

مطالعه ژئوشیمیایی سنگ‌های منشاء هیدروکربنی با استفاده از داده‌های پیرولیز راک-اول و مدل آرنیوس در میدان نفتی آجاجاری

سعیده سنماری^{۱*}، بیژن ملکی^۲، ابودر بازوندی^۳، پرویز آرمانی^۴

۱- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) s.senemari@ENG.ikiu.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) maleki@eng.ikiu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) abozar.bazvandi@gmail.com

۴- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) parviz.armani@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹)

چکیده

در این تحقیق، کاربرد مدل آرنیوس به عنوان مدل سینتیکی مناسب، برای ارزیابی درصد نفت زایش شده در سنگ منشاء ارائه داده شده است. بدین منظور سنگ‌های منشاء احتمالی سازندهای گدوان، کژدمی و پابده در میدان نفتی آجاجاری برای بررسی نحوه کاربرد روش آرنیوس مطالعه شدند. در این تحقیق وضعیت بلوغ سنگ منشاء و همچنین نرخ تبدیل نفت در میدان نفتی آجاجاری تعیین شد. پتانسیل تولید هیدروکربن سازندهای پابده، کژدمی و گدوان به ترتیب خیلی خوب، خوب-خیلی خوب و فقیر است و کروژن غالب در آن‌ها به ترتیب از نوع II و III و III است. بر اساس نتایج بازسازی تاریخچه تدفین و مدل‌سازی حرارتی، سازند کژدمی با توجه به مقدار کربن آلی، پتانسیل زایش، و بلوغ حرارتی، به عنوان سنگ منشاء مناسب در میدان آجاجاری معرفی شد. براساس مدل آرنیوس نرخ تبدیل در میدان نفتی آجاجاری برای سنگ منشاء کژدمی، به حداکثر مقدار خود رسیده است ($X=100\%$). سازند پابده نیز دارای پتانسیل هیدروکربن‌زایی خوب تا عالی بوده و وارد پنجره نفتی شده است ولی با توجه به تاریخچه تدفین آن، نفت کمی تشکیل داده است. در سازند گدوان نیز به علت نوع کروژن ورژیم حرارتی نامناسب، وارد پنجره نفت زایی نشده و دارای TTI و نرخ تبدیل بسیار پایینی است.

کلمات کلیدی

سینتیک زایش نفت، سنگ منشاء، مدل آرنیوس، میدان نفتی آجاجاری

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

امروزه هیدروکربورها بیشترین سهم تولید انرژی را در زندگی بشر داشته، از اینرو اولین قدم در بهره‌گیری از آنها پرداختن به اکتشاف آنها است. در مطالعات ژئوشیمیایی، بررسی خواص سنگ منشاء و نیز مطالعه نقش آنها در تولید نفت انجام می‌گیرد. در واقع بررسی فرایند نفت‌زایی سنگ منشاء در جهت بیان کیفیت و کمیت نفت‌زایی در هر سیستم نفتی انجام می‌پذیرد. سنگ منشاء سنگی است که در طول تدفین و تحت تأثیر حرارت، قادر به تولید مقادیر قابل توجهی از کروژن و مواد هیدروکربوری است. واژه کروژن به تمامی مواد آلی موجود در سنگ‌های منشاء که در حلال‌های مختلف غیرقابل حل هستند اطلاق می‌شود [۱]. قرار گرفتن این سنگ‌ها در اعماق زیاد سبب محدودیت‌های مطالعه آنها گشته، بنابراین برای بررسی بخش‌های عمیق حوضه مورد مطالعه از عوامل مختلف نظیر بازسازی تاریخچه تدفین و بررسی بلوغ حرارتی گذشته می‌توان استفاده کرد. مقدار ماده آلی در سنگ منشاء تحت عنوان کل کربن آلی بیان می‌شود. مقادیر این کربن در سنگ‌های مذکور به شدت وابسته به اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده رسوب است بنحوی که مقادیر بالای آن در رسوب بیانگر آن است که نگهداری مواد آلی و همچنین انتقال آنها به خوبی انجام گرفته است. امروزه برای مطالعه وضعیت سنگ منشاء (پتانسیل تولید هیدروکربن و مقدار بلوغ)، از روش پیرولیز راک-اول استفاده می‌شود. در روش مذکور، فرآیند تولید هیدروکربور از سنگ منشاء در شرایط اکسیداسیون و احیا در دستگاه پیرولیز راک-اول شبیه-سازی شده و به دنبال آن پارامترهایی نظیر کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی در سنگ منشاء بررسی و نتایج به صورت نمودارهای ژئوشیمیایی ارائه می‌شود. پیرولیز راک-اول ساده-ترین روشی است که ریسک حفاری را کاهش داده و جهت شناسایی سنگ‌های منشاء و نحوه توزیع آنها در منطقه کاربرد دارد [۲، ۳]. در نهایت نوع کروژن (I-IV) به کمک مدل سینتیکی زایش نفت تعیین و بر اساس نوع مواد آلی

۲- مواد، روش‌ها و مبانی ریاضی

از جمله فاکتورهای مهمی که در بلوغ سنگ منشاء نقش مهمی ایفا می‌کنند تغییرات عمق و دما است. اولین روش سینتیکی در مدل‌سازی تولید نفت، توسط هابیخت ارائه شد [۲۰]. این رابطه اولین مدل ریاضی برای تولید نفت با استفاده

