

# بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند مبارک با استفاده از روش ژئوشیمیایی پیرولیز راک-ایول ۲

مهناز حکمت شعار<sup>۱</sup>، علی اکبر حسن نژاد<sup>۱</sup>، محمود معماریانی<sup>۲\*</sup> و حسین مصدق<sup>۳</sup>

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، ایران

۲- پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲

## چکیده

به منظور ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند مبارک، تعداد ۱۹ نمونه سطح‌الارضی از برش میغان در شمال شرق شاهرود (البرز شرقی) مورد آنالیزهای ژئوشیمیایی پیرولیز راک-ایول ۲ قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که سازند مبارک در برش مذکور با داشتن مقادیر نسبتاً بالای کل کربن آلی و تحمل درجه حرارت کافی، دارای پتانسیل هیدروکربن‌زایی بوده که از مرحله دیانز عبور کرده است. رسم مقادیر  $T_{max}$  در مقابل شاخص هیدروژن (دیاگرام ون کرولن)، برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد که، سازند مبارک در منطقه میغان دارای کروژنی از نوع III و به مقدار کمتر مخلوطی از کروژن نوع II/III می‌باشد. مواد آلی موجود در سازند مبارک در برش مذکور با داشتن  $T_{max}$  بین ۴۵۵ تا ۴۹۸ °C، از پنجره نفت‌زایی عبور کرده و به مرحله تولید گاز مرطوب رسیده است. توزیع داده‌ها بر روی منحنی تغییرات رخساره آلی براساس مقادیر OI در مقابل HI عمدتاً در محدوده گروه D و CD قرار دارد که معرف محیط اکسیدان می‌باشد. با توجه به نسبت  $S_2/S_3$  مواد آلی افق‌های بالایی این سازند در مقایسه با لایه‌های زیرین کیفیتی بالاتر دارد. با افزایش اندک در محتویات کل کربن نمونه‌ها، به نظر می‌رسد ورود مواد آلی با منشاء خشکی و با نرخ رسوب‌گذاری نسبتاً ثابت به حوضه رسوبی رخ داده باشد.

**کلمات کلیدی:** پیرولیز راک-ایول ۲، پتانسیل هیدروکربن‌زایی، سازند مبارک، میغان، پنجره نفت‌زایی

## مقدمه

استفاده نمود [۱ و ۲]. روش پیرولیز راک-ایول ۲ (Rock-Eval-II)، که روش حرارت دادن مستقیم نمونه‌ها می‌باشد، بهترین ابزار برای تعیین مقدار ماده آلی است. روش‌های متداول پیرولیز کم‌هزینه و سریع بوده و استفاده از آنها در شرایط ساده و عادی نیز میسر است.

در بررسی‌ها و مطالعات ژئوشیمیایی آلی سنگ‌های مولد هیدروکربن جهت ارزیابی کیفیت سنگ منشأ، می‌توان از تکنیک‌های اپتیکی و روش‌های پیرولیزی

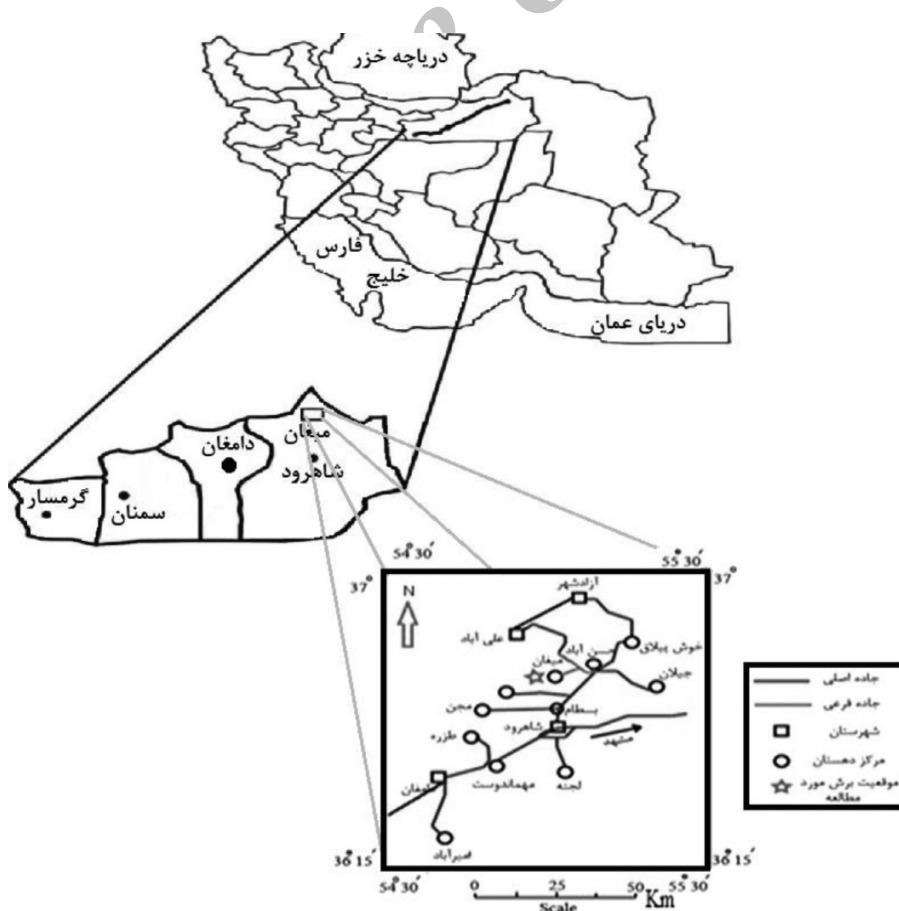
و عرض جغرافیایی  $38^{\circ} 36' 12''$  شمالی در  $20$  کیلومتری شمال شرق شهرستان شاهرود واقع شده است (شکل ۱). این برش در نقشه زمین‌شناسی با مقیاس  $1:250,000$  گرگان [۱۲] نشان داده شده است (شکل ۲).

