

# **Integrating Geochemical Prospecting and Rock-Eval Pyrolysis Data to investigate the Characteristics of Organic Matter from Source Rock from Both the Kermav and Jaddala Formations in the Northern Hussein Block (Aleppo Plateau – Syria).**

**Dr. Bashar Baghdadi\***

**(Received 15 / 7 / 2024. Accepted 18 / 9 / 2024)**

## **□ ABSTRACT □**

The geochemical characteristics and hydrocarbon generating potential of two source rock formations in the Northern Hussein Block of the Aleppo plateau/Syria; the Kermav formation (Paleocene) and the Jaddala formation (Eocene), were evaluated using the techniques of both prospecting geochemistry (a set of redox-sensitive trace elements signatures) and the Rock-Eval pyrolysis. The organic matter in the Kermav rocks is a type II Kerogen with a very good organic carbon content (TOC) and a very good generating potential, deposited under reduced conditions with fluctuations toward minor oxygen content according to the trace elements signature, indicating a marine depositional environment with varying levels of oxygen deficiency and a marine source of organic matter. In contrast, the TOC of Jaddala formation is lower than that of Kermav, but is good with good generating potential and shows relatively less maturity. It belongs to mixed type II/III kerogen that was deposited under more anoxic conditions with an important contribution of terrestrial organic matter, most likely in a marine depositional environment similar to that of Kermav with dilution of organic matter due to increasing mineral inputs. Both the organic matter and the rock component of the source rocks share a common origin according to trace elements data, that is, they were deposited simultaneously and the organic matter was not post-sedimentary or transported. The Jaddala formation showed signs of hydrocarbon migration from the other rock formations, eventually migrating from the kermav (specifically). Overall, the study provides insights into the geochemical characteristics, paleoenvironmental conditions, and hydrocarbon generation potential of both the kermav and Jaddala formations.

**Keywords:** Prospecting Geochemistry – Source rock - Jaddala – Kermav – Paleoenvironment

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Damascus University , Damascus, Syria. bsashar.baghdadi@tishreen.edu

## تكامُل الجيوكيمياء التَّقْيِيبِيَّة ومُعْطِيَّات التَّحْلَل الحَرَارِي (Rock-Eval) فِي تَحْرِي خِصَائِص المَادَّة العَضْوِيَّة لِلصَّخْر المَوْلَد فِي كَل مِن تَشْكِيلَتِي الكِيرْمَاف وَالجَدَالَة فِي تَرْكِيب شَمَال الحَسِين (هَضْبَة حَلْب - سوريَّة)

د. بشار بغدادي\*

(تاريخ الإيداع 2024 / 7 / 15. قُبِل للنشر في 2024 / 9 / 18)

### □ مَلَخَّص □

تَمَّ تَقْيِيم الخِصَائِص الجيوكيميائية والقدرة التوليدية للهيدروكربون لتشكيلتين صخريتين مولدتين في تركيب شمال الحسين من هضبة حلب/سورية، تشكيلته الكيرماف (باليوسين) وتشكيلته الجدالة (ايوسين)، باستخدام تقنيات كل من الجيوكيمياء التَّقْيِيبِيَّة (معاملات مجموعة من العناصر الأثر ذات الحساسية للإرجاع) والتكسير الحراري بجهاز Rock-Eval. تبين أن المادة العضوية في صخور الكيرماف عبارة عن كيروجين من النمط الثاني، ذات محتوى جيد جداً من الكربون العضوي (TOC) وإمكانية توليد جيدة جداً ترسبت في ظل ظروف مرجعة مع تقلبات نحو ظروف ذات محتوى ضعيف من الأوكسجين بحسب معطيات العناصر الأثر، مما يشير إلى بيئة ترسيب بحرية بمستويات متفاوتة من نقص الأوكسجين ومصدر بحري للمادة العضوية. في المقابل، فإن المحتوى من الكربون العضوي في الجدالة أقل مقارنةً بالكيرماف لكنه جيد مع إمكانية توليد جيدة وتبدي نضجاً أقل نسبياً بالمقارنة معها، وتنتمي المادة العضوية في تشكيلته الجدالة إلى كيروجين من النمط المختلط II/III المتوسطة في ظل ظروف لا أوكسجينية أكثر إرجاعية مع مساهمة معتبرة من المواد العضوية القارية على الأرجح في بيئة ترسيب بحرية مشابهة لتلك الخاصة بالكيرماف مع تخفيف للمادة العضوية من خلال زيادة المدخلات الفلزية. تشترك كل من المادة العضوية والمكون الصخري للصخور المولدة المدروسة بأصل واحد بحسب معطيات العناصر الأثر، أي أنه قد تم ترسيبها في وقت واحد والمادة العضوية ليست لاحقة للترسيب أو منقولة. تُظهِر تشكيلته الجدالة علامات تدل على احتوائها على هيدروكربون مهاجر من التشكيلات الصخرية الأخرى، ربما من الكيرماف تحديداً. بشكل عام، تقدم الدراسة نظرة ثاقبة للخصائص الجيوكيميائية، الظروف البيئية القديمة، وإمكانات توليد الهيدروكربون لهتين التشكيلتين، الكيرماف والجدالة.

**الكلمات المفتاحية:** جيوكيمياء تنقيبية - صخر مولد - الجدالة - الكيرماف - البيئة القديمة.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\*أستاذ مساعد، قسم الجيولوجيا، كلية العلوم، جامعة دمشق، دمشق، سورية. bsashar.baghdadi@tishreen.edu

**مقدمة:**

تُعتبر هضبة حلب في سورية منطقة ذات أهمية نفطية بحسب معطيات الشركة السورية للنفط مع العديد من الاكتشافات الهيدروكربونية وأنشطة الاستكشاف المستمرة. ويُعتبر تركيب شمال الحسين الحاوي على مجموعة من حقول النفط واحداً من أهم التراكيب النفطية في تلك المنطقة، وإن كل من تشكيلي الجدالة والكيرماف العائدتين للبالوسين (بالوجين أسفل) والإيوسين (بالوجين أوسط) على الترتيب من التشكيلات ذات الأهمية النفطية في التركيب المذكور لكن خصائصهما الجيوكيميائية لم تتم دراستها بعد. يهدف هذا البحث بالتالي إلى سد هذه الفجوة المعرفية من خلال تطبيقات الجيوكيمياء التقييبية وإجراء تحليل جيوكيميائي شامل لهتين التشكيلتين، مع التركيز على نوع المادة العضوية وجودتها وإمكاناتها في توليد الهيدروكربون. حيث يُمكن أن يوفر فهم الخصائص الجيوكيميائية لهذه الصخور المولدة رؤى قيمة حول الظروف البيئية القديمة التي تحكمت في ترسيبها وإمكانية توليد الهيدروكربون. ستوظف هذه الدراسة إجراء اختبارات التحلل الحراري Rock-Eval بالتكامل مع مبادئ الجيوكيمياء التقييبية في توظيف سلوكية مجموعة من العناصر المعدنية في تحري الخصائص الجيوكيميائية للتشكيلات الصخرية المولدة. سيوفر تحليل Rock-Eval معلومات عن نوعية المادة العضوية، نضج الصخور المولدة، غناها، وإمكاناتها في توليد الهيدروكربون، بينما ستساعد جيوكيمياء العناصر الأثر في فهم أفضل لأصل ولفظروف توضع ونضج هتين التشكيلتين. بشكل عام، يهدف هذا البحث إلى توفير توصيف جيوكيميائي شامل للتشكيلات الصخرية الجدالة والكيرماف في تركيب شمال الحسين من هضبة حلب، مما يلقي الضوء على إمكاناتها لتوليد الهيدروكربون والظروف البيئية القديمة التي تحكمت في تشكيلها.

**أهمية البحث وأهدافه:**

1. إجراء تحليل جيوكيميائي للتشكيلتين الصخريتين المولدتين (الكيرماف والجدالة) ضمن تركيب شمال الحسين، مع التركيز على نوع المادة العضوية فيهما وجودتها وإمكاناتها في توليد الهيدروكربون.
  2. توظيف معطيات Rock-Eval وجيوكيمياء العناصر الأثر في استقصاء الخصائص الجيوكيميائية للتشكيلتين الصخريتين (الكيرماف والجدالة).
  3. تقييم الظروف البيئية القديمة التي سيطرت على تشكيل هذين الصخرين المولدين.
  4. المساهمة في فهم أفضل للتطور الجيوكيميائي للمادة العضوية ضمن الوضع الجيولوجي لهضبة حلب وإمكانات اكتشافات الهيدروكربون في المنطقة.
- بالتالي يُمكن القول بأن أهمية البحث تتلخص في ردم الفجوة المعرفية حول الخصائص الجيوكيميائية لهتين التشكيلتين الصخريتين المولدتين واللتين لم تتم دراستها من قبل برغم كونهما مخترقتان في آبار تركيب شمال الحسين الذي ينتمي لهضبة حلب الغنية بالنفط. ستوفر النتائج رؤى قيمة حول إمكانات توليد الهيدروكربون والظروف البيئية القديمة لهذه التشكيلات، ما يعكس إيجاباً في المستقبل في توجيه عمليات الاستكشاف والتقيب.

**منطقة الدراسة**

يقع تركيب شمال الحسين بين السلسلة التدمرية الشمالية والسهول الجنوبية الشرقية من هضبة حلب. شمال مدينة تدمر بحوالي 100 كم، وهو واحد من حقول الشركة السورية للنفط الواقعة في النطاق الهامشي بين منخفض الفرات، نهوض



إنّ تركيب شمال الحسين عبارة عن مصيدة فالقية تغلق على فالق رئيس ذو اتجاه شمال شرق- جنوب غرب، ومن ثم يأخذ اتجاه شمال غرب- جنوب غرب. وإنّ التركيب بشكله الحالي هو نتاج لعمليات النهوض والانتفاخ لحوض التدمرية خلال الحركة الألبية. يحده من الشمال حقل الديلع الذي يبعد عنه حوالي 1.3 كم.

تأتي الأهمية النفطية في تركيب شمال الحسين من تواجد الظروف التركيبية الجيدة بالإضافة الى وجود الصخور الخازنة والمولدة والمغطية (الشكل 2)، ومن تلك التشكيلات ذات الأهمية النفطية والتي لم تحظْ بدراسة جيوكيميائية لخصائص المادة العضوية وقدراتها التوليدية تشكيليّ الجدالة والكيرماف:

**تشكيلة الكيرماف:** العائدة للبالوجين الأسفل (الباليوسين)، وتتألف من المارل والحجر الكلسي المارلي مع طبقات من الغضار. علماً أنّ رسوبيات البالوجين تعرضت لعمليات التعرية وحذف معظمها (الشركة السورية للنفط، 2019).

**تشكيلة الجدالة:** من عمر البالوجين الأوسط (الإيوسين) ، وتتألف من حجر كلسي وحجر كلسي غضاري-حواري وحجر كلسي عضوي، وتحوي على البيريت والعقد الصوانية.

أما رسوبيات النيوجين في المنطقة فهي ذات سحنة قارية تتألف من الكونغوميرا والحطاميات والحجر الكلسي بالإضافة إلى بعض التوضعات اللاغونية والطبقات الغضارية والرملية الحاوية على الحطاميات الكربوناتيّة (الشركة السورية للنفط، 2019).

### طرائق البحث ومواده:

تقوم هذه الدراسة على ما توفر من عينات من كل من تشكيليّ الكيرماف والجدالة في مستودعات الشركة السورية للنفط، وهي عبارة عن عينات فتاتية تم أخذها من بئر شمال الحسين-7، البئر الوحيد الذي يتوفر فيه عينات من كلتي التشكيلتين المذكورتين معاً، وبما أنّ طبيعة هذه الدراسة تقتضي إجراء مقارنة بين خصائص التشكيلتين، بالتالي فمن الجيد أن تعود عينات كلتي التشكيلتين للبئر ذاته.