نسبت به نمودار ون-کروکن تفکیک می‌شود [۴]. مدل‌های سینتیکی متعددی برای تعیین نوع هیدروکربن ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین مدل‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل ویتربینایت است [۵]. در سال‌های اخیر علاوه بر آن، از مدل لوپاتین نیز استفاده شده است [۶، ۵]. در این روش، تأثیر هر دو عامل زمان و درجه حرارت (TTI) در محاسبه بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در رسوب در نظر گرفته می‌شود اما در عین حال دارای محدودیت‌هایی است [۹-۷]. بنابراین برای رفع این محدودیت‌ها، مدل آرنیوس پیشنهاد شد [۱۰-۱۲]. این مدل نیز از جمله روش‌های غیر مستقیمی است که به منظور ارزیابی سنگ منشاء و تعیین وضعیت بلوغ و درجه پختگی مواد آلی و نیز مشخص نمودن عمق و زمان تشکیل هیدروکربن استفاده می‌شود [۱۳، ۱۴]. علاوه بر این‌ها از مدل-سازی بلوغ حرارتی که با ایجاد مدلی مفهومی از تاریخ زمین-شناسی منطقه انجام می‌پذیرد، چهارچوبی برای بررسی بازسازی تاریخچه رسوبی، فرسایش و تخمین حرارت لازم برای بلوغ سنگ منشاء، استفاده می‌شود [۱۶، ۱۵]. در واقع مطالعه تاریخچه حرارتی از جمله روش‌های غیر مستقیمی است که به منظور ارزیابی سنگ منشاء و تعیین وضعیت بلوغ و درجه پختگی مواد آلی و نیز مشخص کردن عمق و زمان تشکیل هیدروکربن استفاده می‌شود [۱۷]. در مطالعه حاضر سازندهای گدوان، کژدمی و پابده در یکی از چاه‌های میدان نفتی آغاجاری از نقطه نظر ژئوشیمیایی آلی بررسی شد. سازندهای مذکور جزء مهم‌ترین سنگ‌های منشاء شیلی و مارنی در حوضه رسوبی زاگرس هستند [۱۸]. از بین سازندهای مذکور، سازند کژدمی در فروافتادگی دزفول به‌عنوان سنگ منشاء مهم مواد هیدروکربوری در گروه بنگستان معرفی شده است [۱۹]. در مطالعه حاضر سعی شده است تا از مهم‌ترین فاکتورهای علم ژئوشیمی، بازسازی تاریخچه تدفین و همچنین انجام محاسبات لازم با مدل آرنیوس به‌عنوان یکی از پارامترهای اکتشافی تکمیلی منابع هیدروکربوری در ارزیابی سازندهای گدوان، کژدمی، پابده در میدان نفتی آغاجاری استفاده شود.

از مدل سینتیکی آرنیوس همراه با منحنی تاریخچه تدفین سنگ منشاء است [۲۱]. در این روش، تأثیر هر دو عامل زمان و درجه حرارت با معرفی پارامتر TTI^۱ در محاسبه بلوغ مواد آلی در نظر گرفته می‌شوند. فاکتورهای زمان و دما می‌توانند جایگزین هم شوند به‌طوری‌که هر چقدر دما کاهش یابد، زمان

¹ Time Temperature Index

متفاوتی را خواهد داشت، بنابراین برای به‌دست آوردن پارامترهای سینتیکی از آزمایش‌های پیرولیز راک-اول استفاده می‌شود. در معادله ۴ نرخ مصرف کروژن به صورت زیر محاسبه می‌شود.

در این معادله: V_0 کمیت اولیه کروژن، V مقدار باقیمانده کروژن بعد از زمان t و K نرخ ثابت معادله است.

$$V = V_0 \cdot \exp(-kt) \quad (4)$$

همچنین شاخص زمان-دما (TTI) بر اساس معادله آرنیوس توسط وود [۲۲] و طبق معادله ۵ بیان گردید. در این معادله، محاسبه TTI_{ARR} ارائه شده است. وود [۲۲] بیان می‌کند که استخراج TTI از طریق تجزیه تقریبی انتگرال معادله آرنیوس در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه است. در این حالت مقادیر E بیشتر از ۵۰ kJ/mol خطایی کمتر از یک داشته و روند حرارت، خطی است به طوری که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند.

$$TTI_{ARR} = \frac{A(t_{n+1} - t_n)}{T_{n+1} - T_n} \left\{ \left[\frac{RT^{\dagger}}{E + 200n_{n+1}} e^{\left(\frac{-E}{RT_{n+1}}\right)} \right] - \left[\frac{RT^{\dagger}}{E + 200n_n} e^{\left(\frac{-E}{RT_n}\right)} \right] \right\} \times \quad (5)$$

در این معادله: t_n و t_{n+1} به ترتیب زمان (my) و دمای مطلق (C+273) در آغاز و پایان هر بازه حرارتی ۱۰ درجه سانتی‌گرادی است. در واقع این معادله آهنگ حرارت خطی را در هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر می‌گیرد و ضریب ۱۰۰ برای حذف مقادیر با اعشار است. فاکتورهایی نظیر A ، E ، R همانند معادله ۲ است.

از طرفی دیگر با توجه به این‌که برخی از منحنی‌های تاریخچه تدفین دارای دوره‌های زمانی طولانی‌تری در دمای ثابت و با میزان فرونشست یا بالآمدگی ناچیز هستند، بنابراین به‌منظور ارزیابی دقیق، مقدار TTI_{ARR} را می‌توان مطابق معادله ۶ محاسبه کرد.

$$TTI_{ARR} = [(t_{n+1} - t_n) A e^{(E/RT)}] \times 10 \quad (6)$$

در نهایت، افزودن مقادیر TTI_{ARR} برای هر بازه حرارتی ۱۰ درجه و یا دوره‌های دمای ثابت، در منحنی تاریخچه تدفین سنگ منشاء، شاخص جمع‌بندی ($\sum TTI_{ARR}$) را فراهم می‌کند. بنابراین با استفاده از این شاخص، می‌توان حداکثر میزان درصد نفت تولید شده را در معادله ۷ محاسبه

طولانی‌تری برای رسیدن به مرحله بلوغ، لازم است. این روش برای پیش‌بینی تشکیل نفت استفاده می‌شود اما نوع کروژن را مشخص نمی‌کند اما می‌تواند زایش هیدروکربور را با توجه به نوع کروژن نشان دهد. مطابق معادله ۱، مقدار TTI با انعکاس ویتربینایت رابطه مستقیم دارد. از این رابطه و همچنین جدول ۱ می‌توان برای تعیین صحت مدل با روش‌های متداول (انعکاس ویتربینایت) استفاده کرد.

$$R_0[\%] = 0.06359 \times (1444TTI)^{0.2012} = \quad (1)$$

در مطالعه حاضر برخی از نمونه‌های سنگ منشاء که قبلاً روی آن‌ها آزمایش پیرولیز حرارتی انجام شده است مجدداً از لحاظ سینتیکی تحلیل شد، به طوری که بر اساس آن توان تولید نفت آن‌ها تعیین شد. هانت [۱] و وود [۲۲] بیان کردند که برای محاسبه TTI می‌توان از مدل آرنیوس استفاده کرد. چون بلوغ حرارتی توسط عوامل زمان و حرارت کنترل می‌شود بنابراین با بررسی تاریخچه تدفین، می‌توان وضعیت حرارتی سنگ منشاء را تعیین کرد [۲۳]. وابستگی دمایی تجزیه کروژن برحسب معادله ۲ بیان می‌شود [۲۴-۲۶].

$$K = A \exp(-E/RT) \quad (2)$$

در این معادله: K = ثابت واکنش (l/my)، A = ضریب پیش‌نمایی یا فرکانس (l/my)، R = ثابت گاز ایده آل، T = دما برحسب کلون (C+273). پارامترهای سینتیکی E (مقدار انرژی فعال‌سازی) و A (فاکتور فراوانی) است که می‌توان آن‌ها را با حرارت دادن سنگ منشاء در دماهای مختلف و اندازه‌گیری محصول هیدروکربن، به‌دست آورد.

