

تعیین پارامترهای سینتیکی مواد آلی در سنگ های مادر با استفاده از دستگاه "Rock-Eval"

محمد کسایی نجفی^۱ و نصرا. افتخاری^۲

چکیده

با اینکه سازوکار تجزیه کروژن پیچیده است و هنوز به خوبی شناخته شده نیست، با انجام آزمایش‌های پیرولیزی در سیستم‌های بسته و یا باز، می‌توان به پارامترهای سینتیکی دست یافت که هم با داده‌های آزمایشگاهی و هم زمین شناسی طبیعی مطابقت داشته باشند. در این مطالعه، برای تعیین پارامترهای سینتیکی از بلوغ مصنوعی با استفاده از سیستم باز (Rock-Eval) استفاده شد. با تنظیم دستگاه "Rock-Eval" توسط استانداردهای مختلف معادله دماهای واقعی دستگاه به دست آمد. با تحلیل نمونه‌های سنگ‌های مادر پابده، گرو و کژدمی در نرخ‌های حرارتی ۲۵، ۱۵، ۱۰ و ۵ درجه سانتی گراد در دقیقه و با استفاده از روش واکنش‌های درجه اول موازی به کار برده شده در نرم افزار "Optkin" پارامترهای سینتیکی سنگ‌های مادر مذکور شامل توزیع انرژی فعال سازی (اکتیواسیون)، ثابت آرنیوس و مقادیر هیدروکربورهای تشکیل شده تعیین شد.

کلمات کلیدی

پارامترهای سینتیکی، سنگ مادر هیدروکربوری، روش "Rock-Eval"، پابده، کژدمی، گرو

Determination of Source Rocks Kinetic Parameters by Using Rock-Eval Pyrolysis System

M. Kassaie N.; N Eftekhari

ABSTRACT

Despite the fact that kerogen decomposition has not been yet very well understood, it is possible to obtain kinetic parameters which correlate with both empirical and natural geologic data by pyrolysing samples in closed and open systems. In this study, in order to determine hydrocarbon source rocks kinetic parameters, synthetic maturation by using open pyrolysis system (Rock-Eval) was used. In order to determine the equation of the real pyrolysis temperatures, the Rock-Eval pyrolysis oven was calibrated against three standard samples. Three source rock samples from three well known Iranian source rock formations namely Pabdeh, Garu and Kazhdumi were analyzed at temperature rates of 25, 15, 10 and 5°C/min and their kinetic parameters including activation energy distribution, Arrhenus coefficient and the amount of generated hydrocarbon were determined.

KEYWORDS

kinetic parameters; source rock; Pabdeh, Kazhdumi; Garu

^۱ عضو هیأت علمی پژوهشگاه صنعت نفت: kassaie@ripi.ir

^۲ عضو هیأت علمی پژوهشگاه صنعت نفت: eftekhari@ripi.ir

همچنین دانستن پارامترهای سینتیکی (توزیع انرژی فعال سازی) مواد آلی موجود در سنگ مادر لازم است. شرایط زمین شناسی لازم برای مدل را زمین شناسان می‌توانند با دقت خوبی برآورد کنند، اما این امر در مورد شرایط حرارتی دیرینه که معمولا کم و بیش ناشناخته هستند، صدق نمی‌کند. پارامترهای سینتیکی مواد آلی را باید بر اساس کارهای آزمایشگاهی با بررسی بلوغ مصنوعی (پیرولیز) ماده آلی نماینده سنگ مادر مورد نظر تعیین کرد.

در اغلب حالات، زمین شناسانی که از این مدل‌ها استفاده می‌کنند، از داده حرارتی سنگ مادر مربوط به زمان حاضر و داده‌های سینتیکی گنجانده شده در برنامه (به صورت default) برای هر یک از سه نوع کروژن استفاده می‌کنند.

هنگام استفاده از مدل بایستی در نظر داشت که گرادیان حرارتی که به این روش محاسبه می‌شود تا حد زیادی به پارامترهای سینتیکی انتخاب شده در برنامه بستگی دارد؛ زیرا گاهی پارامترهای سینتیکی که به صورت "default" در مدل گنجانده می‌شوند با پارامترهای سینتیکی حقیقی سنگ مادر مورد نظر تفاوت دارند. گرادیان حرارتی محاسبه شده نیز به مدل ریاضی به کار برده شده بستگی دارد. این مدل‌های ریاضی معمولا مدل‌های به نسبت ساده‌ای هستند که در آنها با در نظر گرفتن تعداد n واکنش شیمیایی موازی بر اساس معادلات درجه اول ارنیوس پایه گذاری شده‌اند. حتی اگر پارامترهای سینتیکی خاص مواد آلی سنگ مادر مورد مطالعه تعیین شوند، دقت پارامترهای به دست آمده به دقت آزمایش‌های بلوغ مصنوعی (پیرولیز) انجام شده بستگی دارند.

