

## مقایسه داده‌های زمین شیمیائی آلی سازند مبارک (البرز شرقی) در برش‌های تویه رودبار، لب نثار و میغان

نادر دبستانی

دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه دامغان

علی اکبر حسن نژاد

دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان

محمود معماریانی

پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت تهران

حسین مصدق

دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۵

dabestaninader@yahoo.com

## چکیده

در مطالعه حاضر، ۴۷ نمونه سطح الارضی سازند مبارک از مناطق، تویه رودبار، لب نثار و میغان بوسیله دستگاه پیرولیز راک - اول ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه حاکی است که سازند مبارک در برش‌های مذکور به ویژه برش‌های تویه رودبار و میغان با داشتن مقادیر نسبتاً بالای کل کربن آلی، دارای پتانسیل هیدروکربون‌زایی بوده است. سازند مبارک در منطقه تویه رودبار و میغان با داشتن درجه حرارت حداکثر بالاتر از ۴۸۷ و ۴۹۸ °C ضمن عبور از پنجره نفت زایی، به مرحله تولید گاز مرطوب نیز رسیده است. مقادیر خوب TOC با میانگین ۱/۲۲٪ وزنی برای نمونه‌های تویه رودبار و ۱/۰۶٪ وزنی برای نمونه‌های لب نثار و ۱/۳۱٪ وزنی برای نمونه‌های میغان و مقادیر پایین تر S<sub>2</sub> می‌توان این سازند را یک سنگ منشأ فقیر دانست. شواهد بدست آمده، نشان می‌دهد که کروژن سازند مبارک از نوع III و به صورت خیلی محدود از نوع II/III می‌باشد.

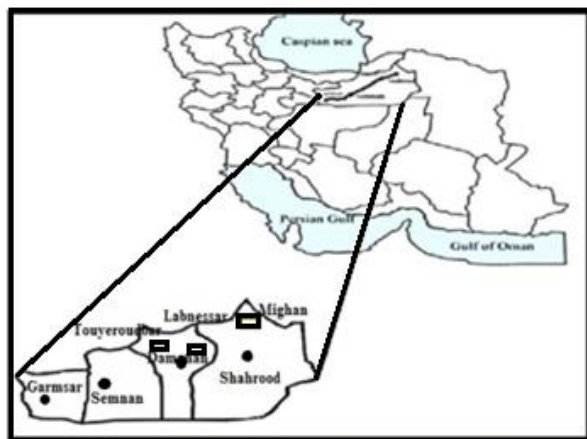
کلمات کلیدی: سازند مبارک، راک - اول، کروژن

## مقدمه

در بررسی‌ها و مطالعات ژئوشیمیایی آلی که عمدتاً بر روی سنگ‌های مولد هیدروکربن انجام می‌گیرد، جهت ارزیابی کیفیت سنگ منشأ می‌توان از تکنیک‌های ایتیکی و روش‌های پیرولیزی استفاده نمود.

روش پیرولیز راک - اول ۲ (Rock-Eval2)، که روش حرارت دادن مستقیم نمونه‌ها می‌باشد، بهترین ابزار برای تعیین مقدار، نوع و درجه بلوغ ماده آلیاست. روش‌های پیرولیز کم هزینه و سریع بوده و استفاده از آن‌ها در شرایط ساده و عادی نیز میسر است. بنابراین استفاده از آن بسیار متداول گردیده است. این ابزار اطلاعات بالارزشی در مورد، محتویات کل کربن آلی (TOC)، کیفیت و نوع ماده آلی، سیر تحولی حرارتی ماده آلی، پتانسیل بالقوه و بالفعل، رخساره زیستی منطقه مورد مطالعه، وضعیت محیط نهشتگی از لحاظ شرایط اکسیدان و احیا و مهاجرت هیدروکربون از سنگ منشأ ارائه می‌دهد (Espitalie et al., 1984; Kotorba et al., 2003).

سازند شیلی - آهکی مبارک با سن کربونیفر پیشین (تورنژین - نامورین) در گستره وسیعی از البرز رخنمون دارد. با توجه به ویژگی‌های برش رخنمون یافته سازند مبارک، در برش‌های تویه رودبار، لب نثار و میغان، برای اولین بار پتانسیل زایشی هیدروکربون آن‌ها مورد پژوهش قرار می‌گیرد. نواحی مورد مطالعه در بخش شرقی حوضه رسوبی البرز و در شمال شرق ایران واقع شده است. که شامل برش‌های سطح الارضی از سازند مبارک واقع در: ۵۵ کیلومتری شمال غرب دامغان (تویه رودبار) ۱۰' ۵۴° طول شرقی و ۲۷' ۳۶° عرض شمالی، ۳۵ کیلومتری شمال دامغان (لب نثار) ۲۷' ۵۴° طول شرقی و ۲۲' ۳۶° عرض شمالی و ۲۰ کیلومتری شمال شرق شاهرود (میغان) ۵۷' ۵۴° طول شرقی و ۳۸' ۳۶° عرض شمالی می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

## روش تحقیق

در این پژوهش افق‌ها و طبقات غنی از مواد آلی سازند مبارک در البرز شرقی، از دیدگاه پتانسیل هیدروکربون‌زایی مطالعه و به این منظور داده‌های حاصل از پیرولیز راک-اول (Rock-Eval 2)، بر روی ۱۷ نمونه سطح-الارضی از منطقه تویه رودبار، ۱۱ نمونه از لب نثار و ۱۹ نمونه از میغان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این روش حرارتی پس از پودر کردن نمونه‌ها در هاون تا حد مش ۱۰۰ و همگن‌سازی آن‌ها، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌ها در کپسول‌های کوچکی قرار داده شده و تحت دو مرحله پیرولیز و اکسیداسیون قرار می‌گیرند (معماریانی و همکاران ۱۳۸۱، اشکان ۱۳۸۳). در این تکنیک تعدادی از پارامترها به صورت کمی و برخی به صورت کیفی بیان می‌شوند.

### تعیین نوع کروژن با ترسیم مقادیر HI در مقابل OI:

برای تعیین نوع کروژن از رسم نمودار HI در مقابل OI Espitalie et (Hunt, 1996; al., 1977) استفاده می‌شود (شکل ۲). اغلب نمونه‌ها دارای شاخص اکسیژنی بین ۰ تا ۷۵ بوده و از طرف دیگر شاخص هیدروژن آن‌ها نیز در حداقل مقادیر می‌باشد. براین اساس تقریباً غالب نمونه‌ها در هر سه مقطع دارای کروژن نوع III و تعداد کمی از نمونه‌ها دارای کروژن نوع II/III هستند. سازند مبارک در منطقه تویه رودبار و میغان با تلفیقی از این دو نوع کروژن پتانسیل تولید گاز را دارا بوده، در حالی که در منطقه لب نثار توانایی تولید هیچ نوع هیدروکربونی وجود ندارد، البته باید در نظر داشت که به علت بلوغ بالای نمونه‌ها، و کاهش طبیعی مقادیر هیدروژن نمونه‌ها، تولید عمده کروژن به نمایش گذاشته شده از نوع III می‌باشند، که با محیط رسوبی و رخساره-های حاکم بر سازند مبارک تا اندازه‌ای متناقض می‌باشد.

