



ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در میدان فروزان

صادق براتی بلداجی (نویسنده مسئول)^۱، ابراهیم سفیداری^۲، هوشنگ مهربانی^۳، سید محمد زمانزاده^۴، علی چهارزی^۵

^۱ مربی پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران Baratiboldaji.s@gmail.com

^۲ استادیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران Ebispidari@gmail.com

^۳ مربی پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران Houshangmehrabi@gmail.com

^۴ دانشیار دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، تهران Smzamanzadeh@gmail.com

^۵ شرکت نفت فلات قاره ایران، تهران A.chehrazi@iooc.co.ir

چکیده

در این مطالعه ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادرهای مستعد در میدان فروزان بر اساس آنالیزهای ژئوشیمیایی پیرولیز راکااول و انعکاس ویتروینایت انجام گرفته است. برای این منظور ۶۷ نمونه خرده حفاری جهت پیرولیز راکااول و ۷ نمونه جهت آنالیز انعکاس ویتروینایت از سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در یکی از چاه‌های میدان فروزان، به منظور تعیین کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر استفاده شده است. نتایج نشان داد که سازندهای مورد مطالعه، میزان مواد آلی در محدوده متوسط را دارا می‌باشند. مواد آلی موجود در سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی در محدوده تلفیق کروژن تیپ III و IV می‌باشند که در اواخر بلوغ قرار دارند. همچنین، مواد آلی سازند فراقان بیشتر از کروژن تیپ III تشکیل شده که از نظر بلوغ حرارتی در محدوده تولید گاز قرار گرفته است. بنابراین می‌توان اظهار کرد که سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان مستعد سنگ مادر مناسب در میدان فروزان به حساب نمی‌آیند.

واژه‌های کلیدی

پیرولیز راکااول، انعکاس ویتروینایت، میدان فروزان، سنگ مادر، بلندای خفجی-نوروز



۱. مقدمه

از آنجایی که صنعت وابسته به منابع هیدروکربنی است، همیشه تلاش شده تا با استفاده از روش‌های نو به اکتشاف و بهره‌برداری از منابع و ذخایر جدید پرداخته و این نیاز صنعت تامین شود. ژئوشیمی یک علم بنیادی و کاربردی است که در اکتشاف و تولید هیدروکربن برای بالا بردن بهره‌وری بکار گرفته می‌شود [1]. از اولین اقدامات ضروری برای کارهای اکتشافی می‌توان به شناسایی سنگ مادر مولد هیدروکربن در یک سیستم نفتی اشاره نمود. درک این موضوع باعث می‌شود که حفاری در نواحی دارای پتانسیل هیدروکربن انجام شود و از هدر رفتن سرمایه جلوگیری می‌کند [2]. سنگ مادر سنگ دانه ریزی است که باید وسعت، ضخامت و پختگی لازم را داشته باشد [3] تا بتواند مواد آلی را حفظ و پس از طی فرآیندهای دیاژنز، کاتاژنز، متاژنز و بلوغ حرارتی، هیدروکربن تولید نماید. با استفاده از ارزیابی سنگ مادر می‌توان به کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی موجود در سنگ مادر پی برد. از مهم‌ترین روش‌هایی که برای ارزیابی سازند و بخصوص سنگ مادر وجود دارد، روش پیرولیز راکاویل می‌باشد [4].

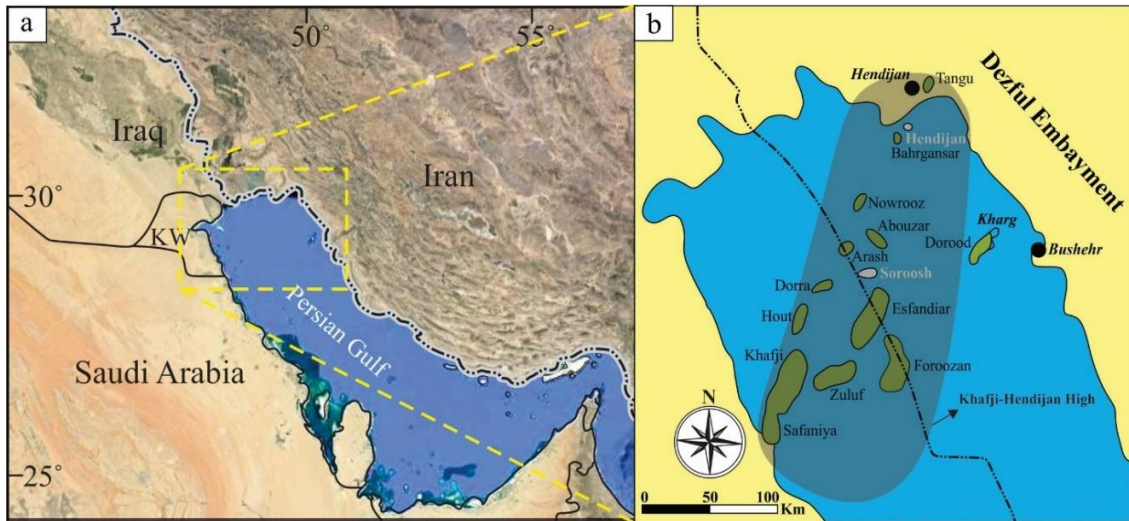
از حوضه خلیج فارس می‌توان به‌عنوان یکی از غنی‌ترین حوضه‌های هیدروکربنی جهان که در خاورمیانه قرار دارد یاد کرد [5]. همچنین مقدار ذخیره قابل استحصال هیدروکربن در شمال غرب خلیج فارس و جنوب غرب ایران که دارای ذخایر غنی از هیدروکربن می‌باشند تا سال ۲۰۱۰، شامل ۱۳۷/۶ میلیارد بشکه نفت و ۱۰۴۵ تریلیون فوت مکعب گاز است [6]. وجود سنگ‌های مادر یا لایه‌های رسوبی تکرار شده و دارای مقدار کافی ماده آلی، وجود مخازن پایدار با جنس کربناته، پوش سنگ‌های منطقه‌ای مناسب، تله‌های تاکدیدیسی بزرگ و رسوبگذاری دنباله‌دار از جمله عواملی هستند که این ناحیه را به یک نقطه مهمی برای تجمع انواع هیدروکربن تبدیل کرده است [7, 8, 9].

هدف از این مطالعه، بررسی توان هیدروکربن‌زایی سنگ‌های مادر احتمالی با استفاده از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی پیرولیز راکاویل و مقادیر انعکاس ویترونیات سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در میدان فروزان در شمال غرب خلیج فارس می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند به بررسی و تحلیل سیستم‌های نفتی و مدلسازی آنها در شمال غرب خلیج فارس که بدلیل عمق بالای سازندها، نمونه‌ها دارای محدودیت می‌باشند، کمک نماید.

۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان فروزان در بخش دور از ساحل خلیج فارس در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جزیره خارک در مرز ایران و عربستان سعودی قرار دارد. بخش عربی این میدان به اسم میدان مرجان نامیده می‌شود. این میدان در بخش شمال شرقی تاقدیس خیلی بزرگ گنبد نمکی در امتداد مرز ایران و عربستان قرار گرفته است (شکل ۱).

این میدان همراه با بخش عربی آن (میدان مرجان) بخشی از یک ساختار بزرگتر هستند که در امتداد بزرگترین روند تولید کننده نفت جهان قرار دارند. این روند شامل میدانی هنديجان، نوروز، سروش، زلوف (Zuluf)، خفجی (Khafji) و سفانیه (Safaniya) می‌باشد که بالغ بر ۵۰ میلیارد بشکه ذخیره هیدروکربن دارد [10]. مهم‌ترین مخزن اکثر این میدانی، ماسه سنگ‌های دلتایی تا دریای کم عمق با سن کرتاسه زیرین تا میانی است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت مکانی میدان فروزان واقع در شمال غرب خلیج فارس.

میدان فروزان و میدادین اطراف آن نتیجه برهمکنش رژیم‌های تکتونیکی فشاری زاگرس و عمان می‌باشند. در طول پرکامبرین تا کرتاسه پسین منطقه مورد مطالعه یکی از مناطق تکتونیکی فعال و دارای گسل‌های چرخشی بوده است. همگرایی صفحات در دوره پرکامبرین و کرتاسه فوقانی جهت استرس‌های افقی اصلی را کنترل کرده و در این زمان‌ها گسل‌های چرخشی نیز شکل گرفته است. جهت فعلی تنش افقی اصلی غالب در منطقه در جهت شرقی-غربی است که به‌عنوان تنش عمان شناخته می‌شود و مسئول تشکیل کوه عمان در اواخر کرتاسه بود [11]. تداوم این رژیم تنشی در بخش عربی صفحه منجر به ایجاد چین‌ها و بالاآمدگی‌های گسترده با جهت شمالی-جنوبی در ناحیه گردیده است. در مقابل، تغییر شکل‌ها در ناحیه زاگرس در ارتباط با بسته شدن اقیانوس نفوتیس (میوسن تا زمان حال) دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی است.

مطالعات مخزنی و حفاری‌های جدید نشان داده است که بخش‌های ماسه سنگی آسماری، بخش کربناته سازند سروک، ماسه‌های ضخیم بخش بورگان A و B از سازند کژدمی و کربناته‌های داریان، فهلیان و سورمه می‌توانند به‌عنوان سنگ مخزن در میدان فروزان عمل کنند [5]. از طرف دیگر سازندهای نیریز، بخش بالایی سازند فهلیان، سازند گدوان، سازند داریان، بخش شیلی سازند کژدمی، سازند سروک، سازند گورپی، سازند دشتک، سازند کنگان، سازند دالان پایینی و سازند فراقان می‌توانند به‌عنوان سنگ مادر احتمالی (بالقوه) برای مخازن این میدان عمل کنند.

۳. روش کار

همانطور که گفته شد، ساده‌ترین و در عین حال سریع‌ترین راه برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند، استفاده از روش پیرولیز راکاویل می‌باشد [12]. این روش را برای دستیابی به پتانسیل هیدروکربن (کمیت)، نوع ماده آلی (کیفیت) و میزان بلوغ مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر فعال احتمالی و همچنین بررسی توان هیدروکربن‌زایی در یک حوضه رسوبی بکار برده‌اند [13]. پیرولیز راکاویل یک روش حرارتی می‌باشد که حدود ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه سنگ مادر در یک برنامه دمایی خاص و معین به صورت حرارت دادن ماده آلی در نبود اکسیژن انجام می‌گیرد [4]. پیرولیز در اصل مشابه تولید طبیعی هیدروکربن در طی مرحله کاتائز در طبیعت می‌باشد [14]. در طی این آنالیز پیک‌های شاخص در درجه حرارت‌های مختلف بدست می‌آیند. پیک S1 شامل مقادیر هیدروکربن آزاد شده‌ای می‌باشد که در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد بخار می‌شود (برحسب میلی‌گرم هیدروکربن به گرم سنگ)، پیک S2 بیانگر مقادیر هیدروکربن و ترکیبات حاوی اکسیژن که در محدوده دمای ۳۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد بر اثر شکست حرارتی کروژن و ترکیبات سنگین‌تری همانند رزین و آسفالتین آزاد می‌گردد (برحسب میلی‌گرم هیدروکربن به گرم سنگ)، پیک S3 که نشان دهنده ترکیبات اکسیژن‌دار که در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد تجزیه شده و به شکل گاز CO₂ آزاد شده که به صورت پیک S3 و در واحد میلی‌گرم CO₂ در هر گرم سنگ بیان می‌شود، Tmax که بیانگر میزان دمایی که پیک S2 در بالاترین مقدار قرار دارد (بر حسب درجه سانتیگراد) و مقادیر TOC (Total



Organic Carbon, بر حسب درصد وزنی) می‌باشد. با استفاده از این مقادیر می‌توان پتانسیل هیدروکربن‌زایی (Petroleum Potential:)
 اندیس تولید (Production Index: $PI=S1/(S1+S2)$), اندیس اکسیژن (Oxygen Index: $OI=100*S3/TOC$) و
 اندیس هیدروژن (Hydrogen Index: $HI=100*S2/TOC$) را محاسبه کرد [15, 16, 17, 18].

کلیه مطالعات این پژوهش توسط دستگاه پیرولیز راکاویل VI صورت گرفته است که بدین منظور تعداد ۶۷ نمونه خرده حفاری از
 سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در میدان فروزان واقع در شمال غرب خلیج فارس جهت بررسی وضعیت محتوای ماده
 آلی، تعیین تیپ کروژن و همچنین میزان بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در سازندهای مذکور برای بررسی و تعیین سنگ مادرهای
 احتمالی و توان هیدروکربن‌زایی این سازندها استفاده شده است که مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج پیرولیز راکاویل نمونه‌های میدان فروزان.

