

ارزیابی پتروگرافی آلی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز، لرستان

سعید شبرنگ^۱، احسان ده‌یادگاری^{۲*} و محمدحسین آدابی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

نویسنده مسئول: e_dehyadegari@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

به‌منظور ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز، آنالیزهای پتروگرافی آلی و پیرولیز راک‌ایول بر روی نمونه‌های سنگ منشأ انجام شد. بدین ترتیب تعداد ۱۵ نمونه تحت مطالعات میکروسکوپ نور عبوری، انعکاسی و فلورسانس و همچنین تعداد ۱۲ نمونه تحت پیرولیز راک‌ایول VI قرار گرفتند. در نور عبوری ماسرال‌های گروه مواد آلی آمورف و معادل آن‌ها در نور انعکاسی، بیتومینیت تشخیص داده شد، همچنین خصوصیات فلورسانسی نمونه‌ها پایین بوده که نشان‌دهنده حضور کروژن نوع II در سازند گرو است. با توجه به اینکه محیط ته‌نشست سازند گرو عمیق بوده است و ورود مواد آلی خشکی وجود نداشته لذا به‌دلیل عدم وجود ماسرال ویتروینیت، استفاده از مقادیر انعکاس ویتروینیت ($VR_o\%$) در ارزیابی بلوغ حرارتی مواد آلی میسر نشد. بنابراین، به‌منظور ارزیابی بلوغ حرارتی از پارامتر شاخص دگرسانی حرارتی (TAI) و انعکاس بیتومن جامد ($BR_o\%$) استفاده شد که غالباً بیانگر اوایل تا اواسط مرحله‌ی بلوغ حرارتی (پنجره نفتی) مواد آلی و کروژن نمونه‌ها در سازند گرو است. با توجه به پارامترهای به‌دست آمده از پیرولیز راک‌ایول و نمودارهای مربوطه، کمیت مواد آلی نمونه‌های مدنظر در بازه‌ی خوب تا بسیار خوب قرار دارند که از نظر کیفیت، کروژن نوع II و II/III را نشان می‌دهند. همچنین مقدار شاخص پتانسیل منشأ (SPI) محاسبه شده در این برش برابر با $19/38 \text{ m ton/m}^2$ بوده که بیانگر شاخص پتانسیل منشأ بالای سازند گرو است.

واژگان کلیدی: پیرولیز راک‌ایول، پتروگرافی آلی، انعکاس بیتومن جامد ($BR_o\%$)، شاخص دگرسانی حرارتی (TAI)، سازند گرو

پیشگفتار

سنگ‌های منشأ با مقدار کافی ماده آلی، توان تولید هیدروکربن و بلوغ حرارتی مناسب، بستگی دارد (رحمان و کینگهورن، ۱۹۹۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۷). بوردانو و بروود (۱۹۹۰) سازند گرو در باختر ایران را به‌عنوان سنگ منشأ شناسایی و معرفی کردند. این سازند در شرایط احيایی و عمیق دریا نهشته شده است (عظامپناه و همکاران، ۱۳۹۱؛ ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ شبرنگ و همکاران، ۱۴۰۰). رستگارکلاته و همکاران (۱۳۹۵) با ارزیابی پتروگرافی- ژئوشیمی آلی، سازند گرو حوضه لرستان در چاه سمنند به این نتیجه رسیده‌اند که کروژن‌های موجود در این سازند از نوع III، II/III و IV بوده که در سطوح بلوغ اواخر پنجره‌ی نفتی تا پنجره‌ی گاز خشک قرار دارند. موری و همکاران (۱۳۹۸) با ارزیابی

پتروگرافی آلی شاخه‌ای از علم ژئوشیمی آلی برای مطالعه میکروسکوپی آثار و بقایای مواد آلی (ماسرال) در زغال‌ها و سنگ‌های منشأ هیدروکربن‌هاست. مهم‌ترین ویژگی‌های علم پتروگرافی آلی نوع ماده آلی و مراحل تکامل حرارتی مواد آلی هستند. نوع ماده آلی ارتباط مستقیم با مواد اولیه سازنده موجودات زنده دارد و خود تحت تأثیر دو عامل منشأ اولیه مواد آلی ته‌نشست شده در محیط رسوب‌گذاری و فرآیندهای تأثیرگذار بر آن‌ها طی دیانز است. اساس پتروگرافی آلی مطالعات میکروسکوپی نور عبوری، انعکاسی و فلورسانس است (کولمنرو و همکاران، ۲۰۰۸). بررسی و شناسایی سنگ‌های منشأ از مهم‌ترین وظایف ژئوشیمی اکتشافی است. تشکیل هیدروکربن در هر منطقه، به‌وجود

در برگرفتن ارتفاعات زاگرس، زاگرس مرتفع نیز نامیده می‌شود. مرز شمال خاوری این ناحیه به راندگی اصلی زاگرس و مرز جنوب باختری آن به راندگی دیگری محدود می‌شود که از شمال کوه کی‌نو و جنوب دهنگان و کوه سبزو می‌گذرد (مطیعی، ۱۳۷۴). برش مورد مطالعه در زون زاگرس مرتفع، و در ۸۰ کیلومتری جنوب باختری شهرستان الیگودرز (استان لرستان) در نزدیکی روستای موس با روند شمال خاوری - جنوب باختری بر روی کوه قالیکوه قرار گرفته است. این برش در محدوده جغرافیایی عرض شمالی $33^{\circ}04'05''$ و طول خاوری $49^{\circ}00'17''$ واقع شده است (شکل ۱). توالی چینه‌شناسی از قاعده تا رأس سازند گرو در این برش ۴۸۳ متر است، که غالباً متشکل از شیل‌آهکی و آهک‌شیلی می‌باشد (شکل ۲). رسوبات عمیق سازند گرو بر روی رسوبات تبخیری سازند گوتنیا به سن ژوراسیک بالایی یا سنگ‌آهک‌های برشی معادل گوتنیا در نواحی لرستان و فروافتادگی دزفول قرار می‌گیرد (مطیعی، ۱۳۸۲). در این برش نیز مرز زیرین سازند گرو بر روی سنگ‌آهک‌های برشی معادل سازند گوتنیا قرار گرفته است و مرز بالایی آن به دلیل قرار گرفتن سازند گرو در هسته ناودیس نامشخص است. به این ترتیب سازند گرو می‌تواند در زیر سازندهای مختلفی واقع شود و این موضوع خود معلول پیشروی رسوبات ساحلی محاط به حوضه رسوبی گرو تفسیر می‌گردد (مطیعی، ۱۳۸۲) (سپهر و کاسگروف، ۲۰۰۴).

مواد و روش‌ها

روش‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده در بررسی‌های پتروگرافی آلی شامل مطالعه برش‌های نازک با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری (مانند مطالعات پالینولوژیکی مواد آلی کروژن‌ها) و مطالعه میکروسکوپی نور انعکاسی و فلورسانس مقاطع صیقلی هستند. در این پژوهش تعداد ۱۵ نمونه سطح‌الارضی، رخنمون سازند گرو به صورت سیستماتیک جهت مطالعات پتروگرافی آلی انتخاب گردید (شکل ۲). در ابتدا کروژن‌های موجود در نمونه‌ها به روش شیمیایی تیلور و همکاران (۱۹۹۸) جداسازی و از آن‌ها برش نازک و صیقلی تهیه شد. سپس سه نمونه از سازند

ژئوشیمی آلی نهشته‌های سازند گرو با استفاده از داده‌های حاصل از پیرولیز راک-ایول بر این باور هستند که نمونه‌های سازند گرو در شمال باختر کرمانشاه در مرحله بلوغ حرارتی تا مرحله‌ی حداکثری تا مرحله‌ی تولید گاز مرطوب و خشک می‌باشند اما نمونه‌های سازند گرو در باختر خرم‌آباد در مرحله‌ی نابالغ تا بلوغ حداکثری قرار دارند. خانی و همکاران (۱۳۹۳) با ارزیابی ژئوشیمیایی و مدلسازی سیستم هیدروکربنی در رسوبات ژوراسیک میانی و کرتاسه زیرین ناحیه لرستان از دیدگاه ذخایر هیدروکربنی غیرمعارف به این نتیجه رسیده‌اند که تمرکز بالای مواد آلی آمورف با میزان پایین فلورسانس‌زایی همراه با مواد آلی دریایی و مقادیر متناهی بیتومن جامد درج‌ازا در این رسوبات وجود دارد. این خصوصیات نشان‌دهنده منشأ دریایی مواد آلی مورد مطالعه بوده است. و براساس مقادیر معادل انعکاس ویترونیات و نتایج مدلسازی، در نواحی مرکز و شمال باختر حوضه لرستان، این رسوبات به لحاظ بلوغ حرارتی در محدوده پنجره گاززایی قرار دارند. سازند گرو شامل کروژن‌های نوع II و III و دارای توان پتانسیل هیدروکربن‌زایی خوب با تولید گاز و نفت است (یوسفی و بدیع، ۱۳۹۴؛ قلندری و همکاران، ۱۳۹۷). شکاری‌فرد و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی خواص ژئوشیمیایی نفت شیل‌های نفتی سازند گرو در منطقه قالی‌کوه به این نتیجه رسیده‌اند که سازند گرو در مرحله اوایل بلوغ و پنجره زایش نفت قرار گرفته است. در این پژوهش با توجه به اهمیت بررسی سنگ‌منشأ در حوضه لرستان به تعیین ماسرال‌ها، نوع کروژن و ارزیابی بلوغ حرارتی سازند گرو براساس مطالعات میکروسکوپ نور عبوری و انعکاسی و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی سازند گرو با استفاده از پیرولیز راک ایول VI، در جنوب‌خاور لرستان، برش الیگودرز پرداخته شده است.

