

ارزیابی بلوغ و تاریخچه‌ی حرارتی رسوبات حاوی مواد آلی گروه شمشک البرز شمالی، بر اساس حرارت سنجی سیالات درگیر

هاشم شمالی^{۱*}، مهناز رضائیان^۲، علی امیری^۱، فریبا پادیار^۳، زیبا زمانی^۴ و عباس بمرودی^۵

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرنند، shalikal_hashem@yahoo.com

(۲) دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

(۳) سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

(۴) پژوهشگاه صنعت نفت کشور، تهران

(۵) دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

* عهده‌دار مکاتبات

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۲؛ تاریخ دریافت اصلاح شده: ۹۰/۶/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۲۵؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۶/۳۰

چکیده

در این مطالعه که برای نخستین بار در حوضه البرز (البرز مرکزی-شمالی) انجام شده است، نهشته‌های تریاس فوقانی گروه شمشک، به عنوان سنگ منشاء احتمالی حوضه‌های البرز و خزر جنوبی مورد مطالعه قرار گرفتند. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی روش حرارت سنجی سیالات درگیر (Fluid Inclusion) در جهت تعیین تاریخچه و بلوغ حرارتی رسوبات حاوی مواد آلی گروه شمشک است. پس از حرارت سنجی سیالات درگیر و محاسبه درصد انعکاس ویترنیت به طور مستقیم انجام شده، نتایج با داده‌های حرارتی پیشین حاصل از مطالعه‌ی اثر شکافت آپاتیت مقایسه شد. نمونه‌های مطالعه شده در این پژوهش از رخساره‌های آهکی و ماسه‌سنگی و رخساره‌های شیلی و زغالی رخنمون سازندهای اکراسر، لله‌بند و کلاریز بخش قاعده گروه شمشک در برش گلندرود برداشت شدند. مطالعه‌ی حرارت سنجی به منظور تعیین بیشینه دمای تدفین بر روی ۷۳ سیال درگیر اولیه و ثانویه انجام شد، نتایج نشان داد که این سیالات بسته به عمق چینه‌شناسی، در محدوده دمایی ۷۵-۱۱۵ °C همگن می‌شوند. همچنین تطابق خوب بین عمق چینه‌شناسی و دمای همگن شدن سیالات درگیر، شیب زمین گرمایی دیرینه‌ای را در حدود ۳۵ °C/km برای زمان بیشینه تدفین نشان داد. بر اساس شیب زمین گرمایی دیرینه، بیشینه عمق تدفین این رسوبات حدود ۲۹۰۰ متر برآورد شد. انعکاس ویترنیت نیز بسته به عمق چینه‌شناسی مقادیر متفاوتی بین ۰/۶۷ تا ۱/۰۵ درصد را نشان داد. نتایج حاصل از بررسی سیالات درگیر رسوبات آلی منطقه‌ی مورد مطالعه با داده‌های انعکاس ویترنیت و داده‌های موجود اثر شکافت آپاتیت، انطباق و هماهنگی بسیار مناسبی را نشان داد. نتایج حاصل از حرارت سنجی سیالات درگیر و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی انعکاس ویترنیت نشان داد که نهشته‌های تریاس فوقانی گروه شمشک در مقطع گلندرود، بلوغ حرارتی کم تا متوسطی را تحمل نموده و وارد پنجره نفت‌زایی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: گروه شمشک، بلوغ حرارتی، حرارت سنجی سیالات درگیر، انعکاس ویترنیت، اثر شکافت آپاتیت.

۱- مقدمه

عوامل مهم در کاهش ریسک اکتشافات هیدروکربنی است که قابل استفاده برای تعیین بلوغ حرارتی نیز می‌باشد. معمولاً از انعکاس ویترنیت به‌عنوان معتبرترین شاخص تعیین بلوغ استفاده می‌گردد. در برخی از حوضه‌های رسوبی روش‌های مرسوم تعیین بلوغ از جمله روش انعکاس ویترنیت و ژئوشیمی آلی به دلیل محدودیت‌های زمین‌شناسی و نمونه‌برداری، قابل استفاده نمی‌باشد. به واسطه ریسک بالای سرمایه‌گذاری در بخش اکتشاف، توسعه روش‌های سریع‌تر، ارزان‌تر و دقیق‌تر، از اهمیت و جایگاه بالایی برخوردار است. حرارت‌سنجی سیالات درگیر به عنوان یک ابزار غیرآلی مستقل، روشی نوین و با ارزش در مطالعه سامانه‌های رسوبی است. با فراهم شدن امکانات آزمایشگاهی مطالعات حرارت‌سنجی در ایران، به کارگیری این روش در مقایسه با روش‌های رایج سریع‌تر و کم هزینه‌تر به نظر می‌رسد. در این پژوهش که برای اولین بار بر روی نهشته‌های تریاس فوقانی گروه شمشک انجام شده است، قابلیت سیالات درگیر جهت تعیین بلوغ و تاریخچه حرارتی این نهشته‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

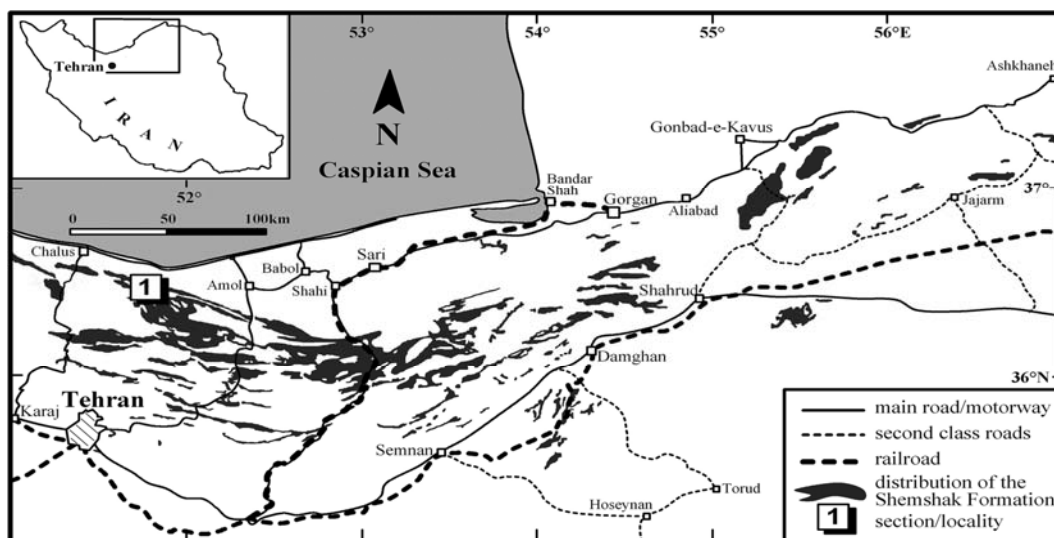
۲- نمونه‌برداری و آماده‌سازی

گستره مورد مطالعه در منطقه گلندرود و در حد فاصل شهرهای چالوس و آمل (تصویر ۱) واقع شده است. در این مطالعه ۲۰ نمونه از رخنمون‌های سطحی بخش قاعده گروه شمشک در ترانشه‌های مجاور جاده منطقه گلندرود برداشت شد. نمونه‌ها از پایین به بالای مقطع به ترتیب از سازندهای اکراسر، لله‌بند و کلاریز جمع‌آوری شدند. این مقطع دارای ضخامتی در حدود ۱۲۰۰ متر است (تصویر ۲).

