

تاثیر کانی‌های رسی بر مهاجرت اولیه هیدروکربن در سنگ منشا پابده، میدان نفتی کرنج

فاطمه صابری^۱، محبوبه حسینی‌برزی^{۲*} و علی اپرا^۳

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳- شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب (NISOC)

نویسنده مسئول: m_hosseini@sbu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۲/۲۵ پذیرش: ۹۹/۳/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سازند پابده در ضخامت‌هایی از خود در برخی از میادین نفتی، غنی از ماده آلی بوده و به عنوان سنگ‌منشا می‌تواند مطرح گردد که در این پژوهش به تاثیر کانی‌های رسی همراه با تولید هیدروکربن، بر مهاجرت اولیه هیدروکربن این سازند در یکی از چاه‌های میدان نفتی کرنج پرداخته شده است. بر اساس نتایج راکاؤل، پراش اشعه‌ایکس، تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی قبل و بعد از حرارت دادن نمونه‌های انتخاب شده و ایجاد بلوغ حرارتی مصنوعی، مشخص گردید که فرآیند ایلیتی شدن و تولید هیدروکربن، می‌تواند مسئول حمل هیدروکربن در سنگ باشد که این فرآیند به عنوان مهاجرت اولیه شناخته می‌شود. در واقع با به بلوغ رسانیدن سنگ‌منشا نابالغ، طی حرارت دادن در آزمایشگاه، نشان داده شد که فرآیند ایلیتی‌زایی به افزایش فشار منغذی طی آزاد شدن آب، کانی‌های شکننده نظیر کوارتز و ایلیت منجر می‌شود که همراه با افزایش فشار سیال منغذی حاصل از تولید هیدروکربن، می‌تواند باعث ایجاد ریزشکستگی شود. بر این اساس، اولین ریزشکستگی‌ها، ترجیحاً در موقعیت‌های ضعیف سنگ با بیش‌ترین میزان تبدیل کانی‌های رسی ایلیت/اسمکتیت به کانی‌های شکننده ایلیت و کوارتز ایجاد شده و توضیحی برای مهاجرت اولیه در سازند پابده در میدان کرنج می‌باشد.

واژگان کلیدی: مهاجرت اولیه، ریزشکستگی، ایلیتی‌زایی، بلوغ مصنوعی، میدان نفتی کرنج

پیشگفتار

شده است. تاثیر این مکانیسم‌ها ممکن است متفاوت باشد اما اعتقاد بر این است که ریزشکستگی‌ها در حمل هیدروکربن‌ها به ویژه در مسافت‌های طولانی نقش بیش‌تری را ایفا می‌کنند (اسنارسکی، ۱۹۶۱؛ تیسوت و ولت، ۱۹۷۸؛ انگلند و همکاران، ۱۹۸۷؛ هانت، ۱۹۹۰؛ لافارگو و همکاران، ۱۹۹۴؛ رودکویچ و همکاران، ۱۹۹۴؛ لافارگو و همکاران، ۱۹۹۸؛ اوگویر-سیمونین و همکاران، ۲۰۱۶؛ چنچنی و همکاران، ۱۹۹۶؛ لاش و انگلدر، ۲۰۰۵؛ کلانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ تکسیرا و همکاران، ۲۰۱۷؛ پناهی و همکاران، ۲۰۱۸) تجربیات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تبدیل کروژن به هیدروکربن با ایجاد فشار محلی منجر به تشکیل ریزشکستگی‌هایی می‌شود که گسترش آن‌ها به وسیله آنیزوتروپی و خصوصیات مکانیکی سنگ کنترل می‌شود (ورنیک، ۱۹۹۴؛ کوچنکو و همکاران، ۲۰۱۱؛ گلتر و همکاران، ۲۰۱۶). اما آزمایشات اخیر روی شیل‌ها نشان داده است که بیش‌تر

فرآیند مهاجرت نفت به دو شکل مهاجرت اولیه و مهاجرت ثانویه انجام می‌شود (ایلینگ، ۱۹۹۳). مهاجرت اولیه به حرکت نفت و گاز در بخش دانه‌ریز سنگ منشا بالغ و مهاجرت ثانویه به هر حرکت هیدروکربن به بیرون از آن اطلاق می‌شود. مهاجرت اولیه در حقیقت یکی از ناشناخته‌های زمین‌شناسی نفت به شمار می‌آید که مکانیسم آن هنوز به خوبی روشن نشده است (هانت، ۱۹۹۶). با این حال، مکانیسم‌های مختلفی برای حمل و نقل هیدروکربن در طول کاتاژنز سنگ‌های غنی از مواد آلی من جمله مهاجرت از طریق یک شبکه پیوسته مواد آلی (مک‌آلیف، ۱۹۷۹)، مهاجرت ریز قطرات، مهاجرت میسل^۱ (کوردل، ۱۹۷۳)، مهاجرت امولسیون نفت، مهاجرت روغن محلول در آب (بری و فاستر، ۱۹۸۰) و مهاجرت روغن محلول در گاز (پرایس، ۱۹۸۹) پیشنهاد