1. تم اجراء تقييم الصخور المولدة المدروسة من حيث المحتوى الكلي للكربون العضوي TOC و T<sub>MAX</sub> والقيم الكمية للهيدروكربون الحر والمتبقي القابل للتوليد علاوةً على كمية CO<sub>2</sub> المتحررة (S1، S2، S3 على الترتيب)، بالإضافة لمؤشرات كل من الأوكسجين والهيدروجين باستخدام Rock Eval - 6 ضمن المجال الحراري من 0 - 600 C° في مخابر الشركة السورية للنفط.

2. تم استخلاص المادة العضوية من العينات الصخرية مخبرياً في مخبر الجيوكيمياء التقييبية، في جامعة دمشق، وذلك باستخدام محل ثلاثي مُكون من (70% تولوين، 15% أسيتون، 15% كحول) بالتسخين حتى درجة حرارة المُحل، بعد أخذ أجزاء من عينات الصخر المولد وطحنها ونخلها بالمناحل ذات أبعاد الفتحات المناسبة، ومن ثم أخذ كمية 5غ من كل عينة، وتم استخلاص البيتوم ووضعه على ساترات وتم حساب نسبته بالـ %wt من الوزن الكلي للعينة المستخلصة.

3. تم تحديد محتوى المادة العضوية من العناصر الأثر (V, Cr, Co, Ni) باستخدام جهاز الامتصاص الذري NOVA 400 بالطريقة السائلة (الشركة العامة لمصفاة حمص).

## النتائج والمناقشة:

## المحتوى الكلي من الكربون العضوي %TOC وجودة الصخر المولد

بينت نتائج تحاليل Rock-Eval أنّ قيمة TOC في الصخر المولد في تشكيلة الجدالة تعادل 1.9%، ما يعني انه صخر مولد جيد (الجدول، 1)، بالمقابل فإن قيمة TOC في الصخر المولد في تشكيلة الكيرماف تعادل وسطياً 3.4 % (الجدول، 1)، ما يعني أنّه صخر مولد جيد جداً (Peters and Cassa, 1994).

## نمط المادة العضوية (الكيروجين)، HI بالعلاقة مع OI

كما هو معروف فإن OI عبارة عن مؤشر يُعبر عن كمية الأكسجين في المادة العضوية. حيث تشير القيم الأعلى إلى المزيد من المواد العضوية الغنية بالأكسجين. في حين يُعبر مؤشر الهيدروجين (HI) عن كمية الهيدروجين في المادة العضوية، وتشير القيم الأعلى إلى المزيد من المواد العضوية الغنية بالهيدروجين، والتي تكون بشكل عام أكثر كمونية لتوليد للزيت.

الجدول 1. معطيات تحاليل التحلل الحراري باستخدام Rock-Eval للصخور المولدة في كل من الجدالة والكيرماف.

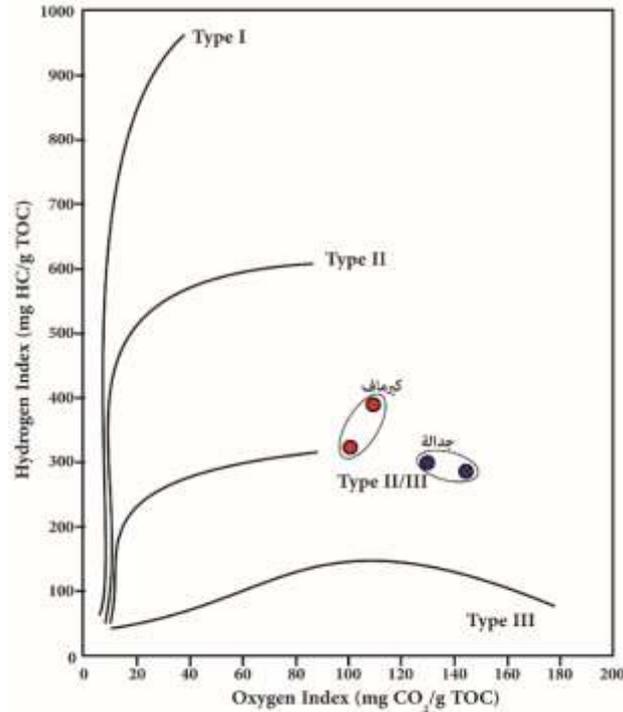
العينة	TOC %	S1 mg HC/g rock	S2 mg HC/g rock	S3 mg HC/g rock	T <sub>MAX</sub> (°C)	HI mg HC/g TOC	OI mg CO <sub>2</sub> /g TOC	S1+S2	PI %
جدالة-1	1.9	6.4	5.5	2.8	462	289	147	11.90	54
جدالة-2	1.9	6.8	5.7	2.5	460	300	131	12.50	54
كيرماف-1	3.6	10.4	11.6	3.7	465	322	102	22.00	47
كيرماف-2	3.2	10.2	12.7	3.7	465	396	115	22.90	45

تم تحليل عينتين من سويتين عمقتين مختلفتين من كل صخر مولد (الأرقام 1 و 2 ترمز لأرقام العينات وارتباطها بالعمق: 1 أقل عمقاً، 2 أكثر عمقاً).

بهدف تحديد نمط المادة العضوية (الكيروجين) للعينات المدروسة في كل من الجدالة والكيرماف اعتباراً من تحاليل Rock-Eval (الجدول، 1) تم إسقاط العينات المدروسة في مخطط فان كريفلين (الشكل، 3)، الأداة شائعة الاستخدام في الجيوكيمياء لتصنيف أنواع الكيروجين الموجودة في الصخور الرسوبية. يُساعد هذا التصنيف في فهم إمكانات الصخور لتوليد أنواع مختلفة من الهيدروكربون (النفط أو الغاز أو كليهما).

تقع عينات الكيرماف في مجال النمط II، بالقرب من الحد الفاصل عن النمط III/II ويشير هذا إلى أنّ العينات المولدة لكل من الزيت والغاز لديها إمكانات أعلى لتوليد النفط (الزيت) بالمقارنة مع الجدالة كما سنرى لاحقاً. إنّ هذا النمط من الكيروجين تسود فيه المادة العضوية ذات المنشأ البحري (Tissot and Welte, 1984) ويعتبر مولداً لكل من النفط والغاز إلا أنه أغنى بالزيت مقارنة بالنمط المختلط III/II والنمط III.

أمّا عينات الجدالة فقد وقعت في مجال النمط II/III، الأقل إمكانية لتوليد النفط (الزيت) من الكيروجين من النمط II النقي. وبالتالي تُصنف هذه العينات على أنّها كيروجين من النمط III/II، ممّا يشير إلى إمكانات مختلطة لتوليد كل من النفط والغاز، أي إنها تُبدي إمكانات هيدروكربونية لا بأس بها لكنها أقل إمكانية لتوليد النفط (الزيت) مقارنةً بالنمط II (أكثر ميلاً لتوليد الغاز). إنّ هذا النمط من الكيروجين يُعتبر مختلطاً ويشير إلى وارد قاري للمادة العضوية بالإضافة للمنشأ البحري (Tissot and Welte, 1984).



الشكل 3. مخطط فان كريفلين (HI vs. OI) لتصنيف أنماط الكيروجين. لاحظ وقوع عينات الكيرماف ضمن مجال النمط II عند الحد الانتقالي إلى النمط II/III في حين تقع عينات الجدالة ضمن مجال النمط II/III.

باختصار، تُصنف عينات الكيرماف على أنها من النمط II ذي الكمون التوليدي الأعلى للنفط مع إمكانية توليد الغاز، أما الجدالة فهي كيروجين من النمط II/III، ذو إمكانات مختلطة لتوليد كل من النفط والغاز مع تعزيز القدرة باتجاه توليد الغاز. وستتم مناقشة هذه النتائج لاحقاً في النص.

#### معامل الإنتاجية PI

مؤشر الإنتاجية PI هو معامل يوفر مؤشراً على نضج المواد العضوية في الصخور المولدة. يتم حسابه والتعبير عنه كنسبة مئوية على النحو التالي:

$$PI = S1 / (S1 + S2) \times 100$$

حيث:

S1 هي كمية الهيدروكربون الحر (غاز + زيت) ملغ \ غ من الصخر.

S2 هي كمية الهيدروكربون المتولد من تكسير الكيروجين أثناء التحلل الحراري، ملغ \ غ من الصخر.

يزداد PI بشكل مستمر عبر النافذة النفطية حتى قيمة حوالي 50-60%. وعادةً ما تفسر قيم PI على النحو الآتي:

بحسب (Espitalie et al., 1985; Peters, 1986; Bordenave et al., 1993) فإن توليد الزيت من الصخر

المولد يقع ضمن المجال  $T_{MAX}$  435-465 °C ويكون PI بين 20 و 40%. وتكون المادة العضوية في مرحلة

اللانضج إذا كانت قيمة  $T_{MAX}$  أقل من 435 °C ويكون PI أقل من 20%، وإن توليد الغاز الجاف من الصخر

المولد يبدأ عند العتبة  $T_{MAX}$  تساوي حوالي 470-475 °C ويكون PI فوق 40%.

يوصف مؤشر الانتاجية حالة تطور المادة العضوية من خلال توفير إشارة إلى كمية الهيدروكربون التي تم توليدها وطردها بالفعل (S1) بالنسبة إلى إمكانات الهيدروكربون المتبقية (S2). فمع نضج الصخر المولد، يزداد S1 بينما تنخفض S2 (في حال تم افتراض أن كل ذلك يحدث ضمن جملة مغلقة).

بنظرة عامة إلى الجدول 1 يُمكن ملاحظة أن الصخر المولد في الجدالة وبرغم المحتوى من الكربون العضوي الكلي TOC المنخفض مقارنةً بما يبديه الصخر المولد في الكيرماف (1.9 في الجدالة مقابل 3.4 وسطياً في الكيرماف) إلا أن معامل الإنتاجية PI في الجدالة أعلى منه في الكيرماف (54 في الجدالة مقابل 46 % وسطياً في الكيرماف) علماً أن  $T_{MAX}$  في الجدالة (461 °C وسطياً) أدنى منها في الكيرماف (465 °C) أي من المفترض أن النضج متقدم نسبياً في الكيرماف بالمقارنة مع الجدالة إلا أن معامل الإنتاجية في الكيرماف أقل نسبياً. إن ذلك يمكن مناقشته على النحو الآتي:

هناك بعض الحالات التي يكون فيها S1 أعلى من S2، على سبيل المثال:

1. وجود نطف مهاجر (Peters, 1998) من شأن احتواء تشكيلة الجدالة على نطف مهاجر، حيث يمكن أن يؤدي ذلك إلى ارتفاع S1، وارتفاع معامل الإنتاجية PI.

2. مادة عضوية شديدة النضج أو مفرطة النضج (Peters and Cassa, 1994): عندما يتم دفن الصخور وتعرضها لدرجات حرارة متزايدة، تزداد S1 على حساب S2، وذلك لأن المادة العضوية الأقل ثباتاً حرارياً قد تفككت بالفعل أثناء النضج الطبيعي، تاركةً بقايا كيروجين مستنفذة وأكثر ثباتاً حرارياً، وهي ليست الحالة هنا، بدليل توليد الكيروجين للهيدروكربون بعد تجاوز الـ 300 درجة مئوية أثناء تجارب التحلل الحراري في Rock-Eval.