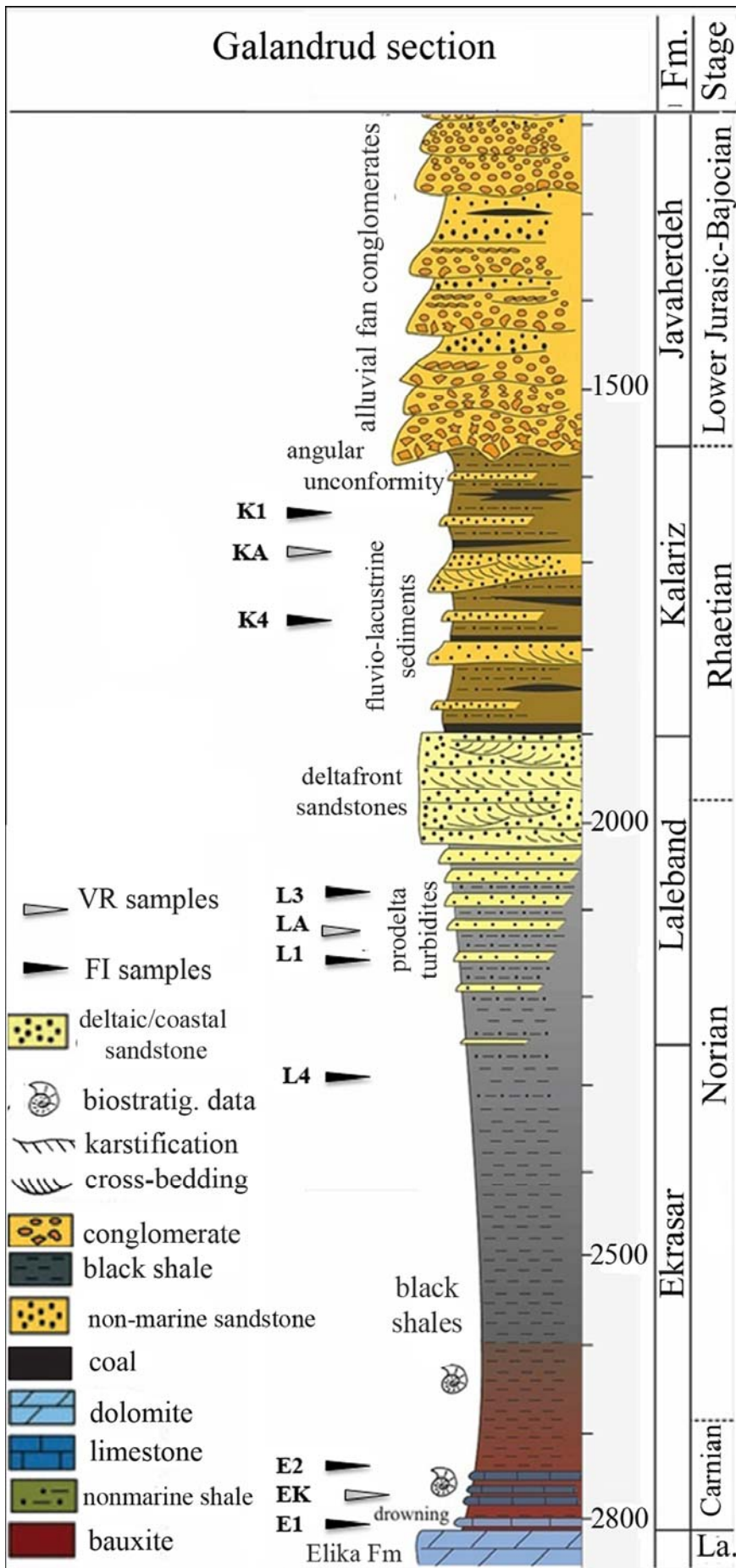
شناخت سامانه نفتی در حوضه مورد مطالعه، نیازمند داشتن اطلاعاتی وسیع و جامع از اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده آن است. عناصر اصلی سامانه نفتی شامل سنگ منشاء (جهت تولید و زایش هیدروکربن)، سنگ مخزن (برای تجمع هیدروکربن‌ها) و پوشش سنگ (محافظت و نگهداری محتویات مخزن) است. پس از سال ۱۹۷۰ میلادی به دلیل افزایش علاقه‌مندی به پیش‌بینی زمان زایش هیدروکربن، بررسی تاریخچه‌ی حرارتی سنگ‌ها و حوضه‌های رسوبی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (McCulloh & Naeser 1989).

مطالعاتی چون انعکاس ویترنیت، دگرسانی رنگ کنوندت و پولن اسپور، اثر شکافت، کانی‌های رسی و سیالات درگیر برای فهم تاریخچه حرارتی حوضه‌های رسوبی استفاده شده‌اند (Bray et al. 1992, Pollastro 1993, Lee & Ko 1997, Resak et al. 2010). تجزیه و تحلیل حرارت‌سنجی سیالات درگیر در صنعت اکتشاف نفت به منظور تخمین دما، زمان و منشاء سیالات کانی‌های دیانزنی مختلف در سنگ‌های رسوبی (Goldstein & Reynolds 1994, Walderhaug 1994) و نیز برای تخمین درجه حرارت و زمان مهاجرت نفت (Burruss et al. 1985)، به طور موفقیت آمیزی به کار برده شده‌اند.

این روش در موارد انگشت شماری در تخمین حرارت دیرین و بازسازی تاریخچه حرارتی استفاده شده است (Barker & Goldstein 1990, Goldstein & Reynolds 1994, Tobin & Claxton 2010, Ceriani et al. 2000). با توجه به اینکه منشاء نفت و گاز، مواد آلی موجود در رسوبات است، لیکن جهت ارزیابی و اکتشاف هیدروکربن علاوه بر تعیین مقدار و نوع ماده آلی، تعیین درجه بلوغ آن نیز دارای اهمیت ویژه‌ای است. بازسازی تاریخچه حرارتی، یکی از



تصویر ۱- پراکندگی رخنمون گروه شمشک در البرز مرکزی و شرقی. موقعیت منطقه مورد مطالعه با عدد (۱) نشان داده شده است (Fursich et al. 2009).



تصویر ۲- ستون چینه‌شناسی رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در البرز شمالی (Fursich et al. 2009). موقعیت نمونه‌ها در این ستون با مثلث‌های سفید و سیاه برای مطالعات آزمایشگاهی ویتربیت و سیالات درگیر مشخص شده است.