### تعیین پتانسیل هیدروکربون‌زایی:

تعیین پتانسیل هیدروکربون‌زایی با ترسیم مقادیر HI در مقابل Tmax:

با توجه به دیاگرام HI در برابر Tmax (Peters 1986) (شکل ۳)، تمامی نمونه‌ها دارای HI کمتر از ۱۵۰ می‌باشند و بر اساس این پارامتر هیدروکربن‌های احتمالی قابل زایش از سازند مبارک عمدتاً گاز می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به نسبت  $S_2/S_3$  نمونه‌های مورد مطالعه که بین ۰/۵۶-۲/۳۳ می‌باشد و با شاخص هیدروژن پایین، با نوع زایش هیدروکربن گازی همخوانی دارد. نمونه های Sh9, Sh11, Sh14, Sh16, MFS1T1, MFS2B2, BMFD با داشتن نسبت  $S_2/S_3$  نسبتاً بالا دارای پتانسیل اندکی برای زایش نفت می‌باشند (جدول ۲).

تعیین پتانسیل هیدروکربونی با ترسیم مقادیر PI در مقابل Tmax:

یکی از روش‌های تعیین میزان پتانسیل هیدروکربونی نمونه‌ها و میزان بلوغ آن، ترسیم دیاگرام حاصل از پارامترهای Tmax و شاخص تولید (PI) به صورت PI در مقابل Tmax است. با ترسیم دیاگرام برای هر سه برش تویه رودبار، لب نثار و میغان، معلوم شد که نمونه‌های مربوط به تویه رودبار و میغان در اواخر پنجره نفت‌زایی و در مراحل پیشرفته‌تری از بلوغ قرار دارند به طوری که تعدادی از نمونه‌ها وارد (Condensate Zone) یا بخش نفت میعانی شده و توان تولید هیدروکربون سیال را از دست داده اند، در حالی که نمونه‌های مربوط به لب نثار در محدوده شروع پنجره نفت‌زایی قرار می‌گیرند. مقادیر بالای شاخص تولید PI (بیشتر از ۰/۴) برای تعدادی از نمونه‌ها به خصوص در برش لب نثار نشان‌دهنده هوازگی و اکسید شدن نمونه‌های سطح الارضی است (Peters 1986) (شکل ۴).

تعیین توانایی تولید هیدروکربون با استفاده از نمودار  $S_2/S_3$  در مقابل TOC:

به منظور تعیین توانایی تولید هیدروکربون از نمودار  $S_2/S_3$  در مقابل TOC استفاده شد. نتایج بدست آمده براینمناطق مورد مطالعه و چگونگی توزیع نمونه‌ها بر روی دیاگرام مربوطه در شکل (شکل ۵) دیده می‌شود (Peters and Cassa, 1994). با توجه به نسبت  $S_2/S_3$  به دست آمده برای نمونه‌های برش تویه رودبار و میغان که بین ۰/۰۸ تا ۹/۶ بوده، نشان‌دهنده این مهم است که سازند مبارک در این مناطق توانایی تولید گاز را دارد و از نظر میزان کل کربن آلی در محدوده مناسبی است، ولی نمونه‌ها در برش لب نثار دارای مقدار کل کربن آلی کمتری است و تقریباً قادر به تولید هیچ نوع هیدروکربونی در شرایط فعلی نیست. با توجه به مقادیر HI و  $S_2/S_3$  نیز می‌

نمونه‌های پودر شده طی فرآیند پیرولیز و تحت برنامه مشخص حرارتی، کروژن موجود در آن‌ها متحمل شکست حرارتی شده و تولید هیدروکربون می‌نماید، و سپس در عمل اکسیداسیون پارامترهای مورد نظر تعیین می‌شود در این روش مقدار هیدروکربن آزاد ( $S_1$ )، توان هیدروکربون‌زایی ( $S_2$ )، 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)، حداکثر دمایی که در آن تمام و یا قسمتی از کروژن به هیدروکربون تبدیل می‌شود ( $T_{max}$ ) تعیین می‌گردد، همچنین با استفاده از پارامترهای فوق، شاخص اکسیژن (OI)، شاخص هیدروژن (HI) و شاخص پتانسیل هیدروکربن (PI) نمونه‌های مورد آنالیز محاسبه می‌شوند، که نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها در جدول (۱) منعکس شده است (Behar et al., 2001).

### بحث و بررسی

همانطوری که از نتایج جدول (۱)، پیداست نمونه‌های تحت مطالعه در برش تویه رودبار، لب نثار و میغان به ترتیب دارای حداقل هیدروکربورهای تولیدی ( $S_1$ ) به میزان ۰/۰۹، ۰/۰۶، ۰/۰۶ (میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ)، بوده و از طرف دیگر حداقل توان و پتانسیل تولیدی آن‌ها ( $S_2$ ) نیز به ترتیب از ۰/۰۲، ۰/۰۷، ۰/۰۹ (میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ) نیز تجاوز نمی‌کند. میزان پختگی مواد آلی ( $T_{max}$ )، این نمونه‌ها از حداقل ۴۰۱ تا حداکثر ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد 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 ۰/۵۶ درصد تا حداکثر ۲/۴۷ درصد متغیر می‌باشد.

### نوع کروژن:

نوع ماده آلی (کروژن) فاکتور مهمی برای ارزیابی پتانسیل سنگ منشأ بوده و تأثیر زیادی بر ماهیت هیدروکربن‌های تولیدی دارد (Hunt, 1996; Barker, 1974). کروژن‌های متفاوت، توانایی متفاوتی در تولید هیدروکربن دارند. به عنوان 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 آن بر روی دیاگرام ون کرونل به سه دسته I و II و III تقسیم می‌شود (Tissot et al., 1974).

کروژن نوع I: کروژن این گروه طی مراحل کاتائز، هیدروکربن‌های مایع تولید می‌نمایند. ساختار شیمیایی این نوع کروژن به گونه‌ای است که حداکثر توان تولید آن‌ها، نفت خام می‌باشد و این نوع کروژن‌ها تقریباً فاقد گاززایی هستند. منشأ مواد آلی این نوع کروژن عمدتاً از جلبک‌های آب شیرین تشکیل شده است (کروژن نوع دریاچه‌ای).

کروژن نوع II: در این گروه کروژن‌ها در مراحل اولیه دیائز، مقادیر فراوانی گاز  $CO_2$  و هیدروکربورن‌های مایع و در مراحل پایانی فاز کاتائز و متائز، گاز متان تولید می‌شود. بیشتر کروژن‌های نوع II دریایی است 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 نفت کمتری تولید می‌کند و اساساً به تولید گاز می‌انجامد. در مراحل دیائز و کاتائز، مقادیر زیادی گاز متان تولید می‌کند. قدرت تولید نفت در آن‌ها بسیار کم است و مناسب‌ترین سنگ منشأ برای تولید گاز محسوب می‌شود (Ehmann and Koppenhaal, 1986). از نظر منشأ بیشتر از بقایای گیاهان عالی خشکی‌زی تشکیل شده و دارای مقادیر قابل توجهی مواد مومی می‌باشد.

