



Organic petrography and geochemistry of the Upper Devonian black shales in north of Kerman (south of the Central-East Iranian Microcontinent) and evaluation of their hydrocarbon generation potential

Amir Hossein Rahiminejad

Assist. Prof., Dept., of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Original Research	Generally, few studies have been carried out on the organic petrographic and organic geochemical aspects of Devonian black shales in Iran. This paper is focused on the organic petrography, organic geochemistry and hydrocarbon generation potential of six intervals (with a total thickness of 44.5m) of black shales in an Upper Devonian stratigraphic succession of the Bahram Formation in the north of the city of Kerman. Stratigraphically, the Bahram Formation in the studied area contains one the thickest interval of Upper Devonian black shales in the central Iran. Based on detailed organic petrographic analysis, the organic materials in the studied black shale intervals derived from the land and inertinite is the only maceral identified in the intervals. The inertinite reflectance in the shale intervals ranges from 1.56 to 3.37 and the TAI ranges between +4 and -4. Additionally, the total organic carbon (TOC) in the black shale intervals ranges from 0.76 (wt %) to 2.79 (wt %). The organic petrographic evidence and the organic geochemical diagrams show that the studied organic materials are highly mature and they display kerogen type IV. This research proposes that the investigated black shale intervals in the Bahram Formation have low hydrocarbon generation potential. However, the black shale intervals have limited gas generation potential and tend to the dry-gas prone area.
Article history: Received: 2025 February 7 Accepted: 2025 April 13	
Keywords: Bahram Formation Upper Devonian Black shale Sedimentology Stratigraphy	

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30510.1657>

Corresponding author: Amir Hossein Rahiminejad, **E-mail:** ah.rahiminejad@kgut.ac.ir

Cite this article: Amir Hossein Rahiminejad (2026). Organic petrography and geochemistry of the Upper Devonian black shales in north of Kerman (south of the Central-East Iranian Microcontinent) and evaluation of their hydrocarbon generation potential, *New Findings of Applied Geology*, Vol. 20, No. 39, pp: 141-155.



Journal of New Findings of Applied Geology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC BY-NC 4.0

Web Site: <https://nfag.basu.ac.ir> **E-mail:** nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Black shales are organic-rich dark sedimentary clastic rocks (mainly marine) that contain different amounts of muds and clay, silt and silicate particles. Black shales were deposited in different sedimentary environments including: marine settings, oceanic abyssal plains, continental settings (mainly lakes) and intermediate environments. The total organic carbon (TOC) of black shales usually ranges from about 1% to 15%. Although, black shales were deposited widely during the Proterozoic, Paleozoic (Late Ordovician, Late Silurian–Late Devonian and Lower Carboniferous–Lower Permian), Jurassic, Cretaceous and Cenozoic but they were considerably common and abundant in the Devonian. Black shales are economically important due to their hydrocarbon generation potential and their metal content. Generally, few investigations have been carried out on the organic petrography and geochemical characteristics of the Devonian black shales in Iran, particularly those in the central Iran. Upper Devonian Organic-rich black shales can be well correlated in the central Iran (e.g., in the Hutk and Gazestan stratigraphic sections in the Kerman Province and the Chahriseh section in the Isfahan. This research is focused on the organic petrographic and geochemical features of intervals of Upper Devonian black shales in the Bahram Formation in north of Kerman, south of the Central-East Iranian Microcontinent and evaluation of their hydrocarbon generation potential. The results of this study can contribute to hydrocarbon explorations and economical geology prospecting in Iran.

Materials and Methods

Six intervals of black shales were identified and fresh rock samples of black shales were collected from them during the fieldtrips in the north of the city of Kerman. In order to determine and identify the organic petrographic content and organic geochemical features of the black shale intervals, shale samples were examined and analyzed by reflecting and transmitting microscopes, fluorescence microscopy and Rock-Eval pyrolysis. The main organic geochemical parameters measured by Rock-Eval pyrolysis include: TOC (wt%), HI, OI, S1, S2, S1+S2, S3 and Tmax. The data generated during the petrographic and geochemical analysis were added to tables and illustrations and also plotted on diagrams by using relevant software. The organic petrographic and organic geochemical analyses

were carried out at the Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran.

Results and Discussion

In this research, six intervals of black shales were recognized in an Upper Devonian stratigraphic succession of the Bahram Formation in the north of the city of Kerman, near the Hutk village. The total thickness of the black shale intervals is 44.5m. Detailed organic petrographic analysis indicated that the organic materials in the studied black shales consist of palynomorphs (spores and pollens), phytoclasts and amorphs with terrestrial origin. The analysis also indicated that the organic materials are highly mature and the black shales intervals are dominated by inertinite maceral. The inertinite maceral comprises macrinite, inertodetrinite, fusinite and semifusinite sub-macerals. Inertinite reflectance and the Thermal Alteration Index (TAI) of the studied black shale intervals were measured during the petrographic analysis. The determined inertinite reflectance for the shale intervals ranges from 1.56 to 3.37 and the TAI ranges between +4 and -4. The total organic carbon (TOC) in the black shale intervals ranges from 0.76 (wt%) to 2.79 (wt%). Generally, the organic petrographic and organic geochemical analyses show that the organic materials in the black shale intervals represent type IV Kerogen. Overall, our studies suggest that the investigated black shale intervals in the Bahram Formation have low hydrocarbon generation potential. The black shale intervals have limited gas generation potential and tend to the dry-gas prone area.

Conclusions

Based on the field studies, six black shale intervals were identified in the Upper Devonian Bahram Formation in the north of the city of Kerman. Based on detailed petrographic studies, the recognized organic materials in the studied black shales derived from the land and are highly mature. The black shales intervals are dominated by inertinite maceral. Also, the identified kerogen in the shale intervals is of type IV. This research indicates that the investigated Upper Devonian black shale intervals have low hydrocarbon generation potential. However, these shale intervals represent the dry-gas prone area and have restricted gas generation potential. The results of this study can be useful in future investigations on hydrocarbon generation potential of black shales and exploration and evaluation of coal shales in Iran.



سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی آلی افق‌های شیلی سیاه دونین بالایی در شمال کرمان (جنوب‌خرده قاره شرق-ایران مرکزی) و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی آن‌ها

امیرحسین رحیمی‌نژاد

استادیار گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۴	یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهد که مطالعات و تحقیقات اندکی بر روی ویژگی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی آلی شیل‌های سیاه به سن دونین در ایران، به‌ویژه در ایران مرکزی صورت گرفته است. در این پژوهش، خصوصیات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی آلی و توان هیدروکربن‌زایی شش افق شیلی سیاه (در مجموع به ضخامت ۴۴/۵ متر) در توالی چین‌نگاری دونین بالایی سازند بهرام در شمال شهر کرمان واقع در جنوب‌خرده قاره شرق-ایران مرکزی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از لحاظ جایگاه چین‌شناسی ایران، سازند بهرام در منطقه مطالعه شده، یکی از توالی‌های چین‌های محسوب می‌شود که حاوی بیشترین و ضخیم‌ترین افق‌های شیلی سیاه دونین در ایران مرکزی می‌باشد. مطالعات سنگ‌نگاری آلی نشان دادند که منشأ مواد آلی در افق‌های شیلی سیاه مزبور، گیاهان قاره‌ای می‌باشند و فقط ماسرال نوع اینترتینیت در افق‌ها شناسایی شده است. میزان انعکاس اینترتینیت در افق‌های شیلی سیاه موردنظر بین ۵۶/۱ و ۳۷/۳ و شاخص آلتراسیون حرارتی (TAI) در آن‌ها بین محدوده ۴+ تا ۴- می‌باشد. همچنین، مقدار کربن آلی کل (TOC) موجود در افق‌های شیلی سیاه بین ۷۶/۰ و ۷۹/۲ درصد وزنی متغیر است. شواهد سنگ‌نگاری و نمودارهای زمین‌شیمیایی آلی مشخص نمودند که بلوغ مواد آلی در افق‌های مطالعه شده، بالا می‌باشد و کروژن موجود در آن‌ها از نوع IV است. در مجموع، مطالعات صورت گرفته در این تحقیق حاکی از پایین بودن توان تولید هیدروکربنی افق‌های شیلی سیاه شناسایی شده در توالی چین‌نگاری سازند بهرام در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. افق‌های شیلی سیاه مزبور، در نهایت مستعد تولید گاز خشک بوده و دارای پتانسیل کمی برای تولید گاز هستند.