مطالعات انجام شده قبلی

معمولا روشی که برای تعیین پارامترهای سینتیکی به کار می‌رود بر بلوغ مصنوعی مواد آلی در آزمایشگاه استوار است. برای تعیین این پارامترها Tissot و Espitalie هم از داده‌های بلوغ طبیعی و هم از داده‌های مصنوعی استفاده کردند [۲]. اخیراً ژئوشیمیست‌های دیگری برای تعیین پارامترهای سینتیکی به طور کل از روش بلوغ مصنوعی با استفاده از سیستم باز استفاده کردند. در این مقادیر هیدروکربورهای در طول زمان پیرولیز کردن سنگ مادر در حرارت‌های برنامه ریزی شده (با دستگاه "Rock-Eval") تشکیل می‌شوند، اندازه گیری شده است [۱]، [۴]. روش‌های دیگری مانند روش پیرولیز آب دار نیز پیشنهاد شده است [۳].

تحول حرارتی مواد آلی دفن شده به همراه رسوبات را می‌توان با استفاده از قوانین نرخ و معادله آرنیوس درک و مدل سازی کرد. اما برای مدل سازی واکنش‌های آلی در نرخ‌های گرمادهی در مقیاس زمین شناسی دانستن انرژی فعال سازی (اکتیواسیون - E) و ضریب فرکانس (A-frequency factor) لازم است. با اینکه سازوکار تجزیه کروژن پیچیده است و هنوز به خوبی شناخته شده نیست، با انجام آزمایش‌های پیرولیزی در سیستم‌های بسته و یا باز می‌توان به پارامترهای سینتیکی دست یافت به طوری که با داده‌های آزمایشگاهی و زمین شناسی طبیعی مطابقت داشته باشند. الگوریتم‌هایی که در آنها بلوغ آلی به صورت یک سری واکنش‌های درجه اول موازی در محدوده‌ای از انرژی فعال سازی در نظر گرفته می‌شود به طور گسترده‌ای در مورد داده‌های حرارتی ناهمسان به کار برده شده‌اند. این روش به نسبت ساده است و به طور قطع، برخورد دقیقی با مسأله بلوغ به حساب نمی‌آید، ولی با استفاده از این روش پارامترهای سینتیکی قابل قبولی برای تخمین شرایط زمین شناسی به دست می‌آید. صحت تعمیم دادن این پارامترهای سینتیکی به دست آمده در آزمایشگاه به دماها و نرخ‌های حرارت دهی در مقیاس زمین شناسی هنوز مورد سؤال است. با این مشکل فقط با مطابقت دادن داده‌های آزمایشگاهی با مشاهدات زمین شناسی می‌توان برخورد کرد. در این مطالعه ضمن بررسی امکان انجام تحلیل‌ها و مطالعات سینتیکی در واحد ژئوشیمی پژوهشگاه صنعت نفت، نمونه‌هایی از سنگ‌های مادر معروف ایران بررسی سینتیکی شده‌اند.

لزام انجام مطالعات سینتیکی

در سال‌های اخیر، تمایل به استفاده از مدل‌های ریاضی که برای شبیه سازی ژنز هیدروکربور در حوضه‌های رسوبی به کار می‌روند، همواره رو به افزایش بوده است. یکی از دلایل این امر این است که امروزه زمین شناسان و ژئوشیمیست‌ها با به کار گیری کامپیوتر شخصی و نصب این نوع مدل‌ها بر روی آن می‌توانند مقدار هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر و همچنین زمان تشکیل آن را پیش بینی کنند. سپس می‌توان این عوامل را در ارتباط با زمان تشکیل ساختمان‌های مخزنی بررسی کرد.

هنگام استفاده از این مدل‌ها دانستن شرایط حرارتی (تدفین و جریان‌های گرمایی) که سنگ مادر در آن قرار داشته و

در این مطالعه به منظور بررسی امکان تعیین پارامترهای سینتیکی با دستگاه "Rock-Eval" از نمونه سنگ‌های مادر معروف ایران شامل پابده، کژدمی و گرو استفاده شد. سنگ‌های مادر به سنگ‌های رسوبی غنی از مواد آلی گفته می‌شود که در اثر تحمل گرمای ناشی از دفن شدن آن‌ها در اعماق زمین (سوبسیدانس) در آستانه حرارتی مشخصی شروع به تولید نفت و گاز می‌کنند. مشخصات ژئوشیمیایی نمونه‌های استفاده شده در جدول (۱) آمده است.

با هدف به دست آوردن نتایج حرارتی مطلوب، پودر نمونه‌های سنگ مادر مذکور چندین بار با نرخ‌های حرارتی ۲۵، ۱۵، ۱۰ و ۵ درجه سانتی گراد در دقیقه براساس روش و شرایط شناخته شده "Rock-Eval" پیرولیز شدند که نتایج هرکدام از نمونه در جدول‌های (۲، ۳ و ۴) آمده است. توضیح این نکته لازم است که اختلاف اندک در نتایج پارامترهای قید شده در این جدول‌ها از جمله درصد TOC از حد خطای مجاز قید شده برای دستگاه است به مراتب کمتر است.

نتایجی که در این مطالعه ارائه شده است از آنالیز منحنی‌های "S2" بسیار زیادی (که از پیرولیز کردن سنگ مادر با دستگاه "Rock-Eval" در نرخ‌های حرارتی مختلف حاصل شدند) به دست آمده‌اند. برای هرآزمایش پیرولیز ۲۰۰ نقطه اندازه‌گیری که تشکیل دهنده منحنی "S2" هستند توسط نرم افزار "Rockplus" ثبت شد.