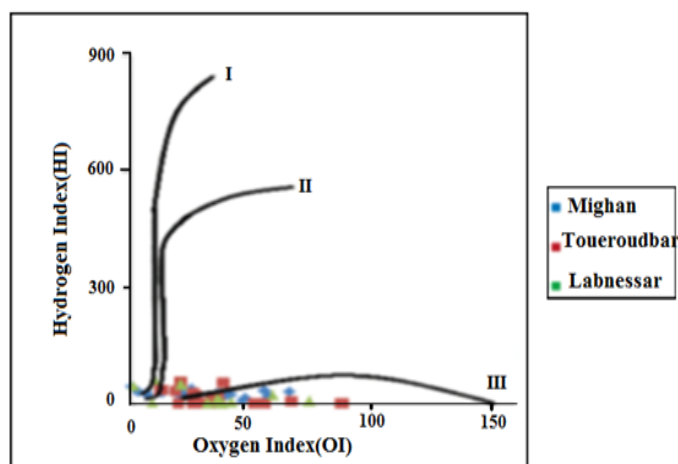
### تعیین نوع کروژن:

۱۵۰ هستند و نسبت  $S_2/S_3$  پایین نمونه ها هیدروکربون تولیدی قابل انتظار از نوع گازی است (جدول ۲).

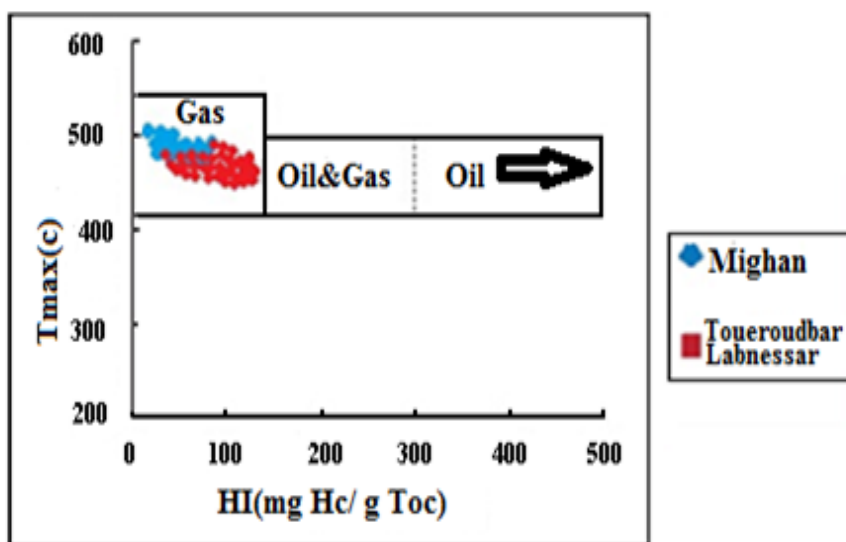
توان نوع هیدروکربون را در مناطق مورد مطالعه مورد بررسی قرار داد از این رو با توجه به مقادیر شاخص هیدروژن برای تمامی نمونه ها که مقادیر کمتر از

جدول ۱. مقادیر پارامترهای حاصل از پیرولیز راک - اول بر روی نمونه‌های برش‌های مورد مطالعه

Sample	Section	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>	Tmax (C)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg HC/g TOC)	TPI (mgHC / mgCO <sub>2</sub> )	TOC (Wt%)
MFS2B7	Touye roudbar	۰.۴۵	۰.۴۹	۰.۱۹	۰.۹۴	۲.۵۸	۴۶۹	۵۰	۱۹	۰.۲۵	۰.۹۸
MF S2B6		۰.۰۹	۰.۴	۰.۲۵	۰.۴۹	۱.۶	۴۷۲	۴۱	۲۶	۰.۲۹	۰.۹۷
MF S2B5		۰.۱۱	۰.۱۱	۱.۴	۰.۲۲	۰.۰۸	۴۶۶	۴	۵۷	۰.۳۱	۲.۴۷
MF S2B4		۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۵۱	۰.۳۹	۰.۶۷	۴۶۲	۲۳	۳۴	۰.۲۴	۱.۵
MF S2B3		۰.۱۶	۰.۴۴	۰.۶۶	۰.۶	۰.۶۷	۴۷۱	۲۴	۳۶	۰.۱۷	۱.۸۲
MF S2B2		۰.۱۶	۰.۸۲	۰.۲	۰.۹۸	۴.۱	۴۶۶	۵۳	۱۳	۰.۳۶	۱.۵۵
MFS2B13		۰.۰۵	۰.۱۲	۰.۱۱	۰.۱۷	۱.۱	۵۱۰	۳۰	۲۸	۰.۳۳	۰.۴
MFS2B11		۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۳۸	۰.۱۲	۰.۱۶	۵۲۵	۱۱	۶۸	۰.۴۵	۰.۵۶
MF S1T7		۰.۱۴	۰.۷۷	۰.۳۹	۰.۹۱	۱.۹۸	۴۵۰	۷۸	۳۹	۰.۱۲	۰.۹۹
MF S1T1		۰.۱۱	۰.۶۷	۰.۱۷	۰.۷۸	۳.۹۵	۴۵۴	۸۳	۲۱	۰.۱۷	۰.۸۱
MF LT9		۰.۰۸	۰.۰۳	۰.۴۶	۰.۱۱	۰.۰۶	۴۵۴	۲	۳۷	۰.۶۲	۱.۲۴
MF LT7		۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۳۴	۰.۰۹	۰.۰۹	۵۰۱	۲	۲۶	۰.۶۷	۱.۳۳
MF LT5		۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۳۸	۰.۱	۰.۱	۴۷۱	۳	۲۹	۰.۶	۱.۳۳
MF LT4		۰.۰۵	۰.۰۳	۰.۵۵	۰.۰۵	۰.۰۵	۳۵۷	۳	۵۲	۰.۷۳	۱.۰۶
MF LT13		۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۷۱	۰.۰۷	۰.۰۴	۴۵۴	۴	۸۹	۰.۵۷	۰.۸
MF LT12	۰.۰۶	۰.۰۲	۰.۳۵	۰.۰۸	۰.۰۵	۴۶۰	۲	۳۲	۰.۷۵	۱.۱۱	
MF LT10	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۲۴	۰.۰۷	۰.۱۲	۴۵۵	۲۰	۲۰	۰.۵۷	۱.۲	
MFLDC1	Lab nessar	۰.۰۶	۰.۰۵	۰.۳۳	۰.۱۱	۰.۱۵	۴۴۰	۶	۳۸	۰.۵۵	۰.۸۷
MF B5		۰.۰۶	۰.۰۹	۰.۰۹	۰.۱۵	۱	۴۰۱	۹	۹	۰.۴	۱.۰۴
MF B1		۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۲۵	۰.۱۳	۰.۲۸	۴۰۸	۱۲	۴۲	۰.۴۶	۰.۵۹
MW3		۰.۰۸	۰.۱۲	۰.۳۲	۰.۲	۰.۳۷	۴۸۷	۱۴	۳۷	۰.۳۹	۰.۸۶
TMF7		۰.۰۷	۰.۱۳	۰.۵۳	۰.۲	۰.۲۴	۴۵۱	۸	۳۲	۰.۳۴	۱.۶۷
TMF3		۰.۰۷	۰.۱۷	۰.۹۱	۰.۲۴	۰.۱۹	۴۵۶	۱۴	۷۵	۰.۲۹	۱.۲۱
TMF4		۰.۰۷	۰.۲۳	۰.۳۹	۰.۳	۰.۶	۴۵۳	۲۲	۳۶	۰.۲۳	۱.۰۷
BMFD		۰.۴۴	۰.۸۶	۰.۰۹	۱.۳	۹.۰۶	۴۵۹	۹۵	۱۰	۰.۳۴	۰.۹
TMF1		۰.۲۷	۰.۹۲	۰.۲۴	۱.۱۹	۳.۸۴	۴۵۶	۷۷	۲۱	۰.۲۳	۱.۱۹
TMF8		۰	۰.۹۴	۰.۱۸	۱.۲۸	۵.۳	۴۵۹	۷۱	۱۴	۰.۲۷	۱.۳۳
MW2	۰.۲۸	۰.۵۸	۰.۹۳	۰.۸۶	۰.۶۳	۴۶۷	۳۸	۶۰	۰.۳۳	۱.۵۴	
Mg1	Mi ghan	۰.۲۲	۱.۰۴	۰	۱.۲۶	۰	۴۵۵	۶۹	۰	۰.۱۷	۱.۵۱
Mg2		۰.۲۷	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	۲.۳۵	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	۴۵۶	۴۴	۱۳	۰.۱۹	۱.۱۴
Mg10		۰.۱۵	۰.۴۹	۰.۲۱	۰.۶۴	۲.۳۳	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	۰.۰۱	۰.۸۸	۷	۴۶۷	۴۲	۶	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