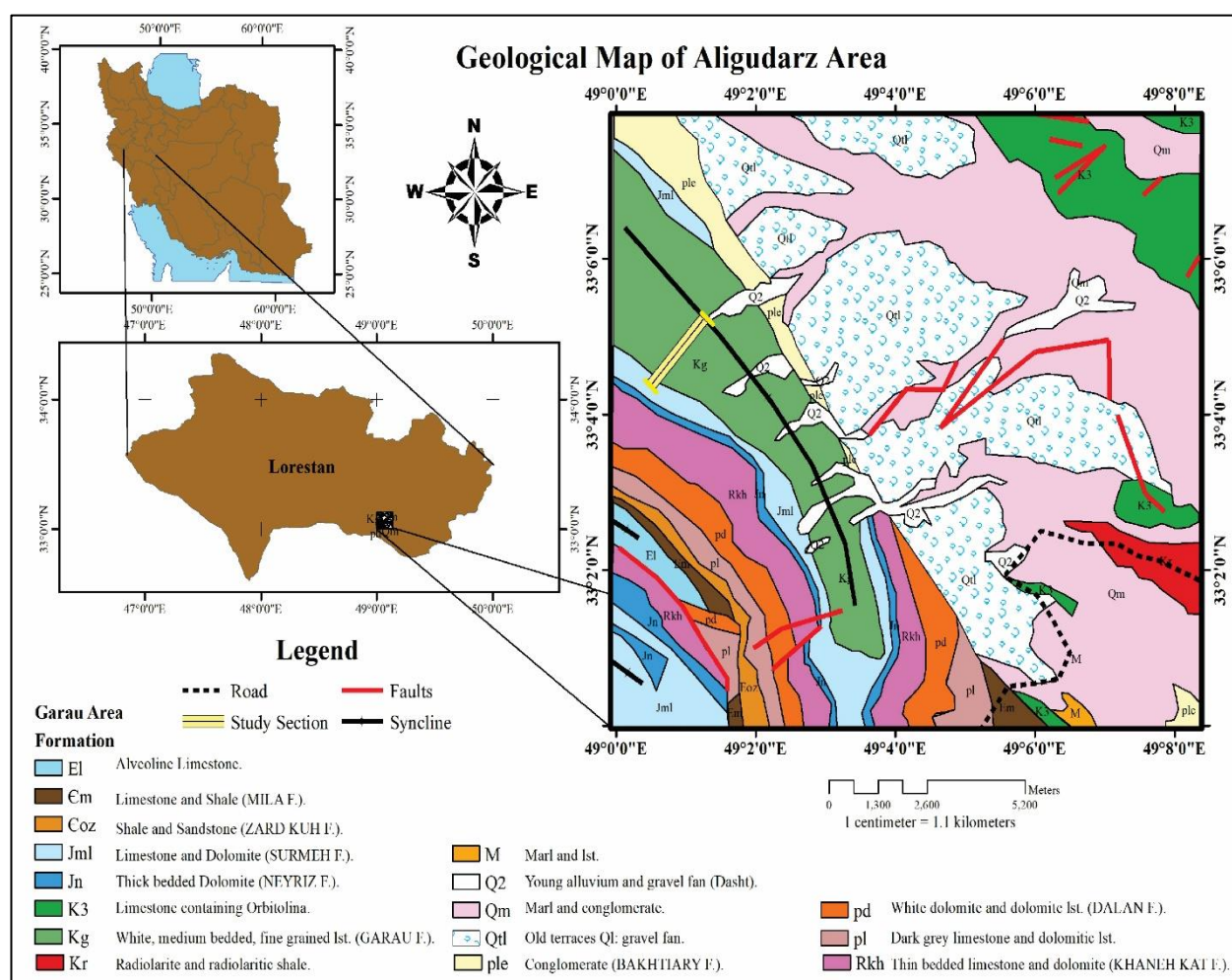
زمین‌شناسی محیط تهنشست

زون زاگرس مرتفع^۱ به صورت زونی به شدت خرد شده و گسل‌خورده و نواری باریک و طویل به طول ۱۰ تا ۷۰ کیلومتر بین زون ساندج - سیرجان و ناحیه زاگرس چین‌خورده و به موازات آن‌ها قرار گرفته است (اشتوکلین، ۱۹۶۸). به این ناحیه از زاگرس که داخلی‌ترین بخش آن را تشکیل می‌دهد، زاگرس داخلی گفته می‌شود و به دلیل

¹ High Zagros Zone

ایول در سال ۱۹۹۶ به‌وسیله تکنولوژی Vinci تکمیل شده که به‌دلیل دقت بالای آنالیز از بهترین روش‌ها جهت ارزیابی سنگ‌های منشأ به‌شمار می‌آید (بهار و همکاران، ۲۰۰۱). از مهمترین پارامترهای محاسبه شده توسط این دستگاه به پارمترهایی مانند: S_1 , S_2 , S_3 , T_{max} , HI^5 , OI^6 و TOC^6 اشاره کرد (جدول ۲). OM مقدار کل ماده‌ی آلی موجود در نمونه است که حاوی عناصر کربن (C) و هیدروژن (H) و سایر عناصر مانند اکسیژن (O)، نیتروژن (N) و گوگرد (S) می‌باشد؛ درحالی‌که TOC مقدار کل کربن آلی موجود در نمونه است.

گرو جهت بررسی همگن^۲ بودن بیتومن‌های جامد^۳ انتخاب گردید. در ادامه بر روی نمونه‌های آماده‌سازی شده مطالعات پتروگرافی آلی صورت گرفت. در این برش جهت انجام پیرولیز راک ایول VI، ۱۲ نمونه انتخاب گردید (شکل ۲). نمونه‌های انتخاب شده هر کدام در هاون چینی خرد شده و به‌منظور یکنواخت شدن، از الک با مش ۶۰ گذرانده شده و حدود ۵۰ تا ۷۰ میلی‌گرم از هر نمونه پودر شده به‌منظور ارزیابی کمیت و کیفیت مواد آلی و بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز توسط دستگاه راک ایول VI مورد پیرولیز قرار گرفتند. دستگاه راک ایول VI به‌عنوان آخرین مدل از راک



شکل ۱. موقعیت سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز بر روی نقشه زمین‌شناسی الیگودرز، با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰

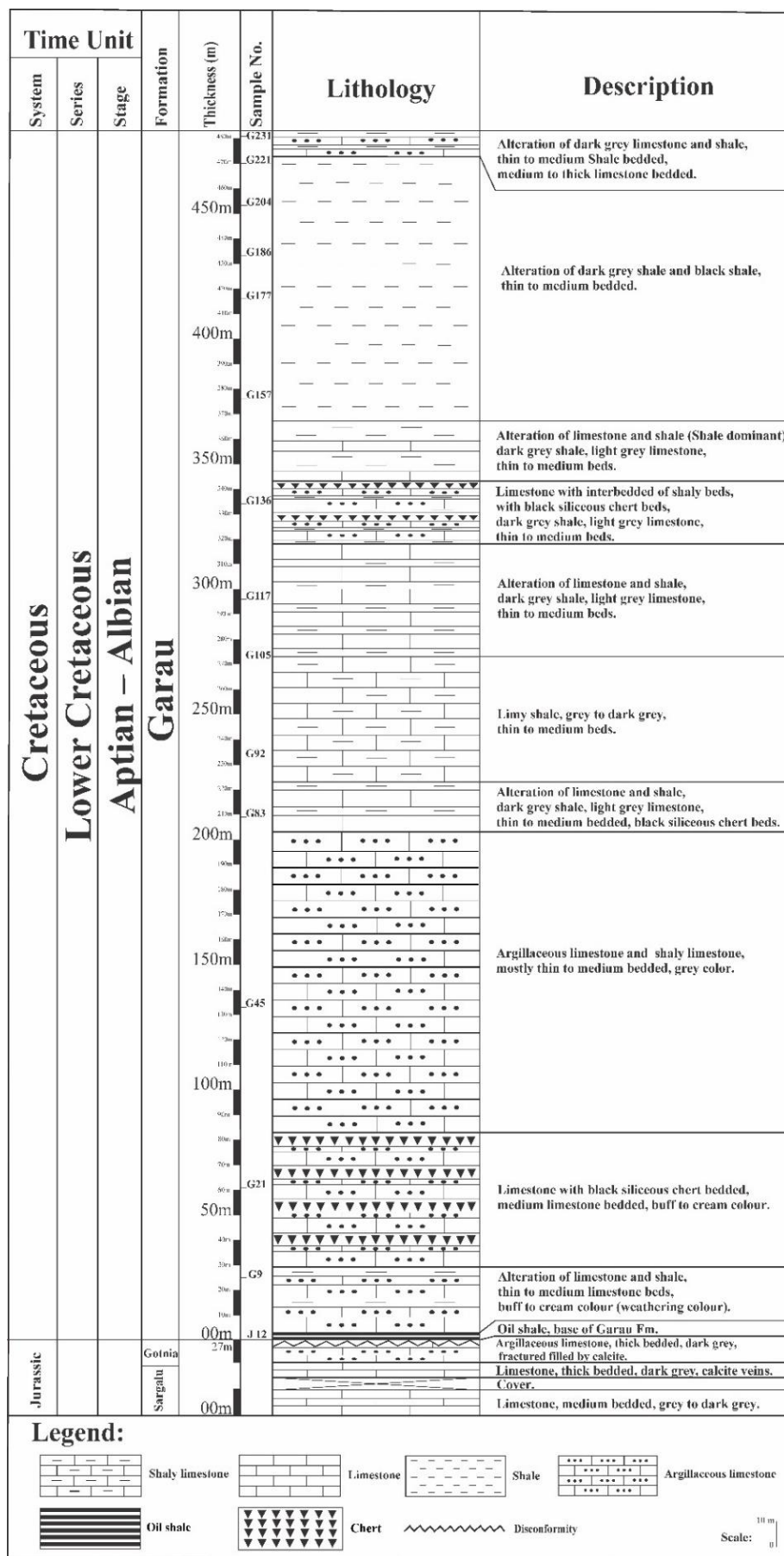
⁵ Oxygen Index

⁶ Total Organic Carbon

² Homogeneous

³ Solid bitumen

⁴ Hydrogen Index



شکل ۲. ستون چینه‌شناسی سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز، جنوب- خاور لرستان

جدول ۱. مقادیر ماده‌ی آلی برحسب درصد وزنی (Organic Matter (wt%)) حاصل از آزمایش استخراج کروژن (نمونه‌هایی که جهت بررسی همگن بودن بیتومن‌های جامد از آن‌ها استفاده شد با رنگ نارنجی مشخص شده‌اند).