برای تعیین پارامترهای سینتیکی، به طور مسلم، داشتن دماهای پیرولیزی حقیقی برای نمونه مورد آزمایش لازم است. در دستگاه‌های "Rock Eval II" و "Oil Show Analyzer" محل ترموکوپل در زیر ظرف نمونه قرار داده شده است که موجب می‌شود دمای اندازه‌گیری شده دمای حقیقی نمونه نباشد.

سرگذشت حرارتی نمونه‌ها را می‌توان با کالیبره کردن دستگاه با نمونه‌های استاندارد که دمای قله S₂ آنها معلوم است، تعیین کرد. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز این نمونه‌های استاندارد می‌توان ارتباط بین دمای حقیقی و اندازه‌گیری شده توسط دستگاه را به دست آورد با تعیین ضریب‌های a و b به منظور استفاده در معادله خطی زیر به دست آورد:

$$T_{(true)} = aT_{(prog)} + b \quad (1)$$

در فرمول (۱): T_(true) - دمای واقعی قله منحنی S₂ - ضریب زاویه خط و T_(prog) - دمای برنامه ریزی (دمای اندازه‌گیری شده) با دستگاه است.

در این مطالعه برای کالیبره کردن کوره پیرولیز از سه نمونه استاندارد؛ که از شرکت IFP فرانسه تهیه شده است، استفاده شد. با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز این نمونه‌ها با دستگاه "Rock Eval II" ضریب a برابر با ۰/۹۹۰۲ و ضریب b برابر با ۴۱/۳۵۵۱ محاسبه شد. برای مثال در اولین آزمایش مندرج در جدول (۲) T_(prog) (دمای ثبت شده توسط دستگاه) = ۴۲۴ (T_{max}+1) بوده است که با دخالت دادن ضرایب فوق در معادله مذکور دمای حقیقی مانند زیر خواهد بود:

$$T_{(true)} = 0.9902 \times 424 + 41.355 = 461.20 \quad (2)$$

جدول (۱): مشخصات ژئوشیمیایی نمونه‌های مطالعه شده.

Tmax°C	Tpeak°C	S1 mg HC/g _{rock}	S2 mg HC/g _{rock}	(mgHC/gTOC HI	TOC(%)	
423	461	1.21	23	582	3.98	نمونه سازند پابده
423	462	4.00	59	582	10.21	نمونه سازند کژدمی
424	463	4.08	77	643	12.02	نمونه سازند گرو

جدول (۲): نتایج آزمایش نمونه‌های سازند پابده در نرخ‌های حرارتی ۲۵، ۱۵، ۱۰ و ۵ درجه سانتی گراد در دقیقه با دستگاه "Rock Eval"

Sample	Heating Rate	Tmax°C	Tpeak°C	S1 mg HC/g _{rock}	S2 mg HC/g _{rock}	HI (mgHC/gTOC)	TOC(%)
PB-712-R1A	25C/min	423	461.20	1.21	23.27	583	3.99
PB-712-R1B	25C/min	422	460.21	1.23	23.17	582	3.98
PB-712-R1C	25C/min	423	461.20	1.23	23.15	583	3.97
PB-712-R1D	25C/min	423	461.20	1.18	23.07	581	3.97
PB-A712-R2A	15C/min	411	449.32	1.23	23.66	592	4.00
PB-A712-R2B	15C/min	410	448.33	1.33	23.61	587	4.02
PB-A712-R2C	15C/min	412	450.31	1.29	23.69	592	4.00
PA-A712-R3A	10C/min	405	443.38	1.28	23.37	587	3.98
PA-A712-R3B	10C/min	405	443.38	1.28	23.45	588	3.99
PA-A712-R3C	10C/min	404	442.39	1.24	23.40	588	3.98
PB-A712-R4A	5C/min	392	430.50	1.26	22.92	591	3.88

PB-A712-R4B	5C/min	393	431.49	1.27	22.92	589	3.89
PB-A712-R4C	5C/min	390	428.52	1.35	22.97	589	3.90
PB-A712-R4D	5C/min	392	430.50	1.29	22.77	585	3.89

جدول (۳): نتایج آزمایش نمونه های سازند کژدمی در نرخ های حرارتی ۲۵، ۱۵، ۱۰ و ۵ درجه سانتی گراد در دقیقه با دستگاه "Rock Eval"

Sample	Heating Rate	Tmax°C	Tpeak°C	S1 mg HC/g _{rock}	S2 mg HC/g _{rock}	HI (mgHC/gTOC)	TOC(%)
KZ-BA128-R1A	25C/min	424	462.19	4.02	60.05	586	10.25
KZ-BA128-R1B	25C/min	423	461.20	3.96	59.26	580	10.21
KZ-BA128-R1C	25C/min	423	461.20	4.03	59.00	580	10.17
KZ-BA128-R2A	15C/min	410	448.33	3.99	60.39	586	10.31
KZ-BA128-R2B	15C/min	413	451.30	3.85	59.89	582	10.29
KZ-BA128-R2C	15C/min	412	450.31	3.87	59.90	582	10.30
KZ-BA128-R3A	10C/min	403	441.40	3.80	59.50	587	10.13
KZ-BA128-R3B	10C/min	404	442.39	4.08	59.84	587	10.19
KZ-BA128-R3C	10C/min	404	442.39	3.80	59.20	584	10.14
KZ-BA128-R4A	5C/min	393	431.49	3.85	58.41	584	10.00
KZ-BA128-R4B	5C/min	391	429.51	4.00	58.50	585	10.00
KZ-BA128-R4C	5C/min	391	429.51	3.95	58.50	586	9.98