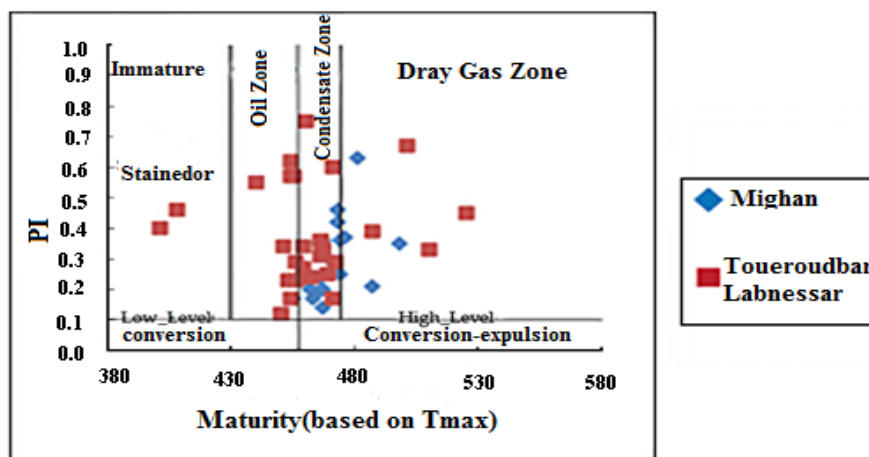
شکل ۲. نمودار HI در مقابل OI (Espitalie et al., 1977; Hunt 1996)



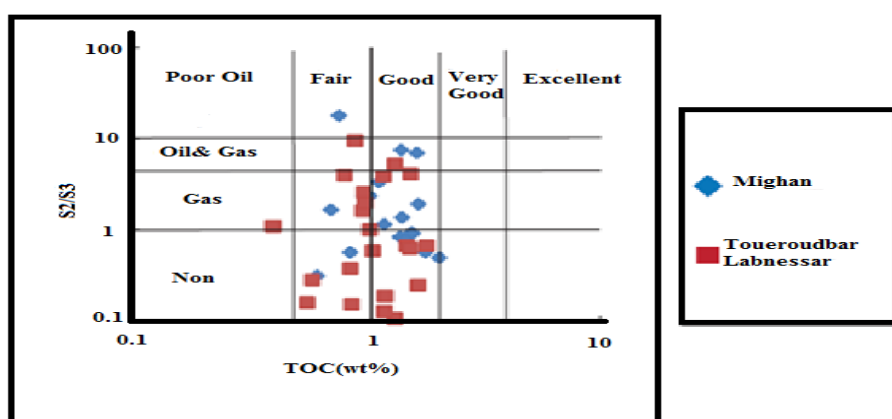
شکل ۳. نمایش تغییرات HI در مقابل Tmax برای تعیین زایش نوع هیدروکربور احتمالی (Peters, 1986)

جدول ۲. تشخیص نوع هیدروکربن با استفاده از مقادیر شاخص HI و  $S_2/S_3$

$S_2/S_3$	HI	نوع هیدروکربور
۰-۳	۰-۱۵۰	گاز
۳-۵	۱۵۰-۳۰۰	گاز و نفت
>۵	>۳۰۰	نفت



شکل ۴. دیاگرام PI در مقابل Tmax (Peters, 1986)



شکل ۵. نمودار S2/S3 در مقابل TOC (Peters and Cassa, 1994)

توجه به اینکه با افزایش بلوغ (حرارت دیدن مواد آلی) پیوسته از مقادیر کروژن کاسته شده و بر اثر شکست حرارتی مواد آلی مقادیر هیدروکربن‌های تولیدی (S<sub>1</sub>) افزایش و در مقابل کمیت توان آن (S<sub>2</sub>) کاهش می‌یابد. برای درجه بندی کیفیت سنگ مادر بر اساس مواد آلی نمونه‌ها معمولاً از فقیر تا عالی تقسیم‌بندی می‌گردند که محدوده هر کدام از این رتبه‌ها در جدول (۳) برای سنگ‌های شیل و کربناته آورده شده است.

### ارزیابی سنگ مادر:

#### ارزیابی سنگ مادر با مقایسه کمی داده‌ها:

با استفاده از مقادیر پارامترهای S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> و S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> و TOC می‌توان وضعیت سنگ مادر از لحاظ توان هیدروکربون‌زایی و همچنین رتبه‌بندی آن را تعیین نمود (Peters 1986). بر اساس این ارزیابی‌ها (جدول ۳)، نمونه‌هایی که مقادیر S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> آن‌ها کمتر از ۳ و مقدار کل کربن آن‌ها نیز کمتر از ۱ باشد، نشان‌گر سنگ منشأ ای با توان هیدروکربون‌زایی ضعیف و فقیر است.

جدول ۳. تشخیص نوع هیدروکربور با استفاده از شاخص HI و نسبت S<sub>2</sub>/S<sub>3</sub> و ارزیابی توان هیدروکربن زایی، رتبه بندی سنگ‌های مادر بر اساس پارامترهای حاصل از آنالیز ارزیاب سنگ مادر (Peters, 1986).

S <sub>2</sub> /S <sub>3</sub>	HI	هیدروکربور توان	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (mg HC/g rock)	S <sub>2</sub> (mg HC/g rock)	S <sub>1</sub> (mg HC/g rock)	TOC (wt%) کربنات‌ها	TOC (Wt%) شیل‌ها	کمیت / توان 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

میانگین پارامترهای  $T_{max}$ ، TOC،  $S_2$  و  $S_1$  بدست آمده برای نمونه‌های سازند مبارک در مقاطع تحت مطالعه در جدول (۵) دیده می‌شوند.

برای ارزیابی میزان پختگی مواد آلی (کروژن) پارامترهای متعددی مورد استفاده ژئوشیمیست‌ها قرار می‌گیرد که شامل داده‌های حاصل از ارزیابی سنگ مادر، ضریب انعکاس ویتربینیت (جدول ۴) می‌باشند.