### روش مطالعه

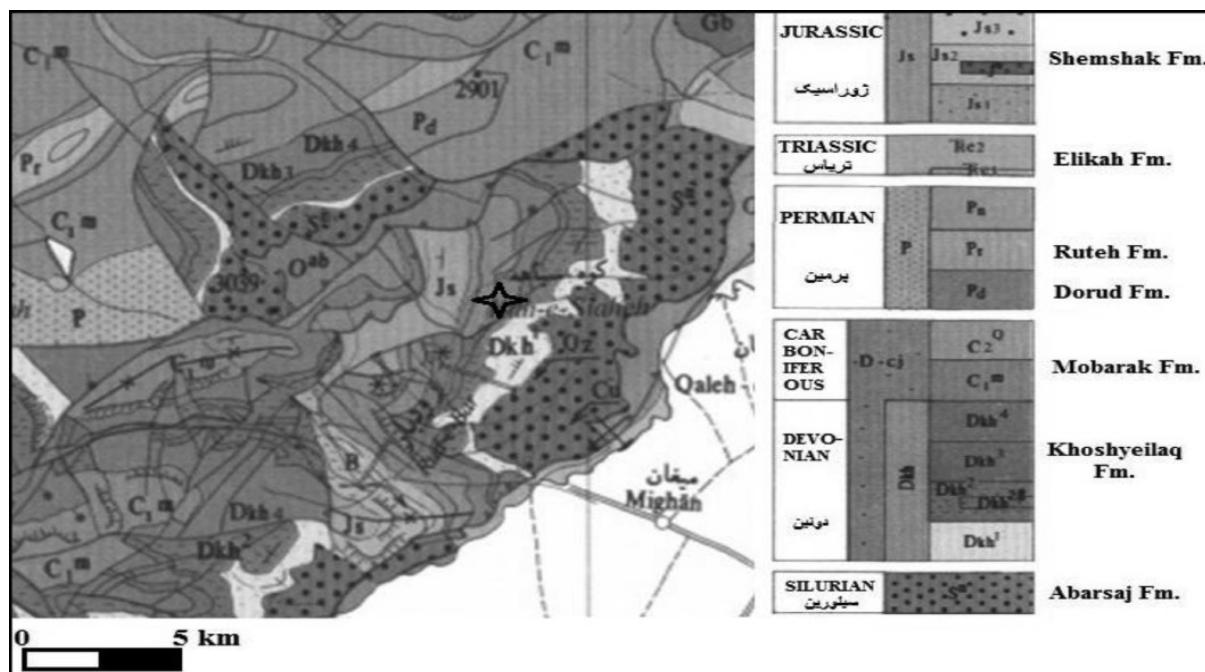
در این پژوهش افق‌ها و طبقات غنی از مواد آلی سازند مبارک در شمال شرق شهرستان شاهرود، از دیدگاه پتانسیل هیدروکربن‌زایی و بررسی‌های مقدماتی ژئوشیمیایی مطالعه گردید. بر این اساس، در ابتدا تعداد ۴ نمونه از بخش‌های مختلف برش برداشت و به منظور بررسی‌های اولیه به واحد ژئوشیمی پژوهشگاه صنعت نفت ایران جهت آنالیز راک-۲ ارسال گردید و باتوجه به نتایج مطلوب اولیه، در مراحل بعدی تعداد ۱۹ نمونه سطح‌الارضی برداشت و مورد پیرولیز راک-۲ قرار گرفت.

این ابزار، اطلاعات با ارزشی در مورد محتویات کل کربن آلی (TOC)، کیفیت و نوع ماده آلی، بلوغ، پتانسیل بالقوه و بالفعل، رخساره زیستی منطقه مورد مطالعه، وضعیت محیط نهشتگی از لحاظ شرایط اکسیدان و احیا و مهاجرت هیدروکربن از سنگ منشأ ارائه می‌دهد [۳-۵].

سازند شیلی-آهکی مبارک با سن کربونیفر پیشین (ویزین - نامورین) در گستره وسیعی از البرز رخنمون داشته و توسط محققین مختلف و از دیدگاه‌های متفاوتی مورد مطالعه قرار گرفته است [۶-۹]. با توجه به گسترش رخساره‌های شیلی و مادستونی در بیشتر رخنمون‌ها، پتانسیل زایش هیدروکربن برای اولین بار در برش‌های تویه رودبارو لب نسا [۱۰] و میغان [۱۱] مورد پژوهش قرار گرفت. برش میغان در شمال شرق شهرستان شاهرود با ضخامت حدود  $450$  m، بین طول جغرافیایی  $54^{\circ} 57' 09''$  شرقی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه [۱۱].



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه میغان، برگرفته از نقشه گلستان [۱۲].

هیدروژن (HI) و شاخص پتانسیل هیدروکربن (PI) نمونه‌های مورد آنالیز محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل بر روی نمونه‌های سازند مبارک در برش میغان در جدول ۱ منعکس شده است.

### بحث و بررسی

بررسی‌های مقدماتی نشان می‌دهد (جدول ۱)؛ که نمونه‌های مورد مطالعه در برش میغان دارای حداقل هیدروکربن‌های تولیدی ( $S_1$ ) به میزان ۰/۰۶ (میلی‌گرم بر گرم سنگ)، بوده و از طرف دیگر حداکثر توان و پتانسیل تولیدی آنها که براساس پارامتر ( $S_2$ ) مشخص می‌شود، نیز از ۰/۰۹ (میلی‌گرم هیدروکربور بر گرم سنگ) تجاوز نمی‌کند. میزان پختگی مواد آلی ( $T_{max}$ )، این نمونه‌ها از ۴۵۵ تا ۴۹۸ متغیر می‌باشد. این محدوده از میزان پختگی نشان از گذر مواد آلی از مرحله اواسط پنجره نفت‌زایی و شروع مرحله گاززایی می‌باشد. کل کربن آلی (TOC)، نمونه‌های تحت مطالعه نیز از حداقل ۰/۷۷٪ تا حداکثر ۲/۰۶٪ متغیر است.

پیرولیز راک-ایول ۲ روشی حرارتی، است و برای تشخیص اولیه نوع و درجه بلوغ مواد آلی و همچنین مشخص کردن پتانسیل تولید هیدروکربن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

در این روش حرارتی، پس از پودر کردن نمونه‌ها در هاون تا حد مش ۱۰۰ و همگن‌سازی آنها، مقدار ۱۰۰ mgr از نمونه‌ها در کپسول‌های کوچکی قرار داده شده و تحت دو مرحله پیرولیز و اکسیداسیون قرار می‌گیرند. در این تکنیک تعدادی از پارامترها به‌صورت کمی و برخی به‌صورت کیفی بیان می‌شوند. نمونه‌های پودر شده طی فرآیند پیرولیز و با برنامه مشخص دمایی، کروژن موجود در آنها متحمل شکست حرارتی شده و تولید هیدروکربور می‌نماید، سپس در مرحله اکسیدان، نمونه‌ها در حضور اکسیژن حرارت می‌یابند. در این روش مقدار هیدروکربن آزاد ( $S_1$ )، توان هیدروکربن‌زایی ( $S_2$ )، مقدار دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) موجود در کروژن که در اثر شکست حرارتی از نمونه تولید می‌گردد ( $S_3$ )، مقدار کل کربن آلی موجود در نمونه (TOC)، دمای بیشینه پیک  $S_2$  ( $T_{max}$ ) تعیین می‌گردد. همچنین با استفاده از پارامترهای فوق، شاخص اکسیژن (OI) ۱، شاخص

