶- نمودار تغییرات بلوغ با عمق براساس مدل Easy%Ro (الف) و Tmax

های تاریخچه تدفین حاکی از تاریخچه رسوبگذاری بسیار مشابه چاه شماره ۹۹ و چاه شماره ۲ است. بنابراین مقدار فرسایش در اثر ناپیوستگی سنومانین در چاه شماره ۹۹ نیز ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- نمودار تغییرات بلوغ با عمق براساس مدل Easy%Ro (الف) و T_{max} (ب) در چاه شماره ۳۳



شکل ۸- نمودار تغییرات بلوغ با عمق براساس مدل Easy%Ro (الف) و T_{max} (ب) در چاه شماره ۹۹

(ب) در چاه شماره ۲ میدان رگ سفید.

مقادیر اندازه گیری شده T_{max} برای سازند کژدمی نسبت به روند پیش بینی شده کمتر است. در سازند پابده نیز اگرچه داده ها از روند کلی پیش بینی شده پیروی می کنند، اما پراکندگی بسیاری را نشان می دهند.

علت این تغییرات آن است که T_{max} علاوه بر بلوغ، به نوع کروژن و پارامترهای دیگری نیز بستگی دارد. اسنودان در سال ۱۹۹۵ عنوان کرده است که پارامتر بلوغ حرارتی راک ایول (T_{max}) ممکن است به علت حضور بخشی از بیتومن در پیک S2 یا وجود کروژن غنی از سولفور، نسبت به واحدهای سنگی اطراف کاهش یابد (Snowdon, 1995). مقدار سولفور در نفت مخزن بنگستان میدان رگ سفید حدود ۳/۵ درصد است (Rezaei & Nogol Sadat, 2004). این مقدار قابل توجه سولفور حاکی از وجود یک سنگ منشأ با مقدار سولفور بالاست. پراکندگی داده های T_{max} اندازه گیری شده در نمونه های سازند پابده نیز می تواند به علت تغییرات محلی نوع ماده آلی در چینه های این سازند باشد که T_{max} را متأثر کرده است، اما به طور کلی داده های مذکور از روند پیش بینی شده پیروی می کنند و نیز براساس نظر (Snowdon, 1995) تغییرات $2 \pm C$ در نتایج T_{max} پذیرفتنی است.

۵-۲-۱-۲) بهینه سازی مدل چاه شماره ۳۳: شیب زمین گرمایی در این چاه به صورت مستقیم اندازه گیری نشده و با توجه به شیب زمین گرمایی چاه شماره ۴۱ که در شرق آن و با فاصله کمی قرار دارد، گرادیان حرارتی چاه شماره ۳۳ نیز 23°C/km در نظر گرفته شد. نتایج بهینه سازی با گرادیان $3/22^\circ\text{C/km}$ (جریان حرارتی $05/64\text{ mW/m}^2$) و فرسایش سطحی 60 متر برای سازند آغاچاری انطباق خوبی را بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده انعکاس ویتربینایت برقرار نمود (شکل ۷ الف). روند پیش بینی شده و داده های اندازه گیری شده T_{max} نیز انطباق نسبتاً خوبی را نشان می دهند (شکل ۷ ب).