جدول (۴): نتایج آزمایش نمونه های سازند گرو در نرخ های حرارتی ۲۵، ۱۵، ۱۰ و ۵ درجه سانتی گراد در دقیقه با دستگاه "Rock Eval"

Sample	Heating Rate	Tmax°C	Tpeak°C	S1 mg HC/g _{rock}	S2 mg HC/g _{rock}	HI (mgHC/gTOC)	TOC(%)
MBG5012R1A	25C/min	424	462	4.18	77.27	644	11.99
MBG5012R1B	25C/min	424	462	4.16	77.51	640	12.11
MBG5012R1C	25C/min	425	463	3.91	76.92	644	11.95
MBG5012R2A	15C/min	414	452	4.01	77.00	647	11.91
MBG5012-R2B	15C/min	415	453	3.86	75.77	649	11.67
MBG5012R2C	15C/min	415	453	3.86	77.40	652	11.87
MBG5012R3A	10C/min	409	447	3.8	78.09	654	11.94
MBG5012R3B	10C/min	409	447	3.88	76.11	654	11.64
MBG5012R3C	10C/min	409	447	3.92	77.14	658	11.72
MBG5012R4A	5C/min	396	434	3.71	75.98	666	11.40
MBG5012R4B	5C/min	397	435	3.72	77.29	670	11.54
MBG5012R4C	5C/min	398	436	3.75	75.94	665	11.42

در بهینه سازی ریاضی که با استفاده از نرم افزار "Optkin" انجام می شود، هدف دستیابی به بهترین انطباق برای توزیع انرژی فعال سازی (X_{i0} , E_i و A) است؛ به طوری که انرژی های فعال سازی در فواصل منظم ۱ تا ۲ کیلوکالری در محدوده ای بین ۴۰ تا ۸۰ کیلوکالری از یکدیگر متمایز شوند. در برنامه بهینه سازی مقادیر A و X_{i0} به صورت نامنظم (random) برای به حداقل رساندن تابع خطا استفاده می شوند. این تابع خطا از حاصل جمع اختلاف بین داده های محاسبه شده و مشاهده شده برای نرخ هیدروکربور به دست می آید.

بحث

همان طور که در مقدمه توضیح داده شد، در روش واکنش های موازی نرخ هیدروکربور تشکیل شده در هر یک از واکنش ها به ضرایب A و K بستگی دارد. با اینکه مواد آلی در نمونه های سنگ مادر سازندهای پابده، کژدمی و گرو هر سه

کاربرد نرم افزار "Optkin"، اصول به کار برده شده و بهینه سازی ریاضی

نرم افزار "Optkin" بر اساس مدل سینتیکی [۲] پایه گذاری شده است که با استفاده از آن می توان هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر را (که بر اثر به وقوع پیوستن واکنش های شکست حرارتی مولکول های کروژن به سبب افزایش حرارت در طول زمان زمین شناسی صورت می گیرد) پیش بینی کرد. این نرم افزار به طور ویژه برای فرایند کردن داده های حاصل از دستگاه "Rock-Eval" طراحی شده است.

تجزیه کروژن به هیدروکربور بر اثر وقوع یک سری واکنش های شیمیایی موازی صورت می گیرد. هر واکنش شیمیایی از معادلات سینتیکی درجه اول تبعیت می کند که به

وسیله قانون آرنیوس توصیف می شود.

کروژن نوع II هستند)، ضرایب به دست آمده برای مواد آلی هریک از این سازندها متفاوت است (مقادیر مندرج در شکل‌های ۱-الف، ۲-الف و ۳-الف). بنابراین نرخ تشکیل هیدروکربور و در نهایت مقدار کل آن متفاوت خواهد بود. در مدل‌هایی که مقدار هیدروکربور تشکیل شده در حوضه‌های رسوبی مختلف را پیش بینی می‌کنند برای هریک از انواع از کروژن‌ها، از جمله کروژن نوع II از مقادیر "default" گنجانده شده در برنامه استفاده می‌شود. بر این اساس، هنگام مدل سازی مقادیر هیدروکربور تشکیل شده از سنگ مادر در طول زمان زمین شناسی، به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر به جای استفاده از ضرایب "default" بایستی ضرایب سینتیکی سنگ مادر مورد نظر را تعیین کرد. همان طور که در این مطالعه نیز نشان داده شد، این کار با استفاده از دستگاه "Rock-Eval" امکان پذیر است.

نتایج

۱- توزیع انرژی فعال سازی (اکتیواسیون): در شکل‌های (۱-الف، ۲-الف و ۳-الف) توزیع انرژی فعال سازی، که از بهینه سازی مقادیر پتانسیل اولیه "Xi0" و انرژی فعال سازی به دست آمده اند، نشان داده شده است.

ثابت آرنیوس (A)، حاصل جمع توان نفت زایی (اندکس هیدروژن) و تابع خطا (error function) نیز بر روی نمودار نشان داده شده است.

نتایج توزیع انرژی فعال سازی به دست آمده معمولاً نشان دهنده ویژگی نوع ماده آلی موجود در سنگ مادر مورد آزمایش است [۲]. شکل ظاهری نمودار توزیع به شکل منحنی "S2" مربوطه شباهت دارد.

