

ارزیابی ژئوشیمیایی و گسترش رخساره‌های آلی سازند پابده در سواحل شمال غربی خلیج

فارس و جنوب فروافتادگی دزفول با استفاده از تجزیه و تحلیل راک-اول

زینب اورک، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

معصومه کردی، استادیار، گروه زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران*

احمدرضا کریمی، دکتری زمین‌شناسی شرکت ملی نفت ایران

چکیده

ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ منشأ نخستین گام در بررسی سیستم‌های هیدروکربنی طی برنامه‌های اکتشافی است. سازند پابده با سن پالئوسن تا الیگوسن و سنگ‌شناسی مارن، آهک و شیل یکی از سازندهای محتمل برای زایش هیدروکربن در سواحل شمال غربی خلیج فارس و جنوب فروافتادگی دزفول است. در پژوهش حاضر، توان هیدروکربن‌زایی، کمیت و کیفیت سنگ منشأ، نوع کروژن، بلوغ حرارتی و گسترش رخساره آلی سازند پابده بررسی شدند؛ به این منظور، تعداد ۴۷ نمونه از میدان‌های واقع در نواحی مورد مطالعه با دستگاه راک-اول ۶ تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان دادند کروژن‌ها از نوع II، III و مخلوطی از کروژن III و II هستند، ولی اکثراً نابالغند و در مرحله دیاژنز قرار گرفته‌اند. پتانسیل هیدروکربن‌زایی ۹۰ درصد نمونه‌ها در بخش متوسط تا عالی قرار دارد. رخساره‌های آلی این سازند در محدوده B، BC، C و CD قرار دارند. این تنوع رخساره‌های آلی از تغییرات جانبی رخساره‌ها و تغییرات نسبی سطح آب دریا طی زمان رسوب‌گذاری این سازند ناشی می‌شود. سازند پابده در منطقه مطالعه شده به سه زون ژئوشیمیایی تقسیم می‌شود: زون‌های بالایی و پایینی در زمان پسروری آب دریا با مقادیر TOC و HI کم و کروژن نوع III ته‌نشست یافته‌اند؛ در حالی که زون میانی در زمان پیشروی آب دریا با مقادیر TOC و HI زیاد و کروژن نوع II نهشته شده است. سازند پابده در منطقه مطالعه شده سنگ منشأیی با پتانسیل هیدروکربن‌زایی خوب ولی نابالغ شناخته می‌شود و زون میانی این سازند منبع هیدروکربنی غیرمتعارف در نظر گرفته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل هیدروکربن‌زایی، سازند پابده، راک-اول، رخساره آلی، کروژن

مقدمه

امروزه، ارزیابی ژئوشیمیایی روشی بین‌رشته‌ایست که برای بهبود بازده فعالیت‌های اکتشاف و تولید به کار می‌رود. بسیاری از مسائل مربوط به شناخت سنگ منشأ با استفاده از نظریه‌ها و روش‌های مختلف ژئوشیمیایی، زون‌های تولیدی و غیرتولیدی، مهاجرت نفت، تجمع‌های نفتی و توسعه میدان‌های نفتی مطالعه می‌شوند (Kaufman et al. 1990; Miller 1995; Peters & Fowler 2002). در صنایع نفتی پذیرفته شده است که احتمال اکتشاف سنگ منشأ مناسب با روش‌های ژئوشیمیایی تا ۶۳ درصد افزایش می‌یابد. این ابزار به پرسش‌هایی نظیر مکان سنگ منشأ، میزان بلوغ، مقدار ماده آلی، پتانسیل هیدروکربنی، میزان تولید سنگ منشأ و مسیر مهاجرت نفت از سنگ منشأ پاسخ می‌دهد. باتوجه به ضرورت اکتشاف ذخایر جدید نفت و گاز و بررسی دقیق‌تر نواحی جنوب ایران، مطالعه سازندهای محتمل سنگ منشأ به‌عنوان نخستین عنصر مهم و تأثیرگذار در سیستم‌های نفتی اهمیت بسیاری دارد؛ در این راستا، پی‌بردن به پتانسیل هیدروکربن‌زایی و بررسی شرایط سنگ منشأ از نظر داشتن شرایط اولیه زایش هیدروکربن اجتناب‌ناپذیر است.

غربال‌گری نمونه‌های سنگ از سازندهای محتمل منشأ و بررسی بلوغ حرارتی از طریق تجزیه و تحلیل نمونه‌ها با دستگاه راک-اول انجام می‌شود (Lafargue et al. 1998). استفاده از این دستگاه و تجزیه و تحلیل‌های مربوطه احتمال ناموفق بودن حفاری را در اهداف و چشم‌اندازهای اکتشافی کاهش می‌دهد (Espitalié 1984). دستگاه راک-اول ۶ (آخرین نسل از دستگاه راک-اول) در سال ۱۹۹۶ با فناوری وینچی^۱ تکمیل شد و به‌علت دقت زیاد تجزیه و تحلیل از بهترین روش‌ها برای ارزیابی سنگ‌های منشأ به‌شمار می‌آید (Behar et al. 2001). در مقاله حاضر، سازند پابده به سن پالئوسن تا الیگوسن در سواحل شمال‌غربی خلیج فارس و جنوب فروافتادگی دزفول با استفاده از تجزیه و تحلیل راک-اول ۶ ارزیابی ژئوشیمیایی

شد. تاکنون مطالعه‌های گوناگونی درباره سازند پابده در ایران انجام شده‌اند؛ برای نمونه، بردانو و هرگ (Bordenave and Herge 2002) دو سنگ منشأ کژدمی و پابده را برای فروافتادگی دزفول معرفی کردند؛ در این مطالعه، زمان زایش و مهاجرت نفت و گاز پس از شکل‌گیری زاگرس حدود ۳ تا ۸ میلیون سال پیش ذکر شده است. عزیزاده و همکاران (Alizadeh et al. 2012) در بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی دو سنگ منشأ کژدمی و پابده در نواحی جنوب فروافتادگی دزفول شمالی دریافتند ماده آلی در سازند پابده دارای کروژن تیپ III و II است. مشهدی و همکاران (Mashhadi et al. 2015) نیز در مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی و هیدروکربن‌زایی سازندهای کژدمی (کرتاسه پیشین)، گورپی (کرتاسه پسین) و پابده (پالئوژن) در بخش ایرانی خلیج فارس با استفاده از راک-اول و Tmax نشان دادند سازند پابده درون پنجره اصلی تولید نفت قرار دارد. کریمی و همکاران (Karimi et al. 2016) با تجزیه و تحلیل‌های ژئوشیمیایی، روش‌های ژئوفیزیکی و مطالعه‌های کینتیکی در تاق‌دیس اهواز به بررسی تأثیر سیستم نفتی کرتاسه-میوسن بر شکل‌گیری مخازن نفتی در این نواحی پرداختند. کریمی و همکاران همچنین با بررسی ارزیابی ژئوشیمیایی و مدل‌سازی حرارتی سازند پابده و سازند گورپی در نواحی شمالی فروافتادگی دزفول دریافتند در نمودار Tmax/HI، بیشتر نمونه‌های پابده و گورپی حاوی کروژن نوع II هستند.

باتوجه به ضرورت مطالعه‌های ژئوشیمیایی در اکتشافات ذخایر متعارف نفت و گاز جدید و همچنین بررسی سازندهای محتمل به‌عنوان ذخایر غیرمتعارف هیدروکربنی در ایران، سازند پابده در سواحل شمال‌غربی خلیج فارس و جنوب فروافتادگی دزفول در پژوهش حاضر بررسی شد. بررسی ناحیه‌ای سازند منشأ از این نظر مهم است که شرایط پتانسیل آن ممکن است در مناطق مختلف به‌علت متغیر بودن شرایط محیط رسوب‌گذاری متفاوت باشد؛ از این رو، تعیین شرایط آن سازند در نواحی مختلف ضروری است.