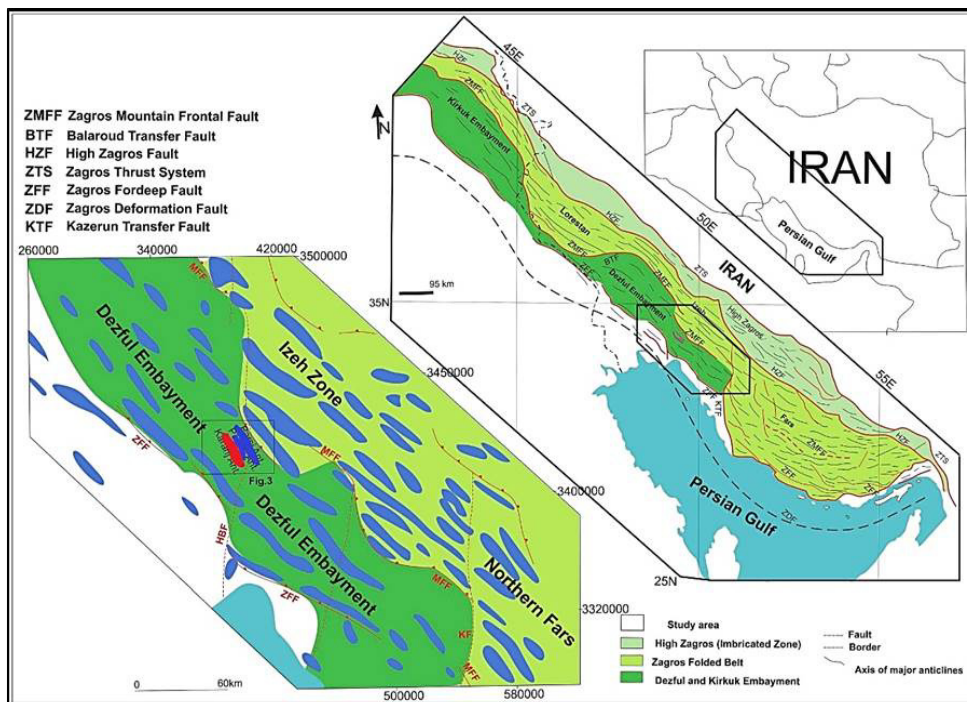
¹ micelle

از جمله تبدیل کانی‌های رسی به یکدیگر در طی دیاژنز، فشار ناشی از تولید هیدروکربن و نقش آن‌ها در ایجاد ریزشکستگی در طول سنگ‌منشا، از اهمیت چشمگیری برخوردار است. ما در این مطالعه قصد داریم با استفاده از داده‌های شیمی آلی، پراش اشعه ایکس، تصاویر میکروسکوپ الکترونی قبل و بعد از حرارت دادن توسط کوره و بلوغ حرارتی مصنوعی به تاثیر تبدیل کانی‌های رسی همراه با بلوغ حرارتی، به باز شدن ریزشکستگی‌ها در سنگ‌منشا پابده پردازیم. هم‌چنین، از آنجایی که سازند پابده از نفوذپذیری و تراوایی کمی برخوردار است و هیدروکربن‌های تولیدی از این سازند در تخلخل‌های منفرد به دام افتاده‌اند، مطالعه عوامل مهاجرت هیدروکربن در مخازن نامتعارف، اهمیت دو چندانی در صنعت نفت می‌تواند داشته باشد.

موقعیت زمین‌شناسی

ساختار تاقدیسی کرنج یکی از میداین مهم نفتی ایران در جنوب‌باختر حوضه رسوبی زاگرس و در جنوبی‌ترین بخش فروافتادگی دزفول شمالی می‌باشد. میدان نفتی کرنج در ۱۱۵ کیلومتری جنوب‌خاوری اهواز و ۴۰ کیلومتری خاور رامهرمز واقع شده است که درجه API این میدان ۳۳/۸ می‌باشد (شکل ۱).

ریزشکستگی‌ها موازات لایه‌بندی رشد می‌کنند (کوبچنکو و همکاران، ۲۰۱۱؛ پناهی و همکاران، ۲۰۱۲؛ سیف و همکاران، ۲۰۱۶؛ سیف و همکاران، ۲۰۱۷؛ فیگروا پیلز و همکاران، ۲۰۱۷) و میزان رشد ریزشکستگی‌ها با فشار حاصل از تولید نفت و دما در ارتباط مستقیم است (جین و همکاران، ۲۰۱۰). گتیکسیرا و همکاران (تکسیرا و همکاران، ۲۰۱۷) با انجام آزمایش روی شیل نفتی *Green River* نشان دادند که شکل‌گیری شبکه‌های ریزشکستگی ارتباط مستقیمی با تعداد و توزیع کروژن و وضعیت تنش تفریقی دارد، به گونه‌ای که استرس فشاری که عمود بر لایه‌بندی است باعث رشد ریزشکستگی در جهت عمودی می‌شود. کلانی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که توسعه ریزشکستگی‌ها به چندین عامل چون پالئوتکتونیک، ترکیب کانی‌شناسی و تراکم شیمیایی بستگی دارد. سیف و همکاران (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷) ریزشکستگی‌های خالی را با ایجاد بلوغ حرارتی مصنوعی در شیل‌های *Green River* بررسی کردند و مشاهده نمودند که اندازه آن‌ها با افزایش دما افزایش می‌یابد و این ریزشکستگی‌ها می‌توانند نقش موثری در حرکت هیدروکربن‌ها به موازات لایه‌بندی داشته باشد (بروس، ۱۹۸۴). سازند پابده از جوان‌ترین سنگ‌منشاهای شناخته شده است که مطالعه‌ی عوامل حرکت هیدروکربن در آن،



شکل ۱. نمایش موقعیت جغرافیایی میدان کرنج (تاقدیس قرمز رنگ) (وطن‌دوست و همکاران، ۲۰۱۹)

روش‌های مطالعه

در این راستا، ابتدا از داده‌های پتروفیزیکی و نتایج آنالیز دستگاه راکایول ۶ شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب در جهت ارزیابی پتانسیل ژئوشیمیایی سازند پابده به عنوان سنگ‌منشا استفاده شد و افق‌هایی از سازند پابده که به عنوان سنگ‌منشا می‌توانستند عمل کرده باشند را از سایر افق‌های با مقادیر ناچیز ماده آلی، متمایز نموده و امکان انتخاب نمونه‌های بعدی برای آنالیزهای دقیق فراهم گردید (پیتر، ۲۰۰۵). به این ترتیب ضخامت غنی از ماده آلی در سازند پابده محدود به ۸ مغزه در عمق ۳۰۳۹/۵-۳۰۲۶ چاه اکتشافی کرنج می‌باشد که ابتدا ۴ نمونه با ویژگی ژئوشیمی تقریباً مشترک از سازند پابده با کروژن‌های نوع II و حداقل آلودگی هیدروکربنی که در مرحله بلوغ اولیه می‌باشند و در صورت بالغ شدن، توانایی تولید نفت را دارند (شکل ۲)، برای بلوغ حرارتی مصنوعی انتخاب گردید (جدول ۱) (شکل ۲). این نمونه‌ها قبل از حرارت، توسط میکروسکوپ الکترونی در دانشگاه شهید بهشتی تصویربرداری شدند تا میزان تغییرات و تبدیل کانی رسی

(به ویژه کانی اسمکتیت) و ریزشکستگی‌های مربوط به قبل و بعد از بلوغ حرارتی از یکدیگر تشخیص داده شود. سپس با بررسی نتایج *XRD* دو نمونه از چهار نمونه انتخابی، شناختی اولیه از کانی‌ها سنگ‌منشا در اختیار ما قرار داده شد تا تاثیر کانی‌های تشکیل‌دهنده بر ایجاد توسعه شکستگی در نمونه‌ها بررسی شود. در نهایت نمونه‌ها بر اساس کینتیک کروژن (جهت کسب اطمینان از اینکه کروژن نمونه‌های نابالغ انتخاب شده طی انرژی فعال‌سازی در دمای ۴۲۰ درجه شروع به زایش هیدروکربن می‌کنند) نمونه‌ها در کوره تحت گاز نیتروژن تا ۴۲۰ درجه به مدت ۴۰ دقیقه حرارت داده شدند (طبق جدول ۱) و مجدداً همان نمونه‌ها بعد از حرارت توسط میکروسکوپ الکترونی مطالعه گردید. سپس نمونه ۱۸ (۳۰۳۹/۵) با بیش‌ترین مقدار *TOC* به منظور اطمینان در روند صحیح حرارت‌دهی و تولید هیدروکربن توسط کروژن‌های نمونه به دستگاه آیتروسکن داده شد تا نقش فشار ناشی از تولید هیدروکربن با ریزشکستگی‌های مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپی تطبیق داده شود.