No.	Sample name	Distance (m)	Organic Matter (wt%)
1	J12	2	30.11
2	G9	25	5.42
3	G21	61	0.6
4	G45	133	1.14
5	G83	209	1.18
6	G92	233	1.81
7	G105	272	3.28
8	G117	296	4.17
9	G136	334	1.1
10	G157	376	3.1
11	G177	416	3.5
12	G186	433	1.85
13	G204	453	4.35
14	G221	470	5.03
15	G231	481	8.01

جدول ۲. نتایج حاصل از پیرولیز راک ایول VI نمونه‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز

Sample	Distance (m)	S ₁ (mgr/gr)	S ₂ (mgr/gr)	Tmax (C°)	S ₃ (mgr/gr)	PC	RC	TOC (%wt.)	HI	OI	GP	MI (S ₁ /TOC)	PI	HC TI
G-231	481	0.65	22.17	429	0.4	1.91	2.65	4.56	486	9	22.82	0.14	0.03	55.43
G-221	470	0.48	18.68	428	0.73	1.62	3.01	4.63	404	16	19.16	0.10	0.03	25.59
G-204	453	0.23	14.91	430	0.55	1.28	2.44	3.71	402	15	15.14	0.06	0.02	27.11
G-186	433	0.12	6.71	428	0.34	0.58	1.2	1.78	378	19	6.83	0.07	0.02	19.74
G-177	416	0.1	10.8	430	0.75	0.93	2.41	3.34	323	22	10.90	0.03	0.01	14.40
G-157	376	0.09	10.21	429	0.52	0.87	2.03	2.9	352	18	10.30	0.03	0.01	19.63
G-136	334	0.1	3.98	430	0.33	0.35	0.68	1.03	385	32	4.08	0.10	0.02	12.06
G-117	296	0.11	7.2	430	0.33	0.62	1.21	1.83	394	18	7.31	0.06	0.02	21.82
G-92	233	0.25	5.63	429	0.28	0.5	1.1	1.6	352	18	5.88	0.16	0.04	20.11
G-83	209	0.42	6.04	426	0.24	0.54	0.52	1.07	566	22	6.46	0.39	0.07	25.17
G-21	61	0.17	2.46	427	0.25	0.23	0.29	0.52	476	48	2.63	0.33	0.06	9.84
J-12	2	1.38	79.73	433	0.41	6.75	12.47	19.22	415	2	81.11	0.07	0.02	194.46

جدول ۳. مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر پارامترهای مهم پیرولیز راک ایول VI، سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز

Parameters	S ₁	S ₂	S ₃	PC	RC	TOC	HI	OI	GP	MI	PI	HC TI
Min	0.09	2.46	0.24	0.23	0.29	0.52	323	2	2.63	0.03	0.01	9.84
Max	1.38	79.73	0.75	6.75	12.47	19.22	566	48	81.11	0.39	0.07	194.46
Average	0.34	15.71	0.43	1.35	2.50	3.85	411	20	16.05	0.13	0.03	37.11

بحث و بررسی

پتروگرافی آلی

بیتومن جامد: همان‌طور که قبلاً اشاره شد سه نمونه سنگ جهت بررسی همگن بودن بیتومن‌های جامد در طول سازند گرو انتخاب گردید (جدول ۱). اهمیت این کار در این است که در صورت ناهمگن بودن بیتومن‌ها نمی‌شود از آن‌ها برای معادلسازی‌های انعکاس ویتروگرافی استفاده کرد. بیتومن در اشکال نوری متعددی وجود دارد. لندیس و کاستانو (۱۹۹۵) سه شکل نوری را در تمام سطوح بلوغ

حرارتی گزارش کرده‌اند. بیتومن همگن نشان‌دهنده ماسرال‌هایی است که انعکاس تقریباً یکنواختی با یکدیگر نشان می‌دهند و به‌سختی می‌توان آن‌ها را با سایر اجزای پتروگرافی آلی اشتباه گرفت (لندیس و کاستانو، ۱۹۹۵). ماسرال‌های همگن هنگام اندازه‌گیری انعکاس و مقایسه با انعکاس ویتروگرافی، قابل اعتماد هستند (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج تأیید می‌کند که از انعکاس بیتومن جامد با بافت همگن می‌توان به‌عنوان شاخص بلوغ حرارتی استفاده کرد (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۹). یک مطالعه بین

آزمایشگاهی با هدف تأکید بر تمایز پتروگرافی بیتومن جامد از ویتترینایت انجام شد، با این حال مقادیر انعکاسی گزارش شده از هردو BR و VR در بین همه نمونه‌ها یکسان بود (هاکلی و همکاران، ۲۰۱۵). برخلاف تأکید وی و همکاران (۲۰۱۶) شناسایی اشتباه بیتومن جامد برای ویتترینایت بر ارزیابی بلوغ حرارتی در کل پنجره نفتی تا اواسط پنجره‌ی زایش گاز خشک تأثیر می‌گذارد (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات میکروسکوپ انعکاسی این سه نمونه، ویژگی‌های بیتومن جامد قطعات بزرگ، زاویه‌دار و انعکاس تقریباً یکنواخت با یکدیگر را نشان می‌دهند که بیانگر همگن بودن بیتومن‌های جامد سازند گرو هستند (شکل ۳). با تأیید همگن بودن بیتومن جامد از انعکاس آن جهت معادل‌سازی انعکاس ویتترینایت به‌عنوان شاخص بلوغ حرارتی می‌توان استفاده کرد.

نور عبوری، انعکاسی و فلورسانس

ماسرال‌ها معادل کانی‌ها در سنگ‌های معدنی‌اند، با این تفاوت که ترکیب شیمیایی این اجزای آلی به‌خوبی مشخص نشده‌اند (ساج، ۱۹۸۲). مقدار درصد فراوانی ماسرال‌ها نسبت به هم، نوع زغال‌ها و نوع ماده آلی سنگ‌های منشأ را تعیین می‌کند (کوک و شروود، ۱۹۹۱؛ هاتون و همکاران، ۱۹۹۴). ماسرال‌ها براساس خصوصیات فیزیکی و نوری خود در سه گروه ویتترینایت (هومینایت)، لیپتینایت و اینرتینایت طبقه‌بندی می‌شوند (سایکوروا و همکاران، ۲۰۰۵). کروژن به قطعات و موادی آلی گفته می‌شود که در حلال‌های آلی و قلیایی غیرقابل حل هستند (تیسوت و ولته، ۱۹۴۸). در لایه‌های سنگ‌منشأ هیدروکربن‌ها، کروژن‌ها ۸۰ تا ۹۹ درصد مواد آلی را تشکیل می‌دهند و بیتومن تشکیل‌دهنده بخش باقی مانده است (تیسوت و ولته، ۲۰۱۳). مطالعات نور عبوری همراه با پتروگرافی آلی در نور انعکاسی اطلاعاتی بسیار دقیق درباره رخساره‌ها و محیط‌های ته‌نشست قدیمی ارائه می‌دهند (تایسون، ۱۹۹۵b). باتوجه به مطالعات میکروسکوپ نور عبوری مواد آلی موجود در نمونه‌های این پژوهش، آمورف تشخیص داده شدند و براساس تقسیم‌بندی تایسون (تایسون، ۱۹۹۳) جزء توده‌های آلی گروه آمورف قرار می‌گیرند (شکل ۴). مطالعات

میکروسکوپ نور انعکاسی، مواد آلی موجود را آمورف تشخیص دادند که جزء گروه ماسرالی اصلی محسوب نمی‌شوند اما با توجه به معادل‌هایی که برای مواد آلی آمورف^۱ در نور انعکاسی ارایه شده است، معادل بیتومینیت می‌باشد (شکل ۵). اولین بار اصطلاح بیتومینیت را تیچمولر در سال ۱۹۷۴ ارائه کرد (تیچمولر، ۱۹۷۴a,b). این ماسرال‌ها در زیر نور انعکاسی فاقد ساختار سلولی‌اند و فلورسانس‌زایی خود به خود، کمی نشان می‌دهند و به شکل درج‌ازا و اکثراً به حالت توده‌ای نیز مشاهده می‌شوند. ساختارهای درونی آن‌ها به دو صورت آمورف تا لایه‌دار هستند (تیچمولر و وولف، ۱۹۷۷؛ کوک و شروود، ۱۹۹۱؛ کوک و همکاران، ۱۹۸۱) (شکل ۵A). این ماسرال ماده آلی غالب در زغال‌های ساپروپلیک و سنگ‌های منشأ تولید کننده هیدروکربن‌ها است (تیچمولر و تیچمولر، ۱۹۸۲b).

انواع مختلف مواد آلی، زمانی که تحت تأثیر تشعشعات نورهای فرابنفش و آبی با طول موج کوتاه قرار می‌گیرند، بسته به نوع ماده آلی، طیف نوری با طول موج بلند ساطع می‌کنند. این طیف‌های نوری در میکروسکوپ انعکاسی با فیلترهای نور فرابنفش و آبی قابل مشاهده هستند (راست، ۱۹۹۵). مقدار فلورسانس‌زایی ماسرال‌ها با افزایش بلوغ کاهش می‌یابد و همراه با آن طیف رنگی نورفلورسانس به سمت طول موج‌های بلند جابه‌جا می‌شود.

براساس بررسی خاصیت فلورسانس‌زایی، مواد آلی سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز دارای خاصیت فلورسانس‌زایی کم می‌باشد (شکل ۶). نتایج به‌دست آمده از میکروسکوپ‌های نور عبوری، انعکاسی و فلورسانس بر روی نمونه‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز می‌توان مواد آلی را در گروه نفت‌زا براساس گروه‌بندی داو (۱۹۷۷ و ۱۹۸۲) و پترز و کاسا (۱۹۹۴) قرار داد. در نهایت با توجه به مطالعات میکروسکوپ نور عبوری، انعکاسی و فلورسانس کروژن‌های سازند گرو از نوع II هستند.

بلوغ حرارتی^۲

شاخص دگرسانی حرارتی (TAI)^۳: نمودار رنگ پیرسون توسط پیرسون (۱۹۹۰) با استفاده از رنگ مانسل^۴ برای نشان دادن اینکه چگونه رنگ‌های فسیل با مقیاس TAI