جدول ۴. راهنمای پیرولیز برای پارامترهای کمیت، کیفیت و بلوغ حرارتی (Peters and Cassa 1994)

بلوغ	R0 (%)	Tmax (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

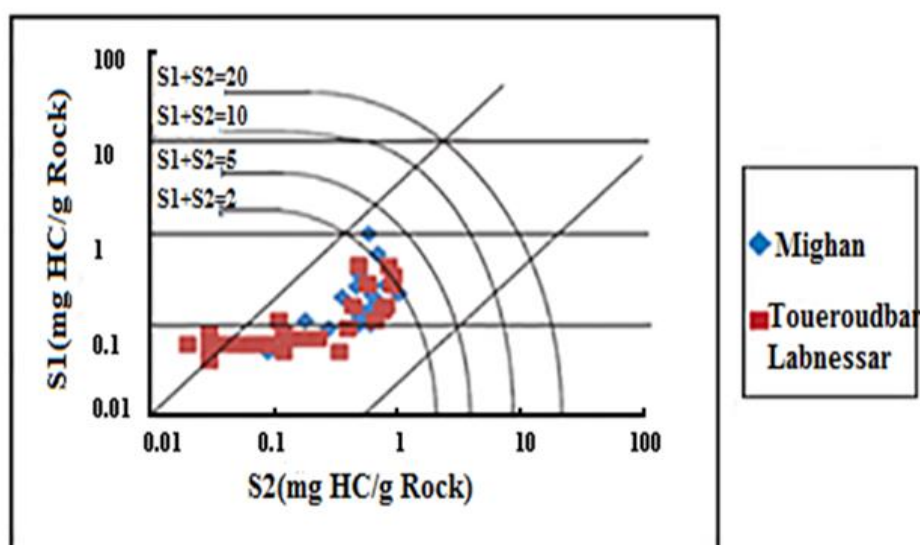
جدول ۵. میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده براساس پیرولیز راک - اول برای نمونه‌های مورد مطالعه

Parameter	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	TOC	Tmax
Range (Touye Roudbar)	۰,۴-۰,۴۵	۰,۰۲-۰,۸۲	۰,۴-۲,۴۷	۳۵۷-۵۱۰
Average (Touye Roudbar)	۰,۲۴	۰,۴۲	۱,۴۳	۴۳۳,۵
Range (Labnessar)	۰,۰۶-۰,۴۴	۰,۰۵-۰,۹۴	۰,۵۹-۱,۶۷	۴۰۱-۴۸۷
Average (Labnessar)	۰,۲۵	۰,۴۹	۱,۱۳	۴۴۴
Range (Mighan)	۰,۰۶-۱	۰,۰۹-۱,۰۴	۰,۶۲-۲,۰۶	۴۵۵-۴۹۸
Average (Mighan)	۰,۵۳	۰,۵۶	۱,۳۴	۴۷۶,۵

### ارزیابی سنگ مادر با استفاده از نمودار $S_1$ در مقابل $S_2$

توان اندک هیدروکربن‌زایی (محدوده ضعیف) در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد (اشکان، ۱۳۸۳) (شکل ۶).

رسم مقادیر  $S_1$  در مقابل  $S_2$  نشان می‌دهد که مجموع هیدروکربن‌های تولید شده و توان باقیمانده در نمونه‌ها کمتر از ۲ می‌باشد که، بیان‌گر وجود

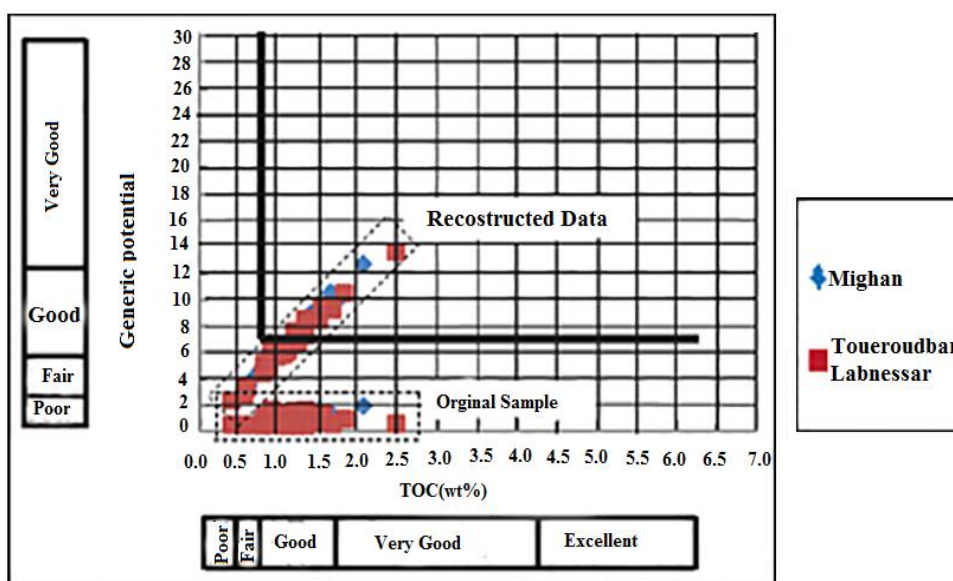


شکل ۶ - نمودار تغییرات  $S_1$  در مقابل  $S_2$  (اشکان، ۱۳۸۳)

سازندمبارک علیرغم داشتن کل کربن آلی تا حدود ۲ درصد، اغلب نمونه‌ها دارای پتانسیل هیدروکربن زایی ضعیف تا متوسط می‌باشند (Barker, 1974) (شکل ۷).

### ارزیابی سنگ مادر با استفاده از نمودار $S_1+S_2$ در مقابل TOC

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 به کار می‌رود نیز نشان می‌دهد که در مناطق مورد مطالعه



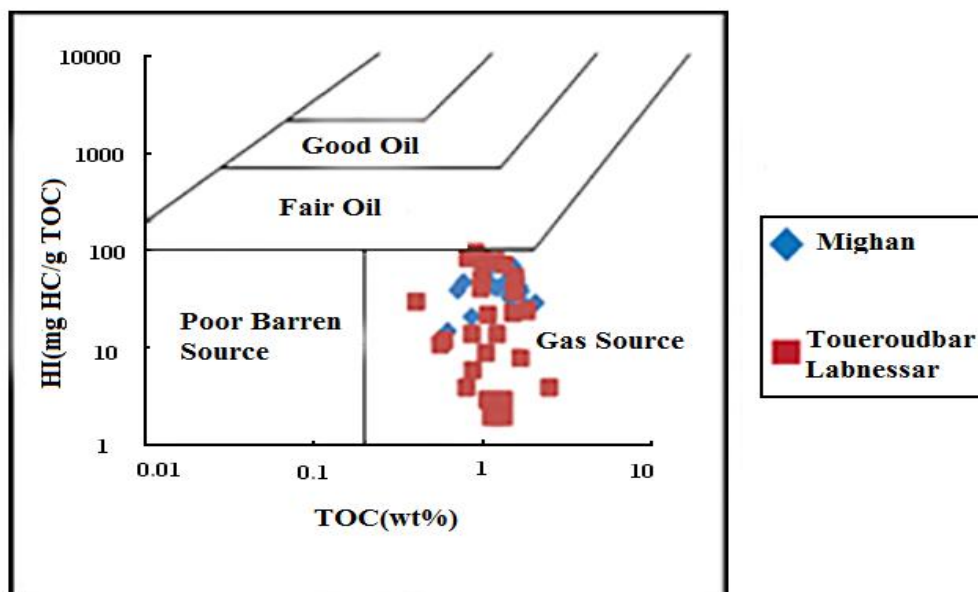
شکل ۷. نمودار تغییرات  $S_1+S_2$  در مقابل TOC (Barker, 1974)

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 هیدروکربن زایی آن افزایش می‌یابد. بنابراین اگر این افزایش در مورد کروژن‌های نوع I و II باشد، تولید هیدروکربن‌های سیال و اگر از نوع III باشد، توان تولید آن معطوف به گاز می‌شود.