1. Oxygen Index
2. Hydrogen Index
3. Production Index

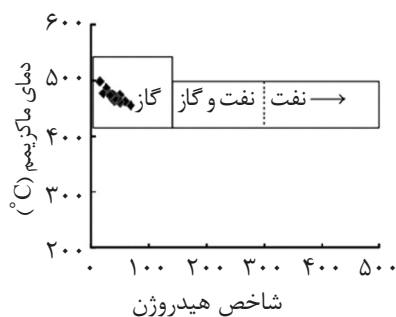
جدول ۱- مقادیر پارامترهای حاصل از پیرولیز راک- اول بر روی نمونه‌های برش میغان:

Sample	S <sub>1</sub> (mg HC/g) Rock	S <sub>2</sub> (mg HC/g) Rock	S <sub>3</sub> (mg CO <sub>2</sub> /g) Rock	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (mg HC/g) Rock	S <sub>2</sub> /S <sub>3</sub>	T <sub>max</sub> (°C)	HI (mg HC/g) TOC	OI (mg HC/g TOC)	TPI (mgHC/ mgCO <sub>2</sub> )	TOC (wt%)
Mg1	۰/۲۲	۱/۰۴	۰	۱/۲۶	۰	۴۵۵	۶۹	۰	۰/۱۷	۱/۵۱
Mg2	۰/۳۷	۰/۸۱	۰/۸۹	۱/۰۸	۰/۹۱	۴۶۰	۵۱	۵۶	۰/۲۵	۱/۵۹
Mg3	۰/۱	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۵۹	۱/۱۴	۴۶۳	۴۱	۳۶	۰/۱۷	۱/۲
Mg4	۰/۱	۰/۶۱	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۹۲	۴۶۷	۳۹	۴۲	۰/۱۴	۱/۵۷
Mg5	۰/۶	۰/۷	۰/۹۴	۱/۳	۰/۷۴	۴۷۳	۵۰	۶۷	۰/۴۶	۱/۴
Mg6	۰/۱۵	۰/۶۱	۰/۲۶	۰/۷۶	۲/۴۵	۴۶۲	۵۹	۲۵	۰/۲	۱/۰۴
Mg7	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۳۷	۱/۶۵	۴۶۶	۳۹	۲۴	۰/۲۴	۰/۷۱
Mg8	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۳۱	۴۹۸	۱۵	۴۷	۰/۳۵	۰/۶۲
Mg9	۰/۱۲	۰/۵	۰/۱۵	۰/۶۲	۳/۳۳	۴۶۵	۴۴	۱۳	۰/۱۹	۱/۱۴
Mg10	۰/۱۵	۰/۴۹	۰/۲۱	۰/۶۲	۲/۲۳	۴۶۱	۵۰	۲۱	۰/۲۳	۰/۹۸
Mg11	۰/۲	۰/۳۶	۰/۰۲	۰/۵۶	۱/۸	۴۶۷	۴۷	۳	۰/۳۶	۰/۷۷
Mg12	۱	۰/۵۹	۱/۲	۱/۵۹	۰/۴۹	۴۸۱	۲۹	۵۸	۰/۶۳	۲/۰۶
Mg13	۰/۲۶	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۷۳	۰/۷۹	۴۷۴	۳۲	۴۰	۰/۳۶	۱/۴۷
Mg14	۰/۲۵	۰/۶	۰/۰۸	۰/۸۵	۷/۵	۴۷۱	۴۲	۶	۰/۲۹	۱/۴۲
Mg15	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۵۶	۴۷۶	۲۱	۳۶	۰/۳۷	۰/۸۶
Mg16	۰/۱۸	۰/۷	۰/۱	۰/۸۸	۷	۴۶۷	۴۲	۱۶	۰/۲	۱/۶۵
Mg17	۰/۲۱	۰/۶۳	۰/۳۳	۰/۸۴	۱/۹۱	۴۷۴	۳۸	۲۰	۰/۲۵	۱/۶۸
Mg18	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۸۵	۱/۳۶	۴۷۳	۳۴	۲۵	۰/۴۲	۱/۴۳
Mg19	۰/۱۳	۰/۴۹	۰/۸۷	۰/۶۲	۰/۵۶	۴۸۷	۲۷	۴۸	۰/۲۱	۱/۸

نفت کمتری تولید می‌کند و مناسب‌ترین سنگ منشأ برای تولید گاز محسوب می‌شود [۱۷]. از نظر منشأ، بیشتر از بقایای گیاهان عالی خشکی‌زی تشکیل شده و دارای مقادیر قابل توجهی مواد مومی می‌باشد.

برای تعیین نوع کروژن از نمودار HI در مقابل OI [۱۴ و ۱۸] و نمودار HI در مقابل  $T_{max}$  [۱۹] استفاده می‌شود. با رسم دیاگرام‌های مذکور برای تمام نمونه‌های مورد مطالعه، مشخص گردید که نمونه‌ها اغلب دارای کروژن نوع III و به‌طور محدودتر نوع II و III می‌باشند (شکل‌های ۳ و ۴). البته باید در نظر داشت که به علت بلوغ بالای نمونه‌ها، و کاهش طبیعی مقادیر هیدروژن نمونه‌ها، عمده کروژن به نمایش گذاشته شده از نوع III می‌باشند، که با محیط رسوبی و رخساره‌های حاکم بر سازند مبارک تا اندازه‌ای متناقض می‌باشد.

با توجه به دیاگرام HI در برابر  $T_{max}$  (شکل ۴)، تمامی نمونه‌ها دارای HI کمتر از ۱۵۰ می‌باشند و براساس این پارامتر، هیدروکربور احتمالی قابل زایش از سازند مبارک عمدتاً گاز می‌باشد. از طرف دیگر مقادیر  $S_2/S_3$  نمونه‌های مورد مطالعه که بین ۰/۵۶ و ۲/۳۳ می‌باشد و همچنین مقادیر پایین شاخص هیدروژن، با نوع زایش هیدروکربن‌های گازی همخوانی دارد. نمونه‌های ۱، ۹، ۱۱ و ۱۶ با داشتن نسبت  $S_2/S_3$  نسبتاً بالا دارای پتانسیل اندکی برای زایش نفت هستند (جدول ۲).



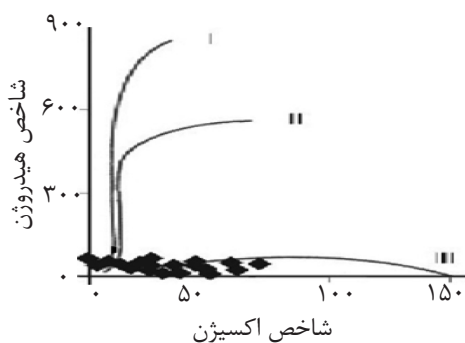
شکل ۴- نمایش تغییرات HI در مقابل  $T_{max}$  برای تعیین زایش نوع هیدروکربور احتمالی [۱۹].