Formation	Sample	Depth(m)	TOC(%)	S1	S2	S3	HI	OI	Tmax	PI	PP	S1/TOC	
Dashtak	RE-1983	4225-6	1.09	0.56	1.07	1.52	98	139	407	0.34	1.63	0.51	
	RE-1984	4236-7	0.59	0.24	0.47	0.52	80	88	420	0.34	0.71	0.41	
	RE-1985	4240-1	1.17	0.47	1.05	1.63	90	139	385	0.31	1.52	0.40	
	RE-1986	4243-4	1.23	0.88	0.98	1.64	80	133	389	0.47	1.86	0.72	
	RE-1987	4246-7	0.85	0.47	0.68	1.37	80	161	404	0.41	1.15	0.55	
	RE-1988	4249-50	0.69	0.43	0.87	1.06	126	154	407	0.33	1.30	0.62	
	RE-1989	4258-9	1.10	0.43	0.98	1.38	89	125	409	0.30	1.41	0.39	
	RE-1990	4265-6	1.14	0.56	0.69	1.40	61	123	404	0.45	1.25	0.49	
	RE-1991	4270-1	0.48	0.23	0.36	0.76	75	158	397	0.39	0.59	0.48	
	RE-1992	4275-6	0.63	0.52	0.56	0.72	89	114	401	0.48	1.08	0.83	
	RE-1993	4279-80	0.79	0.65	0.69	1.06	87	134	416	0.49	1.34	0.82	
	Max			1.23	0.88	1.07	1.64	126	161	420	0.49	1.86	0.83
	Ave	-		0.89	0.49	0.76	1.19	87	133	404	0.39	1.26	0.57
	Min			0.48	0.23	0.36	0.52	61	88	385	0.30	0.59	0.39
Kangan	RE-1996	4526-7	0.71	0.67	0.71	0.52	100	73	376	0.49	1.38	0.94	
	RE-1999	4553-4	0.70	0.56	0.79	0.63	113	90	385	0.41	1.35	0.80	
	RE-2000	4561-2	0.88	0.56	0.84	0.96	95	109	418	0.40	1.40	0.64	
	RE-2002	4569-70	1.03	0.46	0.69	0.96	67	93	395	0.40	1.15	0.45	
	Max			1.03	0.67	0.84	0.96	113	109	418	0.49	1.40	0.94
	Ave	-		0.83	0.56	0.76	0.77	94	91	394	0.43	1.32	0.71
Min			0.70	0.46	0.69	0.52	67	73	376	0.40	1.15	0.45	
L.Dalan	RE-2003	5121-2	0.70	0.27	0.52	0.86	74	123	393	0.34	0.79	0.39	
	RE-2004	5123-4	1.22	0.95	1.76	1.81	144	148	383	0.35	2.71	0.78	
	RE-2005	5126-7	1.34	1.25	1.48	1.61	110	120	380	0.46	2.73	0.93	
	Max			1.34	1.25	1.76	1.81	144	148	393	0.46	2.73	0.93
	Ave	-		1.09	0.82	1.25	1.42	109	130	385	0.38	2.08	0.70
Min			0.70	0.27	0.52	0.86	74	120	380	0.34	0.79	0.39	
Faraghu	RE-2006	5161-2	1.19	0.82	1.23	2.34	103	197	383	0.40	2.05	0.69	
	RE-2008	5174-5	0.83	0.37	0.97	1.08	117	130	378	0.28	1.34	0.45	
	RE-2010	5183-4	0.87	1.11	2.25	1.06	259	122	394	0.33	3.36	1.28	
	RE-2011	5195-6	0.69	0.88	1.17	0.97	170	141	383	0.43	2.05	1.28	
	RE-2021	5251-2	0.56	0.42	1.24	0.75	221	134	378	0.25	1.66	0.75	
	RE-2032	5297-8	0.78	1.01	1.61	0.82	206	105	382	0.39	2.62	1.29	
	RE-2034	5301-02	0.58	0.68	0.85	0.43	147	74	380	0.44	1.53	1.17	
	RE-2035	5305-06	0.54	0.68	0.82	0.58	152	107	371	0.45	1.50	1.26	
	RE-2036	5311-12	0.70	0.56	0.99	0.65	141	93	378	0.36	1.55	0.80	
	RE-2040	5316-7	0.56	0.78	1.38	0.73	246	130	380	0.36	2.16	1.39	
	RE-2047	5347-8	0.62	0.69	1.14	0.74	184	119	378	0.38	1.83	1.11	
	RE-2048	5349-50	0.65	0.60	1.25	0.61	192	94	378	0.32	1.85	0.92	
	Max			1.19	1.11	2.25	2.34	259	197	394	0.45	3.36	1.39
	Ave	-		0.71	0.72	1.24	0.90	178	121	380	0.37	1.96	1.03
Min			0.54	0.37	0.82	0.43	103	74	371	0.25	1.34	0.45	



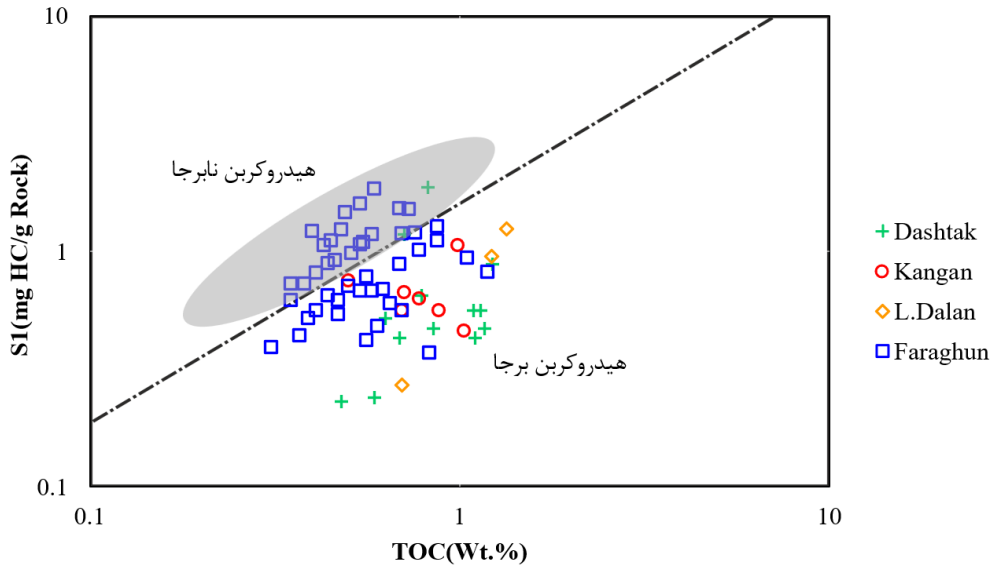
انعکاس ویتربینایت به عنوان تکنیکی رایج در ارزیابی بلوغ حرارتی انعکاس مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر می‌باشد [19]. مقادیر انعکاس ویتربینایت با زیاد شدن عمق بطور پیوسته افزایش پیدا می‌کنند [20]. از روش استاندارد ASTM برای اندازه‌گیری این مقادیر استفاده می‌شود. اندازه‌گیری در این روش با نور غیر قطبی است. در ابتدا روغن غوطه‌ور کننده را بر روی نمونه می‌ریزیم و نمونه را روی صفحه میکروسکوپ قرار داده و با گذشت مدت زمان ۳۰ دقیقه از این عمل، نمونه را برداشته و روغن را تمیز کرده و مقدار انعکاس نمونه اندازه‌گیری می‌شود. این روش تا انجام ۲۰ تا ۳۰ اندازه‌گیری ادامه پیدا می‌کند [21, 22]. برای این کار تعداد ۷ نمونه خرده حفاری از سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در یکی از چاه‌های میدان فروزان جهت بررسی و مطالعه ضرایب انعکاس ویتربینایت انتخاب شده است. نتایج این اندازه‌گیری‌ها بر اساس مقدار میانگین در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