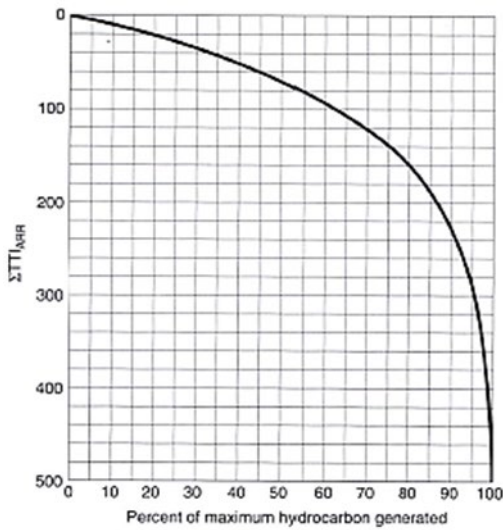
از سویی دیگر ترکیب هر نوع کروژن، دارای پتانسیل متفاوتی برای زایش نفت است و نفت تولید شده می‌تواند به گاز نیز تبدیل شود [۶]. اگر چنانچه در زمان t_0 مقدار کروژن برابر با V_0 و مقدار بیتومن برابر با صفر باشد. در زمان t مقدار کروژن برابر $(V_0 + V_t)$ و مقدار بیتومن برابر V_t است. بنابراین نرخ تبدیل کروژن به بیتومن در دمای ثابت بستگی به مقدار کروژن باقیمانده دارد که این مقدار از معادله ۳ به‌دست خواهد آمد. $(V_0 + V_t)$ کمیت باقی‌مانده واکنش، n درجه واکنش، K نرخ ثابت معادله.

$$\frac{dv}{dt} = K(V_0 - V_t)^n \quad (3)$$

چون آزمایش‌های پیرولیز راک-اول در مدت زمان کم و دمای بالا صورت می‌گیرد و در نهایت مکانیسم‌های واکنشی

$$X\% = [1 - \exp(-\sum TTI_{ARR}/100)] \times 100 \quad (7)$$

نمود. در شکل ۱ مشاهده می‌شود که با افزایش $\sum TTI_{ARR}$ درصد نفت تولید شده نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱- حداکثر میزان درصد نفت و گاز تولیدشده [۱]

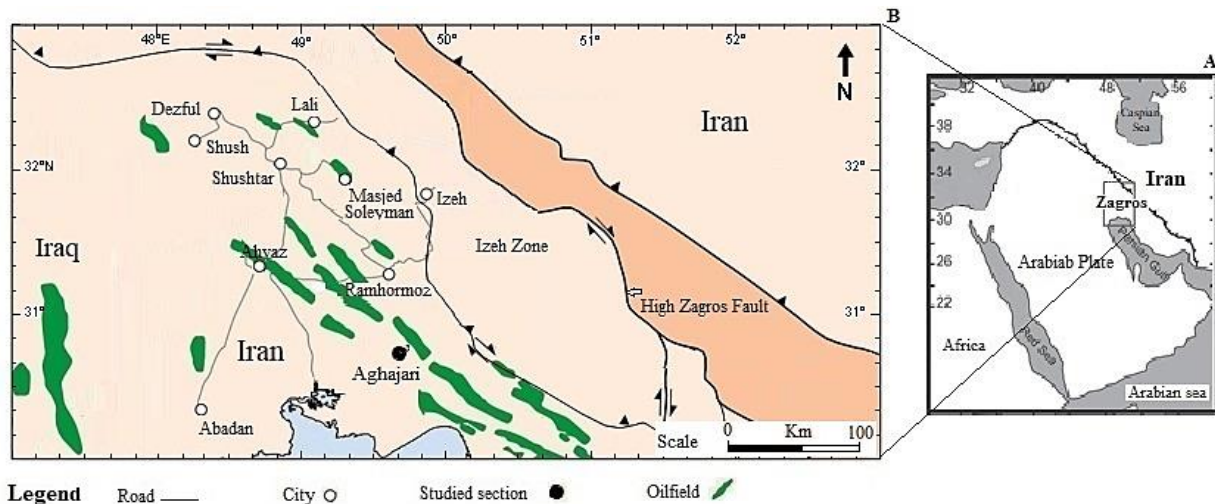
جدول ۱- مقادیر TTI و R0% و ارتباط آن‌ها با وضعیت بلوغ سنگ منشاء [۲۱]

وضعیت بلوغ TTI	درصد انعکاس	وضعیت بلوغ
۳-۰	۰.۵۵-۰	بالغ
۲۰-۳	۰.۷-۰.۵۵	بلوغ اولیه
۷۵-۲۰	۱-۰.۷	بلوغ میانی
۱۸۰-۷۵	۱.۳-۱	بلوغ نهایی
۹۰۰-۱۸۰	۲-۱.۳	گاز زایی