³ Thermal Alteration Index

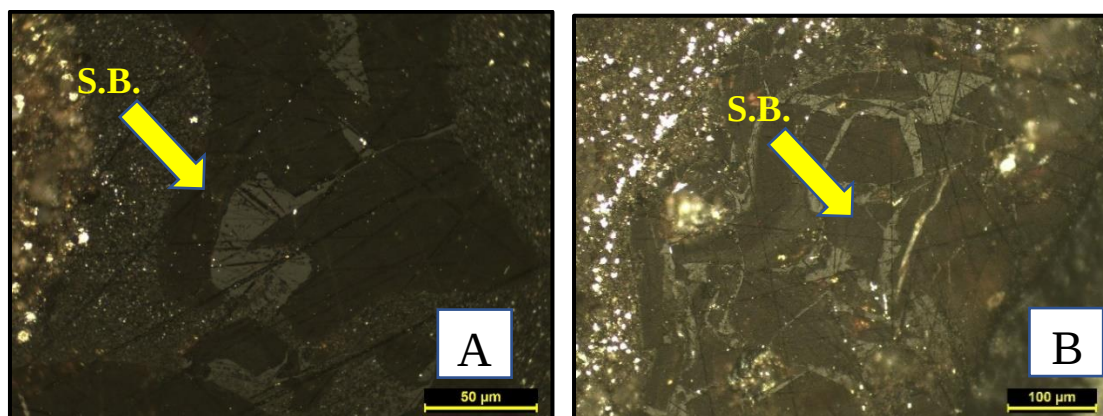
⁴ Munsell

¹ Amorphous Organic Matter

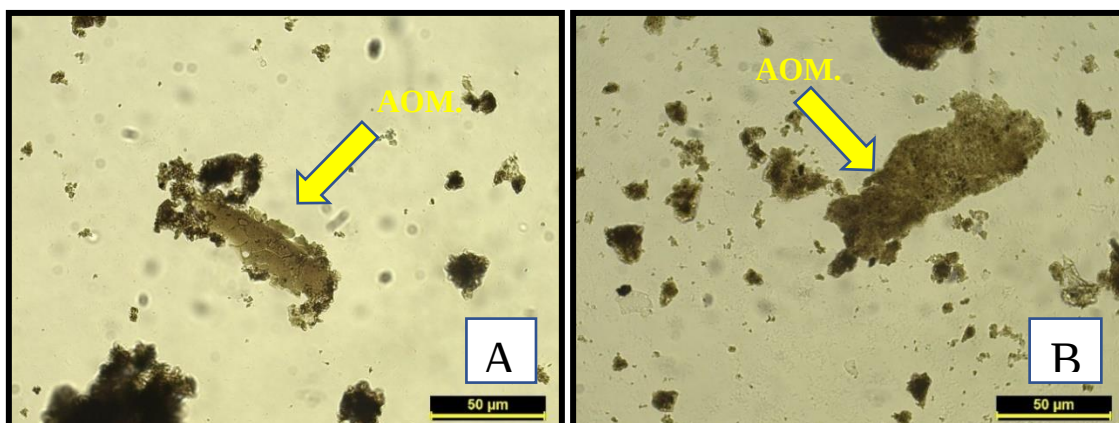
² Thermal maturity

حرارتی مواد آلی مخصوصاً سنگ‌های منشأ استفاده می‌شود. همچنین هزینه این روش پایین‌تر از روش‌های دیگر تعیین بلوغ حرارتی است و می‌تواند به‌عنوان داده تکمیلی همراه با دیگر روش‌ها به‌کار رود.

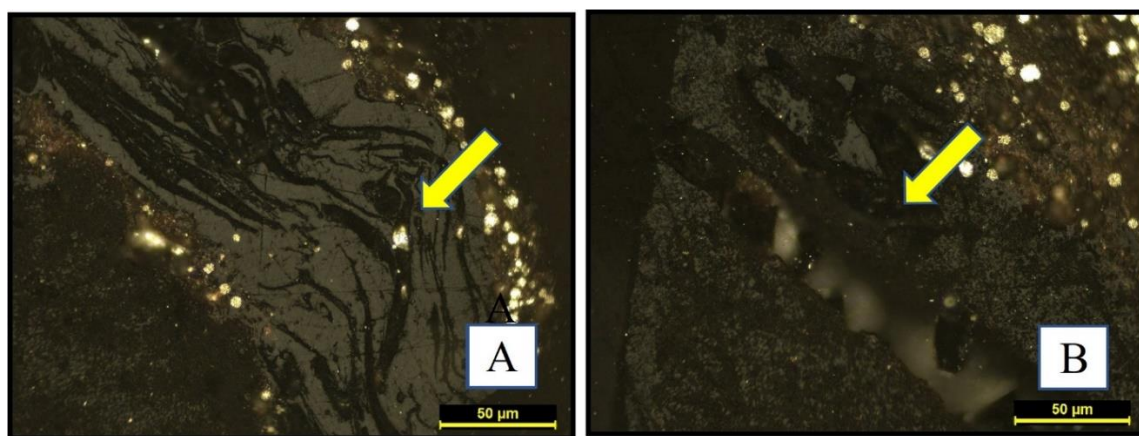
تطابق داده می‌شوند، ساخته شد. اندیس‌ها از ۱ تا ۵ تغییرات رنگ کروژن را از زرد روشن تا زرد تیره، قهوه‌ای روشن، قهوه‌ای، قهوه‌ای تیره و سیاه نشان می‌دهند. زرد، نابالغ؛ قهوه‌ای روشن و قهوه‌ای، بالغ؛ و قهوه‌ای تیره و سیاه، فوق بالغ می‌باشند. TAI به شکل گسترده در ارزیابی بلوغ



شکل ۳. بیتومن‌های جامد موجود در ماتریکس سنگ سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز (بیتومن جامد = S.B.)



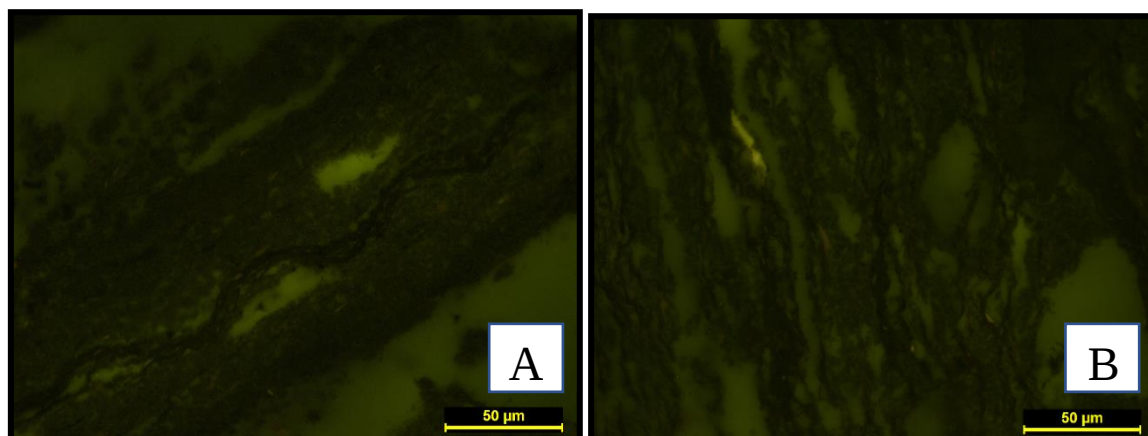
شکل ۴. تصاویر ماسرال‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز با استفاده از میکروسکوپ نور عبوری (AOM = مواد آلی آمورف)



شکل ۵. تصاویر ماسرال‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز با استفاده از میکروسکوپ نور انعکاسی (بیتومینایت = B.)

اساس محدوده بلوغ حرارتی این سازند با توجه به نمودار رنگ پیرسون (اصلاح شده توسط تراورس (۱۹۹۴)) (شکل ۷) در مرحله بالغ و پنجره اصلی زایش نفت قرار می‌گیرند، و به‌صورت تقریبی معادل ۰/۸ تا ۱ درصد انعکاس ویتترینایت (VR%) است که مرحله‌ی بالغ را تأیید می‌کند. با توجه به مقیاس باتن^۱ (مقیاس باتن، اصلاح شده توسط تراورس (۱۹۹۴)) نمونه‌های این سازند در مرحله‌ی بالغ و با پتانسیل زایش نفت و هیدروکربن‌های سبک هستند.

حضور بسیار کم ویتترینایت در بین ماسرال‌های سازند گرو معلول محیط عمیق سازند گرو و طبیعتاً عدم ورود مواد آلی از خشکی است که قبلاً اشاره شد. در اینجا باتوجه به عدم حضور ماسرال ویتترینایت و طبیعتاً نبود انعکاس ویتترینایت، شاخص دگرسایی حرارتی (TAI) می‌تواند به ارزیابی بلوغ حرارتی سازند گرو کمک کند. براساس نتایج به‌دست آمده از شاخص دگرسایی حرارتی (TAI)، نمونه‌های سازند گرو در بازه‌ی ۳⁻ تا ۳ قرار دارند. بر همین



شکل ۶. فلورسانس‌زایی ماسرال‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز

Organic Thermal Maturity	Spore/ pollen Color	Correlation to other scales	
		TAI = 1- 5	Vitrinite Reflectance
Immature		1	0.2%
		1+	
		2-	0.3%
		2	
Mature Maine Phase Of Liquid Petroleum Generation		2+	0.5%
		3-	
		3	.9%
		3+	
Dry Gas Or Barren		4-	1.3%
		4	2.0%
		4	2.5%
	Black and Deformed	(5)	

شکل ۷. نمودار رنگ پیرسون^۱ در مقایسه با بلوغ حرارتی آلی، TAI و انعکاس ویتترینایت (VR%)، (اصلاح شده توسط تراورس (۱۹۹۴))

^۱ Batten's scale

^۱ Pearson's colour chart

انعکاس ویتترینایت معادلسازی شده ($VR_{0\text{ eq.BR}}\%$) با استفاده از انعکاس بیتومن ($BR_0\%$)

انعکاس ویتترینایت ($VR_0\%$) به‌طور کلی معتبرترین تکنیک برای تعیین بلوغ حرارتی سنگ‌های رسوبی در نظر گرفته می‌شود (لوهر و هاگلی، ۲۰۲۱). تبدیل انعکاس بیتومن جامد به انعکاس ویتترینایت معادل یک موضوع مرتبط در جامعه پترولوژی آلی است (ماستالرز و همکاران، ۲۰۱۸). زمانی که در سازند، مواد آلی خشکی وجود نداشته باشد طبیعتاً اندازه‌گیری انعکاس از هیدروکربن‌های جامد مختلف از جمله بیتومن می‌تواند به‌عنوان بهترین روش جهت ارزیابی بلوغ حرارتی مواد آلی باشد. پترولوژیست‌های آلی ترشح ماسرال ثانویه^۱ را به‌عنوان بیتومن در نظر می‌گیرند اما ژئوشیمیست‌های آلی از بیتومن به‌عنوان بخشی از کل مواد آلی سنگ که محلول در حلال‌های آلی است یاد می‌کنند (راجر، ۱۹۹۳). انعکاس بیتومن جامد یک روش مناسب است، زیرا در اکثر شیل‌ها در اواخر بلوغ تا فوق بالغ نوع ماده آلی غالب است (هاگلی و کاردوت، ۲۰۱۶) و میزان انعکاس آنرا به‌عنوان شاخص بلوغ نفتی می‌دانند (وی و همکاران، ۲۰۱۶). حضور بسیار کم ویتترینایت در بین ماسرال‌های سازند گرو معلول محیط

عمیق سازند گرو و عدم ورود مواد آلی از خشکی است. در اینجا با توجه به عدم حضور ماسرال ویتترینایت و طبیعتاً نبود انعکاس ویتترینایت، اندازه‌گیری انعکاس بیتومن جامد می‌تواند به ارزیابی بلوغ حرارتی سازند گرو به‌ما کمک کند. اشمیت و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از نتایج برخی از پژوهشگران (جیکوب، ۱۹۸۹؛ وی و همکاران، ۲۰۱۶) معادله‌ای جهت تبدیل مقادیر انعکاس بیتومن به انعکاس ویتترینایت به‌دست آورده‌اند که دارای ضریب همبستگی ۰/۹۸ بوده است. در اینجا از معادله اشمیت و همکاران (۲۰۱۹) برای محاسبه انعکاس ویتترینایت معادل از انعکاس بیتومن جامد نمونه‌های سازند گرو استفاده شده که در زیر آورده شده است:

$$VR_{eq. BR} = 0.938 * BR + 0.3145$$

[n = 237; R² = 0.98; BR calibration interval = 0.07 - 5.40%]

با توجه به داده‌های انعکاس ویتترینایت معادل به‌دست آمده (جدول ۴) در سازند گرو، میانگین این داده‌ها نشان می‌دهد که مواد آلی موجود در این سازند غالباً در مرحله اوایل تا اواسط پنجره نفتی قرار گرفته‌اند (پیترز و کاسا، ۱۹۹۴).