بلور کلسیت به صورت سیمان‌های بین بلوری و پرکننده‌ی شکستگی، در نمونه‌های آهکی و ماسه‌سنگی موجود می‌باشد. مجموعه‌ی دیگر شامل سیالات درگیری هستند که به صورت ثانویه و در امتداد شکستگی‌ها و درزه‌های ترمیم یافته‌ای که بلور کوارتز را قطع کرده و در اکثر موارد به داخل سیمان‌های دیاژنزی اطراف دانه نیز ادامه می‌یابند (تصویر ۳).

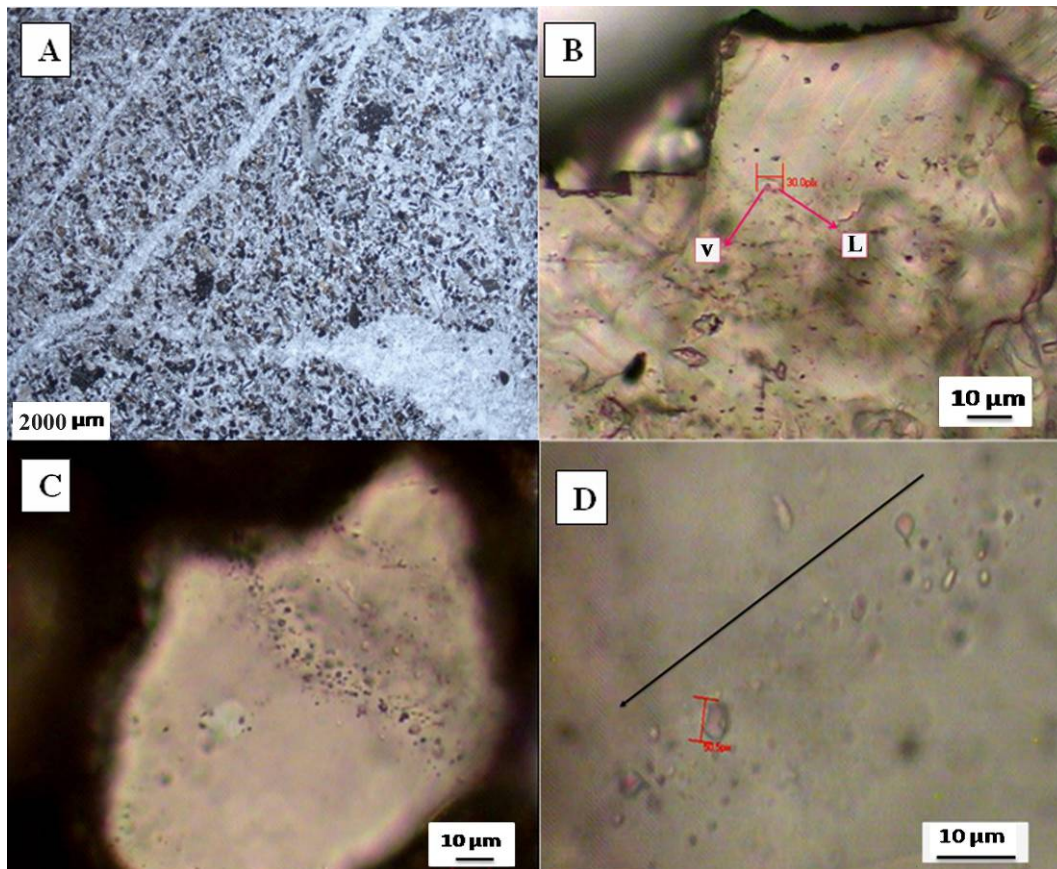
جدول ۱- کانی‌های میزبان و نوع سنگ‌های همراه، برای مطالعه سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه. E، L و K براساس نام سازندها به ترتیب نشان‌دهنده نمونه‌گیری از سازندهای اکراسر، شهبند و کلاریز است.

نمونه	بلور میزبان سیال درگیر	ضخامت چینه‌ای (متر) سازنده- لیتولوژی
K1	کوارتز	کلاریز، ماسه‌سنگ
K4	کوارتز	کلاریز، ماسه‌سنگ
L3	کوارتز- کلسیت	شهبند، ماسه‌سنگ
L1	کوارتز- کلسیت	شهبند، ماسه‌سنگ
L4	کلسیت	اکراسر- کلسیت
E2	کلسیت	اکراسر، سنگ آهک
E1	کلسیت	اکراسر، سنگ آهک

سه نمونه از رخساره‌های شیلی و زغالی جهت تعیین درصد انعکاس ویترنیت انتخاب شدند. از این نمونه‌ها به صورت کل سنگ (Whole rock)، قرص صیقلی تهیه شد.

مقاطع تهیه شده در نور انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفته و درجه بلوغ مواد آلی تعیین شد. ۱۷ مقطع نازک از لیتولوژی‌های آهکی و ماسه‌سنگی تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفتند. ۷ مقطع نازک دوبر صیقلی (Double polish) با ضخامتی کمتر از ۱۰۰ میکرون، جهت برای مطالعات حرارت‌سنجی آماده شد (جدول ۱). این نمونه‌ها بهترین شرایط دیاژنزی را برای مطالعه سیالات درگیر دارا بودند.

لیتولوژی‌های شیلی و سیلتستونی موجود در توالی رسوبی، برای مطالعه‌ی سیالات درگیر مناسب نبوده و از آن‌ها نمونه‌گیری انجام نشد. اندازه‌گیری حرارت‌سنجی بر روی دو مجموعه سیال درگیر انجام شد. یک مجموعه شامل سیالات درگیری به دام افتاده به صورت اولیه و در زمان تشکیل بلور کلسیت است.



تصویر ۳- تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های مطالعه شده در نور طبیعی. A: ریزشکستگی پر شده توسط کلسیت‌های اسپاری و سیمان‌های اسپارایتی موجود در فضای بین دانه‌ای. B: نمونه‌ای از سیال درگیر دوفازی اولیه - فاز مایع (L) - فاز بخار (V) - مطالعه شده در بلور کلسیت. C: صفحات سیالات درگیر ثانویه در شکستگی‌های ترمیم یافته بلور کوارتز که از دانه کوارتز نیز عبور کرده و به حاشیه کوارتز می‌رسند. D: سیالات درگیر ثانویه موجود در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌های بلور کوارتز.

کلیه سیالات درگیر اندازه‌گیری شده در بلورهای کلسیت و کوارتز، در دمای اتاق به صورت دو فازی بودند که در طی حرارت‌سنجی تمامی آن‌ها به یک فاز مایع همگن شدند. اندازه سیالات درگیر مطالعه شده در بلورهای مذکور، متفاوت بوده و بین ۲ تا ۱۷ میکرون متغیر است. سیالات درگیر اولیه بزرگتر و انواع ثانویه نیز اکثراً کوچک می‌باشند.

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌ها، میزان T_{mice} متغیر و بین ۱/۸- تا ۲/۴ درجه سانتی‌گراد بوده که معادل شوری بین ۰ تا ۲/۹ درصد وزنی کلرید سدیم (wt% NaCl) است. نتایج نشان داد که ترکیب سیالات دیاژنزی در طول ضخامت چینه‌شناسی مطالعه شده، تقریباً یکسان بوده و میزان شوری در سیالات درگیر پایین است این امر نشان دهنده‌ی ته‌نشینی از آب‌های جوی (meteoric water) یا دریایی در محیط‌های دیاژنزی نزدیک به سطح (آب‌های شیرین-فراتیک) است.