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30510.1657>

* نویسنده مسئول: امیرحسین رحیمی‌نژاد، E-mail: ah.rahiminejad@kgut.ac.ir

استناد: امیرحسین رحیمی‌نژاد (۱۴۰۵). سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی آلی افق‌های شیلی سیاه دونین بالایی در شمال کرمان (جنوب‌خرده قاره شرق-ایران مرکزی) و ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی آن‌ها، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۲۰، شماره ۳۹، صفحه ۱۴۱ تا ۱۵۵.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را براساس لایسنس کپی‌رایت کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.



آدرس وبسایت نشریه: <https://nfag.basu.ac.ir> ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

شیل‌های سیاه، سنگ‌های رسوبی آواری (عمدتاً دریایی) تیره‌رنگ و دانه‌ریز غنی از مواد آلی بوده که حاوی مقادیر و نسبت‌های متغیری از گل و اجزای بیوژنیک می‌باشند. دارای ترکیبات رسی، سیلتی و سیلیسی همراه با اورانیوم و مقادیر پراکنده‌ای از پیریت هستند که در محیط‌های رسوبی مختلفی شامل محیط‌های دریایی و دشت‌های مفاکی اقیانوس‌ها، محیط‌های قاره‌ای (عمدتاً دریاچه‌ها) و حد فاصل بین محیط‌های دریایی و قاره‌ای، نهشته شده و رسوب کرده‌اند (ریدینگ، ۱۹۹۶؛ کوینگ، ۲۰۰۰؛ ترابوکو-آلساندره و همکاران، ۲۰۱۲؛ جو و همکاران، ۲۰۱۴؛ لی و همکاران، ۲۰۱۵؛ فاتی و همکاران، ۲۰۲۴). میزان محتویات کربن آلی یا کربن آلی کل (TOC) در شیل‌های سیاه، معمولاً بین حدود ۱ تا ۱۵ درصد می‌باشد (ریدینگ، ۱۹۹۶؛ نیکولز، ۲۰۰۹). به‌طور کلی، شیل‌های سیاه در طی زمان‌های پروتوزویک، پالئوزویک (اردوئین پسن، سیلورین پسن تا دونین پسن، کربنیفر پیشین تا پرمین پیشین)، ژوراسیک، کرتاسه و سنوزویک گسترش داشتند، ولی در طول دوره دونین، دارای گسترش قابل‌توجهی بوده‌اند (کیلیمه و اولمشیک، ۱۹۹۱؛ بویر و دروسر، ۲۰۰۹؛ فلوگل، ۲۰۱۰؛ ترابوکو-آلساندره و همکاران، ۲۰۱۲). از نقطه نظر و جایگاه رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی، شیل‌های سیاه به‌عنوان سنگ‌منشأ هیدروکربنی و همچنین دارا بودن تجمعاتی از عناصر فلزی، دارای اهمیت اقتصادی قابل‌توجهی می‌باشند (پاتر و همکاران، ۲۰۰۵؛ نیکولز، ۲۰۰۹؛ بایومی و همکاران، ۲۰۱۶؛ آدیلولو و همکاران، ۲۰۲۲؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۳) و همواره به‌عنوان منابع انرژی نامتعارف مورد توجه محققین قرار دارند (بایومی و همکاران، ۲۰۱۶؛ پانگ و همکاران، ۲۰۲۴). به‌طور کلی، بررسی‌ها و تحقیقات اندکی بر روی ویژگی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی آلی شیل‌های سیاه دونین در ایران به‌خصوص در ایران مرکزی صورت گرفته است. شیل‌های سیاه غنی از مواد آلی دونین پسن در ایران مرکزی به‌طور گسترده‌ای قابل انطباق هستند. به عنوان مثال در برش‌های چینه‌نگاری هوتک و گزستان در استان کرمان (ونت و همکاران، ۲۰۰۲) و در برش چاه‌ریسه در استان اصفهان (محمودی‌قرائی و همکاران، ۲۰۰۷).

در این طرح پژوهشی به بررسی ویژگی‌ها و خصوصیات سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی آلی و پتانسیل هیدروکربن‌زایی افق‌هایی از شیل‌های سیاه دونین بالایی در سازند بهرام در شمال کرمان واقع در جنوب خرده قاره شرق-ایران مرکزی پرداخته شده است. مشاهدات و نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، می‌توانند در اکتشافات هیدروکربنی، زمین‌شناسی و پی‌جویی‌های اقتصادی زمین‌شناسی ایران در آینده، نقش بسزایی داشته باشند.

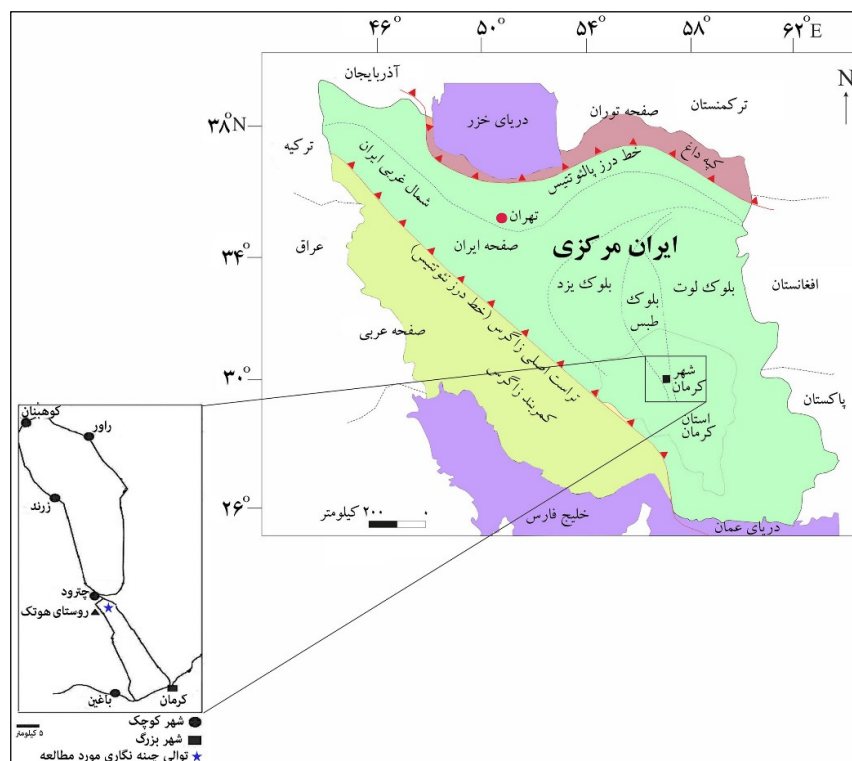
۲- زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و موقعیت جغرافیایی ناحیه مطالعه شده

در این پژوهش، توالی چینه‌نگاری دونین بالایی سازند بهرام که افق‌های شیلی سیاه موردنظر در آن قرار دارند، در حدود ۲۵ کیلومتری شمال شهر کرمان و در مجاورت روستای هوتک واقع شده است (شکل‌های ۱ تا ۳). به لحاظ زمین‌ساختی، برش چینه‌نگاری مطالعه شده (اطراف روستای هوتک) در جنوب بلوک طبس واقع در جنوب خرده قاره شرق-ایران مرکزی^۱ قرار دارد (شکل ۱). بلوک طبس، به ترتیب به‌وسیله گسل‌های کویر بزرگ، ناین و نایبند در شمال، غرب و شرق احاطه شده است (تاکین، ۱۹۷۲؛ اشتوکلین، ۱۹۷۴؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور کلی، منطقه بررسی شده از نظر تکتونیکی، بخشی از یک حوضه پیش‌بومی بوده که عمدتاً از توالی ضخیم رسوبات آواری و کربناته تشکیل شده است (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۶). قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی در ناحیه اطراف روستای هوتک شامل سری دزو می‌باشد که شامل نهشته‌های دولومیت، گچ، ماسه‌سنگ و توده‌های آتشفشانی به سن اینفراکامبرین^۲-کامبرین پیشین است (غلامعلیان، ۱۳۸۵). طبق نظر وحدتی دانشمند و همکاران (۱۳۷۴)، واحد تفکیک نشده‌ای از نهشته‌های سیلورین-دونین بر روی سری دزو رسوب کرده‌اند که از سنگ‌آهک فسیل‌دار، ماسه‌سنگ و شیل تشکیل یافته‌اند (غلامعلیان، ۱۳۸۵). رسوبات دونین مزبور، به‌وسیله نهشته‌های آهکی کربنیفر پوشیده شده‌اند (غلامعلیان، ۱۳۸۵؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۱۶). به لحاظ چینه‌نگاری، توالی نهشته‌های دونین بالایی در ناحیه اطراف روستای هوتک، شامل کربنات‌ها و تخریبی‌ها نشان‌دهنده محیط‌های خیلی کم‌ژرفا می‌باشد (وحدتی دانشمند و همکاران، ۱۳۷۴؛ غلامعلیان، ۱۳۸۵).