**نوع کروژن:** نوع ماده آلی (کروژن) فاکتور مهمی برای ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ بوده و تأثیر زیادی بر ماهیت هیدروکربن‌های تولیدی دارد [۱۴ و ۱۵]. کروژن‌های متفاوت، توانایی متفاوتی در تولید هیدروکربور دارند. به‌عنوان مثال نمونه‌هایی که دارای کروژن نوع I و II هستند توانایی تولید نفت بیشتری دارند. بنابراین تعیین نوع کروژن، به منظور بررسی کیفیت و ساختار شیمیایی مواد آلی و محصولات هیدروکربنی تولید شده ضروری به نظر می‌رسد. انواع کروژن براساس ترکیب عنصری و روند تکوینی آنها بر روی دیاگرام ون کرولن به سه دسته I و II و III تقسیم می‌شود [۱۶].

**کروژن نوع I:** کروژن این گروه طی مراحل کاتائز، هیدروکربورهای مایع تولید می‌نمایند. ساختار شیمیایی این نوع کروژن به گونه‌ای است که حداکثر توان تولید آنها، فرآورده سیال (نفت خام) می‌باشد. منشأ مواد آلی این نوع کروژن عمدتاً از جلبک‌های آب شیرین می‌باشد (کروژن نوع دریاچه‌ای).

**کروژن نوع II:** در این گروه کروژن‌ها در مراحل اولیه دیاژنز مقادیر فراوانی گاز  $CO_2$  و هیدروکربورهای مایع و در مراحل پایانی فاز کاتائز و متائز، گاز متان تولید می‌شود. بیشتر کروژن‌های نوع II دریایی هستند و بیشتر کروژن سنگ‌های منشأ هیدروکربنی ایران نیز از نوع کروژن تیپ II به شمار می‌آیند.

**کروژن نوع III:** نسبت به کروژن‌های نوع I و II



شکل ۳- نمودار OI در مقابل HI برای تعیین نوع کروژن [۱۴ و ۱۸].

**جدول ۲-** تشخیص نوع هیدروکربور با استفاده از شاخص HI و نسبت،  $S_2/S_3$  و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی، رتبه‌بندی سنگ‌های مادر براساس پارامترهای حاصل از آنالیز پیرولیز راک- ایول [۱۹].

$S_2/S_3$	HI	رتبه‌بندی سنگ‌های مادر	$S_1+S_2$ (mg HC/g rock)	$S_2$ (mg HC/g rock)	$S_1$ (mg HC/g rock)	TOC (%wt) کربنات‌ها	TOC (%wt) شیل‌ها	کمیت‌اتوان هیدروکربورزایی
<۱	۰-۱۵۰	گاز	۰-۳	۰-۲/۵	۰-۰/۵	۰-۰/۲	۰-۰/۵	ضعیف
۱-۵	۱۵۰-۳۰۰	نفت و گاز	۳-۶	۲/۵-۵	۰/۵-۱	۰/۲-۰/۵	۰/۵-۱	نسبتاً خوب
۵-۱۰	۶۰۰-۳۰۰	نفت	۶-۱۲	۵-۱۰	۱-۲	۰/۵-۱	۱-۲	خوب
>۱۵	۸۰۰-۶۰۰	نفت	۱۲-۲۰	۱۰-۲۰	۲-۴	۱-۲	۲-۴	خیلی خوب
-	-	-	>۲۰	>۲۰	>۴	>۲	>۴	عالی

ویترینیت (جدول ۳) می‌باشند. میانگین پارامترهای  $S_2$ ، TOC،  $T_{max}$  و  $S_1$  به‌دست آمده برای نمونه‌های سازند مبارک در مقطع تحت مطالعه در جدول ۴ دیده می‌شوند. رسم مقادیر  $S_1$  در مقابل  $S_2$  نشان می‌دهد که مجموع هیدروکربورهای تولید شده و توان باقی‌مانده در نمونه‌ها کمتر از ۲ می‌باشد که بیانگر وجود توان اندک هیدروکربورزایی (محدوده ضعیف) در نمونه‌های مورد مطالعه است (شکل ۵). نتایج حاصل از رسم مقادیر  $S_1+S_2$  در مقابل TOC که برای کیفیت سنجی و درجه‌بندی سنگ‌های مادر بر پایه پارامترهای کل کربن آلی در مقابل توان ژنتیکی کروژن به‌کار می‌رود، نیز نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه سازند مبارک علی‌رغم داشتن کل کربن آلی تا حدود ۲٪، دارای پتانسیل هیدروکربن‌زایی ضعیف تا متوسط می‌باشند (شکل ۶). براساس تغییرات شاخص HI در برابر TOC (شکل ۶) تقریباً تمامی نمونه‌ها در منطقه تولید گاز قرار دارند که با نتایج قبلی در مورد نوع هیدروکربن‌های تولیدی همخوانی دارد (شکل ۷).

همان‌طور که در بالا اشاره شد (شکل ۳)، رسم مقادیر شاخص‌های هیدروژن (HI) در مقابل اکسیژن (OI) نمونه‌ها نشان می‌دهد که مواد آلی این سازند عمدتاً از نوع III همراه با اندکی کروژن نوع II می‌باشد. معمولاً با افزایش مقادیر کل کربن آلی در سنگ‌های منشأ پتانسیل هیدروکربورزایی نیز افزایش می‌یابد.

### ارزیابی سنگ مادر

با استفاده از مقادیر پارامترهای  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_1+S_2$  و TOC می‌توان وضعیت سنگ مادر را از لحاظ توان هیدروکربورزایی تعیین نمود [۱۴]. براساس نتایج حاصل از دستگاه پیرولیز راک- ایول (جدول ۲)، نمونه‌هایی که مقادیر  $S_1+S_2$  آنها کمتر از ۳ و مقدار کل کربن آنها نیز کمتر از ۱٪ باشند، نشانگر وجود سنگ منشأی با توان هیدروکربن‌زایی ضعیف و فقیر است. در مراحل مختلف سیر تحولی کروژن و با افزایش بلوغ مواد آلی، پیوسته از مقادیر کل کربن آلی و به عبارتی از میزان کروژن کاسته شده و بر اثر این فرآیند، مقادیر هیدروکربن‌های تولیدی ( $S_1$ ) افزایش و به موازات آن توان هیدروکربن‌زایی ( $S_2$ ) کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش مقادیر اندیس هیدروژن در بلوغ بالا، می‌تواند ناشی از پختگی زیاد مواد آلی باشد در غیر این صورت (به‌ویژه در مرحله دیاژنز)، وجود مواد آلی با کیفیت پست محتمل‌تر بوده و ربطی به افزایش بلوغ مواد آلی ندارد. برای درجه‌بندی سنگ مادر براساس کیفیت مواد آلی و همچنین با در نظر گرفتن غنای کربن آلی معمولاً از فقیر تا عالی تقسیم‌بندی می‌گردند که محدوده هر کدام از این رتبه‌ها در جدول ۲ برای سنگ‌های شیل و کربناته آورده شده است. برای ارزیابی میزان پختگی مواد آلی (کروژن) پارامترهای متعددی مورد استفاده ژئوشیمیست‌ها قرار می‌گیرد که شامل داده‌های حاصل از پیرولیز راک ایول و ضریب انعکاس