جدول ۱. مشخصات ژئوشیمیایی و الگوی حرارتی نمونه‌های انتخابی برای بلوغ حرارتی مصنوعی

Sample (Depth)	TOC	Temperature (°C)	الگوی حرارتی
۱ (۳۰۲۶)	۲/۳	۴	در مدت زمان ۱۰ دقیقه دما به ۴۲۰ می‌رسد و به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها در دمایی نهایی (۴۲۰) حرارت داده می‌شوند. کل دوره حرارت‌دهی ۱۰ دقیقه می‌باشد.
۴ (۳۰۳۰/۵)	۲/۲۵	۴۲۰	
۶ (۳۰۳۴)	۱/۷۵	۴۲۰	
۸ (۳۰۳۹/۵)	۴/۷۵	۴۲۰	

خط مرزی ۰/۱، عدم آلودگی نمونه‌ها تایید گردید (شکل ۳ A).

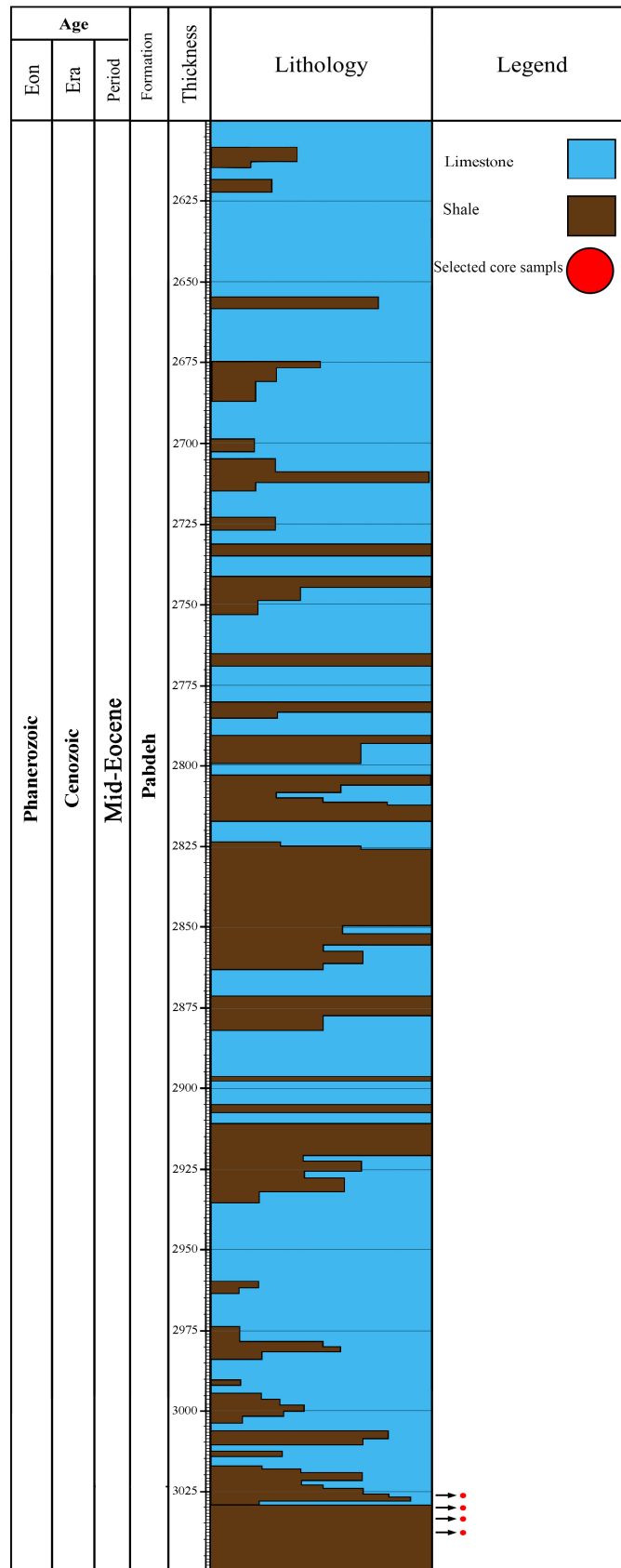
بحث و بررسی

ارزیابی ژئوشیمیایی با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز راکایول

از بین ۸ نمونه مربوط به ضخامت مورد نظر، آنالیز راکاول ۴ نمونه انتخابی که در بخش میانی این سازند می‌باشد مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲) و همانطور که در روش‌ها آمده، سعی بر آن شد که نمونه‌های انتخابی از لحاظ خصوصیت ژئوشیمیایی یکسان و تنها متغیرشان مقدار پتانسیل هیدروکربن‌زایی و کانی رسی باشد تا تاثیر آن‌ها بر ایجاد ریزشکستگی مورد بحث قرار گیرد. قبل هر کار، به منظور اطمینان از عدم آغشتگی نمونه‌های انتخابی به مواد هیدروکربنی از نمودار *S_r/TOC* استفاده شد، و با قرارگیری نمونه‌ها (با رنگ آبی مشخص شده‌اند) زیر شیب