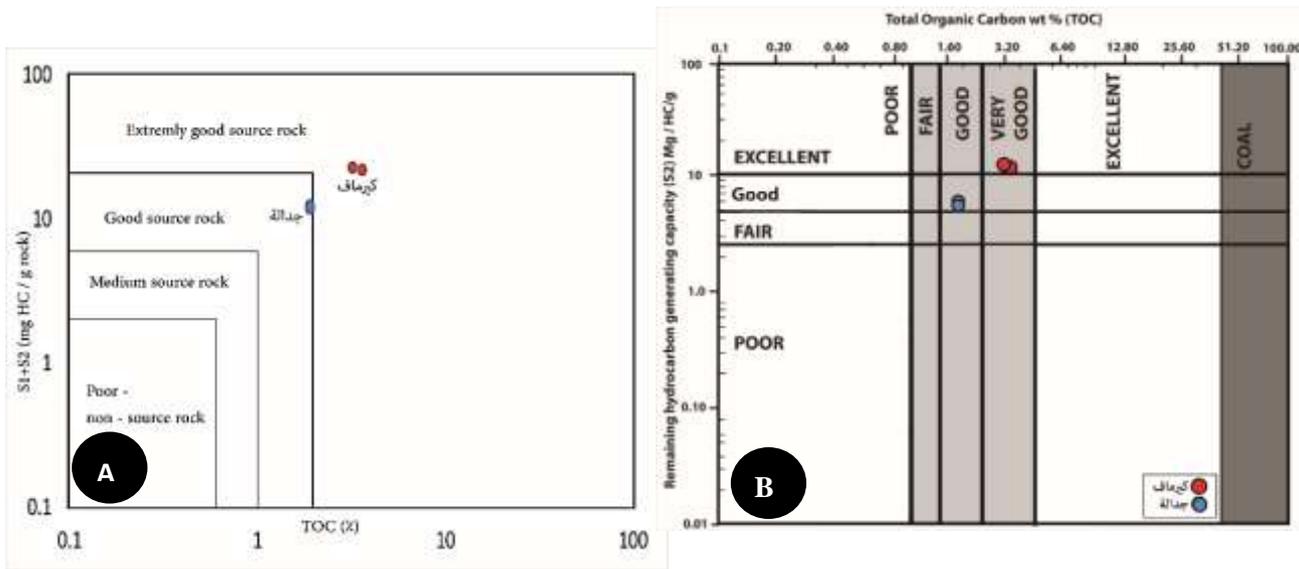
3. محتوى منخفض جداً من المواد العضوية (Peters and Cassa, 1994): إذا كان محتوى المادة العضوية في الصخر منخفضاً جداً (أقل من 0.3 بالوزن %)، ستكون قيم S1 و S2 منخفضة جداً مما ينتج عنه بيانات غير موثوقة. وهي ليست الحالة هنا طالما TOC أصلاً أكبر من 0.3%.

باختصار، في حالة الجدالة، فإن S1 أعلى من S2 نتيجة احتواء التشكيلة على نطف مهاجر، وهو المسؤول عن ارتفاع قيم PI ظاهرياً في الجدالة مقارنةً بالكيرماف.

أما فيما يخص الكيرماف، فبالرغم من أنها تُبدي TOC مرتفع نسبياً مقارنةً بالجدالة، إلا أنها وعلى نحو مفاجئ تُبدي قيم PI منخفضة مقارنةً بالجدالة. علماً أنه بالعودة للجدول 1، فإن قيم S2 أعلى من قيم S1 في الكيرماف، وهو المتوقع والطبيعي. بالتالي، فإن انخفاض قيم PI بالرغم من ارتفاع TOC في الكيرماف مقارنةً بالجدالة يُمكن أن يقود للتفكير باحتمالية محتوى عالي من الكربون المعدني، والذي لا يتحلل حرارياً ولا يساهم في S2. صحيح أن S2 يركز بالفعل على الكربون العضوي فقط، لكن يمكن أن يؤثر وجود الكربون المعدني بشكل غير مباشر على تفسير كلاً من المعاملين S2 و S3، وكذلك مؤشر الإنتاج، حيث إن وجود كربون معدني من شأنه أن يؤدي إلى قيمة أعلى لـ S3 ( $CO_2$ ) لا تتناسب وقيم S2 المقاسة تشير لتفكك شديد للمادة العضوية لا ينسجم والمحتوى الفعلي مع الكربون العضوي، وبالتالي فإن ارتفاع قيم S3 نتيجة وجود الكربون المعدني سيتم اعتباره مؤشراً لنضج أعلى مقارنةً بالواقع، ما يعقد تفسير وفهم الصخر المولد ونضجه وقدرته التوليدية. وينتج عن ذلك قيم PI ظاهرياً أدنى من المتوقع (Snowdon, 1995). وقد تتجاوز قيم S3 قيم S2 نتيجة تحفيز الكربون المعدني لأكسدة شديدة أو معدل تفكك أسرع للمادة العضوية (نتيجة ناقليّة حرارية أعلى للكربون المعدني) (Xie et al, 2023)، إلا أن هذا الافتراض (نسبة من

الكربون المعدني) يمكن نفيه ببساطة في حالة الكيرماف بحسب ما تُظهر قيم S2 و S3، حيث قيم S3 أقل من قيم S2، بالإضافة لارتفاع قيم TOC أصلاً في الصخر. وتُستبعد بالتالي هذه الفرضية. بالنتيجة، فإنّ ارتفاع PI في الجدالة مقارنةً بالكيرماف برغم ما تُبدية الجدالة من قيم أقل لكل من TOC والنضج النسبي لا يعني انخفاض قيم PI في الكيرماف، بل يعني ارتفاع ظاهري وغير حقيقي لقيم PI في الجدالة. وذلك لا يُمكن تفسيره إلا باحتواء تشكيلة الجدالة على نطف مهاجر، على الأرجح من تشكيلة الكيرماف التي تندوها مباشرة، فلو كان هناك من نطف مهاجر من سويات عميقة أكبر، أي أدنى من الكيرماف لتأثرت واضطربت قيم S1 و S2 في الكيرماف أيضاً كما هو الحال في الجدالة، وكذلك فإن نموذج توزيع العناصر الأثر في الكيرماف (التي سيمر النفط المهاجر عبرها صعوداً للجدالة) كان سيضطرب أيضاً ولحدث تشويش في البصمة الجيوكيميائية المتطابقة بين المكون الصخري والمادة العضوية في الكيرماف وهو ما لم يحدث كما سنرى لاحقاً في النص.

ويهدف إظهار الغنى بالكربون العضوي ومنعكسه في القدرة التوليدية لكل من التشكيلتين المدروستين، بحيث يتم تجاوز اللغظ الذي أحدثه حساب PI سابق الذكر، فقد تم اللجوء لمخططات تصنيف الكيروجين بحسب العلاقة بين %TOC وبين مجموع كل من الهيدروكربون الحر S1 والهيدروكربون الكامن S2، وكذلك بحسب العلاقة بين %TOC وبين الهيدروكربون الكامن فقط S2 (الشكل، 4: A و B).



الشكل 4. A) مخطط TOC بدلالة S1+S2 (Wenjun et al., 2022) يُظهر وفرة المادة العضوية في الصخر المولد لكل من تشكيلتي الجدالة والكيرماف (في شمال الحسين). B) مخطط تقاطعي يُظهر قيم المحتوى الكلي من الكربون العضوي (%TOC) و قيم S2 (كمية الهيدروكربون المتشكلة أثناء التفكك الحراري للكيروجين) (Egobowaye, 2017)، حيث تُشير القيم الأعلى من S2 إلى كمونية توليدية أعلى للهيدروكربون. بشكل عام، قيم S2 و TOC تُظهر أن عينات الكيرماف تمثل صخوراً مولداً جيداً، ذو قدرة توليدية ممتازة، في حين أن عينات الجدالة تعبر عن صخر مولد جيد ذو كمونية هيدروكربونية جيدة.

من الشكل 4-A، تقع المادة العضوية المأخوذة من الصخر المولد لتشكيلة الكيرماف ضمن مجال الصخر المولد الجيد جداً. بالمقابل، تقع المادة العضوية المدروسة في الجدالة ضمن مجال الصخر المولد الجيد عند حدود الصخر المولد الجيد جداً. تُشير هذه النتائج إلى أن الصخر المولد في كلتي التشكيلتين لديه إمكانيات عالية لتوليد الهيدروكربون، مع أفضلية للكيرماف. ويعزى ذلك الغنى إلى عدة عوامل، مثل:

1. محتوى عالي من المادة العضوية، حيث يتمتع الصخر المولد في الكيرماف بكمية عالية جداً، وعالية في الجدالة من المادة العضوية، وهي شرط ضروري لتوليد الهيدروكربون.
  2. نضج حراري متقدم، حيث خضع الصخر المولد في كل من الجدالة والكيرماف لدرجات حرارة عالية، مما تسبب في نضج المادة العضوية وجعلها أكثر عرضة لتوليد الهيدروكربون.
  3. مستويات غير عالية من الأكسجين: تم دفن الصخر المولد في بيئة ذات مستويات ليست مرتفعة من الأكسجين، مما سمح للمادة العضوية بالحفظ وأصبحت أكثر عرضة لتوليد الهيدروكربون.
- على صعيد متصل، من الشكل B-4، تقع عينات تشكيلة الجدالة ضمن قطاع "جيد". يُشير هذا إلى أن العينة لديها قدرة متوسطة إلى عالية على إنتاج الهيدروكربون وقدرة جيدة متبقية على توليد الهيدروكربون، مما يُشير إلى أنها مصدر جيد لتوليد الهيدروكربون. ولكنها ليست جيدة جداً مثل الكيرماف، حيث تقع عينات الكيرماف في قطاع "جيد جداً". ويُشير هذا إلى أن العينات لديها قدرة عالية على إنتاج الهيدروكربون وقدرة عالية متبقية على توليد الهيدروكربون، مما يؤكد على أنها مصدر جيد جداً لتوليد الهيدروكربون وذلك نتيجة قيمها العالية من TOC و S2. باختصار، تُظهر كل من الجدالة والكيرماف إمكانات معتبرة لتوليد الهيدروكربون، مع ملاحظة أن الكيرماف أفضل نسبياً من الجدالة. وبجعلنا ذلك نعود إلى حسابات معامل الإنتاجية في الأعلى، حيث بينت النتائج ارتفاع قيم معامل الإنتاجية في الجدالة مقارنة بالكيرماف بشكل يناقض المحتوى الكلي من الكربون العضوي في كل منهما. وبشكل يتناقض أيضاً مع نتائج تصنيف الكيروجين بحسب مخططات الشكل A-4 و B والتي تبين أن القدرة التوليدية للكيرماف أعلى من القدرة التوليدية للجدالة، وبالعودة الآن للمناقشة السابقة بخصوص تفسير ارتفاع PI في الجدالة ذات TOC الأقل نسبياً مقارنة بالكيرماف، فإن ذلك مردّه احتواء الجدالة على نطف مهاجر نتج عنه رفع لقيم S1 ما أعطى قيم أعلى لمعامل الإنتاجية PI بشكل لا يعكس الحقيقة.

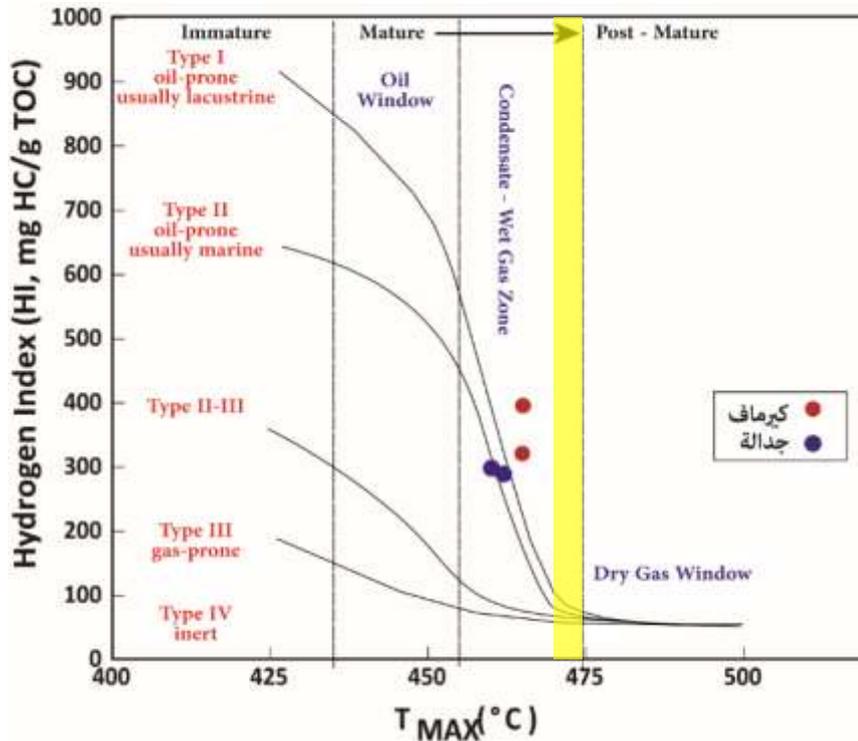
#### النضج الحراري T<sub>MAX</sub> ونوع المادة العضوية

اعتباراً من معطيات الجدول 1، تم إسقاط عينات كل من الجدالة والكيرماف بحسب قيم T<sub>MAX</sub> و HI ضمن مخطط غالباً ما يُستخدم في جيوكيمياء المادة العضوية لتقييم نوع ونضج المادة العضوية في الصخور الرسوبية (الشكل، 5). يُمثل المحور الأفقي درجة الحرارة القصوى (T<sub>MAX</sub>) بالدرجات المئوية، وهو مؤشر للنضج الحراري، بينما يمثل المحور العمودي مؤشر الهيدروجين (HI) بالمليغرام من الهيدروكربون لكل غرام من إجمالي الكربون العضوي (ملغ ١ غ)، مما يدل على نوع المادة العضوية.

