

تكامل الجيوكيمياء اللاعضوية والعضوية كنهج قوي في تقييم النضج والقدرة التوليدية للمادة العضوية في توضعات الترياسي الأسفل.

حالة الدراسة: الفيض - أبو رباح - الشريفة - تياس

وعد محمود محمد مصطفى¹، أ. م. د بشار حسن بغداددي²

¹طالبة دراسات عليا /دكتوراه/، قسم الجيولوجيا، كلية العلوم، جامعة دمشق.

mwd47930@damascusuniversity.edu.sy

²أستاذ مساعد في قسم الجيولوجيا، كلية العلوم، جامعة دمشق.

Bashar.baghdadi@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

تم إجراء تحاليل جيوكيميائية متكاملة لرسوبات الترياسي الأسفل على طول مقطع من حوض الدو في وسط سورية. ويتكون المقطع من أربعة حقول: الفيض، أبو رباح، الشريفة، وتياس. وتم تقييم الرسوبات بناءً على معاملات ROCK EVAL، والتي أظهرت أنها تحتوي على كمية كبيرة من الكربون العضوي وتنتمي إلى النوع الثاني من الكيروجين. توافق هذه الرسوبات منطقة انتقالية بين نافذتي كل من النفط والغاز. وبعد ذلك، أجريت عملية استخلاص البيتوم لدراسة التغيرات الكمية (الإمكانات الهيدروكربونية والقدرة التوليدية) والتغيرات النوعية (النضج). أشارت نتائج اختبارات ROCK EVAL واختبارات الاستخلاص إلى أن النضج الحراري للمادة العضوية يزداد من حقل الفيض في الجنوب الغربي إلى حقل التياس في الشمال الشرقي. علاوة على ذلك، تم إجراء دراسة مفصلة بشكل منفصل لتحليل محتوى العناصر الأثر وسلوكها في كل حقل من حقول مقطع الدراسة. وأظهرت النتائج اشتراك كل من الصخر والمادة العضوية في شروط التوضع الجيوكيميائية، إضافة لانخفاض في محتوى الرسوبات الصخرية والمادة العضوية من العناصر الأثر مع زيادة النضج، مما سلط الضوء على أهميتها وموثوقيتها كمعاملات في تحديد النضج النسبي للمادة العضوية.

الكلمات المفتاحية: العناصر الأثر - النضج الحراري - المادة العضوية - الترياسي الأسفل

تاريخ الإيداع: 2024/04/30

تاريخ القبول: 2024/06/03



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

The Integration of Inorganic and Organic Geochemistry as a Powerful Approach for Evaluating the Generative Potential and Thermal Maturity of the Organic Matter from Lower Triassic Deposits. Case Study: Al-Fayd - Abu Rabah - Al-Sharifa – Tiyas.

Waad Mahmoud Mohamed Moustafa¹ Bashar Hasan Baghdadi²

1 PhD Student. Department of Geology, Faculty of Sciences, Damascus University.
mwd47930@damascusuniversity.edu.sy

2 Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Damascus University.
bashar.baghdadi@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

A comprehensive geochemical analysis of the Lower Triassic deposits was carried out along a section in the Al-Du Basin in central Syria. The section consisted of four fields: Al-Fayd, Abu Rabah, Al-Sharifa, and Tiyas. The evaluation of the deposits was based on ROCK EVAL parameters, which revealed that they contain a significant amount of organic carbon and belong to the kerogen of Type II. These deposits correspond a transitional zone between the oil and gas windows. Subsequently, a bitumen extraction process was conducted to study its quantitative (hydrocarbon potential and generating capacity) and qualitative (maturity) changes. The results from the ROCK EVAL and extraction tests indicated that the thermal maturity of the organic matter increases from the Al-Fayd field in the southwest to the Tiyas field in the northeast. Furthermore, a separate investigation was conducted to analyze the trace element content and its behavior in each field of the study section. The findings demonstrated the shared geochemical deposition conditions for both the rock and the organic matter, in addition, an increase in the content of rock deposits and organic matter trace elements with decreasing maturity, highlighting their significance and reliability as parameters for determining the relative maturity of organic matter.

Keywords: Trace elements, Thermal maturity, Organic matter, Lower Triassic

Received: 30/04/2024
Accepted: 03/06/2024



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

مقدمة:

يعتبر العقدين الأخيرين نقطة تحول هامة في مجال الدراسات النفطية وخاصةً فيما يتعلق بعمليات الاستكشاف النفطي اعتماداً على المسح الجيوكيميائي اللاعضوي، حيث تم تطوير مفاهيم كانت موجودة سابقاً بالإضافة لابتكار طرق جديدة في أساليب البحث والتقيب عن النفط الخام، أدت لرفع الاحتياطي النفطي العالمي بما يعادل 1.5 مرة عما كان عليه قبل إدخال الجيوكيمياء اللاعضوية إلى جانب الطرائق الجيولوجية والجيوفيزيائية التقليدية بحسب ما صرحت عنه هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS, 2016)، هذا ما وجه العلماء مؤخراً للبحث عن أقصى استفادة ممكن أن تقدمها أسس الجيوكيمياء اللاعضوية في مجال الدراسات النفطية ككل، حيث أعطت نتائج مقبولة إلى جيدة في فصل النفوط المختلطة وخاصة ضمن الأحواض التراكمية، وفي ربط النفوط مع مصادرها (Guo et al., 2020; Niu et al., 2022)، يأتي هذا البحث على أعتاب الأبحاث سابقة الذكر لتعزيز إمكانية تطبيق الجيوكيمياء اللاعضوية وعلى وجه الخصوص العناصر الأثر وقدرتها على عكس مجموعة من المعايير التي تتعلق بالقدرة التوليدية للصخر والنضج الحراري للمادة العضوية، المرتبطة بسلوكيتها ضمن الأوساط الجيوكيميائية المختلفة (Peters and Molodwan, 1993)، يقدم هذا البحث دراسة للعلاقة بين محتوى توضعات مولدة عائدة للترياسي الأسفل من العناصر الأثر ومقارنة سلوكها الكيميائي على امتداد المقطع المدروس الممتد من جنوب شرق حوض الدو (وسط سورية)، حتى الجزء الشمالي الشرقي منه، وتشمل بالترتيب حقل الفيض - أبو رياح - الشريفة - تياس. وقد تم اختيار هذا المقطع نظراً لكون هذه الحقول متتالية (دون وجود تراكمات تفصلها عن بعضها البعض) أي متصلة جغرافياً بحيث تسمح بإجراء دراسة جيوكيميائية مستمرة للخصائص من جهة، ولكون توضعات الترياسي الأسفل هي التوضعات المولدة الرئيسية ضمن العمود الليثوستراتغرافي للحوض مما يجعل الخطأ المحتمل الناتج عن الخلط بحدوده الدنيا من جهة أخرى.

2- الدراسات السابقة:**2-1 الدراسات المنفذة على منطقة الدراسة:**

تعتبر حقول الفيض، أبو رياح، الشريفة، تياس من الحقول ذات الأهمية النفطية ضمن مجال تشكيلة الكوراشينادولوميت وخاصة المجال D1 الذي يعتبر نطاق منتج جيد في غالبية الآبار، وفيما يخص هذا الجزء أجرت الشركة السورية للنفط SPC، والشركات التابعة لها مجموعة من الدراسات امتدت من تسعينات القرن الماضي حتى تاريخه، شملت دراسات متنوعة جيولوجية، مستحاثية، سيزمية، وبيوكيميائية على شكل تقارير داخلية غير منشورة، بالإضافة لمجموعة دراسات اختصت بتشكيلة الأمانوس رمل على مساحات ضيقة باعتبارها سوية خزنية جيدة كما في حقل تياس (تقارير داخلية غير منشورة).

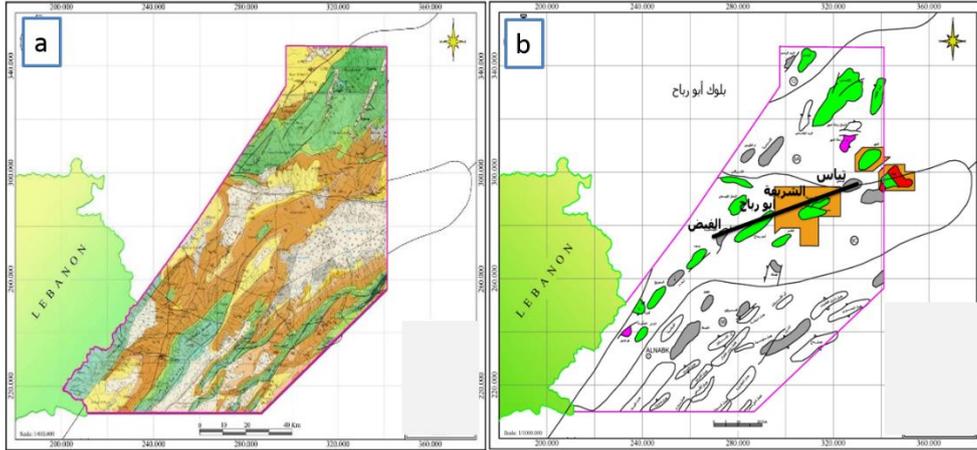
بدأت عمليات المسح لبيولوجية المنطقة على يد بونيكاروف (Ponikarov, 1966)، بالإضافة لأعمال المسح التي قدمتها المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية حتى عام 2008. على صعيد آخر، أجرى غبرة (1999)، دراسة لتأثير الحرارة والضغط والزمن الجيولوجي على توضعات محددة ضمن نطاق الطي التدمري وحدد التشكيلات التي من الممكن أن تلعب دور صخور مولدة، كما قدم تقييم لدور تشكيلة الأمانوس شيل العائدة للترياسي الأسفل في توليد الهيدروكربون ضمن تحت نطاق الطي التدمري الشمالي (غبرة، 2009)، يجدر الذكر أن جميع الأعمال البحثية والمسح الجيولوجي لم تهدف لما يرمي إليه هذا البحث وخاصة في مجال البحث في تطبيقات العناصر الأثر بما يخص تحديد الخصائص التوليدية والنضجية للصخور المولدة.

2-2 الدراسات الجيوكيميائية المرجعية العالمية:

يعتبر إعلان الولايات المتحدة الأمريكية عن اكتشاف أول حقل غاز باستخدام طرق المسح الجيوكيميائي عام 2016 وفق هيئة المسح الأمريكية (Bradley et al., 2017; USGS, 2016)، نقطة تحول هامة بتوجيه أنظار النفطيين في العالم حول تطوير الطرائق الجيوكيميائية في الاستكشاف، إلا أن هذا الحدث وعلى أهميته لم يكن بداية للأبحاث التي تعتبر نهضة في الجيوكيمياء الاستكشافية إن صح التعبير، فقد بدأ Hunt عام 1977 بوضع أسس الجيوكيمياء العضوية وربط النفوط مع مصادرها (Hunt, 1977; Hunt, 1996)، تلاها سلسلة من الأبحاث في الجيوكيمياء العضوية واللاعضوية (Palacas, 1984; Molodwan et al., 1985; Peters et al., 1985).