حرارت‌سنجی‌های انجام شده بر روی سیالات درگیر آبگون نشان داد که مقادیر (Homogenization Temperature, TH) از واحدهای چینه‌شناسی جدیدتر (سازند کلاریز) به سمت واحدهای قدیمی‌تر (اکراسر) افزایش می‌یابد. نمونه‌های سازند کلاریز در پهنه دمایی بین ۹۶-۵۷ °C، سازند لاله‌بند در دمای بین ۱۱۷-۶۲ °C و نمونه‌های سازند اکراسر در بین ۱۲۰-۶۷ °C همگن شده‌اند (تصویر ۴).

همچنین نتایج نشان داد که سیالات درگیر در محیط‌های دیاژنزی نزدیک به سطح زمین به دام افتاده‌اند، بنابراین انتظار می‌رود مقادیر دمای همگن شدن هر یک از آن‌ها نیز تقریباً یکسان بوده و عدد پایینی را نشان دهد (Goldstein 1986). اما مقادیر TH در نمونه‌ها، کاملاً متغیر بوده و در نمونه‌هایی که عمق بیشتری را تحمل نموده‌اند، بسیار بالاتر است (تصویر ۵). اختلاف بین شوری پایین و دمای بالا به دلیل آن است که احتمال دارد سیالات درگیر در سیمان‌های کلسیتی و کوارتزی که در دمای پایین به دام افتاده‌اند، در طی تدفین عمیق و در اثر گرمایش و فشار بیش از حد، اصطلاحاً به تعادل مجدد (Reequilibration) برسند (Goldstein 1986, Burruss 1987, Prezbindowski & Larese 1987, Barker & Goldstein 1990, Osborne & Haszeldine 1993, Tobin & Claxton 2000). در نتیجه‌ی، دمای سیالات درگیر بازنشانی (Reset) شده و با افزایش عمق تدفین، به صورت تدریجی افزایش خواهد یافت.

بنابراین با توجه به تعادل مجدد و بازنشانی دما، برخی از سیالات درگیر در بلورهای کلسیت و کوارتزهای دیاژنزی می‌توانند با اندکی اختلاف برای اثبات بیشینه دمای تدفین (T_{peak}) استفاده شوند (Barker & Goldstein 1991, Osborne & Haszeldine 1993, Tobin & Claxton 2000).

جهت حرارت‌سنجی سیالات درگیر از اولیه از یک صفحه گرم و سرد کننده مدل MDS600 ساخت شرکت لینکام Linkam با تغییرات دمایی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. در مجموع ۷۳ سیال درگیر، مورد مطالعه‌ی حرارت‌سنجی قرار گرفتند. دمای همگن شدن (Homogenization Temperature, TH) برای تمامی ۷۳ سیال درگیر تعیین شد. برای ۳۱ سیال درگیر نیز، دمای ذوب نهایی بلور یخ (Tmice) به دست آمد. با استفاده از دمای ذوب نهایی بلور یخ می‌توان به میزان شوری (Salinity) سیال پی برد. در نمونه‌های مطالعه شده، میزان شوری توسط نرم‌افزار مدل‌سازی پی‌وی‌تی‌ایکس (PVTX) شرکت لینکام محاسبه شد.

با توجه به تفاوت فشار حاکم بر محیط آزمایشگاه و محیط به دام افتادن سیالات درگیر در اعماق زمین، لازم است تصحیحاتی بر اساس مقدار فشار (Pressure Correction) بر روی درجه حرارت همگن شدن اعمال گردد. وجود مقادیر زیاد متان و دیگر گازها در سیالات درگیر، نیاز به تصحیح فشار را کاهش می‌دهد (Barker & Goldstein 1990, Rossi et al. 2002).

در نمونه‌های مورد مطالعه نشانه‌ای مبنی بر اشباع گاز یافت نشد، اما بدون شک، متان زیادی در ابتدا از شیل‌های غنی از مواد آلی و زغال‌های موجود در رسوبات گروه شمشک تولید شده است. بنابراین نیاز به تصحیح فشار می‌بایست بسیار اندک باشد. همچنین پایین بودن دماهای اندازه‌گیری شده نیز خود عاملی برای عدم استفاده از تصحیح فشار به شمار می‌رود. بنابراین در این مطالعه برای اهداف مورد نظر تنها از دمای همگن شدن بدون اعمال تصحیح فشار استفاده شده است.

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- مرارت‌سنجی سیالات درگیر

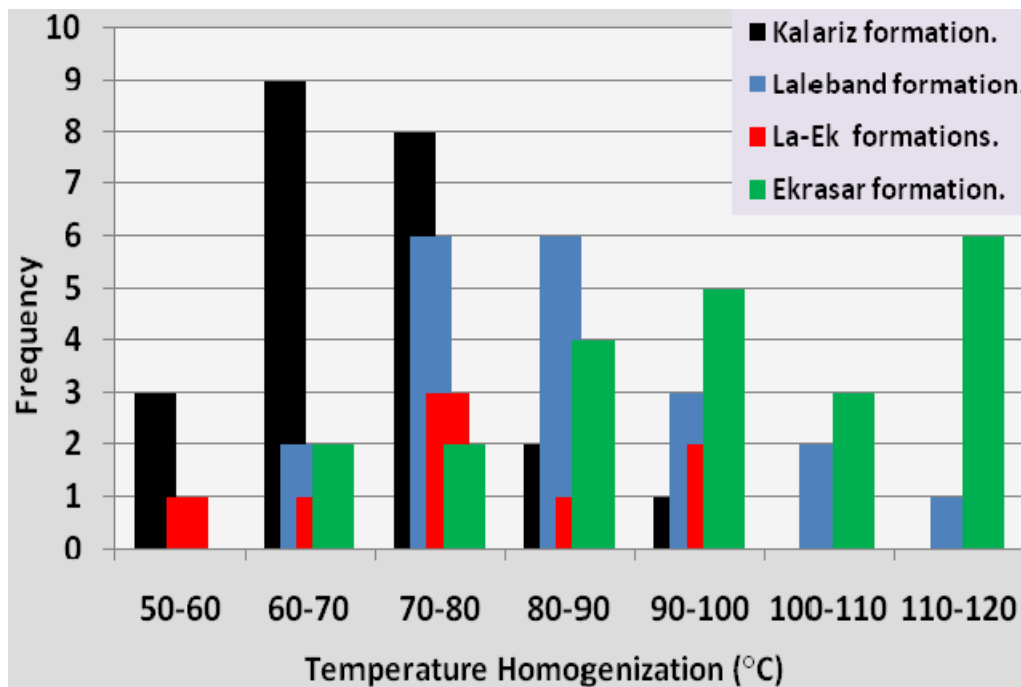
نتایج حرارت‌سنجی ۷۳ سیال درگیر مطالعه شده به طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- نتایج حرارت‌سنجی سیالات درگیر و پتروگرافی نمونه‌های مورد مطالعه

