

بررسی ویژگی‌های ماده آلی و مدل‌سازی حرارتی شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک (تریاس بالایی - ژوراسیک میانی) در برش طزره، البرز خاوری، شمال ایران

علی شکاری فرد^{۱*}، فرانسوا بودن^۲، کاظم سیدامامی^۳، یوهان اشنیدر^۴، حسین رحیم‌پوربناب^۵

^۱دانشکده مهندسی شیمی، مؤسسه مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۲مؤسسه علوم زمین پاریس، دانشگاه ششم پاریس و مرکز ملی تحقیقات علمی، دانشگاه پیر و ماری کوری، پاریس، فرانسه.

^۳دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۴دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۱۷

چکیده

ویژگی‌های ژئوشیمی (پیرولیز راک-اوال و تجزیه عنصری کروژن)، پالئوفاسیس و سنگ‌نگاری آلی (با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری، بازتابی و فرابنفش) شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک (تریاس بالایی - ژوراسیک میانی) در برش طزره (البرز خاوری) بررسی شده است. شیل سیاه قاعده‌ای غنی از ماده آلی بی‌شکل به همراه مقدار کمتری ذرات پراکنده ویترنیت است که در شرایط احیا تا نیمه احیا در محیط دریاچه‌ای رسوب کرده است. بر اساس مقادیر بازتاب ویترنیت (mean V_{Rr}=2.1%) ماده آلی در شیل سیاه قاعده‌ای بلوغ حرارتی زیادی را طی تدفین ژرف تجربه کرده است. در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین کربن آلی باقیمانده ۱ درصد است. نتایج مدل‌سازی حرارتی با استفاده از نرم‌افزار یک بعدی Genex4 نشان می‌دهد که شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در محدوده زمانی ژوراسیک میانی - کرتاسه آغازین بالغ شده و هیدروکربن تولید کرده است. در حال حاضر این رخساره در برش طزره، واجد ماده آلی فوق‌بالغ و فقیر از هیدروژن است که در پنجره تولید گاز خشک قرار دارد. این رسوبات در حال حاضر به عنوان منابع گاز شیل (Shale Gas) قابل توجه هستند.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی حرارتی، ارزیابی سنگ مادر هیدروکربن، گروه شمشک، تریاس بالایی - ژوراسیک میانی، برش طزره، البرز، شمال ایران

E-mail: ashekary@ut.ac.ir

*نویسنده مسئول: علی شکاری فرد

۱ - مقدمه

وجود گل‌فشان‌های فعال، چشمه‌های نفت و گاز در بخش‌های شمالی حوضه البرز و همچنین وجود منابع هیدروکربنی در حاشیه جنوبی دریای خزر بیانگر وجود سیستم‌های نفتی فعال در منطقه است. رخساره‌های دارای ماده آلی گروه شمشک (تریاس بالایی - ژوراسیک میانی) در حوضه البرز یکی از سنگ منشأهای مهم هیدروکربنی با گسترش وسیع هستند که اغلب بلوغ زیادی را تحمل کرده‌اند (Rad, 1982; Rahimpour-Bonab et al., 2002; Shekarifard et al., 2009). در ارزیابی یک سیستم نفتی به ویژه حوضه‌هایی که دارای سنگ منشأ فوق‌بالغ هستند، تعیین زمان هیدروکربن‌زایی بسیار مهم است. به کمک مدل‌سازی حرارتی و با استفاده از داده‌های چینه‌شناسی و همچنین داده‌های حرارتی اندازه‌گیری شده از سنگ‌های مورد مطالعه، می‌توان زمان تولید هیدروکربن را از یک سنگ منشأ فوق‌بالغ بازسازی کرد (Beicip-Franlab, 1995). با توجه به رخداد فازهای مختلف زمین‌ساختی و بالآمدگی در حوضه البرز، درک زمان تولید هیدروکربن از رخساره‌های دارای ماده آلی فوق‌بالغ به منظور ارزیابی میزان حفظ‌شدگی و امکان به دام افتادن هیدروکربن‌های تولیدی، ضروری است.

در این پژوهش با استفاده از روش‌های ژئوشیمیایی (پیرولیز راک-اوال و تجزیه عنصری کروژن)، سنگ‌نگاری ماده آلی (میکروسکوپ نور عبوری، بازتابی و فرابنفش)، مقادیر بازتاب ویترنیت و همچنین مدل‌سازی یک‌بعدی حوضه ضمن بررسی ویژگی‌های ماده آلی، زمان بلوغ و تولید هیدروکربن از شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲ - چینه‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی گروه شمشک

گروه شمشک به سن تریاس بالایی - ژوراسیک میانی با سترایی بین ۱۰۵۰ متر در برش الگوی شمشک (Assereto, 1966) تا ۳۹۰۰ متر در برش طزره در حوضه البرز رخنمون یافته است (Fürsich et al., 2005). در برخی از نقاط مورد

هیدروکربن در گرم کل کربن. متغیر اخیر انواع مختلف کروژن را نشان می‌دهد (Espitalié et al. 1985a, 1985b, 1986).

۴-۲. کلسی‌متری و تجزیه لکو (LECO)

مقدار کربنات کلسیم موجود در نمونه‌ها از روش بمب کربنات (Carbonate bomb) (با اندازه‌گیری حجم گاز متصاعد شده) تعیین شد. در این مطالعه میزان کل کربن آلی به روش LECO IR-212 و تعیین میزان کربن غیرآلی اندازه‌گیری شد. در این روش پودر نمونه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با اکسیژن خالص سوزانده و مقدار کربن با اندازه‌گیری میزان CO_2 تولید شده تعیین می‌شود. در این روش هر چند سوختن ماده آلی کامل‌تر است، اما کربنات‌ها نیز تجزیه می‌شوند. با توجه به اینکه نتایج لکو یک نمونه بیانگر مجموع کربن آلی و غیرآلی است، میزان کل کربن آلی (TOC) از اختلاف بین کل کربن به‌دست آمده از لکو با کربن غیرآلی موجود در نمونه به‌دست آمده است $[C_{\text{organic}} = C_{\text{total}} - (\text{CaCO}_3/8.33)]$. جدول ۱ نتایج پیرولیز راک-اوال و تجزیه لکو را نشان می‌دهد.

۴-۳. پالینوفاسیس، سنگ‌نگاری آلی و تجزیه عنصری کروژن

به‌منظور تعیین ویژگی‌های پالینولوژیکی ماده آلی، ۵ نمونه انتخاب، با استفاده از اسید کلریدریک (۳۷ درصد) و اسیدفلوریدریک (۷۰ درصد) تخلیص کروژن و در مجموع ۳۰ اسلاید فیلترشده و فیلترنشده تهیه شد. اسلایدها با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری مجهز به نور فرابنفش مطالعه شد. همچنین برای سنگ‌نگاری آلی، ۴ نمونه قرص و پلاک صیقلی تهیه و با استفاده از میکروسکوپ نور بازتابی مجهز به نور فرابنفش مطالعه شد. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نور عبوری و بازتابی از ماده آلی را در برخی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

میزان کربن، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن و گوگرد از ۳ نمونه کروژن تخلیص شده از رخساره شیلی مورد نظر با استفاده از روش حرارتی Flash EA 1112 تعیین شد. سپس با استفاده از نمودار ون-کروئل (van-Krevelen) کیفیت، سطح بلوغ و منشأ ماده آلی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۴. اندازه‌گیری بازتاب و یتربیت

برای ارزیابی میزان بلوغ واقعی و همچنین استانداردسازی (Calibration) نتایج مدل‌سازی حرارتی از مقادیر بازتاب و یتربیت استفاده شد. اندازه‌گیری بازتاب و یتربیت یکی از روش‌های معتبر برای تعیین میزان بلوغ حرارتی ماده آلی است (Taylor et al., 1998). میزان بازتاب و یتربیت نمونه‌ها در حالت غوطه‌وری در روغن ایمرسیون و به کمک عدسی ۵۰× با استفاده از میکروسکوپ بازتابی مدل Leica DMR-XP انجام شد.