(Molodwan,1993)، ثم دُرست تطبيقات العناصر الأثر على خصائص النفط والصخور المولدة وعمليات الهجرة من قبل (Jiao et al., 2010)، في حوض تاريم في الصين وتطبيقات العناصر الأثر في تطوير وتصنيف النفط الخام مؤخراً من (Niu et al 2022).
3- منطقة الدراسة:

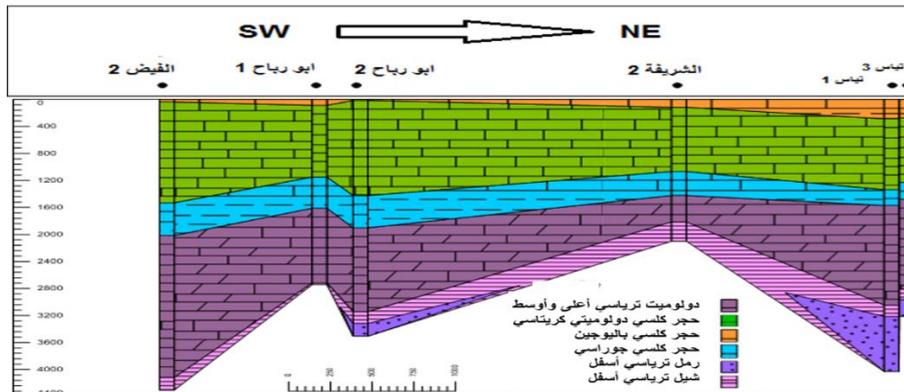
تمتد منطقة الدراسة على أربع حقول متجاورة تتجه من الجنوب الغربي حتى الشمال الشرقي على محور حوض الدو تقريباً وسط سورية، بدءاً من حقل الفيض باتجاه أبو رياح - الشريفة - نياس على التوالي. علماً أن كل من حقول أبو رياح، الشريفة ونياس هي حقول منتجة للغاز، أما حقل الفيض لم يدخل في الإنتاج بعد. وتقع جميع الحقول المذكورة ضمن بلوك أبو رياح (الشكل 1-a، 1-b).



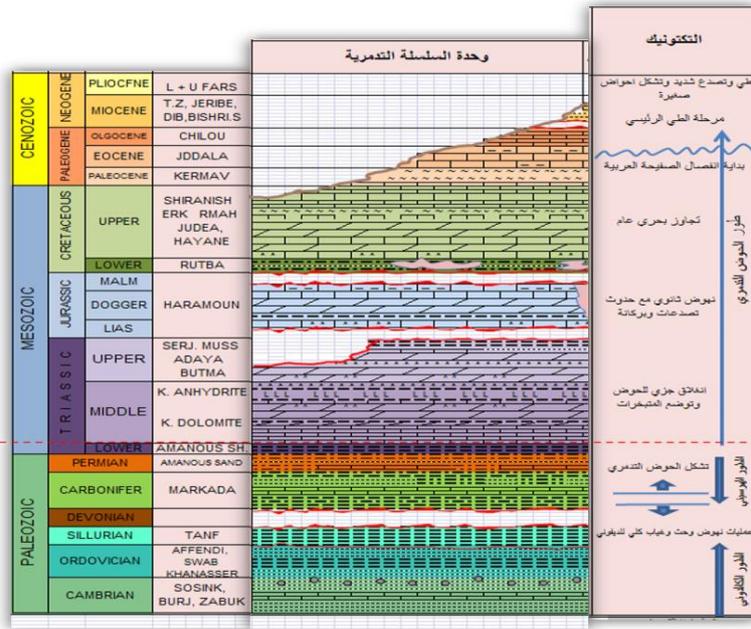
الشكل 1: خريطة جيولوجية لبلوك أبو رياح (a)، وموقع الحقول منطقة الدراسة ضمن البلوك (b)، (SPC.2018)

الشكل (a): تظهر الألوان الأعمار الجيولوجية للتكشفات السطحية (الرمادي- راعي، الأصفر - نيوجين، البني - باليوجين، الأخضر كريتاسي).
 الشكل (b): تمثل التراكمات ذات اللون الأخضر تراكمات منتجة للغاز، واللون الأحمر منتجاً للنفط، اللون الزهري تراكمات مرشحة للحفر، اللون الرمادي تراكمات غير منتجة بعد.

تتكشف في المنطقة توضعات أقدمها يعود للكريتاسي العلوي في حقل أبو رياح بالإضافة لتوضعات الباليوجين (الشكل 1a) التي تزداد ثخانة باتجاه الشمال الشرقي وفق المقطع المدروس (الشكل، 2)، حيث يلاحظ تعرض المنطقة لمجموعة من العمليات التكتونية اللاحقة لعمليات ترسيب تشكيلات الترياسي الأسفل، أدت لحدوث نهوضات لبعض المستويات تمثلت بسلسلة من الفوالق العادية والعكسية التي بدأت خلال الترياسي الأوسط والأعلى وتساعدت شدتها خلال الكريتاسي العلوي والباليوجين حيث تشكلت المعالم الحالية لنطاق الطي التدمري (الشكل، 3)، (Brew et al., 2001).



الشكل 2: مقطع لنيوستراتغرافي يتجه من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي يُظهر التكشفات على امتداد المنطقة المدروسة ويُظهر التتابع الليتوستراتغرافي المخترق في المنطقة، تظهر توضعات الشيل المستهدفة في الدراسة باللون الأحمر على أعماق تتراوح بين 2000 و 4400 متر.



الشكل 3: التطور التكتوني للسلسلة التدمرية، لاحظ بداية تطور الحوض التدمري بدأت مع بداية الترياسي الأوسط. التطور التكتوني، (Brew et al., 2001) المقطع، (الشركة السورية للنفط).

4- مبررات الدراسة:

يشكل البحث في تطبيق المفاهيم الحديثة للجيوكيمياء اللاعضوية على حقول الجمهورية العربية السورية واختبار إمكانية تطبيق العناصر الأثر كمعاملات في الدراسات الجيوكيميائية النفطية علماً فريداً، وتطبيق هذه المقاربة في الدراسات النفطية في سورية يشكل عملاً رائداً ومتقدماً يُستهدف من خلاله الإجابة على تساؤلات حول:

- إمكانية استنتاج قدرة الصخر التوليدية من خلال العناصر الأثر، عن طريق تحديد مدى ارتباط تغير محتوى المادة العضوية والصخر الحاوي عليها من العناصر الأثر مع قدرته التوليدية (طاقته الهيدروكربونية الكامنة).
- اختبار العلاقة بين المحتوى من المادة العضوية من العناصر الأثر ودرجة النضج، بمعنى آخر، استقرار درجة نضج المادة العضوية اعتباراً من العناصر الأثر (فقط) الموجودة في المادة العضوية.
- اكتساب المعرفة وإرساء القواعد على المستوى المحلي (سورية) في مجال جيوكيمياء العناصر الأثر كجزء من الجيوكيمياء اللاعضوية فيما تقدمه من إسهامات تتكامل مع الطرائق التقليدية المستخدمة في هذا المجال لتؤسس لهذه التقنية التي أصبحت رائجة عالمياً في أن تكون متبعة محلياً.

5- أهداف الدراسة:

انطلاقاً مما ذكر أعلاه يهدف هذا البحث إلى ما يلي:

- إجراء تقييم تفصيلي للكمونية الهيدروكربونية لتوضعات الترياسي الأسفل اعتماداً على معاملات Rock Eval.
- تحديد نمط الكيروجين ودرجة النضج اعتماداً على مخططات فان كريفلين.
- إجراء تقييم مخبري لمحتوى توضعات الترياسي الأسفل (المدرسة باستخدام Rock Eval) من البيتوم.
- مقارنة درجة النضج فيما بين البيتوم المستخلص مخبرياً على امتداد مقطع الدراسة (الفيض - ابو رباح - الشريفة - تياس).
- تحديد محتوى التوضعات المدرسة من العناصر الأثر V, Cr, Ni, Co, Sr على امتداد المقطع المدرس.
- تقصي العلاقة بين نتائج معاملات Rock Eval ونتائج البيتوم المستخلص مخبرياً وكذلك قيم المحتوى من العناصر الأثر المدرسة.
- ربط المحتوى من العناصر الأثر على امتداد مقطع الدراسة واستنتاج الكمون التوليدية للهيدروكربون واستقرار النضج الحراري.

6- مواد وطرائق الدراسة:

تقوم هذه الدراسة على مجموعة من الآبار الاستكشافية والتنقيبية في حقول الفيض - أبو رياح - الشريفة - تياس، التي أمكن الحصول منها على عينات لبابية أو فتاتية من المستويات العائدة للترياسي الأسفل أو الحاوية على شواهد هيدروكربونية تعود أيضاً للترياسي الأسفل، يُظهر الجدول (1)، العينات المدروسة مع أعماقها ورموزها وتركيبها الليثولوجي.

الجدول 2: العينات المستخدمة في الدراسة مع الرموز والأعماق والتركيب الليثولوجي لكل منها.

الحقل	العينات - رقم البئر	العمق (م)	الليثولوجيا
الفيض	2 - A	لبابية 4159	شيل
	2 - B	فتاتية 4125	حجر كلسي + شيل
	2 - C	لبابية 4200	شيل
	2 - D	فتاتية 4300	شيل
أبو رياح	2 - E	لبابية 3150	شيل
	2 - F	لبابية 3310	شيل
	7 - G	فتاتية 2808	شيل
	3 - H	فتاتية 2739	شيل
الشريفة	2 - I	لبابية 2450	حجر كلسي
	2 - J	فتاتية 2500	شيل
	2 - K	لبابية 2575	شيل
	2 - L	فتاتية 2650	شيل
	2 - M	فتاتية 3100	شيل
تياس	1 - N	لبابية 3050	حجر كلسي
	1 - O	لبابية 3200	شيل
	3 - P	فتاتية 2485	شيل

• تشير الرموز A, B, C... للرقم المتسلسل للعينات أثناء الاختبارات المنفذة، وتشير الأرقام 1, 2, 3 لرقم البئر في الحقل، بحيث يصبح الرمز كما في المثال: الفيض 2 - A (حقل الفيض، البئر 2، أول عينة مختبرة).