### ارزیابی سنگ مادر با استفاده از نمودار HI در مقابل TOC

بر اساس تغییرات شاخص HI در برابر TOC، اغلب نمونه‌ها مقادیر شاخص هیدروژن کمتر از ۱۰۰ را نشان می‌دهند، تقریباً تمامی نمونه‌ها در منطقه تولید گاز قرار دارند که با نتایج قبلی در مورد نوع هیدروکربن هم خوانی دارد (Peters, 1986) (شکل ۸).

همانطور که در بالا اشاره شد (شکل ۲)، رسم مقادیر شاخص‌های



شکل ۸. نمودار تغییرات HI در مقابل TOC (Peters, 1986)

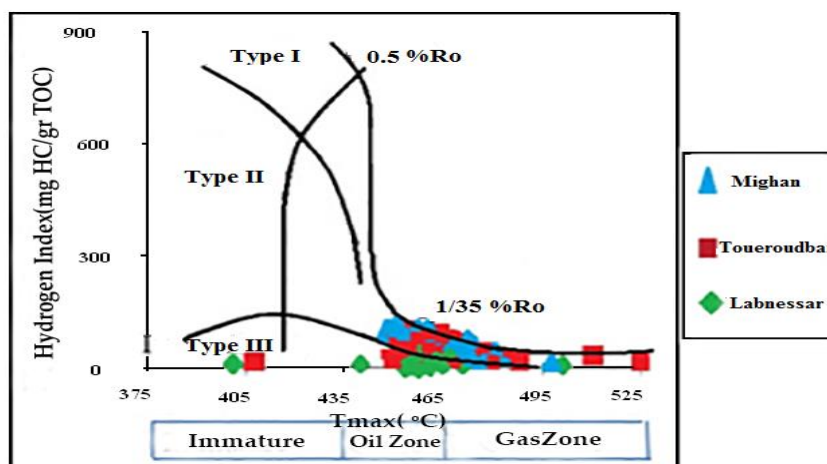


هیدروکربنی از کروژن می‌باشد و با افزایش مقادیر Tmax تا انتهای مرحله تولید گاز، به آهستگی از میزان هیدروژن نیز کاسته می‌شود. همانطوری که در شکل (۹) دیده می‌شود، نمونه‌های سازند مبارک با کمترین میزان شاخص هیدروژن (HI)، از نظر بلوغ در انتهای پنجره نفت‌زایی قرار دارند. این مرحله از هیدروکربن‌زایی معادل بلوغی بیشتر از ۱/۳۵ درصد بر اساس انعکاس ویترنیت می‌باشد.

## بلوغ حرارتی

### ارزیابی بلوغ حرارتی با استفاده از نمودار HI در مقابل Tmax

برای تعیین بلوغ حرارتی مواد آلی و یابه عبارتی کروژن، از رسم پارامتر Tmax در مقابل HI استفاده می‌شود، (Tissot and Welte, 1984) (شکل ۹). بر پایه این دیاگرام نمونه‌های سنگ‌های مادر به آسانی مورد ارزیابی از نظر سطح پختگی مواد آلی و همچنین نوع کروژن قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که کاهش تدریجی شاخص هیدروژن (HI) بواسطه تولید فرآورده‌های



شکل ۹. نمودار مقادیر HI در مقابل Tmax (Tissot and Welte, 1984)

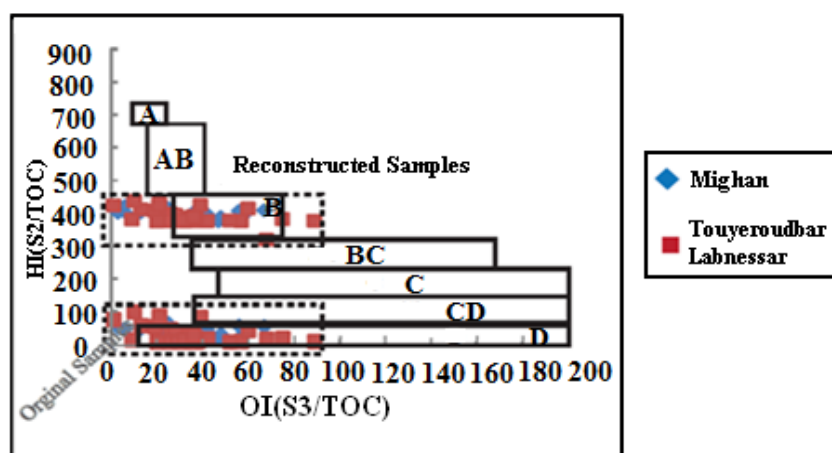
استفاده شده است. در این نمودار براساس تغییرات مقادیر HI در برابر OI، محدوده رخساره‌ای نمونه‌های مورد مطالعه تعیین شده است (شکل ۱۰). برای این اساس اکثر نمونه‌های مورد نظر مابین محدوده CD تا D قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده محیط‌های دریایی تا قاره‌ای نسبتاً اکسیدان است. طی این مطالعه مشخص گردید که با افزایش مقادیر اکسیژن به طور نسبی و کاهش شاخص هیدروژن (شرایط اکسیدان) و افزایش مقدار کل کربن آلی پتانسیل هیدروکربن-زایی این سازند افزایش نیافته است، این وضعیت می‌تواند به واسطه ورود مواد-آلی با کیفیت یکسان و تقریباً با نرخ رسوب‌گذاری ثابت به حوضه رسوبی باشد.

## رخساره آلی

شاخص‌های هیدروژن (HI) و اکسیژن (OI) معرف کیفیت نوع هیدروکربن‌های تولید شده از سنگ مادر می‌باشند، که این پتانسیل‌ها مستقیماً با محیط رسوبی سنگ منشأ 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.