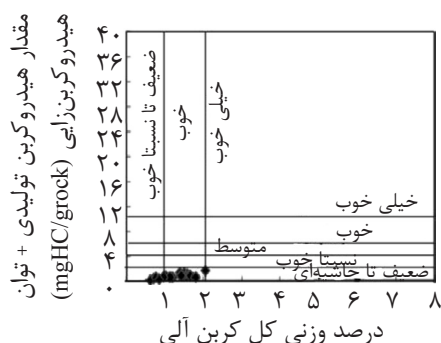
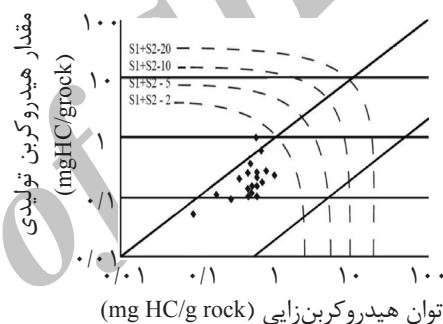
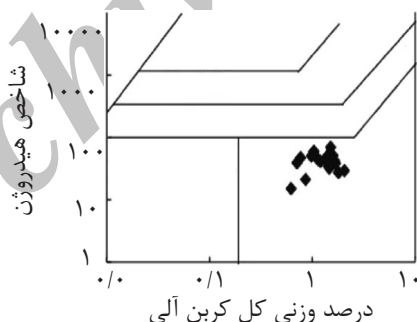


جدول ۳- راهنمای پیرولیز برای پارامترهای کمیت، کیفیت و بلوغ حرارتی [۲۰].

بلوغ	R0 (%)	T <sub>max</sub> (C°)
نابالغ	۰/۲- ۰/۵	<۴۳۵
بلوغ کم	۰/۶- ۰/۸۵	۴۳۵- ۴۴۵
بلوغ متوسط	۰/۶۵- ۰/۹	۴۴۵- ۴۵۰
بلوغ زیاد	۰/۹- ۱/۳۵	۴۵۰- ۴۷۰
بلوغ خیلی زیاد	>۱/۳۵	>۴۷۰

جدول ۴- میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده براساس پیرولیز راک- ایول برای نمونه‌های مورد مطالعه.

پارامترها	هیدروکربن تولیدی (mg HC/g rock)	توان هیدروکربن‌زایی (mg HC/g rock)	کل کربن آلی (wt.%)	دمای ماکزیمم (C°)
دامنه	۰/۰۶-۱	۰/۰۹- ۱/۰۴	۰/۶۲- ۲/۰۶	۴۵۵- ۴۹۸
متوسط	۰/۲۴	۰/۵۳	۱/۳۱	۴۷۰/۵۳

شکل ۶- نمودار تغییرات (S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>/TOC) برای تعیین توان هیدروکربن‌زایی [۱۵].شکل ۵- نمودار تغییرات S<sub>1</sub>/S<sub>2</sub> جهت تعیین توان هیدروکربن‌زایی [۱۹].

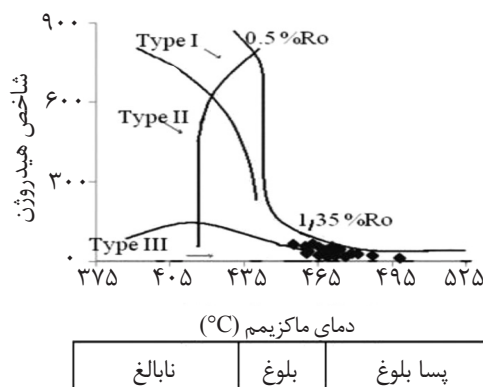
شکل ۷- نمودار تغییرات HI/TOC جهت تعیین پتانسیل تولید هیدروکربن [۲۰].

کروژن، به آسانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که کاهش تدریجی شاخص هیدروژن (HI) به واسطه تولید فرآورده‌های هیدروکربوری از کروژن می‌باشد و با افزایش مقادیر T<sub>max</sub> تا انتهای مرحله تولید گاز، به آهستگی از میزان هیدروژن نیز کاسته می‌شود. همان‌طوری‌که در شکل ۸ دیده می‌شود، نمونه‌های سازند مبارک با مقادیر پایین میزان شاخص هیدروژن (HI)، از نظر بلوغ در انتهای پنجره نفت‌زایی قرار دارند.

بنابراین اگر این افزایش در مورد کروژن‌های نوع I و II باشد، تولید هیدروکربورهای سیال و اگر از نوع III باشد، تولید آن معطوف به گاز می‌شود.

### بلوغ حرارتی

برای تعیین بلوغ حرارتی مواد آلی و یا به عبارتی کروژن، از رسم پارامتر T<sub>max</sub> در مقابل HI استفاده می‌شود. به کمک این دیاگرام، نمونه‌های سنگ مادر از نظر سطح پختگی مواد آلی و همچنین نوع



شکل ۸- نمودار مقادیر HI/T<sub>max</sub> جهت نمایش بلوغ حرارتی [۲۱ و ۲۲].

اندک هیدروکربورهای سیال تولیدی و محیط رسوبی اکسیدان و توان باقی‌مانده برای تولید گاز، در نمونه‌های سازند مبارک نشان می‌دهد که سیر تحولی کروژن اثرات زیادی بر کاهش شاخص هیدروژن گذاشته و در حال حاضر این سازند مستعد تولید گاز می‌باشد. در حالی که احتمالاً اگر به وضعیت اولیه مواد آلی از جمله مقادیر کربن آلی و نوع کروژن پرداخته شود، از لحاظ رتبه‌بندی سنگ مادر و پتانسیل ذاتی تولید، این سازند احتمالاً می‌تواند شرایط متوسط تا خوب را به نمایش گذارد.