جدول ۴. معادلسازی انعکاس ویتترینایت ($VR_{0\text{ eq.BR}}\%$) با استفاده از داده‌های انعکاس بیتومن جامد ($BR_0\%$)

No.	Sample name	Distance (m)	BR ₀ %	Eq. Schmidt et al. (2019)
1	J12	2	0.66	0.93
2	G9	25	0.41	0.70
3	G21	61	0.4	0.69
4	G45	133	0.55	0.83
5	G83	209	0.83	1.09
6	G92	233	0.23	0.53
7	G105	272	0.37	0.66
8	G117	296	0.76	1.03
9	G136	334	0.42	0.71
10	G157	376	0.43	0.72
11	G177	416	0.48	0.76
12	G186	433	0.54	0.82
13	G204	453	0.64	0.91
14	G221	470	0.57	0.85
15	G231	481	0.54	0.82

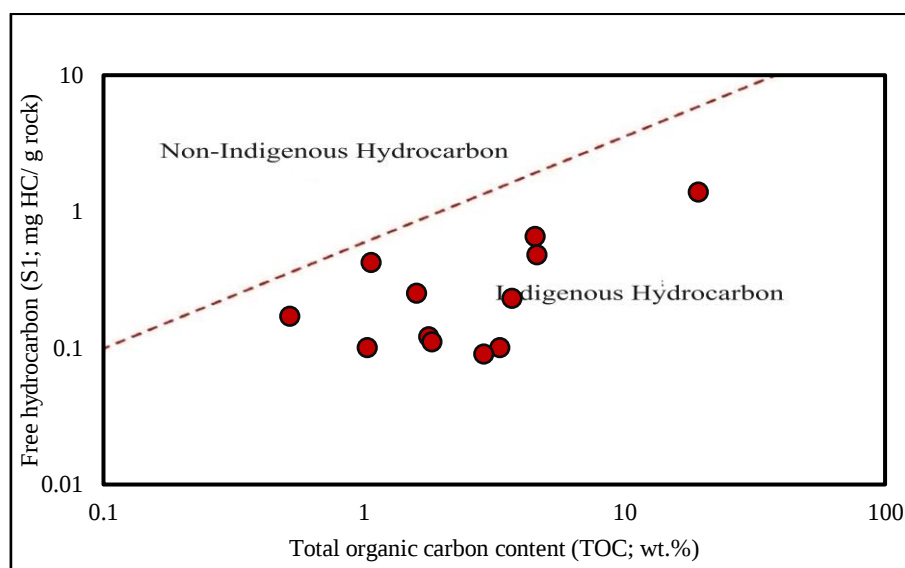
¹ Secondary maceral exsudaite

پیرولیز راک‌ایول

اولین قدم در ارزیابی سنگ منشأ استفاده از دستگاه پیرولیز راک‌ایول است که از طریق آن می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی در مورد نوع ماده آلی، پتانسیل باقی‌مانده نمونه، کل کربن آلی (TOC) و تکامل حرارتی ماده آلی به‌دست آورد، بر این اساس، نمونه‌ها طی دمای برنامه‌ریزی شده به‌صورت تدریجی تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند (اسپیتالی، ۱۹۸۶؛ پیترز، ۱۹۸۶، والپس و ماچیهارا، ۱۹۹۱).

ارزیابی آلودگی یا آغشتگی نمونه‌ها

به‌منظور ارزیابی آلودگی یا آغشتگی احتمالی نمونه‌های سنگ منشأ مطالعه شده، از نمودار S_1/TOC استفاده شده است. در این نمودار نمونه‌های با میزان پارامتر S_1/TOC بالاتر از ۱/۵ نشان‌دهنده حضور مواد هیدروکربنی نابرجا می‌باشند (اسمیت، ۱۹۹۴). تمامی نمونه‌ها با قرارگیری در زیر خط آلودگی نشان‌دهنده برجای بودن مواد آلی در این سازند است (شکل ۸).



شکل ۸. نمودار شاخص مهاجرت جهت تعیین آلودگی نمونه‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز.

کمیت مواد آلی^۱

در دستگاه Rock-Eval IV، مقدار کربن آلی از حاصل جمع کربن پیرولیز (PC)^۲ و کربن باقی‌مانده (RC)^۳ به‌دست می‌آید. مقدار TOC، نمی‌تواند به‌عنوان شاخصی از پتانسیل هیدروکربنی نمونه در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال، گرافیت اساساً از کربن خالص تشکیل شده است اما هیچ هیدروکربنی تولید نمی‌کند، مقدار TOC باید همراه با سایر پارامترها به‌منظور ارزیابی کمی توان هیدروکربن‌زایی ماده آلی موجود در رسوبات مورد استفاده قرار گیرد (والپس، ۲۰۱۳). پارامتر S_1 ، نشان‌دهنده مقدار هیدروکربن‌های آزاد موجود در نمونه می‌باشد که می‌تواند بدون شکسته‌شدن کروژن از سنگ خارج شوند (پیترز و کاسا، ۱۹۹۴). به عبارت دیگر پیک S_1 نشانگر مقدار هیدروکربن‌هایی است

که می‌توانند به‌واسطه حرارت از نمونه آزاد شده و به‌عنوان اولین پیک در پیروگرام^۴ ثبت گردند. این پارامتر با واحد میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ (mg HC/g rock) بیان می‌شود. مقدار هیدروکربن‌های به‌دست آمده از تجزیه حرارتی کروژن، در این پیک نشان داده می‌شود که به‌عنوان مقادیر هیدروکربن‌های آزاد (زایش یافته) از سنگ مولد شناخته می‌شود (پیترز و کاسا، ۱۹۹۴؛ پیترز، ۲۰۰۵). این پارامتر با واحد میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ (mg HC/g rock) بیان می‌شود. در طی بلوغ حرارتی، همزمان با کاهش مقدار S_2 ، مقدار S_1 افزایش می‌یابد. به طور کلی برای تعیین پتانسیل سنگ منشأ، پارامتر S_2 شاخص قابل اطمینان‌تری نسبت به TOC می‌باشد، چراکه TOC دربردارنده کربن مرده^۵ نیز می‌باشد که قادر به تولید

^۴ Pyrogram

^۵ Dead Carbon

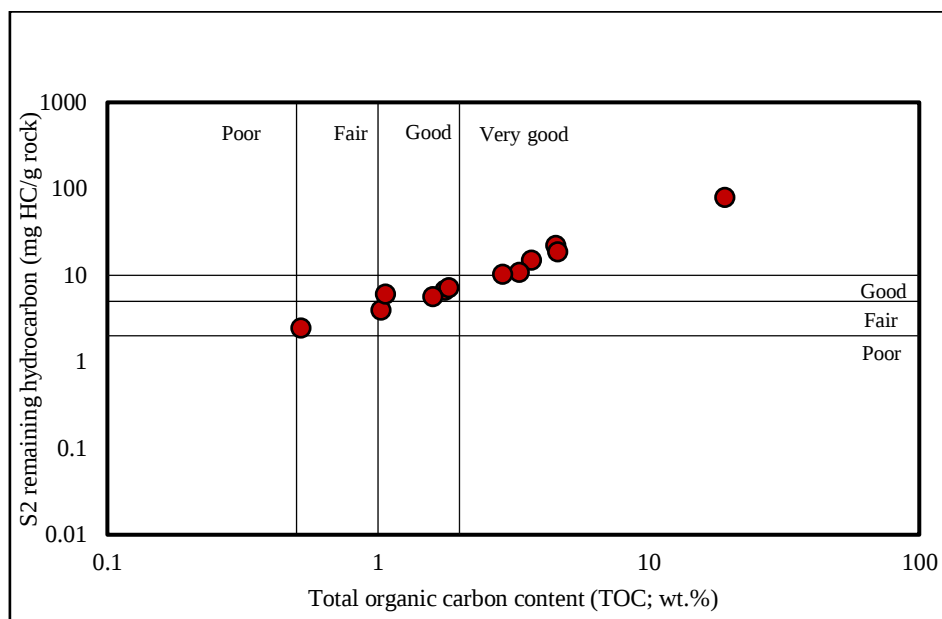
^۱ Quantity of Organic Matter

^۲ Pyrolysis Carbon

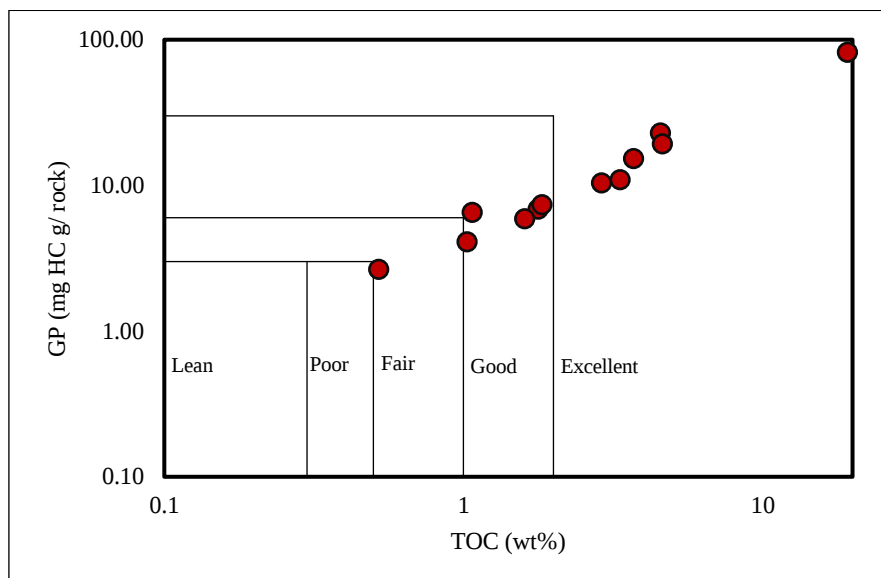
^۳ Residual Carbon

می‌دهند (شکل ۹). در شکل ۱۰ پتانسیل زایش (GP) در برابر TOC نمونه‌های سازند گرو در برش سطح الارضی الیگودرز نشان می‌دهد که نمونه‌ها دارای پتانسیل زایش خوب تا بسیار خوب هستند. لذا در این برش میانگین مقادیر GP محاسبه‌شده از داده‌های برگرفته از راکاپول برابر با ۱۶/۰۵ بوده که نمایان‌گر وجود سنگ مولدی با پتانسیل زایش بسیار خوب می‌باشد (جدول ۲).