از نکات مهم در اندازه‌گیری بازتاب و یتربیت برای نمونه‌های دارای ذرات پراکنده و کوچک و یتربیت، تشخیص و یتربیت اولیه (Autochthonous) و ثانویه (Allochthonous) است. در این حالت، بهترین روش تشخیص، اندازه‌گیری اتفاقی بازتاب و یتربیت (VRR) از تعداد زیادی ذره منتسب به ماسرال و یتربیت و رسم منحنی نمودار فراوانی آنهاست. در این مطالعه برای هر ۴ نمونه انتخابی میزان بازتاب و یتربیت ۵۰ تا ۱۳۰ ذره احتمالاً متعلق به گروه و یتربیت اندازه‌گیری و سپس با رسم نمودار، اجتماعات مختلف و یتربیت شناسایی شد. در این موارد گروهی که میانگین بازتاب کمتری دارند، نشان‌دهنده و یتربیت اولیه و اجتماعات بعدی با میانگین بازتاب بالاتر نشان‌دهنده و یتربیت ثانویه هستند. میانگین مقادیر بازتاب و یتربیت اولیه نشانگر بلوغ واقعی است (Hunt, 1995; Nzoussi-Mbassini et al., 2005). شکل ۳ نمودار مقادیر بازتاب و یتربیت را در برخی نمونه‌های شیلی مورد مطالعه از گروه شمشک نشان می‌دهد.

۴-۵. مدل‌سازی حرارتی

تاریخچه تدفین، بلوغ حرارتی و زمان تولید هیدروکربن از شیل سیاه قاعده‌ای گروه

در جایگاه کافت جوان رسوب کرده است. این مطالعه و برخی مطالعات دیگر (e.g. Seyed-Emami, 2003; Wilmsen et al., 2009) نیز جایگاه پیش‌بوم را برای گروه شمشک در البرز ارائه می‌دهد. باور (Brunet et al. (2007) و Shahidi (2008) بر این است که گروه شمشک در محیطی کافتی با نرخ فرونشینی بالا نهشته شده است. طبق نظر این پژوهشگران، فازهای فرونشینی زمین‌ساختی که در زمان رسوب‌گذاری گروه شمشک، البرز خاوری و مرکزی را تحت تأثیر قرار داده است، در ارتباط با نازک‌شدگی پوسته و تشکیل کافت در حوضه خزر جنوبی هستند.

۳-برش مورد مطالعه و نمونه‌برداری

برش طزره در همسایگی معادن زغال‌سنگ طزره و در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان دامغان و ۴۵ کیلومتری باختر شاهرود در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز قرار دارد. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه و رخنمون سطحی گروه شمشک را در البرز نشان می‌دهد.

در برش طزره گروه شمشک به سن تریاس بالایی-باجوسین و با ستبرای ۳۹۰۰ متر یکی از ستبرترین و کامل‌ترین رخنمون‌های گروه شمشک در حوضه البرز است. در این برش، در بخش قاعده‌ای گروه شمشک توالی به‌نسبت ستبری از رسوبات سیلتی و رسی سیاه‌رنگ رخنمون دارد که در این مقاله شیل سیاه قاعده‌ای نامیده می‌شود. این توالی با ستبرای ۱۱۰ متر مربوط به افق ۲۶۰ تا ۳۷۰ متری از قاعده گروه شمشک است.

از دیدگاه چینه‌شناسی، این واحد شامل رسوبات سیلتی-رسی یکنواخت، بدون فسیل و به رنگ سیاه است که به تدریج به سمت بالا به تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ‌های نازک‌لایه تبدیل می‌شود. در افق‌های ماسه‌سنگی لایه‌بندی مورب بزرگ‌مقیاس و لایه‌بندی مورب پشته‌ای (Hummocky cross-stratification) دیده می‌شود. این رسوبات رخساره‌های کربناتی لاگون یا دریای حاشیه‌ای را می‌پوشاند و به سمت بالا توسط رسوبات رودخانه‌ای با افق‌های زغالی جایگزین می‌شود. با توجه به شواهد رسوب‌شناسی، رنگ رخساره، میزان کربن آلی باقیمانده، نبود وجود آثار رد یا بقایای فسیلی، نبود آشفستگی زیستی و شناسایی فسیل دریاچه آب شیرین (Unionites) در افق‌های ماسه‌سنگی آن در نزدیکی برش مورد مطالعه (منطقه پرور)، این واحد در محیط دریاچه‌ای با شرایط فقیر از اکسیژن رسوب‌گذاری کرده است (Fürsich et al., 2005; Fürsich et al., 2009; Shekarifard et al., 2009).

در این پژوهش، ۴۱ نمونه سطحی غیرهوازده به‌طور منظم و سامان‌مند از شیل سیاه قاعده‌ای (C14-C54) و ۸ نمونه نیز از سنگ‌های کربناتی (C1 to C8) از بخش قاعده‌ای گروه شمشک انتخاب شده است. ۵ نمونه دیگر (C9 to C13) از افق‌های بالاتر از برش طزره جمع‌آوری شده است.

۴-روش‌های تجزیه‌ای و مورد مطالعه

در این پژوهش پیرولیز راک-اوال، کلسی‌متری و تجزیه لکو، تخلیص کروژن و تهیه اسلایدهای پالینوفاسیس در آزمایشگاه ژئوشیمی گروه زمین‌شناسی رسوبی دانشگاه پاریس ششم (Paris -06) انجام شد. مطالعات تعیین بازتاب و یتربیت، تهیه قرص صیقلی از کروژن و سنگ‌نگاری آلی در دانشگاه اورلانتز (Orleans-CNRS) و تجزیه عنصری کروژن‌های مورد مطالعه در دانشگاه لیل (Lille) فرانسه انجام گرفته است.

۴-۱. پیرولیز راک-اوال

به‌منظور ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی نمونه‌های انتخابی از دستگاه پیرولیز راک-اوال III (OSA) استفاده شد. متغیرهای به‌دست آمده از این دستگاه عبارتند از: S_1 و S_2 بر حسب میلی‌گرم هیدروکربن در گرم سنگ، T_{max} به‌عنوان یکی از شاخص‌های بلوغ حرارتی بر حسب درجه سانتی‌گراد، میزان کل کربن آلی (TOC) بر حسب درصد وزنی و شاخص هیدروژن $[HI = (S_2/TOC) \times 100]$ بر حسب میلی‌گرم

کربن آلی پس از اندازه گیری کربن غیر آلی محاسبه شده است. بر اساس نتایج تجزیه لکو، میزان کل کربن آلی در نمونه های مورد مطالعه بین ۵٪ تا ۳/۳ درصد و به طور میانگین ۱ درصد وزنی است. با توجه به بلوغ حرارتی زیاد، کربن آلی تعیین شده مقادیر باقیمانده را نشان می دهد. بر اساس این مقدار کربن آلی باقیمانده، شیل سیاه مورد مطالعه به طور اولیه یک سنگ مادر هیدروکربن نسبتاً خوب است (Bordenave, 1993)؛ چرا که با فرض کروژن نوع II به عنوان کروژن اولیه، مقدار کربن آلی این رخساره به طور اولیه و در حالت نابالغ بیش از ۲ درصد وزنی بوده است (Littke & Leythaeuser, 1993; Ibrahimbas & Riediger, 2004).

پس از تحمل بلوغ حرارتی زیاد، میانگین شاخص هیدروژن نمونه ها بسیار کم، حدود ۹ میلی گرم هیدروکربن بر گرم کربن آلی است. پتانسیل زایش ($S_1 + S_2$) نمونه ها نیز بسیار پایین (۱/۱ میلی گرم هیدروکربن بر گرم سنگ) است. این متغیرها نشان می دهند که در حال حاضر شیل سیاه قاعده ای توان تولید هیدروکربن را ندارد و ماده آلی در این واحد تقریباً به طور کامل کربن برجای مانده و فقیر از هیدروژن است. شکل ۵ نمودارهای ژئوشیمیایی مربوط به شاخص هیدروژن (HI)، کربن آلی (TOC) و Tmax نمونه های مورد مطالعه را از بخش قاعده ای گروه شمشک در برش طزره نشان می دهد.

به علت بلوغ حرارتی و دگرسانی شدید ماده آلی تشخیص نوع و منشأ کروژن با استفاده از نمودار HI-Tmax امکان پذیر نیست و مطالعات پالینوفاسیس سنگ نگاری آلی ضروری است (Bordenave, 1993). بر اساس شواهد پالینوفاسیس (مطالعه میکروسکوپی ماده آلی در نور عبوری)، نمونه های مورد مطالعه غنی از ماده آلی بی شکل (Amorphous OM) به رنگ قهوه ای تیره تا سیاه رنگ است که مقدار کم تا متوسط ذرات مات و گاه اسپورهای قهوه ای تیره نیز آن را همراهی می کنند. در یک مورد بقایای بسیار دگرسان شده و مشکوک به جلبک دریای از نوع باتریوکوکوس (*Botryococcus algae*) نیز قابل مشاهده است. بر اساس شواهد سنگ نگاری آلی (مطالعه میکروسکوپی ماده آلی در نور بازتابی)، بیشتر ذرات مات متعلق به ماسرال و پتریت و یا مواد شبیه و پتریت با بازتاب خاکستری روشن است و کمتر اینتریت قابل مشاهده است. ذرات و پتریت به صورت ذرات شکل دار تا نیمه گرد شده دیده می شود که بر حسب اندازه، شکل و حضور و یا نبود پیریت به و پتریت اولیه و ثانویه (ری ورک شده) نسبت داده می شود. در برخی موارد ذرات و پتریت همراه با هاله اکسیدی قابل مشاهده است که نشان دهنده مراحل مختلف اکسیدشدگی و هوازدگی است. وجود و پتریت های کک شده نشانه خروج گاز طی بلوغ حرارتی زیاد است که در برخی نمونه ها قابل مشاهده است. در برخی موارد این ذرات مربوط به اجتماعات پیریت فرمبوییدال با بازتاب زرد رنگ است (شکل ۲).