تعیین نوع هیدروکربن احتمالی تولیدی با استفاده از نتایج آنالیز راکایول

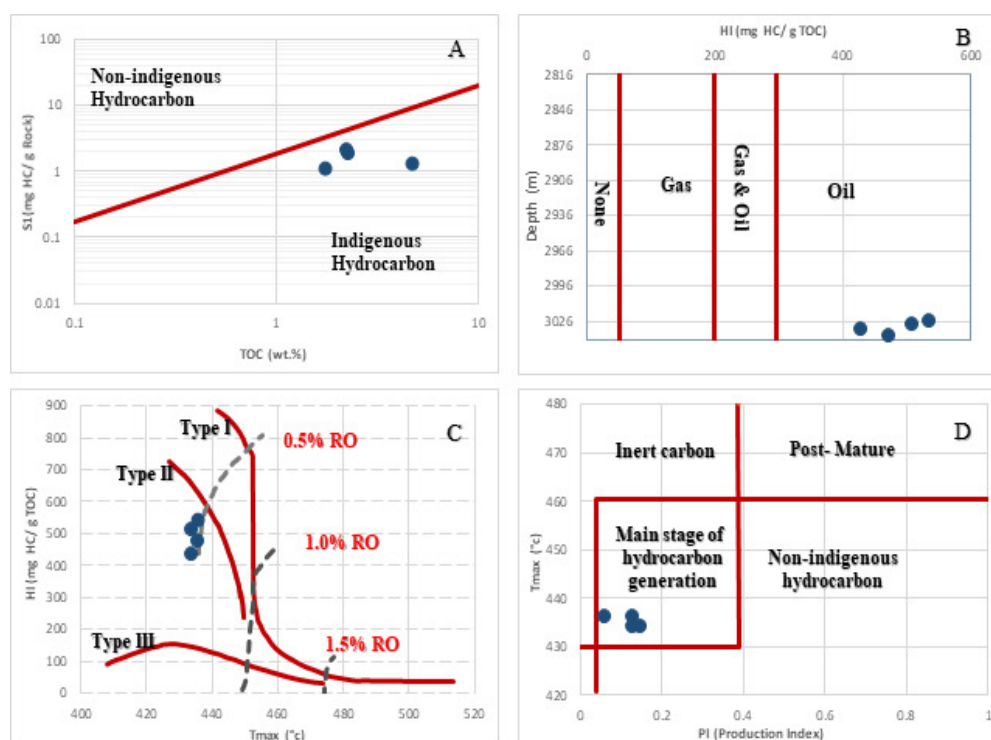
بر مبنای مطالعات پیتر و کاسا (۱۹۹۴) با استفاده از مقادیر اندیس هیدروژن (*HI*) نوع هیدروکربن تولیدی از نمونه‌های سازند پابده مورد بررسی قرار گرفتند. نمودار شکل ۳ B نشان‌دهنده‌ی این است که نمونه‌های انتخابی در صورت بالغ شدن، توانایی تولید نفت را دارند، زیرا با انتخاب نمونه‌هایی که تولیدات گازی داشته باشد، مقدار فشار منفذی لازم برای ایجاد ریزشکستگی در نمونه ایجاد نمی‌شود و از طریق انتشار از نمونه خارج می‌گردد.



شکل ۲. ستون سنگ‌شناسی چاه اکتشافی میدان کرنج و انتخاب ۴ نمونه از بخش شیلی سازند پابده

جدول ۲. نتایج آنالیز راک‌ایول نمونه‌های میدان نفتی کرج. بر اساس داده‌های پتروفیزیکی و داده‌های راک‌اول ضخامت غنی از مواد آلی محدود به ۸ نمونه مغزه به عمق ۳۰۳۹/۵-۳۰۲۶ می‌باشد که بر اساس آنالیز داده‌های راک‌اول ۴ نمونه مناسب (با قرمز نشان داده شده است) برای بلوغ حرارتی مصنوعی انتخاب گردید.

NO.	Depth (m)	FM	Sample	S_1 (mg HC/g Rock)	S_2 (mg HC/g Rock)	PI	T_{MAX} (°C)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg CO ₂ /g TOC)	TOC (Wt.%)
1	3026	M.PD	Core	1.78	12.39	0.13	436	538	13	2.3
2	3028	M.PD	Core	12.47	14.91	0.46	443	596	26	3
3	3028	M.PD	Core	15.2	19.93	0.43	446	469	29	4.25
4	3030	M.PD	Core	1.97	11.44	0.15	434	509	11	2.25
5	3032	M.PD	Core	1.43	12.66	0.1	434	488	11	2.59
6	3034	M.PD	Core	1.1	7.54	0.13	434	431	18	1.75
7	3036	M.PD	Core	1.67	11.45	0.13	434	514	15	2.23
8	3039.5	M.PD	Core	1.31	22.35	0.06	436	474	6	4.72



شکل ۳. (A) نمودار S_1 / TOC هیدروکربن‌های مهاجرت یافته را از هیدروکربن‌های درجا تفکیک می‌کند (اقتباس از هانت، ۱۹۹۶). (B) تعیین نوع هیدروکربن تولیدی از نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که نمونه‌های انتخابی نفت‌زا می‌باشند (اقتباس از پیترو و کاسا، ۱۹۹۴). (C) نمودار HI در مقابل T_{MAX} نشان می‌دهد نمونه‌ها از کروژن نوع II و در ابتدای بلوغ حرارتی می‌باشند (آکینلووا، ۲۰۰۵). (D) نمودار T_{MAX} در مقابل PI در جازا بودن هیدروکربن تولیدی را نشان می‌دهد (هانت، ۱۹۹۶).

می‌دهد از نظر بلوغ، در مرحله بلوغ اولیه^۱ قرار دارند. همچنین با قرارگیری نمونه‌ها در محدوده مرحله اصلی تولید هیدروکربن^۲ نمودار شکل ۳ D نشان می‌دهد که نمونه‌ها در ابتدای مرحله تولید هیدروکربن درجا هستند.