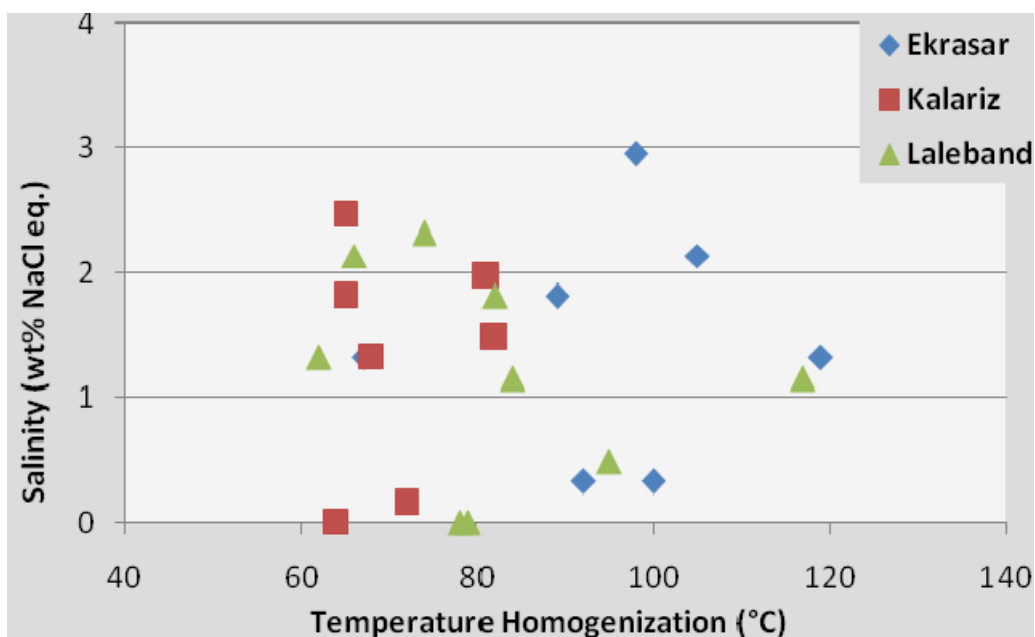
Sample	Phases	Type	TH (°C)	Salinity (wt% NaCl eq.)
K ₁	مایع + بخار	ثانویه	۵۷-۸۱	۰-۲/۴۶
K ₄	مایع + بخار	ثانویه	۵۸-۹۶	۱/۴۸-۱/۸۱
L ₃	مایع + بخار	اولیه و ثانویه	۷۵-۱۱۷	۰/۳۳-۱/۱۵
L ₁	مایع + بخار	اولیه و ثانویه	۶۲-۱۰۱	۰-۲/۳۰
L ₄	مایع + بخار	اولیه و ثانویه	۵۴-۹۷	-
E ₂	مایع + بخار و CO ₂	اولیه	۶۷-۱۱۵	۰/۳۳-۲/۹۵
E ₁	مایع + بخار	اولیه	۶۸-۱۲۰	۱/۳۲-۲/۱۴

سیالات درگیر است. همچنین این اختلاف دمایی می‌تواند به دلیل چند منشاء بودن سیالات باشد که با توجه به یکسان و ثابت بودن میزان شوری و ترکیب سیالات، این مورد تقریباً نادرست است.

همچنین امکان دارد برخی از سیالات درگیر با تغییر شرایط در طی تدفین به تعادل مجدد نرسند (Goldstein 1986, Prezbindowski & Larese 1987, Barker & Goldstein 1990). توزیع وسیع دمای همگن شدن (تصویر ۴) نشان دهنده درجات متفاوتی از تعادل مجدد



تصویر ۴- نمودار ستونی مربوط به دمای همگن شدن در مقابل فراوانی برای سیالات درگیر مطالعه شده منطقه گلندرود



تصویر ۵- نمودار مربوط به دمای همگن شدن در مقابل شوری برخی از سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه

کلاکستون (Tobin & Claxton 2000) استفاده شده است (تصویر ۶). نتایج انعکاس ویتترینیت و دمای همگن شدن سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه، همخوانی بسیار نزدیکی با نتایج حاصل از داده‌های توبین و کلاکستون (Tobin & Claxton 2000) دارد (جدول ۳ و تصویر ۶). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های دمایی سیالات درگیر و مقادیر متوسط انعکاس ویتترینیت در نمونه‌های مربوط به رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در منطقه‌ی گلندرود، کاملاً با هم قابل انطباق بوده و یکدیگر را تأیید می‌نمایند.

جدول ۳- مقادیر انعکاس ویتترینیت و مقایسه بین دمای همگن شدن به‌دست آمده در این مطالعه و دمای همگن شدن مورد انتظار برحسب مقدار انعکاس ویتترینیت

Formation	Depth of Samples (m)	VR % (This study)	TH (°C) * (Tobin & Claxton 2000)	TH (°C) (This study)
Kalariz	1600	0.67	73	70 - 80
Lalebant	2100	0.90	94	80 - 90
Ekrasar	2700	1.05	111	110 - 120

VR: Vitrinite Reflectance; TH: Homogenization Temperature
*دمای همگن شدن معادل با مقادیر انعکاس ویتترینیت به‌دست آمده بر اساس توبین و کلاکسون (Tobin & Claxton 2000).

تجزیه و تحلیل اثر شکافت آپاتیت نیز روشی برای ارزیابی تاریخچه حرارتی محسوب می‌شود. با توجه به مدل ارائه شده براساس توزیع طول اثرات شکافت آپاتیت در نمونه‌های تریاس فوقانی گروه شمشک در ناحیه گلندرود توسط رضائیان (Rezaeian 2008)، بیشینه دمایی که این رسوبات تحمل نموده‌اند $110 \pm 10^\circ\text{C}$ است. حال آن که حرارت‌سنجی سیالات درگیر نیز بیشینه دمایی بین $110-120^\circ\text{C}$ را نشان داد. براساس این نتایج، بین داده‌های TH و اثر شکافت آپاتیت از نمونه‌های رسوبات گروه شمشک در منطقه گلندرود نیز انطباق بسیار خوبی مشاهده شد.

تصویر ۷، نموداری است که نتایج حاصل از حرارت‌سنجی سیالات درگیر، انعکاس ویتترینیت و اثر شکافت آپاتیت، از نظر بازه تغییرات دمایی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. این مقایسه نشان‌دهنده‌ی آن است که تمامی داده‌ها تقریباً در یک محدوده دمایی مشابه‌ای قرار داشته و کاملاً تأییدکننده‌ی یکدیگرند. بنابراین بررسی و مطالعه‌ی سیالات درگیر نیز همانند سایر روش‌ها، قابلیت تعیین تاریخچه حرارتی را برای رسوبات گروه شمشک، خواهد داشت.