^۱ Central-East Iranian Microcontinent

کربناته- آواری کم‌ژرفا می‌باشد. لازم به ذکر است که سن توالی چینه‌نگاری دونین بالایی بررسی شده در این پژوهش که افق‌های شیلی سیاه در آن شناسایی شده‌اند (شکل ۲)، بر اساس مطالعات غلامعلیان (۱۳۸۵)، ونت و همکاران (۲۰۰۲) و رحیمی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۲) فراسنین تا فامنین می‌باشد.

این توالی بر روی توالی تخریبی و ماسه‌سنگی قرمز رنگ دونین زیرین تا میانی نهشته شده است (غلامعلیان، ۱۳۸۵؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۱۶). لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات هاشمی و همکاران (۲۰۱۶) و رحیمی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۲)، مدل رسوب‌گذاری نهشته‌های رسوبی دونین بالایی در اطراف روستای هوتک منطبق با یک شلف



شکل ۱. نقشه زمین‌ساختاری ایران (تغییر یافته از ویلمسن و همکاران، ۲۰۰۹) و موقعیت جغرافیایی توالی چینه‌نگاری مطالعه شده از سازند بهرام.
Fig. 1. The structural map of Iran (based on Wilmsen et al., 2009) and the geographical location of the studied stratigraphic succession of the Bahram Formation.

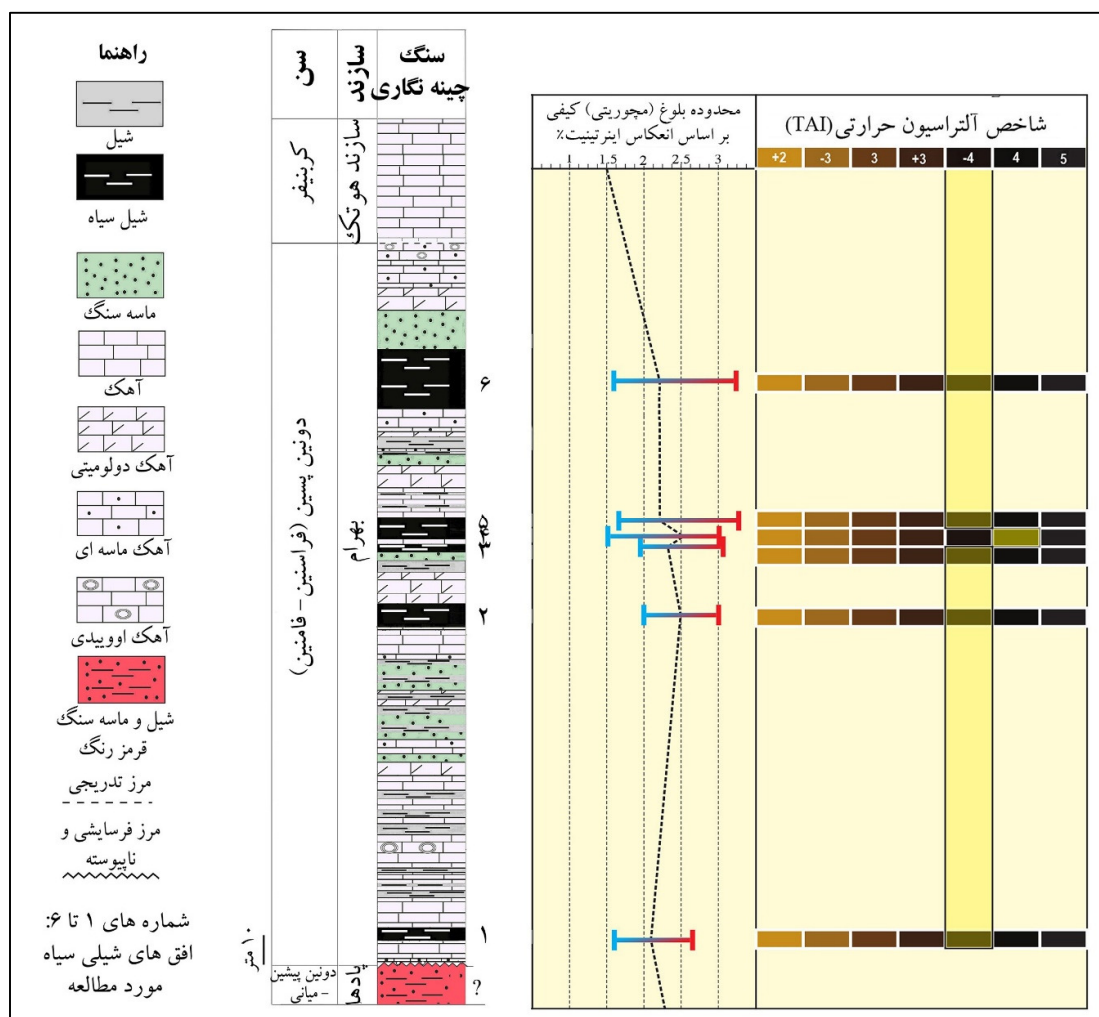
۳- مواد و روش‌ها

میزان بلوغ مواد آلی، شاخص یا درجه آلتراسیون حرارتی و انعکاس اینترتینیت به صورت میکروسکوپی بررسی و شناسایی شدند. تعداد ۳۵ قرص یا اسلاید پالیش از کروژن‌ها و محتویات آلی موجود در نمونه‌های سنگی/رسوبی شیلی مورد نظر تهیه شدند. سپس، اسلایدها یا قرص‌های صیقل داده شده به کمک میکروسکوپ (مدل Leitz-MPV COMBI)، زیر نورهای عبوری، انعکاسی و فلورسانس مورد بررسی قرار گرفتند. میزان متوسط، کمینه و بیشینه انعکاس اینترتینیت (Ro% in oil) برای هر کدام از قرص‌ها یا اسلایدها اندازه‌گیری و داده‌ها به وسیله رایانه و نرم-افزارهایی کنترل شدند. لازم به ذکر است که مطالعات سنگ‌نگاری آلی در پژوهشگاه صنعت نفت در تهران انجام شده‌اند. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی، جهت تعیین

در ابتدا، شش افق شیلی سیاه در توالی رسوبی دونین بالایی سازند بهرام در اطراف روستای هوتک در طی بررسی‌های صحرایی شناسایی و انتخاب شدند. در ادامه، ضخامت افق‌های مزبور تعیین (افق شیلی ۱: چهار و نیم متر؛ افق شیلی ۲: هشت متر؛ افق شیلی ۳: سه متر؛ افق‌های شیلی ۴ و ۵: هشت متر؛ افق شیلی ۶: بیست و یک متر) و ویژگی-های صحرایی آن‌ها نیز بررسی و از آن‌ها عکس‌برداری گردید. از هر کدام از افق‌های شیلی سیاه، چهار نمونه سنگی/رسوبی سطح‌الارضی که دست‌نخورده و هوازده نشده‌اند، برای مطالعات آزمایشگاهی برداشت شدند. در طی مطالعات سنگ‌نگاری آلی، نوع مواد آلی و نوع ماسرال موجود در نمونه‌های سنگی/رسوبی شیلی همراه با تعیین