جدول ۲. مقادیر میانگین انعکاس ویتربینایت اندازه‌گیری شده بر روی سنگ مادرهای احتمالی در میدان فروزان.

Formation	Depth(m)	Ro(%)
Dashtak	4225.5	1.10
	4265.5	1.06
Kangan	4569.5	0.86
L.Dalan	5123.5	1.11
	5161.5	1.55
Faraghun	5296.5	1.75
	5347.5	1.92

۴. بحث

آلودگی نمونه‌های مورد مطالعه، نتایج بدست آمده از پیرولیز را کاول را تحت شعاع قرار داده و منجر به تفسیرهای اشتباه می‌گردد. لذا ابتدایی‌ترین عمل در یک پژوهش ژئوشیمیایی با روش پیرولیز را کاول بررسی آلودگی نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد [2, 23]. این آلودگی‌های موجود می‌توانند ناشی از مهاجرت مواد هیدروکربنی از سازندهای مجاور باشد [2, 4]. همچنین گل حفاری نیز می‌تواند موجب رخداد این آلودگی شده باشد [24]. از روش‌های استاندارد تعیین این آلودگی‌ها، می‌توان به نمودار S1 به TOC اشاره کرد [2, 4, 23]. مقادیر بالاتر از شیب این نمودار که برابر ۱/۵ است بیانگر آلودگی نمونه و هیدروکربن نابرجا و مهاجرت یافته است. همچنین معیار دیگری که برای بیان این آلودگی وجود دارد مقادیر PI بالای ۰/۵ است که نشان دهنده آلودگی نمونه‌های مورد مطالعه است [2]. با توجه به شکل ۲، تعداد ۲۳ نمونه که شامل ۲ نمونه از سازند دشتک و ۲۱ نمونه از سازند فراقان، مقدار S1 به TOC بالای ۱/۵ را دارند. همچنین ۵ نمونه که شامل ۱ نمونه از سازند دشتک، ۳ نمونه از سازند کنگان و همچنین ۱ نمونه از سازند فراقان نیز مقادیر PI بالای ۰/۵ را داشته که با توجه به این دو فاکتور ذکر شده، این نمونه‌های آلوده تفاسیر را با خطا مواجه می‌کنند، لذا در ادامه مطالعات از مقادیر داده‌ها حذف شده و نتایج این پژوهش بر اساس نمونه‌های عاری از آلودگی بیان شده است. همچنین با بررسی‌های تکمیلی در ادامه مطالعه، تعداد ۱۰ نمونه مقادیر TOC و Tmax نامتعارفی را دارند که این موارد نیز تفسیرها را دچار خطا می‌کنند. بنابراین نمونه‌های مذکور نیز به دلیل عدم قطعیت از درست بودن آنها نیز حذف و در تفسیرهای نهایی استفاده نشده‌اند.



شکل ۲. نمودار شاخص مهاجرت جهت تعیین آلودگی نمونه‌های میدان فروزان [2].

برای تولید هیدروکربن یک سنگ مادر باید سه شرط کمیت، کیفیت و بلوغ را داشته باشد. جدول ۳ معیارهای تعیین شده برای تحلیل این پارامترها را نشان می‌دهد [25]. در ادامه پژوهش به منظور بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازندهای مورد نظر در میدان فروزان به بررسی و تشریح پارامترهای جدول ۳ می‌پردازیم.

جدول ۳. پارامترهای حاصل از آنالیز پیرولیز راکا اول برای تعیین کمیت، کیفیت و بلوغ سنگ مادر [25].

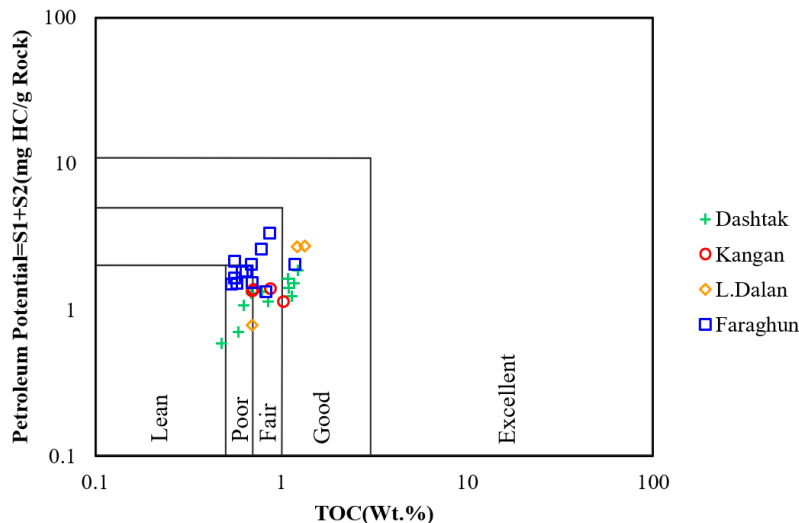
پتانسیل (کمیت)	TOC(Wt. %)	S1(mg HC/g Rock)	S2(mg HC/g Rock)
ضعیف	<0.5	<0.5	<2.5
متوسط	0.5-1	0.5-1	2.5-5
خوب	1-2	1-2	5-10
خیلی خوب	2-4	2-4	10-20
عالی	>4	>4	>20
کروژن (کیفیت)	اندیس هیدروژن (mg HC/g TOC)	S2/S3	محصول اصلی در زون بالغ
I	>600	>15	نفت
II	300-600	10-15	نفت
II/III	200-300	5-10	نفت/گاز
III	50-200	1-5	گاز
IV	<50	<1	-
بلوغ	Ro(%)	Tmax(°C)	اندیس تولید (S1/S1+S2)
نابالغ	0.20-0.60	<435	<0.10
بالغ	ابتدا	435-445	0.10-0.15
	اوج	445-450	0.25-0.40
	انتها	450-470	>0.40
فوق بالغ	>1.35	>470	-