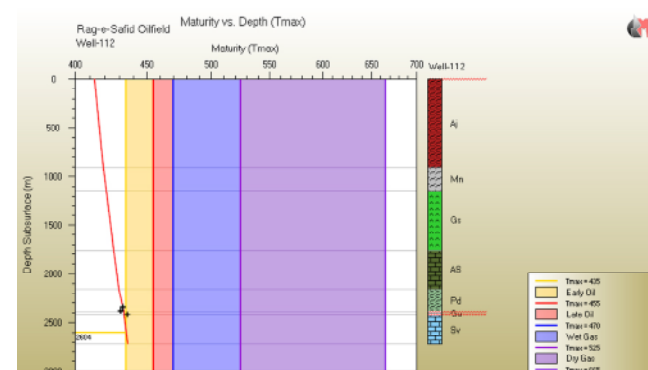
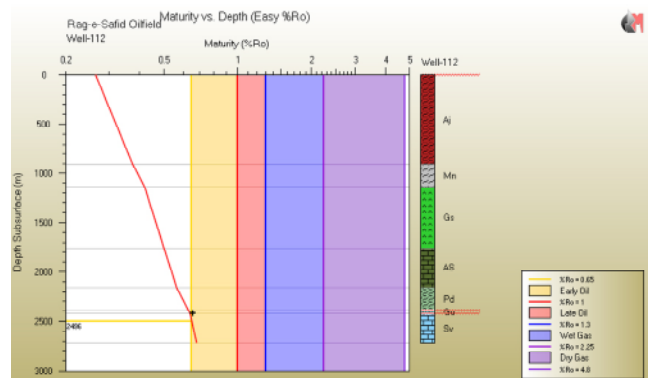
منحنی های تاریخچه تدفین حاکی از تاریخچه رسوبگذاری مشابه چاه های شماره ۳۳ و ۲ است. بنابراین مقدار فرسایش در اثر ناپیوستگی سنومانین در چاه شماره ۳۳ نیز ۲۰۰ متر اعمال شده است. ۵-۳-۱-۲) بهینه سازی مدل چاه شماره ۹۹: مقدار شیب زمین گرمایی در چاه شماره ۹۹ با توجه به مقدار شیب زمین گرمایی چاه شماره ۱۳ که در مجاورت آن قرار دارد، 26°C/km در نظر گرفته شد. علت افزایش گرادیان در این چاه قرار گرفتن آن بر روی Paleo high است (شکل ۲). بهینه سازی مدل با داده های انعکاس ویتربینایت و نیز T_{max} نشان داد که با اعمال گرادیان 26°C/km (جریان حرارتی 70 mW/m^2) و فرسایش سطحی 60 متر برای سازند آغاچاری انطباق قابل قبولی بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده انعکاس ویتربینایت و T_{max} به وجود می آید (شکل ۸). بررسی منحنی

ایجاد کنند. علت افزایش شیب زمین گرمایی در محل گسل ها حرکت صفحات گسلی در مقابل یکدیگر است که گرمای اصطکاکی ایجاد می کند و در بسیاری از موارد منجر به افزایش انعکاس ویتربینایت می شود. آنومالی های حرارتی ناشی از عملکرد گسل به مناطق بسیار کوچکی که نزدیک گسل قرار دارند، محدود می شود (Barker 1996). در این چاه دو مرحله بالا آمدگی در فاصله زمانی ۷۱-۸۹ میلیون سال پیش (نهشته شدن بخش عمده ای از سازند گورپی) و در ۶۱-۶۵ میلیون سال قبل (ناپیوستگی بین سازندهای پابده و گورپی) ثبت شده است. مقدار فرسایش در اینتروال زمانی ۷۱-۸۶ میلیون سال پیش ۱۳۰ متر و در اینتروال زمانی ۶۱-۶۵ میلیون سال پیش ۴۰ متر فرسایش در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به میزان بالاآمدگی در چاه شماره ۲ با نرخ ۷ m/my و فرونشست مجدد این بخش از حوضه رگ سفید و نیز با توجه به لیتولوژی سست تر سازند گورپی (شیلی-مارنی) نسبت به سازند سروک (آهکی) اعمال شده است.