* الطرائق المستخدمة:

- 1- ROCK EVAL: استخدمت مخرجات هذا الجهاز من أجل تحديد المؤشرات الكمية والنوعية والنضج للعينات المدروسة، الذي يعتمد على مبدأ التكسير الحراري بوسط خالٍ من الأوكسجين حيث يوضع مسحوق من العينة بوزن 0.7-1 g ويتم قراءة قيم TOC, S1, S2, S3 المعبرة عن المحتوى الكلي من الكربون العضوي، الهيدروكربون الحر، البيتومين والاسفلتين والكيروجين، ونسبة CO₂ على التوالي، ثم يتم تحديد قيم T_{MAX} المعبرة عن درجة الحرارة العظمى التي تصل لها قمة S2.
- 2- العمل المخبري: تم فصل البيتومين من العينات التي تمت دراستها باستخدام ROCK EVAL بالإضافة لعينات أخرى (الجدول، 1)، وذلك بإعتماد الطريقة الساخنة، حيث أخذت العينات الصخرية اللبائية أو الفتاتية، لتغسل وتجفف وتطحن ثم تتخل بمناخل أبعادها من رتبة 0.16 - 0.63 mm يؤخذ منها وزن 100 g - 5/25 من الصخر ويتوقف ذلك على نوع العينة، يوضع الجزء الموزون بورق ترشيح ليتم الإختبار بجهاز السيكلوليه (مرجلة وحجلة و مبرد)، ثم تشغل السخانات تحته وباستخدام المحل الثلاثي (تولوين + أسيتون + كحول)، طبقت هذه العملية في مخبر الجيوكيمياء التنقيبية في جامعة دمشق.
- 3- تحليل المحتوى من العناصر الأثر باستخدام جهاز الامتصاص الذري NOVA-A400 حيث تم حساب تراكيز V, Cr, Co, Ni, Sr مقدر ب mg/g.

7- النتائج والمناقشة:

1- التقييم التفصيلي للكمون الهيدروكربوني باستخدام ROCK EVAL:

إن عمليات التكسير الحراري للرسوبات وعزل الجزيئات العضوية بالإضافة لتحديد طاقة الكمون التوليدي للصخر، باستخدام ROCK EVAL تقدم مجموعة من البارامترات الكمية، النوعية والنضجية (Sajjad et al., 2019).

البارامترات الكمية:

TOC: كمية الكربون العضوي الإجمالي ضمن الصخر.

S1: الهيدروكربون الحر المتحرر حتى الدرجة 300°C.

S2: تعبر عن محتوى الصخر من البيتوم والكيروجين والأسفلتين بين 300 - 600°C.

S3: تعبر عن كمية CO₂ المنطلق خلال الاختبار.

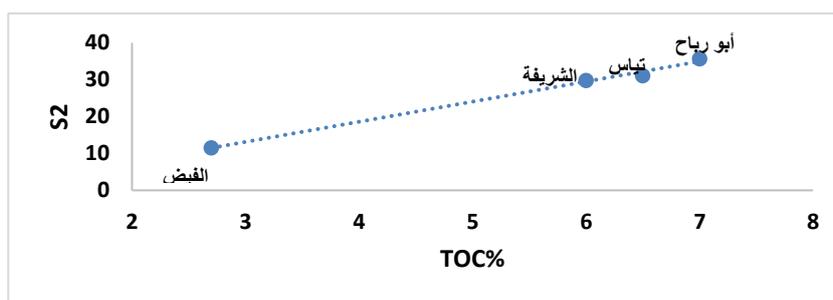
إن قيم TOC تساعد في التحديد الدقيق لأهمية الصخر من ناحية احتوائه على المادة العضوية، حيث تعتبر القيمة 0.5 العتبة لاعتبار صخر الشيل صخراً أمماً (Sajjad et al., 2019)، أما القيم الأكبر من 2 تجعل الصخر صخراً أمماً للهيدروكربون بمرتبة جيد جداً (Sarhan et Basal, 2020). من الجدول (2)، يظهر، وعلى امتداد مقطع الدراسة، أن قيم TOC تتراوح بين قيمتين، أدناها 2.4 في حقل الفيض وأعظمها 8 في كل من حقول أبو رباح والشريفة وتياس، بالنتيجة، تُعتبر العينات المدروسة بالمجمل غنية بالكربون العضوي. وإن تقييم ذلك المحتوى بالعلاقة مع قيم S2 (الجدول 2) يمكن استنتاج أنها علاقة طردية ("خطية") (الشكل 4). ويشير ذلك إلى أن الكربون العضوي الموجود ضمن سويات التشكيلة أصيل وليس منقول أو ناتج عن هيدروكربون آخر مهاجر إلى هذه التشكيلة (وإلا فلا علاقة منتظمة ولا ارتباط خطي يحكم العلاقة بين قيم S2 و TOC)، كذلك الأمر، بالنظر لقيم S1 في الجدول (2)، يمكن هي بدورها أيضاً تبدي علاقة طردية ("خطية") بالعلاقة مع TOC (الشكل 5)، وهي كذلك طردية و"خطية" بين S1 و S2 (الشكل 6) وتؤكد بمجملها أن الهيدروكربون الحر الموجود ضمن مستويات التشكيلة المدروسة ناتج عن نضج وتوليد المادة العضوية الأصلية، (في حال كان للهيدروكربون الحر منشأ غير التشكيلة المولدة ذاتها لكانت العلاقة غير منتظمة وغير خطية بين S1 و S2) (Agbor et al., 2023). ويمكن اعتبارها قيمة جيدة إذا ما أخذ بعين الاعتبار القيم المرتفعة من S2 بالنسبة للوسط المقبول عالمياً من قيم TOC والبالغ 2.2 بالنسبة للشيل (Chinn, 1991)، وهذا بدوره يفسر وقوع قيم دليل الإنتاجية $PI = \frac{S1}{S1+S2}$ وعلى عكس المتوقع، عند القيمة 0.1 - 0.2 أي أدنى من القيمة الموافقة لبداية النافذة الغازية (0.4) وأكبر أو يساوي القيمة الموافقة للنافذة النفطية (0.1) (Sajjad et al., 2019) (الجدول، 2) علماً أن التشكيلة مصنفة كمنتجة اصلاً للغاز في منطقة الدراسة.

الجدول 2: نتائج معاملات ROCK EVAL الكمية.

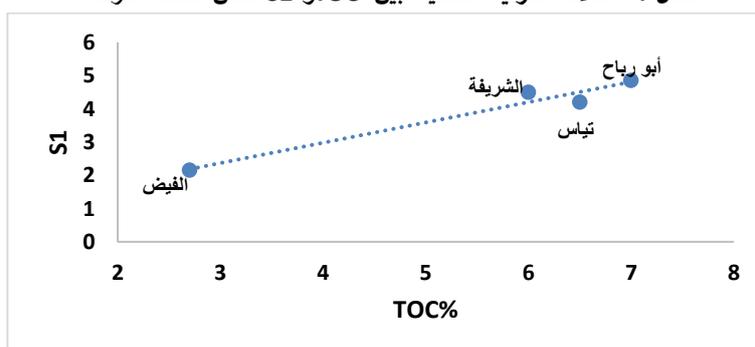
ROCK EVAL						
الحقل	رمز العينة	TOC	S1	S2	S3	PI
الفيض	2-A	3	2	12.6	4.5	0.13
	2 - B	-	-	-	-	-
	2 - C	2.4	2.3	10.5	3.1	0.17
	2 - D	-	-	-	-	-
ابو رياح	2 - E	6	4.5	33	9.6	0.12
	2 - F	-	-	-	-	-
	7 - G	8	5.2	38.4	11.2	0.11
	3 - H	-	-	-	-	-
الشريفة	2 - I	-	-	-	-	-
	2 - J	4	4.2	23.6	6	0.15
	2 - K	-	-	-	-	-
	2 - L	8	4.8	36	10.4	0.11
	2 - M	-	-	-	-	-
تياس	1 - N	8	5	34.2	10.8	0.12
	1 - O	-	-	-	-	-
	3 - P	5	3.4	28	7	0.1

• تشير (-)، إلى عينات لم يتم اختبارها بهذه التقنية.

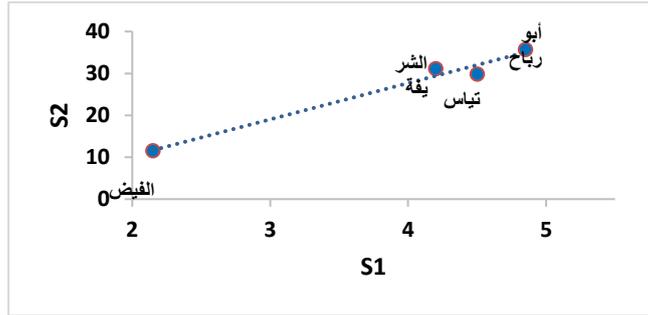
إن هذه القيم المنخفضة لـ PI المسؤول عنها هو تدني قيم S1 والتي تتحدد بمحتوى الهيدروكربون الحر المتواجد ضمن العينة المدروسة، والمؤد قبل الدرجة C 300°، وبما أن التشكيلية منتجة للغاز فإن ذلك الهيدروكربون الحر غازي التركيب حكماً، والذي من الطبيعي ألا يتواجد محتجراً في العينة الخاضعة للتحليل بعد سلسلة العمليات التي خضعت لها العينة منذ استخراجها وتخزينها في المستودعات تحت شروط الضغط الجوي السطحي، وإن ذلك الضياع في الغاز الحر المتولد في التشكيلية هو المسؤول عن قيم S1 المتدنية وبالنتيجة انخفاض قيمة المقدار PI عن القيمة المتوقعة له والموافقة لبدائية نافذة الغاز 0.4 (Peters et al., 2005; Sajjad et al., 2019).



الشكل 4: العلاقة الطردية "الخطية" بين TOC و S2 ضمن منطقة الدراسة.



الشكل 5: العلاقة الطردية "الخطية" بين TOC و S1 ضمن منطقة الدراسة.



الشكل 6: العلاقة الطردية "الخطية" بين S1 و S2 ضمن منطقة الدراسة

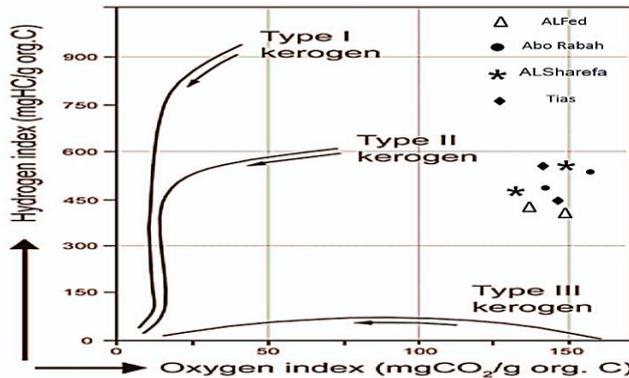
البارامترات النوعية:

- يعبر دليلي الأوكسجين OI والهيدروجين HI عن نمط المادة العضوية ونمط الكيروجين المتوضع ضمن الصخر اللذين يمكن الحصول عليهما من البارامترات الكمية، حيث يشير S2 بالنسبة للكربون العضوي الكلي إلى مقدار احتواء الوسط على الهيدروجين، وبالمثل تشير قيم S3 إلى مقدار احتواء الوسط على الأوكسجين ويمكن من خلال دراسة قيم HI بالمقارنة مع OI تحديد نمط الكيروجين وبالتالي بيئة ترسيب المادة العضوية ضمن الصخر (Moldowan, 2008)، يظهر الجدول (3)، قيم هذين الدليلين على امتداد المقطع المدروس، ويظهر الشكل (7)، أن الكيروجين في جميع العينات المدروسة يعود للنمط الثاني وأن شروط الأكسدة والإرجاع مستقرة ومتشابهة في الحقول الأربعة المدروسة.