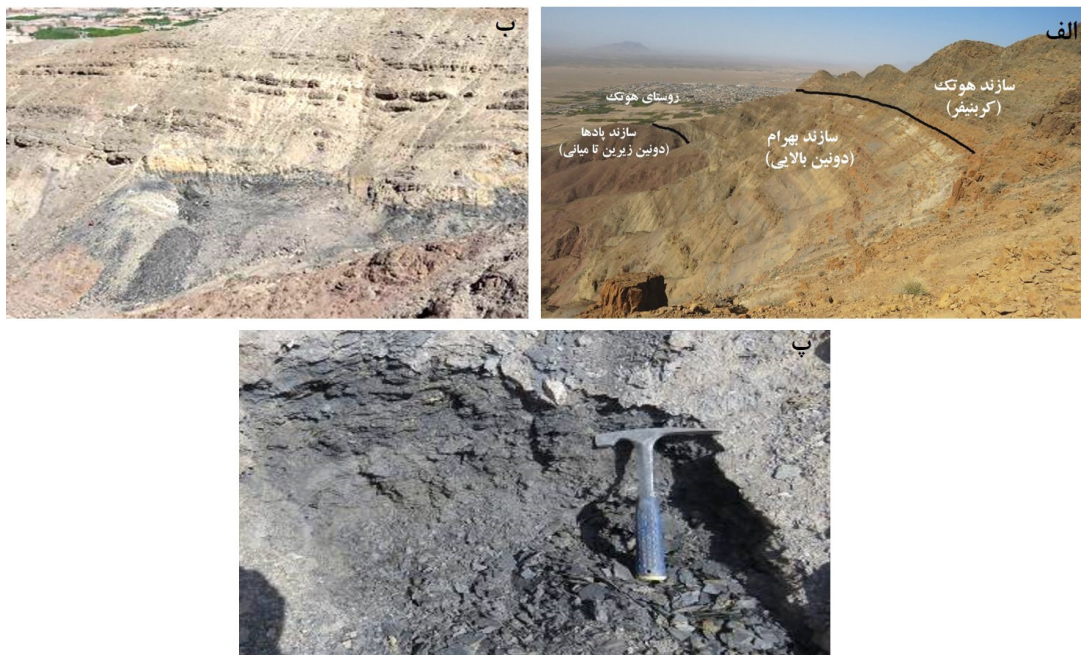
با دستگاه راک-اول در پژوهشگاه صنعت نفت در تهران انجام شده و مراحل و روش‌های آن بر اساس بهار و همکاران (۲۰۰۱) می‌باشند. داده‌های به‌دست‌آمده از دستگاه راک-اول ۶ و همچنین آنالیزهای سنگ‌نگاری آلی، به‌وسیله نرم-افزارهای مربوطه به‌صورت جداول و تصاویری ارائه و نیز بر روی نمودارها پلات شدند. تعیین محدوده شاخص آلتراسیون حرارتی (به عنوان شاخص درجه حرارت یا پختگی) بر اساس پیرسون (۱۹۹۰) و میزان کدر بودن رنگ اجزای کروژن نظیر پالینومورف‌ها (شامل پولن، اسپور) و مواد آلی آمورف می‌باشد.

پارامترهای زمین‌شیمیایی شیل‌های سیاه مورد نظر، نمونه‌های پودر شده از نمونه‌های سنگی/ رسوبی شیلی به‌وسیله دستگاه راک اول ۶ (Rock-Eval 6) آنالیز شدند. تعدادی از پارامترهای زمین‌شیمیایی مهم اندازه‌گیری شده به‌وسیله دستگاه راک-اول شامل موارد زیر می‌باشند (بهار و همکاران، ۲۰۰۱): مقدار کربن آلی کل (بر حسب درصد وزنی (TOC) موجود در نمونه، میزان هیدروکربن‌های آزاد در سنگ (S1)، توان هیدروکربن‌زایی باقی‌مانده در سنگ (S2)، حداکثر دمایی که در آن تمام یا بخشی از کروژن به هیدروکربن تبدیل می‌شود (Tmax)، شاخص اکسیژن (OI) و شاخص هیدروژن (HI). لازم به ذکر است که انجام آنالیز



شکل ۲. توالی چینه‌نگاری سازند بهرام (دوین بالایی) همراه با انعکاس اینرتینیت و شاخص آلتراسیون حرارتی افق‌های شیلی در محدوده مطالعه شده.

Fig. 2. The stratigraphic succession of the Bahram Formation and the inertinite reflectance and the thermal alteration index (TAI) of the black shale intervals in the studied area.



شکل ۳. الف: رخنمون صحرایی از توالی چین‌نگاری دونین بالایی سازند بهرام در شمال شهر کرمان در اطراف روستای هوتک. ب و پ: افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده در سازند بهرام.

Fig. 3. A. Outcrop view of the Upper Devonian stratigraphic succession of the Bahram Formation in the north of the city of Kerman, near the Hutk village. B and C. The studied black shale intervals in the Bahram Formation.

۴- نتایج

۴-۱- چین‌نگاری سازند بهرام و افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده

توالی چین‌نگاری مورد نظر (دونین بالایی: فراسنین-فامنین) از سازند بهرام در اطراف روستای هوتک، با ضخامت ۲۵۵ متر، با ناپوستگی فرسایشی بر روی نهشته‌های آواری (ماسه و شیل) قرمز رنگ دونین زیرین-میانی سازند پادها و به طور تدریجی در زیر توالی کربناته کربنیفر سازند هوتک (معادل سازند شیشتوه) نهشته شده است (شکل‌های ۲ و ۳ الف). مرز بین سازند بهرام و سازند پادها با یک افق میکروکنگلومرایی مشخص می‌شود که به صورت جانبی ناپدید می‌شود. در برش هوتک، سازند بهرام از سنگ‌آهک خالص، سنگ‌آهک‌های ماسه‌ای، سنگ‌آهک اوولیتی، سنگ‌آهک‌های دولومیتی و میان لایه‌های نازک و ضخیمی از ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها تشکیل شده است (شکل ۲). سنگ‌آهک‌های موجود در سازند بهرام در برش هوتک حاوی خرده‌های بیوکلاستی فسیل‌های دریایی براکیوپد، خارپوست و مرجان‌ها می‌باشند. در سنگ‌آهک‌ها و سنگ‌آهک‌های ماسه‌ای آثار ریپل وجود دارد. در ماسه‌سنگ‌های شناسایی شده در سازند بهرام، ساختارهای

رسوبی شامل طبقه‌بندی‌های مورب و طبقه‌بندی‌های موازی وجود دارد. در توالی چین‌نگاری مزبور، به ترتیب از پایین و ابتدای سازند بهرام به طرف بالا و بخش انتهایی آن، شش افق شیلی سیاه شناسایی شدند (شیل‌های شماره ۱ تا ۶؛ شکل ۲). شیل‌های سیاه در افق‌های شناسایی شده دارای لامیناسیون‌های مورب و افقی می‌باشند. ضخامت مجموع شش افق شیلی سیاه ۵/۴۴ متر می‌باشد. ضخامت هر کدام از افق‌های شیلی به تفکیک در بخش مواد و روش‌ها مشخص شده است.

۴-۲- نوع مواد آلی شناسایی شده در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده

انواع و فراوانی نسبی مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه بررسی شده در نور عبوری در جدول ۱ ارائه شده است. تصاویر میکروسکوپی از مواد آلی شناسایی شده، در شکل در مطالعات سنگ‌نگاری، مواد آلی موجود در سنگ‌های رسوبی در زیر میکروسکوپ و در نور عبوری شناسایی و تقسیم‌بندی می‌شوند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای گروه‌ها و انواع مواد آلی در نور عبوری ارائه شده‌اند (مانند: تایسون، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵؛

(میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). این مواد آلی شامل بافت‌های چوبی، بافت‌های غیرچوبی، بافت‌های کوتیکولی، فیتوکلست‌های غشایی، فیتوکلست‌های کدر و نیمه کدر، خرده‌های ذغالی، شاخه‌های قارچی، بافت گیاهان دریایی و بافت‌های گیاهی اسکریید هستند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). آمورف‌ها، کلیه مواد آلی بدون ساختار مشخص میکروسکوپی را دربر می‌گیرند و از مواد بدون شکل باکتریایی، رزین گیاهان عالی، فیتوپلانکتون‌ها و مواد ناشی از فرایندهای دیاژنزی بافت ماکروفیت حاصل شده‌اند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). زیرگروه‌های شناسایی شده در گروه آمورف‌ها شامل توده‌های آلی، پلت‌های مدفوعی، تیوباکتری‌ها و سیانوباکتری‌ها، رزین و ضمغ و مواد آمورف قاره‌ای می‌باشند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶).

