

تقييم المصادر الصهارية والتحولات الحرارية للقاطع الناري بتكوين أبو شيبة

"شمال غرب ليبيا"

أمير أحمد محمد المحنوش

كلية هندسة الموارد الطبيعية، العجيلات / جامعة الزاوية ليبيا

a.almhnoosh@zu.edu.ly

<https://orcid.org/0009-0009-1980-7967>

الملخص:

تفتقر منطقة مكن أبو شيبة في شمال غرب ليبيا إلى دراسات متكاملة تدرس القواطع النارية وتأثيراتها البترولوجية والاقتصادية والبيئية، رغم إمكاناتها المعدنية الواعدة، تم جمع أربع عينات صخرية تمثل القاطع الناري (DI)، (DTI)، والصخور المجاورة (AS1)، (AS2) من تكوين أبو شيبة. استخدمت مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (XRF) لتحليل التركيب الكيميائي للعناصر الرئيسية لها، مع تطبيق بروتوكولات صارمة لضبط الجودة ومعايرة الأجهزة. حللت النتائج إحصائياً باستخدام SPSS ومخطط تصنيف، TAS أظهرت نتائج التحاليل أن القاطع الناري يندرج ضمن صخور البازل (SiO₂: 42.26-43.1)، مجموع القلويات: (1.64-1.84%)، مع وجود تمايز صهاري واضح أدى إلى تركيز التيتانيوم في طرف القاطع (4.15%) متجاوزاً الحد الاقتصادي (3%). وسجل الحديد تركيزاً شبه اقتصادياً (12.95%). كما تم توثيق تحول حراري شديد في العينة الملامسة (AS1) تمثل بفقدان 93.6% من السيليكا وزيادة 143.3% في أكسيد الكالسيوم بيئياً، وتجاوز تركيز الكروم (0.07%) الحد المسموح به بنسبة 70%، مما تصنف المنطقة ذات خطر بيئي متوسط التركيز استكشافياً على القاطع الناري لتقييم خامات التيتانيوم والحديد، مع تطبيق إجراءات تخفيفية للمخاطر البيئية (مراقبة المياه الجوفية، معالجة المخلفات) وإجراء دراسات مجهرية مستقبلية للتأكيد على التصنيف الصخري.

الكلمات المفتاحية: القاطع الناري، البازلت، تكوين أبو شيبة، مطيافي XRF، التقييم الاقتصادي، المخاطر البيئية، ليبيا.



“Assessment of the magmatic sources and thermal transformations of the Abu Sheiba Formation igneous dividing, northwest Libya”

Amir Ahmed Mohammed Al-Mahnoush

Faculty of Natural Resources Engineering, Ajilat / University of Zawiya,

Libya a.almhnosh@zu.edu.ly

Abstract:

The Abu Shaybah reservoir area in northwestern Libya lacks integrated studies examining igneous dykes and their petrological, economic, and environmental impacts, despite promising mineral potential. Four rock samples representing the igneous dyke (DI, DTI) and surrounding rocks (AS1, AS2) were collected from the Abu Shaybah Formation. X-ray fluorescence spectrometry (XRF) was used for major and trace element analysis, applying rigorous quality control protocols and instrument calibration. Results were statistically analyzed using SPSS and the TAS classification diagram. The dyke is classified as basalt (SiO_2 : 42.26-43.13%, total alkalis: 1.64-1.84%), with clear magmatic differentiation concentrating titanium (4.15%) at the dyke margin, exceeding the economic cut-off grade (3%). Iron showed sub-economic concentration (12.95%). Intense thermal metamorphism was documented in the contact sample (AS1), manifested by 93.6% silica loss and 143.3% calcium oxide increase. Environmentally, chromium concentration (0.07%) exceeded permissible limits by 70%, classifying the area as medium environmental risk. Exploration should focus on the dyke body for titanium and iron ores, implement mitigation measures for environmental risks (groundwater monitoring, tailings treatment), and conduct future petrographic studies to confirm rock classification.

Keywords: Igneous dyke, basalt, Abu Shaybah Formation, XRF spectrometry, economic assessment, environmental risks, Libya.

المقدمة:

تمثل الصخور النارية نسيجاً جيولوجياً حيوياً في بناء القشرة الأرضية، حيث تتشكل عبر عمليات جيوديناميكية معقدة تبدأ من أعماق سحيقة في الوشاح الأرضي. هذه الصخور التي تنشأ من تبلور الصهارة (الماجما) تحمل في تركيبها الكيميائي سجلاً حياً للظروف الجيولوجية والبيئية التي أحاطت بتكونها. تتنوع مظاهرها بين كتل متداخلة ضخمة (البلوتونات) التي تتشكل في الأعماق، وسدود نارية تمتد لعشرات الكيلومترات، وطبقات لافا بركانية تغطي مساحات شاسعة.