۵-۲-۱ (ب) بهینه سازی مدل چاه شماره ۱۸: اندازه گیری شیب زمین گرمایی در چاه شماره ۱۸ و چاه های مجاور آن انجام نشده، بنابراین برای این چاه گرادیان نرمال $23\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ در نظر گرفته شد. بهینه سازی مدل با داده های انعکاس ویتربینایت نشان داد که با اعمال گرادیان $23\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ (جریان حرارتی $94/58\text{ mW/m}^2$) و فرسایش سطحی ۶۰ متر برای سازند آغاچاری انطباق خوبی بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده انعکاس ویتربینایت به وجود می آید (شکل ۱۰ الف). تاریخچه رسوبگذاری این چاه نیز مانند چاه ۱۱۲ شماره است، سازند ایلام رسوب نموده و ضخامت نهشته شده سازند گورپی در این چاه ۴۲ متر است. چاه شماره ۱۸ عمیق ترین بخش حوضه رگ سفید بوده است. به همین علت در اینتروال زمانی ۷۱-۸۹ میلیون سال پیش ۱۲۰ متر و در ۶۱-۶۵ میلیون سال پیش ۴۰ متر فرسایش در نظر گرفته شده است. با اعمال این کالیبراسیون، روند پیش بینی شده و اندازه گیری شده $T_{\max}$ انطباق قابل قبولی را نشان می دهد، اما در اینتروال $2795-2845$ متری (در سازند پابده) مقادیر اندازه گیری شده $T_{\max}$ در حدود 9°C کمتر از مقدار پیش بینی شده است (شکل ۱۰ ب). در گزارش لاگ گرافیکی چاه برای عمق مذکور آمده است: شیل های کربناته سیاه تا خاکستری بیتومینی، پیریتی. وجود بیتومن در پیک S2 با افزایش مقدار اشعه گاما، TOC و HI همراه است (Snowdon, 1995). TOC و HI بالا در اینتروال مذکور $\text{TOC} = 3-5\text{ } \text{Wt}\%$ و $\text{mg HC/gr TOC} > 550$ موید وجود بیتومن است. بنابراین علت اصلی کاهش $T_{\max}$ در این اینتروال می تواند وجود بیتومن در سازند پابده و سولفور موجود در محیط (به علت وجود پیریت) باشد. افزایش HI و TOC در این اینتروال، منجر به کاهش مقدار اندازه گیری شده انعکاس ویتربینایت (suppression) شده است.

(ب) در چاه شماره ۹۹

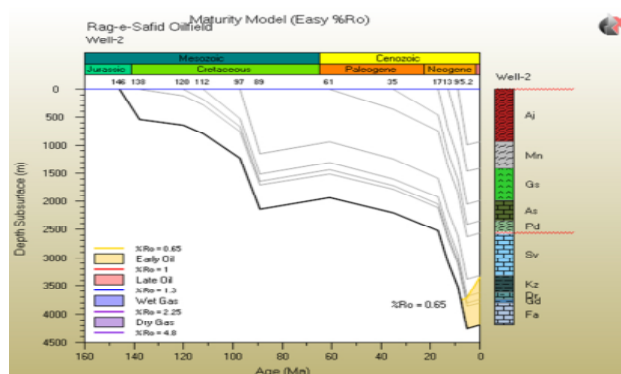
۵-۲-۱ (ب) بهینه سازی مدل چاه شماره ۱۱۲: اندازه گیری شیب زمین گرمایی در چاه شماره ۱۱۲ و چاه های مجاور آن انجام نشده، بنابراین برای این چاه گرادیان نرمال $23\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ (جریان حرارتی $277/61\text{ mW/m}^2$) در نظر گرفته شد. تنها داده اندازه گیری شده انعکاس ویتربینایت در این چاه از سازند گورپی است که مقدار 0.66% را نشان می دهد (در اثر هرزروی گل در سازند پابده ضخامتی زیادی از پابده فاقد نمونه بوده و ضخامت گورپی نیز در این چاه شماره ۳۲ متر است). این مقدار بسیار بیشتر از مقدار پیش بینی شده توسط Easy%Ro داده های $T_{\max}$ نیز این عدم همخوانی را نشان می دادند. با اعمال شیب زمین گرمایی $31\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ (جریان حرارتی $226/83\text{ mW/m}^2$) و فرسایش ۶۰ متر (مشابه چاه شماره ۲) برای سازند آغاچاری، داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده انعکاس ویتربینایت و $T_{\max}$ انطباق قابل قبولی را نشان دادند (شکل ۹).