¹ Vinci

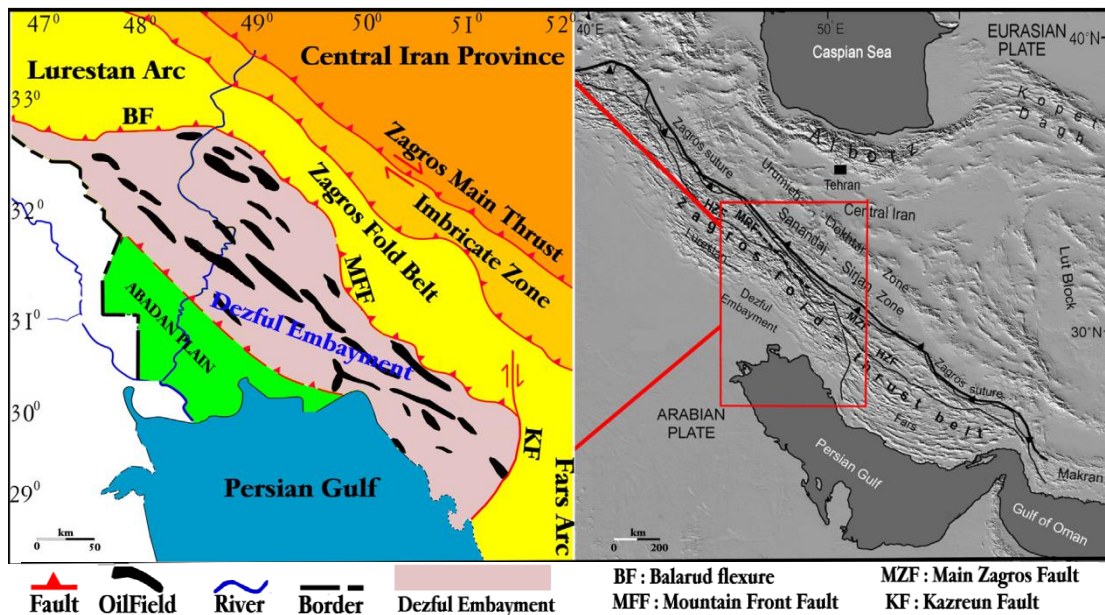
موقعیت جغرافیایی و چینه‌شناسی منطقه

فروافتادگی دزفول در جنوب‌غرب تراست زاگرس واقع شده است و حدود ۴۰۰۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد. این ناحیه با وجود مساحت نسبتاً کمی که دارد، بخش اعظمی از ذخایر نفت ایران را در خود جای داده است؛ به طوری که در ناحیه فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس حدود ۶۰ میدان نفتی وجود دارد. برخی از این میدان‌ها مانند اهواز، گچساران و بی‌بی حکیمه، میدان‌های فوق‌عظیمند. از جمله میدان‌های نفتی عظیم ناحیه عبارتند از: تابناک، هندیدجان، تنگو، رگ سفید (شکل ۱) (Bordenave 2002).

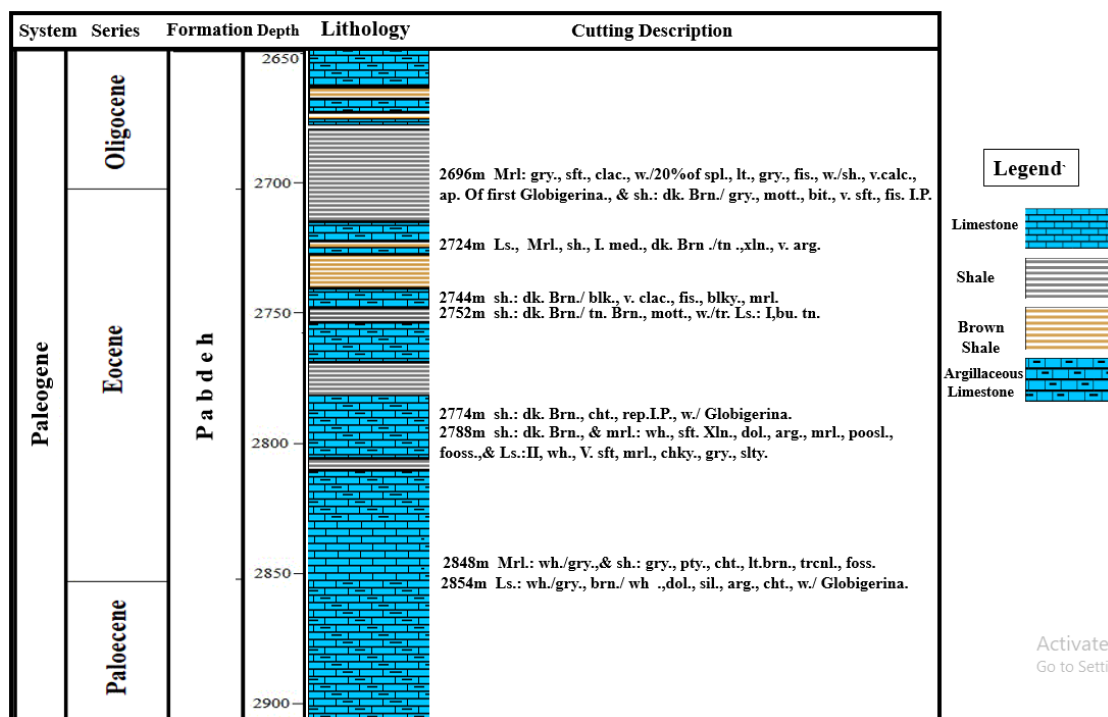
فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس بخشی از زاگرس چین‌خورده‌اند و عملکرد توأم گسل قطر-کازرون (KF) و گسل بالارود (BF) نقش اساسی در

شکل‌گیری این نواحی داشته است (شکل ۱) (Aghanabati 2004).

جیمز و واند برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵ سازند پابده را مطالعه و آن را سازند معرفی کردند (James & Wynd 1965). برش الگوی واحد سنگی پابده در تنگ پابده، در شمال میدان نفتی مسجدسلیمان به ضخامت ۷۹۸ متر مطالعه شده است. این سازند از سنگ‌شناسی مارن، آهک و شیل تشکیل شده و سن آن پالئوسن تا الیگوسن است. سازند پابده به‌ویژه در نواحی جنوب‌شرقی لرستان، خوزستان و نواحی جنوبی فارس گسترش دارد (Aghanabati 2004) و مرز زیرین آن در محل برش نمونه با شیل و مارن‌های سازند گورپی به‌شکل هم‌شیب و مرز بالایی آن در برش نمونه با سازند آسماری به‌شکل هم‌شیب و تدریجی است (شکل ۲).



شکل ۱- نقشه ناحیه فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس، میدان‌های هیدروکربنی و ویژگی‌های ساختاری اصلی آنها. (Karimi et al. 2016)



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی سازند پابده در یکی از چاه‌های مورد مطالعه (برگرفته از گزارش شرکت ملی نفت ایران)

روش مطالعه

در مطالعه حاضر، تعداد ۴۷ نمونه خرده‌حفاری از هفت حلقه چاه مربوط به سازند پابده، از میدان‌های واقع در سواحل شمال‌غربی خلیج فارس و جنوب فروافتادگی دزفول تهیه و با دستگاه پیرولیز راک-اول ۶ دانشگاه امیرکبیر تجزیه و تحلیل شدند.