في البيئة الجيولوجية الليبية، تحتل الصخور النارية موقعاً استراتيجياً في التركيبة الصخرية للبلاد. وتنتشر هذه التشكيلات الصخرية في عدة أحزمة جيولوجية مهمة، حيث تظهر على شكل نطاقات ممتدة تعكس التاريخ الجيولوجي الغني للمنطقة. ومن بين هذه التشكيلات، يبرز تكوين أبو شيبية في شمال غرب ليبيا كحلقة وصل جيولوجية فريدة، حيث يجسد التفاعل المعقد بين العمليات التكتونية والنشاط الناري خلال عصور جيولوجية مختلفة¹.

- مشكلة الدراسة: تكمن مشكلة الدراسة في الإجابة عن الأسئلة التالية:

1. ما البيانات الجيوكيميائية الحديثة حول تكوين أبو شيبية الناري؟
2. كيفية استغلال العناصر المعدنية ذات القيمة الاقتصادية (مثل الكروم، النيكل، النحاس) رغم احتمالية وجودها بتركيزات مجدية؟
3. ما هو التركيب الكيميائي للصخور النارية في مكن أبو شيبية التي تستخدم تقنية XRF؟
4. كيف يتم تأكيد التصنيف الأولي للصخور (غابرو أو ديورايت) دون تدعيم جيوكيميائي؟
5. كيف يتم الربط بين التركيب الكيميائي والعمليات الجيولوجية التكوينية؟
- 6- ما هي المخاطر البيئية المحتملة لاستغلال المكن؟ وما الإجراءات المقترحة للتخفيف من آثار التعدين؟

- أهمية الدراسة:

1. اكتشاف الموارد المعدنية: تحديد المعادن ذات القيمة الاقتصادية.
2. تعزيز الاقتصاد المحلي: خلق فرص عمل عبر أنشطة التعدين.

3. البحث العلمي: إثراء المعرفة الجيولوجية والنشر العلمي.
 4. الحفاظ على البيئة: تقليل الآثار البيئية لعمليات التعدين.
 5. تقييم الجدوى الاقتصادية: دعم القرارات الاستثمارية المستنيرة.
- **اهداف الدراسة:** يهدف البحث إلى تحليل التأثيرات الحرارية والكيميائية للقاطع الناري على الصخور المحيطة من خلال دراسة التغيرات في التركيب الكيميائي والتحولات المعدنية، مما يساهم في فهم أفضل للعمليات الجيولوجية المصاحبة للتدخلات النارية في المنطقة
1. تحديد التركيب الكيميائي للصخور النارية في مكن أبو شيبه باستخدام تقنية XRF ، مع التركيز على العناصر الرئيسية مثل (Si, Fe, Ca) والنزرة مثل (Ni, Cr, Cu)
 2. تصنيف نوع الصخور (النارية) مثل غابرو، ديورايت) بناءً على التحليل الجيوكيميائي ومخطط TAS، ومقارنتها بالدراسات السابقة في المنطقة.
 3. تقييم الإمكانيات الاقتصادية للمكن عبر تحليل تركيزات العناصر المعدنية (مثل Fe_2O_3)، SiO_2 المعادن الثقيلة (وربطها بالاستخدامات الصناعية (مواد بناء، تعدين، إلخ)
 4. دراسة تأثير العمليات الجيولوجية (مثل التبلور التفاضلي، التمدن الحراري) على توزيع العناصر الاقتصادية داخل المكن.
 5. وضع نموذج استكشافي أولي للمكان المشابهة في ليبيا، باستخدام النتائج كحالة دراسية لدعم قرارات الاستثمار والتعقيب المستقبلية.
 6. قلة الدراسات التي تستخدم تقنية XRF لتحليل الصخور النارية في المنطقة، رغم دقتها وسرعتها.
- **حدود الدراسة:** تقع منطقة الدراسة ضمن النطاق الجغرافي لمدينة غريان التي يحدها من الشمال مدينة العزيزية ومن الشرق مدينتي ترهونة ومسلاته ومن الجنوب مدينتي بني وليد ومزدة أما من الغرب فمدينة يفرن وتقتصر الدراسة على مكن أبو شيبه شمال المدينة الواقع ضمن الإحداثيات $40.5^{\circ} 00' 13''$ N ، $18.7^{\circ} 16' 32''$ E ، $44.6^{\circ} 01' 13''$ E ، $11.2^{\circ} 16' 32''$ N ويتميز القاطع الناري في المنطقة باتجاه شمالي-جنوبي وبزاوية ميل تبلغ 40 درجة، ويبلغ سمكه 2.30 متر، بينما يصل طول مكشفه الظاهر على السطح إلى 20 متراً. كما هو موضح في الشكل (1)