جالب‌ترین جنبه توزیع انرژی‌های فعال سازی به دست آمده از بلوغ مصنوعی ماده آلی در آزمایشگاه، مفید بودن آنها برای شبیه سازی تکامل طبیعی ماده آلی؛ که در نرخ های گرمادهی کند در حدود 10^{-11} در دقیقه صورت می گیرد، است. بررسی صحت این نوع برآوردها همیشه مشکل بوده است، اما در تشکیلات رسوبی؛ که داده‌های زمین شناسی و ژئوشیمیایی آنها (داده‌ها تدفینی، کرایان حرارتی، اندکس هیدروژن، انعکاس ویتربیت و "Tmax") در دسترس است، می توان با استفاده از این توزیع‌ها پدیده های بلوغ طبیعی مواد آلی را شبیه سازی کرد.

۲- نرخ تشکیل هیدروکربور از سنگ مادر: در شکل‌های (۱-الف، ۲-الف و ۳-الف) منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های پیرولیزی و منحنی محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. منحنی‌هایی که از آنالیزهای پیرولیزی حاصل شده اند به صورت نقطه چین

و منحنی‌های محاسبه‌ای به صورت خط پیوسته نشان داده شده‌اند.

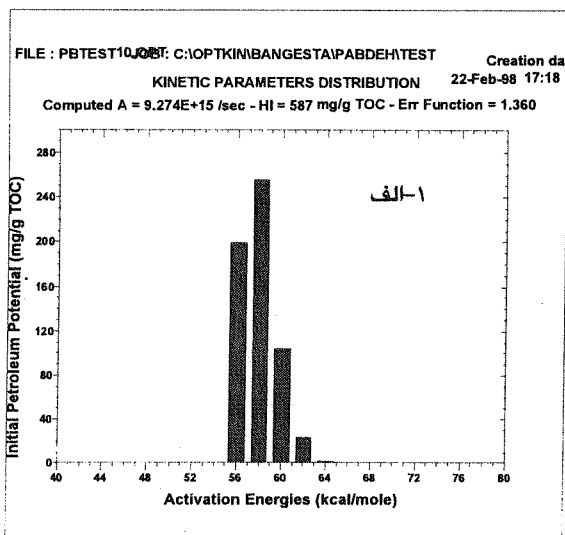
۳- مقدار هیدروکربور تشکیل شده: در شکل‌های (۱-الف، ۲-الف و ۳-الف) منحنی‌های مقادیر هیدروکربورهای تشکیل شده بر اثر آنالیزهای پیرولیزی و مقادیر محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. منحنی‌هایی که از آنالیزهای پیرولیزی حاصل شده‌اند به صورت نقطه چین و منحنی‌های محاسبه‌ای به صورت خط پیوسته نشان داده شده‌اند. همان طور که در این نمودارها دیده می‌شود، کل مقدار هیدروکربور تشکیل شده در نهایت به اندازه کل توان هیدروکربورزایی (اندکس هیدروژن) رسیده است.

۴- نرخ تبدیل کروژن به هیدروکربور "Transformation Ratio": در شکل‌های (۱-الف، ۲-الف و ۳-الف) نرخ تبدیل (TR) کروژن به هیدروکربور در آنالیزهای پیرولیزی و نرخ‌های حاصل از محاسبه با یکدیگر مقایسه شده اند.

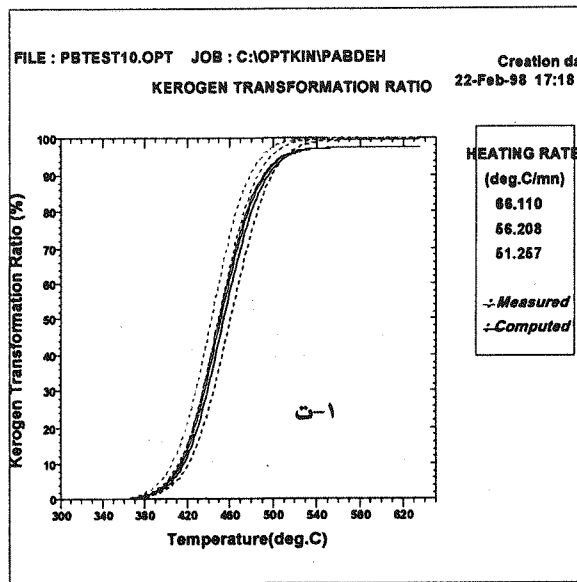
نرخ تبدیل از تقسیم مقدار هیدروکربور تشکیل شده بر مجموع توان هیدروکربورزایی (اندکس هیدروژن) در محدوده ای بین ۰ تا ۱۰۰ درصد به دست می‌آید.