در این روش، مقدار کمی (معمولاً حدود ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم) از نمونه‌های خرده‌حفاری پودر شده سازند پابده از اعماق مختلف در محیط گاز خنثی نیتروژن یا هلیوم (محیط بدون اکسیژن) از دمای ۱۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ افزایش دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت داده شد. در نمونه‌های قدیمی دستگاه راک-اول، فرایند حرارت‌دادن تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شد؛ اما در دستگاه راک-اول ۶ به علت شکسته شدن مواد آلی کروژن نوع III در دمای بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، این فرایند تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد (Dahl et al. 2004). هیدروکربن‌های آزاد موجود در نمونه سنگ تا دمای حدود ۳۰۰ درجه

سانتی‌گراد بخار و به شکل پیک S_1 بر حسب میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ مشخص شدند. مواد آلی موجود در نمونه سنگ در فرایند پیرولیز و هنگام حرارت‌دادن به هیدروکربن تبدیل شدند و مقدار آنها به شکل شاخص S_2 بر حسب میلی‌گرم هیدروکربن بر گرم سنگ اندازه‌گیری و ثبت شد. دو شاخص یادشده با آشکارساز یونی-شعله‌ای (FID) اندازه‌گیری شدند. در ادامه حرارت‌دهی طی فرایند پیرولیز، برخی ترکیبات دارای اکسیژن در دمای حدود ۳۰۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد شکسته و به شکل CO_2 آزاد شدند (Wang & Scott 2007؛ این مقادیر با سلول فروسرخ (IR-CELL) اندازه‌گیری و با عنوان شاخص S_3 بر حسب میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن بر گرم سنگ نشان داده شدند. مقدار CO که از شکستن ترکیبات اکسیژن‌دار طی فرایند پیرولیز تولید می‌شود نیز با سلول فروسرخ اندازه‌گیری شد. باقیمانده نمونه در کوره اکسیداسیون و در شرایط اتمسفر مصنوعی ($N_2/O_2: 80/20$) با نرخ افزایش دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. ترکیبات CO و CO_2

فارس و جنوب فروافتادگی دزفول انجام شد. جدول ۱ نتایج پیرولیز راک- اول ۷ نمونه از خرده‌های حفاری سازند پابده را در هفت حلقه چاه از این نواحی و جدول ۲ معیارهای ارزیابی کمیت، کیفیت و بلوغ ماده آلی استفاده‌شده در پژوهش را نشان می‌دهد (Peters & Cassa 1994).

آزادشده در فرایند اکسیداسیون نیز با سلول فروسرخ اندازه‌گیری شدند (Behar et al. 2001).

بحث و بررسی

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی ژئوشیمیایی سازند پابده به‌عنوان سنگ منشأ محتمل در سواحل شمال‌غربی خلیج

جدول ۱- نتایج پیرولیز راک- اول ۶ نمونه‌های سازند پابده از هفت حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه

FM	Well	Depth (m)	S ₃	Tmax (°C)	OI	TOC (Wt. %)	S ₁	S ₂	HI	S ₁ /S ₃	S ₁ +S ₂	PI
Pb	1	2658	1.74	426	112	1.55	1.02	1.54	99	0.89	0.59	2.56
Pb	1	2665	1.36	423	209	0.65	0.62	0.82	126	0.60	0.46	1.44
Pb	1	2682	1.54	425	193	0.80	0.72	1.01	126	0.66	0.47	1.73
Pb	1	2688	1.02	423	68	1.50	0.96	1.47	98	1.44	0.94	2.43
Pb	1	2714	2.61	425	80	3.27	1.67	12.79	391	4.90	0.64	14.46
Pb	1	2723	1.83	424	59	3.08	1.88	14.42	468	7.88	1.03	16.30
Pb	1	2731	2.44	419	65	3.76	2.15	15.46	411	6.34	0.88	17.61
Pb	1	2743	2.02	419	44	4.55	1.93	22.96	505	11.37	0.96	24.89
Pb	1	2750	2.94	417	56	5.21	2.61	24.81	476	8.44	0.89	27.42
Pb	1	2763	1.95	420	52	3.73	2.02	16.16	433	8.29	1.04	18.18
Pb	1	2771	2.43	418	73	3.33	1.77	15.53	466	6.39	0.73	17.30
Pb	1	2780	1.78	423	51	3.48	1.86	14.92	429	8.38	1.04	16.78
Pb	1	2790	2.22	428	79	2.82	1.48	7.62	270	3.43	0.67	9.10
Pb	1	2797	1.45	423	154	0.94	0.60	2.43	259	1.68	0.41	3.03
Pb	1	2808	1.95	427	174	1.12	0.68	1.68	150	0.86	0.35	2.36
Pb	1	2820	1.15	429	68	1.68	0.77	1.91	114	1.66	0.67	2.68
Pb	1	2831	2.24	427	350	0.64	0.41	1.34	209	0.60	0.18	1.75
Pb	1	2843	1.78	426	178	1.00	0.73	1.89	189	1.06	0.41	2.62
Pb	1	2850	1.68	427	111	1.52	0.74	1.95	128	1.16	0.44	2.69
Pb	1	2859	0.85	425	170	0.50	1.26	1.50	300	1.76	1.48	2.76
Pb	1	2870	1.59	422	192	0.83	1.65	1.53	184	0.96	1.04	3.18
Pb	1	2881	1.43	423	72	1.99	2.25	3.23	162	2.26	1.57	5.48
Pb	1	2893	2.45	424	454	0.54	1.47	1.01	187	0.41	0.60	2.48
Pb	1	2898	2.13	431	215	0.99	1.63	1.97	199	0.92	0.77	3.60
Pb	2	2681	2.39	422	62	3.87	2.54	11.94	309	5.00	1.06	14.48
Pb	2	2752	2.61	424	253	1.03	1.66	2.59	251	0.99	0.64	4.25
Pb	2	2823	1.44	435	267	0.54	1.00	0.70	130	0.49	0.69	1.70
Pb	2	2870	0.53	437	39	1.35	0.81	1.45	107	2.74	1.53	2.26
Pb	2	2891	1.96	431	209	0.94	1.19	1.32	140	0.67	0.61	2.51
Pb	3	2640	2.66	426	171	1.56	0.84	1.60	103	0.60	0.32	2.44
Pb	3	2675	3.01	432	118	2.56	1.64	3.03	118	1.01	0.54	4.67
Pb	3	2701	2.20	427	69	3.18	1.51	11.80	371	5.36	0.69	13.31
Pb	3	2736	2.89	421	74	3.92	1.76	16.16	412	5.59	0.61	17.92
Pb	4	2015	1.28	434	53	2.42	0.39	3.16	131	2.46	0.30	3.55
Pb	4	2084	1.05	428	30	3.57	0.54	13.41	376	12.73	0.51	13.95
Pb	4	2090	0.98	434	47	2.08	0.33	1.38	66	1.40	0.34	1.71
Pb	4	2099	0.44	426	133	0.33	0.08	0.83	252	1.90	0.18	0.91
Pb	4	2140	1.30	426	52	2.48	0.33	10.96	442	8.42	0.25	11.29
Pb	5	2193	0.90	431	35	2.55	0.48	8.55	335	9.46	0.53	9.03
Pb	5	2243	1.40	427	77	1.81	0.29	11.41	630	8.17	0.21	11.70
Pb	6	2285	0.50	429	27	1.83	0.14	3.98	217	7.93	0.28	4.12
Pb	6	2346	0.94	431	71	1.33	0.61	2.19	165	2.33	0.65	2.80
Pb	7	1723	0.10	437	40	0.25	0.20	1.13	452	11.30	2.00	1.33
Pb	7	1841	1.32	423	30	4.33	0.91	27.54	636	20.93	0.69	28.45
Pb	7	1883	0.84	427	31	2.68	0.54	10.01	374	11.93	0.64	10.55
Pb	7	1933	1.03	433	412	0.25	0.02	1.81	724	1.76	0.02	1.83
Pb	7	1964	1.19	433	132	0.90	0.13	0.85	94	0.71	0.11	0.98

جدول ۲- معیارهای بررسی کمیت، کیفیت و بلوغ ماده آلی سنگ منشأ (برگرفته از Peters & Cassa 1994).