نمودارهای مربوط به داده های بازتاب و پتریت اندازه گیری شده و مقادیر انحراف از استاندارد (۳۸٪) نیز نشان دهنده اجتماعات و گروه های مختلف و پتریت است. مقادیر انحراف استاندارد بیش از ۰/۱ معرف وجود انواع مختلف و پتریت است.

در نور فرابنفش (UV) هیچ یک از ذرات آلی بویژه ماده آلی بی شکل خاصیت فلورسانس زایی ندارند که این بیانگر دگرسانی شدید و از دست رفتن هیدروکربن نمونه هاست. با توجه به شواهد محیط رسوبی (نبود آثار رد فسیلی و آشفستگی زیستی)، رنگ سیاه رخساره و همچنین وجود پیریت های فرمبوییدال و مقدار کربن آلی باقیمانده، در هنگام رسوب گذاری شیل سیاه دریای (شیل سیاه قاعده ای) شرایط احیا تا نیمه احیا فراهم و شرایط حفظ شدگی ماده آلی به طور نسبی خوب بوده است. با در نظر گرفتن محیط رسوبی و شرایط حاکم، به احتمال زیاد ماده آلی بی شکل به عنوان بخش غالب ماده آلی در شیل سیاه قاعده ای از بقایای تجزیه شده فیتوپلانکتون و باکتری های دریای منشأ گرفته است که در شرایط نابالغ

شمشک در برش طزره با استفاده از نرم افزار Genex4 مدل سازی و بازسازی شد (Beicip-Franlab, 1995). به دلیل نبود حفاری ژرف در محدوده مورد مطالعه، مدل سازی با رسم یک چاه فرضی بر مبنای اطلاعات چینه شناسی گروه شمشک و ردیف های سنگی روی آن انجام شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱. بلوغ حرارتی

میانگین مقادیر بازتاب و پتریت به دست آمده از بخش قاعده ای گروه شمشک و واحد شیل سیاه قاعده ای (۴۰۰ متر قاعده ای گروه شمشک) بین ۱/۹ تا ۲/۲ درصد (میانگین ۲/۱ درصد) است. این عدد نشان دهنده بلوغ حرارتی زیاد بخش قاعده ای گروه شمشک در برش طزره است (شکل ۳). بر اساس مقادیر بازتاب و پتریت به دست آمده، واحد شیل سیاه قاعده ای در بخش پایانی زون کاتازن قرار داشته و در حال حاضر نسبت به تولید هیدروکربن مایع فوق بالغ است.

اگر چه همواره نمی توان به داده های Tmax اعتماد کرد، اما مقادیر قابل قبول Tmax از چند نمونه مورد مطالعه در بخش قاعده ای گروه شمشک بین ۵۵۴ تا ۵۹۹ درجه سانتی گراد (میانگین ۵۷۴ درجه سانتی گراد) است که این مقادیر نیز بلوغ زیادی را نشان می دهد. در نمونه های بسیار بالغ در برخی موارد مقادیر بسیار کم Tmax (کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد) از برخی نمونه های شیل سیاه قاعده ای ثبت شده است. این مقادیر غیرعادی مربوط به شکست حرارتی بیتومن و هیدروکربن های سنگین و باقیمانده در نمونه است و شاخص بلوغ حرارتی نیست (Mongenet et al., 1996). برای مثال مقدار Tmax نمونه C17 حدود ۳۶۰ درجه سانتی گراد است در حالی که میزان بازتاب و پتریت آن ۲ درصد است. گفتنی است این مقادیر غیرعادی از جدول داده ها حذف شده است.

شکل ۴ موقعیت کروژن های انتخابی از بخش قاعده ای گروه شمشک را بر روی نمودار ون-کروژن نشان می دهد. این نتایج نیز همانند داده های بازتاب و پتریت نشان دهنده بلوغ زیاد نمونه های مورد مطالعه است. بر اساس موقعیت نمونه ها، ماده آلی شیل سیاه قاعده ای در زون کاتازن قرار دارد و بخش پایانی مسیر تکاملی کروژن را نشان می دهد. نسبت اتمی H/C نمونه ها بین ۰/۴۴ و ۰/۴۸، درصد و نسبت اتمی O/C بین ۰/۸ و ۱/۴، درصد است. فقیر بودن نمونه ها از هیدروژن می تواند به علت بلوغ حرارتی، تولید هیدروکربن و همچنین اکسیداسیون بخشی ماده آلی باشد (Bordenave, 1993).

بر اساس نتایج بازتاب و پتریت، داده های پیرولیز راک-اول و همچنین ترکیب عنصری کروژن، شیل سیاه قاعده ای گروه شمشک در برش طزره بسیار بالغ بوده و از پنجره تولید نفت گذشته و وارد پنجره تولید گاز شده است. بر اساس تاریخچه تدفین بازسازی شده گروه شمشک در برش طزره (مراجعه به مبحث مدل سازی حرارتی)، شیل سیاه قاعده ای تدفین بسیار زیادی (حدود ۷۰۰۰ متر) را تحمل کرده است. با توجه به نبود شواهدی از آگماتیسیم محلی در اطراف شیل سیاه قاعده ای، بلوغ زیاد این رخساره به تدفین ژرف طی رسوب گذاری نسبت داده می شود. بدیهی است که حتی با در نظر گرفتن شیب زمین گرمایی کم تا متوسط برای این ناحیه، بلوغ مشاهده شده مربوط به ژرفای تدفین است. در صورتی که این واحد در حالت نابالغ غنی از کروژن نفت زا بوده باشد، حجم زیادی هیدروکربن (نفت و گاز) از این شیل غنی از ماده آلی تولید شده است.

۵-۲. مقدار، کیفیت و نوع ماده آلی

با توجه به بلوغ زیاد و نبود کربنات در نمونه های شیلی مورد مطالعه، میزان کربن محاسبه شده از تجزیه لکو (LECO) قابل قبول تر و معرف کل کربن آلی است (Vandenbroucke & Largeau, 2007). در نمونه های کربناتی مورد مطالعه میزان کربنات کلسیم بین ۴۰ تا ۶۷ درصد است (جدول ۱). در نمونه های کربناتی میزان

Fürsich et al. (2005) است. گفتنی است با توجه به شواهد پالینوفاسیس در مدل‌سازی کروژن نوع II برای شیل سیاه قاعده‌ای در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی دوره‌های کافت از روش کافت (Rift procedure) نرم‌افزار Genex4 استفاده شد. در این روش عامل کششی بتا نیز اضافه می‌شود و در این حالت پوسته نازک‌شده و جریان حرارتی بیشتر از سست‌کره تأمین می‌شود. در روش کافت نرم‌افزار، سبترای پوسته ۳۰ کیلومتر و عامل بتا ۱/۴۵ در نظر گرفته شده است. عامل بتا معرف میزان نازک‌شدگی پوسته است. این عامل بین ۱ و ۳ قابل تغییر است. بتای ۳ بیشترین کشش و نازک‌شدگی و بتای ۱ کمترین نازک‌شدگی را در پوسته نشان می‌دهد (Beicip-Franlab, 1995).

با توجه به منحنی‌های تاریخچه تدفین گروه شمشک در برش طزره، بیشترین تدفین شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک پس از رسوب‌گذاری گروه شمشک اتفاق افتاده است. بنابراین بیشترین درجه حرارت و بلوغی که شیل سیاه قاعده‌ای تجربه کرده است، مربوط به زمان رسوب‌گذاری گروه شمشک نبوده و این واقعه پس از ژوراسیک میانی، در زمان نوژن و پیش از بالآمدگی البرز در میوسن (Brunet et al., 2007; Shahidi, 2008) رخ داده است. از این رو، نتایج مدل‌سازی حرارتی و برآورد جریان حرارتی انجام گرفته بر اساس داده‌های بازتاب و تیرینیت، بیانگر جریان حرارتی در زمان رسوب‌گذاری گروه شمشک نبوده و بنابراین در این مطالعه به آن پرداخته نشده است (Shekarifard et al., 2012).