شملت الدراسة تطبيق منظومة متكاملة من التقنيات الميدانية والمخبرية المتقدمة، حيث اتبعت إجراءات جمع العينات وتحليلها طبقاً للمعايير الدولية المعتمدة في الدراسات الجيولوجية. **منهجية الدراسة:** تمثلت المنهجية الاستقرائية والتفسيرية في ربط النتائج الكيميائية المستخلصة من تحاليل XRF بالعمليات الجيولوجية الرئيسية، وعلى رأسها التمايز الصهاري والتحول الحراري وأنماط التمعدن، ثم انتقل البحث إلى تقييم الجدوى الاقتصادية للعناصر من خلال مقارنة التراكيز المقاسة في العينات بالحدود الاقتصادية العالمية المعتمدة، كما شمل هذا التقييم تصنيف المخاطر البيئية المحتملة بناءً على تركيز الكروم مقارنة بالحدود المسموحة دولياً. وخلاصة القول إن البحث يندرج ضمن الدراسات الوصفية التحليلية، إذ اعتمد على المنهج التجريبي المتمثل في تجارب مطيافية الأشعة السينية (XRF)، والمنهج المقارن لمقارنة العينات فيما بينها ومقارنة النتائج مع الدراسات السابقة، مع تطبيق الإحصاء الاستدلالي لاستخلاص العلاقات بين المتغيرات الجيوكيميائية والجيولوجية.

- **الدراسات السابقة:** الدراسات السابقة حول المكامن النارية في ليبيا والمنطقة العربية، وأوجه التشابه والاختلاف

- دراسة (عبد الله، 2018) "الدايكات النارية في حوض سرت: دراسة جيوكيميائية"
- التشابه: ركزت على تحليل الصخور النارية باستخدام XRF، مع تقييم العناصر الاقتصادية مثل الحديد.
- الاختلاف: أجريت في حوض سرت (شرق ليبيا)، بينما دراسة أبو شيبه في شمال غرب ليبيا.

- تاريخ النشر. 2018 :
- دراسة (جامعة بنغازي، 2019) "الخصائص الجيوكيميائية للدايكات البازلتية في جنوب ليبيا"
 - التشابه: استخدمت XRF لتحليل 20 عينة من الصخور النارية.
 - الاختلاف: لم تنطرق إلى الربط بين التركيب الكيميائي والعمليات الجيولوجية التكوينية.
 - تاريخ النشر. 2019 :
- دراسة" - (Boukhrouf et al., 2020) تقييم دايكات الدوليريت في الهقار (الجزائر) باستخدام XRF"
 - التشابه: حللت 6 عينات باستخدام XRF وركزت على المعادن الثقيلة. (Cr, Ni)
 - الاختلاف: أجريت في بيئة جيولوجية مختلفة (درع الهقار القديم).
 - تاريخ النشر 2020 في: *Arabian Journal of Geosciences*.
- دراسة" (El Hadi et al., 2017) تحليل دايكات الدوليريت في الأطلس الصغير (المغرب)
 - التشابه: درست تأثير الدايكات على الصخور المضيفة باستخدام XRF.
 - الاختلاف: ركزت على التطبيقات الإنشائية (مواد بناء) بدلاً من الجدوى التعدينية.
 - تاريخ النشر. 2017 :
- دراسة (محمد عبد الحميد، 2019) - "تقييم دايكات الجرانيت في جنوب سيناء"
 - التشابه: استخدمت XRF للكشف عن معادن ثمينة (مثل الذهب).
 - الاختلاف: أجريت في صخور جرانيتية، بينما أبو شيبية صخور غابروية/بازلتية.
 - تاريخ النشر. 2019 :

أولاً: تكوين أبو شيبية، شمال غرب ليبيا

يعد هذا التكوين بنية جيولوجية متعددة الطبقات، تظهر فيها العروق النارية بشكل لافت، حيث تخترق الصخور الأقدم محدثة تحولات واضحة في الصخور المجاورة. هذه العروق الحارة لا تقتصر أهميتها على كونها نوافذ طبيعية تتيح دراسة الأعماق، بل تمثل أيضاً خزانات طبيعية للعديد من المعادن الاقتصادية. التحاليل الأولية تشير إلى وجود شبكة معقدة من العروق المعدنية الحاملة للحديد والنفاس، مع مؤشرات واضحة على وجود معادن مجموعة البلاتين والكروم في بعض النطاقات.