Quantity	TOC (wt. %)	S ₁ (mg HC/g Rock)	S ₂ (mg HC/g Rock)
Poor	0-0.5	0-0.5	0-2.5
Fair	0.5	0.5-1	2.5-5
Good	1-2	1-2	5-10
Very Good	2-4	2-4	10-20
Excellent	>4	>4	>20
Quantity	HI(mg HC/g TOC)	S ₂ /S ₃	Kerogen type
None	<50	<1	IV
Gas	50-200	1-5	III
Gas and Oil	200-300	5-10	II/III
Oil	300-600	10-15	II
Oil	>600	>15	I
Maturation	Ro (%)	T _{max} (°C)	TAI
Immature	0.2-0.6	<435	1.5-2.6
Mature	Early	435-445	2.6-2.7
	Peak	445-450	2.7-2.9
	late	450-470	2.9-3.3
Post mature	>1.35	>470	>3.3

شاخص مهاجرت و تعیین آلودگی

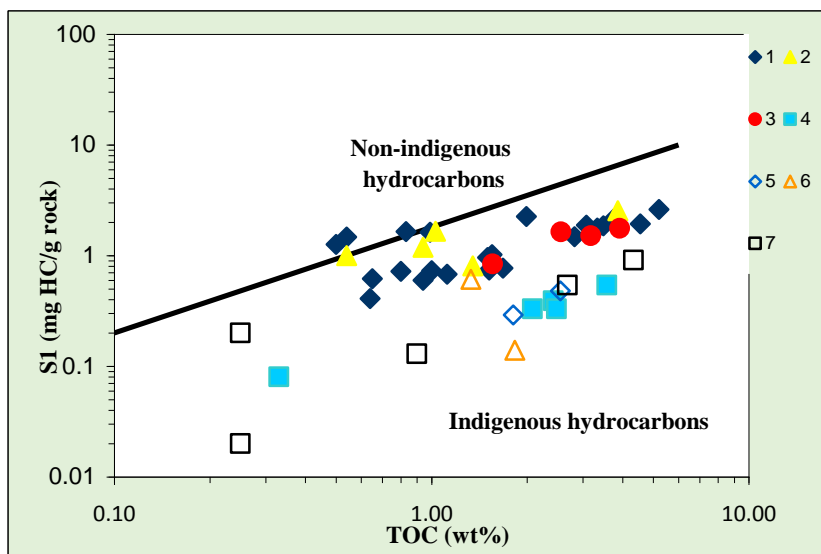
اطمینان از اینکه نمونه‌های مطالعه‌شده آلودگی و یا آغشتگی ندارند در انجام مطالعه‌های ژئوشیمیایی بسیار ضروری است؛ زیرا آلودگی نمونه‌ها بر نتایج پیرولیز راک- اول تأثیر می‌گذارد. آغشتگی‌ها ممکن است ناشی از مهاجرت هیدروکربن از لایه‌ها و سازندهای عمیق‌تر و آلودگی نمونه‌ها به نفت خام و مواد روغنی موجود در گل حفاری در زمان حفاری باشد. به‌منظور تعیین آلودگی از منحنی تغییرات S₁ در برابر TOC استفاده می‌شود (Hunt 1996). بر اساس شکل ۳، قسمت اعظم نمونه‌های سازند پابده از نوع برج‌ها بودند و فقط در ۳ نمونه، نشانه‌های جزئی آلودگی و هیدروکربن‌های نابرجا دیده شد؛ در نتیجه، این ۳ نمونه از ادامه مطالعه حذف شدند.

تعیین کمیت مواد آلی

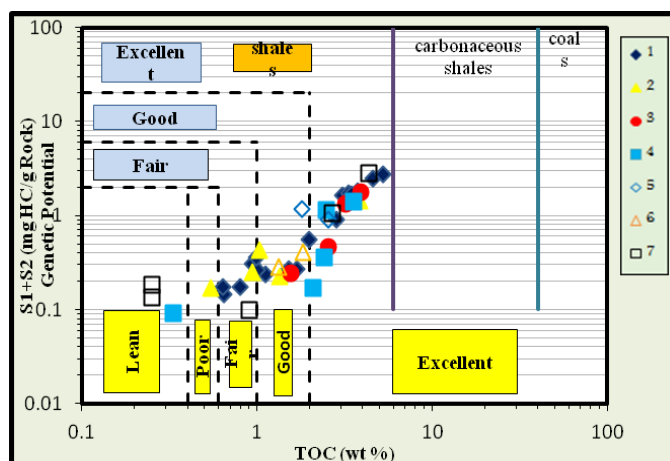
مقدار ماده آلی با عنوان کربن آلی کل (TOC) بیان می‌شود. سنگی توانایی تولید نفت و گاز را دارد که حداقل معینی کربن

آلی داشته باشد و این مقدار باتوجه‌به نوع سنگ منشأ متفاوت است. به‌منظور ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند پابده، مقادیر (S₁+S₂) و TOC حاصل از پیرولیز راک- اول نمونه‌ها با مقادیر استاندارد آنها ارزیابی شد (شکل ۴). نتایج این شکل نشان دادند ۱۰ درصد نمونه‌ها در محدوده پتانسیل ضعیف، ۱۸ درصد در محدوده پتانسیل متوسط و ۷۲ درصد در محدوده پتانسیل خوب تا عالی قرار دارند؛ بنابراین، سازند پابده سنگ منشأ با توان هیدروکربن‌زایی متوسط تا عالی در نظر گرفته می‌شود.

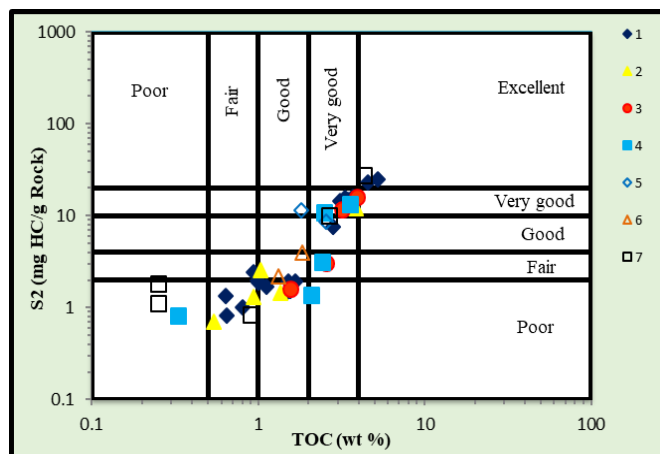
نمودار S₂ در برابر TOC (شکل ۵) نیز برای تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی واحدهای رسوبی به کار می‌رود. طبق این نمودار، پتانسیل هیدروکربن‌زایی نمونه‌های سازند پابده از متوسط تا عالی متغیر است که تأییدکننده شکل ۴ است.