تعیین بلوغ ماده آلی توسط پارامترهای راک‌ایول برای تعیین میزان بلوغ حرارتی نمونه‌های مورد مطالعه از نمودار HI در مقابل T_{MAX} استفاده می‌شود (آکینلووا، ۲۰۰۵). بررسی این نمودار (شکل ۳ C) نشان داد که نمونه‌های مربوطه با توجه به قرارگیریشان بر روی منحنی‌ها، از کروژن نوع II می‌باشند و بر اساس میزان انعکاس ویتترینایت (RO%) که حدود ۰.۶۲ درصد را نشان

¹ Early

² Main stage of hydrocarbon generation

نتایج آنالیز XRD

با توجه به جدول ۳ و نتایج XRD دو نمونه از ۴ نمونه انتخاب شده از سازند پابده، مشخص گردید که از نمونه کم عمق تر به نمونه عمیق تر، مقدار درصد کانی کوارتز، ایلیت/ اسمکتیت، دولومیت و پیریت افزایش یافته (که می‌تواند باعث افزایش خاصیت شکنندگی سنگ‌منشا شود) (کلانی، ۲۰۱۵؛ کلانی و همکاران، در مطبوعات؛ نلسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ هیل و همکاران، ۲۰۰۲؛ نی و همکاران، ۲۰۰۹؛ لی و همکاران، ۲۰۰۹؛ تان و همکاران، ۲۰۰۹؛ دینگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ زنگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ نلسون و همکاران، ۲۰۰۱) و نیز کانی‌های کائولینیت و دولومیت آهن‌دار کم شده و سایر کانی‌ها روند خاصی را دنبال نمی‌کنند. با توجه به ضخامت ۱۳ متری بخش غنی از ماده آلی و مقیاس مطالعه در این کار، نمونه‌ها به طور طبیعی (شیب زمین گرمایی و نرخ رسوب‌گذاری) دمای لازم برای تبدیل کامل اسمکتیت به کانی ایلیت- اسمکتیت در آن عمق را تجربه کرده‌اند. این توزیع ناهمگون کانی‌ها در اندازه و اشکال مختلف در طول لایه‌بندی سنگ مادر باعث آنیزوتروپی و زمینه‌ای برای

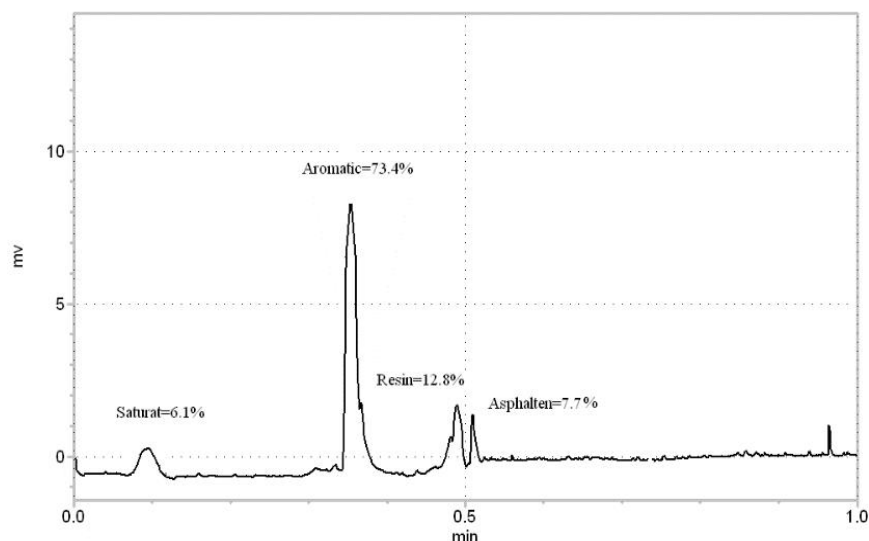
ایجاد ریزشکستگی و حرکت هیدروکربن می‌گردد (فواد و همکاران، ۲۰۱۰).

آیتروسکن

آیتروسکن نمونه ۱۸ (۳۰۳۹/۵)، با بیش‌ترین مقدار TOC، نشان می‌دهد که این نمونه در طول حرارت‌دهی تولید هیدروکربن کرده است (شکل ۴). در واقع کروژن‌های عدسی شکل موجود در این نمونه‌ها به سرعت تحت تاثیر دما شروع به تولید هیدروکربن می‌کنند. این تولید هیدروکربن با افزایش حجم همراه می‌باشد (کرادوک و همکاران، ۲۰۱۸؛ کانفیه و همکاران، ۲۰۱۷) و از آن جایی که شیل‌های پابده گلوگاه‌های کوچکی دارند، این افزایش حجم، تراوایی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و مانع خروج هیدروکربن تولید شده در سنگ منشا می‌شوند. در نتیجه باعث تجمع فشار منفذی در نوک و لبه‌های کروژن می‌شود تا این که به مرز شکستگی سنگ برسد (کانفیه و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۳. داده‌های XRD سنگ منشا پابده میدان کرنج

Depth	Quartz	Calcite	Dolomite	Fe-dolomite	Plg	k-fld	Smectite	kaolinite	Pyrite	Musc	I-S	Chlorite	Clays	Carbonate
3026	8.81	51.19	0.55	4.59	0.00	0.00	0.00	19.44	0.89	2.24	12.28	0.00	31.73	56.34
3039.5	10.91	51.67	2.42	1.90	0.00	0.00	0.00	9.54	2.09	2.77	18.70	0.00	28.24	56.00

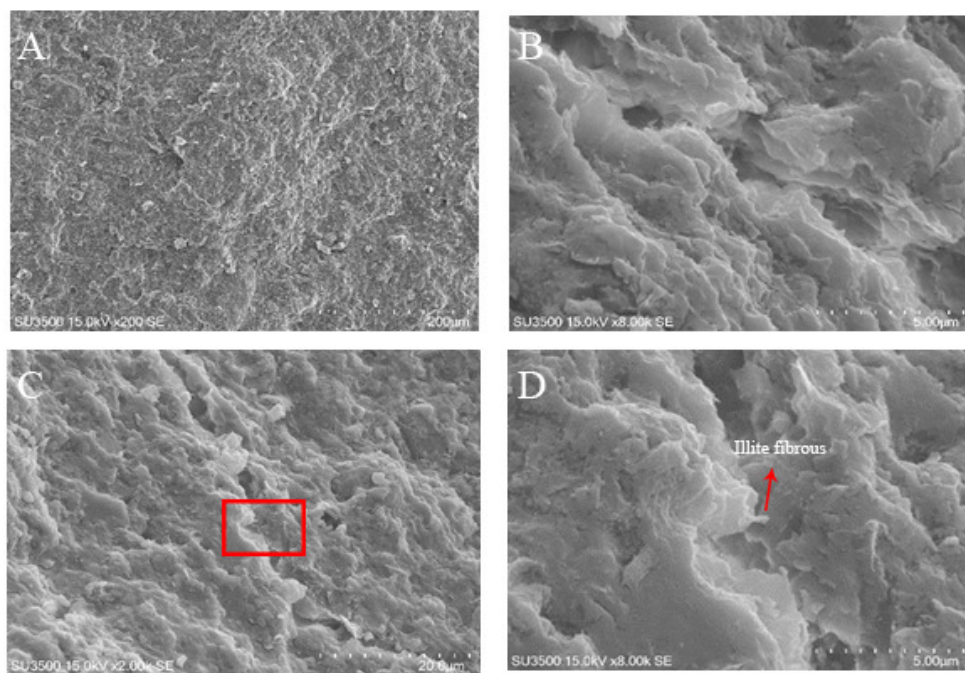


شکل ۴. نتایج آیتروسکن نمونه ۱۸ (۳۰۳۹/۵) نشان می‌دهد که طی بلوغ حرارتی مصنوعی تولید هیدروکربن کرده است.