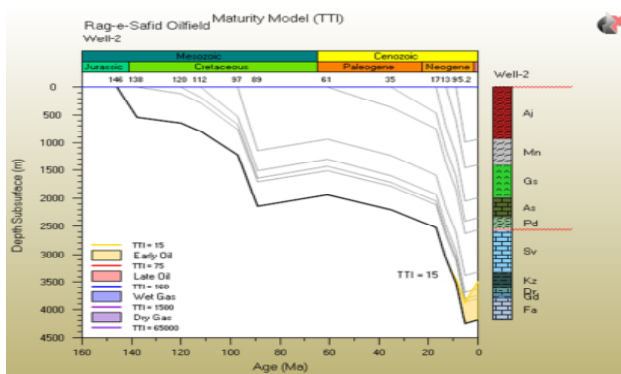
شکل ۹- نمودار تغییرات بلوغ با عمق براساس مدل Easy%Ro (الف) و $T_{\max}$ (ب) در چاه شماره ۱۱۲

افزایش غیرعادی شیب زمین گرمایی می تواند به علت عملکرد گسل، نفوذی آذرین و یا وجود مواد رادیواکتیو باشد (Hunt 1996). شکل ۲ نشان می دهد چاه شماره ۱۱۲ بر روی گسل پی سنگی ایذه-هندیجان قرار گرفته است. بارکر در سال ۱۹۹۶ در بررسی تأثیر گسل عنوان کرده که گسل ها می توانند به صورت محلی آنومالی های حرارتی

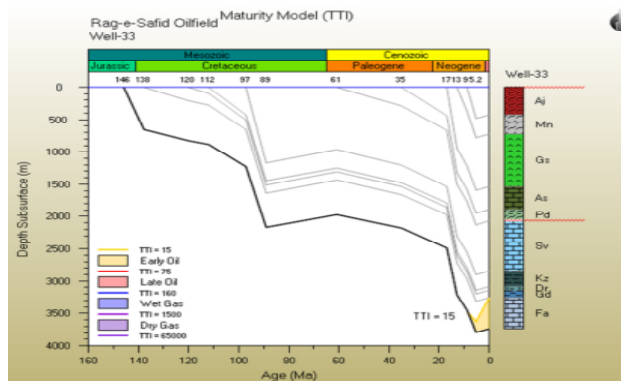
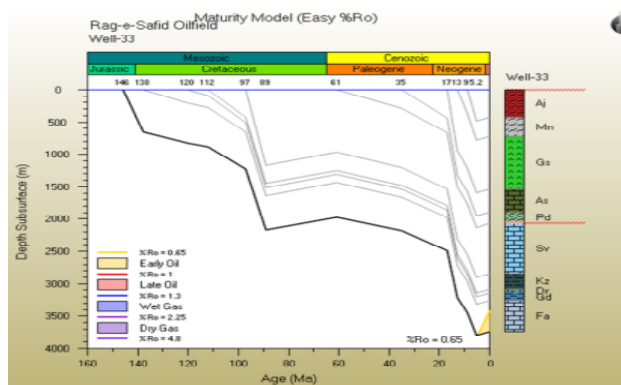
می دهند، سازندهای کژدمی و گدوان به پنجره نفتی نرسیده و پنجره



الف

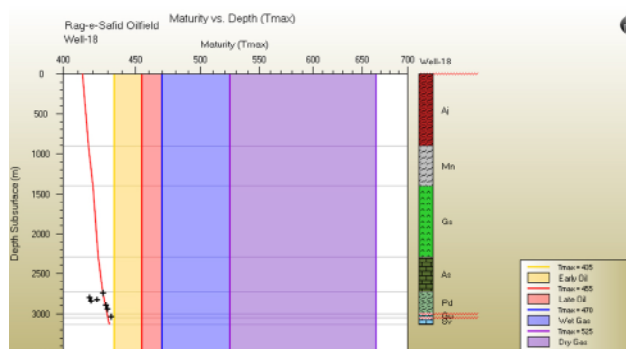
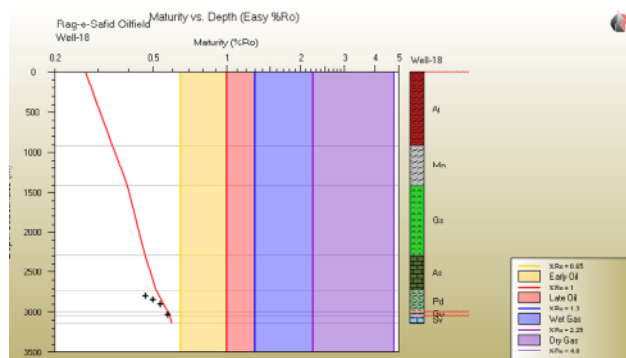