در این نرم‌افزار با استفاده از منحنی نسبت تبدیل کروژن به هیدروکربن (Kerogen transformation ratio) می‌توان زمان ورود به پنجره تولید نفت و زمان بلوغ کامل یک سنگ مادر فوق‌بالغ را بازسازی کرد. طبق تعریف، نسبت تبدیل کروژن عبارت است از نسبت هیدروکربن تولید شده به بیشترین مقدار هیدروکربنی که می‌تواند طی بلوغ کامل یک سنگ مادر مولد هیدروکربن تولید شود (Beicip-Franlab, 1995).

شکل ۷ منحنی‌های نسبت تبدیل کروژن را برای شیل سیاه قاعده‌ای نشان می‌دهد. به‌طور تعجب‌آوری بیشترین نسبت تبدیل کروژن برای شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره با فرض فرضیه‌های مختلف بسیار نزدیک به هم است و زمان ژوراسیک میانی تا کرتاسه آغازین را نشان می‌دهد.

طبق منحنی‌های نسبت تبدیل کروژن مدل‌سازی‌شده، فرضیه‌های مختلف جریان حرارتی و فرض جایگاه کافت و پیش‌بوم تأثیر چندانی بر زمان بلوغ شیل سیاه قاعده‌ای در برش طزره ندارد؛ بنابراین منطقی است بپذیریم زمان بلوغ و تولید هیدروکربن از واحد شیل سیاه قاعده‌ای یا هر سنگ مادر هیدروکربن احتمالی واجد کروژن اولیه نوع II در بخش قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره بدون در نظر گرفتن جایگاه زمین‌ساختی مربوط به این زمان است. بخش قاعده‌ای گروه شمشک در ژوراسیک میانی وارد پنجره نفتی شده (نسبت ۱۰ درصد تبدیل کروژن) و بسیار سریع تقریباً در ژوراسیک پایانی - کرتاسه آغازین به حداکثر بلوغ رسیده است. بعد از آن طی رسوب‌گذاری رسوبات بعدی این واحد وارد مرحله فوق‌بالغ شده است. با توجه به اینکه زمان بلوغ کامل ماده آلی در شیل سیاه قاعده‌ای قبل از ناپیوستگی‌های مهم (کرتاسه بالایی - پالئوسن و فازهای جوان‌تر) در گروه شمشک اتفاق افتاده است، بدون تردید این فازها بر بلوغ این رخساره آلی تأثیری نداشته است؛ بنابراین منطقی است مدل‌سازی تنها با فرض جریان‌های حرارتی متفاوت انجام گیرد. البته به‌منظور اطمینان بیشتر مدل‌سازی با فرض تغییر در زمان هیاتوس و همچنین فرض سبترای متفاوت فرسایش یافته انجام شد که هیچ کدام روی بلوغ این واحد اثری نداشته است.

با فرض مدل کافت نیز زمان بلوغ و تولید هیدروکربن واحد شیل سیاه قاعده‌ای مربوط به پایان ژوراسیک میانی تا ابتدای کرتاسه آغازین تقریباً همزمان با رسوب‌گذاری سازندهای دلیچای و لار است. در این زمان تقریباً تمام کروژن

غنی از هیدروژن بوده و توانایی تولید هیدروکربن را داشته است. به احتمال زیاد این شیل‌ها در حالت نابالغ غنی از کروژن‌های نفت‌زا (دست‌کم کروژن نوع II) بوده است.

بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، پالینوفاسیس و سنگ‌نگاری آلی، شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره پس از تدفین ژرف و تحمل بلوغ حرارتی زیاد با از دست دادن مقدار زیادی هیدروکربن تبدیل به سنگ مادر فوق‌بالغ بسیار فقیر از هیدروژن شده است که تنها توانایی تولید گاز خشک را دارد.

۳-۵. مدل‌سازی تاریخچه تدفین و زمان تولید هیدروکربن

مدل‌سازی حرارتی بر پایه یک سری معادلات فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای استوار است که می‌توان به کمک آن و با در نظر گرفتن فرضیات مختلف زمین‌شناسی، تاریخچه بلوغ و همچنین تولید و خروج هیدروکربن را از یک سنگ مادر هیدروکربن بازسازی کرد (Tissot & Welte, 1984; Ungerer et al., 1990). هر چند نتایج مدل‌سازی به میزان اعتبار و صحت این فرضیات وابسته است، اما با این وجود مدل‌سازی روش بسیار مفیدی برای تعیین صحت این مفروضات است.

برای مدل‌سازی حرارتی و تاریخچه تدفین داده‌های ورودی به نرم‌افزار Genex4 عبارتند از: (۱) شیب زمین گرمایی و یا جریان حرارتی عهد حاضر و گذشته، (۲) سن مطلق و سبترای گروه شمشک و سنگ‌های جوان‌تر، (۳) سنگ‌شناسی و درصد فراوانی آنها در هر واحد یا سازند، (۴) ناپیوستگی‌ها، هیاتوس‌ها و سبترای فرسایش یافته و (۵) شاخص بلوغ حرارتی مانند بازتاب و تیرینیت.

با توجه به نبود چاه اکتشافی در منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی با در نظر گرفتن یک چاه فرضی و از راه برداشت سطحی انجام شد. داده‌های چینه‌شناسی، سبترای جنس واحدهای سنگی گروه شمشک و توالی پوشاننده آن مربوط به مطالعات Fürsich et al. (2009) و Shahidi (2008) است. به دلیل نداشتن اطلاع دقیق از میزان سبترای فرسایش یافته، ناپیوستگی‌های کرتاسه بالایی - پالئوسن و پس از آن به عنوان فاز نبود رسوب‌گذاری در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

تاریخچه تدفین مدل‌سازی‌شده در برش طزره نشان می‌دهد که گروه شمشک از زمان رسوب‌گذاری فرونشینی تقریباً پیوسته و سریعی را به‌ویژه در زمان رسوب‌گذاری بخش قاعده‌ای و همچنین بخش بالایی نشان می‌دهد (شکل ۶).

به‌منظور مدل‌سازی حرارتی گروه شمشک، به دلیل نداشتن آگاهی از تاریخچه حرارتی گذشته حوضه البرز و با توجه به فرضیه‌های ارائه‌شده در مورد جایگاه زمین‌ساختی گروه شمشک، مدل‌سازی حرارتی با فرض جایگاه پیش‌بوم و کافت و همچنین با فرض فرضیه‌های مختلف جریان حرارتی انجام شد تا تأثیر جریان‌های حرارتی متفاوت بر بلوغ پایانی و زمان تولید هیدروکربن از شیل سیاه قاعده‌ای مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. این فرضیه‌ها عبارتند از:

(۱) فرض جریان حرارتی ثابت از ۲۸ تا ۷۰ میلی‌وات بر متر مربع، این مقادیر قابل مقایسه با جریان حرارتی یک حوضه پیش‌بوم عادی است (Allen & Allen, 2005).
(۲) فرض جریان حرارتی متغیر با یک افزایش ۸۰ میلی‌وات بر مترمربع در زمان رسوب‌گذاری گروه شمشک. در این دو مورد، جریان حرارتی تنها از پوسته و سنگ‌کره تأمین می‌شود.

(۳) در نظر گرفتن یک جایگاه کافت با ۳ فرضیه متفاوت شامل: الف) فرض یک فاز طولانی کافت از ۲۱۶ تا ۱۷۰ میلیون سال پیش در طول رسوب‌گذاری گروه شمشک، ب) فرض دو مرحله کافت کوتاه یکی در محدوده زمانی بین ۲۱۶ تا ۱۹۹ میلیون سال (همزمان با رسوب‌گذاری بخش قاعده گروه شمشک) و دیگری در محدوده زمانی بین ۱۸۳ تا ۱۷۰ میلیون سال (همزمان با رسوب‌گذاری بخش بالایی گروه شمشک). مدل‌سازی در این دو حالت فرضیه‌های کافت ارائه شده توسط Brunet et al. (2007) و Shahidi (2008) را مورد آزمایش قرار می‌دهد و ج) فرض یک مرحله کافت کوتاه از ۱۸۳ تا ۱۷۰ میلیون سال (زمان توآرسین - آلنین) که مطابق با نظر

کمتر خورده‌های ویترونیته اولیه و ثانویه است. ماده آلی بی‌شکل بیشتر حاصل تجزیه بقایایی باکتری‌ها و فیتوپلانکتون‌های دریاچه‌ای است که به‌طور اولیه در حالت نابالغ و پیش از مرحله کاتازنز غنی از هیدروکربن (کروژن‌های نفت‌زا) بوده‌اند.