۱.۴. کمیت مواد آلی

جهت بررسی و تعیین کمیت ماده آلی موجود در یک سازند از محتوی کربن آلی کل (TOC) استفاده می‌شود [26]. همچنین از مقادیر S1 و S2 به همراه TOC نیز برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی یک سازند و تعیین کمیت آن استفاده می‌شود [27]. از روش‌های دیگری که برای تعیین کمیت مواد آلی نیز استفاده می‌شود، می‌توان به نمودار تغییرات TOC در برابر اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی اشاره نمود [7]. محدوده‌های پارامترهای تعیین کننده کمیت مواد آلی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین اگر مقادیر اندیس هیدروکربن‌زایی پایین‌تر از ۶ باشد نشان دهنده توان ضعیف و متوسط سازند مورد بررسی است و در صورتی که این مقدار بالاتر از ۶ باشد، بیانگر سازند با کمیتی خوب و عالی می‌باشد [6].

مقادیر TOC برای بررسی کمیت ماده آلی سازند دشتک بین ۱/۲۳-۰/۴۸ درصد وزنی در محدوده ضعیف تا خوب قرار دارد که مقدار میانگین TOC در این سازند برابر با ۰/۸۹ درصد وزنی است و از منظر کمیتی در محدوده متوسط قرار می‌گیرد. برای سازند گنگان، مقادیر TOC بین ۱/۰۳-۰/۷۰ درصد وزنی در بازه متوسط تا خوب بوده و همچنین مقدار میانگین TOC برای سازند مذکور ۰/۸۳ درصد وزنی و کمیتی معادل محدوده متوسط برای این سازند می‌باشد. با توجه به نتایج راکا اول، مقادیر TOC سازند دالان پایینی بین ۱/۳۴-۰/۷۰ درصد وزنی متغیر بوده که بیانگر محدوده متوسط تا خوب این سازند است. مقدار TOC میانگین سازند دالان پایینی ۱/۰۹ درصد وزنی بوده که از جنبه کمیتی در محدوده متوسط قرار دارد. مقدار کنونی ماده آلی سازند فراقان بر اساس مقدار TOC بین ۱/۱۹-۰/۵۴ درصد وزنی متغیر است که نشان دهنده وضعیت متوسط تا خوب سازند فراقان است. مقدار میانگین این سازند نیز ۰/۷۱ درصد وزنی است و کمیتی در محدوده متوسط را برای این سازند نشان می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی در مقابل TOC در میدان فروزان [7].

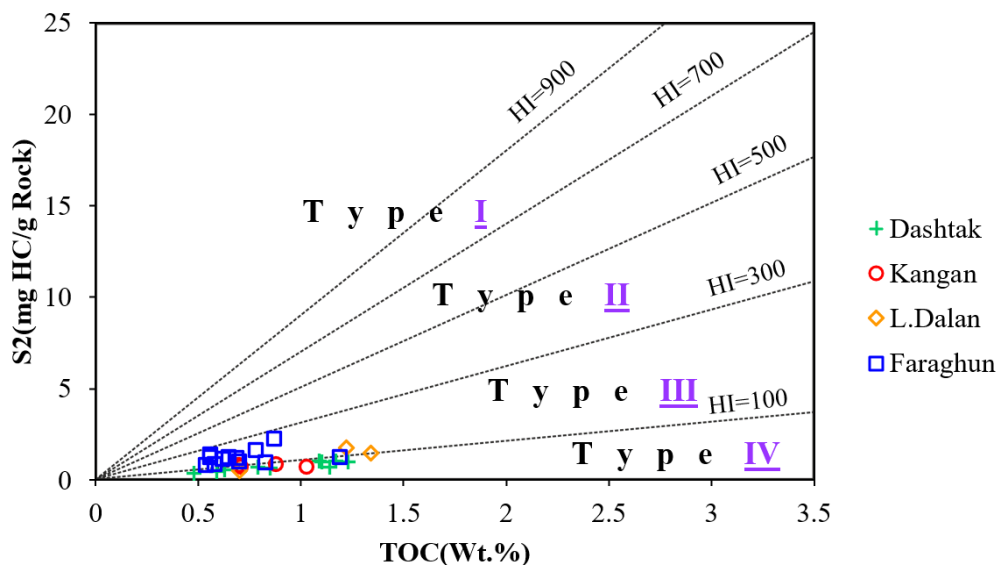
۲.۴. کیفیت مواد آلی

کروژن ماده آلی انحلال ناپذیر در حلال آلی است که از انواع ماسرال‌ها ایجاد شده است [28]. لذا جهت بررسی کیفیت یک سازند، تعیین دقیق تیپ کروژن موجود در سازند بسیار مهم است [7, 29]. کروژن دارای تیپ‌های متنوعی است. کروژن تیپ I مختص محیط‌های دریاچه‌ای می‌باشد. کروژن تیپ II از مخلوط شدن گیاهان دریایی و خشکی و در محیط‌های دریایی احیایی ایجاد می‌شوند. کروژن تیپ III نیز از گیاهان دریایی ایجاد و توانایی تولید هر نوع هیدروکربنی را ندارند [2]. برای تعیین نوع کروژن و میزان بلوغ حرارتی آن از نمودار تغییرات اندیس هیدروژن در برابر تغییرات اندیس اکسیژن و یا نمودار ون کروژن تصحیح شده استفاده می‌شود. همچنین از نمودار تغییرات Tmax در برابر تغییرات اندیس هیدروژن برای تایید نتایج نیز استفاده می‌شود. از پارامتر S2 در برابر TOC به صورت محدوده‌های مجزا و گروه‌های کروژنی در نمودارهای استاندارد برای تعیین کیفیت و نوع کروژن نیز استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در استفاده از این پارامترها در تعیین نوع ماده آلی باید در نظر داشت که این پارامترها علاوه بر نوع ماده آلی تحت تاثیر بلوغ و فرآیندهای