بحسب الشكل 5 تقع عينات الكيرماف في نافذة الغاز الرطب (المتكثفات). ضمن مجال T<sub>MAX</sub> حوالي 465 °C، وقيم HI ما يقرب من 159 °C (وسطياً) ملغ HI ١ غ TOC. وتُشير مواقع العينات إلى أن المادة العضوية تُبدي نضجاً حرارياً أعلى نسبياً مقارنةً بعينات الجدالة، مع مؤشر هيدروجين أعلى كونها تنتمي إلى كيروجين من النمط II. يُشير هذا إلى أن الكيروجين من النمط II (ذي الكمون الجيد لتوليد الزيت وكذلك الغاز) قد تعرض لمستويات أعلى من النضج الحراري مما هو متوقع لنافذة الزيت. ويبدو أن هذا الكيروجين قد تم تسخينه إلى النقطة التي ولد فيها نطفه الكامن، وهو الآن ينتج الغاز الرطب (Peters, 1986)، أو أنه يولد نطف سائل (زيت) منخفض الكثافة (API < 45°) لكن يصعب تمييزه عن المتكثفات أو الغاز الرطب ضمن المخطط (Speight, 2014).

تقع عينات الجدالة في نافذة الغاز الرطب (المتكثفات). ضمن مجال من T<sub>MAX</sub> حوالي 460 °C، وقيم HI تقارب 290 °C (وسطياً) ملغ HC ١ غ TOC. وتُشير مواقع العينات إلى أن المادة العضوية موجودة في مرحلة توليد زيت

إلى توليد غاز رطب (متكثفات)، مع مؤشر هيدروجين معتدل يُشير إلى مزيج من الكيروجين ذو الكمون لتوليد كل من النفط والغاز مع ميل لتوليد الغاز (النمط II إلى النمط III).



الشكل 5. مخطط للعلاقة بين  $T_{MAX}$  و HI يظهر نضج و نمط المادة العضوية في كل من الصخرين المولدين الكيرماف والجدالة. النطاق المظلل بالأصفر يعبر عن مجال عتبة الانتقال من الغاز الرطب إلى الغاز الجاف بحسب المراجع (يتراوح بين 470 و 475 °C حسب نمط المادة العضوية) (Adeleye and Okeke, 2014; Bello et al., 2018; Oljira et al., 2020). Immature: غير ناضجة، Mature: ناضجة، Post - Mature: فوق ناضجة.

#### مؤشر المحتوى الأوكسجيني OI

يُشير مؤشر الأوكسجين الذي تم الحصول عليه من تحليل تقييم الصخور بشكل أساسي إلى محتوى الأوكسجين الأصلي للمادة العضوية، والذي يعتمد على نمط المادة العضوية (الكيروجين) الموجودة في الصخر (El Nady and Harb, 2012; Rezouga et al., 2015).

يُمثل OI كمية الأوكسجين نسبةً إلى كمية الكربون العضوي في العينة. يُشير مؤشر OI الأعلى عموماً إلى وجود كيروجين أكثر غنىً بالأوكسجين، والذي إذا ما اقترن بانخفاض في HI فإنه يرتبط عادةً بالمواد العضوية المشتقة من النباتات القارية الأعلى، في المقابل، يشير مؤشر OI الأدنى مع غنىً بالهيدروجين، إلى كيروجين غالباً ما يكون مشتقاً من الطحالب والكائنات الحية الدقيقة في المياه العذبة أو البيئة البحرية (Erik, 2006).

تجدر الإشارة إلى أنّ نوع المادة العضوية ومحتواها من الأوكسجين يمكن أن يتأثرا بظروف الأكسدة والإرجاع في بيئة الترسيب، إلا أنّ OI يعكس في المقام الأول محتوى الأوكسجين الأصلي للمادة العضوية على أساس نوعه، ولا يدل OI مباشرة على الظروف الإرجاعية القديمة خلال الترسيب (Jiang et al., 2017).

يحتوي الصخر المولد في الكيرماف على محتوى أوكسجيني أقل (102 mg CO<sub>2</sub>/g TOC) في مادته العضوية مقارنةً بالصخر المولد في الجدالة الذي يحتوي على محتوى أوكسجيني أعلى (139 mg CO<sub>2</sub>/g TOC).

يُشير هذا إلى أن المادة العضوية في الكيرماف غنية بالهيدروجين وأقل غنىً بالأوكسجين، ومن المحتمل أن تكون مشتقة من الطحالب والكائنات الحية الدقيقة. بالمقابل، فإنّ المادة العضوية في صخور الجدالة أغنى نسبياً بالأوكسجين، وعادةً ما ترتبط بالمواد العضوية المشتقة من النباتات القارية الأعلى ( Littke and Zieger, 2019; Tissot and Welte, 1984).

### الجيوكيمياة التنقيبية وشروط التوضع القديمة (الظروف الإرجاعية وحفظ المادة العضوية) مقارنة نماذج توزع العناصر الأثر وهجرة الهيدروكربون إلى الجدالة

يُمكن استخدام نموذج توزع العناصر الأثر الحساسة للإرجاع مثل الفاناديوم (V) والكروم (Cr) والكوبالت (Co) والنيكل (Ni) لتوصيف الشروط المسيطرة في تراكم المواد العضوية وظروف الترسيب في الصخور المولدة ( Jegede et al., 2018; Liu et al., 2023). وتُعتبر هذه الأساليب جزءاً من تقنيات الجيوكيمياة التنقيبية وتسهم في تعزيز فعالية استراتيجيات التنقيب عن الموارد الطبيعية. يبين الجدولين، 2 و 3، نتائج تحليل العناصر الأثر المختارة (V, Cr, Co, Ni) في كل من المكون الصخري والمكون العضوي كل على حدى في كل من الكيرماف والجدالة.

الجدول 2 . تحليل العناصر الأثر (بال ppm) بتقنية الامتصاص الذري NOVA 400 ضمن المكون الصخري لكل من العينات المأخوذة من تشكيلتي الجدالة والكيرماف.

العمق م	التشكيلة	V	Cr	Co	Ni	الارتياب
370	جدالة 1	300	89	130	107	
490	جدالة 2	305	70	230	107	±0.5
600	كيرماف 1	440	64	54	120	ppm
650	كيرماف 2	470	43	66	128	

تم تحليل عينتين من سويتين عمقتين مختلفتين من كل صخر مولد (الأرقام 1 و 2 ترمز لأرقام العينات وارتباطها بالعمق: 1 أقل عمقاً من 2).

الجدول 3 . تحليل العناصر الأثر (بال ppm) بتقنية الامتصاص الذري NOVA 400 ضمن المكون العضوي لكل من العينات المأخوذة من تشكيلتي الجدالة والكيرماف.

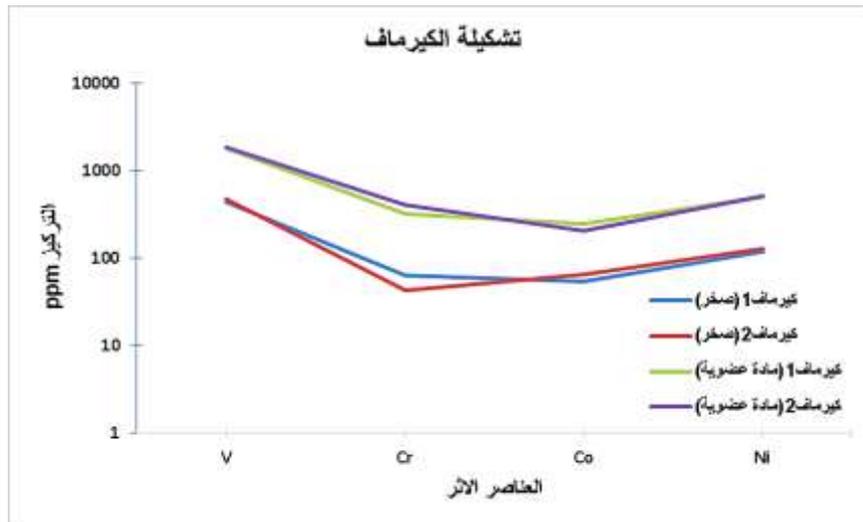
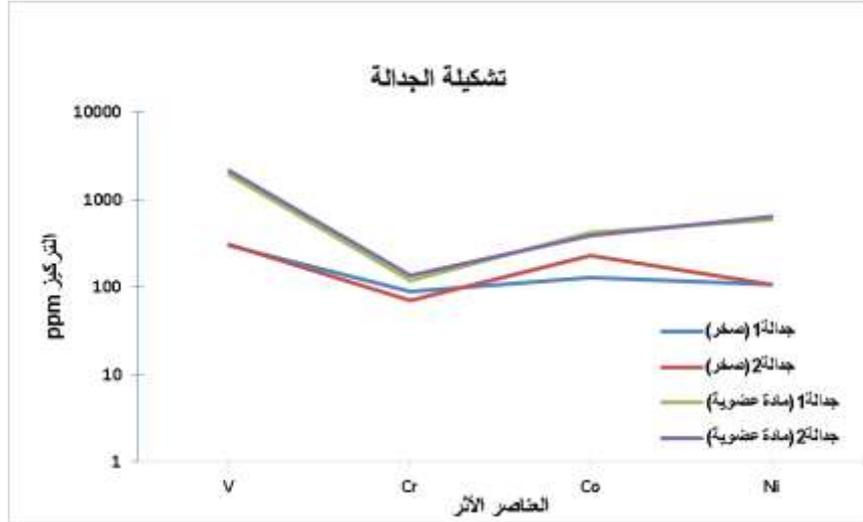
العمق م	التشكيلة	V	Cr	Co	Ni	الارتياب
370	جدالة 1	1950	118	420	600	
490	جدالة 2	2140	137	390	650	±0.5
600	كيرماف 1	1800	320	250	500	ppm
650	كيرماف 2	1870	405	206	520	

تم تحليل عينتين من سويتين عمقتين مختلفتين من كل صخر مولد (الأرقام 1 و 2 ترمز لأرقام العينات وارتباطها بالعمق: 1 أقل عمقاً من 2).

تمّ ترتيب العناصر المدروسة في مخططات (الشكل، 6) بحسب ميلها للوسط المرجح وقابليتها للحركة ( Algeo and Tribovillard, 2009)، اعتباراً من الفاناديوم ذو حالات التكافؤ المتعددة من  $V^{2+}$  إلى  $V^{5+}$  والذي يؤشر لشروط عالية الإرجاع، يليه الكروم ذو حالات التكافؤ المتعددة من  $Cr^{2+}$  إلى  $Cr^{6+}$ ، وذو الحركية الأقل نسبياً من تلك الخاصة بالفاناديوم. يأتي بعده الكوبالت الذي يُظهر حالات تكافؤية متعددة ( $Co^{2+}$  و  $Co^{3+}$ )، ويؤدي عموماً سلوكاً أقل تأثراً

(نسبياً) بالشروط المرجعة مقارنةً بالفاناديوم والكروم. ومن ثمّ النيكل وهو ذو حالات تكافؤية قليلة ( $Ni^{2+}$  و  $Ni^{3+}$ )، وسلوكه ذو حركية أقلّ تأثراً بالتغيرات المرجعة.