الأهمية الاقتصادية لتكوين أبو شيبه: لا تقتصر الأهمية على محتواه المعدني فحسب، بل تمتد إلى خصائصه الفيزيائية التي تؤهله للاستخدام في صناعات متعددة. فصخوره البازلتية تصلح كمادة خام لصناعة الصوف الصخري، كما أن بعض طبقاته تظهر مواصفات مثالية لاستخدامها في صناعة الاسمنت البورتلاندي. أما العروق الكوارتزية فتحمل مؤشرات مشجعة على وجود معادن ثمينة قد تكون ذات جدوى اقتصادية عالية².

من الناحية الجيوتكتونية، يمثل هذا التكوين منطقة اتصال بين نطاقين جيولوجيين مهمين، مما يجعله سجلاً غنياً للعمليات الجيولوجية التي شهدتها المنطقة عبر ملايين السنين. الطبقات الصخرية هنا تحتفظ بأدلة واضحة على مراحل متعددة من النشاط الناري، تتراوح بين التدفقات البركانية القديمة والتدخلات النارية الأحدث نسبياً.

- **البيانات الجيوفيزيائية:** البيانات الجيوفيزيائية الأولية تكشف عن وجود أنظمة معدنية متعددة المراحل، حيث تظهر بعض المناطق تركيزات عالية من العناصر الأرضية النادرة، خاصة في النطاقات التي تعرضت لعملية التبادل الأيوني الحراري المائي. هذه الخصائص تجعل من المنطقة مختبراً طبيعياً لدراسة عمليات التمدن المرتبطة بالنشاط الناري³. على الصعيد البيئي، تقدم دراسة هذا التكوين فرصة فريدة لفهم التفاعلات بين الصخور النارية والبيئة المحيطة، خاصة فيما يتعلق بعمليات التجوية والتعرية التي شكلت المظهر التضاريسي المميز للمنطقة. كما أن تحليل هذه الصخور يسهم في فهم الدور الذي تلعبه العروق النارية في نظام المياه الجوفية الإقليمي.

- **المعدات والتقنيات الميدانية للتكوين:** تم الاعتماد على مجموعة متطورة من الأجهزة الدقيقة لضمان دقة جمع البيانات والعينات:

- **نظام التموضع العالمي (GPS) عالي الدقة:** تم استخدام جهاز Garmin GPSMAP 64s الحساسية العالية، الذي يوفر دقة تصل إلى ± 3 متر في الظروف الميدانية المثلى. استخدم هذا النظام في تحديد الإحداثيات الجغرافية الدقيقة لنقاط أخذ العينات، ورسم الحدود الجيولوجية، وتوثيق مواقع التدخلات النارية، حيث تم تسجيل الإحداثيات بنظام الإحداثيات العالمي WGS84.

- **المعدات الجيولوجية الميدانية المتخصصة:** شملت مجموعة من الأدوات ذات المواصفات القياسية، بما في ذلك مطرقة جيولوجية مزدوجة الرأس (وزن 0.9 كجم) من الفولاذ المقاوم للصدأ، تم استخدامها بعناية فائقة لأخذ عينات ممثلة دون إحداث تشققات دقيقة قد تؤثر على الخصائص الطبيعية للصخور. كما تم استخدام بوصلة جيولوجية نوع **Brunton Transit** لقياس اتجاه وميل الطبقات والصخور النارية بدقة تصل إلى ± 0.5 درجة.
- **مجموعة أخذ العينات المعقمة:** تم استخدام أدوات فولاذية مقاومة للصدأ وأكياس عينات معقمة ذات مواصفات خاصة لحفظ العينات ومنع تلوثها، مع تدوين البيانات الوصفية الكاملة على بطاقات تعريف مقاومة للعوامل الجوية.
- **التقنيات المخبرية والمعدات التحليلية:** تم تطبيق أحدث التقنيات التحليلية لتحديد الخصائص الكيميائية والمعدنية للعينات:
مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (XRF) استخدم جهاز Analytical Epsilon 3XLE المتطور في تحليل التركيب الكيميائي الكمي للعينات. يعمل الجهاز بجهد 50 كيلو فولت وتيار 1 مللي أمبير، ويتميز بقدرة تحليلية عالية للعناصر من الصوديوم إلى اليورانيوم. تم إعداد العينات وفق البروتوكول القياسي حيث تم طحنها إلى مسحوق ناعم (حجم جزيئات < 75 مايكرومتر) ثم ضغطها تحت ظروف محكمة لتشكيل أقراص متجانسة كما في الشكل (2) الذي يوضح التقنيات المخبرية والمعدات التحليلية⁴.