نفت نیست. پتانسیل زایش (GP) سنگ منشأ از جمع مقادیر S_1 و S_2 به‌دست می‌آید و برحسب مقادیر آن می‌توان سنگ‌های منشأ را دسته‌بندی کرد (بوردانو، ۱۹۹۳). براساس مقادیر TOC کمیت اغلب نمونه‌ها بازه‌ی خوب و بسیار خوب را نشان می‌دهد، از نظر مقادیر S_2 که هیدروکربن‌های بالقوه را نشان می‌دهد، غالب نمونه‌های سازند گرو در این برش کمیت خوب تا بسیار خوب را نشان



شکل ۹. نمودار S_2 در برابر TOC سازند گرو در برش سطح الارضی الیگودرز



شکل ۱۰. پتانسیل زایش (GP) در برابر TOC، نمونه‌های سازند گرو در برش سطح الارضی الیگودرز

کیفیت مواد آلی^۱

پارامتر S_2/S_3 به عنوان شاخص نوع هیدروکربن (HC TI)^۲ نام گذاری شده و مقدار آن متناسب با مقدار هیدروژن موجود در کروژن می باشد. مقادیر کمتر از ۳ برای این نسبت نشان دهنده تولید گاز و مقادیر بالاتر از ۵ نشانگر تولید نفت از سنگ منشأ هستند (پیترز و کاسا، ۱۹۹۴). سومین پیک که در یک پیروگرام ثبت می شود S_3 (برحسب میلی گرم) است که نماینده مقدار دی اکسید کربنی است که از یک گرم نمونه، با افزایش درجه حرارت تا 390°C ، تولید شده و به وسیله آشکارگر هدایت حرارتی (TCD)^۳ ثبت می شود (پیترز و همکاران، ۲۰۰۵). مقادیر S_3 ، عموماً به اندازه دیگر پارامترهای راک ایول قابل اطمینان نیستند (به دلیل تداخل کانی های کربناتی و یا اکسیداسیون کروژن در طی خرد کردن نمونه). به همین دلیل، در مواردی که مقادیر S_3 دارای اعتبار کافی نباشد، می توان به جای نمودارهای HI در مقابل OI از نمودارهای HI در مقابل $T_{\max}$ استفاده نمود (هانت، ۱۹۹۶). شاخص اکسیژن (OI) در ارتباط با میزان اکسیژن موجود در کروژن بوده و با واحد میلی گرم کربن دی اکسید بر گرم کل کربن آلی (mg $\text{CO}_2/\text{g TOC}$) بیان می شود. شاخص هیدروژن (HI) با واحد میلی گرم هیدروکربن بر گرم کل کربن آلی (mg $\text{HC}/\text{g TOC}$) بیان می شود و نشان دهنده مقدار هیدروژن موجود در ماده آلی می باشد. میانگین مقادیر HI در یک سنگ منشأ به وسیله شیب خط رگرسیون نمودارهای S_2 در برابر TOC قابل تعیین است (لانگفورد و بلنس-والثون، ۱۹۹۰). روندهای کلی پارامتر HI می تواند به عنوان شاخصی از بلوغ حرارتی مورد استفاده قرار گیرند اما باید توجه داشت که هر تغییری در رخساره آلی یا شیمی سنگ منشأ می تواند باعث تغییر در مقادیر HI گردد. لذا هنگام استفاده از روندهای HI برای یک سنگ منشأ، باید توجه داشت که سنگ منشأ مورد مطالعه دارای ویژگی های یکنواخت باشد.

بر اساس مقادیر HI، تمامی نمونه ها در این برش پتانسیل زایش نفت را نشان می دهد. میانگین مقادیر نسبت S_2/S_3 بیشتر از ۵ و نشان دهنده ی کروژن های با پتانسیل نفت زایی است (هلنت، ۱۹۹۶؛ بوردانو، ۱۹۹۳) (جدول ۲). با توجه به نمودار HI در برابر OI و نیز نمودار S_2 در

برابر TOC همه ی نمونه ها در بازه ی کروژن های نوع II با پتانسیل نفت زایی قرار دارند (شکل های ۱۱ و ۱۳). همچنین نمودار $T_{\max}$ در برابر HI نشان می دهد که برخی نمونه ها در محدوده ی کروژن های نوع II و برخی دیگر در محدوده ی کروژن های مخلوط نوع II/III قرار گرفته اند. از آنجا که نمونه ها از رخنمون جمع آوری شده اند اثر هوازدگی موجب شده است برخی کروژن های نوع II در طی پیرولیز راک ایول رفتاری مشابه کروژن های نوع III نشان دهند (شکل ۱۲) (دیمبیک، ۲۰۰۹). شکل ۱۴ نشان می دهد که غالب نمونه ها در محدوده سنگ منشأ با پتانسیل عالی زایش نفت قرار گرفته است.

شاخص پتانسیل سنگ منشأ (SPI)^۴

اولین بار تیسوت و همکاران (۱۹۸۰) شاخص پتانسیل منشأ یا پتانسیل هیدروکربن تجمعی را معرفی کردند، بدین ترتیب این شاخص عبارتست از حداکثر مقادیر هیدروکربن هایی (برحسب تن) که در یک ستون سنگ منشأ با مساحت ۱ متر مربع می توانند زایش یابند. با توجه به مطالعات دیمایسون و هوپزینگا (۱۹۹۱) این شاخص، پتانسیل هیدروکربن تجمعی را اندازه گیری می کند؛ بنابراین لازم به ذکر است که بین ظرفیت زایش نفت و ظرفیت زایش گاز تفکیک ایجاد نکرده و نیز در صورتی که مواد آلی در توالی سنگ منشأ در حین تدفین به طور کامل بالغ شده باشد تمامی هیدروکربن ها انتشار خواهند یافت. بررسی های اسپیتالی و همکاران (۱۹۷۷) نشان می دهد که شاخص پتانسیل منشأ با بازده پتانسیل زایشی (S_1+S_2) حاصل از راک ایول مشخص می شود و غنای سنگ منشأ را به طور نیمه کمی اندازه گیری می کند. علاوه بر این، ضخامت سنگ منشأ به صورت مستقیم بر این شاخص تأثیر می گذارد. در نتیجه این شاخص با محاسبه ی هر دو عامل کیفیت ماده آلی و ضخامت سنگ منشأ امکان سنجش حجم بالقوه ی هیدروکربن های زایش یافته از سنگ منشأ را فراهم می کند. در زیر معادله شاخص پتانسیل سنگ منشأ (SPI) آورده شده است:

$$SPI = (h(S_1 + S_2) \rho) / 1000$$

در این معادله واحد SPI متریک تن بر متر مربع بوده به طوری که ضخامت سنگ منشأ (h) برحسب متر، میانگین

^۳ Thermal Conductivity Detector

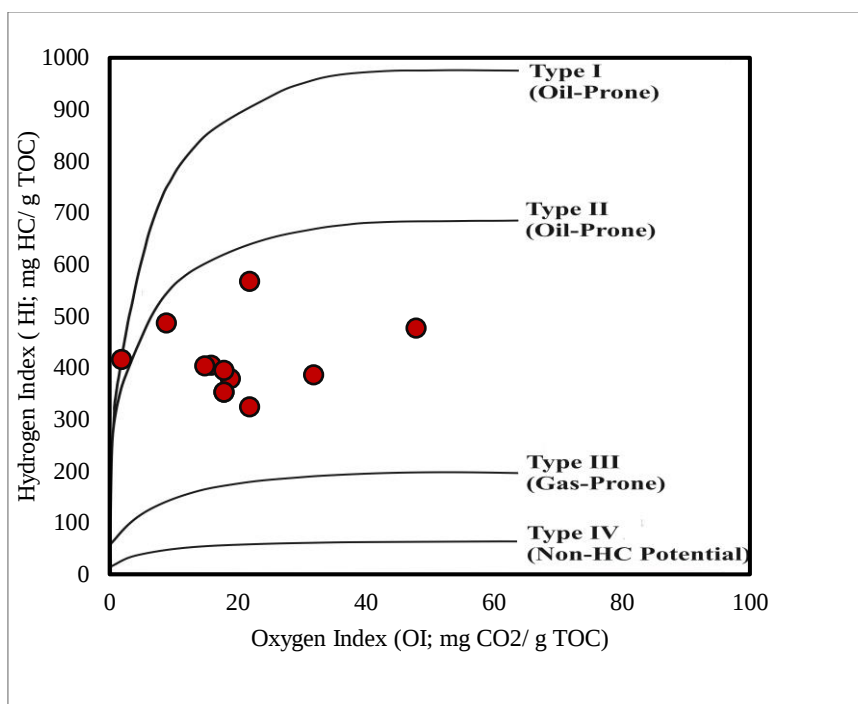
^۴ Source Potential Index

^۱ Quality of Organic Matter

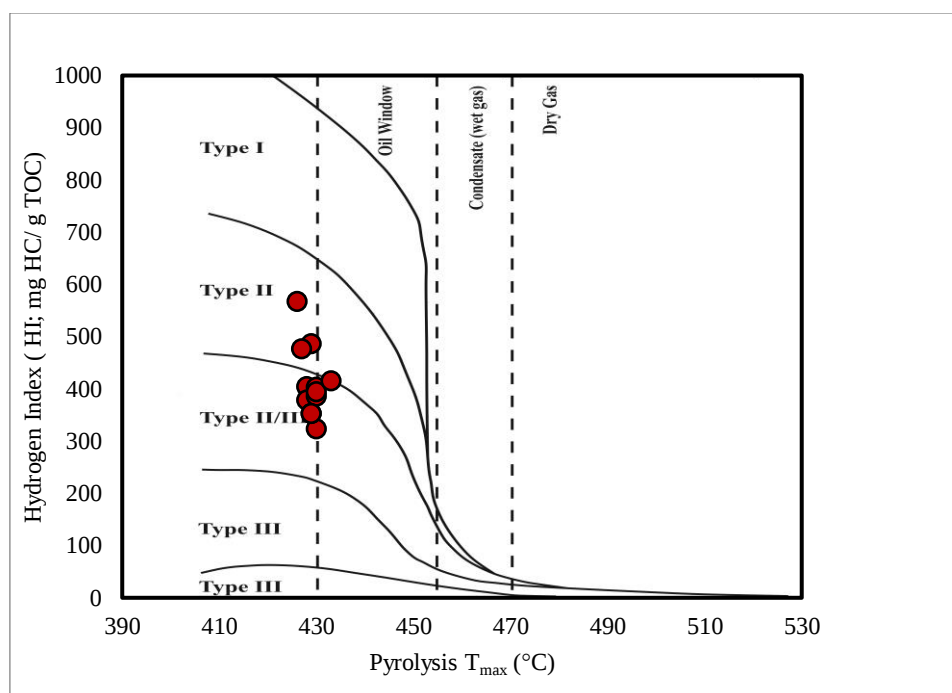
^۲ Hydrocarbon Type Index

استفاده از داده‌های راکایول نمونه‌های جمع‌آوری شده $16/05 \text{ mg HC/gr rock}$ محاسبه گردید. همچنین با توجه به حضور پر رنگ شیل‌ها در لیتولوژی سازند گرو در برش مورد مطالعه، مقدار چگالی $2/5$ در نظر گرفته شد. در نتیجه مقدار SPI محاسبه شده برای این سازند برابر با $19/38 \text{ m ton/m}^2$ بوده که بیانگر شاخص پتانسیل منشأ بالا است (دیمایسون و هوپزینگ، ۱۹۹۱).