از آنجایی که مواد آلی موجود در سازند مبارک با منشأ دریایی و اندکی با منشأ خشکی می‌باشند، بنابراین پتانسیل نفت و گاززایی آن را بر حسب نوع کروژن‌های موجود و سطوح مختلف پختگی مواد آلی می‌توان تعیین نمود. براساس یافته‌های [۲۴] و [۲۵]، کل کربن آلی یک سازند برابر است با مجموع کربن آلی مولد نفت و کربن آلی مولد گاز به همراه کربن مرده:

$$\% \text{TOC} = \% \text{OPOC} + \% \text{GPOC} + \% \text{DC} \quad (1)$$

با رسم مقادیر پارامتر (S<sub>2</sub>) در مقابل کل کربن آلی (TOC)، می‌توان به مقادیر کربن آلی مرده یا باقی‌مانده پی برد. در این رابطه، هرچه قدر نوع کربن پست‌تر (نوع III) و بلوغ بالاتر باشد، مقادیر کربن مرده آن بیشتر خواهد بود و در مقابل، کروژن‌های خوب (نوع I و II) مقادیر کربن مرده کمتری را بجا می‌گذارند.

این مرحله از هیدروکربن‌زایی معادل بلوغی بیشتر از ۱/۳۵ براساس شاخص انعکاس ویتروکسیت می‌باشد.

شاخص‌های هیدروژن (HI) و اکسیژن (OI) معرف کیفیت نوع هیدروکربورهای تولید شده از سنگ مادر می‌باشند، که این پتانسیل‌ها مستقیماً با محیط رسوبی سنگ مولد و منشأ مواد آلی ارتباط دارند. بنابراین با استفاده از این دو شاخص می‌توان وضعیت رخساره مواد آلی موجود در این سازند را تعیین نمود.

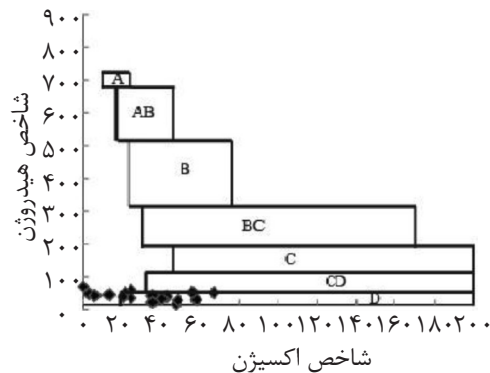
### رخساره آلی

جهت تعیین رخساره آلی نمونه‌های مورد نظر از نمودار [۲۳] استفاده شده است. در این نمودار براساس تغییرات مقادیر HI در برابر OI، محدوده رخساره‌ای نمونه‌های مورد مطالعه تعیین شده است (شکل ۹). براین اساس اکثر نمونه‌های مورد نظر، مابین محدوده CD تا D قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده محیط‌های دریایی تا قاره‌ای نسبتاً اکسیدان است. طی این مطالعه مشخص گردید که با افزایش مقادیر اکسیژن به‌طور نسبی و کاهش شاخص هیدروژن (شرایط اکسیدان) و افزایش مقدار کل کربن آلی پتانسیل هیدروکربورزایی این سازند افزایش نیافته است. این شرایط می‌تواند بیانگر آن باشد که کیفیت مواد آلی وارد شده به حوضه رسوبی تغییرات چندانی نداشته است.

بلوغ بالای مواد آلی، کاهش مقادیر هیدروژن، مقادیر

1. Oil-Prone Organic Carbon  
2. Gas prone Organic Carbon  
3. Dead Carbon





شکل ۹- نمودار تعیین رخساره آلی با استفاده از نسبت تغییرات HI در برابر OI، ویژگی محدوده‌های مشخص شده عبارتند از: A محیط دریایی شدیداً احیایی، AB محیط‌های احیایی دریایی پیشرونده، B محیط‌های دریایی یا دریاچه‌ای به‌طور نسبی احیایی، BC محیط‌های دارای مواد آلی دریایی و قاره‌ای و رسوب‌گذاری سریع در شرایط اکسیدان، C محیط‌هایی با سرعت رسوب‌گذاری متوسط در شرایط احیایی، CD محیط‌های عمیق در مجاورت نقاط کوه‌زایی، D محیط‌های قاره‌ای شدیداً اکسیدان [۲۳].

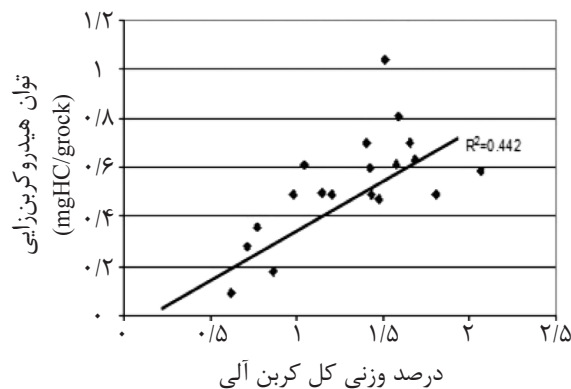
گاز (نمودار الف) و مولد نفت (نمودار ب) در شکل ۱۱ در مقابل کل کربن آلی اولیه نمونه‌ها براساس معادله ۱ [۲۳] و با در نظر گرفتن گستره میزان بلوغ مواد آلی، نشان می‌دهد که مقادیر کل کربن آلی اولیه نمونه‌ها محتوی کروژن پست حدود ۹۰٪ در محدوده ۱/۵ تا ۲/۵٪ می‌باشد. از طرف دیگر مواد آلی با منشأ دریایی و با کروژن با کیفیت بالاتر (نوع II) می‌توانسته تا حد ۰.۸٪ کربن آلی داشته باشد. اما از آنجایی که سطح پختگی مواد آلی عمدتاً در انتها، در اواسط گاززایی قرار دارند (میزان انعکاس ویتترینت بیشتر از ۱/۳٪)، کروژن نفت‌زای این سازند قادر به تولید هیدروکربن سیال نیز می‌باشد.

در صورت وجود توالی‌ها و سکانس‌های رسوبی با تخلخل و تراوایی مناسب و پوش سنگ در ناحیه، امید به یافتن مخازن هیدروکربنی سیال (میعانات گازی) دور از انتظار نیست.