الشكل (2): يوضح التقنيات المخبرية والمعدات التحليلية
المصدر: عمل الباحث، السنة 2025

- تحليل فقدان بالاشتعال (LOI) تم استخدام فرن تجفيف نوع Nabertherm L5/11 ذو التحكم الرقمي الدقيق، الذي يعمل حتى درجة حرارة 1100°م. اتبع البروتوكول المعياري ASTM D7348 حيث تم تسخين العينات عند 1000°م لمدة 3 ساعات، مع حساب نسبة فقدان الوزني وفق المعادلة $LOI\% = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100^5$ حيث W_1 الوزن قبل التسخين و W_2 الوزن بعده.
- التحضير المخبري للعينات: تم استخدام طاحونة كرات من الزركونيوم لطحن العينات، مع منخل كهربائي لضمان تجانس حجم الجسيمات، وميزان تحليلي دقيق نوع Sartorius CPA225D بدقة 0.0001 جرام⁶.

- ضمان الجودة ومراقبة الدقة: تم تطبيق إجراءات صارمة لضمان جودة النتائج وموثوقيتها:

- معايرة الأجهزة: تمت معايرة جميع الأجهزة باستخدام مواد قياسية معتمدة قبل بدء التحليلات.
- العينات المرجعية: تم تحليل عينات مرجعية معيارية (G-2) للجرانيت، BCR-2 للبالزانت) بشكل متواز مع عينات الدراسة للتحقق من دقة النتائج.
- التكرار التحليلي: تم تحليل 20% من العينات بشكل مكرر لضمان ثبات النتائج ودقتها الإحصائية.
- الظروف المحكمة: أجريت جميع التحليلات في ظروف محكمة للرطوبة ودرجة الحرارة ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ ، رطوبة $50 \pm 5\%$).

تمثل هذه المنهجية المتكاملة إطاراً علمياً متقدماً يضمن الحصول على نتائج دقيقة وموثوقة قابلة للمقارنة مع الدراسات العالمية المماثلة، مما يثري القيمة العلمية للبحث ويسهم في تحقيق أهدافه المنشودة.

ثانياً: جمع العينات وإعدادها

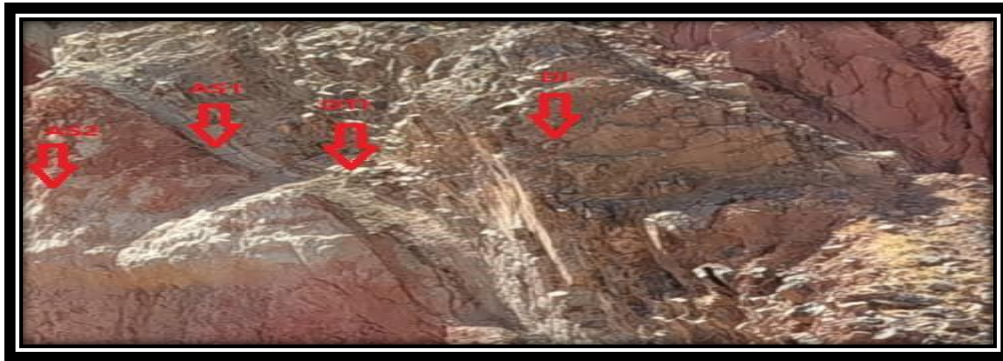
أ- اختيار مواقع أخذ العينات: تم اختيار مواقع جمع العينات بناءً على دراسة ميدانية بحثية للتوزيع الجيولوجي للقاطع الناري والصخور المحيطة به، مع مراعاة التباين في درجات التأثير الحراري والمسافات من مركز القاطع. اعتمد منهج أخذ العينات على مبدأ "المسافات الشعاعية" من مركز القاطع الناري نحو الصخور السليمة، لضمان تمثيل كافة الأنماط الصخرية والظروف الجيولوجية. شملت معايير الاختبار: التمثيلية، الوضوح الجيولوجي، السلامة البنيوية وإمكانية الوصول، كما في الشكل (3) يوضح التوزيع الجيولوجي للقاطع الناري والصخور المحيطة به



الشكل (3) يوضح التوزيع الجيولوجي للقاطع الناري والصخور المحيطة به
المصدر: عمل الباحث، السنة 2025

ب- وصف العينات: تم جمع أربع عينات رئيسية كما في الشكل (4)، (5) يوضح أربع عينات رئيسية من مواقع مختلفة كالآتي:

- **العينة AS1:** جمعت من التماس المباشر بين القاطع الناري وتكوين أبو شيبه الرسوبي. تتميز بلونها الداكن وهشاشة تركيبها نتيجة التعرض لدرجات حرارة عالية.
- **العينة AS2:** جمعت من مسافة متر واحد من حافة القاطع الناري ضمن نفس التكوين الرسوبي. تمثل الصخور غير المتأثرة حرارياً وتحفظ بخصائصها الرسوبية الأصلية.
- **العينة DI:** جمعت من منتصف القاطع الناري وتمثل التركيبة الصخرية الأصلية للتداخل الناري. تتميز بصلابتها العالية والنسيج البورفيرى.
- **العينة DTI:** جمعت من حافة القاطع الناري في منطقة التماس مع الصخور الرسوبية.
- تظهر خصائص وسيطة بين العينات النارية والرسوبية.