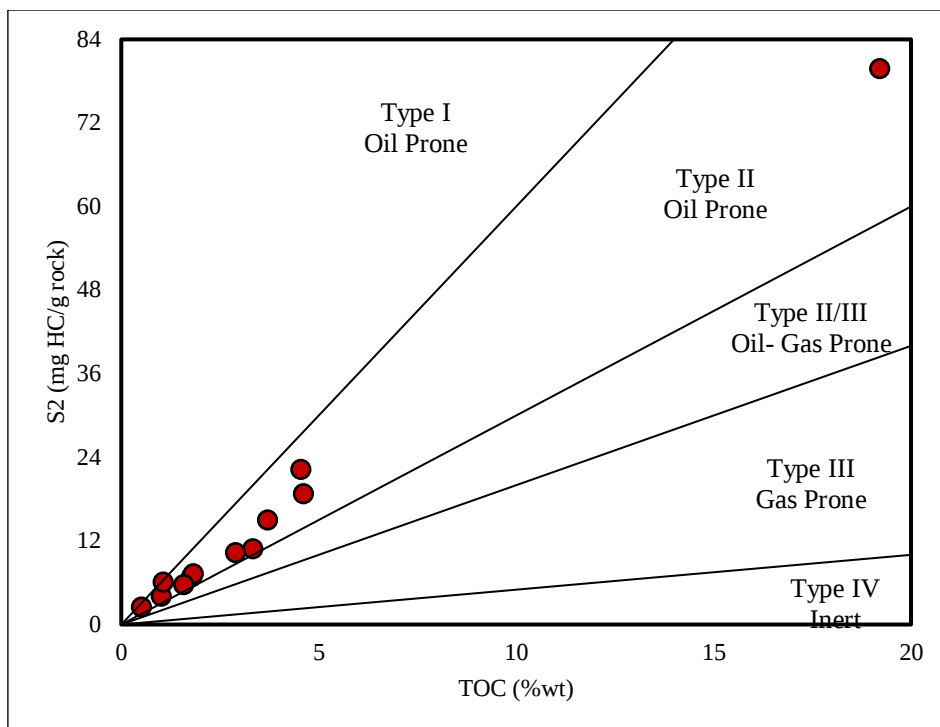
پتانسیل زایش (S_1+S_2) برحسب کیلوگرم هیدروکربن به متریک تن و چگالی سنگ منشأ (ρ) برحسب متریک تن به متر مکعب است. بایستی در نظر داشت که چگالی سنگ‌های ریزدانه $2/5$ فرض می‌گردد (دیمایسون و هوپزینگ، ۱۹۹۱). بنابراین به‌منظور محاسبه SPI (شاخص پتانسیل منشأ)، ضخامت کل سازند 483 متر در نظر گرفته شد و میانگین بازده پتانسیل زایشی سازند (S_1+S_2) با



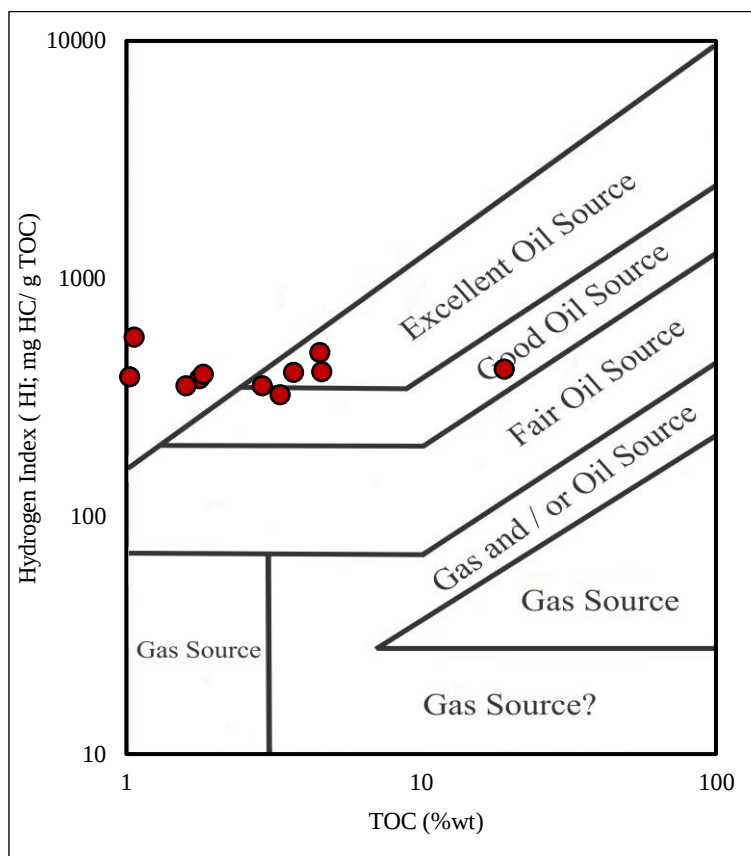
شکل ۱۱. نمودار HI در برابر OI سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز



شکل ۱۲. نمودار HI در برابر T_{max} سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز



شکل ۱۳. نمودار S_2 در برابر TOC سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز



شکل ۱۴. نمودار HI در برابر TOC سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی پتروگرافی آلی و پیرولیز راک ایول VI، نمونه‌های سازند گرو در برش سطح‌الارضی الیگودرز به شرح زیر است:

(۱) بیتومن‌های جامد، همگن بوده و به‌همین دلیل از انعکاس آن‌ها برای معادلسازی انعکاس ویتترینایت استفاده شد.

(۲) ماسرال‌های شناسایی شده در نور عبوری شامل گروه مواد آلی آمورف و در نور انعکاسی معادل بیتومینایت هستند، همچنین فلورسانس تمامی ماسرال‌ها کم بوده که نشان‌دهنده عمدتاً کروژن نوع II است.

(۳) شاخص دگرسایبی حرارتی (TAI) بین 3^- تا 3^+ بوده و معادل انعکاس ویتترینایت ($VR_{0\ eq.BR}\%$) آن در نمودار پیرسون ۰/۹٪ است که مراحل اوایل تا اواسط کاتائز را نشان می‌دهد.

(۴) مقادیر انعکاس ویتترینایت معادل ($VR_{0\ eq.BR}\%$) که از معادله اشمیت و همکاران در سال ۲۰۱۹ به‌دست آمده، غالباً مراحل اوایل تا اواسط کاتائز را برای نمونه‌های سازند گرو تأیید می‌کنند.

(۵) با ترسیم نمودار S_2 در برابر TOC، برای نمونه‌های سازند گرو در این برش، گستره خوب تا بسیار خوب از نظر کمیت مواد آلی ارزیابی شد. پتانسیل زایش (GP) در برابر TOC این نمونه‌ها بیانگر این است که نمونه‌ها دارای پتانسیل زایش خوب تا بسیار خوب هستند.

(۶) میانگین مقادیر نسبت S_2/S_3 برای نمونه‌ها بیشتر از ۵ بوده که نشان‌دهنده کروژن‌های با پتانسیل نفت‌زایی است. با توجه به نمودار HI در برابر OI و نیز نمودار S_2 در برابر TOC همه‌ی نمونه‌ها در بازه‌ی کروژن‌های نوع II با پتانسیل نفت‌زایی قرار می‌گیرند. پلات HI در برابر TOC بیانگر این است که غالب نمونه‌ها در محدوده سنگ منشأ با پتانسیل عالی زایش نفت است.

(۷) مقدار پتانسیل زایش منشأ (SPI) برای این سازند در برش مورد مطالعه $19/38\ m\ ton/m^2$ محاسبه شد که بیانگر شاخص پتانسیل منشأ بالا است.

منابع

خانی، ب (۱۳۹۳) ارزیابی ژئوشیمیایی و مدلسازی سیستم هیدروکربنی در رسوبات ژوراسیک میانی و کرتاسه زیرین

ناحیه لرستان از دیدگاه ذخایر هیدروکربنی غیرمتعارف، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ۳۸۵ ص.
ذوالفقاری، ز، فروغی، ف، قاسمی‌نژاد، ا، یزدی‌مقدم، م (۱۳۹۵) زیست‌چینه‌نگاری و محیط‌رسوبی سازند گرو در چاه A، لرستان مرکزی، شمال غرب زاگرس. دوفصلنامه رخساره‌های رسوبی، شماره ۱، سال نهم، ص ۹۱-۱۰۶.

عظام‌پناه، ی، صادقی، ع، آدابی، م، جمالی، ا (۱۳۹۱) بایوستراتیگرافی سازند گرو در برش تحت‌الارضی چاه نفت، جنوب کرمانشاه. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی (مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان)، شماره ۲، سال بیست و هشتم، ص ۶۹-۸۲.

رستگارکلاته، ا (۱۳۹۵) ارزیابی پتروگرافی-ژئوشیمی آلی پتانسیل تولید حوضه لرستان به‌عنوان شیل‌گازی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۵۲ ص.

شبرنگ، س، ده‌یادگاری، ا، آدابی، م (۱۴۰۰) ارزیابی محیط رسوبی و ژئوشیمی رسوبی سازند گرو در برش الیگودرز، لرستان. ششمین کنفرانس ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، ص ۳۰۴-۳۱۰.