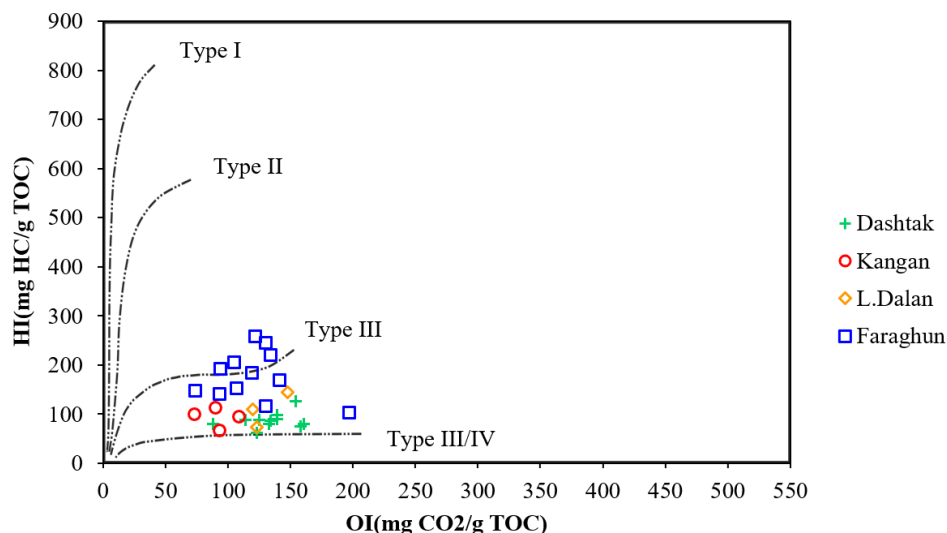


ثانویه تاثیر گذار بر روی مواد آلی می‌باشند. اندیس هیدروژن بزرگتر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) معرف تیپ I و مقدار بین ۳۵۰ تا ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) معرف تیپ II کروژن می‌باشد. برای کروژن تیپ III اندیس هیدروژن بین ۵۰ تا ۲۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) قرار می‌گیرد [2, 25, 30]. اندیس هیدروژن کمتر از ۵۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) مربوط به کروژن تیپ IV که هیچ پتانسیلی برای تولید هیدروکربن ندارد [7].

مقدار اندیس هیدروژن برای سازند دشتک بین ۶۱ تا ۱۲۶ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) است که بیانگر تلفیق کروژن تیپ III گاززا و تیپ IV در این سازند می‌باشد. همچنین مقادیر این اندیس در سازند کنگان نیز بین ۶۷ تا ۱۱۳ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر بوده که مشابه سازند دشتک دارای کروژن تیپ III و IV می‌باشد. بازه اندیس هیدروژن سازند دالان پایینی بین ۱۴۴-۷۴ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) متغیر می‌باشد و نشان دهنده تیپ III و تیپ IV کروژن برای این سازند است. در سازند فراقان نیز بازه اندیس هیدروژن بین ۱۰۳ تا ۲۵۹ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می‌باشد که این مقدار اندیس هیدروژن بیانگر تیپ III کروژن گاززا می‌باشد (شکل ۴). نمودار اندیس هیدروژن در مقابل اندیس اکسیژن هم نتایج فوق را تایید می‌کند (شکل ۵).



شکل ۴. نمودار S2 در برابر TOC برای تعیین نوع کروژن موجود در سازندهای میدان فروزان [30].



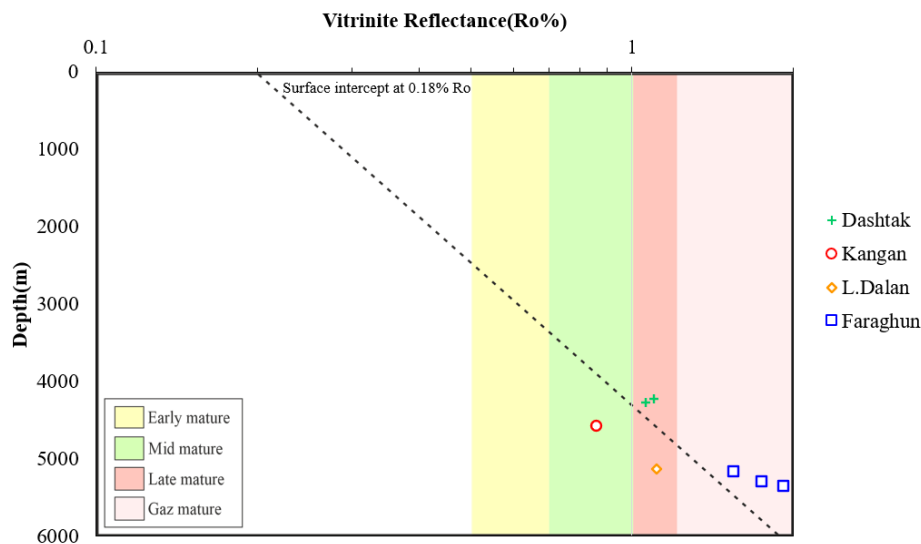
شکل ۵. نمودار اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن برای سازندهای مطالعه شده در میدان فروزان [2].



۳.۴. بلوغ مواد آلی

به مجموعه تغییرات شیمیایی که عمدتاً در نتیجه تنش‌های حرارتی در مواد آلی موجود در سنگ‌های مادر در طول زمان ایجاد می‌شوند بلوغ حرارتی گفته می‌شود [7]. مقدار بلوغ حرارتی به دست آمده با استفاده از اکثر شاخص‌های بلوغ معمولاً وابسته به نوع مواد آلی مورد آنالیز می‌باشد. بنابراین، یک روند بلوغ حرارتی زمانی معتبر می‌باشد که همه نمونه‌های مورد استفاده، از یک توالی رسوبی با ماده آلی همگن انتخاب شده باشند. پارامترهای T_{max} و PI علاوه بر وابستگی به نوع ماده آلی از مهم‌ترین پارامترهای حاصل از آنالیز راکا اول جهت ارزیابی بلوغ حرارتی مواد آلی می‌باشند [2, 12]. T_{max} به‌عنوان شاخص بلوغ به‌کار گرفته می‌شود زیرا با افزایش بلوغ حرارتی کروژن، دمایی که در آن بیشترین نرخ پیرولیز رخ می‌دهد افزایش پیدا می‌کند [31]. کروژن نوع I در محدوده انعکاس ویتترینایت بین ۰/۷ تا ۱ درصد بالغ می‌شود، لذا استفاده از پارامتر T_{max} در ارزیابی میزان پختگی این کروژن کاربردی ندارد. اما شاخص T_{max} در ارزیابی بلوغ کروژن نوع II که فقیر از ویتترینایت است بهترین پارامتر می‌باشد. همچنین برای کروژن نوع III بین مقادیر T_{max} و انعکاس ویتترینایت انطباق خوبی برقرار است [32].