۲-۴- شیب زمین گرمایی دیرینه و عمق دیرینه تدفین

در صورتی که دمای حاصل از حرارت‌سنجی سیالات درگیر نتیجه‌ی

فرآیندهای تعادل مجدد و بازنشانی دمای سیالات درگیر برگشت‌ناپذیر هستند. در نمونه‌هایی که دارای توزیع داده‌های چندنمایی (Polymodal) از دمای همگن شدن می‌باشند، تنها بالاترین نما و تک‌نمای موجود در داده‌های تک‌نمایی (Unimodal)، برای بازسازی تاریخچه‌ی حرارتی سنگ‌های رسوبی اهمیت دارد (Barker & Goldstein 1990). بنابراین می‌توان گفت بیشینه دمایی که نمونه‌های سازند کلاریز در طی تدفین تحمل نموده‌اند $80-70^\circ\text{C}$ ، برای نمونه‌های سازند الله‌بند $90-80^\circ\text{C}$ و برای سازند اکراسر $120-110^\circ\text{C}$ می‌باشد.

۳-۲- اندازه‌گیری انعکاس ویتترینیت

به منظور مقایسه و درک صحیح از داده‌های سیالات درگیر، انعکاس ویتترینیت سازندهای مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. بر این اساس میانگین انعکاس ویتترینیت در سازند کلاریز 0.67 درصد، در سازند الله‌بند 0.9 درصد و برای سازند اکراسر 1.05 درصد محاسبه شد. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی افزایش بلوغ ماده آلی به‌سمت بخش قاعده‌ای گروه شمشک است. افزایش بلوغ حرارتی از بخش‌های بالایی به‌سمت بخش قاعده‌ای گروه شمشک، نشان‌دهنده تأثیر کلی عمق تدفین در میزان بلوغ حرارتی ماده آلی است.

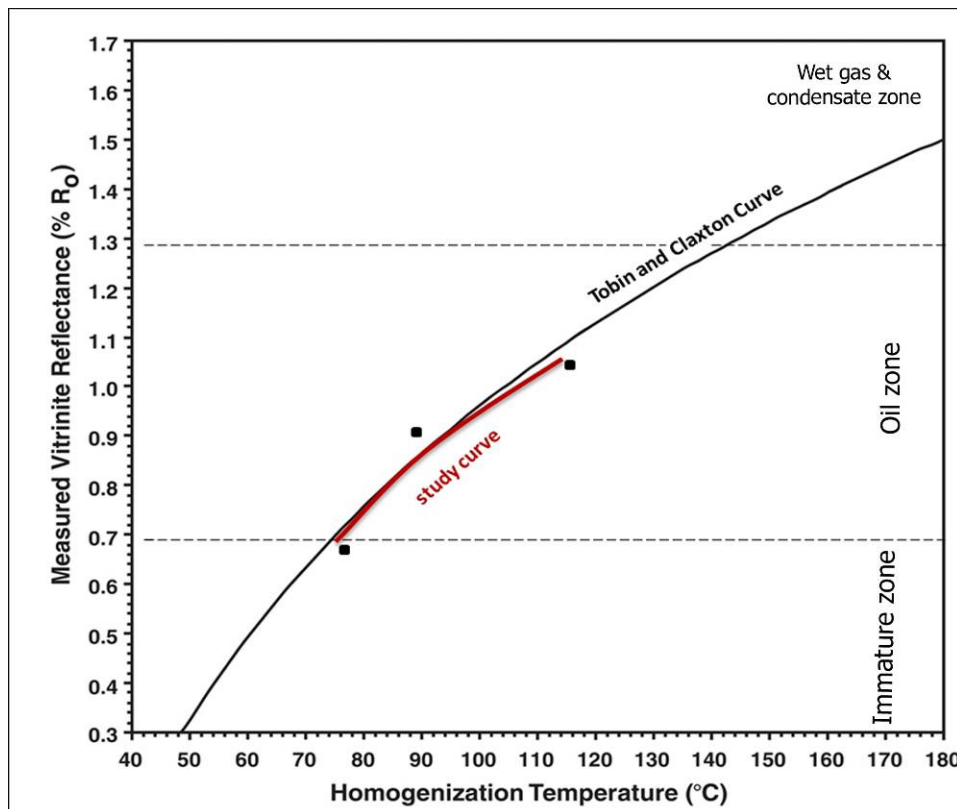
۴-۱- بحث

۱-۴- صحت داده‌های سیالات درگیر

تاکنون تلاش‌های متعددی برای مقایسه و بررسی ارتباط بین داده‌های TH و انعکاس ویتترینیت صورت پذیرفته است (Bone & Russell 1988, Aizawa 1989, Barker & Goldstein 1990, Tobin & Claxton 2000). در این میان، توبین و کلاکستون (Tobin & Claxton 2000) و به‌گرددآوری مجموعه داده‌های TH و انعکاس ویتترینیت نمونه‌های مربوط به زمان‌های زمین‌شناسی مختلف و سیستم‌های تدفینی به‌دور از هر گونه فعالیت آذرین از حوضه‌های سراسر دنیا پرداختند. نتیجه کار آنها یکی از مهم‌ترین و کامل‌ترین کالیبراسیون‌ها برای تطابق بین مقادیر متوسط انعکاس ویتترینیت و بیشینه دمای همگن شدن سیالات درگیر می‌باشد (تصویر ۶).

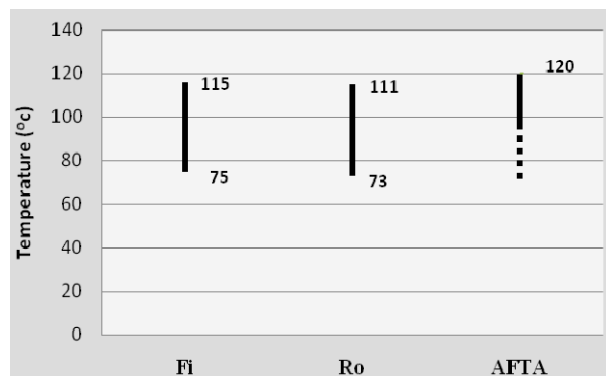
بررسی آماری این مجموعه داده‌ها بیانگر همبستگی آشکار بین بالاترین میانه‌ی TH از سیالات درگیر تحت تعادل مجدد قرار گرفته (به عبارتی افزایش دمای سیالات درگیر با افزایش عمق و حرارت) و داده‌های انعکاس ویتترینیت است.

برای ارزیابی نتایج این مطالعه، از نمودار تغییرات متوسط انعکاس ویتترینیت در برابر دمای همگن شدن ارائه شده توسط توبین و



تصویر ۶- تطابق بین مقادیر متوسط انعکاس ویتترینیت و حداکثر دمای همگن شدن سیالات درگیر (بدون اعمال تصحیح فشار). تقسیمات پهنه‌های بلوغ ماده آلی براساس (Taylor et al. 1998) می‌باشد. منحنی رنگ تیره بر اساس توپین و کلاکسون (Tobin & Claxton 2000) و منحنی رسم شده به رنگ قرمز مربوط به نمونه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشند.