قلندری گشتی، پ (۱۳۹۷) چینه‌نگاری و ژئوشیمی آلی بازه فلهیان/گرو در یکی از میادین نفتی دشت آبادان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه دامغان، ۱۵۰ ص.

کمالی، م، سلگی، ع (۱۳۹۴) ارزیابی ژئوشیمیایی سازند گرو در طاق‌دیس‌های انجیر و کبیرکوه در جنوب غرب ناحیه لرستان. پژوهش نفت، شماره ۲-۸۵، سال بیست و پنجم، ص ۱۴۵-۱۵۹.

مطیعی، ه (۱۳۷۴) زمین‌شناسی نفت زاگرس، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، جلد ۱، ۵۸۹ ص.
مطیعی، ه (۱۳۷۴) زمین‌شناسی نفت زاگرس، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، جلد ۲، ۵۰۰ ص.
مطیعی، ه (۱۳۸۲) زمین‌شناسی ایران (چینه‌شناسی زاگرس)، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ ص.

موری، ش، مغفوری‌مقدم، ا، رفیعی، ب، صداقت‌نیا، م (۱۳۹۸) ارزیابی ژئوشیمی آلی نهشته‌های سازند گرو با استفاده از داده‌های حاصل از پیرولیز راک-اول در مناطق باختر خرم‌آباد و شمال باختر کرمانشاه. دوفصلنامه رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۱۳، سال هفتم، ص ۹۴-۱۰۱.

یوسفی، م، نظری بدیع، ا (۱۳۹۴) ارزیابی خصوصیات ژئوشیمیایی مواد آلی سازند گرو (کرتاسه پیشین) در جنوب لرستان. دوفصلنامه رسوب‌شناسی کاربردی، شماره ۵، سال سوم، ص ۱-۱۱.

- C., Flores, D., Gentzis, T., Gonçalves, P.A. and Mendonça Filho, J.G (2015) Standardization of reflectance measurements in dispersed organic matter: Results of an exercise to improve interlaboratory agreement. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 22-34.
- Hackley, P. C. and Cardott, B. J (2016) Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review. *International Journal of Coal Geology*, 163: 8-51.
- Hutton, A., Bharati, S. and Robl, T (1994) Chemical and petrographic classification of kerogen/macerals. *Energy & Fuels*, 8: 1478-1488.
- Hunt, J. M (1996) *Petroleum geochemistry and geology*, New York, Freeman and Company.
- Jacob, H (1989) Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen"). *International Journal of coal geology*, 11: 65-79.
- Landis, C. R. and Castaño, J. R (1995) Maturation and bulk chemical properties of a suite of solid hydrocarbons. *Organic Geochemistry*, 22: 137-149.
- Langford, F. F. and Blanc-Valleron, M. M (1990) Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolyzable hydrocarbons vs. total organic carbon. *AAPG bulletin*, 74: 799-804.
- Lohr, C. D. and Hackley, P. C (2021) Relating T_{max} and hydrogen index to vitrinite and solid bitumen reflectance in hydrous pyrolysis residues: Comparisons to natural thermal indices. *International Journal of Coal Geology*, 242: 103768.
- Mastalerz, M., Drobniak, A., Stankiewicz, A. B (2018) Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review. *Int. J. Coal Geol*, 195: 14-36.
- Peters, K. E. and Cassa, M. R (1994) *Applied source rock geochemistry: Chapter 5: Part II. Essential elements*. AAPG, Special Publication, 11: 116-123.
- Peters, K. E (1986) Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG bulletin*, 70: 318-329.
- Peters, K. E., Peters, K. E., Walters, C. C. and Moldowan, J. M (2005) *The biomarker guide* (Vol. 1). Cambridge university press.
- Pearson, D. L (1990) Pollen/spore color "standard". 2nd Printing of Version 2. Phillips Petroleum Company.
- Riediger, C. L (1993) Solid bitumen reflectance and Rock-Eval T_{max} as maturation indices: an example from the "Nordegg Member", Western Canada Sedimentary Basin. *International Journal of Coal Geology*, 22: 295-315.
- Rost, F. W (1995) *Fluorescence microscopy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Rahman, M. and Kinghorn, R. R. F (1995) A practical classification of kerogens related to Bertrand, R (1993) Standardization of solid bitumen reflectance to vitrinite in some Paleozoic sequences of Canada. *Energy Sources*, 15: 269-287.
- Bertrand, R. and Malo, M (2012) Dispersed organic matter reflectance and thermal maturation in four hydrocarbon exploration wells in the Hudson Bay Basin: regional implications. Geological Survey of Canada.
- Bordenave, M. L. and Burwood, R (1990) Source rock distribution and maturation in the Zagros orogenic belt: provenance of the Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations. *Organic Geochemistry*, 16: 369-387.
- Behar, F., Beaumont, V. and Penteado, H. D. B (2001) Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*, 56: 111-134.
- Bordenave, M. L (1993) The sedimentation of organic matter. *Applied Petroleum Geochemistry*. Paris: Éditions Technip, 15-76.
- Colmenero, J. R., Suárez-Ruiz, I., Fernández-Suárez, J., Barba, P. and Llorens, T (2008) Genesis and rank distribution of Upper Carboniferous coal basins in the Cantabrian Mountains, Northern Spain. *International Journal of Coal Geology*, 76: 187-204.
- Cook, A., Hutton, A., and Sherwood, N (1981) Classification of oil shales, bull. Cent. Rech. Exploration-Production Elf-Aquitaine, 5: 353-81.
- Cook, A. C. and Sherwood, N. R (1991) Classification of oil shales, coals and other organic-rich rocks. *Organic Geochemistry*, 17: 211-222.
- Dow, W. G (1977) Kerogen studies and geological interpretations. *Journal of geochemical exploration*, 7: 79-99.
- Dow, W. G. and O'Connor, D. I (1982) Kerogen maturity and type by reflected light microscopy applied to petroleum exploration.
- Demaison, G. and Huizinga, B. J (1991) Genetic classification of petroleum systems. *AAPG bulletin*, 75: 1626-1643.
- Dembicki, Jr. H (2009) Three common source rock evaluation errors made by geologists during prospect or play appraisals. *AAPG bulletin*, 93: 341-356.
- Espitalie, J., Laporte, J. L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., Paulet, J. and Boutefeu, A (1977) Rapid method for source rock characterization, and for determination of their petroleum potential and degree of evolution. *Oil and Gas Science and Technology Revue*, 32: 23-42.
- Espitalié, J (1986). Use of T_{max} as a maturation index for different types of organic matter. Comparison with vitrinite reflectance. Editions Technip.
- Hackley, P. C., Araujo, C. V., Borrego, A. G., Bouzinos, A., Cardott, B. J., Cook, A. C., Eble,

- Tyson, R. V (1993) Palynofacies analysis. In *Applied micropalaeontology*, Netherlands, Springer, 3-191.
- Tyson, R. V (1995b) Abundance of organic matter in sediments: TOC, hydrodynamic equivalence, dilution and flux effects. In *Sedimentary organic matter*, Berlin, Springer, 81-118.
- Traverse (1994) *Sedimentation of organic particles*: Cambridge, Cambridge University Press, 547p.
- Tissot, B., Demaison, G., Masson, P., Delteil, J. R. and Combaz, A (1980) Paleoenvironment and petroleum potential of middle Cretaceous black shales in Atlantic basins. *AAPG Bulletin*, 64: 2051-2063.
- Wang, Y., Wang, Z., Zhao, C., Wang, H., Liu, J., Lu, J. and Liu, D (2007) Kinetics of hydrocarbon gas generation from marine kerogen and oil: implications for the origin of natural gases in the Hetianhe gasfield, Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Geology*, 30: 339-356.
- Waples, D. W (2013) *Geochemistry in petroleum exploration*. Springer Science and Business Media.
- Waples, D. W., Machihara, T (1991) Biomarkers for geologists – a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, Methods in Exploration*, 91 p.
- Wei, L., Wang, Y. and Mastalerz, M (2016) Comparative optical properties of macerals and statistical evaluation of mis-identification of vitrinite and solid bitumen from early mature Middle Devonian–Lower Mississippian New Albany Shale: Implications for thermal maturity assessment. *International Journal of Coal Geology*, 168: 222-236.
- hydrocarbon generation. *Journal of Petroleum Geology*, 18: 91-102.
- Schmidt, J. S., Menezes, T. R., Souza, I. V. A. F., Spigolon, A. L. D., Pestilho, A. L. S. and Coutinho, L. F. C (2019) Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation. *International Journal of Coal Geology*, 201: 44-50.
- Shekarifard, A. Daryabandeh, M. Rashidi, M. Hajian, M. Röth, J (2019) Petroleum geochemical properties of the oil shales from the Early Cretaceous Garau Formation, Qalikuh locality, Zagros Mountains, Iran. *International Journal of Coal Geology*, 206: 1-18.
- Stach, E (1982) *Stach's Textbook of Coal Petrology*, Gebruder Borntraeger (Berlin-Stuttgart).
- Sýkorová, I., Pickel, W., Christanis, K., Wolf, M., Taylor, G. H. and Flores, D (2005) Classification of huminite—ICCP System 1994. *International Journal of Coal Geology*, 62: 85-106.
- Stocklin, J (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52: 1229-1258.
- Sepehr, M., and J. W. Cosgrove (2004) Structural framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran: *Marine and Petroleum Geology*, 21: 829-843.
- Smith, J. T (1994) *Petroleum System Logic as an Exploration Tool in a Frontier Setting: Chapter 2: Part I. Introduction*.
- Taylor, G. H., Teichmüller, M., Davis, A. C. F. K., Diessel, C. F. K., Littke, R. and Robert, P (1998) *Organic petrology*.
- Teichmüller (1974) M. Teichmüller. Über neue Macerale der Liptinit-Gruppe und die Entstehung von Micrinit. *Fortschr. Geology Rheind. Westf.*, 24: 37- 64.
- Teichmüller, M (1982) Fluoreszenzmikroskopische Änderungen von Liptiniten und Vitriniten mit zunehmendem Inkohlungsgrad und ihre Beziehungen zu Bitumenbildung und Verkokungsverhalten, *Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen*, 119p.
- Teichmüller, M. and Teichmüller, R (1982) The geological basis of coal formation. *Stach's textbook of coal petrology*, 3:5-86.
- Teichmüller, M. and Wolf, M (1977) Application of fluorescence microscopy in coal petrology and oil exploration. *Journal of Microscopy*, 109: 49-73.
- Tissot, B. P. and Welte, D. H (1984) From kerogen to petroleum. In *Petroleum formation and occurrence*, New York, Springer, 160-198.
- Tissot, B. P. and Welte, D. H (2013) *Petroleum formation and occurrence*, Berlin, Springer Science and Business Media.