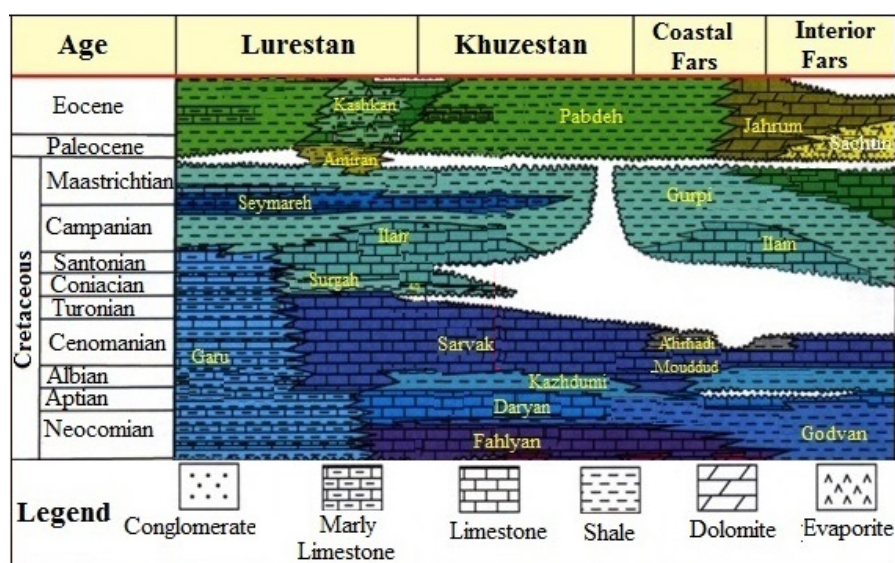
می‌باشد این میدان در موقعیت جغرافیایی $30^{\circ}42'$ شمالی و $49^{\circ}49'$ شرقی در جنوب غربی ایران با روند شمال غربی-جنوب شرقی قرار دارد (شکل ۲). این میدان به دلیل وجود ذخایر نفتی و گازی مورد توجه زمین‌شناسان بوده است. در این میدان مخازن بنگستان و آسماری حاوی نفت، و مخزن خامی حاوی گاز است. نحوه گسترش سازند های مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است.

۳- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی میدان نفتی آغاجاری

میدان نفتی آغاجاری در ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز، در ناحیه فروافتادگی دزفول، مرز بین دزفول شمالی و جنوبی و در جوار میداین کرن، رامشیر، پازنان و مارون قرار دارد [۲۷]. طول این میدان ۵۶ کیلومتر و عرض آن ۶ کیلومتر



شکل ۲- موقعیت میدان نفتی آغاجاری و میدان‌های نفتی همجوار آن واقع در جنوب غرب ایران [۲۸]



شکل ۳- نحوه گسترش سازندهای گدوان، کژدمی و پابده در منطقه زاگرس [۲۹]

۴- مطالعه سنگ‌های منشاء آگاجاری

است [۳۲]. از سویی دیگر می‌توان انرژی اکتیواسیون را بدون در نظر گرفتن محتوی گوگرد و با کمک داده های راک-اول تعیین نمود [۳۳، ۹]. در این راستا تقسیم‌بندی چهارگانه ضعیف، متوسط، خوب، خیلی خوب به ترتیب معادل با A, B, C, D در نظر گرفته شد. با توجه به جداول ۳ و ۲ از روی پارامترهای راک-اول (S1, S2, TOC) و ارتباط آن با انرژی اکتیواسیون، مرغوبیت کروژن مشخص می‌شود. بطورمثال کروژن نوع دو با کیفیت poor دارای بیشترین انرژی اکتیواسیون و معادل IID است.

در این تحقیق پتانسیل زایشی هیدروکربن در زمان ته نشست سازندهای گدوان، کژدمی و پابده در یکی از چاه‌های واقع در میدان نفتی آگاجاری مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا از نتایج آنالیز راک-اول مربوط به خرده حفاری یکی از چاه-های میدان نفتی آگاجاری متعلق به سازندهای گدوان، کژدمی و پابده استفاده شد [۳۰]. بررسی‌های نتایج راک-اول (جدول ۲) نشان داد که نمونه‌های سازند گدوان و کژدمی با توجه به مقادیر ΔT دارای بلوغ حرارتی بوده که بیانگر ورود تمامی نمونه‌های این دو سازند به درون پنجره نفتی است. همچنین بررسی پتانسیل هیدروکربورزایی سازندهای گدوان، کژدمی و پابده نشان داد که سازندهای پابده و به ویژه کژدمی توانایی زایش هیدروکربور را پیدا کرده است [۳۱]. در این راستا مواد آلی سازندهای گدوان، کژدمی و پابده به ترتیب از نوع کروژن $\square\square\square$ ، $\square\square$ و \square ارزیابی شد.

در مطالعه کنونی که بر اساس مدل سینتیکی آرنیوس می‌باشد، لازم است نوع کروژن با تقسیمات جزئی‌تری ارائه شود. به همین علت نیاز به تعیین انرژی اکتیواسیون کروژن است. روش‌های مختلفی برای تعیین این انرژی وجود دارد که از جمله می‌توان به محتوی گوگرد اشاره کرد. بر این اساس چهار نوع کروژن تیپ دو پیشنهاد گردید. البته برای کروژن نوع دو تقسیم‌بندی دیگری بر اساس محتوی گوگرد نیز صورت گرفت که در آن کروژن تیپ دو را به دو تا سه دسته تقسیم نموده

جدول ۲- داده‌های پیرولیز راک اول برای نمونه‌های میدان نفتی آغاچاری

سازند	عمق (m)	S1 mg HC/g Rock	S2 mg HC/g Rock	Tmax (°C)	HI	TOC %	نوع کروژن	بلوغ	مرغوبیت	معادل کروژن آرنیوس
پابده	۲۱۹۵	۳/۶۲	۲۰/۸۸	۴۲۴	۴۹۲	۴/۲۴	II	I	E ^۲	IIA
	۲۲۲۲	۲/۲۷	۴/۱۴	۴۲۶	۵۴۳	۲/۶۵	II	I	E	
	۲۲۵۸	۱/۵	۶/۳۳	۴۳۰	۳۷۹	۱/۶۷	II	I	E	
کژدمی	۳۷۰۴	۱/۳۶	۵/۲۴	۴۳۸	۲۴۷	۲/۱۲	III, II	M	E	IIA
	۳۷۳۲	۱/۶۲	۷/۴۶	۴۴۱	۳۶۳	۲/۰۵	II	M	E	
	۳۷۷۴	۱/۳۷	۴/۵۷	۴۳۸	۲۹۱	۱/۵۷	III, II	M	G ^۳	
گدوان	۴۰۳۶	۰/۶۳	۱/۱	۴۳۷	۲۰۴	۰/۵۴	III	M	P ^۴	III
	۴۰۴۲	۰/۵۲	۰/۸۹	۴۳۹	۱۶۲	۰/۵۵	III	M	P	