افزایش تدریجی دمای همگن شدن با افزایش تدریجی عمق تدفین و انطباق کامل داده‌های سیالات درگیر و انعکاس ویتترینیت، این مسئله را اثبات و نشان داد که دماهای به دست آمده کاملاً تحت تأثیر افزایش تدریجی عمق تدفین می‌باشند نه نفوذ و نشست از یک سیال داغ (Rossi et al. 2002, Reed 2003). برای بررسی این الگو و تغییرات دما در طول ضخامت چینه‌شناسی نمونه‌برداری شده، نمودار TH در مقابل عمق برای نمونه‌های مورد مطالعه رسم شد (تصویر ۸). بر اساس نتایج حاصل و یک R^2 خوب (در حدود ۰/۹۷)، شیب زمین گرمایی برای رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در ناحیه گلندرود در زمان بیشینه تدفین، تقریباً $35^\circ\text{C}/\text{Km}$ محاسبه شده است. همچنین داده‌های دمای همگن شدن سیالات درگیر، برای تعیین عمق تدفین سنگ‌ها نیز به کار گرفته شده‌اند (Friedman 1989, Lee & Ko 1997, Reed 2003, Swierczewska 2005, Ceriani et al. 2010). بر اساس حرارت سنجی سیالات درگیر، بیشینه‌ی دمایی رسوبات بخش قاعده گروه شمشک در مقطع گلندرود بین $110-120^\circ\text{C}$ محاسبه شد. با در نظر گرفتن شیب زمین گرمایی در حدود $35^\circ\text{C}/\text{Km}$ برای زمان بیشینه تدفین و دمای سطحی 15°C ، بیشینه عمق تدفین برای رسوبات ذکر شده بیش از ۲۹۰۰ متر می‌باشد. این مقدار تخمینی از بیشینه ضخامت



تصویر ۷- مقایسه بین داده‌های روش‌های حرارت سنجی سیالات درگیر (Fi)، ضریب انعکاس ویتترینیت (Ro) و اثر شکافت آپاتیت (AFTA) از نظر بازه تغییرات دمایی

واکنش بین سنگ میزبان و سیالات منفذی در طی تدفین تدریجی بوده و عامل سیالات داغ در آن دخیل نباشد، می‌توان با اندازه‌گیری سیستماتیک دمای همگن شدن سیالات درگیر اولیه و ثانویه در اعماق مختلف حوضه‌های رسوبی، شیب زمین گرمایی دیرینه (Paleogeothermal gradient) را تخمین زد (Friedman 1989, Lee & Ko 1997, Yiqun et al. 2001, Reed 2003, Ceriani et al. 2010).

تناقض بین این مسئله و افزایش تدریجی دما با افزایش عمق نیز نشان‌دهنده تعادل مجدد صورت گرفته در طی تدفین در سیالات درگیر است. با توجه به رخ دادن تعادل مجدد در سیالات درگیر شده، دمای همگن شدن به دست آمده می‌تواند تخمینی از بیشینه دمای تدفین باشد. تغییرات این دماها در ضخامت چینه‌شناسی نمونه‌برداری شده، شیب زمین گرمایی حدود $35^{\circ}\text{C}/\text{km}$ را برای رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در ناحیه گلندرود در زمان بیشینه تدفین، نشان داد. براساس این شیب زمین گرمایی و بیشینه دمای $110-120^{\circ}\text{C}$ ، رسوبات بخش قاعده گروه شمشک در منطقه گلندرود، عمق تدفین بیش از ۲۹۰۰ متر را تحمل نموده‌اند که این میزان با نتایج چینه‌شناسی سازگار است.

- نتایج حاصل از روش‌های مطالعه‌ی درگیر، انعکاس ویترنیت و همچنین داده‌های موجود اثر شکافت آپاتیت، انطباق بسیار خوبی را با یکدیگر دارند. این مسئله نشان داد که داده‌های همگن شدن حاصل از حرارت‌سنجی سیالات درگیر در نمونه‌های مورد مطالعه، تخمینی از بیشینه دمایی هستند که رسوبات در طول تاریخچه تدفین خود تحمل نموده‌اند. لذا این داده‌ها قابلیت بالایی برای بازسازی تاریخچه حرارتی و تعیین میزان بلوغ حرارتی رسوبات دارند.

- با توجه به تاریخچه حرارتی به دست آمده براساس نتایج حرارت‌سنجی سیالات درگیر در رسوبات مورد مطالعه، و با توجه به مقادیر متوسط انعکاس ویترنیت ($R_m\% = 0.67-1.05$) که رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در ناحیه گلندرود، یک سنگ منشاء نیمه‌بالغ بوده و بلوغ حرارتی کم تا متوسطی را تحمل نموده‌اند. همچنین این رسوبات وارد پنجره‌ی نفت‌زایی شده‌اند.

این پژوهش نشان داد که مطالعه و حرارت‌سنجی سیالات درگیر نقش مهمی را در فهم تاریخچه و بلوغ حرارتی رسوبات حاوی مواد آلی ایفا می‌نماید.

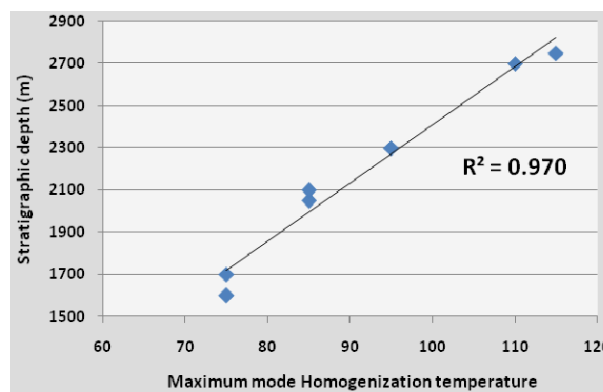
تشکر و قدردانی

این پژوهش با همکاری شرکت نفت خزر انجام شده است. نویسندگان مقاله از کلیه کارکنان شرکت نفت خزر و همچنین از آقای دکتر سیدمحمد موسوی روح‌بخش و دکتر شهرام شرکتی به خاطر راهنمایی‌های بسیار ارزشمندشان تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Aizawa, J., 1989, "Relationship between vitrinite reflectivity and paleogeotemperature based on fluid inclusions in the southwestern coalfields of Japan", *Proceedings, International Conference on Coal Science, Vol. 1: 93-96*.

توالی پوشاننده می‌باشد. بر اساس مطالعات چینه‌شناسی در برش گلندرود و منابع متعدد موجود، ضخامت گروه شمشک و توالی پوشاننده آن مجموعاً ۲۷۰۰ متر برآورد شده است (Shahidi 2008, Fursich et al. 2009). بنابراین می‌توان سازگاری خوبی را بین این ضخامت و بیشینه عمق تدفین به دست آمده مشاهده نمود. اختلاف کم موجود می‌تواند ناشی از فرسایش در اثر بالاآمدگی و یا خطای محاسبه باشد. به طور کلی این سازگاری خود می‌تواند دلیلی بر تأیید درجه زمین گرمایی به دست آمده برای رسوبات تریاس فوقانی گروه شمشک در زمان بیشینه تدفین باشد. این مطالعات می‌توانند در بازسازی تاریخچه تدفین سنگ‌های منشاء و پیش‌بینی زمان زایش هیدروکربن در مناطقی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در رابطه با ضخامت توالی پوشاننده وجود ندارد کاربرد داشته باشد.