- در حال حاضر این رخساره آلی به‌عنوان سنگ مادر مؤثر است که دارای ماده آلی دگرسان‌شده و بسیار فقیر از هیدروژن است. از نظر بلوغ حرارتی این رخساره فوق‌بالغ است و در زون تولید گاز خشک (متان) قرار دارد.

- براساس نتایج مدل‌سازی حرارتی، شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره در زمان ژوراسیک میانی تا کرتاسه آغازین پیش از عملکرد فازهای مهم کوهزایی در البرز به‌طور کامل بالغ شده و مقدار زیادی هیدروکربن تولید و خارج کرده است. - با توجه به بالاآمدگی البرز در زمان میوسن و عملکرد فاز کوهزایی لارامید به احتمال زیاد هیدروکربن‌های تولیدشده شانس کمی برای حفظ‌شدگی داشته و در صورت تشکیل تجمعات اقتصادی در ادامه از بین رفته و فرسایش یافته‌اند.

- بر اساس نتایج بازسازی تاریخچه تدفین، این رسوبات در برش طزره تدفین بسیار زیادی (حدود ۷۰۰۰ متر) را تحمل کرده‌اند و با توجه به نبود فعالیت‌های آتشفشانی در منطقه مورد مطالعه، بلوغ مشاهده‌شده بیشتر نتیجه این تدفین رسوبی ژرف است.

سپاسگزاری

از دانشگاه‌های اورلآنز (Orleans) و لیل (Lille) فرانسه به‌خاطر همکاری در آماده‌سازی نمونه‌ها و اجازه استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی بویژه سنگ‌نگاری آلی و تعیین بازتاب ویترونیته تشکر می‌شود. از مؤسسه نفت فرانسه (IFP) برای در اختیار قرار دادن نرم‌افزار تجاری Genex4 سپاسگزاری می‌شود. از همکاران گرامی آقایان دکتر علیرضا شهیدی و دکتر محمود رضا مجیدی فرد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) نیز تشکر می‌شود.

موجود در شیل سیاه قاعده‌ای به‌طور کامل بالغ شده و هیدروکربن تولید کرده است. این واحد طی تدفین‌های بعدی و در نتیجه تحمل بیشتر حرارت، وارد زون فوق‌بالغ شده است.

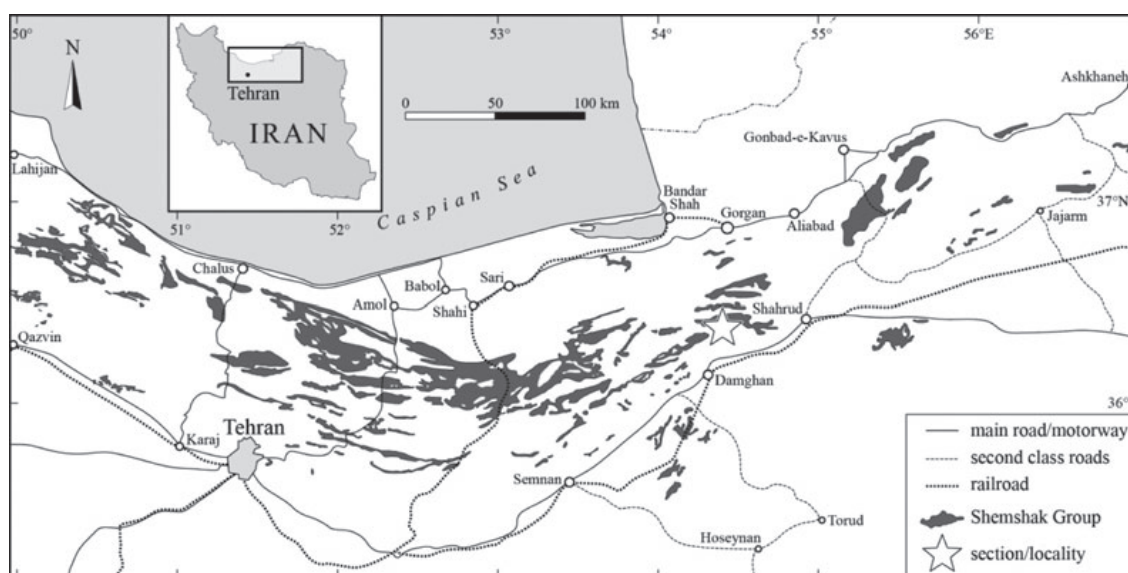
در تأیید نتایج ژئوشیمیایی و سنگ‌نگاری آلی، نتایج مدل‌سازی حرارتی نیز نشان می‌دهد که شیل سیاه قاعده‌ای طزره در حال حاضر فوق‌بالغ است که در زمان ژوراسیک میانی - کرتاسه آغازین پیش از عملکرد فازهای کوهزایی مهم البرز (مانند فاز لارمید در زمان کرتاسه پایانی - پالئوسن) هیدروکربن تولید کرده است.

به‌احتمال زیاد هیدروکربن‌های تولید شده در امتداد گسل‌های موجود در گروه شمشک (Shahidi, 2008) به سمت بخش‌های بالایی و جانبی گروه شمشک مهاجرت کرده و درون افق‌های ماسه‌سنگی به‌عنوان اولین سنگ مخزن احتمالی درون گروه شمشک به‌دام افتاده‌اند. البته با توجه به بالاآمدگی‌های بی‌شمار البرز و فرسایش‌های به‌دنبال آن به‌احتمال زیاد منابع احتمالی هیدروکربن به‌دام‌افتاده در مخازن ماسه‌سنگی گروه شمشک از بین رفته‌اند و بنابراین پتانسیل حفظ‌شدگی و اکتشاف منابع هیدروکربنی مایع در این ناحیه از البرز کم است. البته این رخساره‌های غنی از ماده آلی بسیار بالغ به‌عنوان مخازن نامتعارف گاز شیل (Shale Gas) قابل توجه هستند.

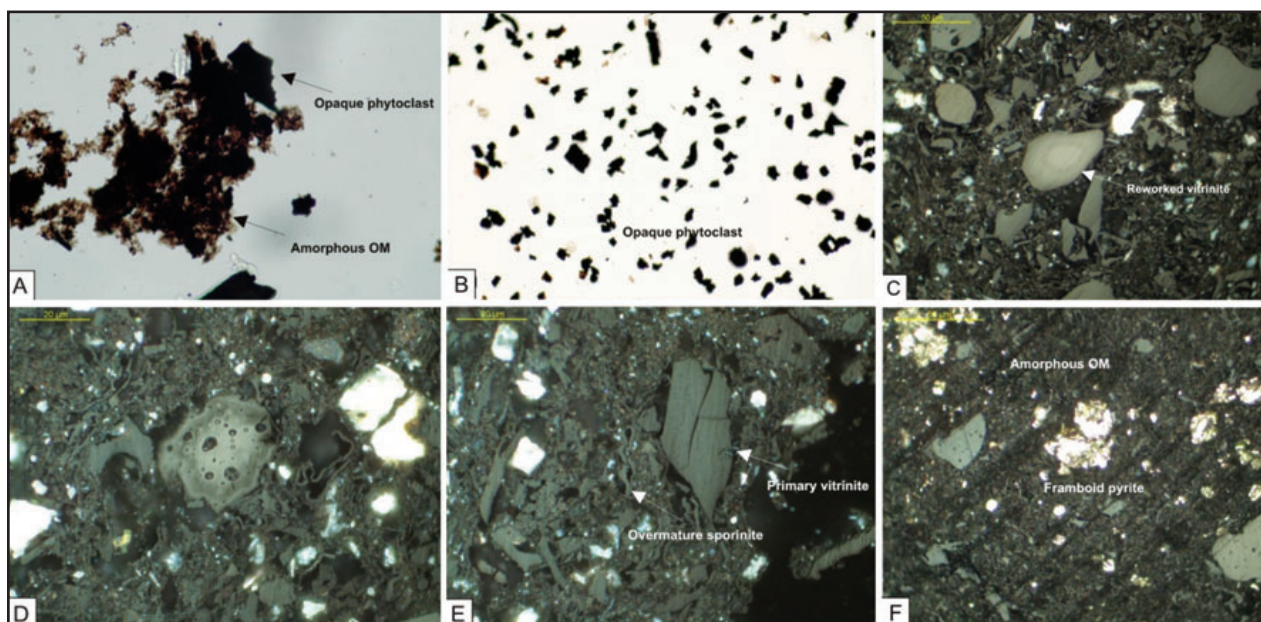
۵- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده عبارت است از:

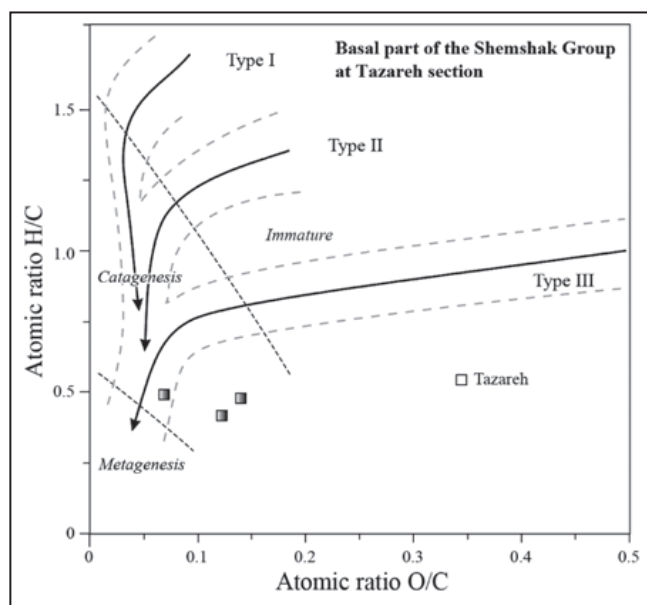
- شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره با ستبرای کمی بیش از ۱۰۰ متر و با میانگین کربن آلی باقیمانده حدود ۱ درصد در یک محیط دریاچه‌ای فقیر از اکسیژن رسوب کرده است.
- اجزای آلی تشکیل‌دهنده این رخساره آلی بیشتر شامل ماده آلی بی‌شکل و به‌مقدار



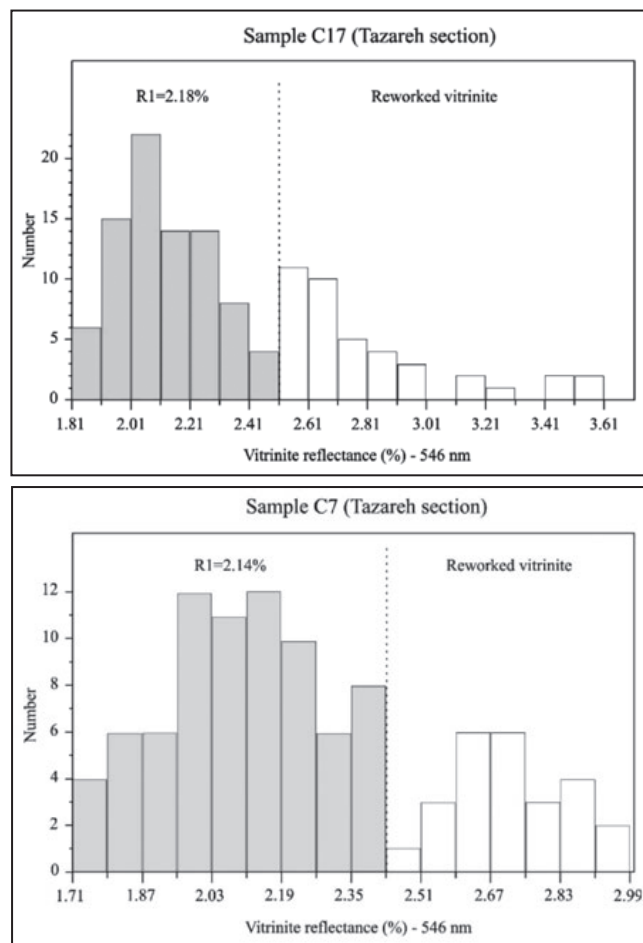
شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و رخنمون گروه شمشک در حوضه رسوبی البرز در شمال ایران.



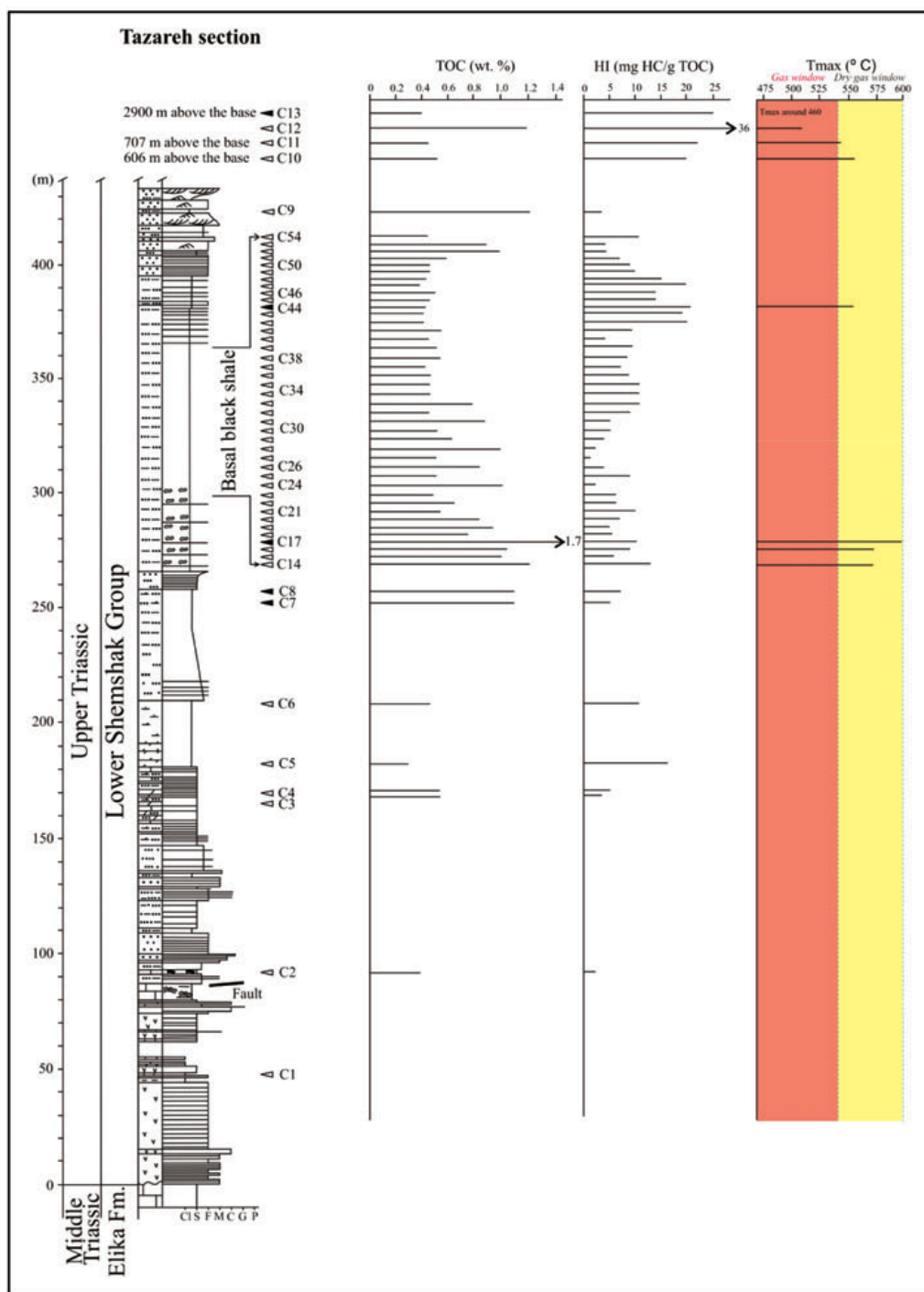
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی ماده آلی در نور عبوری (A, B) و انعکاسی (C, D, E, F) از شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره. (A) ماده آلی بی‌شکل به همراه فیتو کلاست‌های مات (Opaque phytoclasts) در اسلاید فیلتر نشده ($\times 100$). (B) قطعات فیتو کلاست مات در اسلاید فیلتر شده ($\times 200$). (C) قطعات ویتترینیت با هاله‌های اکسیدی. (D) قطعات ویتترینیت کک شده (ویتترینیت حفره دار) طی بلوغ حرارتی زیاد. (E) ویتترینیت اولیه همراه با اسپوره‌های بسیار بالغ که بازتاب مشابهی با ویتترینیت دارد. (F) پیریت‌های فرموبیدال همراه با ماده آلی بی‌شکل.