جدول ۳- دستورالعمل‌های تفسیری برای کمیت، کیفیت و بلوغ سنگ [۳۴، ۳۵]

Quantity	TOC (%)	S1 (mg HC/g TOC)	S2 (mg HC/g TOC)
Poor	<۰/۵	<۰/۵	<۲/۵
Fair	۰/۱-۵	۰/۱-۵	۲/۵-۵
Good	۴-۱	۴-۱	۲۰-۵
Excellent	>۴	>۴	>۲۰
Quantity	HI (mg HC/g TOC)	S2/S3	Kerogen type
None	<۵۰	<۱	IV
Gas	۲۰۰-۵۰	۵-۱	III
Gas and Oil	۳۰۰-۲۰۰	۱۰-۵	II/III
Oil	۶۰۰-۳۰۰	۱۵-۱۰	II
Oil	>۶۰۰	>۱۵	I
Maturation	R0 (%)	T _{max} (°C)	TAI
Immature	۰/۰-۲/۶	<۴۳۰	۱/۲-۵/۶
Early mature	۰/۰-۶/۶۵	۴۴۰-۴۳۰	۲/۲-۶/۷
Peak mature	۰/۰-۶۵/۹	۴۵۰-۴۴۰	۲/۲-۷/۹
Late mature	۰/۱-۹/۳۵	۴۷۰-۴۵۰	۲/۳-۹/۳
Post mature	>۱/۳۵	>۴۷۰	>۳