سازند پابده

نمودارهای توزیع انرژی فعال سازی، نرخ تشکیل هیدروکربور از سنگ مادر، مقدار هیدروکربور تشکیل شده، نرخ تبدیل کروژن به هیدروکربور (Transformation Ratio) برای نمونه سنگ مادر پابده در شکل‌های (۲-الف تا ۳-الف) نشان داده شده است:



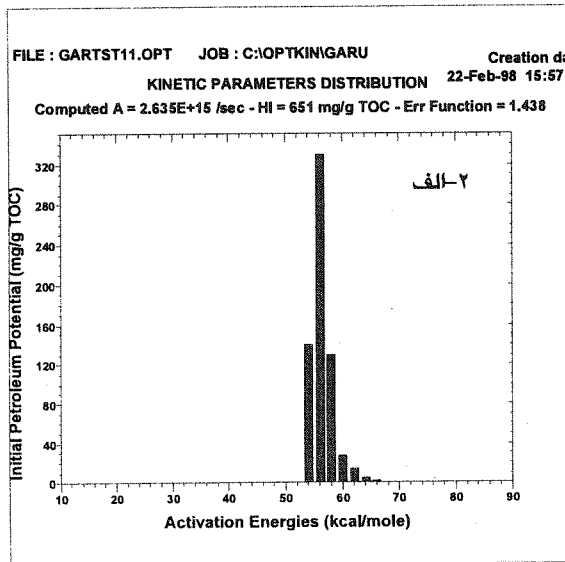
شکل (۱-الف): توزیع انرژی فعال سازی برای نمونه سازند پابده. پارامترهای سینتیکی دیگر شامل ثابت آرنیوس "A" مجموع پتانسیل نفت زایی "اندکس هیدروژن" و تابع خطا نیز بر روی نمودار نشان داده شده است.



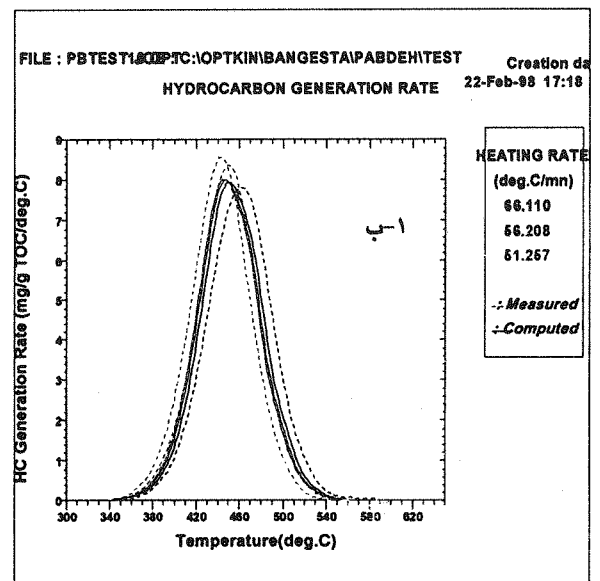
شکل (ا-ت). در این نمودار نرخ تبدیل (کروژن به هیدروکربور) اندازه گیری شده و محاسبه شده برای سازند پابده نشان داده شده است (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).

سازند گرو

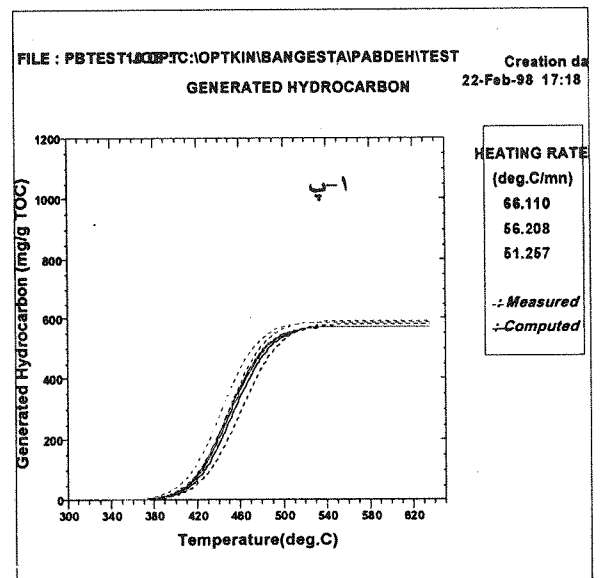
نمودارهای توزیع انرژی فعال سازی، نرخ تشکیل هیدروکربور از سنگ مادر، مقدار هیدروکربور تشکیل شده، نرخ تبدیل کروژن به هیدروکربور (Transformation Ratio) برای نمونه سنگ مادر سازند گرو در شکل های (الف تا ت) نشان داده شده است:



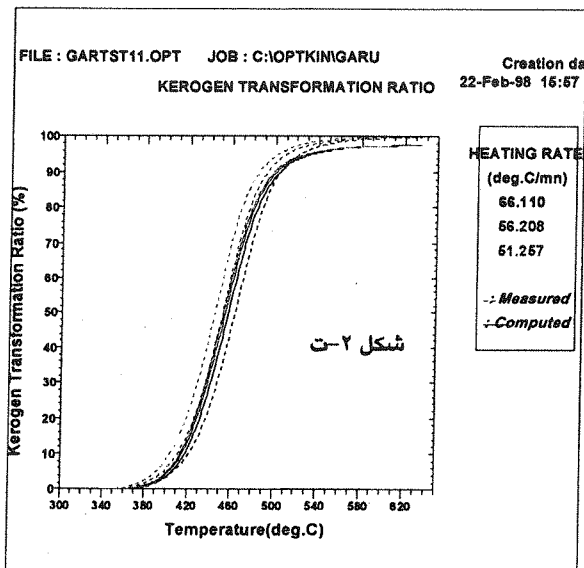
شکل (الف-۲): توزیع انرژی فعال سازی برای نمونه سازند گرو (پارامترهای سینتیکی دیگر شامل ثابت ارنیوس (A) مجموع پتایسیل نفت زایی "اندکس هیدروژن" و تابع خطا نیز بر روی نمودار نشان داده شده است).