الجدول 3: نتائج معاملات ROCK EVAL النوعية والنضجية.

الحقل	رمز العينة	HI	OI	TMAX
الفيض	2-A	420	150	455
	2 - B	-	-	-
	2 - C	437.5	129	450
	2 - D	-	-	-
أبو رباح	2 - E	550	160	461
	2 - F	-	-	-
	7 - G	480	140	459
	3 - H	-	-	-
الشريفة	2 - I	-	-	-
	2 - J	590	150	460
	2 - K	-	-	-
	2 - L	450	130	465
	2 - M	-	-	-
تياس	1 - N	427.5	135	475
	1 - O	-	-	-
	3 - P	560	140	473

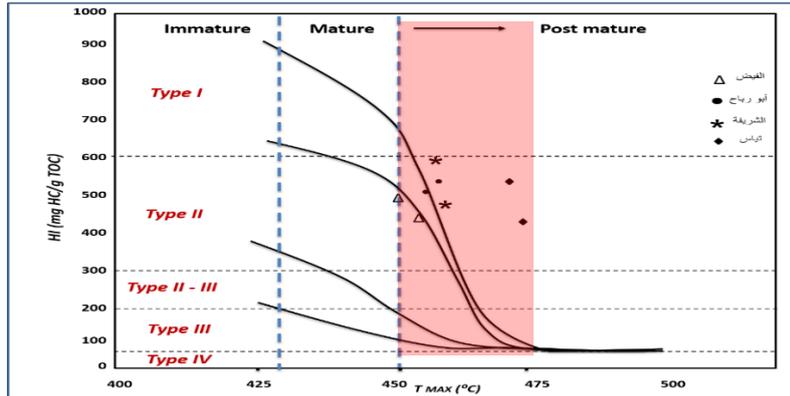
تشير (-)، إلى عينات لم يتم اختبارها بهذه التقنية.



الشكل 7: مخطط فان كريفلن يظهر العلاقة بين دليل الهيدروجين ودليل الأوكسجين في حقول: الفيض - أبو رباح - الشريفة - تياس. لاحظ وقوع العينات جميعها ضمن مجال الكيروجين من النمط الثاني.

- البارامترات النضجية T_{MAX} : وتقابل درجة الحرارة العظمى التي يحدث عندها أكبر قيمة للتكسير الحراري للبيتوم والكبروجين والإسفلتين الموافقة لقمة البيك S2.

إن عمليات توليد الهيدروكربون الحر وتحديد نوعه نطف أم غاز لا تتوقف فقط على الغنى النسبي من المادة العضوية أو على شروط الوسط الجيوكيميائية من أكسدة وإرجاع، وإنما تخضع بشكل رئيس للحرارة التي تتحكم بـ: (1) درجة التكسير الحراري (Cracking) حيث يجري التفكك الحراري لجزيئات الهيدروكربون الكبيرة، والثقيلة إلى جزيئات صغيرة وأكثر خفة، وذلك عند مجال حراري منخفض نسبياً (حول 300 - 400 درجة) ويتحرر خلال ذلك مركبات هيدروكربونية ذات سلاسل قصيرة مثل الميثان، الإيثان، البروبان. (2) و التحلل الحراري (Pyrolysis) والتفكيك التام للمادة العضوية عند درجات حرارة أعلى (حول 500 - 600 درجة) وتجزئتها لجزيئات أصغر وأكثر خفة محررة طيفاً واسعاً من المركبات الهيدروكربونية بما في ذلك المركبات طويلة وقصيرة السلاسل، وبالتالي مركبات أكثر نضجاً مما يجعل قابلية هذه المركبات أكبر لكي تتحرر وتبدأ رحلتها بالهجرة، حيث تصبح (مع زيادة الحرارة) أقل لزوجة وأقل كثافة وأخف وزناً (Freeman et al., 2001)، يُظهر الجدول (3)، والشكل (8)، أن قيم T_{MAX} تتراوح بين 450 - 475 درجة مئوية بحيث تزداد نسبياً كلما اتجهنا من حقل الفيض (جنوب غرب) باتجاه أبو رياح، الشريفة وتياس (شمال شرق)، ويلاحظ من الشكل (8)، وقوع جميع العينات ضمن المجال الانتقالي بين المادة العضوية الناضجة والفقو ناضجة إلا أنها متفاوتة النضج نسبياً فيما بينها، فيبدو حقل الفيض هو الأقل نضجاً نسبياً، بالمقابل فحقل تياس هو الأكثر نضجاً نسبياً، ويظهر حقلي أبو رياح والشريفة قيمياً متقاربة من حيث النضج تقع بين قيم الحقلين السابقين.

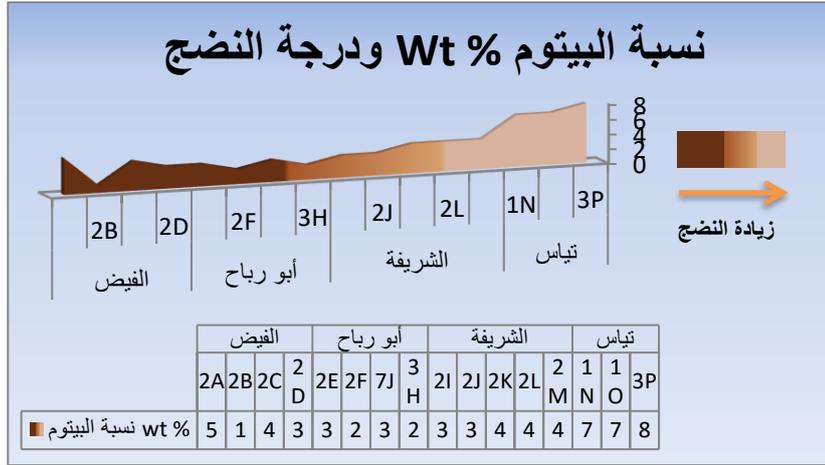


الشكل 8: مخطط فان كريفلين مبسط لـ HI بدلالة T_{MAX} يظهر أنماط الكبروجين ومجالات النضج، لاحظ التشابه بين حقلي أبو رياح والشريفة بدرجة النضج. لاحظ وقوع العينات المدروسة في نطاق انتقالي بين مرحلة النضج وما بعد النضج (المجال المظلل بالأحمر) وانتمائها جميعها لنمط الكبروجين II.

تقسم المادة العضوية المشتتة ضمن الصخور الرسوبية تبعاً لدرجة الانحلال بالمحلات العضوية إلى بيتوم، حموض هيومية وكبروجين تشكل مجموعها 1% من الكتلة العامة للصخر (Hunt, 1996).

يعتبر البيتوم السلف المباشر للهيدروكربون المتولد، أي أنه يمثل المرحلة الأقرب من تطور المادة العضوية قبيل إعطاء الهيدروكربون، ومنه تأتي أهمية تحديد محتوى تشكيلة ما من البيتوم في سبيل تحديد قدرتها التوليدية الكامنة، وعليه يمكن القول إنه كلما زادت نسبة البيتوم في الصخر زادت كمية الهيدروكربون المتولد عنه (Hunt, 1977).

يبين الشكل (9)، قيم محتوى العينات المدروسة من البيتوم الذي يزيد في جميعها عن 2% Wt عدا العينة 2B وهذا يعني أن التوضعات المدروسة غنية جداً وذات قدرة توليدية عالية، (Peters and Molodwan, 1993). تجدر الإشارة إلى أن العينة 2B وحدها أبدت محتوى متدني من البيتوم يشذ عن باقي القيم، ويرجع ذلك إلى التركيب غير المتجانس للعينة الفتاتية المحللة والمكونة من حجر كلسي في أجزاء منها ومن شيل في أجزاء أخرى، وإن المحتوى المنخفض من البيتوم مرده ارتفاع الجزء الكربوناتي في العينة المأخوذة للتحليل. ويمكن اعتبار ذلك مؤشراً قوياً على دور الشيل في رفع محتوى التشكيلة من المادة العضوية أصلاً.



الشكل 9: تغيرات المحتوى من البيتوم في التوضعات المدروسة وتفاوت درجات النضج، الدرجة اللونية الأفتح تعني بيتوم أعلى نضجاً.

إلا أن المحتوى من البيتوم يأخذ قيمة عظمى في حقل تياس، وقيماً وسطية متقاربة نسبياً في حقول الشريفة وأبو رياح والفيض، الأمر الذي يعكس القدرة التوليدية للتوضعات المدروسة التي ترتفع باتجاه الجزء الشمالي الشرقي من الحوض أي باتجاه حقل تياس. ومن المعايير الهامة التي يمكن الاستدلال من خلالها على نضج المادة العضوية، هو لون البيتوم المستخلص (الاختبار القياسي لمقياس الألوان ASTM D1500)، كونه يعد انعكاساً رئيساً لتركيبه الكيميائي من جهة المركبات الهيدروكربونية ذات الوزن الجزيئي العالي وأشكال الاتساق المعقدة التي تعطي ألواناً قاتمة أو تلك ذات الوزن الجزيئي المنخفض وذات الشكل السلسلي المنتظم التي تعطي ألواناً فاتحة، ومحتواه من العناصر الثقيلة أو النادرة أو الأثر من جهة أخرى التي تسمح سلوكيتها الكيميائية لها بالاستقرار ضمن المركبات العضوية (عبود، 1990; Engel and Macko, 1993)، يقوم مبدأ التفسير اللوني لنضج المادة العضوية من خلال لون البيتوم على معادلة بسيطة وهي أن المركبات العضوية ذات عدد ذرات الكربون المرتفع أقل نضجاً حرارياً من تلك ذات العدد المنخفض وذلك لأن عمليات النضج الحراري تعطي من خلال التكسير والتحلل الحراري للمركبات الثقيلة مركبات أقل تعقيداً وأخف وزناً وأقل عدداً من ذرات الكربون يطلق عليها اسم (منتجات التولد الجديد) (Peters et al., 2005; غبرة وشاهين، 2017)، وعليه إن المادة البيتومية الحاوية على مركبات ثقيلة ذات ألوان قاتمة أقل نضجاً حرارياً من تلك الحاوية على مركبات خفيفة ذات ألوان فاتحة نسبياً أي أكثر نضجاً.