² Excelent

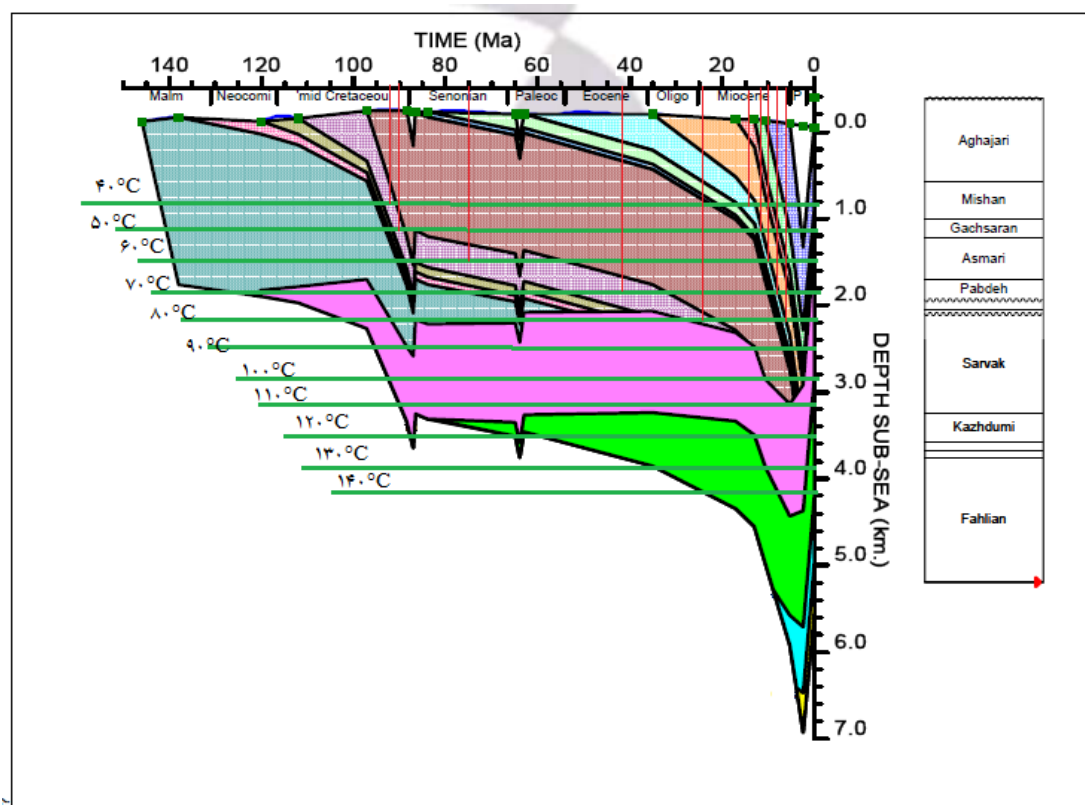
³ Good

⁴ Poor

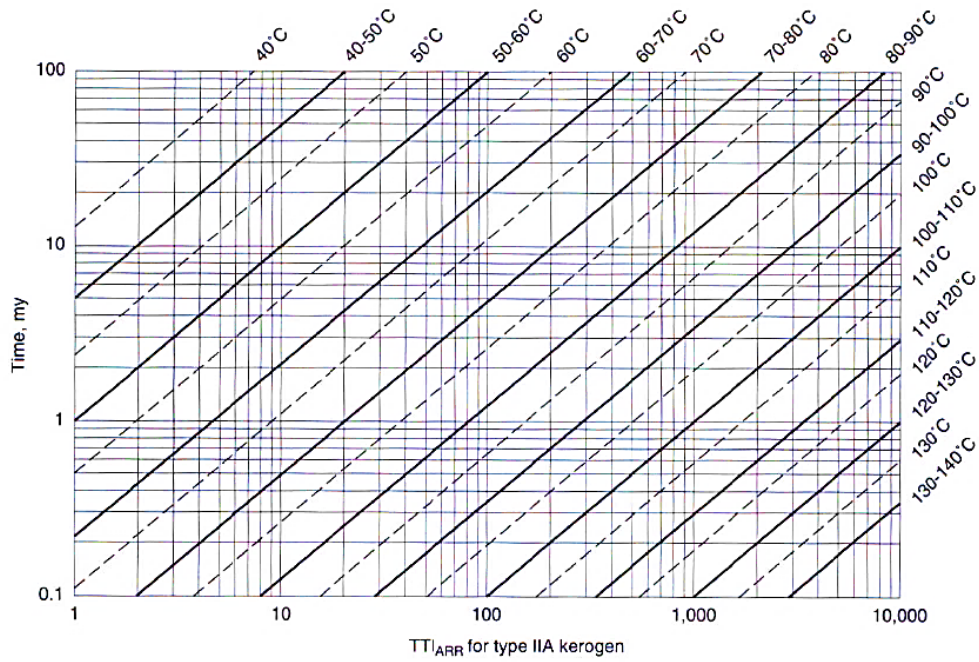
۴- روش مطالعه

نشان‌دهنده یک محدوده دمایی است. زمان در معرض قرارگیری سازند در هر محدوده دمایی، بر روی محور مختصات قائم درج تعیین می‌گردد. به ازای هر زمان در معرض، خط افقی رسم شده تا خط قطری مربوط به محدوده دمای خود را قطع نماید. از نقطه تقاطع خطی قائم رسم نموده تا محور افقی را قطع نموده و بدین ترتیب مقدار $TTIARR$ محدوده دمایی مربوطه تعیین می‌شود. برای هر محدوده دما، اینکار انجام شده و سرانجام $\sum TTIARR$ بدست می‌آید (جدول ۴). در انتها به کمک معادله ۷ و یا شکل ۳، درصد تبدیل نفت بدست آمد.

در این تحقیق علاوه بر داده‌های حاصل از نتایج آنالیز راک-اول (جدول ۲)، از نتایج مدل آرنیوس نیز استفاده شد (جدول ۴). برای تعیین تاریخچه تدفین سنگ‌های منشاء در این میدان، معادل عمق‌های مختلف تعیین و به کمک خطوط افقی و عمودی، زمان قرارگیری هر سازند در محدوده‌های دمایی، مشخص گردید (شکل ۴). رژیم حرارتی میانه سازند به عنوان پارامتری برای کل سازند در نظر گرفته شد. با استفاده از نمودارهای آرنیوس مربوط به هر کروژن، $TTIARR$ کروژن هر سازند به ازای محدوده‌های دمایی مختلف بدست می‌آید (شکل ۵). در این نمودارها هر یک از خطوط قطری توپر،



شکل ۴- تاریخچه تدفین سنگ منشاء در میدان نفتی آغاچاری به همراه خطوط هم دما



شکل ۵- رابطه بین زمان، دما، و TTI_{ARR} در کروژن نوع IIA [۳۲]

جدول ۴- پارامترهای مدل آرنیوس برای سنگ منشاء سازند کژدمی، پابده، و گدوان در میدان نفتی آغاچاری

سازند	نوع کروژن	عمق سازند (km)	محدوده دما (°C)	زمان در معرض قرارگیری (my ⁵)	TTI	ΣTTI	%X
کژدمی	IIA	۰/۱-۸۳۳/۱۶۶	۵۰-۴۰	۲/۵	۰	۲۵۷۵	۱۰۰
		۱/۱-۱۶۶/۵۰۰	۶۰-۵۰	۱۵	۱۵		
		۱/۱-۵۰۰/۸۳۳	۷۰-۶۰	۳۳	۱۶۰		
		۱/۲-۸۳۳/۱۶۶	۸۰-۷۰	۱۸	۴۰۰		
		۲/۲-۱۶۶/۵۰۰	۹۰-۸۰	۲۴	۲۰۰۰		
پابده	IIA	۰/۱-۸۳۳/۱۶۶	۵۰-۴۰	۳	۰	۵۵۲	۹۹/۵۹
		۱/۱-۱۶۶/۵۰۰	۶۰-۵۰	۲	۲		
		۱/۱-۵۰۰/۸۳۳	۷۰-۶۰	۲	۱۰		
		۱/۲-۸۳۳/۱۶۶	۸۰-۷۰	۲	۴۰		
		۲/۲-۱۶۶/۵۰۰	۹۰-۸۰	۶	۵۰۰		
گدوان	III	-	-	-	-	۰	۰

⁵ Million years

۵- بحث و بررسی

در تحقیق حاضر، سازند کژدمی مطابق جدول ۴ در محدوده دمایی ۴۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد و زمان در معرض قرارگیری ۲/۵ تا ۲۴ میلیون سال منجر به مقدار $\sum TTI_{ARR} = 2575$ می‌شود که بر اساس معادله ۷، نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد هیدروکربن تولید شده است ($X=100\%$). در صورتی که صرفاً مقدار بالای $\sum TTI_{ARR}$ در نظر گرفته شود، هیدروکربن زایشی گازی خواهد بود. بررسی دقیق‌تر تاریخچه تدفین (شکل ۴) نشان می‌دهد که مقدار ۲۰۰۰ واحد TTI_{ARR} مربوط به محدوده دمایی ۹۰-۸۰ سانتیگراد می‌باشد. در این محدوده مقدار ناچیزی از سنگ منشاء سازند قرار گرفته و بنابراین می‌بایست از آن صرف نظر کرد. بر این اساس می‌توان زایش هیدروکربور را عمدتاً نفتی دانست. همچنین برای سنگ منشاء سازند پابده با توجه به مقادیر $\sum TTI_{ARR} = 552$ و مقدار $X = 99/59$ ، پتانسیل هیدروکربن زایی خوب تا عالی بوده و وارد پنجره نفتی شده است. اما بدلیل فرونشست سازند از دمای ۵۰ سانتیگراد، عملاً نفت زایش شده قابل توجه نمی‌باشد. سنگ منشاء گدوان نیز بدلیل نوع کروژن (III) و TOC پائین، از پتانسیل نفت‌زایی ضعیفی برخوردار است. براساس مدل آرنیوس نیز با توجه به $\sum TTI_{ARR} = 0$ و $X=0\%$ این موضوع تأیید می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کاربرد روش سینتیکی مدل آرنیوس در ارزیابی سنگ‌های منشاء سازندهای گدوان، کژدمی و پابده واقع در یکی از چاه‌های واقع در میدان نفتی آغاچاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدل بیانگر آن است که سازندهای کژدمی و پابده در بیشتر پنجره نفتی قرار داشتند، ولی سازند پابده بدلیل حجم کم آن در این محدوده دمایی، سنگ منشاء مناسبی نیست. سازند گدوان نیز بدلیل نوع کروژن و تاریخچه تدفین، نرخ تبدیل بسیار پایین داشته و منبع هیدروکربوری مناسبی نمی‌باشد. سازند کژدمی بدلیل نوع کروژن مرغوب و حجم مناسب در محدوده نفت‌زایی، سنگ منشاء اصلی است. مقایسه نتایج مدل آرنیوس با سایر نتایج مبتنی بر آزمایش پیرولیز راک-اول، نشان دهنده انطباق زیاد آن‌ها با مدل آرنیوس است.