بررسی مقادیر T_{max} و انعکاس ویتترینایت نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر T_{max} دقت کافی را نداشته و برای بررسی و بیان بلوغ مواد آلی مناسب نیستند و مقادیر انعکاس ویتترینایت اطلاعات بهتر و دقیق‌تری را راجع به بلوغ سازندهای مذکور به ما می‌دهند. بنابراین با توجه به شکل ۶ سازندهای دشتک، کنگان و دالان پایینی در محدوده بلوغ قرار گرفته‌اند و سازند فراقان نیز در محدوده تولید گاز از جنبه بلوغ حرارتی قرار گرفته است.



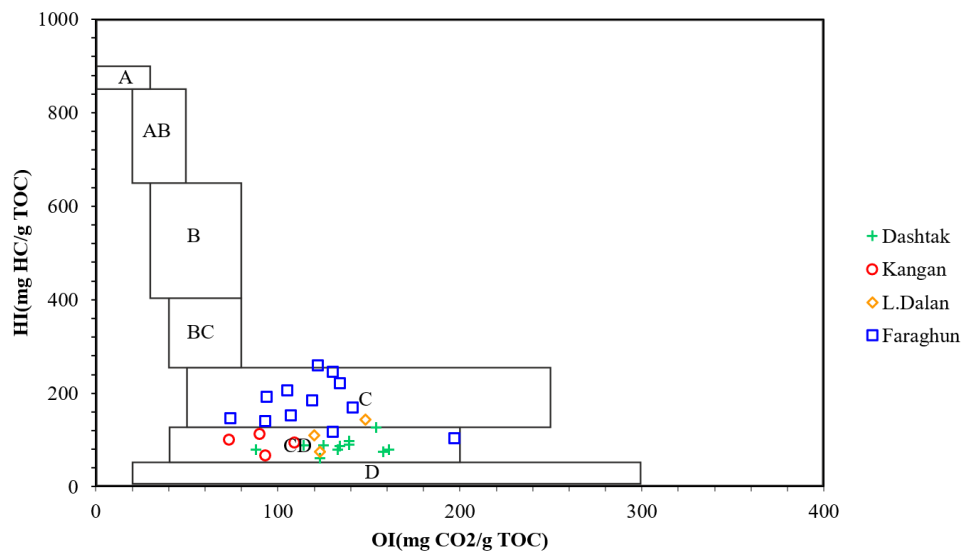
شکل ۶. نمودار میانگین انعکاس ویتترینایت اندازه‌گیری شده در برابر عمق برای نمونه‌های سنگ‌های مادر احتمالی میدان فروزان.

۴.۴. محیط ته‌نشست

اندیس هیدروژن و اندیس اکسیژن به‌عنوان پارامترهای غیر مستقیم حاصل از پیرولیز می‌توانند جهت تفسیر محیط ته‌نشست مورد استفاده قرار گیرند. مواد آلی که در محیط‌های نزدیک قاره ته‌نشست پیدا کرده‌اند، به‌خاطر حضور مقدار زیاد اکسیژن محلول و ورود حجم بالای مواد آلی گیاهی (اکسیژن فراوان‌تر نسبت به ارگانوسم‌های دریایی) در آن محیط، درصد ترکیبات اکسیژن‌دار خیلی زیادتر است. در آنالیز پیرولیز راکا اول، این مواد آلی با اندیس اکسیژن بالایی نمایان می‌شوند. در محیط‌های دریایی بسته آحيایی حضور حجم زیاد ارگانوسم‌های دریایی (هیدروژن فراوان) به همراه مقدار پایین اکسیژن محلول در آب، مواد آلی موجود، مقدار پایین اکسیژن و مقدار بالای هیدروژن را دارا هستند که در آنالیز پیرولیز راکا اول اندیس هیدروژن مقادیر بالایی را نشان می‌دهد [2, 25, 33]. با توجه به اثر پذیری پارامترهای اندیس اکسیژن و اندیس هیدروژن از میزان بلوغ مواد آلی، بالاترین انطباق با محیط ته‌نشست اولیه در نمونه‌هایی که دارای میزان بلوغ پایین‌تری هستند دیده می‌شود.



در ادامه به تشریح محدوده‌های نمودار جونز می‌پردازیم که محدوده A: محیط دریاچه‌ای شدیداً احیایی؛ محدوده AB: محیط دریایی پیشرونده احیایی؛ محدوده B: محیط‌های دریایی یا دریاچه‌ای نسبتاً احیایی؛ محدوده BC: محیط‌های دارای مواد آلی دریایی و قاره‌ای و رسوبگذاری سریع در شرایط نسبتاً اکسیدان؛ محدوده C: محیط‌های با سرعت رسوبگذاری متوسط در شرایط احیایی؛ محدوده CD: محیط‌های عمیق در مجاورت نقطه کوهزایی و محدوده D: محیط‌های قاره‌ای به شدت اکسیدان هستند [33]. بنابر شکل ۷ نمونه‌های سازندهای دشتک، کنگان و دالان پایینی در محدوده محیط‌های عمیق در مجاورت نقطه کوهزایی تهنشست داشته‌اند و نمونه‌های سازند فراقان پایینی، بیانگر محیط‌های با سرعت رسوبگذاری متوسط در شرایطی احیایی را دارند.



شکل ۷. نمودار تعیین رخساره آلی با استفاده از نسبت تغییرات اندیس هیدروژن در مقابل اندیس اکسیژن [33].

۵. نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین حوضه‌های نفتی جهان و خاورمیانه، حوضه خلیج فارس می‌باشد که بخش شمال غربی آن میداین هیدروکربنی فراوانی در بخش‌های ایرانی و عربی خود را در بر گرفته است. میدان فروزان همراه با بخش عربی آن (میدان مرجان) از میداین مهم شمال غرب خلیج فارس بوده که بر روی بلندای قدیمه خفجی-نوروز قرار گرفته است. در این مطالعه سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان در یکی از چاه‌های میدان فروزان بر اساس نتایج آنالیز پیرولیز راکاؤل و انعکاس ویترنایت مورد ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادر قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعات نشان داد که میانگین میزان مواد آلی سازندهای مورد مطالعه در میدان فروزان در محدوده متوسط می‌باشند. با این حال، نوع مواد آلی سازندهای دشتک، کنگان و دالان پایینی در محدوده کروژن تیپ III و IV بوده و به بلوغ کافی رسیده‌اند و در اواخر محدوده بلوغ قرار دارند. از طرف دیگر، سازند فراقان دارای کروژن تیپ III بوده که در بازه تولید گاز قرار دارد. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان اظهار کرد که سازندهای دشتک، کنگان، دالان پایینی و فراقان مستعد سنگ مادر مناسب در میدان فروزان به حساب نمی‌آیند.