من خلال دراسة شكل نموذج التوزع للعناصر المدروسة ومقارنتها فيما بين المكون الصخري من جهة وبين المكون العضوي من جهة أخرى في كل صخر مولد يُمكن استنتاج مدى التشابه والتباين في البصمة الجيوكيميائية وبالتالي مدى التشاركية في ظروف الترسيب والأصل للمشارك لكل من هذين المكونين في الصخر المولد الواحد.



الشكل 6. نماذج توزع العناصر الأثر في المكون الصخري وفي المكون العضوي في الصخور المولدة المدروسة. لاحظ التطابق في البصمة الجيوكيميائية بين المكون الصخري والمكون العضوي في حالة الكيرماف ما يشير لظروف الترسيب الواحدة وأن المادة العضوية مترامنة الترسيب مع المكون الصخري وليست لاحقة أو منقولة. يمكن ملاحظ ذات التطابق في حالة الجدالة مع شذوذ يديه الكوبالت يليه الكروم في إشارة لسيطرة الأصل القاري على المكون الصخري والذي يرتبط به عنصري الكوبالت والكروم. لاحظ التشابهات والفروقات بين نماذج الجدالة عن نماذج الكيرماف ما يعكس تشابهات واختلافات في السحنة، شروط الترسيب وبعض الخصائص الجيوكيميائية.

نموذج تشكيلة الكيرماف

يُبدى كل من الصخر والمادة العضوية نفس نموذج توزيع العناصر الأثر مع وفرة أعلى بالعناصر الأثر المدروسة في المكون العضوي مقارنةً بالمكون الصخري (الشكل، 6). وعموماً يُبدى النموذج ميلاً من اليسار (غنى نسبي بالفاناديوم) إلى اليمين (حيث يفتقر بالكوبالت)، أي أنه ينحدر من الفاناديوم باتجاه الكروم ومن ثم الكوبالت ليعاود الصعود نسبياً باتجاه النيكل. إنَّ هذا التشابه في شكل نموذج توزيع العناصر الأثر، والتطابق في هذه البصمة الجيوكيميائية يقود للاستنتاج بالأصل المشترك لكل من المادة العضوية والصخر وأن المادة العضوية متزامنة الترسيب مع المادة الصخرية وهي ليست منقولة. وهناك انسجام وتوافق في مصدر المادة العضوية والمادة الصخرية مع محتوى عالي من TOC كما تبين سابقاً.

وعموماً فإنَّ المحتوى من العناصر الأثر في المكون العضوي أعلى مما هو عليه في المكون الصخري وهو الطبيعي نتيجة الميل الطبيعي الجيوكيميائي لتلك العناصر للمواد العضوية، وكذلك حساسيتها لظروف الأكسدة والإرجاع والإنتاجية القديمة، ما يؤدي إلى إثرائها في الجزء الغني بالمواد العضوية من الصخور المولدة مقارنةً بالمكون الصخري (Hatch and Levanthal, 1992; Pang et al., 2019; López and Mónaco, 2017).

نموذج تشكيلة الجدالة

يُبدى نموذج توزيع العناصر الأثر في المادة العضوية انحداراً من الفاناديوم باتجاه الكروم ليعاود الصعود النسبي باتجاه النيكل عبر الكوبالت (الشكل، 6). في حالة الصخر فإن نموذج التوزيع يأخذ منحى عاماً مشابهاً لذلك الذي تبديه المادة العضوية مع تفاوتات نسبية، حيث يُمكن ملاحظة التقارب في المحتوى من الكروم بين كل من المكونين (الصخر والمادة العضوية) حيث يبلغ المحتوى الوسطي من الكروم في الصخر حوالي 80 ppm في حين أنه في المادة العضوية يبلغ حوالي 54 ppm أي أنه أعلى في المادة العضوية بـ 1.6 ضعفاً عنه في الصخر بينما كانت هذه النسبة في حالة الكيرماف تبلغ 6.8 ضعفاً. هذا يعني غنى نسبي أعلى بالكروم في الصخر مقارنةً بباقي العناصر في الجدالة بالمقارنة مع المادة العضوية فيها. يُمكن تفسير الاختلاف الطفيف في شكل نموذج التوزيع بين الصخر والمادة العضوية في الجدالة لناحية الاغتناء النسبي العالي بالكروم والكوبالت في الصخر مقارنةً بالمادة العضوية بالتأثر بوارد قاري (نواتج تجوية؟) أثناء الترسيب، حيث أنّ كلاً من الكوبالت والكروم عنصران ذا ميل للارتباط بالمكونات الفلزية مقارنةً بالارتباط بالمكونات العضوية في ظروف معينة، كزيادة الإرجاعية أثناء الترسيب ما يعزز ارتباط هذين العنصرين تقضيلاً بالمكون الصخري (O'Connor et al., 2015; Abarghani et al., 2020)، كما يُشير ذلك إلى وجود وارد من فلزات معينة كالعنصريات، الأكاسيد، والسولفيدات التي يتعزز ارتباط كل من الكروم والكوبالت بها في شروط مرجعة مقارنةً بميلها للارتباط بالمادة العضوية (Hem, 1977; Fendorf, 1995). ويعني ذلك ازدياداً في مساهمة المكون الصخري على حساب المكون العضوي أثناء الترسيب وذلك يتناغم مع المحتوى المنخفض من TOC في الصخر (الجدالة) وحدوث تبعثر وتخفيف للمادة العضوية في الصخر، وكذلك مع وقوع المادة العضوية ضمن النمط II/III أي مادة عضوية مختلطة ووجود وارد من مادة عضوية ذات أصل قاري في الصخر.

العناصر الأثر،  $T_{MAX}$ ، والنضج

بالمقارنة بين محتوى المادة العضوية من العناصر الأثر (V, Cr, Co, Ni) ومحتوى المادة الصخرية من تلك العناصر في كل من الجدالة والكيرماف (الجدولين، 2 و 3) فإنَّ النسب تكون على النحو الآتي:

– 4.80 نسبة مجموع العناصر الأثر في المادة العضوية في الجدالة إلى مجموعها في الصخر في الجدالة.

- 4.24 (مقارنة للنسبة أعلاه) نسبة مجموع العناصر الأثر في المادة العضوية في الكيرماف إلى مجموعها في الصخر في الكيرماف.
- 1.09 (1 تقريباً) نسبة مجموع العناصر الأثر في المادة العضوية في الجدالة إلى مجموعها في المادة العضوية في الكيرماف.
- 0.97 (1 تقريباً) نسبة مجموع العناصر الأثر في المادة الصخرية في الجدالة إلى مجموعها في المادة الصخرية في الكيرماف.

إن هذه الأرقام تبين تقارب قيم النسب، سواء بين المحتوى الإجمالي للعناصر بين التشكيلتين، أو نسبة المحتوى من العناصر في المادة العضوية في كل من التشكيلتين أو في المادة الصخرية في كل منهما، ما يُعطي الانطباع بأن التشكيلتين تبيان بعضاً من الخصائص الجيوكيميائية المتقاربة (مع اختلاف نموذج التوزع المرتبط بالشروط السائدة أثناء التوضع)، وإن التفاوت الطفيف بين النسب المذكورة جميعها لصالح الجدالة التي تظهر دائماً وفي كافة النسب المذكورة تفوقاً طفيفاً يمكن رده بصورة رئيسة لاحتوائها على هيدروكربون مهاجر من تشكيلات أدنى يرجح مبدئياً أنها من الكيرماف الملاصقة لها من الأسفل. وإذا ما أخذنا بعين الاعتبار معامل النضج  $T_{MAX}$  (الشكل، 5) فإن النضج النسبي الأعلى للكيرماف مقارنة بالجدالة ( $T_{MAX}$  C 465 (وسطياً) في الكيرماف، مقابل C 461 (وسطياً) في الجدالة) يفسر الفقر النسبي الطفيف بالمحتوى بالعناصر الأثر في الكيرماف مقارنة بالجدالة، حيث أن ذلك النضج وتوليد الهيدروكربون قد حرر بعضاً من العناصر الأثر من التشكيلة (الكيرماف) (Abarghani et al. 2020) التي من المفترض أنها أسفل الجدالة (أي أكثر عمقاً)، وإن جزءاً من ذلك الهيدروكربون المتولد قد تحرك صعوداً نحو الجزء الأعلى من التشكيلة (الجدالة) حاملاً محتواه من العناصر الأثر المتحررة، وبالتالي فإن الاختلاط المحتمل للجدالة بنواتج هيدروكربونية من التشكيلات الملاصقة كالكيرماف رفع نسبياً المحتوى من العناصر الأثر المذكورة، والذي كان من الممكن أن يكون أدنى من قيمته الحالية لولا ذلك الاختلاط. كما ساهم أيضاً في اختلاف شكل نموذج توزع العناصر في الجدالة عنه في الكيرماف، بالإضافة لما تم مناقشته من مساهمة تأثير قاري في الترسيب في الجدالة مقارنة بالكيرماف.

#### إرجاعية الوسط وحفظ المادة العضوية

يُمكن استخدام العناصر الأثر مثل الفاناديوم (V)، الكروم (Cr)، الكوبالت (Co) والنيكل (Ni) كمؤشرات فعالة لظروف الترسيب القديمة وخصائص صخور المولدة. وتوفر نسب هذه العناصر الأثر رؤى قيمة حول بيئة الترسيب، ظروف الأكسدة والإرجاع، ومصدر الصخور الرسوبية (Algeo and Maynard, 2004; Wang et al., 2024). تُعتبر النسبة  $V/V+Ni$  مفيدة بشكل خاص لتقييم ظروف الأكسدة والإرجاع أثناء ترسب الرسوبات. حيث تُشير النسبة  $V/V+Ni$  الأعلى إلى مزيد من ظروف الإرجاع (Anoxic)، بينما تُشير النسبة المنخفضة إلى المزيد من ظروف الأكسدة (Oxic) (Xiaochun et al., 2020) وبالمثل، يُمكن استخدام نسبة  $V/Cr$  لاستنتاج درجة الأكسدة، فارتفاع نسبة  $V/Cr$  تُشير إلى بيئة أكثر إرجاعية (Wang et al., 2024). فتُشير نسبة  $V/Cr$  العالية ( $>4.25$ ) بشكل عام إلى ظروف لا أوكسجينية، بينما تُشير النسبة بين 2.00 و 4.25 إلى ظروف فقر بالأوكسجين، وتُشير النسبة  $>2$  إلى ظروف مؤكسدة (Zhao et al., 2023).