بتدقيق الفروقات اللونية التي تظهرها الصورة (1) والتي تم إسقاطها في الشكل (9)، يمكن استنتاج أن كل من حقلي الفيض وأبو رياح يبديان بيتوماً بدرجة لونية قاتمة متقاربة أي أقل نضجاً نسبياً بالمقارنة مع لون البيتوم في كل من حقلي الشريفة وتياس.



الصورة 1: الدرجات اللونية المختلفة للبيتوم المستخلص من حقول الفيض - أبو رياح - الشريفة - تياس (كامل عينات الحقل). لاحظ كيف يصبح لون البيتوم أفتح (أكثر نضجاً) بالانتقال من الفيض (جنوب غرب) باتجاه تياس (شمال شرق).

أي أن حقلي أبو رياح والفيض بنفس سوية النضج تقريباً اعتماداً على لون البيتوم، ويزداد هذا النضج بالاتجاه نحو الشمال الشرقي في حقل الشريفة ليبلغ أعلى درجة نضج له في حقل تياس أي في الجزء الشمالي الشرقي من الحوض. تتسجم هذه المشاهدات والاستنتاجات مع نتائج ROCK EVAL فيما يتعلق بنضج المادة العضوية (الشكل، 5)، حيث أن التقارب بدرجة النضج كان بين حقلي أبو رياح والشريفة، وكان حقل الفيض هو الأقل نضجاً، أي أن كلا الاختبارين متطابقان في نتائجهما من حيث أن عمليات النضج الحراري تزداد شدتها بالاتجاه من جنوب غرب الحوض (الفيض) نحو الشمال الشرقي في حقل تياس، وإن هناك اختلافاً نسبياً في درجات النضج بين الحقول الأربعة.

2- العناصر الأثر:

تم تحديد محتوى كل من التوضعات الصخرية والمادة العضوية المستخلصة منها في توضعات الترياسي الأسفل المدروسة من العناصر الأثر V, Cr, Ni, Co, Sr (الجدول 4)، التي تم اختيارها كونها تتمتع بخصائص جيوكيميائية مميزة في هذا المجال من الدراسات، كسلوكها الفريد وارتباطها بالمادة العضوية (V, Cr, Ni)، (Peters et al., 2005) وتأثرها بعمليات الهجرة نظراً لحركيتها المتباينة بين الطور السائل والصلب (V, Ni, CO) (Hunt, 1996; Peters et al., 2005). وقدرتها على تقديم معلومات هامة حول بيئة ووسط ترسيب الصخر والمادة العضوية (V, Cr, Ni, Co, Sr) (Zuo et al., 2020).

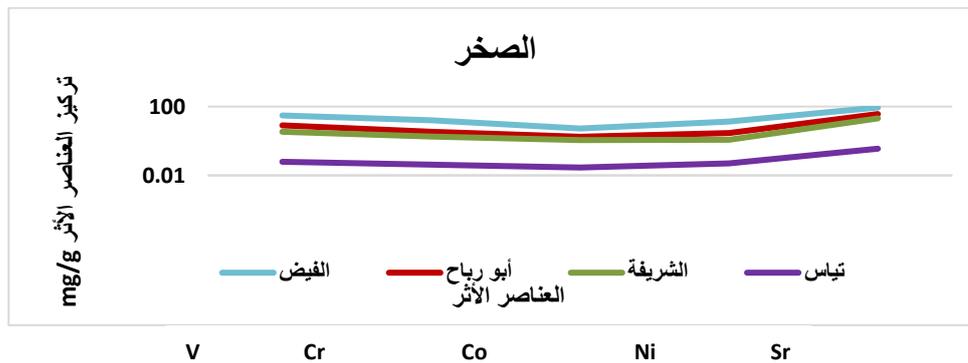
الجدول 4: المحتوى من العناصر الأثر ضمن التوضعات المدروسة في الصخر والمادة العضوية المستخلصة منه، مقدراً بـ mg/g.

علماً أن دقة القياس من رتبة 0.00001 mg/g

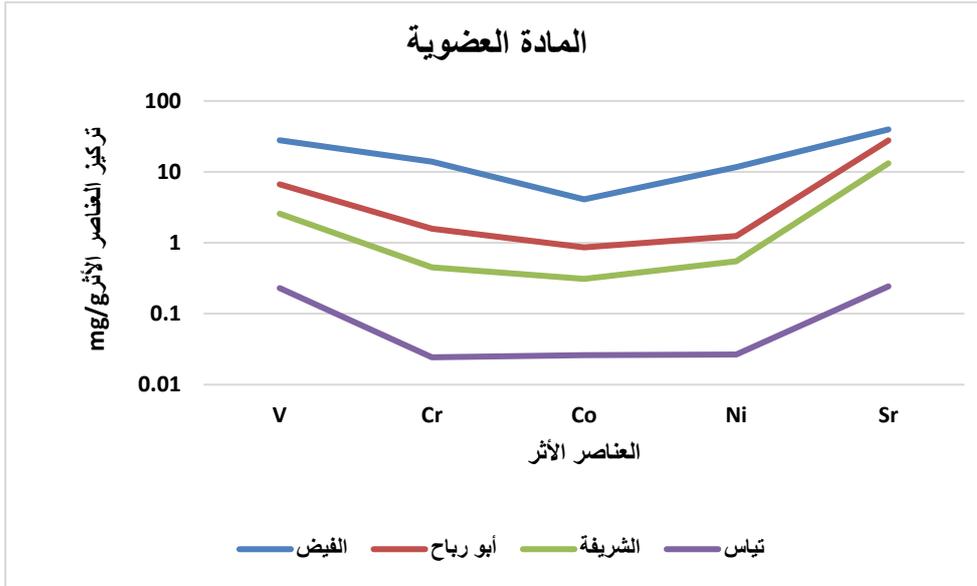
الحقل	العينة	الصخر					المادة العضوية				
		V	Cr	Co	Ni	Sr	V	Cr	Co	Ni	Sr
الفيض	2-A	30	16	4.8	12.4	90	27	13.6	3.1	11.1	40
	2-B	32	16.4	5.8	13.7	88.7	29.3	15	4.3	11.4	35
	2-C	30.77	15.9	5.34	14.2	85.6	27.3	13.4	4.9	12.6	43.9
أبورباح	2-E	6.7	2.3	1.02	2.3	34.456	5.3	0.8	0.55	1	36.8
	2-F	7	3.2	2.1	2.9	36.2	5.3	1.4	1.2	0.9	20.5
	7-G	7.4	2.5	1.9	2.6	37.6	5.9	0.9	0.7	1.1	33.8
	3-H	11.7	5.5	2	4	38.8	10.2	3.2	1	2	20
الشريفة	2-J	3.7	1.9	1	0.6	25.8	2.6	0.3	0.12	0.5	15.9
	2-K	2.3	1.4	0.8	1.5	20.3	1.5	0.4	0.02	0.8	10
	2-L	3.4	1.7	1.2	1.5	18.5	2.5	0.2	0.4	0.7	6
	2-M	4.2	2.3	1.5	1.2	17.5	3.7	0.9	0.7	0.2	21
تياس	1-O	0.0589	0.0321	0.0231	0.042	0.361	0.0356	0.0158	0.0197	0.032	0.219
	3-P	0.0632	0.0535	0.0341	0.056	0.351	0.425	0.0328	0.0324	0.021	0.267

العناصر الأثر والمنشأ:

يُظهر الشكل (10)، أن العينات الصخرية المأخوذة من الحقول الأربعة ذات نموذج توزع متماثل للعناصر الأثر ضمنها (سحنة جيوكيميائية واحدة) مما يؤكد أن التوضعات المدروسة توضع بتسوية متماثلة وذات منشأ واحد من حيث التركيب الليثولوجي، ويؤكد الشكل (11)، بدوره أن المادة العضوية المترسبة ضمن مستويات التوضعات أصيلة وتوضعت وتطورت خلال عمليات الترسيب ذاتها التي تعرض لها الصخر حيث حافظت على نموذج توزع للعناصر الأثر متشابه فيما بينها، وبينها وبين الصخر أيضاً على الرغم من الاختلاف في المحتوى (تراكيز العناصر الأثر).



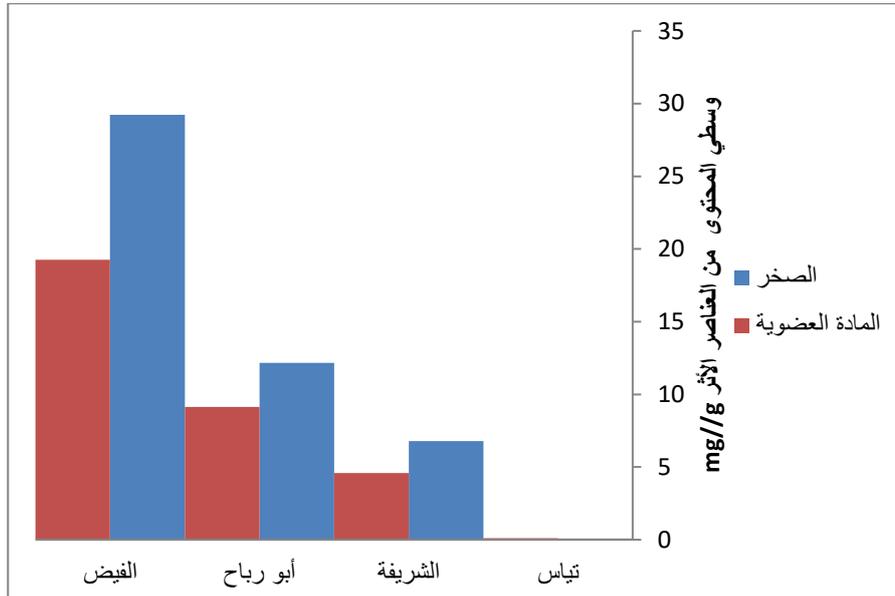
الشكل 10: نموذج توزع العناصر الأثر ضمن العينات الصخرية المدروسة (بعد استخلاص المادة العضوية منها).



الشكل 11: نموذج توزيع العناصر الأثر ضمن البيتوم المستخلص من العينات الصخرية.

لاحظ التشابه في توزيع العناصر مع الشكل (10)، الذي يعود للعينات الصخرية.

يُظهر الشكل (12)، الإنخفاض التدريجي لمحتوى العناصر الأثر في كل من الصخر والمادة العضوية على السواء بالانتقال من جنوب غرب الحوض (الفيض) باتجاه شمال شرقه (تياس). إن هذا الانخفاض في ذلك المحتوى توافق وبشكل ملفت مع زيادة نضج المادة العضوية بحسب ما تبين من معاملات النضج والدرجة اللونية للبيتومين.