الشكل (4): يوضح اختيار مواقع أخذ العينات



الشكل (5): يوضح أربع عينات رئيسية من مواقع مختلف

المصدر: عمل الباحث، السنة 2025

ت- مبدأ عمل جهاز XRF يعتمد مبدأ عمل مطيافية الأشعة السينية على التأثير الكهروضوئي كما في الشكل (6) يوضح جهاز XRF حيث:

- الإثارة الأولية: تتعرض العينة لحزمة أشعة سينية عالية الطاقة، مما يؤدي إلى طرد الإلكترونات من المدارات الداخلية للذرات.
- الانتقالات الإلكترونية: تنتقل الإلكترونات من المدارات الأعلى طاقة لملء الفراغات الناتجة، مُطلقةً طاقةً على شكل أشعة سينية ثانوية.
- الطيف المميز: لكل عنصر طيفٌ مميزٌ من الأشعة السينية، يمكن قياسه لتحديد هوية العنصر وتركيزه. وتُعبّر عن العلاقة بين طاقة الأشعة السينية المنبعثة والعنصر بالمعادلة⁷:

$$E = k(Z - \sigma)^2$$

E: طاقة الأشعة السينية

Z: العدد الذري للعنصر

σ , k: ثوابت فيزيائية



الشكل (6): يوضح جهاز XRF

المصدر: عمل الباحث، السنة 2025

ث- إجراءات إعداد العينات: تم إعداد العينات للتحليل المخبري وفق البروتوكولات القياسية كما في الشكل (7) إجراءات إعداد العينات⁸. حيث:

- طحنت العينات باستخدام طاحونة كرات من الزركونيوم.
- نخلت لضمان تجانس حجم الجسيمات.
- ضغطت تحت ظروف محكمة لتشكيل أقراص متجانسة.
- خزنت في ظروف خاضعة للرقابة لمنع التلوث.



الشكل (7): إجراءات إعداد العينات

المصدر: عمل الباحث، السنة 2025

ج-الإعداد المخبري: تم إخضاع العينات الصخرية المجمعة لسلسلة من العمليات التحضيرية الدقيقة وفقاً للمواصفات القياسية الدولية. بدأت العملية بمرحلة التجفيف الأولي عند درجة حرارة 105 درجة مئوية لمدة 24 ساعة باستخدام فرن تجفيف ذي تحكم دقيق. بعد ذلك، تم طحن العينات باستخدام طاحونة كرات من الزركونيوم عالي النقاء لتجنب تلوث العينات، مع التحكم في

زمن الطحن لضمان الحصول على حجم جسيمات أقل من 75 ميكرومتر اعتمد اختيار العينات على معايير محددة، تم تعقيم المسحوق الناتج باستخدام هاون من الأغاط الصناعي، ثم نخل عبر منخل كهربائي ذي فتحات 200 شبكة. لإعداد الأقراص المضغوطة، تم خلط 5 غرامات من المسحوق مع رابطة من حمض البوريك بنسبة 1:10، ثم ضغط الخليط تحت ضغط 25 طنًا لمدة 30 ثانية باستخدام مكبس هيدروليكي. ولتأكيد دقة النتائج، تم تطبيق بروتوكول صارم لضبط الجودة شمل استخدام العينات القياسية المرجعية في كل دفعة تحليلية. كما تم تحليل 20% من العينات بشكل مكرر للتأكد من ثبات النتائج، حيث لم تتجاوز نسبة الانحراف المعياري 2% للعناصر الرئيسية و 5% للعناصر النزرة كما في الشكل (8)



الشكل (8): يوضح الإعداد المخبري

المصدر: عمل الباحث، السنة

ح- تحليل البيانات: اعتمد تحليل البيانات على منهجية متعددة المستويات تبدأ بالتحليل الإحصائي الوصفي باستخدام برنامج SPSS. تم حساب المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية ومعاملات الاختلاف لجميع المتغيرات. بعد ذلك، طُبِّقت تقنيات التحليل متعدد المتغيرات بما في ذلك تحليل