رشد نموده‌اند. در واقع می‌توان گفت فرآیند ایلیت‌زایی در نمونه‌های مورد مطالعه که با تولید آب (افزایش فشار منفذی) (ویدال و دوباک، ۲۰۱۰؛ نادو، ۲۰۱۱؛ نادائو، ۲۰۱۱؛ نادائو و همکاران، ۲۰۰۲) و کوارتز و ایلیت (افزایش خاصیت شکنندگی) همراه است (استورول و برویک، ۲۰۰۸؛ تیرگ و همکاران، ۲۰۱۰) یکی از فاکتورهای موثر در ایجاد ریزشکستگی است. هم‌چنین با افزایش تحریک حرارتی و تجزیه کانی‌های ناپایداری مانند کلسیت و فلدسپار، مایعات اسیدی (H_2S, CO_2, \dots) تولید می‌شوند که قادر هستند کانی‌های مجاور را حل و فضای مجزا در نمونه را به یکدیگر متصل نماید (جاروی و همکاران، ۲۰۰۳، زنگ و همکاران، ۲۰۱۳).

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

مطالعه نمونه‌های انتخاب شده قبل از حرارت توسط میکروسکوپ الکترونی و هم‌چنین داده‌های XRD نشان می‌دهد که این سازند از کانی‌های شکننده‌ای چون کوارتز، دولومیت، فلدسپار و... تشکیل شده و فاقد ریزشکستگی هستند (شکل ۵). ولی با ایجاد استرس حرارتی در لبه کانی‌های مختلف، موجبات ضعیف شدن مرز تماسی کانی‌ها (مواد آلی و آلی/ مواد آلی و غیرآلی) فراهم می‌گردد (فنگ و ژائو، ۲۰۱۵). بررسی تصاویر میکروسکوپی بعد از حرارت تبدیل لبه‌های ورقه اسمکتیت به رشته‌های ایلیت را نشان می‌دهد که ریزشکستگی‌ها به خوبی در موقعیت حضور این کانی‌ها



شکل ۵. شکل (A) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ها قبل از حرارت است که هیچ گونه ریزشکستگی در آن مشاهده نشده و شکل (B, C) تصاویر میکروسکوپی نمونه حرارت دیده شده را نشان می‌دهد که طی حرارت و فرآیند *Illitization* لبه ورقه‌های اسمکتیت به رشته‌های ایلیت (رشته‌های ایلیت در D که بخش بزرگ شده از C می‌باشد با فلش مشخص شده است) تبدیل شده است و با افزایش خاصیت شکنندگی طی تولید هیدروکربن و ایجاد فشار محلی باعث گسترش شکستگی در این نقاط شده است.

خود عبور دهد که شاخص‌ترین تفاوت مرتبط با این ریزشکستگی‌ها میان این نمونه و سه نمونه دیگر، در افزایش مقدار کانی ایلیت/اسمکتیت و پتانسیل زایش هیدروکربن می‌باشد. زیرا طی حرارت دادن به نمونه ۸/۱، تبدیل کانی اسمکتیت/ایلیت (۱۸/۷۰٪) به کانی ایلیت تسهیل می‌شود (شکل ۴). این تغییرات با آزاد

نتیجه‌گیری

با مطالعه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در شکل ۴ انتظار می‌رود که طی حرارت دادن به ۴ نمونه انتخابی، نمونه ۱۸ (۳۰۳۹/۵) با بیش‌ترین تراکم ریزشکستگی متصل بهم ایجاد شبکه‌ای از ریزشکستگی کند و هیدروکربن‌های تولیدی در دمای $420^{\circ}C$ را از میان

همکاران، ۲۰۱۸) بنابراین با افزایش سرعت تولید هیدروکربن تا دمای 420°C ، مقدار هیدروکربن تولیدی بیش‌تر از مقدار نشت آن خواهد شد و با تجمع در سنگ‌منشا و ازدیاد فشار مایع منفذی موجب توسعه شبکه‌ای از ریزشکستگی در نقاط ضعف نمونه، مانند بستر کانی‌های رسی تبدیل شده به ایلیت با خاصیت شکننده می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از ریاست محترم انجمن رسوب‌شناسی ایران، جناب آقای دکتر موسوی‌حرمی و دبیر محترم علمی پنجمین همایش ملی رسوب‌شناسی ایران جناب آقای دکتر زندمقدم بسیار قدردانی می‌نمایند. همچنین از جناب آقای دکتر سعید خدابخش سردبیر محترم مجله رسوب‌شناسی کاربردی برای حمایت از همایش ملی رسوب‌شناسی و چاپ مقالات برگزیده تشکر می‌شود.

منابع

- Akinlua, A., Jarvie, D. M. Ajayi, T. R (2005) A pre appraisal of the application of Rock-Eval pyrolysis to source rock studies in the Niger Delta *Journal of Petroleum Geology*, 28: 39-48.
- Bray, E. E., Foster, W. R (1980) A process for primary migration of petroleum. *AAPG Bull*, 64 (1): 107-114.
- Bruce, C. H (1984) Smectite dehydration Its relation to structural development and hydrocarbon accumulation in northern Gulf of Mexico Basin. *AAPG Bull*, 68: 673-683.
- Chanchani, J., Berg, R.R., Lee, C. I (1996) Pressure solution and microfracturing in primary oil migration, upper cretaceous Austin Chalk. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Transact*, 46: 71-78.
- Craddock, P. R., Bake, K. D., Pomerantz, A. E (2018) Chemical, molecular, and microstructural evolution of kerogen during thermal maturation: case study from the Woodford Shale of Oklahoma, *Energy & Fuels*. ACS Publications, 32(4): 4859-4872.
- Cordell, R. J (1973) Colloidal soap as proposed primary migration medium for hydrocarbons. *AAPG Bull*, 57 (9): 1618-1643.
- Ding, W. L., Chao, L. Chunyan, X. Changchun, J., Kai, Z., Liming, W (2012) Fracture development in shale and its relationship to gas accumulation. *Geoscience Frontiers*, 3: 97-105.