الشكل 12: تغيرات متوسط المحتوى للتوضعات المدروسة من العناصر الأثر بالاتجاه من الجنوب الغربي (الفيض) حتى الشمال الشرقي (تياس).

توزيع العناصر الأثر في الصخر وفي المادة العضوية - ملامح عامة

من مقارنة الشكلين (10)، (11)، يمكن بوضوح ملاحظة أن نموذج توزيع العناصر يبدي نمطاً متشابهاً فيما بين عينات الصخر، أي أن عينات صخور جميع الحقول تبدي نموذج توزيع للعناصر الأثر متشابه، حيث تظهر اغتناء نسبياً بالسترونسيوم، غنى أقل بالنيكل، وأدنى قيم للكوبالت، لتعاود القيم الارتفاع عند الكروم وقيم أعلى نسبياً من الفاناديوم. إن قيم الوفرة النسبية للعناصر المدوسة تبدي ترتيباً تصاعدياً حيث تبلغ أدناها في تياس، يليها الشريفة، ثم أبو رباح لتبلغ أعلاها في الفيض.

مقارنة شكل نمط التوزيع (*Pattern*) والوفرة النسبية للعناصر بين الصخر والمادة العضوية:

يلاحظ أن عينات المادة العضوية المستخلصة تبدي نفس نموذج توزيع العناصر الذي تبديه الصخور ففي كل حقل على حدى:

- الفيض: إن شكل نمط توزيع العناصر المدروسة بالمقارنة بين الصخر وبين المادة العضوية في الفيض يبدي تطابقاً شبه كلي، ووسطي مجموع تراكيز العناصر في الصخر يبلغ 154 mg/g أما في المادة العضوية فيبلغ حوالي 97 mg/g (حوالي مرة ونصف في الصخر أعلى منه في المادة العضوية)، مع ملاحظة أن السترونسيوم يبدي نسبة مضاعفة في الصخر مقارنةً بالمادة العضوية تبلغ حوالي 2.2.

- أبو رباح: إن شكل نمط توزيع العناصر المدروسة بالمقارنة بين الصخر وبين المادة العضوية في أبو رباح يبدي تطابقاً شبه كلي، ووسطي مجموع تراكيز العناصر في الصخر يبلغ 53 mg/g أما في المادة العضوية فيبلغ حوالي 38 mg/g (حوالي مرة ونصف في الصخر أعلى منه في المادة العضوية). مع ملاحظة أن كل من الفاناديوم والسترونسيوم يبديان نسبةً قريبة جداً شبه متطابقة مع تلك التي يبديها الصخر مقارنةً بالمادة العضوية وإن النسب بين وفرة كل منهما تبلغ حوالي 1.2 و 1 على الترتيب.

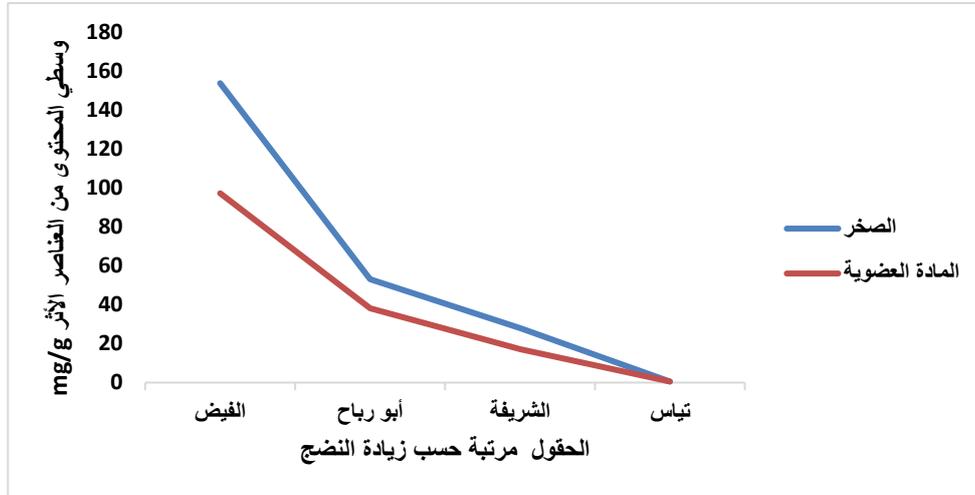
- الشريفة: إن شكل نمط توزيع العناصر المدروسة بالمقارنة بين الصخر وبين المادة العضوية في الشريفة يبدي شكلاً عاماً واحداً تقريباً. ووسطي مجموع تراكيز العناصر في الصخر يبلغ 28 mg/g أما في المادة العضوية فيبلغ حوالي 17 mg/g (حوالي مرة ونصف في الصخر أعلى منه في المادة العضوية). إلا أن شكل النموذج أكثر استقامة في نموذج الصخر مقارنةً بشكل نموذج المادة العضوية الذي يبدي تقعرًا للأسفل عند الكروم بين الفاناديوم والكوبالت وذلك نتيجة معدل الاغتناء الأعلى بالفاناديوم في المادة العضوية قياساً للصخر ما أعطى انطباعاً ظاهرياً بأن الكروم على النموذج هو الأقل. وإن النسبة بين وسطي وفرة الفاناديوم في المادة العضوية إلى وسطي وفرته في الصخر هي 2 تقريباً أي الضعف. مع ملاحظة أن وفرة السترونسيوم في الصخر هي أعلى بـ مرة ونصف المرة تقريباً مقارنةً بالمادة العضوية.

- التياس: إن شكل نمط توزيع العناصر المدروسة بالمقارنة بين الصخر وبين المادة العضوية في حقل تياس يبدي شكلاً عاماً مشابهاً، ووسطي مجموع تراكيز العناصر في الصخر يبلغ 0.54 mg/g أما في المادة العضوية فيبلغ حوالي 0.55 mg/g (أي أن المحتوى من العناصر الأثر متطابق تقريباً بين كل من الصخر والمادة العضوية). علماً أن نموذج توزيع العناصر في المادة العضوية يبدي اغتناء نسبي أعلى بالفاناديوم، كما أنه لا يبدي شذوذاً سالباً للكوبالت بين النيكل والكروم كما هو الحال في باقي النماذج سواءً في المادة العضوية أو في الصخر، أي لا يبدو أن هناك اقتسام عالي (Fractionation) للكوبالت بالنسبة للعناصر الأخرى المدروسة علماً أن معدل اغتناء الفاناديوم بالنسبة للكروم في الصخر هو 1.5 تقريباً في حين أنه في المادة العضوية هو حوالي 7.6 أي أن هناك اغتناءً بالفاناديوم في المادة العضوية مقارنةً بالصخر بمقدار خمس مرات بالنسبة للكروم. والكروم بدوره يبدي اغتناءً تدريجياً طبيعياً بالنسبة للعنصر الذي يليه وهو الكوبالت بنسبة تبلغ حوالي 1.5 مرة وفي أبو رباح كانت النسبة 1.2 مرة وكذلك في الشريفة، أي أن الاستثناء هو المحتوى العالي من الفاناديوم في عينات تياس من المادة العضوية مقارنةً بالصخر وليس الكروم.

العناصر الأثر خلاصات - مناقشات - نتائج

إن التشابه في نموذج توزيع العناصر الأثر في الصخر في جميع الحقول المدروسة يعني أن المادة العضوية والتوضعات الرسوبية ذات بيئة ترسيب جيوكيميائية واحدة (خصائص جيوكيميائية متماثلة للوسط الترسيبي). علاوةً على ذلك فإن التشابه في نموذج توزيع العناصر الأثر بين الصخور وما يقابلها من مادة عضوية مستخلصة منها في كل حقل تعني أنها ذات منشأ واحدة، بمعنى آخر فإن المادة العضوية أصيلة وغير منقولة وتوضعت مع توضع الصخر الرسوبي وهو ما ينسجم مع معطيات الدراسة الجيوكيميائية العضوية أنفاً.

وبشكل عام فإن المحتوى من العناصر الأثر في كل الحقول يبدي قيماً أعلى نسبياً في الصخر لما يقابله في المادة العضوية بنسبة وسطية تبلغ (المجموع كامل العناصر) حوالي 1.6 مرة في الفيض، 1.4 مرة في الشريفة، 1.6 مرة في أبو رياح، أما في تياس فإن النسبة متطابقة وتبلغ 1 وسطياً. أي أن الصخر والمادة العضوية يبديان نفس البصمة الجيوكيميائية من حيث شكل نموذج توزع العناصر الأثر فيما بين الصخر والمادة العضوية، إلا أن المحتوى من العناصر الأثر في الصخر هي أعلى دوماً مما يقابلها في المادة العضوية في كل حقل على حدى ما عدا في حقل تياس، فهي بالإضافة إلى كونها متساوية في هذا الحقل فإنها في الحد الأدنى قياساً بالحقول الأخرى. إن ذلك يمكن ربطه بمعطيات النضجية المستتجة مسبقاً من خلال معطيات Rock Eval، حيث أن الفيض الأقل نضجاً حرارياً يبدي مادة عضوية بأعلى محتوى من العناصر الأثر، وبتقدم النضج بالاتجاه نحو الشريفة يقل المحتوى النسبي من العناصر الأثر في المادة العضوية، ليصبح أقل في أبو رياح ذي النضج الأعلى، ويبلغ المحتوى من العناصر الأثر أدنى قيمه في المادة العضوية المأخوذة من حقل تياس ذي النضجية الأعلى. وإن الارتباط بين المحتوى من العناصر الأثر ودرجة النضج يمكن ربطها بارتفاع الحرارة أثناء دياجيزم المادة العضوية الذي يحفز حركية العناصر المدروسة للتحرك اعتباراً من الصخر إلى المادة العضوية، وعبر المادة العضوية إلى الهيدروكربون المتولد. وإن الانحدار في القيم (لشكل 13) من الفيض باتجاه أبو رياح يعكس فرق النضج الكبير نسبياً حيث ينخفض محتوى العناصر الأثر من الفيض إلى أبو رياح بنسبة 66% في الصخر و61% في المادة العضوية، وبالانتقال من أبو رياح إلى الشريفة يصبح الانحدار معتدلاً حيث ينخفض المحتوى بنسبة 47% في الصخر و 55% في المادة العضوية، ويحافظ على ذلك الاعتدال بالانتقال من الشريفة إلى تياس ليكون انخفاض المحتوى بنسبة 34% في الصخر و 45% في المادة العضوية، وإن معدلات الانخفاض تلك تعكس تقدم درجة النضج ومدى اشتداده بالانتقال من حقل إلى الذي يليه أي من جنوب غرب الحوض باتجاه شمال شرق الحوض (الشكل 13).