کاروالهو و همکاران، ۲۰۰۲؛ مه نرس و همکاران، ۲۰۰۸؛ مندونکا فیلهو و همکاران، ۲۰۱۱) که براساس آن‌ها، سه گروه اصلی از مواد آلی در سنگ‌های رسوبی قابل تشخیص هستند که شامل پالینومورف‌ها، فیتوکلست‌ها و آمورف‌ها می‌باشند و هرکدام از این سه گروه، طبق ویژگی‌های نوری و فیزیکی در زیر میکروسکوپ به زیر گروه‌هایی دسته‌بندی می‌شوند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). پالینومورف‌ها شامل اسپورومورف‌ها (اسپورها و پولن‌های قاره‌ای)، فیتوپلانکتون‌ها (پاراسینوفیت‌ها، آکریتارک‌ها، داینوفلاژله‌ها، سیانوباکتری‌ها، اسپورهای رودوفیات‌ها و جلبک‌های کلوروکوکاله) و زومورف‌ها (خرده‌های پوسته‌ای جانوری روزنه‌داران، اسکولودونت‌ها، گراپتولیت‌ها، کیتینوزوا) می‌باشند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). فیتوکلست‌ها متشکل از خرده‌های گیاهان قاره‌ای (عمدتاً) و قارچ‌ها با ابعاد در حد رس تا ماسه دانه‌ریز می‌باشند

جدول ۱. انواع و درصد مواد آلی مختلف مشاهده شده در نور عبوری در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده. مواد آلی شناسایی شده شامل: فیتوکلست‌ها (قاره‌ای)، پالینومورف‌های قاره‌ای (اسپورها و پولن‌ها) و آمورف‌ها می‌باشند.

Table 1. The identified organic matters in the studied black shale intervals. The organic matters include: phytoclast, palynomorphs (spores and pollens) and amorphs.

نوع کروژن	ماسرال	پالینومورف قاره‌ای: اسپور و پولن (%)	فیتوکلست (%)	آمورف (%)	افق‌های شیلی سیاه مورد نظر
IV	اینرتینیت	۵	۵۰	۴۵	۶
IV	اینرتینیت	۱۰	۳۵	۵۵	۵
IV	اینرتینیت	۱۵	۲۰	۶۵	۴
IV	اینرتینیت	۱۵	۱۵	۷۰	۳
IV	اینرتینیت	۳۰	۴۰	۳۰	۲
IV	اینرتینیت	۰	۰	۱۰۰	۱

کلی، ماسرال‌ها براساس خصوصیات فیزیکوشیمیایی و نوری‌شان به ماسرال‌ها و ساب‌ماسرال‌های مختلفی تقسیم می‌گردند (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). گروه ماسرالی اینرتینیت براساس میزان کربنی شدن، منشأ، اندازه و حفظ‌شدگی بافت سلولی به ساب‌ماسرال‌های فوزینیت، سمی‌فوزینیت، فونجینیت، ماکرینیت، میکرینیت، اسکروتینیت، اینرتودترینیت و سکریتینیت تقسیم شده است (تیلور و همکاران، ۱۹۹۸؛ میرشاهانی و همکاران،

۳-۴- ماسرال شناسایی شده در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده

بررسی مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده در زیر نور انعکاسی سفید و فلورسانس نشان می‌دهد که ماسرال موجود در آن‌ها از نوع اینرتینیت^۲ است (جدول ۱ و شکل ۵) که شامل ساب‌ماسرال‌های فوزینیت^۳، سمی فوزینیت^۴، ماکرینیت^۵ و اینرتودترینیت می‌باشد (شکل ۵). مواد آلی خصوصیات فلورسانس‌زایی نشان نمی‌دهند. به‌طور