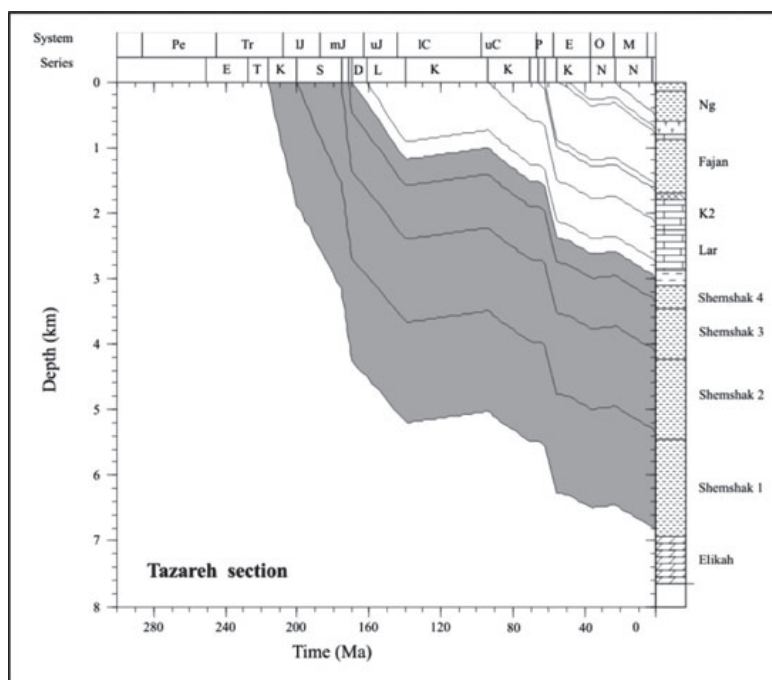
شکل ۴- موقعیت کروژن‌های انتخابی از بخش قاعده‌ای گروه شمشک روی نمودار ون-کروتن.



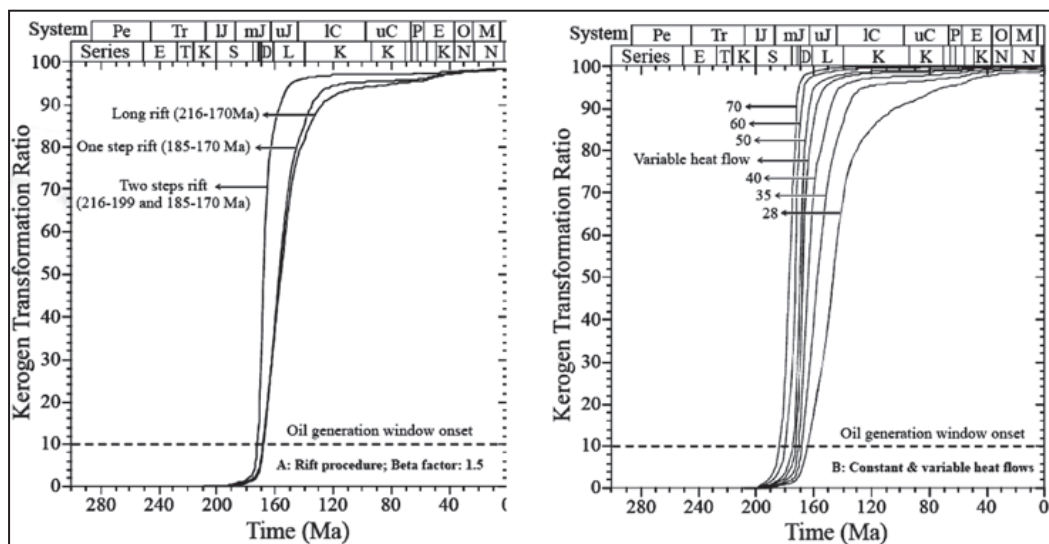
شکل ۳- نمودارهای مقادیر بازتاب ویتترینیت در برخی نمونه‌های شیلی مورد مطالعه از بخش قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره.



شکل ۵- نمودارهای حاصل از نتایج پیرولیز راک-اوال نمونه‌های مورد مطالعه از بخش قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره.



شکل ۶- منحنی تاریخچه تدفین گروه شمشک در برش طزره در البرز خاوری.



شکل ۷- منحنی‌های نرخ تبدیل کروژن در شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک در برش طزره با شرایط حرارتی متفاوت.

جدول ۱- نتایج حاصل از پیرولیز راک-اوال و تجزیه لکو نمونه‌های انتخابی از شیل سیاه قاعده‌ای گروه شمشک و چند نمونه دیگر از بخش‌های مختلف در برش طزره.

Sample	Section	Tmax	S1	S2	TOC	LECO	HI	Caco3
C1	Tazareh		0.06		0.02	0.54		58
C2	Tazareh		0.01	0.01	0.4	0.92	2	52
C3	Tazareh		0.01	0.02	0.53	1.34	3	40
C4	Tazareh		0.01	0.03	0.55	1.62	5	43
C5	Tazareh		0.01	0.05	0.3	2.07	16	60
C6	Tazareh		0.01	0.05	0.46	1.53	11	67

ادامه جدول ۱

Sample	Section	Tmax	S1	S2	TOC	LECO	HI	Caco3
C7	Tazareh		0.03	0.06	1.17	3.29	5	42
C8	Tazareh		0.03	0.08	1.14	2.66	7	47
C9	Tazareh		0.01	0.04	1.21	1.21	3	0
C10	Tazareh	554	0.03	0.11	0.54	0.98	20	0
C11	Tazareh	542	0.11	0.1	0.44	0.6	22	0
C12	Tazareh	510	0.05	0.44	1.19	1.63	36	0
C13	Tazareh		0.02	0.1	0.4	0.57	25	0
C14	Tazareh- Basal black shale	571	0.03	0.17	1.24	1.95	13	0
C15	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.07	1.05	1.52	6	0
C16	Tazareh- Basal black shale	572	0.03	0.11	1.13	1.85	9	0
C17	Tazareh- Basal black shale	599	0.02	0.14	1.74	2.2	8	0
C18	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.78	0.96	6	0
C19	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.97	1.28	5	0
C20	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.06	0.82	1.02	7	0
C21	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.06	0.56	0.73	10	0
C22	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.04	0.65	0.84	6	0
C23	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.03	0.5	0.66	6	0
C24	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.03	1.07	1.15	2	0
C25	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.05	0.54	0.66	9	0
C26	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.04	0.84	1.07	4	0
C27	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.01	0.52	0.66	1	0
C28	Tazareh- Basal black shale		0.07	0.03	1.04	1.25	2	0
C29	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.03	0.62	0.87	4	0
C30	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.03	0.51	0.67	5	0
C31	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.89	1.02	5	0
C32	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.04	0.44	0.61	9	0
C33	Tazareh- Basal black shale		0.04	0.09	0.8	1.03	11	0
C34	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.45	0.63	11	0
C35	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.44	0.6	11	0
C36	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.04	0.46	0.61	8	0
C37	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.03	0.41	0.59	7	0
C38	Tazareh- Basal black shale		0.02	0.04	0.48	0.63	8	0
C39	Tazareh- Basal black shale		0.03	0.05	0.51	0.63	9	0
C40	Tazareh- Basal black shale		0.13	0.02	0.45	0.69	4	0
C41	Tazareh- Basal black shale		0.16	0.05	0.53	0.71	9	0
C42	Tazareh- Basal black shale		0.07	0.09	0.43	0.53	20	0
C43	Tazareh- Basal black shale		0.05	0.08	0.42	0.63	19	0
C44	Tazareh- Basal black shale	554	0.07	0.1	0.46	0.64	21	0
C45	Tazareh- Basal black shale		0.06	0.07	0.47	0.61	14	0
C46	Tazareh- Basal black shale		0.05	0.07	0.49	0.55	14	0
C47	Tazareh- Basal black shale		0.06	0.08	0.39	0.62	20	0
C48	Tazareh- Basal black shale		0.09	0.07	0.45	0.61	15	0
C49	Tazareh- Basal black shale		0.05	0.05	0.47	0.56	10	0
C50	Tazareh- Basal black shale		0.05	0.04	0.44	0.61	9	0
C51	Tazareh- Basal black shale		0.04	0.04	0.62	0.82	6	0
C52	Tazareh- Basal black shale		0.3	0.04	0.99	0.96	4	0
C53	Tazareh- Basal black shale		0.05	0.04	0.9	1.06	4	0
C54	Tazareh- Basal black shale		0.06	0.05	0.43	0.7	11	0

References

- Assereto, R., 1966- The Jurassic Shemshak Formation in central Elburz (Iran). Riv Ital Paleont Stratigr 72:1133–1182
- Allen, P. A. & Allen, J. R., 2005- Basin analysis principles and application. 2nd ed., Blackwell Scientific Publications, 549p.
- Beicip-Franlab, 1995- The basin modeling line and 1D quantitative modeling of hydrocarbons generation and expulsion for WINDOWS, Genex Single Well (User Guide) Beicip-Franlab, 464 p.
- Bordenave, M. L., 1993- (ed.) Applid petroleum geochemistry, Editions Technip, 524p.