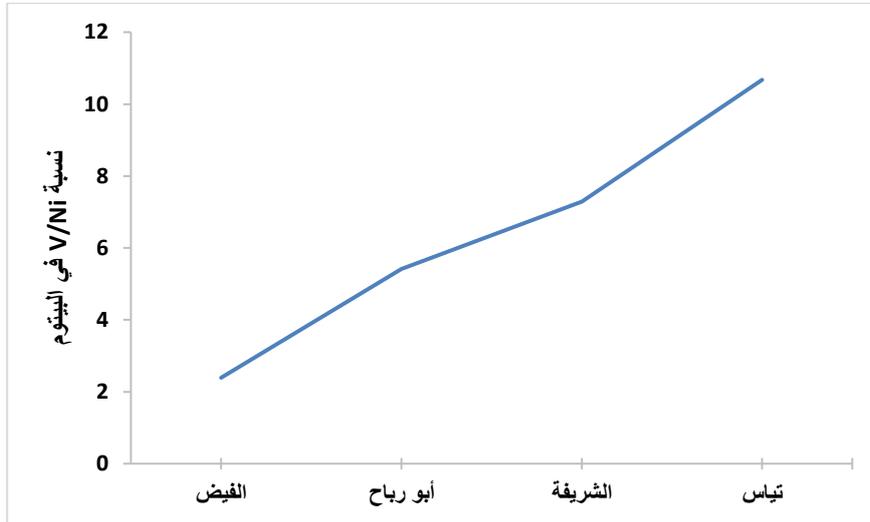


الشكل 13: المحتوى من العناصر الأثر في كل من الصخر والمادة العضوية المستخلصة في الحقول المدروسة بدلالة درجة النضج

- من ناحية أخرى، فإن قيم V/Ni في المادة العضوية تظهر دائماً تفوق الفاناديوم على النيكل بنسب تبلغ 2 (الفيض)، 5 (الشريفة)، 7 (أبو رياح)، و 11 (تياس). إن ذلك التفوق في نسبة الفاناديوم إلى النيكل تشير إلى توضع المادة العضوية في وسط مرجع (Lewan, 1984).
- وإن ارتفاع نسبة الفاناديوم إلى النيكل بالانتقال من الفيض باتجاه تياس تتناسب عكساً والمحتوى من العناصر الأثر، وطرداً مع النضج. فالنيكل عنصر ذو ميل للارتباط بالأطوار الفلزية في حين أن الفاناديوم ذو ميل للارتباط بالمكونات العضوية (Peters and Molodwan, 1993) وأثناء النضج ينحو لأن يبقى ثابتاً في الطور الفلزي، أما الفاناديوم يميل لأن يرتبط بالمادة العضوية، وأثناء النضج فإن تركيزه يزداد في المادة العضوية نتيجة فقدان العناصر ذات الحركية الأعلى كالنتروجين والكبريت (Hunt, 1996; Jiao et al., 2010). بالتالي، فإن ارتفاع النسبة V/Ni يمكن اعتباره

مؤشراً على تقدم عملية النضج. ويبيدي الشكل (14)، علاقة طردية "خطية" بين تلك النسبة وبين درجة النضج بحسب الحقل.

- بالانتقال من الفيض باتجاه التياس يلاحظ ارتفاع المحتوى من الفاناديوم في المادة العضوية، وهذا الاغتناء بالفاناديوم مع تقدم النضج هو المسؤول عن الاختلاف النسبي في نموذج توزيع العناصر بين الصخر والمادة العضوية في التياس (يبدو ظاهرياً وكأنه اغتناء بالكوبالت بالنسبة للكوبالت والفاناديوم)



الشكل 14: العلاقة "الخطية" والطردية بين النسبة V/Ni ودرجة النضج المتزايد ضمن الحقول الأربعة المدروسة تباعاً.

- فيما يخص السترونسيوم، فقد أبدى السترونسيوم اغتناءً نسبياً في جميع نماذج توزيع العناصر الأثر مقارنةً بالعناصر الأخرى. ويفسر ذلك بأن السترونسيوم أقل حركية في الطور السائل (Algeo et al., 2009). فأثناء هجرة الموائع فإن السترونسيوم ضعيف بانتقاله اعتباراً من الشيل الحاوي عليه، ما يساهم في الاغتناء النسبي به في الشيل بالنسبة للعناصر الأخرى. وإن السترونسيوم هو عنصر ليثوفيلي ما يعني أنه يبدي ميلاً كبيراً للصخور والفلزات مقارنةً بالموائع (Carroll, 2003). في أثناء دياجيزيس المادة العضوية وتوليد الهيدروكربون فإن السترونسيوم يميل لأن يبقى مرتبطاً بالفلزات الغضارية والفلزات السيليكاتية الأخرى في الشيل، في حين أن المركبات العضوية كالهيدروكربون تبدي ميلاً ضعيفاً للسترونسيوم. وإن وفرته النسبية المرتفعة في كل من نماذج العناصر الأثر للصخر وكذلك للمادة العضوية تؤكد على أن المادة العضوية المترسبة اصلاً مع ترسب مكونات الصخر واكتسبت بصمته الجيوكيميائية من حيث نمط توزيع العناصر الأثر بما في ذلك السترونسيوم قد حافظت على المحتوى النسبي المرتفع منه غير المحب للأطوار الهيدروكربونية.

- يبدي الكروم افتقاراً نسبياً بين الفاناديوم والكوبالت بالانتقال من الفيض الذي يبدي فيه الكروم اغتناءً نسبياً (الاغتناء النسبي بالكروم Cr/V+Co في الصخر 0.47 أعلى بـ 3 مرات مما هي عليه في المادة عضوية (0.16) في الفيض في حين أن الاغتناء النسبي بالكروم Cr/V+Co في الصخر يساوي نفس القيمة تقريباً في المادة العضوية (0.44) باتجاه التياس كما يظهر مخطط المادة العضوية)، ويتوافق ذلك مع زيادة النضج من الفيض باتجاه التياس، علماً أن الكروم عادةً ما يرتبط بالغضاريات أو الفلزات الحطامية في الشيل أكثر من أن يتم استيعابه بشكل كبير في المادة العضوية وكبروجين من النمط II (Molodwan et al., 1985)، وهذا واضح من خلال مقارنة وفرته بين الصخر وبين المادة العضوية حيث يظهر قيم أعلى نسبياً في الصخر. وهنا يمكن الاستنتاج أن الفعل الحراري المحفز لحركية العناصر وزيادة معدل هجرتها من الصخر باتجاه المادة العضوية ومنها باتجاه المركبات المتولدة قد بلغ درجة متقدمة جداً في التياس لدرجة أن كل من الصخر (مع قدرته العالية لاستيعاب الكروم) والمادة العضوية قد فقدا محتواهما تقريباً من العناصر الأثر (لاحظ تساوي الوفرة النسبية تقريباً) وقد تخلت المادة العضوية حتى عن محتواها من تلك العناصر

للدهيدروكربون المتولد، فلا يمكن القول بأن المحتوى المنخفض من العناصر الأثر في المادة العضوية في التياس مرده احتفاظ الصخر بذلك المحتوى حيث أن نموذج توفر العناصر في الصخر (من حقل تياس) يبين تدني المحتوى، والتفسير المنطقي هو تقدم النضج لدرجة تخلي كل من الصخر والمادة العضوية عن محتوئهما من العناصر الأثر للكربون المتولد. - وأيضاً، بالانتقال من الفيض باتجاه التياس يمكن ملاحظة أن Co لا يبدي الشذوذ السالب بين Cr و Ni في المادة العضوية في التياس كما يبديه في المادة العضوية في الفيض، ففي الفيض تبلغ قيمة الاغتناء النسبي 0.18 Co/Cr+Ni في الصخر بالمقابل فهي تساوي 0.31 في التياس (أي في التياس أعلى بـ 1.7 مرة بالنسبة للفيض)، في حين أنها في المادة العضوية تبلغ 0.16 في الفيض و 0.51 في التياس (أي أعلى بمقدار 1.6 مرة) أي أن الافتقار النسبي بالكوبالت بين كل من النيكل والكروم هو افتقار ظاهري، بالتالي فإن تغير شكل نموذج توزيع العناصر في الفيض سيكون مسؤولاً عنه كل من الفاناديوم ذي النسبة المرتفعة في المادة العضوية وكذلك الكروم، فالإغثناء النسبي للكروم بين الكوبالت والفاناديوم في الصخر Cr/V+Co يساوي 0.47 بينما في المادة العضوية هو 0.07 أي أنه أقل بمقدار 2.6 مرة في التياس عنه في الفيض، بالتالي فإن اغتناء المكون العضوي بالفاناديوم وافتقاره بالكروم هو المسؤول عن التغير النسبي في شكل نموذج توزيع العناصر في التياس بين كل من الصخر والمادة العضوية وإضفاء انطباع بأن الكوبالت قد أبدى اغتناءً نسبياً ظاهرياً بين الصخر والمادة العضوية، أي أنه بتقدم النضج فإن الكروم أبدى سلوكاً ميالاً للارتباط بالطور الفلزي في الشيل في حين أن الفاناديوم أبدى سلوكاً محبباً للمادة العضوية. بالنتيجة، فإن استنفاد الصخر لمعظم محتواه من العناصر الأثر مع تقدم النضج الحراري قد قاد إلى تخليه بالحد الأعلى عن مخزونه من تلك العناصر كل بحسب وفرته النسبية، فالوفرة النسبية للكوبالت أقل من تلك الخاصة بكل من النيكل والكروم أصلاً في الصخر في كافة نماذج التوزيع في الشكل (10)، بالتالي لدى بلوغ النضج درجته العالية في تياس فإن الصخر قد قدم رصيده المرتفع نسبياً من كل من النيكل والكروم قياساً بالكوبالت المتدني أصلاً إلى المادة العضوية، لذلك فإن شكل نموذج توزيع العناصر في التياس قد أبدى استقامة فيما بين Ni و Cr عبر Co في حين كان مقعراً في باقي النماذج. فتوزيع النيكل (على نحو مماثل للكروم) يمكن أن يتأثر بالمكونات الأخرى في الصخر غير المادة العضوية ذات النمط II. وإن التفاوت في وفرته يمكن أن يعكس حركيته (Berner, 1980). ويمكن القول عموماً إن الكروم والنيكل لديهما ميول ضعيفة للارتباط بالمادة العضوية وخصوصاً الكيروجين من النمط II، بالتالي فإن وفرتهما في المادة العضوية وفي الصخر ستكون متشابهة نتيجة اشتراكهما بالارتباط بالعضاريات أو المكونات الفلزية الأخرى في الصخر. بالنتيجة فإن نوع المادة العضوية السلف وبيئة الترسيب يؤثران على كمية العناصر الأثر المستوعبة في الكيروجين، بالتالي، إن نمط المادة العضوية المسيطر له دور حاسم في تفسير وفرة العناصر الأثر (Jegede et al., 2018)، فالبيئات البحرية غالباً ما تقود إلى كيروجين أغنى بالفاناديوم والنيكل نظراً لوفرتهم في مياه البحر، في حين أن البيئات القارية تبدي غنى أكثر بعناصر مثل اليورانيوم والثوريوم نظراً لتواجدهما في المواد العضوية المشتقة من بيئات اليابسة، وفي حالة الدراسة فإن هذا يقود إلى أن أصل ومنتشأ المادة العضوية هو منشأ بحري حكماً. فالكيروجين من النمط II عادةً ما يكون بحري سابووبيلي وذو قدرة متوسطة على أخذ الفاناديوم وميلاً محدوداً تجاه النيكل قد يكون أقل من الميل الذي يبديه الكيروجين من النمط I إلا أنه بالتأكيد أعلى من النمط الذي يبدي الكيروجين من النمط III الغني بالهيوم وذو قدرة استيعاب ضعيفة جداً للعناصر الأثر مقارنة بالعناصر الأخرى (عبود، 1995; Jiao et al., 2010; Hunt, 1996).