شدن سلیس با خاصیتی کاملاً شکننده و آب همراه است که طی محاسبات ترمودینامیکی، انتظار می‌رود ۳۰۰ کیلوگرم آب در هر متر مکعب از کانی اسمکتیت طی این فرآیند آزاد گردد (ویدال و دوباک، ۲۰۱۰). با افزایش فشار سیال در حفره‌ها مهاجرت نفت و گاز می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد (مونتنس-هرناندز و همکاران، ۲۰۰۴؛ بروس، ۱۹۸۴؛ نادائو، ۲۰۱۱؛ نادائو، ۲۰۰۲؛ کالانی و همکاران (مطبوعات)) و باعث ایجاد ریزشکستگی یا گسترش ریزشکستگی‌های قبلی در سنگ منشا گردد. همچنین در آزمایشگاه، مونت هر ناندز و همکاران (مونتنس-هرناندز و همکاران، ۲۰۰۴) اظهار داشتند که در طول چرخه هیدراتاسیون و دهدراتاسیون ریزشکستگی‌ها و حفرات ایجاد شده در کانی اسمکتیت در مقایسه با کانی ایلیت با سرعت بیش‌تری بسته می‌شود. بنابراین حضور ۲۸/۲۴٪ کانی رسی با اشکال صفحه‌ای و سطح ویژه بالا در سنگ‌منشا مورد مطالعه، باعث نگهداری آب آزاد شده از این واکنش می‌گردد. هاور و همکاران (هاور و همکاران، ۱۹۹۶) نشان دادند که اولین پیک تولید نفت در ابتدای زون تبدیل اسمکتیت به ایلیت اتفاق می‌افتد زیرا به موازات تبدیل کانی‌های رسی به یکدیگر، با شکسته شدن کروژن جامد به بیتومن و نفت با چگالی پایین، منجر به افزایش ۳۰٪ حجم هیدروکربن تولیدی نسبت به حجم کروژن می‌گردد (انگلدرد و لاکازیت، ۲۰۰۵؛ جاهرن و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیتایوزر و همکاران، ۱۹۸۸) که فشار محلی ناشی از این افزایش حجم، در اطراف مواد آلی بلوغ یافته تابعی از نفوذپذیری نمونه و سرعت تولید هیدروکربن می‌باشد. بنابراین هرچه شیل، نفوذپذیری کم‌تری داشته باشد، خروج هیدروکربن تولیدی کم‌تر خواهد بود (بردوفت و همکاران، ۱۹۹۹) و نیروی ایجاد شده می‌تواند وضعیت استرس ماتریکس سنگ را تا رسیدن به آستانه مقاومت سنگ تغییر دهد و باعث رشد ریزشکستگی گردد (انگلدرد و لاکازیت، ۱۹۹۰) زیرا توزیع ریزشکستگی‌ها با موقعیت فشار مایع منفذی در لامینه‌ها مطابقت دارد (ژئو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ما و همکاران، ۲۰۱۶). در این آزمایش میزان گرمایش اولیه به اندازه کافی سریع بوده و هر چه دمای ثابتی که نمونه‌ها در معرض آن قرار می‌گیرند، بالاتر باشد مقدار تولید هیدروکربن بالاتر خواهد بود. تا این که نمونه از مرحله کاتازن خارج گردد. (پناهی و

- Jahren, J., Haile, B. G., Hellevang, H., Bjørlykke, E., Ohm, S. E. (2013) Fracture patterns in organic rich mudstones-implications for primary petroleum migration. 75th EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2013 EAGE London, UK.
- Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble T. E., Pollastro, R. M. (2007) Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91: 475-499.
- Jin, Z. H., Johnson, S. E., Fan, Z. Q. (2010) Subcritical propagation and coalescence of oilfilled cracks: getting the oil out of low-permeability source rocks. *Geophys. Res. Lett.* 37, L01305.
- Kalani, M., Jahren, J., Mondol, N. H., Faleide, J. I. (2015) Petrophysical implications of source rock microfracturing. *Int. J. Coal Geol.* 143: 43-67.
- Kalani, M., Jahren, J., Mondol, N. H., Faleide, J. I. (2015) Compaction processes and rock properties in uplifted clay dominated units - the Egersund Basin, Norwegian North Sea. *Mar. Pet. Geol.* (in press).
- Kobchenko, M., Panahi, H., Renard, F., Dysthe, D.K., Malthé-Sørenssen, A., Mazzini, A., Scheibert, J., Jamtveit, B., Meakin, P. (2011) 4D imaging of fracturing in organic-rich shales during heating. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116, B12201.
- Lash, G. G., and Engelder, T. (2005) An analysis of horizontal microcracking during catagenesis: example from the Catskill delta complex. *AAPG Bull.* 89 (11): 1433-1449.
- Lafargue, W., Espitalie, J., Broks, T. M., Nyland, B. (1994) Experimental simulation of primary migration. *Org. Geochem.* 22 (3-5): 575-586.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pillot, D. (1998) Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Rev. Inst. Fr. Petrol.* 53(4): 421-437.
- Leythaeuser, D., Littke, R., Radke, M., Schaefer, R. G. (1988) Geochemical effects of petroleum migration and expulsion from Toarcian source rocks in the Hills syncline area, NW-Germany. *Org. Geochem.* 13: 489-502.
- Li, D. H., J. Z. Li, S. J. Wang, and X. J. (2009) Conditions of shale gas reservoir formation. *Natural Gas Industry*, 29(5): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. F., Dong, C. M., Luan, G. Q., Lin, C. Y., Liu, X. C., Elsworth, D. (2016) Types, characteristics and effects of natural fluid pressure fractures in shale: a case study of the Paleogene strata in eastern China. *Petroleum Explor. Dev.* 43: 634-643.
- Ma, C., Elsworth, D., Chunmei, D. (2017) Engelder, T., Lacazette, A. (1990) Natural hydraulic fracturing. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, 4-6 June at Loen, Norway, p. 35-43.
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M., Quigley, T. M. (1987) The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *J. Geol. Soc.* 144 (2): 327-347.
- Fawad, M., Mondol, N. H., Jahren, J., Bjørlykke, K. (2010) Microfabric and rock properties of experimentally compressed sil-clay mixtures. *Mar. Pet.* 27: 1698-1712.
- Figueroa Pilz, F., Dowey, P. J., Fauchille, A. L., Courtois, L., Bay, B., Ma, L., Taylor, K. G., Mecklenburgh, J., Lee, P. D. (2017) Synchrotron tomographic quantification of strain and fracture during simulated thermal maturation of anorganic-rich shale, UK Kimmeridge Clay. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 122: 2553-2564.
- Glatz, G., Castanier, L. M., Kovscek, A. R. (2016) Visualization and quantification of thermally induced porosity alteration of immature source rock using x-ray computed tomography. *Energy Fuels*, 30 (10): 8141-8149.
- Goddard, D. A., Mancini, E. A., Talukar, S. C., Horn, M. (1997) Bossier - Hanesvill shale, North Louisiana salt basin: Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, center for energy, pdf file, www.api.ning.com/files.
- Goulart Teixeira, M., Donzé, F., Renard, F., Panahi, H., Papachristos, E., Scholtès, L. (2017) Microfracturing during primary migration in shales. *Tectonophysics*, 694: 268-279.
- Guo, X., He, S., Song, G., Wang, X. J., Wang, B. J., Na, L. I. (2011) Evidences of over pressure caused by oil generation in Dongying depression. *Earth Science Journal China Univ. Geosciences* 36, 1085-1094 (in Chinese with English abstract).
- Hill, D. G., Lombardi, T. E., Martin, J. P. (2002) *Fractured Shale Gas Potential in New York, Arvada, Colorado*, pp. 1-16.
- Hover, V. C., Peacor, D. R., and Walter, L. M. (1996) Relationship between organic matter and authigenic illite in Devonian Black shales, Michigan and Illinois Basins, USA, siliciclastic diagenesis and fluidflow concepts and applications. *SEM Spec. Publ.* 55: 73-83.
- Hunt, J. M. (1996) *Petroleum geochemistry and geology*, 2nd edition. W. H. Freeman and Company. 743 pp.
- Hunt, J. M. (1990) Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments (1). *AAPG Bull.* 74 (1): 1-12.
- Illing, V. C. (1933) Migration of oil and natural gas. *Inst. Petrol.* 19 (114): 229-274.