شکل ۱۱- مدل بلوغ در چاه شماره ۲ میدان نفتی رگ سفید به روش Easy%Ro (الف) و TTI (ب).



شکل ۱۲- مدل بلوغ در چاه شماره ۳۳ میدان نفتی رگ سفید به روش

۲-۲-۵) بررسی تاریخچه تولید نفت در چاه های مطالعاتی میدان نفتی رگ سفید: مدل بلوغ در هر چاه در میدان نفتی رگ سفید با دو روش Easy%Ro و TTI تعیین و نتایج به صورت مجزا برای هر چاه ارائه شده است.



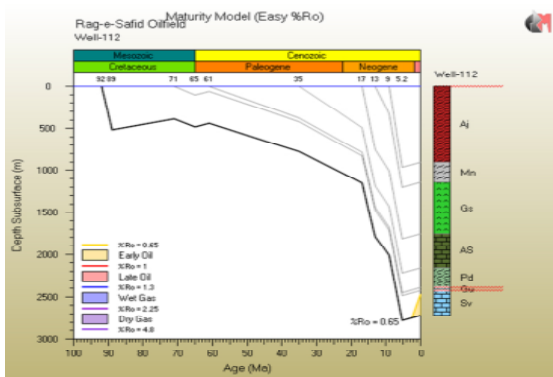
شکل ۱۰- نمودار تغییرات بلوغ با عمق براساس مدل Easy%Ro (الف) و Tmax (ب) در چاه شماره ۱۸

۱-۲-۲-۵) تاریخچه تولید نفت در چاه شماره ۲: براساس مدل بلوغ در شکل (الف) روش Easy%Ro سازند گدوان ۶ میلیون سال پیش در عمق ۳۷۳۰ متری و سازند کژدمی در ۵ میلیون سال قبل، در همین دما و در عمق ۳۶۹۰ متری به پنجره نفتی رسیده اند ($Ro=0.65\%$) و پنجره نفتی هم اکنون در سر سازند کژدمی در عمق ۳۳۳۵ متری قرار دارد. براساس مدل TTI (شکل ۱۱ ب) سازند گدوان ۵ میلیون سال پیش در دمای $117^{\circ}C$ در عمق ۳۸۶۰ متری و سازند کژدمی در ۲ میلیون سال قبل، در همین دما و در عمق ۳۶۵۰ متری به پنجره نفتی رسیده است ($TTI=15$) و هم اکنون در عمق ۳۴۷۹ متری قرار دارد. همانطور که در هر دو شکل نیز مشاهده می شود، عمق پنجره نفتی رو به کاهش است که به علت بلوغ سنگ منشأ و نیز خروج حوضه از آب از ۵ میلیون سال پیش، بالآمدگی و فرسایش در اثر کوهزایی زاگرس است.

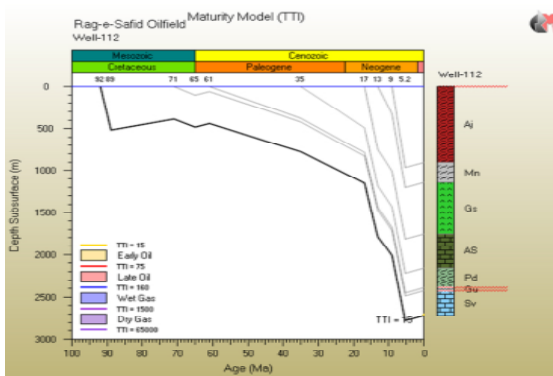
۲-۲-۲-۵) تاریخچه تولید نفت در چاه شماره ۳۳: براساس هر دو شکل (الف و ب) که عمق پنجره نفتی را در چاه شماره ۳۳ نشان

Easy%Ro (الف) و TTI (ب).