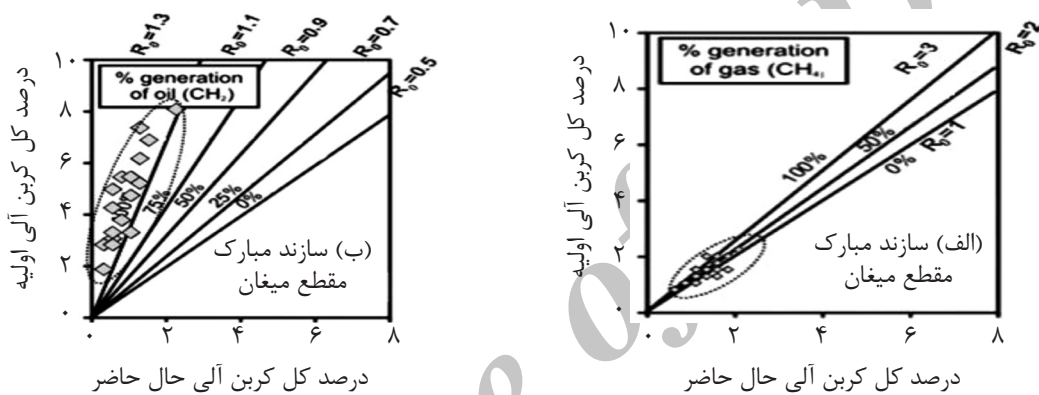
شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقادیر کربن مرده سازند مبارک در حد متوسط بوده (میزان رگرسیون نمودار)، به عبارت دیگر توان تولید هیدروکربن با افزایش کل کربن آلی اندکی افزایش می‌یابد. بنابراین مقادیر کم کل کربن آلی و شاخص هیدروژن کم (HI) نمونه‌ها، می‌تواند بخشی ناشی از تأثیرات افزایش تدریجی بلوغ مواد آلی و بخش دیگر مربوط به ژنز مواد آلی (منشاء خشکی) باشد.

براساس مقادیر  $T_{max}$  جدول ۱، حداقل پختگی مواد آلی نمونه‌های مبارک ۴۵۵ (اواسط پنجره نفت‌زایی) و حداکثر آن ۴۹۸ °C (اواخر پنجره گاززایی) می‌باشد و اکثریت آنها در مرحله متاژنز قرار دارند. با در نظر گرفتن توان نفت و گاززایی کروژن‌های موجود در نمونه‌ها، و بر حسب میزان پختگی مواد آلی، می‌توان پتانسیل اصلی کروژن‌ها را با مقادیر اولیه میزان کربن آن به‌صورت تخمین برآورد نمود (شکل ۱۱).

مقایسه مقادیر محتویات کربن آلی مستعد تولید



شکل ۱۰- رسم مقادیر TOC در مقابل  $S_2$  برای نمونه‌های سازند مبارک جهت تعیین وضعیت مقادیر کربن مرده



شکل ۱۱- مقایسه میزان کل کربن آلی اولیه بر پایه کربن‌های آلی مولد گاز (الف) و نفت (ب) در رابطه با پختگی کروژن‌های موجود در نمونه‌ها [۲۶].

دریایی و نسبتاً احیایی راسب شده‌اند. از نقطه نظر پتانسیل تولید هیدروکربن، این سازند در مقطع تحت بررسی، ضعیف تا متوسط می‌باشد. شاخص تولید (PI) و مقادیر  $T_{max}$  نمونه‌ها حاکی از گذر مواد آلی از پنجره نفت‌زایی و قرار داشتن آنها در داخل مرحله متاژنز می‌باشد. این سازند با بیشترین مقدار کربن آلی و درجه حرارت حداکثر در اواسط مرحله تولید گاز تر بود و از پنجره نفت‌زایی عبور نموده و قادر به تولید هیدروکربن‌های گازی می‌باشد.

برآورد مقادیر کربن آلی و شاخص هیدروژن اولیه با در نظر گرفتن سطوح مختلف پختگی ( $T_{max}$ )، حاکی از این است که سازند مبارک مستعد تولید هیدروکربن سیال نیز بوده است. که این شرایط با محیط‌های D و CD همخوانی ندارد (محیط‌های عمیق در مجاورت نقاط کوه‌زایی و محیط‌های قاره‌ای شدیداً اکسیدان)، بلکه شرایط رسوبی و

### نتیجه‌گیری

بررسی‌های ژئوشیمیایی مقدماتی سازند مبارک نشان داد که مقدار کل کربن آلی (TOC) این سازند از ۰/۶۲ تا ۰/۲۰۶٪ متغیر بوده و از لحاظ رتبه‌بندی بر پایه محتویات کربن آلی فقیر تا متوسط می‌باشد. مقادیر شاخص هیدروژن و اکسیژن بیانگر وجود مواد آلی با منشاء دریایی همراه با اختلاط مواد آلی با منشاء خشکی در رسوبات این سازند است. پایین بودن شاخص هیدروژن در اغلب نمونه‌های برداشت شده از لایه‌های شیلی این سازند، می‌تواند به دلیل کیفیت پایین مواد آلی و یا به خاطر سطوح بالای پختگی کروژن باشد. هیدروکربن‌های تولیدی احتمالی سازند مبارک در برش میغان بر پایه توزیع داده‌ها بر روی دیاگرام ون‌کرولن نشان می‌دهد که، به‌طور غالب کروژن نوع III و به‌طور محدودتر مخلوطی از کروژن نوع II/III می‌باشد که در محیط

می‌دهد که بخش عظیمی از توان این سازند به مصرف رسیده است و مقادیر HI اولیه آنها و همچنین کل کربن آنها حدود ۲ یا ۳ برابر HI کنونی بوده است. وجود HI اولیه با مقادیر زیاد حاکی از نهشته شدن سازند مبارک در محیط دریایی و مواد آلی با کیفیت (کروژن نوع II) با شرایط نسبتاً احیایی می‌باشد. بر آورد کربن آلی اولیه بر پایه حضور انواع کروژن (نفتزا و گاززا) نشان می‌دهد که نمونه‌های حداکثر تا حدود ۰.۸٪ کربن آلی داشته‌اند. بر این اساس، می‌توان این سنگ مادر را از لحاظ غنی مواد آلی و پتانسیل ذاتی آن را در وضعیت خوب تا بسیار خوب رتبه‌بندی نمود. ۳- با وجود افزایش اندکی در میزان TOC در بخش‌های پایینی این سازند و همراه با عدم افزایش مقادیر HI به نظر می‌رسد، فرآیند پسروری دریا و نهشته شدن مواد آلی با کیفیت کمتر (منشأ خشکی) رخ داده باشد که معمولاً همراه با اکسیده شدن مواد آلی و در نتیجه کاهش کیفیت و یا به عبارتی کاهش اندیس هیدروژن همراه است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین آزمایشگاه‌های ژئوشیمی آلی پژوهشگاه صنعت نفت به خاطر انجام آنالیزهای راک ایول تشکر و قدردانی به عمل آورند.

رخساره آلی این سازند بعد از برآورد کربن اولیه با شرایط محیط رسوبی از نوع B و یا BC مطابقت خواهد داشت.