منابع

- [1] England, W.A., 2007. Reservoir geochemistry—A reservoir engineering perspective. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 58(3-4), 344-354, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>.
- [2] Hunt, J.M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 2nd Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 743 p.
- [3] Sfidari, E., Sharifi, M., Yazdi-Moghadam, M. and Hakimi-Zanouz, A., 2023. Geochemical pyrolysis, petrographical analysis and burial history reconstructions of the Kazhdumi Formation in the Hendijan and Soroosh oil fields, northwestern Persian Gulf. *Journal of African Earth Sciences*, 105158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105158>.



- [4] Behar, F., Beaumont, V.D.E.B., and Pentead, H.D.B., 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(2), 111-134, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
- [5] Ghazban, F., 2007. *Petroleum Geology of the Persian Gulf*. Tehran University and National Iranian Oil Company Publications, Tehran, 707 p.
- [6] Hosseiny, E., and Barati Boldaji, S., 2020. Evaluation of Hydrocarbon Generation Potential of Sargelu Source Rock in Southwestern Iran and the Northwestern Persian Gulf. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(23), 79-89, doi: <https://doi.org/10.29252/annm.2020.14351.1451>.
- [7] Tissot, B.P., and Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence* Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, Tokio, 699 p.
- [8] Bordenave, M.L., and Huc, A.Y., 1995. The Cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran. *Revue de L'institut Français du Pétrole*, 50(6), 727-752, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1995044>.
- [9] Rabbani, A.R., 2008. Geochemistry of crude oil samples from the Iranian sector of the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Geology*, 31(3), 303-316, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2008.00422.x>.
- [10] Alsharhan, A.S., and Salah, M.G., 1997. Tectonic implications of diapirism on hydrocarbon accumulation in the United Arab Emirates. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 45(3), 279-296, doi: <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.45.3.279>.
- [11] Marzouk, I., and Sattar, M.A.E., 1994. Wrench tectonics in Abu Dahbi, United Arab Emirates, in M. Al-Husseini, ed., *Geo 94, The Middle East Petroleum Geosciences*, Gulf Petrolink, 1, 655-668.
- [12] Espitalié, J., Deroo, G., and Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, 40(6), 755-784, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1985045>.
- [13] Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A.C.F.K., Diessel, C.F.K., Littke, R., and Robert, P., 1998. *Organic petrology*: Berlin. Gebrüder Borntraeger, 704 p.
- [14] Barker, C., 1974. Pyrolysis techniques for source-rock evaluation. *AAPG Bulletin*, 58(11), 2349-2361, doi: <https://doi.org/10.1306/83D91BAF-16C7-11D7-8645000102C1865D>.
- [15] Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., and Paulet, J., 1977. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution, *Revue Institut Français du Pétrole*, 32(1), 23-42, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1977002>.
- [16] Peters, K.E., 1986. Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG bulletin*, 70(3), 318-329, doi: <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
- [17] Hosseiny, E., and Mohseni, A., 2023. Garau Formation as an unconventional hydrocarbon resource in southwestern Iran: a geochemical investigation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(7), 1535-1549, doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01634-1>.
- [18] Barati Boldaji, S., Sefidari, E., Mehrabi, H., and Zamanzadeh, S.M., 2024. Geochemical evaluation of potential source rocks based on Rock-Eval Pyrolysis and Vitrinite reflectance analyses in Foroosan oil field. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, doi: <https://10.22071/gsj.2023.422750.2119>.
- [19] Attarian, M., Moalemmi, S.A., and Memariani, M., 2016. Evaluation of burial history and thermal modeling of oil field located in the east of the Persian Gulf. In *Proceedings of the 20th Conference of the Geological Society of Iran*, 1735-1742 p.
- [20] Dow, W.G., 1977. Kerogen studies and geological interpretations. *Journal of geochemical exploration*, 7, 79-99, doi: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90078-4).



- [21] ASTM, 2011. Standard Test Method for Microscopical Determination of the Reflectance of Vitrinite Dispersed in Sedimentary Rocks. Geneva: Wiley Publications.
- [22] Dembicki, H., 2022. Practical petroleum geochemistry for exploration and production. Elsevier.
- [23] Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide, second ed. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Cambridge University Press, Cambridge, 683 p.
- [24] Smith, J.T., 1994. Petroleum System Logic as an Exploration Tool in a Frontier Setting, AAPG Mem. 60, 25-49 p.
- [25] Peters, K.E., and Cassa, M.R., 1994. Applied Source-Rock Geochemistry. In: Magoon, L.B., and Dow, W.G., Eds., The Petroleum System. From Source to Trap, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 93-120 p.
- [26] Bordenave, M.L., and Burwood, R., 1995. The Albian Kazhdumi Formation of the Dezful Embayment, Iran: One of the Most Efficient Petroleum Generating Systems. In: Katz, B.J. (eds) Petroleum Source Rocks. Casebooks in Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg, 183-207, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-78911-3_11.
- [27] Huang, B., Xiao, X., and Zhang, M., 2003. Geochemistry, grouping and origins of crude oils in the Western Pearl River Mouth Basin, offshore South China Sea. Organic Geochemistry, 34(7), 993-1008, doi: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(03\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00035-4).
- [28] Batten, D.J., 1996. Palynofacies and Palaeoenvironmental Interpretation. In: Jansonius, J., and McGregor, D.C., Eds., Palynology: Principles and Applications, Vol 3, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, College Station, 1011-1064 p.
- [29] Hosseiny, E., Rabbani, A.R., and Moallemi, S.A., 2016. Source rock characterization of the Cretaceous Sarvak Formation in the eastern part of the Iranian sector of Persian Gulf. Organic geochemistry, 99, 53-66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.06.005>.
- [30] Langford, F.F., and Blanc-Valleron, M.M., 1990. Interpreting Rock-Eval Pyrolysis Data Using Graphs of Pyrolizable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. AAPG bulletin, 74(6), 799-804, doi: <https://doi.org/10.1306/0C9B238F-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- [31] Waples, D.W., 1985. Predicting Thermal Maturity. In: Geochemistry in Petroleum Exploration. Geological Sciences Series. Springer, Dordrecht, 121-154, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-5436-6_9.
- [32] Bordenave, M.L., 1993. Applied petroleum geochemistry. Editions Technip, Paris.
- [33] Jones, R., 1987. Organic Facies. In: Brooks, J., Welte, D. (Eds.), Advances in Petroleum Geochemistry, Acad. Press. New York, 1-90, doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0763-3-5>.