تصویر ۸- نمودار حداکثر دمای همگن شدن در برابر عمق برای تمامی نمونه‌های مطالعه شده

۵- نتیجه‌گیری

نتایج ارائه شده از حرارت‌سنجی سیالات درگیر، درک نوینی از بلوغ و تاریخچه حرارتی و تدفین توالی رسوبی زغال دار رخنمون یافته در منطقه گلندرود را ارائه می‌دهد:

- نتایج حرارت‌سنجی نشان دادند که سیالات درگیر در نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند کلاریز در محدوده دمایی بین $96-57^{\circ}\text{C}$ ، نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند لله‌بند در دمای بین $117-62^{\circ}\text{C}$ و نمونه‌های کربناته سازند اکراسر در محدوده دمایی بین $120-67^{\circ}\text{C}$ همگن شده‌اند.

دماهای اندازه‌گیری شده در طیف وسیعی تغییر می‌کند که دلالت بر درجات مختلف تعادل مجدد در طی تدفین رسوبی دارد.

- با افزایش عمق چینه‌شناسی بدون تغییر در شوری سیالات دما تدریجاً افزایش یافته پایین بودن میزان شوری (0-2.9 wt% NaCl)، منشاء آب‌های شیرین و به دام افتادن در اعماق کم را برای سیالات درگیر تأیید می‌نماید.

Vol. 10: 271-278.

Pollastro, R. M., 1993, "Considerations and application of the Illite/Smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 41 (2): 119-133.

Prezbindowski, D.R, & Larese, R.E., 1987, "Experimental stretching of fluid inclusions in calcite: Implications for diagenetic studies", *Geology*, Vol. 15: 333-336.

Reed, J. S., 2003, "Thermal and diagenetic eVolution of carboniferous sandstone, Central Appalachian Basin", *Ph. D thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), 114 pp.

Resak, M., Glasmacher, U.A., Narkiewicz, M. & Littke, R., 2010, "Maturity modelling integrated with apatite fission-track dating: Implications for the thermal history of the Mid-Polish Trough (Poland)", *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 27:108-115.

Rezaeian, M., 2008, "Coupled tectonics, erosion and climate in the Alborz Mountains, Iran", *PhD thesis*, University of Cambridge, 219 pp.

Rossi, C., Goldstein, R.H, Ceriani, A. & Marfil, R., 2002, "Fluid inclusions record thermal and fluid eVolution in reservoir sandstones, Khatatba Formation, Western Desert, Egypt: a case for fluid injection", *AAPG Bull 86*, Vol. (10): 1773-1799.

Shahidi, A., 2008, "Tectonic eVolution of Northern Iran (Alborz and Kopet Dagh) since Mesozoic", *PhD thesis*, University Paris 6-Pierre et Marie Curie, 500 pp.

Swierczewska, A., 2005, "The interplay of the thermal and structural histories of the Magura Nappe (Outer Carpathians) in Poland and Slovakia", *Mineralogia Polonica*, Vol. 36 (2): 91- 144,

Taylor, G. H., Teichmuller, M., Davis, A., Diessel, C. F. K., Littke, R., & Robert, P., 1998, "Organic petrology", *Borntraeger, Berlin-Stuttgart*. 704 pp.

Tobin, R.C., & Claxton, B.L., 2000, "Multidisciplinary thermal maturity studies using vitrinite reflectance and fluid inclusion microthermometry: A new calibration of old techniques", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, Vol. 84: 1647-1665.

Walderhaug, O., 1994, "Precipitation rates for quartz cement in sandstones determined by fluidinclusion microthermometry and temperature-history modeling", *Journal of Sedimentary Research*, Vol. A64 (2):324-333

Yiqun, L., Mingsheng, Y., Dingwu, Z., Qiao, F., & Jun, J., 2001, "New progresses on geothermal history of Turpan-Hami Basin, Xinjiang, China", *Science IN China*, Vol. 44 (2):166-176.

Barker, C. E., & R. H. Goldstein, 1990, "Fluid inclusion technique for determining maximum temperature and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer", *Geology*, Vol. 18: 1003-1006.

Bone, Y., & Russell, N. J., 1988, "Correlation of vitrinite reflectivity with fluid inclusion microthermometry: assessment of the technique in the Cooper/Eromanga basins, South Australia", *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol. 35: 567-570.

Bray, R. J., Green , P. F., & Duddy, I. R. 1992, "Thermal history reconstruction using apatite fission track analysis and vitrinite reflectance: a case study from the UK East Midlands and Southern North Sea", *Geological Society Special Publication*, Vol. 67: 3-25.

Burruss, R. C., 1987, "Diagenetic paleotemperatures from aqueous fluid inclusions re-equilibration of inclusions in carbonate cements by burial heating", *Mineral Mag*, Vol. 51: 477-481.

Burruss, R. C., Cercone, K. R., & Harris, P. M., 1985, "Timing of hydrocarbon migration: evidenced from fluid inclusions in calcite cements, tectonics and burial history", In: *Schneidermann, N. & Harris, P. M. (eds.)*, *Carbonate cements: SEPM Special Publication*, Vol. 36: 277-289.

Ceriani, A., Calabro, R., Di Giulio, A., & Buonaguro, R., 2010, "Diagenetic and thermal history of the Jurassic-Tertiary succession of the Zagros Mountains in the Dezful Embayment (SW Iran): constraints from fluid inclusions", *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 17 pp.

Friedman, G.M., 1989, "Case history of deep-burial Sulfide mineralization in the Northern Appalachian basin", *Carbonates and Evaporites*, Vol. 4 (2): 231-241.

Fursich, F. T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K., & Majidifard, M. R., 2009, "Lithostratigraphy of the Upper Triassic-Middle Jurassic Shemshak Group of northern Iran", In: *Brunet, M. F., Wilmsen, M. & Granath, J. W (eds.)*, *South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society London, Special Publication*, Vol. 312: 129-160.

Goldstein, R. H., 1986, "Re-equilibrium of fluid inclusions in low temperature calcium carbonate cement", *Geology*, Vol. 14: 792-795.

Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J., 1994, "Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals", *SEPM Short Course*, Vol. 31, 199 pp.

Lee, Y. I. & Ko, H. K., 1997, "Illite crystallinity and Fluid inclusion analysis across a Paleozoic disconformity in Central Korea", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 45 (2): 147-157.

McCulloh, TH., & Naeser, N. D., 1989, "Thermal history of sedimentary basins: Introduction and overviews". In: *Naeser ND, McCulloh TH, editors. Thermal history of sedimentary basins: Methods and case histories*. New York: Springer- Verlag: 1-11.

Osborne, M. & Haszeldin, S., 1993, "Evidence for resetting of fluid inclusion temperatures from quartz cements in oilfields", *Marine and Petroleum Geology*,