### تعیین رخساره آلی با استفاده از نمودار HI در مقابل OI

جهت تعیین رخساره آلی نمونه‌های مورد نظر از نمودار (Jones, 1987)



شکل ۱۰. نمودار تعیین رخساره آلی با استفاده از نسبت تغییرات HI در برابر OI که ویژگی محدوده‌های مشخص شده عبارتند از: A: محیط دریایی شدیداً احیایی، AB: محیط‌های احیایی پیش‌رونده، B: محیط‌های دریایی یا دریاچه‌ای به طور 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

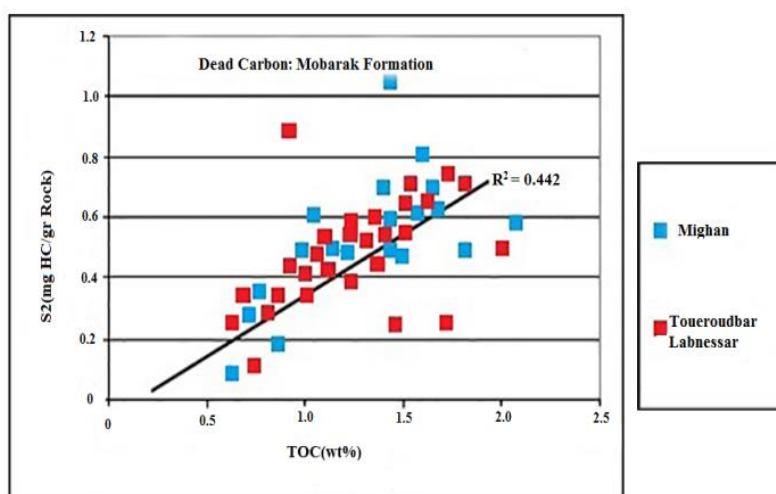


بلوغ بالای مواد آلی، کاهش مقادیر هیدروژن، مقادیر اندک هیدروکربن‌های سیال تولیدی و محیط رسوبی اکسیدان؟ و توان باقی مانده برای تولید گاز، در نمونه‌های سازند مبارک نشان می‌دهد، که سیر تحولی کروژن اثرات زیادی بر کاهش شاخص هیدروژن گذاشته و درحال حاضر این سازند مستعد تولید گاز می‌باشد، در حالی که اگر به وضعیت اولیه مواد آلی از جمله مقادیر کربن آلی و نوع کروژن پرداخته شود، از لحاظ رتبه‌بندی سنگ مادر و پتانسیل ذاتی تولید، شرایط متوسط تا خوب را به نمایش می‌گذارد. 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. بر اساس یافته‌های Cornford 1998، Teichmuller and Durand 1983 کل کربن آلی یک سازند برابر است با مجموع کربن آلی مولد نفت و کربن آلی مولد گاز به همراه کربن مرده:

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.

**تعیین کیفیت مواد آلی با استفاده از نمودار S2 در مقابل TOC**

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مقادیر کربن مرده سازند مبارک در مناطق مورد مطالعه پایین می‌باشد، به عبارت دیگر کیفیت مواد آلی آن بهتر بوده است، بنابراین مقادیر کم کل کربن آلی و هیدروژن کم (HI) نمونه‌ها، در نتیجه پختگی زیاد مواد آلی می‌باشد.

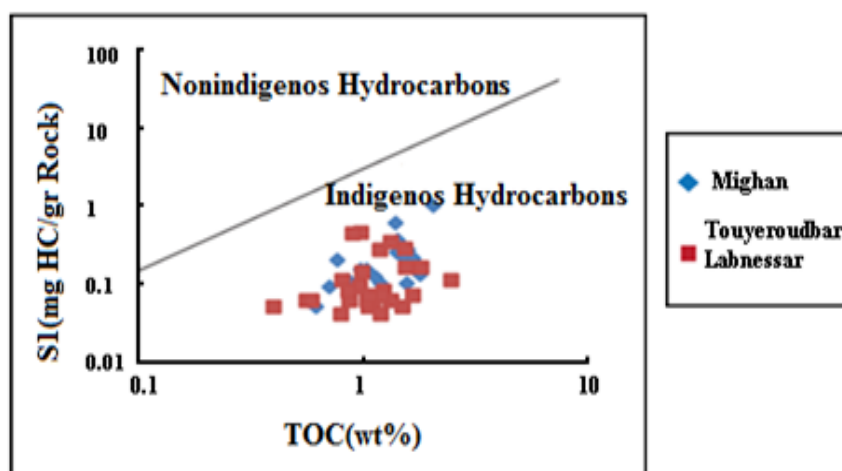


شکل ۱۱. رسم مقادیر TOC در مقابل S2 (Hunt, 1996).

هیدروکربن برجا قرار گرفته، که نشان‌دهنده عدم آلودگی (هیدروکربن‌های مهاجرت یافته) است (Hunt, 1996).

### تعیین آلودگی با استفاده از نمودار S1 در مقابل TOC

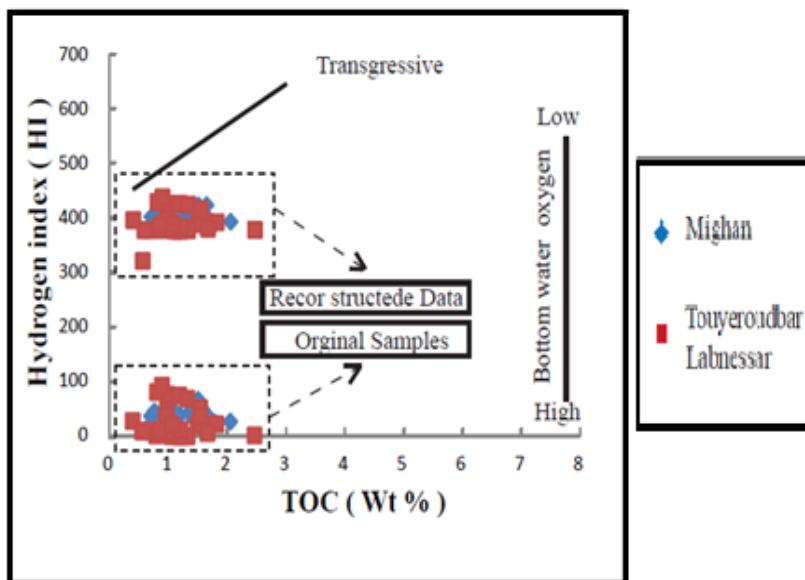
به منظور تعیین آلودگی در نمونه‌های مورد مطالعه، از ترسیم نمودار S1 در مقابل TOC استفاده شد (شکل ۱۲). و مطابق با این نمودار، تمام نمونه‌ها در محدوده



شکل ۱۲. نمودار S1 در مقابل TOC (Hunt, 1996)

**تعیین محیط رسوبی با استفاده از نمودار TOC در مقابل HI:**

ترسیم مقادیر شاخص هیدروژن در مقابل میزان کل کربن آلی (Dean et al., 1986)، در هر سه منطقه مورد مطالعه با میزان شاخص هیدروژن و میزان کل کربن آلی پایین در اکثر نمونه‌ها نشان‌دهنده یک سری پسونده با شرایط اکسیدان در زمان رسوب‌گذاری است. و این نمودار (شکل ۱۳) بیانگر این واقعیت



شکل ۱۳. نمودار HI در مقابل TOC (Dean et al., 1986)

است که مقادیر TOC و HI فزونی نیافته و رابطه مستقیمی با یکدیگر ندارند. و نشان‌دهنده افزایش اکسیژن محیط و پسروی دریاست. و با ترسیم مقادیر تصحیح شده، سازند مبارک در هر سه برش دارای شاخص هیدروژن بالا و تقریباً همراه با سیکل‌های پیشروی است و شرایط احیایی حفظ شدن ماده آلی را به خوبی نشان می‌دهد.

**بحث و نتیجه گیری**

بررسی‌های ژئوشیمیایی سازند مبارک نشان داد که علیرغم افزایش کل کربن آلی (TOC) و درجه حرارت حداکثر (Tmax)، در حرکت به طرف شرق البرز مرکزی به آهستگی از کیفیت مواد آلی کاسته شده و از لحاظ پتانسیل هیدروکربن‌زایی در مراحل پیشرفته‌تری از بلوغ قرار می‌گیرند. با این مفهوم که در مناطق مورد مطالعه اکثر نمونه‌ها در مرحله بلوغ زیاد قرار دارند عمق حوضه رسوبی نسبتاً عمیق می‌باشد.