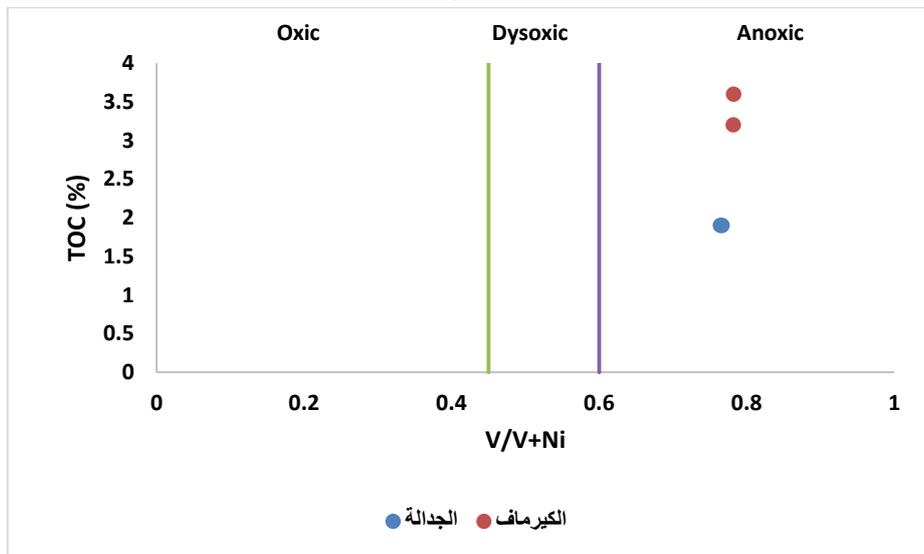
من خلال تحليل نماذج ونسب هذه العناصر الأثر، يُمكن إعادة بناء الظروف القديمة، بيئة الأكسدة والإرجاع، ومصدر صخور المولدة، وهو أمر بالغ الأهمية لفهم التاريخ الترسيبي وإمكانية توليد الهيدروكربون (Wang et al., 2024; )

(Zhu et al., 2020)، ويُمكن استخدام النسبتين  $V/V+Ni$  و  $V/Cr$  بالاقتران مع  $TOC$  (إجمالي الكربون العضوي) لتقييم ظروف الأكسدة والإرجاع وحفظ المادة العضوية في الصخر المولد.

### 1. نسبة $V/V+Ni$ بالعلاقة مع $TOC\%$

بالنسبة لعينات كل من الكيرماف والجدالة فإن النسبة العالية من  $V/V+Ni$  تعني أنّ المادة العضوية قد تم حفظها في بيئة لا أوكسجينية، وهو شرط مناسب لتراكم المادة العضوية (الشكل، 7). يُلاحظ أنّ ارتفاعاً في قيمة  $TOC$  يرافقه ارتفاع نسبي في قيمة النسبة  $V/V+Ni$  في الكيرماف مقارنةً بالجدالة ما يؤشر إلى أنّ زيادة الوارد من المادة العضوية في الكيرماف رفع من نسبة الفاناديوم المرتبط اصلاً بالمادة العضوية في وسط فقير بالأوكسجين. بالمقابل فإنّ المادة العضوية في الجدالة تُبدي نسبة  $V/V+Ni$  تشير أيضاً لتوضعها في بيئة لا أوكسجينية إلا أنّ هذه النسبة هي أقل بشكل طفيف مقارنةً بالكيرماف ومردّ ذلك زيادة نسبة النيكل المرتبط بزيادة الوارد القاري في الجدالة (كبروجين من النمط II/III).

تجدر الإشارة هنا إلى أنّه يُمكن لمعاملات بمفردها كالنسبة  $V/V+Ni$  تقديم رؤى قيمة حول الشروط الإرجاعية الترسيبية القديمة، إلا أنّ الاعتماد على معامل واحد يمكن أن يؤدي إلى تفسيرات غير كاملة أو مضلّة. يجب أن يتضمن التقييم الشامل لظروف الإرجاع القديمة باستخدام معاملات جيوكيميائية متعددة لضمان تقييم قوي ودقيق. فالنسبة  $V/V+Ni$  يُمكن أن تتأثر بعوامل أخرى غير الظروف المرجعة مثل الوارد من الحطاميات مثلاً (Riquier et al., 2006). لذلك عادةً ما يتم القيام بتكامل لقيم هذه النسبة مع قيم نسبة مؤشرة أخرى كنسبة  $V/Cr$  للحصول على صورة أدق فيما يخص الظروف الإرجاعية لبيئة الترسيب (Rimmer, 2004).

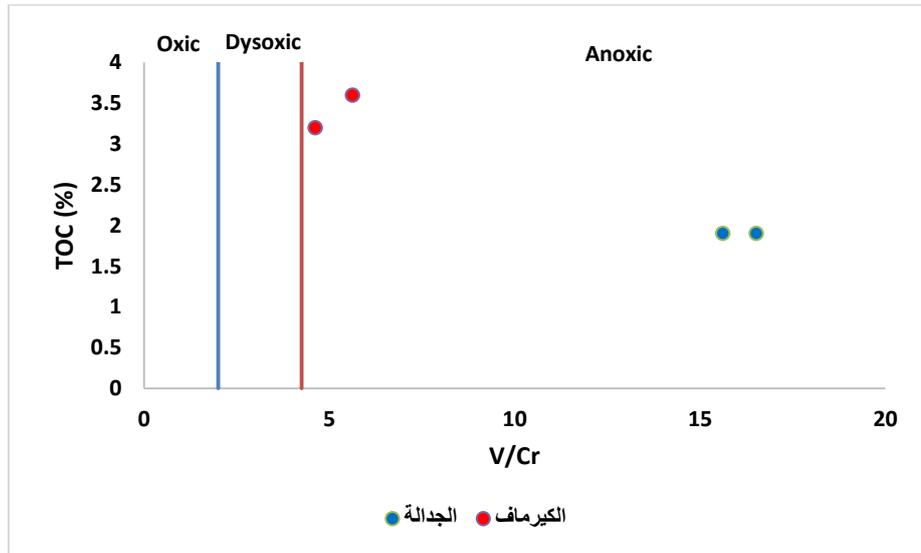


الشكل 7. الإرجاعية القديمة لبيئة ترسيب المادة العضوية من خلال العلاقة  $V/V+Ni$  بدلالة  $TOC$ . لاحظ وقوع عينات كل من الكيرماف والجدالة في المجال اللا أوكسجيني (Yang et al., 2022). (Oxic) أوكسجيني، (Dysoxic) شبه أوكسجيني، (Anoxic) لا أوكسجيني.

### 2. نسبة $V/Cr$ بالعلاقة مع $TOC\%$

في الصخور المولدة المدروسة لكل من الكيرماف والجدالة، تشير نسبة عالية من  $V/Cr$  (الشكل، 8) إلى أنّ المادة العضوية تم حفظها في بيئة خالية من الأوكسجين (الشكل، 8)، "متذبذبة" نسبياً في الكيرماف وتُبدي انحرافاً نحو شروط أقل إرجاعية نسبياً (الشكل، 8). مردّ ذلك ارتفاع تركيز الـ  $Cr$ ، وكذلك انخفاض الفاناديوم بالمقارنة مع الجدالة (جدول، 3). بالربط مع  $TOC$ ، فإنّ المحتوى المرتفع من  $TOC$  في الكيرماف رافقه محتوى نسبي أقل من  $V$  وارتفاعاً في  $Cr$

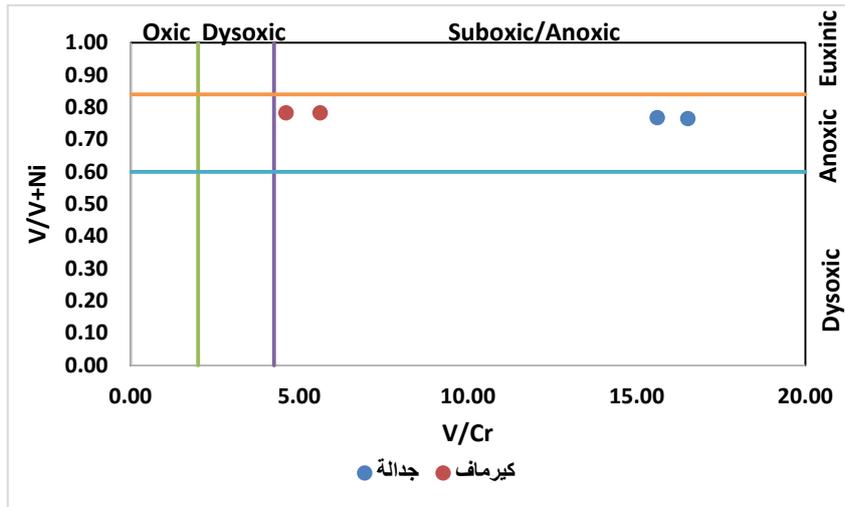
مقارنةً بالجدالة مع أن كلتي التشكيلتين مترسبتان في شروط لا أوكسجينية، إلا أن انحراف عينات الكيرماف نحو مجال المحتوى الأوكسجيني المنخفض (Dysoxic) مقارنةً بالجدالة يعني شروطاً لا أوكسجينية أقل شدة من تلك الخاصة بالجدالة بسبب انخفاضاً نسبياً بالمحتوى من V رافقه ارتفاعاً بالمحتوى من الكروم (الجدول، 3). فبارتفاع محتوى الأوكسجين، يميل محتوى V إلى الانخفاض. وذلك لأن الفاناديوم متحرك نسبياً (relatively mobile) ويمكن ترشيحه أو إزالته من المادة العضوية أثناء عملية الأكسدة (Breit and Wantly, 1991). أما محتوى Cr غالباً ما يرتفع بارتفاع محتوى الأوكسجين. وذلك لأن الكروم أقل حركة (less mobile) ويميل إلى التراكم في المادة العضوية المتبقية حيث تتم إزالة العناصر الأخرى الأكثر حركة (كالفاناديوم) بوجود الأوكسجين (Tribovillard et al., 2006).



الشكل 8. علاقة V/Cr بدلالة TOC والظروف الإرجاعية القديمة المسيطرة أثناء ترسيب كل من الكيرماف والجدالة (Pašava et al., 2019; Yang et al., 2022). (Oxic) أوكسجيني، (Dysoxic) شبه أوكسجيني، (Anoxic) لا أوكسجيني.

إذاً، يُشير انزياح عينات الكيرماف نحو الحد الفاصل بين حقل نقص الأوكسجين والحقل اللا أوكسجيني إلى تذبذب نحو زيادة في المحتوى من الأوكسجين أثناء الترسيب، مقارنةً بالجدالة. ويُمكن أن يشير هذا إلى أن ظروف الترسيب لم تكن تعاني من نقص حاد في الأوكسجين باستمرار طوال فترة ترسب المادة العضوية في الكيرماف، بل كانت تتقلب بين ظروف نقص الأوكسجين واستنفاد الأوكسجين.

بالربط المباشر بين النسبتين  $V/V+Ni$ ، و  $V/Cr$  (الشكل، 9)، تتوضع عينات الكيرماف ضمن المجال تحت الأوكسجيني/اللا أوكسجيني من حيث نسبة  $V/Cr$ ، ويوافق ذلك المجال اللا أوكسجيني من حيث النسبة  $V/V+Ni$ .



الشكل 9. علاقة V/Cr بدلالة V/(V+Ni) والظروف الإرجاعية القديمة المسيطرة أثناء ترسيب كل من الكيرماف والجدالة (Li et al., 2021). (Oxic) أوكسجيني، (Dysoxic) شبه أوكسجيني، (Suboxic) تحت أوكسجيني، (Anoxic) لا أوكسجيني.

بالرابط مع قيم مؤشر الأوكسجين OI في كل من الصخر المولد في الجدالة والكيرماف والمناقشة سابقاً، وبالمقارنة مع الظروف الإرجاعية المستنتجة من دراسة نسب العناصر الأثر ذات الصلة، فقد تم ترسيب صخر الجدالة المولد في ظل ظروف أكثر لا أوكسجينية، على الرغم من أن المادة العضوية تُبدي OI أعلى مقارنةً بما تُبديه المادة العضوية في الصخر المولد في الكيرماف الذي أبدى بحسب العناصر الأثر أنه قد ترسب في ظل ظروف إرجاعية "مخففة" من نقص الأوكسجين.