نفتی در عمق ۲۶۹۳ متری نزدیک کف چاه (۲۷۱۵ متری) قرار دارد.



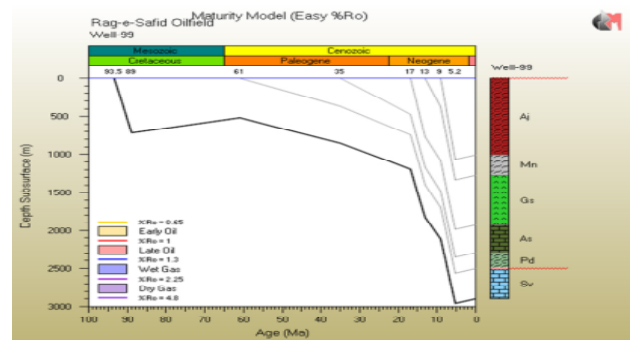
شکل ۱۱



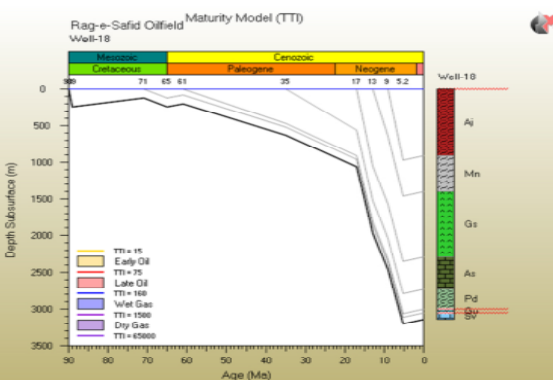
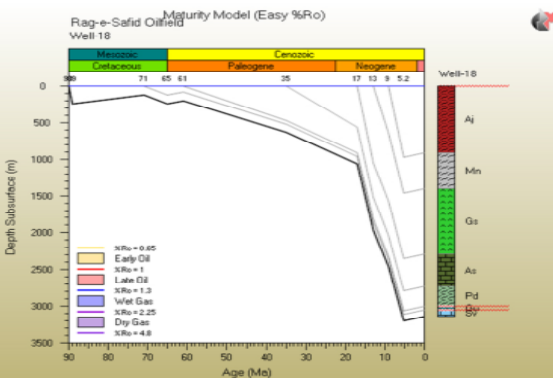
شکل ۱۲- مدل بلوغ در چاه شماره ۱۱۲ میدان نفتی رگ سفید به روش Easy%Ro (الف) و TTI (ب).

نفتی هم اکنون در سازند فهلیان قرار دارد (این عبارت به معنای این نیست که سازند فهلیان نفت زایی نموده بلکه به این معناست که به دمای لازم برای نفت زایی رسیده است). براساس مدل Easy%Ro پنجره نفتی ۵ میلیون سال قبل در عمق ۳۷۷۰ متری و هم اکنون در عمق ۳۴۱۹ متری قرار دارد. براساس مدل TTI پنجره نفتی ۸ میلیون سال قبل در عمق ۳۵۰۰ متری، در ۵ میلیون سال قبل در عمق ۳۶۱۰ متری و هم اکنون در عمق ۳۲۵۹ متری در رأس سازند فهلیان قرار دارد.

۵-۲-۳) تاریخچه تولید نفت در چاه شماره ۹۹: این چاه تا عمق حفاری شده (۲۸۹۸ متری در سازند سروک) به پنجره نفتی نرسیده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- مدل بلوغ در چاه شماره ۹۹ میدان نفتی رگ سفید به روش Easy%Ro (الف) و TTI (ب)



شکل ۱۵- مدل بلوغ در چاه شماره ۱۸ میدان نفتی رگ سفید به روش Easy%Ro (الف) و TTI (ب).