نوع هیدروکربن‌های احتمالی سازند مبارک در برش‌های مذکور که از توزیع داده‌ها بر روی دیاگرام ون کروئل تعیین شده است بطور غالب کروژن نوع III و بطور محدودتر کروژن نوع II/III می‌باشد و از نظر تولید هیدروکربنی ضعیف تا مناسب و با بیشترین مقدار کربن آلی و درجه حرارت حداکثر در اواخر مرحله کاتازن قرار داشته 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 (Tmax)، حاکی از این است که سازند مبارک تا اندازه ای مستعد تولید هیدروکربن‌های 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 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 - کربونifer (D/C) که منطبق با پیشروی جهانی و سریع آب دریا می‌باشد، از این رو انتظار می‌رود شرایط احیایی که همراه با افزایش ناگهانی عمق و نرخ رسوب‌گذاری پایین سازگار است حاکم باشد (مصدق و همکاران ۱۳۷۹)، براین اساس باید شرایط B یا AB براساس نمودار (Jones 1987) صادق باشد.

در بررسی‌های صحرایی، وضعیت لیتولوژی و ظاهری برش‌های مذکور نشان‌گر حضور شیل‌های تیره است. این در حالی است که گراف ترسیم شده برای برش‌های مذکور محیط‌های D و CD را نشان می‌دهد که با وضع موجود هم‌خوانی ندارد که دلایل زیر می‌تواند توجیه کننده شرایط فوق باشد.

۱- با توجه به اینکه این نمونه‌ها از برش سطحی می‌باشند و برای مدت مدیدی در معرض هوازدگی و اکسیداسیون قرار داشته اند، طبیعی است که به آهستگی از HI (اکسید شدن مواد آلی به صورت تدریجی) آن‌ها کاسته شود. این تغییرات بیان‌گر کاهش کیفیت مواد آلی (از کروژن نوع I و II به کروژن نوع III) می‌باشد.

۲- کاهش HI با توجه به میزان بلوغ (Tmax) نیز نشان می‌دهد که بخش عظیمی از توان این سازند به مصرف رسیده‌است و مقادیر HI اولیه آن‌ها حدود ۲ یا ۳ برابر HI کنونی بوده‌است. وجود HI اولیه با مقادیر زیاد حاکی از قرار داشتن سازند مبارک در محیط دریایی با شرایط احیایی می‌باشد.

۳- بر آورد کربن اولیه بر پایه حضور انواع کروژن نشان می‌دهد که نمونه‌های اولیه تا حدود ۸ درصد کربن آلی داشته‌اند. با این وصف می‌توان این سنگ مادر را از لحاظ مواد آلی غنی و پتانسیل ذاتی آن را در وضعیت خوب تا بسیار خوب رتبه بندی نمود.

۴- افزایش OI نیز بیانگر این موضوع می‌باشد که نمونه‌های اکسید شده رخنمون‌ها، اغلب واقعیت را منعکس نمی‌کنند.

۵- با وجود افزایش اندکی در میزان TOC مقادیر HI افزایش نیافته‌است. که این می‌تواند دلیلی بر پسروی دریا و نهشته شدن مواد آلی با کیفیت کمتر (منشأ خشکی) در فازهای بعدی باشد و یا همانطوری که در بالا گفته شد وضعیت نمونه‌های سطح‌الارضی عموماً این ویژگی‌ها را نشان می‌دهند.

## منابع

- اشکان، م.، ۱۳۸۳، اصول مطالعات ژئوشیمیایی سنگ‌های منشأ هیدروکربوری و نفت‌ها با نگرش ویژه به حوضه رسوبی زاگرس: انتشارات شرکت ملی نفت ایران. کمالی، م.، و ب، قربانی، ۱۳۸۵، ژئوشیمی آلی از فیتو پلانکتون تا تولید نفت: انتشارات آراین زمین.
- مصدق، ح، کبریانی زاده، ا.، حسینی نژاد، م.، ۱۳۸۴، ویژگی های 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 زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- معماریانی، م.، کمالی، م.ح.، ۱۳۸۱، ارزیابی شیمیایی توان هیدروکربورزایی سازند مبارک در کربونیفر زیرین (البرز شرقی در ایران مرکزی)، مجله تحقیق ش. ۴۵.
- Barker, C., 1974, Pyrolysis techniques for source-rock evaluation: The AAPG Bulletin, v.58.
- Batten, D.J., 1996, Palynofacies and petroleum potential Palynology, principle and application: AASP foundation, v.3 .
- Behar, F., V . Beaumont, and B. Pentea do, 2001, Rock-Eval 6 Technology, performances and development: Oil and Gas Sci. Tech-Rew, v.56 .
- Cornford, C., 1998, Source rocks and hydrocarbons of the North Sea. In: Petroleum Geology of the North Sea, Blackwell Science Publications .
- Ehmann, W.D., Koppenhaal, D.W., Hamrin Jr., C.E., Jones, W.C., Prasad, M.N., Tian, W.Z. (1986) Comparison of methods for the determination of organic oxygen in coals. *Fuel*, **65** .
- Espitalie, J., F. Marqis, and L. Sagel, 1984, Geochemical logging, in: Voorhees, K, J. (ed), Analytical pyrolysis: Butterworths, Boston .
- Espitalie, J., M. Mades, B. Tissot, J.J. Menning, and P. Leplate, 1997, Source rock characterization on method for petroleum exploration: proceeding of the 9<sup>th</sup> annual offshore technology conference, Houston .
- Hunt, J.M., 1996, Petroleum geochemistry and geology (2<sup>nd</sup> ed) .
- Jones, R. W./ 1987 , Organic Facies, in Brook J. Welte D. eds. Advances in petroleum geochemistry: Academic Press, New York.
- Kotorba, M. J., Wieclaw, D., Kosakowski, P., Zacharski, j. and Kowalski, A., 2003, Evaluation of sourced rock and potential of middle Jurassic strata the South – estern part of Poland, *Prezegląd Geologiczny*.
- Peters, K.E. , and M.R. , 1994, Applied source rock geochemistry, In Magoon, L, B, DOW , W , G.(Eds) , The petrpleum system from source to trap: AAPG memoir.
- Peters, K.E., 1986, Guidelines for eveluating petroleum source rock using programmed pyrolysis: AAPG Bulletin. V70 .
- Teichmuller, M. and B., 1983, Fluorescence microscopical rank studies on liptinite and vitrinite in peat and coals, and comparison with results of Eval pyrolysis. In *International Journal of Coal Geology* vol .
- Tissot, B.P, B Durand, J. Espitalie and A.Combaz , 1974, Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum: AAPG Bulletin, v, 58
- Tissot, B.P and D.H Welte 1984 , Petroleum formation and occurrence : Berlin Springer – Verlag , v , 223,p . 509 – 523
- Tyson, R. V., 1989, Palynofacies analysis, In: Jenkins, D.J. (Editor): Applied Micropalaeontology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht .
- Van Krevelen, D.W., 1993, Coal., Elsevier .