شکل ۳- نمودار تغییرات مقادیر TOC در برابر S_1 برای تعیین نفت برجا و نایرجزای نمونه‌های سازند پابده (برگرفته از Hunt 1996)



شکل ۴- نمودار تغییرات مقادیر TOC در برابر مقادیر (S_1+S_2) برای تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی نمونه‌های سازند پابده (برگرفته از Barker 1974)

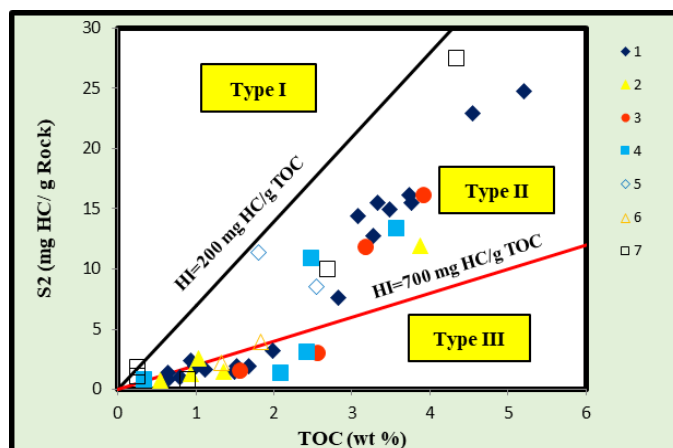


شکل ۵- نمودار S_2 در برابر TOC برای تعیین پتانسیل هیدروکربن‌زایی نمونه‌های سازند پابده (برگرفته از Peters 1986)

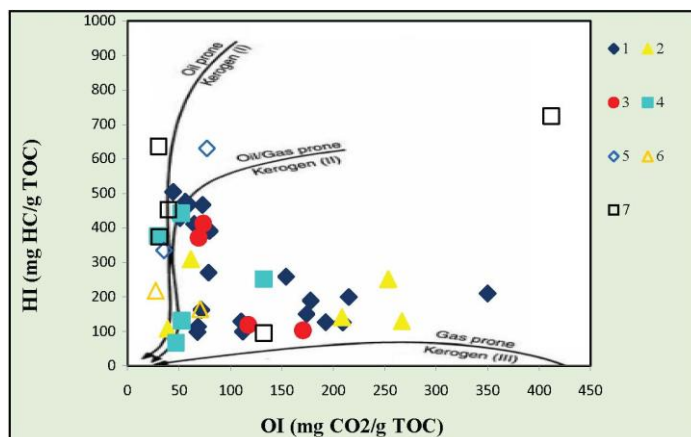
تعیین کیفیت ماده آلی

کیفیت یا نوع ماده آلی (کروژن) موجود در سنگ منشأ با استفاده از نمودار TOC در برابر S_2 تعیین می‌شود (Peters 1986). طبق نظر اسپیتالیه و همکاران (Espitalie et al. 1985)، کروژن نوع I غالباً منشأ دریاچه‌ای و قابلیت تولید ۸۰ درصد وزنی هیدروکربن طی پیرولیز را دارد و نفت‌زاست. کروژن نوع II که منشأ دریایی دارد حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد وزنی هیدروکربن تولید می‌کند. کروژن نوع III که از مواد چوبی با منشأ قاره‌ای تشکیل شده است، حداکثر ۱۵ تا ۳۰ درصد وزنی هیدروکربن تولید می‌کند و گاززاست. لنگفورد و بلانک والرون (Langford & Blanc-Valleron 1990) بیان کرده‌اند در نمودار TOC/ S_2 خطی که در محدوده $HI=700$ mg

HC/gTOC قرار دارد به‌شکل مرز جداکننده بین کروژن نوع I و II و خط دیگری که در محدوده $HI=200$ mg HC/g TOC است به‌شکل مرز جداکننده کروژن نوع II و III عمل می‌کند. باتوجه‌به نمودار TOC در برابر S_2 (شکل ۶)، نمونه‌های سازنده پابده در محدوده کروژن نوع II، III و مخلوطی از این دو نوع کروژن واقع شده‌اند. برای تعیین نوع کروژن از نمودار ون‌کرولن (شکل ۷) نیز استفاده می‌شود؛ طبق این نمودار، کروژن از نوع II، III و مخلوطی از دو نوع کروژن است و چنانچه بلوغ مناسبی داشته باشد، توانایی زایش نفت، گاز و نفت/گاز را دارند. این نمودار (شکل ۷) تأییدکننده شکل ۶ است.



شکل ۶- نمودار تغییرات S_2 در برابر TOC نمونه‌های سازنده پابده (برگرفته از Peters 1986)

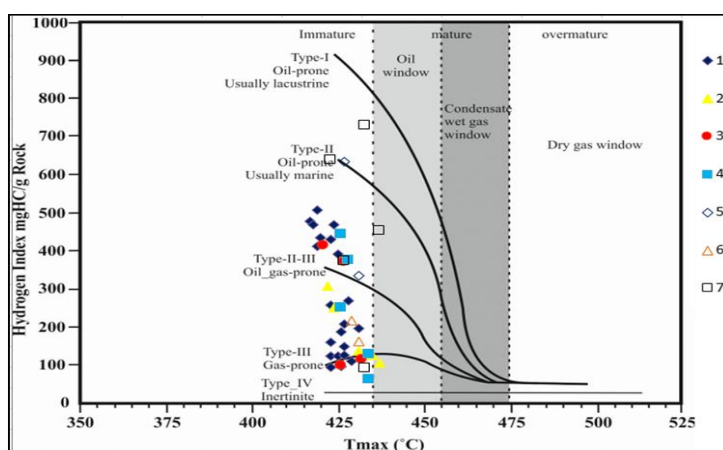


شکل ۷- نمودار تغییرات HI در برابر OI نمونه‌های سازنده پابده

بلوغ حرارتی و نوع کروژن

به‌منظور تعیین بلوغ ماده آلی و نوع آن از نمودار شاخص هیدروژن در برابر Tmax استفاده می‌شود (Espitalié et al. 1985). محدوده بلوغ Tmax برای انواع مختلف ماده آلی متفاوت است (Tissot & Walte 1984; Bordenave 1993). در روش پیرولیز، پنجره زایش نفت از کروژن نوع I و II در درجه‌حرارت بین ۴۳۰ تا ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد و تولید گاز خشک از کروژن نوع III در بیشتر از ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد است (Tissot et al. 1987; Peters 1986). بر اساس شکل ۸، مقادیر Tmax برای نمونه‌های مطالعه‌شده ۴۱۷ تا ۴۳۷ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین، نمونه‌های سازند پابده عمدتاً در انتهای مرحله دیازنز قرار دارند و وارد پنجره تولید نفت

نشده‌اند. طبق این نمودار، فقط تعداد کمی (حدود ۶/۸ درصد) از نمونه‌ها در ابتدای محدوده پنجره نفت‌زایی قرار دارند. بر اساس توزیع نمونه‌ها در نمودار یادشده، کروژن بیشتر نمونه‌ها از نوع II، III و ترکیبی از این دو نوع است (تأییدکننده نمودارهای ون‌کرولن و S1 در برابر TOC). باتوجه‌به نابالغ بودن سازند پابده در جنوب فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس بایستی سازند دیگری که پتانسیل هیدروکربن‌زایی مناسب و بلوغ حرارتی کافی داشته باشد، سنگ منشأ اصلی مواد هیدروکربنی در این ناحیه در نظر گرفته شود؛ از این‌رو، می‌توان به سازند کژدومی به‌عنوان سنگ منشأ احتمالی اشاره کرد.