^۲ semifusinite

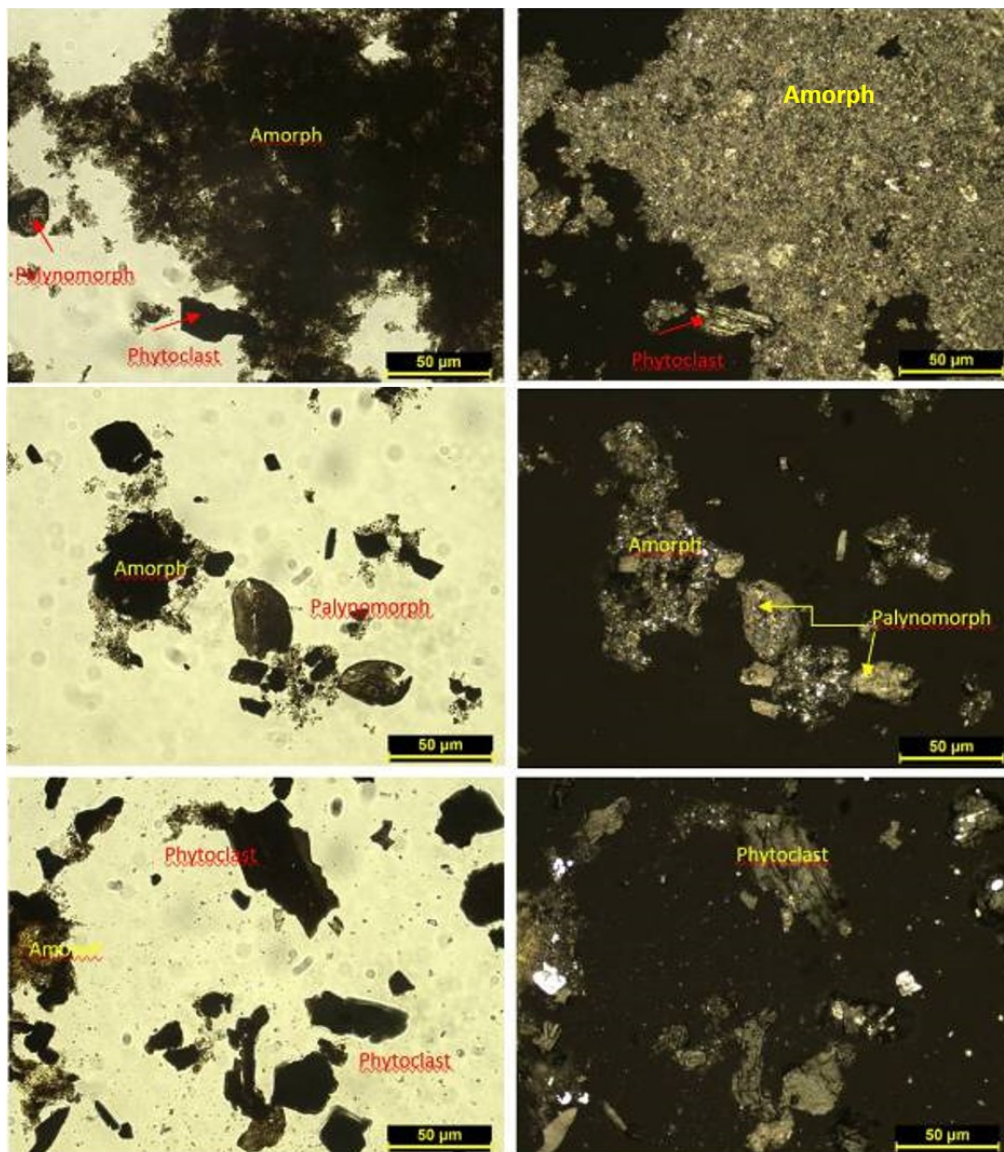
^۵ macrinite

^۲ inertinite

^۳ fusinite

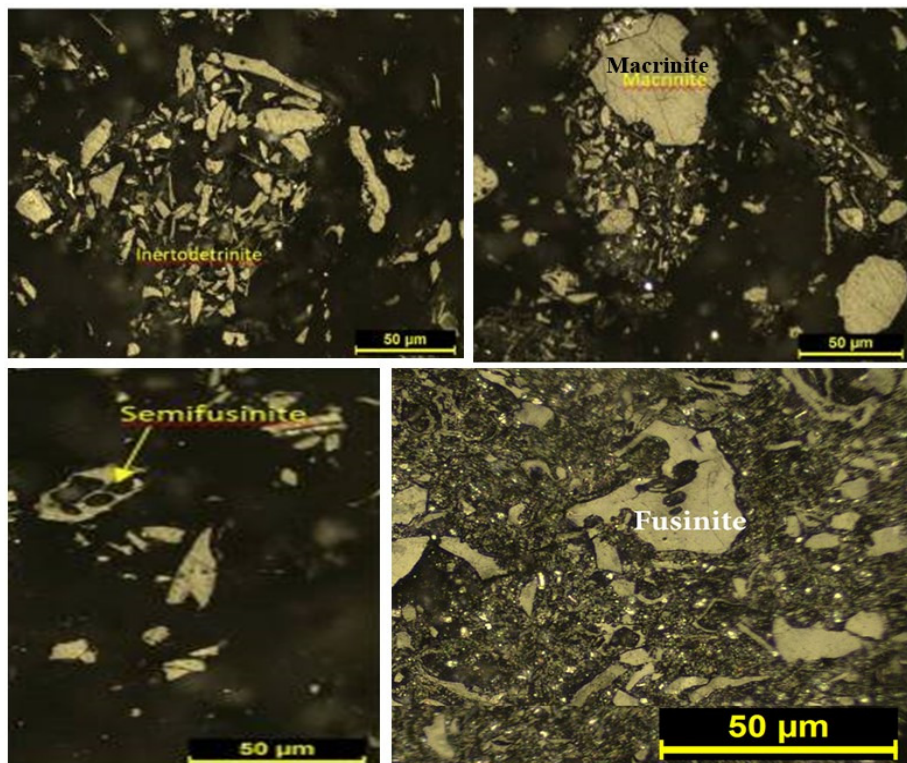
سلول‌های گیاهی می‌باشند (تیلور و همکاران، ۱۹۹۸). در گروه ماسرالی اینترتینیت، ساب‌ماسرال‌های فوزینیت، سمی‌فوزینیت و فونجینیت دارای بافت گیاهی اولیه می‌باشند، در صورتی که ساب‌ماسرال‌های میکرنیت، ماکرنیت و سکرینیت فاقد بافت گیاهی اولیه هستند و ساب‌ماسرال اینرتودترینیت نیز شامل خرده‌های ساب‌ماسرال‌های فوزینیت و سمی‌فوزینیت است (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶).

۱۳۹۶). ساب‌ماسرال‌های مربوط به گروه اینترتینیت نسبت به سایر گروه‌های ماسرالی مانند لیپتینیت‌ها و ویترنیت‌ها دارای خاصیت فلورسانس‌زایی بسیار پایین‌تر، اکسیژن و هیدروژن بسیار اندک و کربن زیادتری می‌باشند و همچنین در یک لایه رسوبی یکسان دارای انعکاس بالاتری هستند (ملندز، ۲۰۰۱؛ میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). منشأ اولیه ساب‌ماسرال‌های مربوط به گروه اینترتینیت شامل ساختارهای بافتی گیاهان عالی و قارچ‌ها با ساختارهای درونی حفظ شده، مواد آمورف ژله‌ای و ترشحات مربوط به



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده. تصاویر سمت چپ در نور عبوری و تصاویر سمت راست در نور انعکاسی عکس‌برداری شده‌اند.

Fig. 4. Microphotographs of the identified organic matters in the studied black shale intervals.



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از ساب‌ماسرال‌های شناسایی شده مربوط به ماسرال اینرتینیت موجود در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده.

Fig. 5. Microphotographs (reflected light) of the identified sub-macerals of the inertinite group in the studied black shale intervals.

تقریباً افزایشی همگام با افزایش سن نمونه‌ها نشان می‌دهد. این یافته‌ها بر پایه پارامتر اندازه‌گیری بلوغ (T_{max})، مواد آلی، به‌وسیله دستگاه راک-اول (جدول ۳)، کاملاً تایید می‌شود.

۴-۵- پارامترهای زمین‌شیمیایی آلی اندازه‌گیری شده به‌وسیله تجزیه راک-اول در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده

تعدادی از پارامترهای زمین‌شیمیایی آلی مهمی که در شش افق شیلی سیاه مطالعه شده به‌وسیله تجزیه راک-اول تعیین گردیدند، در جدول ۳ مشخص می‌باشند.

۵- بحث

مطالعات سنگ‌نگاری انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهند که منشأ مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه شناسایی شده در سازند بهرام، گیاهان قاره‌ای بوده‌اند.

۴-۴- شاخص آلتراسیون حرارتی و انعکاس اینرتینیت در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده

نتایج آنالیز شاخص یا درجه آلتراسیون حرارتی (TAI) عمدتاً بر اساس پالینومورف‌ها (اسپور و پولن) و انعکاس اندازه‌گیری شده بر روی ماسرال اینرتینیت^۶ در شش افق شیلی سیاه (۱ تا ۶) مطالعه شده و در جدول ۲ و شکل ۲ ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که شاخص آلتراسیون حرارتی در نور عبوری و انعکاس اینرتینیت در نور انعکاسی اندازه‌گیری شده‌اند. طبق نتایج آنالیز انعکاسی بر روی افق‌های شیلی، به دلیل عدم وجود ماسرال ویتیرینیت در آن‌ها، امکان اندازه‌گیری انعکاس ویتیرینیت مقدور نمی‌باشد و محدوده حرارتی هیدروکربن‌زایی براساس نتایج انعکاس ویتیرینیت قابل ارائه نیست. به دلیل این محدودیت، اندازه‌گیری انعکاس بر روی ماسرال اینرتینیت که ماسرال غالب در افق‌های شیلی سیاه مورد نظر می‌باشد، انجام شده است. بر اساس شکل ۲، تغییرات میزان انعکاس، روندی

^۶ Inertinite Reflectance

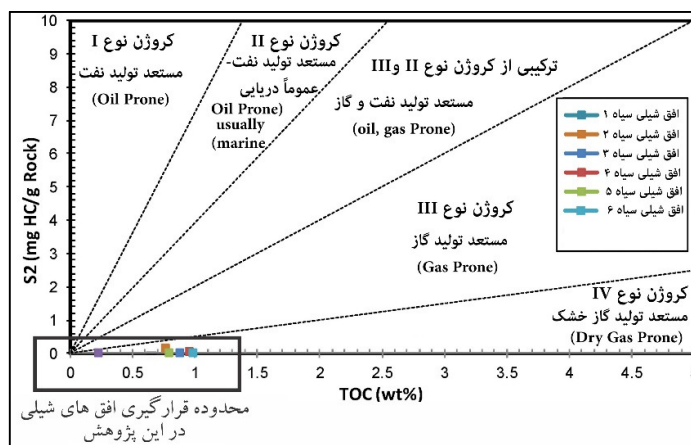
آلتراسیون حرارتی (TAI) تعیین شده در افق‌های شیلی سیاه شناسایی شده (محدوده +۴ تا -۴- در شکل ۲ و جدول ۲) حاکی از بلوغ بالای مواد آلی موجود در آن‌ها می‌باشد. همچنین، نتایج مطالعات میکروسکوپی در زیر نور فلورسانس نشان داده است که مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مزبور فاقد هرگونه خاصیت فلورسانس‌زایی هستند که این امر می‌تواند از بلوغ بالای مواد آلی ناشی شده باشد. در این تحقیق، حضور ساب‌ماسرال‌های گروه اینترتینیت شامل اینترتودتینیت، فوزینیت، سمی‌فوزینیت و ماکرینیت در افق‌های شیلی مورد نظر نشان‌دهنده این مطلب است که کروژن موجود در آن‌ها از نوع IV می‌باشد. همچنین نمودار تغییرات S2 در مقابل TOC (هانت، ۱۹۹۶) نیز نشان می‌دهد که افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده دارای کروژن نوع IV می‌باشند (شکل ۶). نمودار تغییرات HI در برابر Tmax (هانت، ۱۹۹۶) نیز نشان‌دهنده این است که افق‌های مورد نظر حاوی کروژن نوع IV هستند (شکل ۷).