شکل (ا-ب): نرخ تشکیل هیدروکربور از نمونه سنگ مادر سازند پابده (در این نمودار منحنی های "S2" حاصل از آزمایش های پیرولیزی نمونه نابالغ سازند پابده توسط دستگاه "Rock Eval" و منحنی های محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).



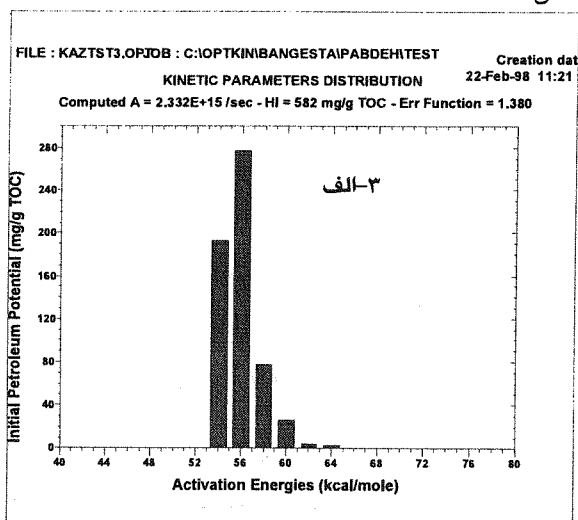
شکل (ا-پ). در این نمودار، مقدار هیدروکربور تشکیل شده بر اثر آنالیز پیرولیزی نمونه سنگ مادر سازند پابده و مقدار به دست آمده از محاسبات با یکدیگر مقایسه شده اند (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).



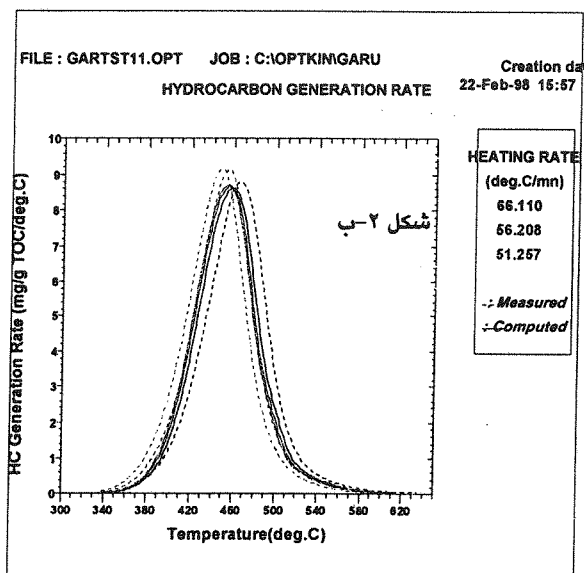
شکل (۲-ت): در این نمودار نرخ تبدیل (کروژن به هیدروکربور) اندازه گیری شده و محاسبه شده برای نمونه سازند گرو نشان داده شده است (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).

سازند کژدمی

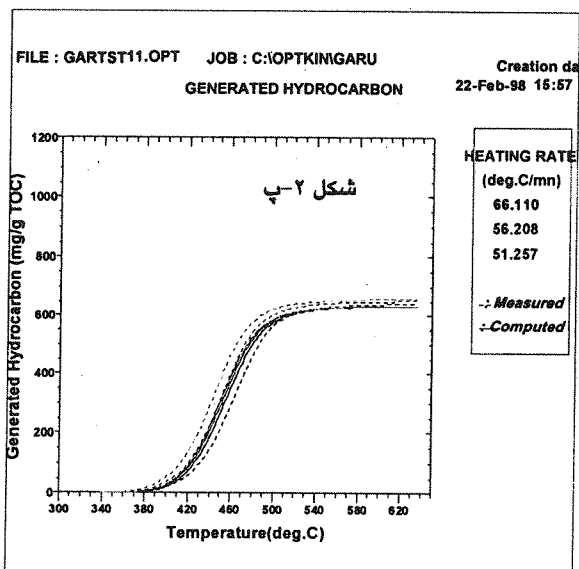
نمودارهای توزیع انرژی فعال سازی، نرخ تشکیل هیدروکربور از سنگ مادر، مقدار هیدروکربور تشکیل شده، نرخ تبدیل کروژن به هیدروکربور (Transformation Ratio) برای نمونه سنگ مادر سازند کژدمی در شکل های (۳-الف تا ت) نشان داده شده است:



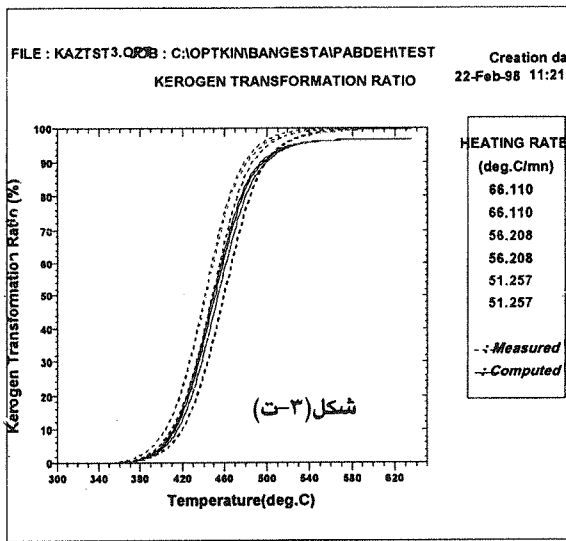
شکل ۳-الف. توزیع انرژی فعال سازی برای نمونه سازند کژدمی. (پارامترهای سینتیکی دیگر شامل ثابت ارنیوس (A) مجموع پتاسیل نفت زایی "ندکس هیدروژن" و تابع خطا نیز بر روی نمودار نشان داده شده است).