التفسير المنطقي لهذه التباينات (OI منخفض، إرجاعية أقل في الكيرماف من جهة، وOI مرتفع نسبياً، مع إرجاعية أعلى نسبياً في الجدالة من جهة أخرى) هو تغير في شروط ومواصفات بيئة الترسيب وطبيعة المادة العضوية: انتقال من شروط ذات محتوى أوكسجيني منخفض ومادة عضوية ذات محتوى منخفض من المركبات الحاوية على الأوكسجين في الكيرماف (بالوسين)، إلى شروط أكثر لا أوكسجينية مع مادة عضوية ذات محتوى أوكسجيني نسبياً أعلى (إيوسين)، وقد تشير بالتالي لتغاير في الشروط المسيطرة على الترسيب من بيئة مرجعة ذات تبادل مائي نسبي ربما يخفف من الإرجاعية العالية (انحراف عينات الكيرماف نحو مجال الـ Dysoxic في الشكلين 8 و 9)، مع مادة العضوية يُسيطر عليها المنشأ البحري (كبروجين من نمط II، وانخفاض OI) وبالتالي بيئة أكثر بحرية (عمقاً) في الكيرماف، إلى بيئة أكثر لا أوكسجينية ذات مادة عضوية تُبدي قيم أعلى نسبياً من OI (وكبروجين من نمط III/II) ما يُشير لمساهمة قارية في المادة العضوية وبالتالي بيئة ترسيب بحري لكنه في وسط ذو طاقة وسط أقل اضطراباً نسبياً وأقل تبادلاً مائياً وبالتالي أكثر إرجاعية في الجدالة.

من شأن هذه النتيجة أن تسلط الضوء على أهمية النظر في مؤشرات جيوكيميائية متعددة عند دراسة أي مسألة، حيث أنّ مؤشراً واحداً مثل OI قد لا يوفر دائماً صورة كاملة لبيئة الترسيب وخصائص المواد العضوية. وإنّ ربطاً بين OI ونسب عناصر مؤشرة للأكسدة والإرجاع يوفر تفسيراً أكثر قوة في هذه الحالة.

بالرابط مع الدراسات الترسيبية المرجعية للتشكيلتين، وبحسب (إسماعيل، 2014)، فإنّ كل من الجدالة والكيرماف (في حوض الدو) تبيان سحنة نيريئية (أي ضحلة نسبياً - حتى 200 م عمقاً) ذات رسوبات تميز تجاوز بحري، أمّا بحسب الشركة السورية للنفط فإنّ الكيرماف تميز بيئة ترسيب بحر مفتوح عميق، في حين تميز الجدالة بيئة بحر مفتوح

متوسط العمق إلى عميق. مع الإشارة إلى أن التشكيلات ذات العمر الأحدث (النيوجين) والتي تعلو التشكيلتين المدروستين بالإضافة للشيلو ذات سحنة قارية تتألف من الكونغوميرا والحطاميات والحجر الكلسي بالإضافة إلى بعض التوضعات اللاغونية والطبقات الغضارية والرملية الحاوية على الحطاميات الكربوناتيّة (الشركة السورية للنفط) كما ذكر في فقرة منطقة الدراسة.

تتيح هذه التباينات في مرجعية بيئة الترسيب لكل من تشكيلتي الكيرماف والجدالة الفرصة لتقديم مساهمة جديدة تتمثل في نتائج الدراسة الحالية، مما قد يعزز هذا الاتجاه أو ذلك، أو حتى يفتح المجال لمقاربة جديدة لمواصفات بيئة توضع كل من التشكيلتين المدروستين.

إن كل من الكيرماف والجدالة يُدَيان سحنة (مارل وحجر كلسي مارلي مع سويات غضارية في الكيرماف، وحجر كلسي وحجر كلسي غضاري في الجدالة)، وُحسب ما تقدم من نتائج، تُبدي الكيرماف محتوى عالي من الكربون العضوي (كيروجين من النمط II) ما يُشير لترسيب بحري صريح في وسط مرجع ذو محتوى متذبذب من الأوكسجين، في حين أنّ الجدالة أقل غنىً بالمادة العضوية (TOC أقل) مع زيادة في ضحالة العمق (Brew, 2001) وزيادة في الوارد القاري من المادة العضوية (كيروجين نمط II/III) وظروف ترسيب تبدو أكثر تعقيداً مقارنةً بالكيرماف، حيث تبدو أكثر إرجاعية مع زيادة في معدل الطمر مترافق مع ارتفاع الوارد من المادة القارية المنشأ، وإن ارتفاع نسبة المكون الصخري (بحسب نموذج توزع العناصر الأثر) قد ساهم في تخفيف المحتوى من المادة العضوية (TOC أقل مقارنةً بالكيرماف). وإن احتواء الجدالة على البيريت بحسب الوصف البترولوجي يكرس ويُعزز الاستنتاج بأن بيئة الترسيب مشابهة لتلك الخاصة بالكيرماف إلا أنها أكثر لا أوكسجينية، ولو كان هناك من متبخرات لكانت البيئة اللاغونية هي خيار وارد كئيبة ترسيب مناسبة للجدالة، بالتالي فإن بيئة الترسيب في الجدالة ليست شديدة التقييد وليست شديدة الملوحة لكنها تُظهر محتوى من وارد قاري سواء في المكون الصخري أو في المادة العضوية بالتالي فإن البيئة الأكثر احتمالاً ستكون بيئة كربونات بحرية مرجعة مشابهة لتلك الخاصة بالكيرماف لكن مع مدخلات قارية.

وفيما يخص المادة العضوية في الكيرماف فهي متقدمة النضج نسبياً مقارنةً بالجدالة، وإن جزءاً من الهيدروكربون المتولد عن ذلك النضج قد هاجر صعوداً نحو الأعلى (الجدالة) محدثاً تغيراً طفيفاً في محتوى التشكيلة (صخر + مادة عضوية) من العناصر الأثر (الجدول، 2 و 3) مقارنةً بالمحتوى الذي تبديه الكيرماف ذات النضج النسبي الأعلى وتوليد الهيدروكربون واختلاط ذلك الهيدروكربون بعد هجرته للأعلى بمكونات الجدالة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

1. ينتمي الكيروجين في عينات الكيرماف إلى النمط II، تسود فيه المادة العضوية ذات المنشأ البحري ما يُشير إلى أنّ هذا الصخر المولد لديه إمكانات جيدة لتوليد الهيدروكربون ذو كمون لتوليد كل من الزيت والغاز (مع غنى بالزيت). وينتمي الكيروجين في عينات الجدالة إلى النمط المختلط II/III، الأقل إمكانية لتوليد النفط (الزيت) من الكيروجين من النمط II النقي.

2. تُظهر كل من الكيرماف والجدالة إمكانات معتبرة لتوليد الهيدروكربون، مع ملاحظة أنّ الكيرماف أفضل نسبياً من الجدالة (قيم TOC 3.4 وسطياً في الكيرماف مقابل 1.9 في الجدالة). وإن القدرة التوليدية للكيرماف أعلى من

القدرة التوليدية للجدالة، وإن ارتفاع PI في الجدالة مقارنة بالكيرماف مردّه احتواء الجدالة على نפט مهاجر أدى لارتفاع قيم S1 وبالتالي أدى لقيم أعلى لمعامل الإنتاجية PI بشكل لا يعكس الحقيقة.

3. تقع عينات الكيرماف في نافذة الغاز الرطب (المتكثفات). ضمن مجال  $T_{MAX}$  حوالي  $465^{\circ}C$  وقيم HI ما يقرب من  $159^{\circ}C$  (وسطياً) ملغ HI \ غ TOC. وتُبدى المادة العضوية نضجاً حرارياً أعلى نسبياً مقارنةً بعينات الجدالة، مع مؤشر هيدروجين أعلى كونها تنتمي إلى كيروجين من النمط II. يُشير هذا إلى أن الكيروجين من النمط II (المولد لكل من الزيت والغاز مع غنى نسبي أعلى بالزيت) قد تعرض لمستويات أعلى من النضج الحراري، ويبدو أن هذا الكيروجين قد تم تسخينه إلى النقطة التي ولد فيها كمّاً من نطفه أو زيتته الكامن، وهو الآن ينتج نطفاً ذو API مرتفع (زيت منخفض الكثافة) أو متكثفات (غازات رطبة). بالمقابل، تقع عينات الجدالة في نافذة الغاز الرطب (المتكثفات). ضمن مجال من  $T_{MAX}$  حوالي  $460^{\circ}C$ ، وقيم HI ما يقارب من  $290^{\circ}C$  (وسطياً) ملغ HC \ غ TOC. والمادة العضوية في مرحلة توليد غاز رطب (متكثفات)، مع مؤشر هيدروجين معتدل يشير إلى مزيج من الكيروجين ذو الكمون لتوليد كل من النفط والغاز مع كمون أعلى للغاز (النمط II إلى النمط III).

4. أبدت عينات تشكيلة الكيرماف تطابقاً في البصمة الجيوكيميائية (نموذج توزع العناصر الأثر) ما يُشير للأصل المشترك لكل من المادة العضوية والصخر، وأنّ المادة العضوية متزامنة الترسيب مع المادة الصخرية وهي ليست منقولة. وهناك انسجام وتوافق في مصدر المادة العضوية والمادة الصخرية مع محتوى عالي من TOC. في حين، أبدت عينات تشكيلة الجدالة نموذج توزع يأخذ منحى عاماً مشابهاً لذلك الذي تبديه المادة العضوية مع تفاوتات نسبية تُشير إلى تأثير بوارد قاري أثناء الترسيب. ويعني ذلك ازدياداً في مساهمة المكون الصخري على حساب المكون العضوي أثناء الترسيب وذلك يتناغم مع المحتوى المنخفض من TOC في الصخر (الجدالة) وحدوث تبعثر وتخفيف للمادة العضوية في الصخر، وكذلك مع وقوع المادة العضوية ضمن النمط II/III أي مادة عضوية مختلطة ووجود وارد من مادة عضوية ذات أصل قاري في الصخر.

5. أبدت التشكيلتان (الجدالة والكيرماف) عدداً من الخصائص الجيوكيميائية المتقاربة (مع اختلاف نموذج التوزع المرتبط بالشروط السائدة أثناء التوضع)، وإن التفاوت الطفيف بين النسب المذكورة جميعها لصالح الجدالة التي تُظهر دائماً وفي كافة النسب المذكورة تفوقاً طفيفاً يمكن رده بصورة رئيسة لاحتوائها على هيدروكربون مهاجر من تشكيلات أدنى يرجح مبدئياً أنها من الكيرماف الملاصقة لها من الأسفل. وإنّ الفقر النسبي الطفيف بالمحتوى بالعناصر الأثر في الكيرماف مقارنةً بالجدالة يمكن رده للنضج الأعلى نسبياً للمادة العضوية في الكيرماف مقارنةً بالجدالة. حيث أنّ ذلك النضج وتوليد الهيدروكربون قد حرّر بعضاً من العناصر الأثر من التشكيلة (الكيرماف)، وإنّ ذلك الهيدروكربون المتولد قد تحرك صعوداً نحو الجزء الأعلى من التشكيلة (الجدالة) حاملاً محتواه من العناصر الأثر المتحررة، وبالتالي فإنّ الاختلاط المحتمل للجدالة بنواتج هيدروكربونية من التشكيلات الملاصقة كالكيرماف رفع نسبياً المحتوى من العناصر الأثر المذكورة، بالإضافة لمساهمة تأثير قاري في الترسيب في الجدالة مقارنةً بالكيرماف.

6. بينت دراسة النسبتين  $V/Cr$  و  $V/V+Ni$  بالربط مع TOC وكذلك مع OI إلى ترسب المادة العضوية في كل من الكيرماف والجدالة في أوساط لا أوكسجينية مرجعة مع بيئة ذات محتوى إرجاعي مخفف نسبياً في الكيرماف مقارنةً بالجدالة. أي أنه تم الانتقال من شروط ذات محتوى منخفض إلى معدوم الأوكسجين ومادة عضوية ذات محتوى منخفض من المركبات الحاوية على الأوكسجين في الكيرماف، أي من بيئة ترسيب مرجعة عموماً ذات تبادل مائي نسبي يخفف من الإرجاعية العالية، مع مادة عضوية يُسيطر عليها المنشأ البحري، إلى شروط أكثر فقراً نسبياً

بالأوكسجين مع مادة عضوية ذات محتوى أوكسجيني نسبياً أعلى، أي إلى بيئة أكثر لا أوكسجينية ذات مادة عضوية تُبدي قيم أعلى نسبياً من OI (وكبروجين من نمط II/III) ما يعكس مساهمة قارية في المادة العضوية وبالتالي بيئة ترسيب (تتلقى وارد قاري) وأكثر إرجاعية في الجدالة.