اگرچه در اولین و پایین‌ترین افق شیلی (افق شیلی شماره ۱ در شکل ۲ و جدول ۱) در سازند بهرام، مواد آلی صرفاً از نوع آمورف می‌باشند اما با توجه به عدم شناسایی هرگونه مواد آلی با منشأ دریایی در کلیه افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده، می‌توان بر قاره‌ای بودن آمورف‌ها در افق‌های مزبور تأکید نمود. تعیین مرحله یا میزان بلوغ یا پختگی مواد آلی در سنگ منشأ، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مراحل در مطالعات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی آلی در نظر گرفته می‌شود (تیلور و همکاران، ۱۹۹۸؛ میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). جهت تعیین میزان پختگی یا بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مورد نظر، از شاخص آلتراسیون حرارتی (TAI) استفاده گردیده است (شکل ۲ و جدول ۲). لازم به ذکر است که شاخص آلتراسیون حرارتی (TAI) که یک شاخص رنگی محسوب می‌شود که برای اولین بار توسط استاپلین در سال ۱۹۶۹ تعریف گردیده است (میرشاهانی و همکاران، ۱۳۹۶). محدوده شاخص

جدول ۲. انعکاس اینترتینیت و شاخص یا درجه آلتراسیون حرارتی (TAI) در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده.

Table 2. Inertinite reflectance and the thermal alteration index (TAI) in the studied black shale intervals.

شاخص آلتراسیون حرارتی Thermal Alteration Index (TAI)							انعکاس اینترتینیت: Inertinite Reflectance data (Ro % in oil)				افق‌های شیلی سیاه مورد نظر
5	4	-4	+3	3	-3	+2	متوسط	حداکثر	حداقل	تعداد دفعات قرائت آنالیز	
							2.34	2.92	1.61	16	۶
							2.23	3.37	1.69	54	۵
							2.58	3.10	1.56	40	۴
							2.36	3.14	1.93	26	۳
							2.45	2.94	1.98	34	۲
							2.16	2.66	1.67	43	۱



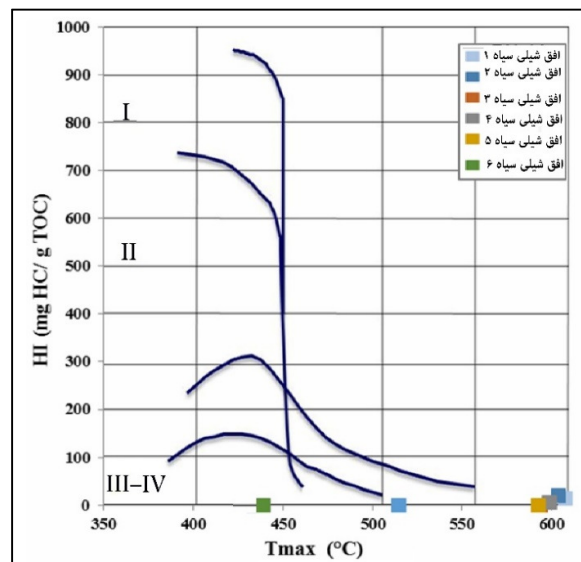
شکل ۶. نمودار تغییرات S2 در برابر TOC برای شش افق شیلی مطالعه شده (هانت، ۱۹۹۶).

Fig. 6. S2 vs TOC diagram for the identified black shale intervals (Hunt, 1996).

جدول ۳. تعدادی از پارامترهای زمین‌شیمیایی آلی مهم به دست آمده به‌وسیله تجزیه راک-اول از افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده.

Table 3. Some of the important organic geochemical parameters measured by Rock Eval analysis for the identified black shale intervals.

افق‌های شیلی مورد نظر	S1 (mg HC/g Rock)	S2 (mg HC/g Rock)	S1+S2 (mg HC/g Rock)	Tmax (°C)	S3 (mg CO ₂ /g Rock)	TOC (wt%)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg HC/g TOC)
۶	0	0	0	439	0.33	0.98	0	33
۵	0	0	0	593	0.45	0.79	0	57
۴	0	0.06	0.06	599	0.69	0.95	6	73
۳	0	0	0	594	0.37	0.87	0	43
۲	0	0.14	0.14	604	0.49	0.76	19	64
۱	0	0.35	0.35	608	1.2	2.79	13	43



شکل ۷. نمودار تغییرات HI در برابر Tmax برای شش افق شیلی سیاه مطالعه شده (هانت، ۱۹۹۶).

Fig. 7. HI vs Tmax diagram for the identified black shale intervals (Hunt, 1996).

گاززایی است. لازم به ذکر است که نمودار تغییرات S2 در مقابل TOC ترسیم شده برای افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده مؤید مستعد بودن آن‌ها برای تولید گاز خشک می‌باشد (شکل ۶).

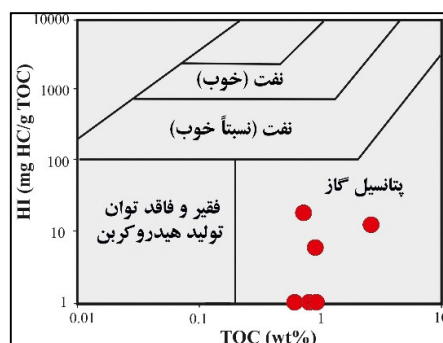
۶- نتیجه‌گیری

در طی مطالعات صحرایی، شش افق چینه‌ای از شیل‌های سیاه در مجموع به ضخامت ۴۴/۵ متر در توالی چینه‌نگاری دونین بالایی سازند بهرام در شمال شهر کرمان شناسایی شدند. تجزیه و تحلیل‌های سنگ‌نگاری آلی، نشان دادند که مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده شامل فیتوکلست‌ها (قاره‌ای)، پالینومورف‌های قاره‌ای (اسپورها و پولن‌ها) و آمورف‌ها می‌باشند و تنها ماسرال موجود در این شیل‌ها از نوع اینترتینیت است. بر اساس مطالعات

در مجموع می‌توان گفت بلوغ بالای مواد آلی موجود در افق‌های شیلی سیاه مطالعه شده، حضور ساب‌ماسرال‌های اینترتودترینیت، فوزینیت، سمی‌فوزینیت و ماکرینیت در آن‌ها و محسوب شدن کروژن موجود در شیل‌ها از نوع IV حاکی از توان پایین تولید هیدروکربنی افق‌های شیلی بررسی شده می‌باشند. با این حال، افق‌های شیلی مذکور دارای پتانسیل تولید گاز به‌صورت جزئی می‌باشند. نمودار تغییرات HI در برابر TOC (پیترز، ۱۹۸۶) که برای شش افق شیلی سیاه مطالعه شده رسم شده است بیان‌گر این است که افق‌های شیلی مورد نظر تا حدودی در محدوده تولید گاز قرار دارند (شکل ۸). همچنین، محدوده شاخص آلتراسیون حرارتی (TAI) برابر با ۴ تا ۴- در افق‌های شیلی مطالعه شده (شکل ۲ و جدول ۲)، حاکی از قرارگیری مواد آلی موجود در افق‌های شیلی مزبور در محدوده پنجره

این پژوهش و با توجه به ماهیت قاره‌ای بودن مواد آلی گیاهی موجود در شیل‌های سیاه دونین، روش‌ها و مطالعات صورت گرفته می‌توانند مبنایی برای بررسی‌ها و پی‌جویی‌های بعدی بر روی شیل‌های سیاه در سایر نقاط استان کرمان و ایران مرکزی، به‌منظور ارزیابی پتانسیل تولید گازی آن‌ها و کشف افق‌ها و شیل‌های ذغالی و کیفیت منابع ذغالی آن‌ها باشند.

سنگ‌نگاری و تجزیه و تحلیل‌های زمین‌شیمیایی آلی، مواد آلی موجود در افق‌های شیلی دارای بلوغ بالایی بوده و کروژن موجود در شیل‌ها از نوع IV می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان دادند که افق‌های شیلی مزبور در مجموع دارای توان تولید هیدروکربنی پایینی هستند. اگرچه، دارای پتانسیل اندکی برای تولید گاز می‌باشند و مستعد برای تولید گاز خشک هستند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از



شکل ۸. نمودار تغییرات HI در برابر TOC برای شش افق شیلی مطالعه شده (پیترز، ۱۹۸۶).

Fig. 8. HI vs TOC diagram for the identified black shale intervals (Peters, 1986).