در این تحقیق کاربرد روش آرنیوس برای تعیین وضعیت سنگ‌های منشاء بیان شد. این روش دارای دقت بیشتری نسبت به روش لوپاتین است. در روش لوپاتین از بهسازی مدل TTI برای رسم نمودارهای زمان-دما به منظور تولید نفت استفاده می‌شود [۳۶]. برای آنکه روش آرنیوس از روش لوپاتین تمیز داده شود، وود [۲۲] شاخص زمان-دما را بر اساس معادله آرنیوس، TTI_{ARR} نامید تا از TTI لوپاتین تفکیک شود. او به منظور مدل‌سازی بلوغ سنگ منشاء، رابطه بین TTI_{ARR} و دما-زمان را برای برخی از تاریخچه‌های تدفین استفاده نمود. سپس روش خود را با روش لوپاتین مقایسه کرد و نتیجه گرفت که روش لوپاتین برای کروژن‌های با واکنش سریع، ارزیابی پایین داشته و در اختلافات زیاد حرارتی، تخمین و ارزیابی مناسبی ندارد [۳۶]. بدین جهت، در تحقیق حاضر روش آرنیوس بکار گرفته شد. چاه مورد مطالعه در میدان نفتی آغاچاری است و سازندهای گدوان، کژدمی و پابده به عنوان سنگ‌های منشاء احتمالی موجود در این میدان، بررسی شد. نتایج مطالعات قبلی بدست آمده از پیرولیز راک اول از لحاظ کمیت، کیفیت و بلوغ ماده آلی نشان داد که پتانسیل تولید هیدروکربن از نظر نوع کروژن در سازندهای پابده، کژدمی، و گدوان به ترتیب خیلی خوب، خوب تا خیلی خوب، و فقیر است و کروژن غالب در آن‌ها به ترتیب از نوع II، III-II و III می‌باشد (جدول ۳). در نظر گرفتن تاریخچه تدفین و مدل گرمایی نشان می‌دهد، سنگ منشاء موثر مربوط به سازند کژدمی است. نمودار نتایج راک اول برای $T_{max}-PI^6$ بیانگر آن است که، پابده و گورپی در اوایل پنجره نفتی قرار دارند، در صورتی که کژدمی و گدوان به مرحله اوج زایش نفت رسیده‌اند. از طرف دیگر مقدار متوسط پائین HI و نمودار $TOC-S1+S2$ نشان می‌دهد که سنگ منشاء گدوان ضعیف است [۳۷]. تحقیق دیگری براساس پتانسیل نسبت گاز-نفت ($GORP^7$) نشان داد که سازند پابده پتانسیل نفت زایی بیشتری نسبت به گاز داشته و کروژن آن نوع II و غنی از ماده آلی است پارامتر $GORP$ برای کژدمی ۰/۵۵-۰/۶ و گدوان ۰/۸۳-۱ می‌باشد. مطالعه اثر ماتریکس نشانگر نابالغ بودن سنگ منشاء پابده و بلوغ کژدمی و گدوان است [۳۸].

⁶ Production Index

⁷ Gas-Oil Ratio Potential

منابع

- [10] Chen, Z., Liu, X., Guo, Q., Jiang, C., Mort, A., 2017, "Inversion of source rock hydrocarbon generation kinetics from Rock-Eval data", *Fuel* 194, 91-101.
- [11] Chen, Z., Liu, X., Osadetz, K.G., 2019, "Petroleum generation kinetic models for Late Ordovician kukersite Yeoman Formation source rocks, Williston Basin (southern Saskatchewan), Canada", *Fuel* 241, 234-246.
- [12] Burnham, A.K., 2019, "Kinetic models of vitrinite, kerogen, and bitumen reflectance", *Organic geochemistry* 131, 50-59.
- [13] Chen, Z., Guo, Q., Jiang, C., Liu, X., Reyes, J., Mort, A., Jia, Z., 2017, "Source rock characteristics and Rock-Eval-based hydrocarbon generation kinetic models of the lacustrine Chang-7 Shale of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China", *International Journal of Coal Geology* 182, 52-65.
- [14] Burnham, A.K., 2015, "A Simple Kinetic Model of Oil Generation, Vaporization, Coking, and Cracking", *Energy and Fuels* 29 (11), 7156-7167.
- [15] Bordenave, M. L., Burwood R., 1990, "Source rock distribution and maturation in Zagros belt: province Asmari and Bangestan reservoir oil accumulation", *AAPG Bull.* 16 (1), 369-387.
- [16] کمالی، محمدرضا؛ بیجاری پور، آیتا؛ زینل زاده، ارسلان؛ ۱۳۸۴؛ "بازسازی تاریخچه تدفین و مدل سازی حرارتی سنگ منشاء گدوان در ناحیه فارس"، *مجله علوم دانشگاه تهران*، دوره ۳۱، شماره ۱، صفحه ۲۸۲ تا ۲۶۹.
- [17] کمالی، محمد رضا؛ شایسته، محمد رضا؛ ۱۳۸۷؛ "مبانی ژئوشیمی در اکتشاف نفت"، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، ایران.
- [18] Bordenave, M.L., 2002, "The Middle Cretaceous to Early Miocene Petroleum System in the Zagros Domain of Iran, and its Prospect Evaluation", *AAPG Annual Meeting*, March 10-13, Houston, Texas.
- [19] Asadi Mehmandousti, E., Adabi, M. H., Bowden, S. A., Alizadeh, B., 2015, "Geochemical investigation, oil-oil and oil-source rock
- [1] Hunt, J.M., 1995, "Petroleum geochemistry and geology", 2ed. New York, W.H. Freeman and Company, p.743.
- [2] Espitalié, J., Madec, M., Tissot, B., 1980, "Role of Mineral Matrix in Kerogen Pyrolysis: Influence on Petroleum Generation and Migration". *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 4, 59-66.
- [3] Lafargue, E., Espitalié, J., Marquis, F., Pillot, D., 1998, "Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and in soil contamination studies". *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 53 (4), 421-437.
- [4] علیزاده، بهرام؛ جنت مکان، ندا؛ قلاوند، هرمز؛ حیدری فرد، محمد حسین؛ ۱۳۹۱؛ "مطالعه ژئوشیمیایی و تأثیر تغییرات محیط رسوبی بر پتانسیل هیدروکربنی سازند پابده در میدان نفتی منصوره"، *مجله زمین شناسی نفت ایران*، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۱ تا ۲۲.
- [5] Sweeney, J. J., Burnham, A. K., 1990, "Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics", *AAPG Bull.* 74, 1559-1570.
- [6] علیزاده، بهرام؛ صراف دخت، هاشم؛ ۱۳۹۰؛ "ارزیابی ژئوشیمیایی سازندهای سنگ منشاء در میدان نفتی کیلور کریم، جنوب غرب ایران"، *مجله زمین شناسی نفت ایران*، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۱۰۹ تا ۱۲۵.
- [7] کمالی، محمد رضا؛ ۱۳۸۷؛ "کاربرد ژئوشیمی آلی در اکتشاف نفت"، پژوهشگاه صنعت نفت.
- [8] رضایی، محمد رضا؛ ۱۳۸۳؛ "زمین شناسی نفت"، انتشارات علوی، تهران، ۵۵۲ صفحه.
- [9] کسایی نجفی، م.م.، افتخاری، ن.، ۱۳۸۶؛ "تعیین پارامترهای سینتیکی مواد آلی در سنگ های مادر با استفاده از دستگاه راک-اول"، *مهندسی معدن و متالوژی*، دوره ۱۸، شماره ۶۷، صفحه ۱۹ تا ۲۶.