8 - النتائج:

1. العينات المدروسة في الحقول الأربعة الفيض، الشريفة، أبو رباح وتياس تبدي TOC مرتفع وبالتالي فهي صخور أم جيدة.
2. إن المادة العضوية بحسب مؤشرات Rock-Eval هي مواد أصلية وليست منقولة.
3. ينتمي الكيروجين في الحقول الأربعة إلى النمط الثاني بحسب معاملات Rock-Eval.

4. أبدت العينات المدروسة من الحقول الأربعة درجات متفاوتة من النضجية تقع في المجال بين نهايات نطاق توليد النفط وبدايات توليد الغاز .
5. تبدي عينات حقل الفيض درجات نضجية أدنى في حين أظهرت عينات التياس أعلى درجات النضج وأخذت حقول الشريفة وأبو رباح قدرات وسطية بينهما بحسب معاملات Rock-Eval.
6. بنتيجة فصل المستخلصات من عينات الحقول الأربعة وتقييم محتواها من البيتوم تبين غناها جميعاً بالبيتوم وأنها ذات قدرة توليدية عالية.
7. أعلى محتوى من البيتوم كان من نصيب حقل تياس وبالتالي فإن القدرة التوليدية تزداد باتجاه حقل تياس.
8. أبدى البيتوم المستخلص من حقلي الشريفة وتياس درجات لونية توشر لنضجية متقدمة مقارنة بما أبداه كل من حقلي أبو رباح والفيض اللذين أبديا درجة لونية متشابهة.
9. تم استنتاج تزايد النضجية بالاتجاه من جنوب غرب الحوض المدروس باتجاه شمال شرق الحوض المدروس، وهو ما يتطابق مع معطيات Rock-Eval.
10. أظهرت دراسة المحتوى من العناصر الأثر في الحقول الأربعة تطابقاً بين نمط توزع العناصر المدروسة بين كل من الصخر والمادة العضوية ما أكد على الأصل المشترك والعلاقة الجينية الواحدة بين كل من الصخر والمادة العضوية وتوضعهما بشكل متزامن معاً ضمن وسط جيوكيميائي واحد وأن المادة العضوية أصلية وغير منقولة وهو ما يتطابق مع معطيات Rock-Eval.
11. أظهر الصخر وفرة نسبية أعلى من العناصر الأثر في كافة الحقول مع مقابلاتها من المادة العضوية مع المحافظة على شكل نموذج توزع العناصر متشابهاً، وإن الوفرة النسبية للعناصر أبدت علاقة عكسية مع درجة النضج، وكلما تقدم النضج انخفض المحتوى من العناصر الأثر في المادة العضوية ما يؤكد على فعالية هذه الأداة الجيوكيميائية اللاعضوية وحساسيتها في تحري النضجية في الدراسات النفطية.
12. إن أهمية العناصر الأثر لا تقتصر فقط على التدليل على نضجية المادة العضوية، بل تتعدى ذلك للتغيرات النسبية في درجات النضج، فالنضج النسبي الأعلى في حقل أبو رباح بالنسبة لحقل الفيض ما كان من الممكن تمييزه لونياً نتيجة التقارب الكبير في الدرجة اللونية للبيتوم بينهما، وكذلك فإن معطيات Rock Eval التي أعطت نتائج متقاربة لكل من حقلي الشريفة وأبو رباح بسبب التقارب بقيم TMAX والتي تصل لدرجة واحدة فرق و ما كان من الممكن تمييز درجات النضج للمادة العضوية بينهما لولا حساسية العناصر الأثر، الأمر الذي يؤكد على دور العناصر الأثر (الجيوكيمياء اللاعضوية) كأداة متينة في هذا النمط من الدراسات.

9- المراجع:

- عبود، م. (1990). جيوكيمياء نفط الكريتاسي في سورية، مجلة بحوث جامعة حلب، سلسلة العلوم الأساسية، العدد 12.
- عبود، م. (1995). المكونات المعدنية في نفط الترياسي، مجلة بحوث جامعة حلب، سلسلة العلوم الأساسية، العدد 19. ص 281.
- غبرة، ع. (1999). دراسة تأثير الحرارة والضغط والزمن الجيولوجي في التوضعات الصخرية في نطاق الطي التدمري بهدف تمييز التشكيلات المولدة للفحوم الهيدروجينية في هذا النطاق. مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية. 16(1).
- غبرة، ع. (2009). تقييم دور تشكيلة الأمانوس شيل (T_1) في توليد المواد الهيدروكربونية البترولية في تحت نطاق الطي التدمري الشمالي. مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية. 25(1).
- غبرة، ع.، شاهين، ج. (2017). جيوكيمياء النفط والمادة العضوية. مطبوعات جامعة دمشق. ص 311.
- Agbor, F. A., Mhlambi, S., Teumahji, N. A., Sonibare, W. A., Bever Donker, J. M. van (2023). Petroleum source rock potential evaluation: a case study of block 11a, Pletmos sub-basin, offshore South Africa. *Journal of Petroleum Expioration and Production*. 13:995-1007.
- Algeo, T, P, and Tribovillard, N, P. (2009). Rare Earth Element Geochemistry and phosphogenesis in the Late Devonian Woodford Shale of Oklahoma (USA). *Chemical Geology*
- Berner, E, C (1980). Early diagenesis: a Theoretical approach. Princeton Univeristy Press
- Bradly S. Van Gosen, Philip L, Verplanck ,Robert R, Seal II, keth R. Long, and Joseph Gambogi (2017). Rare-Earth Elements, U.S. Geological Survey Professional Paper 1802,p 01-031.
- Brew, G., Barazangi, M., Al-Maleh, A. K., Sawaf, T. (2001). Tectonic and Geologic Evolution of Syria. *GulfPetroLink, Bahrain. GeoArabia 6:p. 573-616*.
- Carroll, M, R. (2003). *Igneous Rock Gepchemistry*. Pearson Education.
- Chinn, E, W. (1991). The role of organic geochemistry in petroleum exploration: Basin Research Institute Bulletin, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, p. 15-23.
- Dubertret, L. (1966). Liban, Syria et bordure des Pay Voisines: I, tableau stratigraphique et carte au millionieme. Extrait de Notes et Memoire Moyen-Orient VIII, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris.
- Engel, M. and Macko, S., (1993). *Organic geochemistry: principles and applications*, springer science+business media,LLC, V 11 P862.
- Guo, R., Zhao, Y., Wang, W., Hu, X., Zhou, X., Hao, L., Ma, X., Ma, D., Li, s., (2020). Application of Rare- Earth Elements and Comparison to Molecular Markers in oil- soure correlation of tight oil: A case study of chang 7 of the upper triassic Yanchang formation in long dong Area, ordos basin China, *ACS omega*, 5, 35, 22140–22156
- Hunt, J.M. (1977). Distribution of carbon as hydrocarbons and asphaltic compounds in sedimentary rock, *Bull, AM petrol. Geo*, v. 61, pp. 100-104.
- Hunt, J.M. (1996). *Petroleum Geochemistry and Geology*. W.H. Freeman and Company.
- Jegede, T. O., Adekola, S. A., Akinlua, A., (2018). Trace element geochemistry of kerogens from the central Niger Delta. *Journal of Petroleum Expioration and Production Technology*.8:999-1007
- Jiao, W., Yang, H., Zhao, Y., Zhang, H., Zhou, y., Zhang, J., Xie, Q., (2010). Application of trace elements in the study of oil – source correlation and hydrocarbon migration in the Tarim Basin, China, school of Earth Sciences, Chaina university of petroleum (BeiYina) ،V28. N6 P.Pu 51-466
- Lewan MD (1984) Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils. *Geochim Cosmochim Acta* 48:2231–2238
- Moldowan J. M. (2008). Organic geochemistry of the Bakken Formation, Saskatchewan, Canada: II. Correlation of thermal maturity with petrophysical well-log responses and estimation of oil-in-place *AAPG Bulletin*, vol. 92, no. 7, pp. 917-934.
- Moldowan J., Seifert, K., Gallegos, J, (1985). relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *Petrol. Geol.Bull.* 69(8); 1255-1268

- Niu, Z., Meng, W., Wang, Y., Wang, Xu., Li, Z., Wang, J., Liu, H., Wang, Xi., (2022). Characteristics of trace elements in crude oil in the east section of the south slope of Dongying Sag and their application crude oil classification, Elsevier V209.
- Palacas, J.G., Anders, D.E., King, J.D., (1984). South Florida Basin -a prime example of carbonate source rocks of petroleum.
- Peters, E., Walters, C., and Moldowan, J., (2005). The biomarker guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History, 2d ed.:Cambridge University press,Cambridge, v. 2..
- Peters, K. E., and Moldowan, J. M. (1993). The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments (Vol. 1). Prentice Hall.
- Ponikarov, V.P. 1966. The Geology of Syria. Explanatory Notes on the Geological Map of Syria, Scale 1:200,000. Ministry of Industry, Damascus, Syrian Arab Republic.
- Sajjad, A, Faizan A, Abdullah, M, Eisa, F, Khalid K and Suleman K (2019). Integration of the out crop and subsurface geochemical data: implications for the hydrocarbon sourcerock evaluation in the lower Indus Basin, Pakistan, journal of petroleum Expioration and production technology 9; 937 – 951.
- Sarhan, M. A., and Basal, A. M. K., (2020). Total organic carbon content deduced from resistivity-porosity logs overlay: a case study of Abu Roash formation, Southwest Qarun field, Gindi Basin, Egypt. Geology Department, Faculty of science, Damietta University, New Damietta, 34517, Egypt VOL. 9, NO. 1, 190-205
- USGS (2016). <https://Science for a changing world/midland-Texas-mammoth-oil-discovery/2016.gov>
- Zuo, X., Li, C., Zhang, J., Ma, G., Chen, P., (2020). geochemical characteristics and depositional environment of the shahejie formation in the Binnan oilfield China, Journal of Geophysics and Engineering, oxford 17, 539-551.