7. إن بيئة الترسيب لكنتي التشكيليتين في الأصل هي بيئة بحرية ذات غنى بالمادة العضوية ذات المنشأ البحري وخصوصاً في الكيرماف، وإن تذبذباً في مستوى سطح البحر وزيادة الوارد من المواد قارية المنشأ (مكون صخري ومكون عضوي) أدى لتغير في السحنة والمحتوى من TOC نحو الأعلى أي نحو تشكيلة الجدالة. بالتالي، تُبدي كل من الكيرماف والجدالة مواصفات وخصائص تشير لأنهما متوضعتان في بيئة ترسيب واحدة مع تفاوت سحني بينهما يعكس تغيرات في مستوى سطح البحر نتج عنه اختلافاً طفيفاً في الخصائص السحنية للتشكيليتين. بمعنى آخر، فإنه يمكن النظر إلى التشكيليتين على أنهما تشكيلة واحدة بخصائص جيوكيميائية وترسيبية متقاربة مع تغاير في ظروف الترسيب والسحنة من الكيرماف باتجاه الجدالة.

ومن أهم التوصيات التي من شأنها أن تحقق تكاملاً مع نتائج الدراسة الحالية هو القيام بدراسة بترولوجية معمقة لما لذلك من أهمية في حسم أمر نطاق بيئة الترسيب وإزالة الالتباس الحاصل في الدراسات المرجعية بهذا الشأن، ولعل دراسة نوع الغضار وأصل المادة العضوية القارية على وجه الخصوص سيكون من العوامل الحاسمة في ذلك الاتجاه.

## References:

- Ismail, M.(2014). Evaluating the Important Geological Formations concerning Oil at al-Daw Basin- Syria. Journal of Tishreen University for Research and Scientific Studies. Basic Sciences Series, 36(4).
- The Syrian Oil Company (Various years, 2010, 2013). Internal Unpublished Reports.
- Abarghani, A., Gentzis, T., Liu, B., Khatibi, S., Bubach, B., Ostadhassan, M. (2020). Preliminary Investigation of the Effects of Thermal Maturity on Redox-Sensitive Trace Metal Concentration in the Bakken Source Rock, North Dakota, USA. ACS Omega. 5. 7135-7148. 10.1021/acsomega.9b03467.
- Adeleye, O. M., and Okeke, C. N. (2014). Aspects of Hydrocarbon Potential of the Tertiary Imo Shale Formation in Anambra Basin, Southeastern Nigeria. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/319376887\\_Aspects\\_of\\_Hydrocarbon\\_Potential\\_of\\_the\\_Tertiary\\_Imo\\_Shale\\_Formation\\_in\\_Anambra\\_Basin\\_Southeastern\\_Nigeria](https://www.researchgate.net/publication/319376887_Aspects_of_Hydrocarbon_Potential_of_the_Tertiary_Imo_Shale_Formation_in_Anambra_Basin_Southeastern_Nigeria).
- Algeo, T. J. and Maynard, J. B. (2004). Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems, Chemical Geology, Volume 206, Issues 3-4, Pages 289-318, ISSN 0009-2541, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.009>.
- Algeo, T. J. and Tribovillard, N. (2009). Environmental Analysis of Paleoceanographic Systems Based on Molybdenum-Uranium Covariation. Chemical Geology, 268, 211-225. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.001>
- Brew G., Barazangi, M. Al-Maleh A. K. and Sawaf T. (2001). *Tectonic and Geologic Evolution of Syria*", GeoArabia, Vol.6, No.4, Gulf Petrol, ink. Bahrain.
- Bello, A. M., Abubakar, M. B., Yandoka, B., Usman, M. B., Abubakar, U., Kwami, I. A., Auwalu, D. (2018). Source Rock Characteristics and oil-Source Rock Correlation in the Offshore Gippsland Basin, Southeast Australia.
- Bordenave, M. L., Espitalie, J., Leplat, P. and Vandenbroucke, M. (1993). Screening techniques for source rock evaluation. Organic Geochemistry, 11(1-3), pp.13-25.

- Breit, G. N. and Wanty, R. B. (1991). Vanadium accumulation in carbonaceous rocks: A review of geochemical controls during deposition and diagenesis. *Chemical Geology*, 91(2), 83-97.
- Hatch, J. R., and Leventhal, J. S. (1992). Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 99(1-3), 65-82.
- Hem, J., D. (1977). Reactions of metal ions at surfaces of hydrous iron oxide. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 41, 527-538.
- Egbobawaye, E. (2017). Petroleum Source-Rock Evaluation and Hydrocarbon Potential in Montney Formation Unconventional Reservoir, Northeastern British Columbia, Canada. *Natural Resources*. 08. 716-756. 10.4236/nr.2017.811045.
- El Nady, M. and Harb, F. (2015). Source Rock Quality from Oil Biomarkers of Abu Gharadig Basin in the North Western Desert, Egypt. *Energy Sources*. 30. 2514-2523. 10.1080/15567036.2012.683135.
- Erik, N. Y., Özçelik, O., Altunsoy, M. (2006). Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of S2 vs. TOC: Middle Triassic-Lower Jurassic units, eastern part of SE Turkey, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 53, Issues 1-2, Pages 34-46, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.03.001>.
- Espitalie, J., Laporte, J. L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., Paulet, J. and Boutefeu, A. (1985). Methode rapide de caracterisation des roches meres, de leur potentiel petrolier et de leur degre d'evolution. *Revue de l'Institut français du pétrole*, 40(5), pp.563-579.
- Fendorf, S., E. (1995). Surface reactions of chromium in soils and waters. *Geoderma*, 67, 55-71.
- Jiang, Ch., J., Zhuoheng, Ch., Denis, L., Jeanne, P., Pavel, P. (2017). Mineral carbon MinC(%) from Rock-Eval analysis as a reliable and cost-effective measurement of carbonate contents in shale source and reservoir rocks. *Marine and Petroleum Geology*. 83. 10.1016/j.marpetgeo.2017.03.017.
- Jegede, T. O., Adekola, S. A., Akinlua, A. (2018). Trace element geochemistry of kerogens from the central Niger Delta. *J Petrol Explor Prod Technol* 8, 999-1007. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0448-1>.
- Jones, B., and Manning, D. A. C. (1994). Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.* 111:111-129.
- Li, T. J., Huang, Z. L., Chen, X. et al. (2021). Paleoenvironment and organic matter enrichment of the Carboniferous volcanic-related source rocks in the Malang Sag, Santanghu Basin, NW China. *Pet. Sci.* 18, 29-53. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00514-1>.
- Littke, R. and Zieger, L. (2019). Formation of Organic-Rich Sediments and Sedimentary Rocks. In: Wilkes, H. (eds) *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5\\_14-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54529-5_14-1).
- Liu, P., Liu, C., Guo, R. (2023). Depositional Environment and Organic Matter Enrichment in the Lower Paleozoic Shale from the Northeastern Margin of the Yangtze Platform, South China. *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 501. <https://doi.org/10.3390/jmse11030501>.
- López, L., and Lo Mónaco, S. (2017). Vanadium, nickel and sulfur in crude oils and source rocks and their relationship with biomarkers: Implications for the origin of crude oils in Venezuelan basins. *Organic Geochemistry*, 105, 29-41.

- O'Connor, A. E., Luek, J. L., McIntosh, H., Beck, A. J. (2015). Geochemistry of redox-sensitive trace elements in a shallow subterranean estuary. *Marine Chemistry*, 172, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.03.001>
- Oljira, T., Nton, M. and Sonibare, O. (2020) Organic Geochemical Evaluation of Shale Units of Bokh Formation, Ogaden Basin, Ethiopia. *Open Journal of Geology*, 10, 565-578. doi: 10.4236/ojg.2020.105025.
- Pang, X., Li, M., Wang, Y., Luo, X., Jin, Z., Zhang, W. (2019). Sedimentary environment and enrichment of organic matter in the Paleogene Shahejie Formation, Huanghekou Depression, Bohai Bay Basin, China. *Applied Sciences*, 9(11), 2276.
- Pašava, J., Chrástný, V., Kirsti L-R., Šebek, O. (2019). Nickel isotopic variation in black shales from Bohemia, China, Canada, and Finland: a reconnaissance study. *Mineralium Deposita*. 54. 10.1007/s00126-018-0839-8.
- Peters, K., E. (1986). Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG Bull* 70(3):318–329.
- Peters, K.E. (1998). Rock-eval pyrolysis. In: *Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4496-8\\_276](https://doi.org/10.1007/1-4020-4496-8_276).
- Peters, K. E. and Cassa, M. R. (1994) *Applied source-rock geochemistry*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem., 60, 93–120.
- Rezouga, N., Belhaj Mohamed, A., Moncef, S., IBRAHIM. B. (2012). Geochemical Correlation And Migration Studies Of The South Eastern Part Of Tunisia. 10.2118/150832-MS.
- Rimmer, S., M. (2004). Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chemical Geology*, 206, 373 – 391.
- Riquier, L., Tribouillard, N., Averbuch, O., Devleeschouwer, X., Riboulleau, A. (2006). The Late Frasnian Kellwasser horizons of the Harz Mountains (Germany): Two oxygen-deficient periods resulting from different mechanisms. *Chemical Geology*. 233. 137-155. 10.1016/j.chemgeo.2006.02.021.
- Snowdon, L. R. (1995). Rock-Eval Tmax suppression: documentation and amelioration. *AAPG Bulletin*, 79(8), pp.1337-1348.
- Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*, Fifth Edition. United Kingdom: Taylor & Francis.
- Tissot, B. P. and Welte, D.H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Tribouillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232(1-2), 12-32.
- Wang, B., Huang, Z., Xiao, D., Yu, H., Zeng, W., Wang, X., Qu, T., Li, Z., Yang, Y. (2024). Generation and expulsion of Lower Jurassic hydrocarbon in different source rocks in the Taibei Sag, Turpan-Hami Basin, northwest China, *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 259, 105911, ISSN 1367-9120, <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2023.105911>.
- Wenjun, H., Yin, L., Dongxue, W., Dewen, L., Guangdi, L., Gand, G., Liliang, H., Yanpin, Q. (2022). Geochemical Characteristics and Process of Hydrocarbon Generation Evolution of the Lucaogou Formation Shale, Jimsar Depression, Junggar Basin. *Energies*. 15. 2331. 10.3390/en15072331.
- Xiaochun, Z., Cunlei, L., Jinliang, Z., Guiyang, M., Panpan, Ch. (2020). Geochemical characteristics and depositional environment of the Shahejie Formation in the Binnan Oilfield, China. *Journal of Geophysics and Engineering*. 17. 10.1093/jge/gxaa013.

- Xie M., Ma F., Chen G., Xi Z., Xiao R., Zhang C. (2023). "Genesis and Geological Significance of Siderite in the First Member of the Nantun Formation of Dongming Sag, Hailar Basin" *Minerals* 13, no. 6: 804. <https://doi.org/10.3390/min13060804>
- Yang, M., Zuo, Y., Fu, X., Qiu, L., Li, W., Zhang, J., Zheng, Z., Zhang, J. (2022). Paleoenvironment of the Lower Ordovician Meitan Formation in the Sichuan Basin and Adjacent Areas, China. *Minerals*. 12(1):75. <https://doi.org/10.3390/min12010075>.
- Zhao, D. F., Guo, Y. H., Wang, G., Zhou, X. Q., Zhou, Y. Y., Zhang, J. M., Ren, G. Y. (2023). Organic matter enrichment mechanism of Youganwo Formation oil shale in the Maoming Basin. *Heliyon*, 9(2), e13173. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13173>.
- Zhu, L., Liu, G., Song, Z., Zhao, W., Li, Q., Tian, X., Wang, Y., Yang, D. (2022). Reservoir solid bitumen-source rock correlation using the trace and rare earth elements—implications for identifying the natural gas source of the Ediacaran-Lower Cambrian reservoirs, central Sichuan Basin. *Marine and Petroleum Geology*. 137, 105499.