- using synchrotron X-ray microtomography. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (13): 6799–6807.
- Snarskiy, A. N (1961) Relationship between primary migration and compaction of rocks. *Petrol. Geol.: Digest of Russ. Lit. Petrol. Geol.*, 5: 362–365.
- Storvoll, V., and Brevik, I (2008) Identifying time, temperature, and mineralogical effects on chemical compaction in shales by rock physics relations. *Lead. Edge*, 27: 750–756.
- Tan, R. R (2009) Shale gas becomes the mainstay of the newly increased proven reserves, *Natural Gas Industry*, 1362: 29(5), 81 (in Chinese with English abstract).
- Thyberg, B., Jähren, J., Winje, T., Bjørlykke, K., Faleide, J. I., Marcussen, Ø (2010) Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of micro-quartz crystals. *Mar. Pet. Geol.*, 27: 1752–1764.
- Tissot, B. P., and Welte, D. H (1978) *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer-Verlag, New York, pp. 538.
- Vatandoust, M., Faghhi, A., Asadi, S., Azimzadeh, A. M., Heidarifard, M. H (2020) 1D-2D modeling of hydrocarbon migration at the Karanj and Parsi oilfields, Southern Dezful Embayment, SW Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104095.
- Vernik, L (1994) Hydrocarbon-generation-induced microcracking of source rocks. *Geophysics*, 59 (4): 555–563.
- Vidal, O., and B. Dubacq (2009) Thermodynamic modelling of clay dehydration, stability and compositional evolution with temperature, pressure and H₂O activity, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 6544–6564.
- Vidal, O., and B. Dubacq (2009) Thermodynamic modelling of clay dehydration, stability and compositional evolution with temperature, pressure and H₂O activity, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 6544–6564.
- Xu, C., Dowd, P. A. Tian, Z. F (2015) A simplified coupled hydro-thermal model for enhanced geothermal systems, *Applied Energy*. Elsevier, 140: 135–145.
- Zeng, W., J. Zhang, W. Ding, S. Zhao, Y. Zhang, Z. Liu, K (2013) Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 251–266.
- 'Controls of hydrocarbon generation on the development of expulsion fractures in organic-rich shale: Based on the Paleogene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China', *Marine and Petroleum Geology*. Elsevier, 86: 1406–1416.
- McAuliffe, C. D (1979) Oil and gas migration—chemical and physical constraints. *AAPG Bull.*, 63 (5): 761–781.
- Montes-Hernandez, G., J. Duplay, L. Martinez, S. Escoffier and Rousset, D (2004) Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions. *Applied Clay Science*, 25: 187–194.
- Nadeau, P. H (2011) Earth's energy “golden zone”: a synthesis from mineralogical research. *Clay Miner.*, 46: 1–24.
- Nadeau, P. H., Peacor, D. R., Yan, J., Hillier, S (2002) I–S precipitation in pore space as the cause of geopressing in Mesozoic mudstones, Egersund Basin, Norwegian continental shelf. *Am. Mineral.*, 87: 1580–1589.
- Nelson, P. H (2009) Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales. *AAPG Bulletin*, 93: 329–340.
- Nie, H. K., X. Tang, R. K. Bian (2009) Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 484–491.
- Ougier-Simonin, A., Renard, F., Boehm, C., Vidal-Gilbert, S (2016) Microfracturing and microporosity in shales. *Earth Sci. Rev.*, 162: 198–226.
- Panahi, H (2018) 'In-situ imaging of fracture development during maturation of an organic-rich shale: Effects of heating rate and confinement', *Marine and Petroleum Geology*, 95: 314–327.
- Peters, K. E., and Cassa, M. R (1994) Applied source rock geochemistry. in: Magoon, L. B., Dow, W. G., (eds.), *The petroleum system from source to trap*. AAPG memoir, 60: 93–120.
- Price, L. C (1989) Primary petroleum migration from shales with oxygen-rich organic matter. *J. Petrol. Geol.*, 12 (3): 289–324.
- Rudkiewicz, J. L., Brévar, O., Connan, J., Montel, F (1994) Primary migration behaviour of hydrocarbons: from laboratory experiments to geological situations through fluid flow models. *Org. Geochem.* 22 (3–5), 631IN7–639IN8.
- Saif, T., Lin, Q., Bijeljic, B., Blunt, M. J (2017) a. Microstructural imaging and characterization of oil shale before and after pyrolysis. *Fuel*, 197: 562–574.
- Saif, T., Lin, Q., Singh, K., Bijeljic, B., Blunt, M. J (2016) Dynamic imaging of oil shale pyrolysis