- Baioumy, H., Ulfa, Y., Nawawi, M., Padmanabhan, E., Anuar, M. N. A. (2016) Mineralogy and geochemistry of Palaeozoic black shales from Peninsular Malaysia: Implications for their origin and maturation. *International Journal of Coal Geology*, 165: 90–105.
- Behar, F., Beaumont, V., Pentead, H. D. B. (2001) Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*. 56 (2): 111–134.
- Boyer, D. L., Droser, M. L. (2009) Palaeoecological patterns within the dysaerobic biofacies: Examples from Devonian black shales of New York state. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 276 (1–4): 206–216.
- Carvalho, M. A., Mendoca Filho, J. G., Menezes, T. R. (2002) Palynofacies analysis of the upper Aptian-Albian succession of Sergipe Basin, Brazil. In *Boletim 6_ simposio sobre o Cretaceo do Brasil*, Sao Pedro-SP, p. 209–214.
- Fathy, D., Baniasad, A., Littke, R., Sami, M. (2024) Tracing the geochemical imprints of Maastrichtian black shales in southern Tethys, Egypt: Assessing hydrocarbon source potential and environmental signatures. *International Journal of Coal Geology*, 283: 104457. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104457>.
- Flügel, E. (2010) *Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application*, Springer, Berlin, 984p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>.

۷- تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر حامد زندمقدم از دانشگاه شهید باهنر کرمان به خاطر کمک‌ها و راهنمایی‌های ایشان در طی بررسی‌ها و مطالعات صحرایی، صمیمانه قدردانی و سپاسگزاری می‌شود. این مقاله، مربوط به طرحی پژوهشی می‌باشد که توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) تحت قرارداد شماره ۹۶۰۰۲۶۸۱ و همچنین توسط پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، تحت قرارداد شماره ۲۷۴۷/۹۶ / ص / ۷ حمایت مالی شده است که از آن‌ها نهایت تشکر و قدردانی می‌شود. نویسنده این مقاله، از سردبیر محترم هیئت تحریریه نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی و همچنین داوران محترم بابت نکات ارزشمندی که برای تقویت مقاله متذکر شدند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارد.

References

- Adeyilola, A., Zakharova, N., Liu, K., Gentzis, T., Carvajal-Ortiz, H., Ocubalidet, S., Harrison III, W. B. (2022) Hydrocarbon potential and organofacies of the Devonian antrim shale, Michigan basin. *International Journal of Coal Geology*, 249: 103905. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103905>.

- Gholamalian, H. (2006) Biostratigraphy of Late Devonian Sequence in Hutk section (North of Kerman) Based on Conodonts. *Geosciences Scientific Quarterly Journal (Ulum-I Zamin)*, 15 (59): 94–101. (in Persian).
- Hashmie, A., Rostamnejad, A., Nikbakht, F., Ghorbanie, M., Rezaie, P., Gholamalian, H. (2016) Depositional environments and sequence stratigraphy of the Bahram Formation (middle–late Devonian) in north of Kerman, south-central Iran. *Geoscience Frontiers*, 7(5): 821–834.
- Hunt, J. M. (1996) *Petroleum geochemistry and geology*, W. H. Freeman, New York, 743p.
- Ju, Y., Wang, G., Bu, H., Li, Q., Yan, Z. (2014) China organic-rich shale geologic features and special shale gas production issues. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3): 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.03.002>.
- Klemme, H. D., Ulmishek, G. F. (1991) Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors. *AAPG Bulletin*, 75(12): 1809–1851.
- Li, Y., Fan, T., Zhang, J., Wei, X., Zhang, J. (2015) Impact of paleoenvironment, organic paleoproductivity, and clastic dilution on the formation of organic-rich shales: a case study about the Ordovician-Silurian black shales, southeastern Chongqing, South China. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12): 10225–10239. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1944-y>.
- Mahmudy Gharaie, M. H., Matsumoto, R., Racki, G., Kakuwa, Y. (2007) Chemostratigraphy of Frasnian-Famennian transition: Possibility of methane hydrate dissociation leading to mass extinction, in Monechi, S., Coccioni, R., and Rampino, M., eds., *Large Ecosystem Perturbations: Causes and Consequences*. Geological Society of America Special Papers, 424: 109–125.
- Melendez, R. B. (2001) The characterisation and combustion of South American coals. PhD Thesis, University of Nottingham.
- Mendonça Filho, J. G., Menezes, T. R., Mendonça, J. D. O. (2011) Organic composition (palynofacies analysis). *ICCP Training Course on Dispersed Organic Matter*, 5: 33–81.
- Menezes, T. R., Mendonça Filho, J. G., Araujo, C. V., de Souza, I. V. A. F., de Oliveira Mendonça, J. (2008) Fácies orgânica: conceitos, métodos e estudos de casos na indústria do petróleo. *Brazilian Journal of Geology*, 38(2): 86–96.
- Mirshahani, M., Khani, B., Khajehzadeh, A. (2017) *Applied Organic Petrography: Principals and Techniques*. Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, 328p. (in Persian).
- Nichols, G. (2009) *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley– Blackwell, Chichester, 432 p.
- Pang, Q., Song, H., Xu, Z., Xu, S., Hu, G., Liu, Y., Zhang, J. (2024) Uranium mobility and enrichment during hydrocarbon generation and accumulation processes: A review. *Ore and Energy Resource Geology*: 100063. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2024.100063>.
- Pearson, D. L. (1990) Pollen/spore color “standard,” version 2. Phillips Petroleum eology Branch, Bartlesville, Oklahoma, 3p.
- Peters, K. E. (1986) Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG bulletin*, 70(3): 318–329.
- Potter, P. E., Maynard, J. B., Depetris, P. J. (2005) *Mud and Mudstone: Introduction and overview*. Springer-Verlag, Berlin, 297pp. <https://doi.org/10.1007/b138571>.
- Qiuying, Z. (2000) Uraniferous Black Shale and Related Uranium Mineralization Features in South China. *Acta Geologica Sinica*, 74 (3): 602–604.
- Rahiminejad, A. H., Zand-Moghadam, H., Mirshahani, M., Khajehzadeh, A. (2022) Famennian inertinite-bearing marine shale facies as indicator of wildfire event in north of Gondwana. *Historical Biology*, 34(9): 1752–1768.
- Reading, H. G. (Ed) (1996) *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Wiley-Blackwell, Oxford, 704p.
- Staplin, F. L. (1969) Sedimentary organic matter, organic metamorphism, and oil and gas occurrence. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 17 (1): 47–66. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.17.1.047>.
- Stocklin, J. (1974) Possible ancient continental margins in Iran. In: Burk, C.A., & Drake, C.L. (Eds). *The geology of Continental margins*. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, pp. 873–887.
- Takin, M. (1972) Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, 235(5334): 147–150. <https://doi.org/10.1038/235147a0>.
- Taylor, G. H., Teichmüller, M., Davis, A. C. F. K., Diessel, C. F. K., Littke, R., Robert, P. (1998) *Organic petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 704 p.
- Trabucho-Alexandre, J., Hay, W. W., De Boer, P. L. (2012) Phanerozoic environments of black shale deposition and the Wilson Cycle. *Solid Earth*, 3(1): 29–42. <https://doi.org/10.5194/se-3-29-2012>, 2012.
- Tyson, R. V. (1993) Palynofacies analysis. In *Applied micropalaeontology*, Springer, Dordrecht, p. 153-191. Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0763-3_5.
- Tyson, R. V. (1995) Abundance of organic matter in sediments: TOC, hydrodynamic equivalence, dilution and flux effects. In: *Sedimentary organic matter: Organic facies and*

- palynofacies. Springer, Dordrecht, (pp. 81-118).
https://doi.org/10.1007/978-94-011-0739-6_5.
- Vahdati-Daneshmand, F., Mosavvari, F., Mahmudi Gharai, M. H., Ghasemi, A (1995) Geological map of Zarand, Geology Survey of Iran, Tehran, scale: 1:100,000 series, sheet 7351.
- Wang, E., Guo, T., Li, M., Xiong, L., Dong, X., Wang, T., Ouyang, J. (2023) Reservoir characteristics and oil properties of a lacustrine shale system: Early Jurassic black shale from the Sichuan Basin, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 242: 105491.<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105491>.
- Wendt, J., Kaufmann, B., Bełka, Z., Farsan, N., Bavandpur, A. K. (2002) Devonian/lower carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part I. Southeastern Iran. *Acta Geologica Polonica*, 52(2): 129–168.
- Wilmsen, M., Fürsich, F. T., Seyed-Emami, K., Majidifard, M. R. (2009) An overview of the stratigraphy and facies development of the Jurassic System on the Tabas Block, east-central Iran. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M., & Granath, J.W. (Eds), *South Caspian to central Iran basins*. Geological Society, London, Special Publications, 312 (1): 323–343. <https://doi.org/10.1144/SP312.15>.