- Brunet, M. F., Shahidi, A., Barrier, E., Muller, C., & Saidi, A., 2007- Subsidence evolution of Alborz and Kopet Dag (northern Iran): Inferences on the south Caspian basin opening. International symposium on Middle East Basins Evolution, C16, December, 4. 5., CNRS PARIS, France.
- Espitalié, J., Deroo, G. & Marquis, F., 1985a- La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Patrie I. Rev. Inst. Fr. Pétrole*, 40/5, 563-579.
- Espitalié, J., Deroo, G. & Marquis, F., 1985b- La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Patrie II. Rev. Inst. Fr. Pétrole*, 40/6, 755-784.
- Espitalié, J., Deroo, G. & Marquis, F., 1986- La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Patrie III. Rev. Inst. Fr. Pétrole*, 41/1, 73-89.
- Fürsich, F. T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K., Cecca, F., & Majidifard, M. R., 2005- The upper Shemshak Formation (Toarcian-Aalenian) of the eastern Alborz: Biota and paleoenvironments during a transgressive-regressive cycle. *Facies*, 51, 365-384.
- Fürsich, 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 312. 129-160.
- Hunt, J. W., 1995- *Petroleum geochemistry and geology*, 2nd ed., New York, W. H. Freeman and Company. 742p.
- Ibrahimbas, A. & Riediger, C., 2004- Hydrocarbon source rock potential as determined by Rock-Eval 6/TOC pyrolysis, Northeast British Columbia and Northwest Alberta. British Columbia Ministry of Energy and Mines, summary of activities 2004.7-18.
- Littke, R. & Leythaeuser, D., 1993- Migration of oil and gas in coals. In: Law, B. E. & Rice, D. D. (eds): *Hydrocarbons from coal*. American Association Petroleum Geologists Studies in Geology, 38, 219-236.
- Mongenot, Th., Tribouillard N. P., Desprairies A., Lallier-Vergès E. & Laggoun-Défarge, F., 1996- Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: the Cretaceous La Luna Formation of Venezuela. *Sedimentary Geology*, 102, 23-37.
- Nzoussi-Mbassani, P., Copard, Y. & Disnar, J. R., 2005- Vitrinite recycling: diagnostic criteria and reflectance changes during weathering and reburial. *International Journal of Coal Geology*, 61, 223-239.
- Rad, F. K., 1982- Hydrocarbon potential of the Eastern Alborz Region, NE Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 4, 419-435.
- Rahimpour- Bonab, H., Zamani, Z. & Kamali, M. R., 2002- Source rock evaluation of Shemshak Formation in the central Alborz basin: A preliminary investigation. *Iranian International Journal of Science*. 3/2, 235-262.
- Seyed-Emami, K., 2003-Triassic in Iran, *Facies*, 48, 91-106.
- Seyed-Emami, K., Fürsich, F. T., Wilmsen, M., Majidifard, M. R., Cecca, F., Scharirer, G. & Shekarifard, A., 2006- Stratigraphy and ammonite fauna of the Upper Shemshak Formation (Toarcian-Aalenian) at Tazareh, eastern Alborz, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. 28, 259-275.
- Shahidi, A., 2008- Tectonic evolution of Northern Iran (Alborz and Kopet Dag) since Mesozoic. PhD thesis, University Paris 6-Pierre et Marie Curie, 500 p.
- Shekarifard, A., Baudin, F., Schynder, J. & Seyed-Emami, K., 2009- Characterization of organic matter in the fine-grained siliciclastic sediments of the Shemshak Group (Upper-Triassic to Middle Jurassic) in the Alborz Range, northern Iran. In: Brunet, M.-F., Wilmsen, M. & Granath, J. W (eds), *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society London, Special Publication 312. 161-174.
- Shekarifard, A., Baudin, F., Seyed-Emami, K., Schynder, J., Laggoun-Défarge, F., Riboulleau A. Brunet, M. F. & Shahidi, A., 2012- Thermal maturity of the Upper Triassic-Middle Jurassic Shemshak Group (Alborz Range, Northern Iran) based on organic petrography, geochemistry and modelling: implications for source rock evaluation and petroleum exploration, *Geological Magazine*, 149(1), 19-38 p.
- Taylor, G. H., Teichmuller, M., Davis, A., Diessel, C. F. K., Littke, R. & Robert, P., 1998- *Organic petrology*. Borntraeger, Berlin-Stuttgart. 704 p.
- Tissot, B. P. & Welte, D. H., 1984- *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin. 699 p.
- Ungerer, Ph., Burrus, J., Doligez, B., Chenet, P. Y. & Bessis, F., 1990- Basin evaluation by integrated 2D modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration. *Bull. Am. Assoc. Petr. Geol.*, 74, 309-335.
- Vandenbroucke, M. & Largeau, C., 2007- Kerogen origin, evolution and structure, *Organic Geochemistry*, 38, 719-833.
- Wilmsen, M., Fürsich, F. T., Seyed-Emami, K., Majidifard, M. R. & Taheri, J., 2009- The Cimmerian Orogeny in northern Iran: tectono-stratigraphic evidence from the foreland, *Terra Nova*, 21, 211-218.

in the earth surface displacement studies. Indeed using temporal variations of the earth surface deformation, the seismotectonics of the area can be distinguished. Deformation modeling of the area can be accessed using the analyzing of repeated geodetic measurements. In Tehran area the earthquake studies is an important task and in this paper we are going to use GPS measurements for this field. Here 35 GPS stations cover whole of Tehran which consists North Tehran fault. These stations were occupied at least 2 annual epochs and some of them were measured more than 4 times. After processing the acquired data and analyzing the results, the velocity field was obtained. Deformation analysis of the velocity field shows a small left lateral movement about 0.5-2 mm/year and more or less the same value for shortening in the northern band Tehran area. This value is not constant along the northern band and it seems the eastern part where we reach the Mosha fault the deformation is more significant than western part. The observed rate is equal to a total movement of ~5km during 2.5-10 my which is consistent with geological studies carried out in this area.

Key words: Geodesy, Seismotectonic, Northern band of Tehran, Deformation, GPS

For Persian Version see pages 211 to 218

*Corresponding author: Y. Djamour; E-mail: djamour@ncc.org.ir

Organic Matter Characterization and Thermal Modeling of the Basal Black Shale from the Shemshak Group (Upper Triassic- Middle Jurassic) in the Tazareh Section, Eastern Alborz, Northern Iran

A. Shekarifard¹, F. Baudin², K. Seyed-Emami³, J. Schnyder² & H. Rahimpour-Bonab⁴

¹School of Chemical Engineering, Institute of Petroleum Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

²Institut des Sciences de la Terre de Paris, UPMC-Univ. Paris06 et CNRS, UMR 7193, Paris, France.

³School of Mining Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

⁴School of Geology, University College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 2011 February 27

Accepted: 2011 June 07

Abstract

Geochemical characteristics (Rock-Eval pyrolysis and elemental analysis of kerogen), palynofacies and organic petrography (using light transmitted-reflected-uv microscopy) of the basal black shale from the Shemshak Group (Upper Triassic- Middle Jurassic) in the Tazareh section (Eastern Alborz) have been investigated. The basal black shale is rich in amorphous organic matter with fewer amounts of vitrinite particles that was deposited in lacustrine environment under anoxic to suboxic conditions. According to vitrinite reflectance values (mean VR_r=2.1%), organic matter of the basal black shale has experienced high thermal maturity during deep burial. In this study samples residual organic carbon content is 1 wt.% on average. Thermal modeling results using 1D Genex4 software show that the basal black shale of the Shemshak Group became mature during the Middle Jurassic-Lower Cretaceous time and generated hydrocarbon. At the present day, this organic facies in the Tazareh section is thermally over-mature and depleted in hydrogen and is located in the dry gas generation window. Presently, these sediments are considered as shale gas resources.

Keywords: Thermal modeling, Petroleum source rock evaluation, Shemshak Group, Upper Triassic-Middle Jurassic, Tazareh section, Alborz, Northern Iran.

For Persian Version see pages 219 to 228

*Corresponding author: A. Shekarifard; E-mail: ashekary@ut.ac.ir