شکل ۸- نمودار تغییرات HI در برابر Tmax به‌منظور تعیین بلوغ حرارتی و نوع کروژن نمونه‌های سازند پابده

رخساره آلی و محیط رسوب‌گذاری

منظور از رخساره آلی تعیین شرایط محیط رسوبی است که در آن مواد آلی همراه با رسوبات نهشته شده‌اند. به‌منظور تعیین رخساره آلی و محیط رسوب‌گذاری از نمودار جونز (Jones 1987) و نمودار HI در برابر OI استفاده می‌شود (شکل ۹). هرکدام از محدوده‌ها و محیط‌های رسوب‌گذاری مربوط به آنها که در این نمودار دیده می‌شوند در جدول ۳ آورده شده‌اند نمودار محدودده رخساره‌های B, BC, C و CD

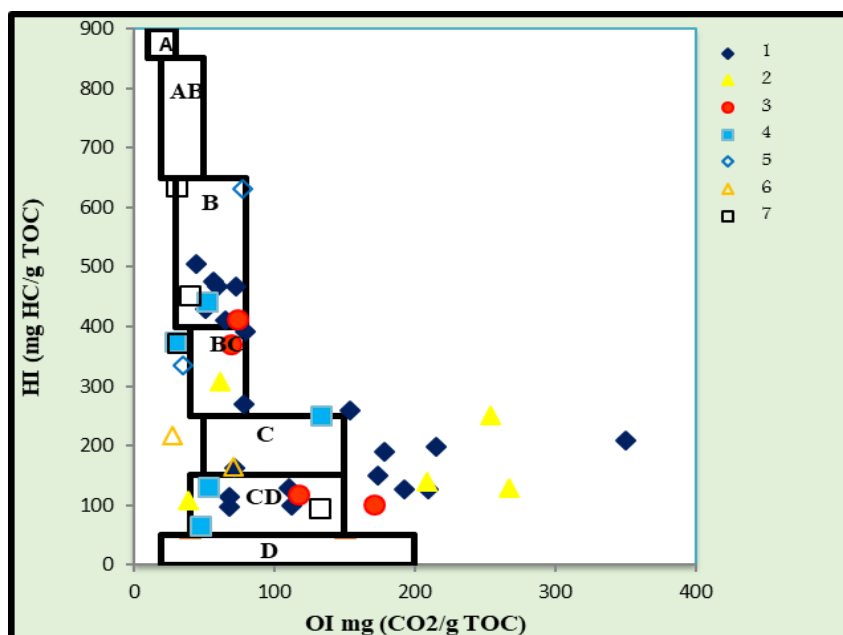
را برای نمونه‌های سازند پابده نشان می‌دهد. این محدوده‌ها شاخص محیط دریایی احیایی، نسبتاً احیایی تا نسبتاً اکسیدان هستند. رخساره‌های تعیین‌شده توانایی تولید نفت در رخساره B تا گاز خشک در رخساره CD را دارند. چنین رخساره‌هایی با نوع کروژن‌های تعیین‌شده در پژوهش حاضر (کروژن‌های نوع II، III و ترکیبی از این دو نوع) مطابقت دارند. طبق نظر بهبهانی و همکاران (Behbahani et al. 2011)، محیط رسوبی سازند پابده در شمال‌غرب حوضه زاگرس و

این دو در سیستم‌های پسروری- پیشرویی- پسروری طی زمان رسوب‌گذاری این سازند توجه‌پذیر است.

به‌منظور زون‌بندی ژئوشیمیایی سازند پابده، تغییرات مقادیر کربن آلی کل، اندیس هیدروژن، توان هیدروکربن‌زایی و نوع کروژن در یکی از چاه‌های مورد مطالعه با یکدیگر تطابق داده شد (شکل ۱۲). همان‌طور که در شکل نشان داده شده است سازند پابده به سه زون ژئوشیمیایی A، B و C تقسیم می‌شود. از آنجا که معمولاً شرایط پسروری سطح آب دریا مقادیر TOC و HI کمتری را نسبت به شرایط پیشرویی سطح آب دریا با مقادیر TOC و HI زیاد نشان می‌دهد، نتیجه گرفته می‌شود زون C (بخش زیرین سازند پابده) در زمان پایین‌بودن سطح نسبی آب دریا ته‌نشست شده که این زمان با کاهش مقادیر TOC و HI هم‌زمان بوده است. با توجه به پایین‌بودن سطح نسبی آب دریا در این زمان، نوع مواد آلی این زون عمدتاً کروژن نوع III است که منشأ خشکی و توان تولید گاز را دارد. زون B (بخش میانی سازند پابده) در زمان بالا بودن سطح نسبی آب دریا ته‌نشست شده است و مقادیر بیشتری از TOC و HI را نشان می‌دهد. کروژن‌های این زون عمدتاً از نوع II و دریایی‌اند و توان تولید نفت را دارند. وجود شیل‌های قهوه‌ای (مشخص شده در ستون سنگ‌شناسی) در این زون تأییدکننده افزایش سطح نسبی آب دریا در این زمان است. زون A (بخش بالایی سازند پابده) در زمان پایین‌آمدن مجدد سطح نسبی آب دریا و با کاهش مقادیر TOC و HI ته‌نشست شده است. نوع مواد آلی این زون عمدتاً کروژن نوع III با منشأ خشکی و توان تولید گاز است.

جنوب فروافتادگی دزفول از رمپ بیرونی با رخساره‌های پلاژیک (شرایط احیایی تا کمی احیایی) به شکل تدریجی به رمپ میانی با رخساره‌های پشته‌های الیتی دارای انرژی زیاد و تحت‌تأثیر توفان (شرایط نسبتاً اکسیدان) و در نهایت به لاگون (رمپ درونی) تغییر می‌کند؛ بنابراین، تغییرات جانبی رخساره‌ها و فرایندهای توفانی عوامل احتمالی‌ای هستند که تنوع رخساره‌های آلی و کروژن‌های سازند پابده را توجیه می‌کنند. شکل ۱۰ به‌طور شماتیک محیط رسوبی، موقعیت رخساره‌های آلی و نوع کروژن در سازند پابده را در منطقه مطالعه‌شده نشان می‌دهد.

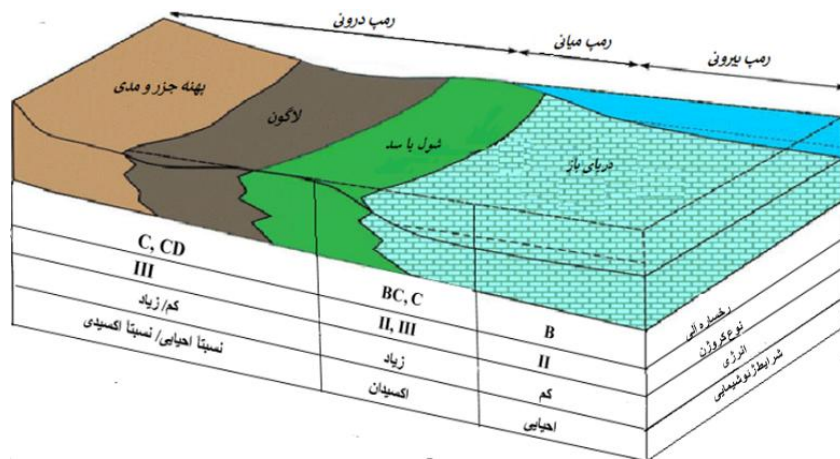
علاوه بر محیط رسوبی، تغییرات نسبی سطح آب دریا (پسروری و پسروری) از عواملیست که سبب ایجاد تغییرات عمودی رخساره‌ها در توالی‌های رسوبی می‌شود. نمودار HI در برابر TOC (Dean et al. 1986) در سازند پابده (شکل ۱۱) متغیربودن شرایط محیطی را در اثر پیشرویی و پسروری‌های آب دریا در زمان نهشته‌شدن این سازند نشان می‌دهد. علیزاده و همکاران (Alizadeh et al. 2012) با بررسی‌های چینه‌نگاری سکانسی سازند پابده در شمال غرب حوضه زاگرس و جنوب فروافتادگی دزفول نشان دادند در زمان پائوسن پسین تا ائوسن میانی (بخش زیرین سازند پابده) سطح نسبی آب دریا پایین (سیستم تراکت پسرورنده)، در زمان ائوسن پیشین (بخش میانی سازند پابده) سطح نسبی آب دریا بالا (سیستم تراکت پیش‌رونده) و در زمان الیگوسن پیشین (بخش بالایی سازند پابده) دوباره سطح نسبی آب دریا پایین (سیستم تراکت پسرورنده) بوده است؛ بنابراین، تنوع رخساره‌های آلی و نوع کروژن‌های سازند پابده با منشأ دریایی، خشکی و مخلوطی از