۵-۲-۴) تاریخچه تولید نفت در چاه شماره ۱۱۲: مدل بلوغ چاه شماره ۱۱۲ (شکل ۱۴) نشان می دهد که پنجره نفتی هم اکنون در سازند سروک قرار دارد و بر همین اساس سازند کژدمی و گدوان نیز به پنجره نفتی رسیده اند، اما به علت عدم حفاری اطلاعاتی از زمان و عمق آغاز پنجره نفتی در این سازندها و نیز سازند سروک وجود ندارد. براساس مدل Easy%Ro (شکل ۱۴ الف) پنجره نفتی در ۳ میلیون سال قبل در عمق ۲۷۴۰ متری و هم اکنون در عمق ۲۴۷۱ متری در رأس سازند سروک است و براساس مدل TTI (شکل ۱۴ ب) پنجره

نفتی است.

با توجه به نتایج مدل سازی براساس روش Easy%Ro، آغاز نفت زایی در سازند کژدمی میدان نفتی رگ سفید ۵ میلیون سال پیش است، در حالیکه آغاز نفت زایی این سازند در فروافتادگی دزفول حدود ۸-۱۰ میلیون سال پیش است. علت تأخیر نفت زایی سازند کژدمی در میدان نفتی رگ سفید نرخ فرونشست پایین این میدان نسبت به کل فروافتادگی دزفول است.

با توجه به سن زایش نفت (۵ میلیون سال پیش) و سن سازند گچساران به عنوان پوش سنگ (۱۳-۹ میلیون سال پیش) و نیز سن چین خوردگی در زاگرس (۱۰-۸ میلیون سال پیش) برای تشکیل نفت گیرها، آغاز زایش نفت در این میدان پس از تشکیل پوش سنگ و نفت گیر بوده است.

میدان نفتی رگ سفید مثال خوبی از ارتباط بین پارامترهای ژئوشیمیایی و تکتونیک است. در این میدان تکتونیزه، تأثیر پارامترهای تکتونیکی بر بلوغ سنگ های منشأ با داده های ژئوشیمیایی اثبات شده است.

تشکر و قدردانی:

بدینوسیله از دانشگاه شهید چمران اهواز، به ویژه گروه زمین شناسی به منظور صدور اجازه استفاده از امکانات آزمایشگاه نفت و شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، به ویژه اداره زمین شناسی بنیانی برای فراهم کردن نمونه ها و اطلاعات حفاری تشکر و سپاس گزاری به عمل می آید.

۵-۲-۵) تاریخچه تولید نفت در چاه شماره ۱۸: چاه شماره ۱۸ تا عمق حفاری شده (۳۱۳۵ متری در سازند سروک) به پنجره نفتی نرسیده است (شکل ۱۵).

۶) نتیجه گیری

مطالعه انعکاس ویتروینایت در میدان نفتی رگ سفید نشان داد که سازند کژدمی در چاه شماره ۲ و سازند گورپی در چاه شماره ۱۱۲ وارد پنجره نفتی شده اند. این داده ها به همراه داده های Tmax قرارگیری چاه شماره ۱۱۲ بر روی گسل ایزه-هندیجان و نیز چاه شماره ۹۹ بر روی paleo high را تأیید نمود.

نتایج حاصل از مدل سازی بلوغ حرارتی در میدان نفتی رگ سفید نشان داد که سازند پایده در میدان نفتی رگ سفید به نفت زایی نرسیده است. از طرف دیگر سازند کژدمی نیز به جز چاه شماره ۳۳ که رسیدن به پنجره نفتی را نشان نمی دهد، در بقیه میدان نفتی رگ سفید به نفت زایی رسیده است. به علت گرادیان حرارتی بالا بر روی گسل ایزه-هندیجان واقع در شمال کوهانک شمال غربی انتظار می رود که سازند کژدمی در این بخش از میدان تا حد انتهای پنجره نفتی نیز برسد (در محدوده عملکرد گسل). در میانه کوهانک جنوب شرقی میدان به علت عمق بیشتر و نیز شیب زمین گرمایی بالا (در محل paleo high) انتظار می رود بلوغ کژدمی تا اواخر پنجره نفتی برسد. جز این دو مکان در میدان رگ سفید (محل گسل ایزه-هندیجان و بر روی paleo high) بلوغ سازند کژدمی در آغاز پنجره