- [30] Behar, F., Beaumont, V., Pentea do, B., 2001, "Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments", *Oil & Gas Science and Technology-Rev* 56, 111-134.
- [۳۱] عبدل‌زاده، سحر؛ کمالی، محمد رضا؛ امیری‌بختیار، حسن؛ شایسته، مسعود؛ موسوی، میرحسن؛ ۱۳۸۹؛ "ارزیابی پتانسیل هیدروکربورزائی سنگ‌های منشاء احتمالی در میدان نفتی آغاچاری"، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، دوره ۴۱، شماره ۴، صفحه ۴۳ تا ۵۶.
- [32] Hunt, J. M., Lewan, M. D., Hennen, R. J.C., 1991, "Modelling oil generation with time-temperature index graphs on the Arrhenius equation", *AAPG Bull.* 75, 795-807.
- [۳۳] سلطانی، زهرا؛ علیزاده، بهرام؛ صراف دخت، هاشم؛ ۱۳۹۴؛ "تعیین پارامترهای کینتیکی (E و A) در سنگ منشاء کژدمی با استفاده از دستگاه راک-اول"، هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه دامغان.
- [34] Baik, H.Y., Richtmyer, A., Asafu-Adzaye, N.B., Adzei-Akpor, N., Manu, T., 2000, "Tectono stratigraphy and hydrocarbon potential of an active transform margin basin: Accra/ Keta Basin, Ghana, West Africa", *Aapg Annual Convention, New Orleans, Louisiana, AAPG Search and Discovery Abstract Article No.* 9091.
- [35] Getty Oil International 1985, "Exploration well prognosis Haho1, offshore Togo", *Rapport interne B. N R M Togo*, p.75.
- [36] Lopatin, N.V., 1976, "The determination of the influence of temperature and geologic time on the catagenic processes of calcification and oil - gas formation, Moscow", *SSSR* p. 361-366.
- [37] Alizadeh, B., Khani, B., Alipour, M., Shayesteh, M., Hosseini, S.H., 2012, "Thermal modeling and organic geochemical appraisal of petroleum source rocks within the Aghajari Oilfield, SW Iran", *JGeope* 2 (2), P. 1-10.
- [۳۸] عدالتی‌منش، نرگس؛ کدخدائی، علی؛ علیزاده، بهرام؛ حیدری‌فرد، محمدحسین؛ خانی، بهزاد؛ ۱۳۹۳؛ "مطالعه ژئوشیمیایی سنگ‌های منشاء نفت در میدان نفتی آغاچاری بر اساس داده‌های راک ایول"، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، دوره ۵۷، شماره ۴، صفحه ۸۷ تا ۱۰۲.
- correlation in the Dezful Embayment, Marun Oilfield, Zagros, Iran*", *Marine and Petroleum Geology* 68, 1-16.
- [20] Habicht, J. K. A., 1964, "Comment on the history of migration in the Gifhorn Trough", *Proceedings of the sixth World petroleum Congress, paper 19-PD2 sec. 1*, p. 480.
- [21] Tissot, B., 1969, "Première données sur les mécanismes et la cinétique de la formation du pétrole dans les sédiments: Simulation d'un schéma réactionnel sur ordinateur", *Revue de l'Institut Français du Pétrole B.* 24 (4), 470-501
- [22] Wood, D. A., 1988, "Relationships between thermal maturity indices calculated using Arrhenius equation and Lopatin method: Implications for petroleum exploration", *AAPG Bull.* 72, 115-134.
- [۲۳] اشکان، علی محمد؛ ۱۳۸۳؛ "اصول مطالعات ژئوشیمیایی سنگ‌های منشاء هیدروکربوری و نفت‌ها با نگرش ویژه به حوضه رسوبی زاگرس"، مدیریت اکتشاف، اداره مطالعات و تحقیقات ژئوشیمی.
- [24] Braun, R.L., Burnham, A.K., 1987, "Analysis of chemical reaction kinetics using a distribution of activation energies and simpler models", *Energy Fuels* 1, 153-61.
- [25] Burnham, A.K., Braun, R.L., 1999, "Global kinetic analysis of complex materials", *Energy Fuels* 13(1), 1-22.
- [26] Tsamba, A.J., Yang, W., Blasiak, W., 2006, "Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells", *Fuel Process Technology* 87, 523-30.
- [۲۷] مطیعی، ه.، ۱۳۷۴. زمین‌شناسی نفت زاگرس، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، جلد اول، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۰۹ ص
- [28] Bordenave, M.L., Hegre, J.A., 2010, "Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems", *Geological Society, London, Special Publications* 330, 291- 353.
- [29] James G.A., Wynd J.C., 1965, "Stratigraphy nomenclature of Iranian Oil consortium Agreement Area", *American association petroleum geologist bulletin* 49, 2118-2245.