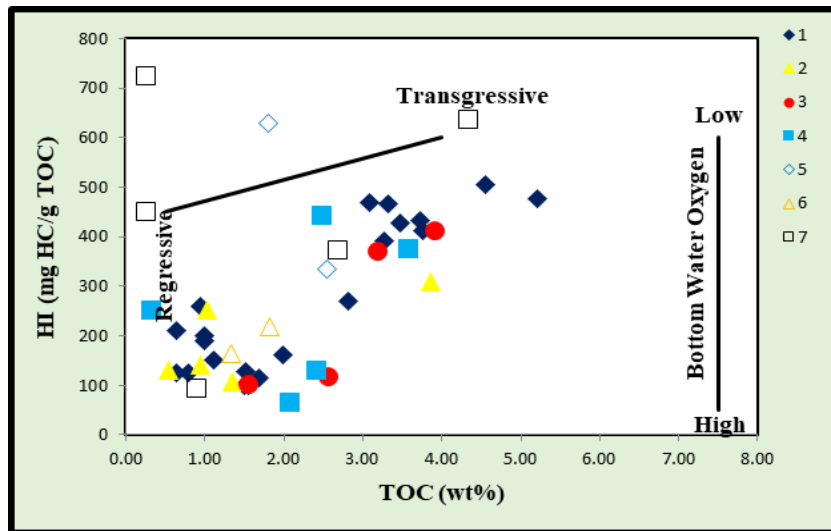
شکل ۹- نمودار TOC در برابر HI برای تعیین رخساره‌های آلی نمونه‌های سازند پابده (برگرفته از Jones 1987)

جدول ۳- رخساره‌های آلی به همراه مواد آلی غالب، موجودات اولیه و محیط رسوبی (برگرفته از Jones 1987)

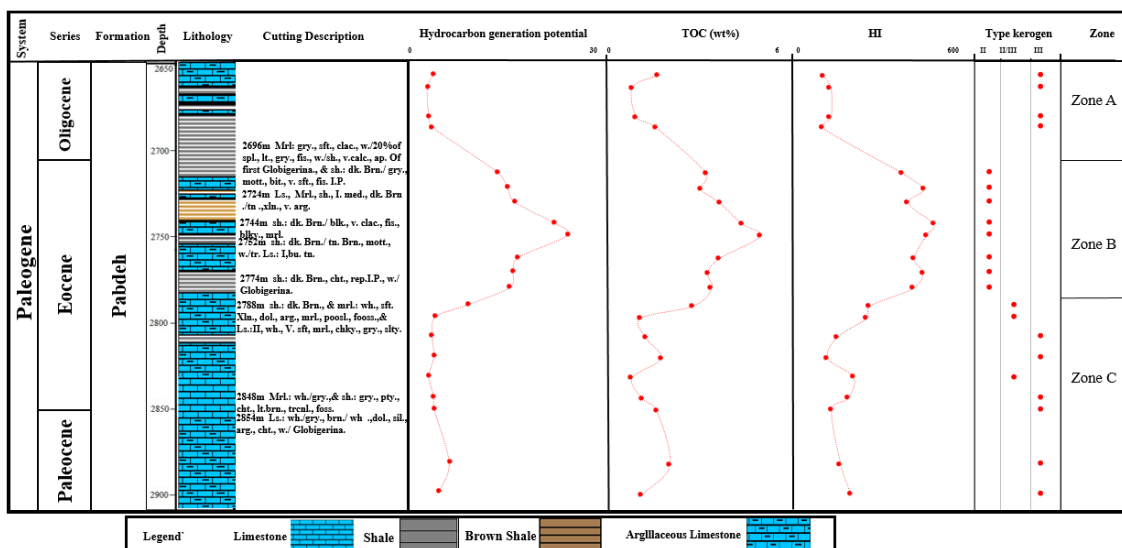
Organic Facies	Dominant Organic Matter	Primary Organisms	Depositional Environments	Primary Products
A	Algal, amorphous	Botyococcus, Tasmanites	Lacustrine, persistent anoxia stratified H2O. Warm Humid climate	OIL
AB	Amorphous, highly flour. Minor terrestrial input	Conspicuous Tasmanites	Persistent anoxia, transgressive, warm-equable climate. Well laminated	OIL
B	Amorphous, common. Terrestrial input	Conspicuous Tasmanites during Cretaceous. Marine/non-marine algae & associated bacteria	Less persistent anoxia marine or lacustrine.	OIL
BC	Mixed; some oxidation. Partially oxidized during Cretaceous. Algal	Variable algal input. Diverse	Terrestrial & marine organic matter. Pro-delta muds-outer shelf	LIQUIDS and GAS
C	Terrestrial; some oxidation.	Telinite&Colinite. Low amounts of spores, cuticles &resinite	Oxic H2O-Moderate rapid deposition in anoxic conditions	GAS Prone
CD	Oxidized; reworked organic matter	Varying amounts terrestrial & reworked organic matter Some fine grain amorphous organic matter of unknown origin.	Marine fore-deeps in front of rising mountain ranges	Moderate DRY GAS capacity
D	Highly Oxidized	Dominant inertinite Highly Oxidized or re- deposited residual organic matter.	Deep ocean to terrestrial	DRY GAS only at high maturity



شکل ۱۰- مدل محیط رسوبی، موقعیت رخساره‌های آلی و نوع کروژن سازند پابده در منطقه مطالعه‌شده



شکل ۱۱- نمودار مقادیر TOC در برابر HI به منظور تعیین تغییرات سطح آب دریا در زمان رسوب‌گذاری سازند پابده (برگرفته از Dean et al. 1986).



شکل ۱۲- زون‌بندی ژئوشیمیایی سازند پابده بر اساس تطابق بین تغییرات مقادیر توان هیدروکربن‌زایی، کربن آلی کل، اندیس هیدروژن و نوع کروژن در یکی از چاه‌های مطالعه‌شده

نتیجه

نسبی آب دریا با کاهش مقادیر TOC و HI ته‌نشست یافته و مواد آلی موجود در این دو زون عمدتاً کروژن‌های نوع III و مخلوطی از کروژن‌های II و III است.

ارزیابی ژئوشیمیایی سازند پابده در فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس و توجه به نوع کروژن‌ها (II)، III و مخلوطی از این دو) و توان هیدروکربن‌زایی متوسط تا عالی نشان می‌دهد این سازند قابلیت تولید نفت و گاز را دارد، ولی باتوجه‌به بلوغ کم در مراحل دیازنز باقی مانده است؛ بنابراین، سازند پابده (به‌ویژه زون میانی) در جنوب فروافتادگی دزفول و سواحل شمال‌غربی خلیج فارس منبع هیدروکربنی غیرمتعارف احتمالیست که باید بررسی‌های بیشتری درباره آن انجام شوند.