شکل (۲-ب): نرخ تشکیل هیدروکربور از نمونه سنگ مادر سازند گرو (در این نمودار منحنی های "S2" حاصل از آزمایش های پیرولیزی نمونه نابالغ سازند گرو توسط دستگاه "Rock Eval" و منحنی های محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).



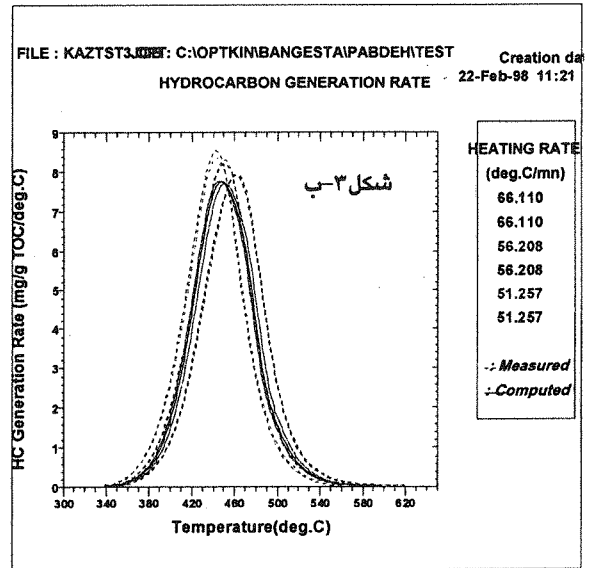
شکل (۲-پ): در این نمودار مقدار هیدروکربور تشکیل شده بر اثر آنالیز پیرولیزی نمونه سازند گرو و مقدار به دست آمده از محاسبات با یکدیگر مقایسه شده اند (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).



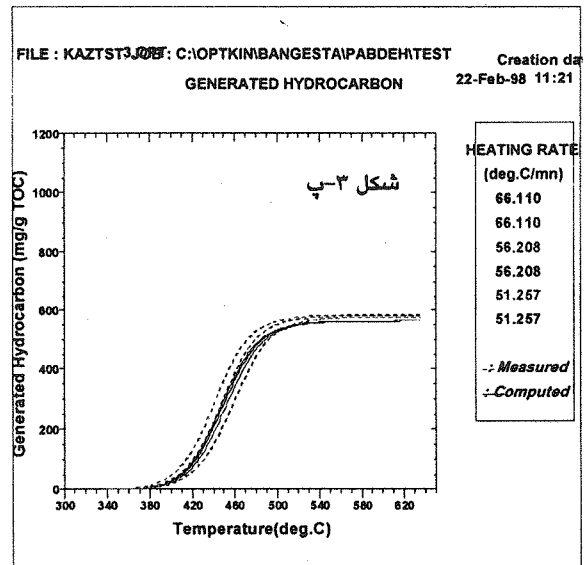
شکل (۳-ت): در این نمودار نرخ تبدیل (کروژن به هیدروکربور) اندازه گیری شده و محاسبه شده برای سازند کژدمی نشان داده شده است (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).

مراجع

- [۱] Braun, R. L. and Burnham, a. K., 1987, *Analysis of chemical reaction using distribution of activation energies and simpler model*: Energy and Fuels, v. 1, p. 153-161.
- [۲] Tissot, B. P. and Espitalie, J., 1975, L'evolution thermique de la matiere organique des sediments: applications of d'une simulation mathematique: Revue de l'Institute Francis du Petrole, v. 30p. 235-246.
- [۳] Lewan, M.D., 1985 *Evolution of petroleum generation by hydrous pyrolysis experimentation*: Philosophical Transaction of Royal society of London, Series A, v. 315p. 123-134.
- [۴] Ungerer, et al., 1986 *Use of kinetic models of organic matter evolution for reconstruction of paleotemperatures, in Thermal Modeling of Sedimentary Basins*, Burrus, J. (ed.): Technip, Paris, p. 541-546.



ب. نرخ تشکیل هیدروکربور از نمونه سنگ مادر سازند کژدمی (در این نمودار منحنی های "S2" حاصل از آزمایش های پیرولیزی نمونه نابالغ سازند کژدمی توسط دستگاه "Rock Eval" و منحنی های محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).



شکل (۳-پ): در این نمودار مقدار هیدروکربور تشکیل شده بر اثر آنالیز پیرولیزی نمونه سازند کژدمی و مقدار به دست آمده از محاسبات با یکدیگر مقایسه شده اند (منحنی های حاصل از آنالیز به صورت نقطه چین و منحنی های محاسبه ای به صورت خط ممتد نشان داده شده اند).