المكونات الرئيسية وتحليل العنقوديات للكشف عن العلاقات بين العناصر وتجميع العينات. ولتصنيف الصخور النارية، استخدم مخطط التصنيف الكيميائي TAS وفقاً لتصنيف الاتحاد الدولي للعلوم الجيولوجية. تم إنشاء المخطط باستخدام برنامج Igp2011 ، مع تحديد حقول التصنيف بدقة وفق إحداثيات السيليكا ومجموع القلويات. كذلك، طبق تحليل النسب العنصرية مثل نسبة السيليكا إلى الألومينا ونسبة الحديد إلى التيتانيوم لتفسير العمليات الجيولوجية. تم إنشاء الرسوم البيانية والخرائط الجيوكيميائية باستخدام برنامج Golden Surfer 16 ، مع تطبيق تقنيات الاستيفاء الإحصائي لرسم توزيع العناصر في المنطقة.

يقدم هذا البحث التحليل العلمي للعينات باستخدام التقنيات المخبرية المتقدمة، حيث يمثل الجسر الرابط بين الجانب النظري والتطبيقي في البحث. اعتمد التحليل على بروتوكول متكامل يشمل جمع العينات الممثلة للمنطقة وإعدادها مخبرياً وفق أعلى معايير الجودة، مع استخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRF) للتحليل الكيميائي الدقيق.

تتمثل المنهجية المتبعة في عرض النتائج في التدرج المنطقي الذي يبدأ بالتحليل الكيميائي العام وينتقل إلى التصنيف الصخري ثم التحليل المتقدم للعناصر النزرة، مما يوفر الإطار الأمثل لتفسير الأنماط الجيوكيميائية والعمليات الجيولوجية الفاعلة في منطقة الدراسة تتوافق دقة التحاليل مع معايير ضبط الجودة المسجلة

خ- التحليل الكيميائي والتركيب المعدني

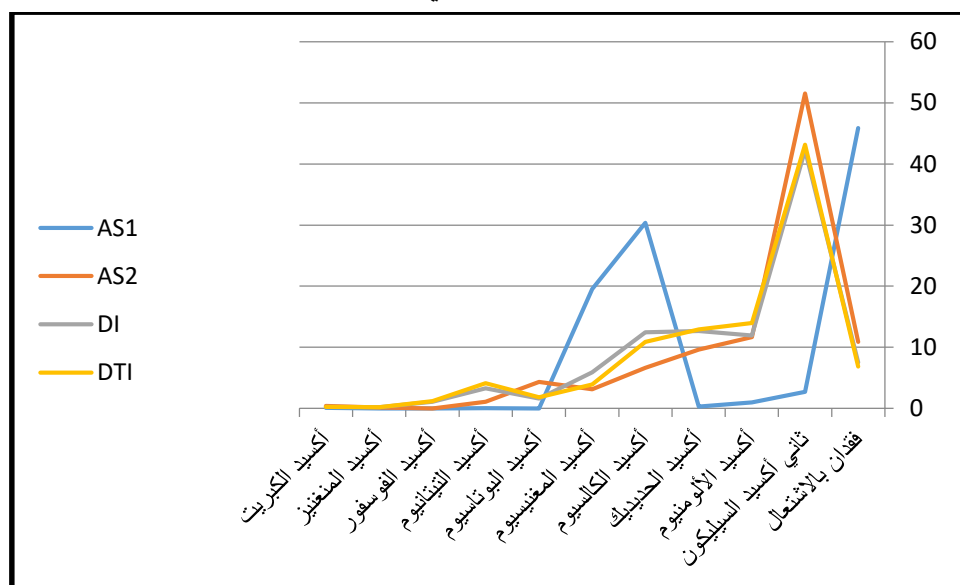
تكشف التحليلات الكيميائية عن أنماط واضحة للتغير الجيوكيميائي بين العينات المدروسة. يبين الجدول (1) تحليلاً كمياً لهذه التغيرات:

- AS1: عينة من تكوين أبوشيبية المباشر والملامس للدايك الناري.
- AS2: عينة من تكوين أبوشيبية تبعد 1 متر عن الدايك الناري.
- DI: عينة من منتصف الدايك الناري.
- DTI: عينة من طرف الدايك الملامس لتكوين أبوشيبية.