منابع:

- بیجاری پور آ، زینل زاده ا، کمالی م. ر. ۱۳۸۴: بازسازی تاریخچه تدفین و مدل سازی حرارتی سنگ منشأ گدوان در ناحیه فارس. *مجله علوم دانشگاه تهران*. ۳۱: ۲۸۲-۲۶۹.
- چلداوی ع، ۱۳۸۵: لیتواستراتیگرافی و بایواستراتیگرافی رسوبات کرتاسه بالایی در میدان نفتی رگ سفید با تأکید بر عملکرد فاز کوهزایی ساب هرسی نین، رساله کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید بهشتی. ۲۲۴ صفحه.
- زینل زاده ا، رضایی م. ر، کمالی م. ر. ۱۳۸۳: نقش نهشته های الیگوسن و نوژن در سیستم نفتی حاشیه شمال شرق فروافتادگی دزفول. *مجله علوم دانشگاه تهران*. ۳۰: ۲۵۸-۲۴۷.
- شهابی س، علوی ع. ا. ۱۳۶۵: مطالعه مقدماتی زمین شناسی مخزن خامی بالایی میدان رگ سفید، گزارش شماره پ-۴۰۰۸، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اداره زمین شناسی.
- ظهرباب زاده م. ۱۳۸۵: مطالعه زمین شناسی مخزن نفت آسماری میدان نفتی رگ سفید، گزارش شماره پ-۵۹۵۴، مناطق نفت خیز جنوب، ۳۷۸.
- علیزاده ب، آدابی م. ج، تژه ف. ۱۳۸۵: ارزیابی پتانسیل هیدروکربورزایی سنگهای منشأ احتمالی در میدان نفتی مارون. *مجله علوم دانشگاه تهران*. ۳۲: ۲۷۴-۲۶۷.

- Barker C. E. 1996: Thermal modeling of petroleum generation: Theory and application, Elsevier Science B. V., Amsterdam.
- Bordenave M.L. 1993: Applied Petroleum Geochemistry, Editions technip, Paris.
- Huang B., Xiao X., Li X. 2003: Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea. *Organic Geochemistry* 34: 1009-1025.
- Hunt J.M. 1996: Petroleum Geochemistry and Geology, W.H. Freeman and Company, New York, 2nd edition.
- Kamali M.R., Fathi Mobarakabad A., Mohsenian E. 2006: Petroleum Geochemistry and Thermal Modeling of Pabdeh Formation

- in Dezful Embayment, JUST 32 (2): 1-11.
- Katz B.J., Pfeiffer R.N., Schunk D.J. 1988: Interpretation of discontinuous vitrinite reflectance profiles. *AAPG Bulletin*. **72**: 926-931.
- Petersen H.I., Sherwood N., Mathiesen A., Fyhn M.B.W., Dau N.T., Russell N., Bojesen-Koefoed J.A., Nielsen L.H. 2009: Application of integrated vitrinite reflectance and FAMM analyses for thermal maturity assessment of the northeastern Malay Basin, offshore Vietnam: Implications for petroleum prospectively evaluation. *Marine and Petroleum Geology* **26**: 319–332.
- Rezaie A. H., Nogole-Sadat M. A. 2004: Fracture Modeling in Asmari Reservoir of Rag-e Sefid Oil-Field by using Multiwell Image Log (FMS/FMI), Iranian International. *Journal of Science* **5**: 107-121.
- Sepehr M., Cosgrove J. W. 2004: Structural framework of the Zagros Fold–Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*. **21**: 829–843.
- Snowdon L.R. 1995: Rock-Eval Tmax suppression: Documentation and amelioration. *AAPG Bulletin*. **79**: 1337-1348.
- Sweeney J.J., Burnham A.K. 1990: Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*. **74**: 1559-1570.