References

- Alizadeh B. Sarafdokht H. Rajabi M. Opera A. and Janbaz M. 2012. Organic geochemistry and petrography of Kazhdumi (Albian–Cenomanian) and Pabdeh (Paleogene) potential source rocks in southern part of the Dezful Embayment, Iran. *Organic Geochemistry*, 49: 36-46.
- Alizadeh B. Janatmakan N. Ghalavand H. and Ghobeishavi A. 2012. Geochemistry and Sequence Stratigraphy of Pabdeh Formation in Mansuri Oil Field, southwest Iran. *Advanced Applied Geology*, 2(5), 27-40. (In Persian).
- Aghanabati A. 2004. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. 586 p. (In Persian).
- Barker C. 1974. Pyrolysis techniques for source-rock evaluation, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58: 2349–2361.
- Behar F. Beaumont V. De. and Penteadó H. L. 2001. Rock-Eval6 technology: performances and developments. *Oil and Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 56, 2: 111-134.
- Behbahani R. Khodabakhsh S. Mohseni H. and Atashmard Z. 2011. Evidences of tempestite and turbidite deposits in Pabdeh Formation, north and southwest of Zagros basin. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 27: 73- 96 (in Persian).
- Bordenave M.L. 1993. *Applied Petroleum Geochemistry*, Edition Teaching, Paris, 524 p.
- Bordenave M. L. 2002. The Middle Cretaceous to Early Miocene Petroleum System in the Zagros Domain of Iran, and its Prospect Evaluation, *American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting*, Houston, Texas, 1-9.

باتوجه‌به مطالعه‌های انجام‌شده و تفاسیری که از نتایج پیرولیز راک- اول ۶ روی نمونه‌های سازند پابده در سواحل شمال‌غربی خلیج فارس و جنوب فروافتادگی دزفول به دست آمده است و باتوجه‌به منحنی تغییرات S1 در برابر TOC، ۳ نمونه آلودگی داشتند و از ادامه مطالعه حذف شدند. بر اساس نمودارهای TOC/S2 و ون‌کروتن مشخص شد مواد آلی این سازند از کروژن‌های نوع II، III و مخلوطی از این دو نوع کروژن هستند. نمودار Tmax/HI نیز نوع کروژن‌های سازند پابده را تأیید کرد. نمودارهای TOC/S2 و (S1+S2)/TOC نشان دادند سازند پابده در منطقه مطالعه‌شده توان هیدروکربن‌زایی متوسط تا عالی و بنابراین توانایی تولید نفت و گاز را دارد. بر اساس نمودار بلوغ ماده آلی (Tmax/HI) نمونه‌های سازند پابده عمدتاً در انتهای مرحله دیازنز قرار دارند و فقط ۶/۸ درصد از نمونه‌ها وارد پنجره نفت‌زایی شده‌اند. به‌طورکلی سازند پابده در این ناحیه توان هیدروکربن‌زایی خوبی دارد، ولی نابالغ است و به بلوغ کافی برای تولید هیدروکربن نرسیده است. نمودار HI/OI نشان داد بیشتر نمونه‌ها در شرایط محیط دریایی- دریاچه‌ای نسبتاً احیایی (B) و محیط‌های عمیق مجاور نقاط کوه‌زایی (CD) و مقدار کمی از آنها در محیط‌های دارای مواد آلی دریایی و قاره‌ای با رسوب‌گذاری و شرایط نسبتاً اکسیدان (BC) و محیط‌های با سرعت رسوب‌گذاری متوسط در شرایط احیایی (C) قرار دارند. متغیربودن شرایط رسوب‌گذاری و تغییرات جانبی رخساره‌ها ازجمله عواملی‌اند که تنوع رخساره‌های آلی و کروژن‌های سازند پابده را توجیه می‌کنند. سازند پابده در منطقه مطالعه‌شده از نظر پتانسیل هیدروکربن‌زایی یکنواخت نیست و به سه زون ژئوشیمیایی A، B و C تقسیم می‌شود. زون میانی (B) در زمان بالا بودن سطح نسبی آب دریا با افزایش مقادیر TOC و HI ته‌نشست شده و مواد آلی موجود در این زون عمدتاً کروژن نوع II و دریایی است؛ درحالی‌که زون‌های زیرین (C) و بالایی (A) در زمان پایین بودن سطح

- American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74 (6): 799-804.
- Mashhadi Z.S. Rabbani A.R. and Kamali M.R. 2015. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation modeling of the Kazhdumi (Early Cretaceous), Gurpi (Late Cretaceous) and Pabdeh (Paleogene) formations, Iranian sector of the Persian Gulf, *Marine and Petroleum Geology*, 66: 978-997.
- Miller R. G. 1995. A future for exploration geochemistry. *Organic Chemistry: Developments and Applications to Energy, Climate Environment and Human History*, AIGOA, Donostia, 412-414.
- Mirzaee Mahmoodabadi R. Lasemi Y. and Afghah M. 2009. Depositional environment and sequence stratigraphy of the Pabdeh Formation in Shiraz area. *Journal of Geoscience*, 19(73): 139-146. doi: 10.22071/gsj.2010.57203. (In Persian).
- Peters K. E. 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70: 318-329.
- Peters K. E. and Cassa M. R. 1994. Applied source rock geochemistry. In: L. B. Magoon and W. G. Dow (Eds.), *the Petroleum System - From Source to Trap*: American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 93-117.
- Peters K. E.'s and Fowler M. G. 2002. Application of petroleum geochemistry to exploration and reservoir management, *Organic Geochemistry*, 33: 5-36.
- Tissot B.P. and Welte D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Tissot B. P. Pelet R. and Ungarner P. H. 1987. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71: 1445-1466.
- Wang Z. and Stout S. 2006. Oil spill environmental forensics: fingerprinting and source identification, Elsevier, 620 p.
- Bordenave M.L. and Herge J.A. 2002 "The Influence of tectonics on the Entrapment of Oil in the Dezful Embayment, Zagros Fold belt, Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 28(4): 339-368.
- Dahl B. Bojesen-Koefoed J. Holm A. Justwan H. Rasmussen E. and Thomsen E. 2004. A New Approach to Interpreting Rock-Eval S₂ and TOC Data for Kerogen Quality Assessment. *Organic Geochemistry*, 35: 1461-1477.
- Dean W.E. Arthur M.A. and Claypool G.E. 1986. Depletion of ¹³C in Cretaceous marine organic matter: Source, diagenetic, or Mineralogists, *New Orleans*, 263-282.
- Espitalié J. Deroo G. & Marquis F. 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, 40(6): 755-784.
- Hunt J.M. 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*, W.H. Freeman and Company, New York, 2nd edition, 764 p.
- James G.A. Wynd J.G. 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium, agreement area, *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, 49: 2182-2245.
- Jones R.W. 1987. *Organic facies*. *Advances in Petroleum Geochemistry*, Academic Press, New York, USA.
- Karimi A.R. Rabbani A.R. and Kamali M.R. 2016. A bulk kinetic, Burial history and thermal modeling study of the Albian Kazhdumi and the Eocene-Oligocene Pabdeh formations in the Ahvaz Anticline, Dezful Embayment, Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146: 61-70.
- Karimi A.R. Rabbani A.R. Kamali M.R. and Heidarifard M.H. 2016. Geochemical evaluation and thermal modeling of the Eocene-Oligocene Pabdeh and Middle Cretaceous Gurpi formations in the northern part of the Dezful Embayment. *Arabian Journal of Geosciences*, 432: 1-16.
- Kaufman R.L. Ahmed A.S. and Elsinger R.J. 1990. Gas Chromatography as a development and production tool for fingerprinting oils from individual reservoirs, applications in the Gulf of Mexico, in D. Schumaker, and B. F. Perkins, (Eds.), *Proceedings of the 9th Annual Research Conference of the Society of Economic and Paleontologists and Mineralogists*, New Orleans, 263-282.
- Lafargue E. Espitalié J. Marquis F, and Pillot D. 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and in soil contamination studies, *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 53, 4: 421-437.
- Langford F.F. and Blanc-Valleron M.M. 1990. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using of pyrolyzable hydrocarbons vs. total organic carbon,