با توجه به مرز دونین- کربونیفر (D/C) که منطبق با پیشروی جهانی و سریع آب دریا می‌باشد، انتظار می‌رود شرایط احیایی که همراه با افزایش ناگهانی عمق و نرخ رسوب‌گذاری پایین سازگار است حاکم باشد. براین اساس، باید شرایط B یا AB براساس نمودار صادق باشد. در بررسی‌های صحرایی، وضعیت لیتولوژی و ظاهری برش میغان نشانگر حضور شیل‌های تیره با درصد کربن آلی نسبتاً بالا است. در صورتی که نمودار ترسیم شده برای برش میغان محیط‌های D و CD را نشان می‌دهد که با وضع موجود همخوانی ندارد که دلایل زیر می‌تواند توجیه کننده شرایط فوق باشد.

۱- علی‌رغم برداشت نمونه‌های سطح‌الارضی از اعماق بیشتر رخنمون‌ها، به نظر می‌رسد، فرار داشتن آنها برای میلیون‌ها سال در معرض هوازدگی و اکسیداسیون، به طور طبیعی و تدریجی و به آهستگی از HI آنها کاسته شده باشد. براساس یافته‌های آزمایشگاهی، این تغییرات می‌تواند بیانگر کاهش کیفیت مواد آلی (از کروژن نوع I و II به کروژن نوع III) باشد در حالی که شاید در واقعیت چنین نباشد.

۲- کاهش HI باتوجه به میزان بلوغ ( $T_{max}$ ) نشان

### مراجع

- [۱]. اشکان م.، "اصول مطالعات ژئوشیمیایی سنگ‌های منشأ هیدروکربوری و نفت‌ها با نگرش ویژه به حوضه رسوبی زاگرس": انتشارات شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۳.
- [۲]. کمالی م.، قربانی و. ب.، "ژئوشیمی آلی از فیتو پلانکتون تا تولید نفت"، انتشارات آراین زمین، ۱۳۸۵
- [3]. Kotarba M. J., Wieclaw D., Kosakowski P., Zacharski j. and Kowalski A., "Evaluation of source rock and potential of middle Jurassic strata the South – Eastern part of Poland," *Prezeglad Geologiczny*, 2003.
- [4]. Espitalie J., Marqis F. and Sagel L., "Geochemical logging," in: Voorhees, K, J. (ed), *Analytical Pyrolysis: Butterworths*, Boston, 1984.
- [5]. Batten D. J., "Palynofacies and petroleum potential Palynology, principle and application," *AASP Foundation*, Vol. 3, 1996.

- [۶]. محمدی ک.، "تغییر ویژگی‌های ژئوشیمیایی گذر دونین- کربنیفر در برش لبنسار، شمال دامغان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه دامغان، ۱۳۹۳.
- [۷]. مصدق ح.، کبریائی‌زاده ا.، حسینی نژاد م.، "ویژگی‌های زیست چینه‌ای و رسوب‌شناسی گذر دونین - کربونیفر (سازندهای جیروود و مبارک) در البرز شرقی: معرفی حادثه زیستی هنگنبرگ (Hangenberg Bioevent)"، فشرده مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۳۸۴.
- [۸]. معماریانی م.، کمالی م. ح.، "ارزیابی شیمیایی توان هیدروکربورزایی سازند مبارک در کربونیفر زیرین (البرز شرقی در ایران مرکزی)"، مجله تحقیق ش. ۴۵، ۱۳۸۱.
- [9]. Bozorgnia F., "Paleozoic foraminiferal biostratigraphy of central and east Alborz mountains, Iran," National Iranian Oil Company, Geological Laboratories Publication, 4: 1-185, 1973.
- [۱۰]. دبستانی ن.، "بررسی هیدرو کربورزایی سازند مبارک (کربونیفر زیرین)، مناطق تویه رودبار و لب نسا در شمال دامغان با استفاده از تکنیک‌های ژئوشیمیایی آلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه دامغان، ۱۳۹۰.
- [۱۱]. حکمت شعار م.، "بررسی هیدروکربورزایی سازند مبارک (کربونیفر زیرین) در برش میغان در شمال شرق شاهرود، با استفاده از تکنیک‌های ژئوشیمی آلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه دامغان، ۱۳۹۲.
- [۱۲]. جمشیدی خ.، افشاریان‌زاده ع.، صهبانی م.، دح حقی ف.، "نقشه زمین‌شناسی گرگان، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۶۹.
- [13]. Behar F., Beaumont V. and Penteado B., "Rock-Eval. 6 technology, performances and development: Oil & Gas," *Sci. Tech. Rew.*, Vol. 56, 2001.
- [14]. Hunt J. M., "Petroleum geochemistry and geology," (2<sup>nd</sup> ed.), New York: W.H. Freeman, pp. 487-501, 507-516, 1996.
- [15]. Barker C., "Pyrolysis techniques for source-rock evaluation,." *The AAPG Bulletin*, Vol. 58, 1974.
- [16]. Tissot B. P., Durand B., Espitalie J. and Combaz A., "Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum," *AAPG Bulletin*, Vol., 58, 1974.
- [17]. Ehmman W. D., Koppenhaal D. W., Hamrin Jr. C. E., Jones W. C., Prasad M. N. and Tian W. Z., "Comparison of methods for the determination of organic oxygen in coals," *Fuel*, Vol. 65, 1986.
- [18]. Espitalie J., Madès M., Tissot B., Menning J. J. and Leplate P., "Source rock characterization on method for petroleum exploration," *Proceeding of the 9<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference*, Houston, 1997.
- [19]. Peters K.E., "Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis," *AAPG Bulletin*, Vol. 70, pp. 318-329, 1986.
- [20]. Peters K. E. and Cassa M. R., "Applied source rock geochemistry," in: Magoon, L, B, DOW, W., G.(eds.), *The Petroleum System from Source to Trap*, AAPG Memoir, 1994.
- [21]. Tissot B. P and Welte D. H., *Petroleum formation and occurrence*, Berlin, Springer, Verlag, Vol. 223, pp. 509- 523, 1984.
- [22]. Van Krevelen D. W. "Graphical-statistical method for the study of structure and reaction 261 processes of coal," *Fuel*, Vol. 269-284, 1993.
- [23]. Jones R. W., "Organic Facies," in: Brook J. Welte D. (eds.), *Advances in petroleum geochemistry*, Academic Press, New York, 1987.

[24]. Cornford C., "Source rocks and hydrocarbons of the North Sea," in: Petroleum Geology of the North Sea, Blackwell Science Publications, 1998.

[25]. Teichmuller M. and Durand B., "Fluorescence microscopical rank studies on liptinite and vitrinite in peat and coals, and comparison with results of Eval pyrolysis," *International Journal of Coal Geology*, 1983.

[26]. Cornford C., Burgess C., Gliddon T. and Kelly R., "Geochemical truths in large data sets-II: Risking Petroleum System,," in: 20<sup>th</sup> International Meeting Organic Geochemistry, Abst. Vol. 1, pp. 322-323, 2001.

Archive of SID