الجدول (1) يبين تحليل نسب التغير الكيميائي بين العينات

العنصر / العينة	الوصف العلمي	AS1	AS2	DI	DTI	الأهمية الجيولوجية
L.O.I	فقدان بالاشتعال	45.87	10.87	7.53	6.85	يقيس المواد المتطايرة والماء
SiO ₂	ثاني أكسيد السيليكون	2.70	51.52	42.26	43.13	المكون الرئيسي للصخور
Al ₂ O ₃	أكسيد الألومنيوم	1.00	11.68	11.93	13.97	يدل على المعادن الطينية
Fe ₂ O ₃	أكسيد الحديد	0.31	9.63	12.67	12.95	يدل على معادن الحديد
CaO	أكسيد الكالسيوم	30.37	6.62	12.48	10.90	يدل على الكربونات
MgO	أكسيد المغنيسيوم	19.54	3.14	5.92	3.91	يدل على الدولوميت
K ₂ O	أكسيد البوتاسيوم	0.00	4.34	1.64	1.84	يدل على القلويات
TiO ₂	أكسيد التيتانيوم	0.03	1.10	3.31	4.15	عنصر ثابت مهم
P ₂ O ₅	أكسيد الفوسفور	0.00	0.00	1.08	1.22	يدل على الأباتيت
MnO	أكسيد المنغنيز	0.01	0.16	0.21	0.18	عنصر نزر
SO ₃	أكسيد الكبريت	0.09	0.42	0.27	0.27	يدل على الكبريتيدات

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.



الشكل (9): تحليل نسب التغير الكيميائي بين العينات

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

تكشف التحليلات الكيميائية الدقيقة عن أنماط واضحة للتغير الجيوكيميائي بين العينات المدروسة كما في الشكل (9)، حيث تعكس نسب التغير المحسوبة الآليات الجيولوجية الفاعلة في منطقة الدراسة. يقدم الجدول التالي تحليلاً كمياً لهذه التغيرات مع تفسيرها العلمي.

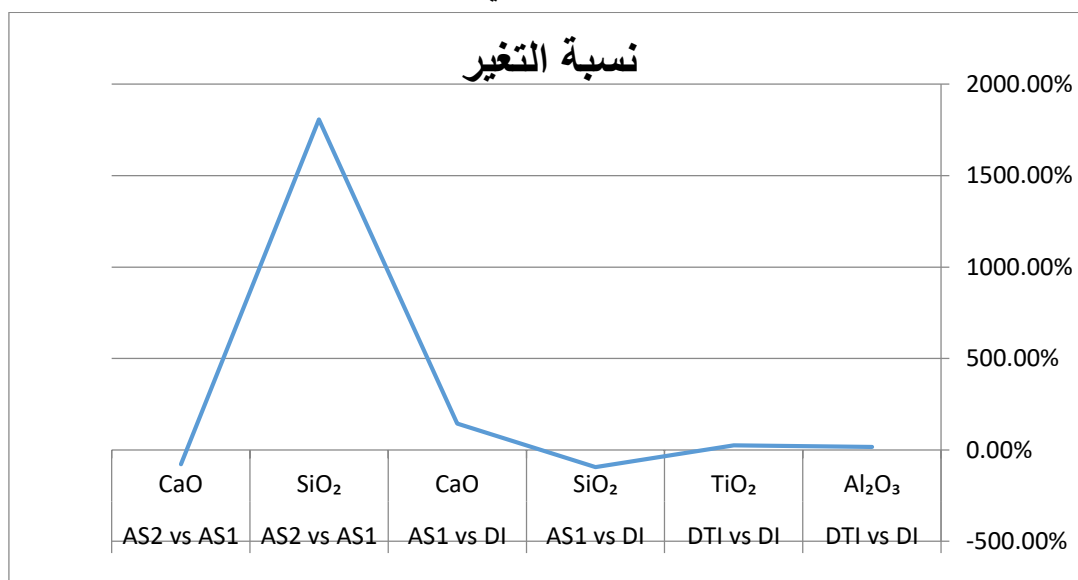
د- الصيغة الرياضية المستخدمة

$$\text{نسبة التغير \%} = \frac{(\text{القيمة النهائية} - \text{القيمة الأولية})}{\text{القيمة الأولية}} \times 100$$

الجدول (2): يبين تحليل نسب التغير الكيميائي بين العينات

المقارنة	العنصر	القيمة 1	القيمة 2	نسبة التغير	الدلالة	التفسير
DTI vs DI	Al ₂ O ₃	11.93%	13.97%	+17.1%	▲ ▲	تمايز صهاري
DTI vs DI	TiO ₂	3.31%	4.15%	+25.4%	▲ ▲	تركيز في الطرف
AS1 vs DI	SiO ₂	42.26%	2.70%	-93.6%	▲ ▲ ▲	تحول حراري
AS1 vs DI	CaO	12.48%	30.37%	+143.3%	▲ ▲ ▲	تكلس
AS2 vs AS1	SiO ₂	2.70%	51.52%	+1808%	▲	عودة للطبيعة الأصلية
AS2 vs AS1	CaO	30.37%	6.62%	-78.2%	▲ ▲ ▲	فقدان كربونات

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.



الشكل (10): التمايز الصهاري والتحولات الحرارية

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

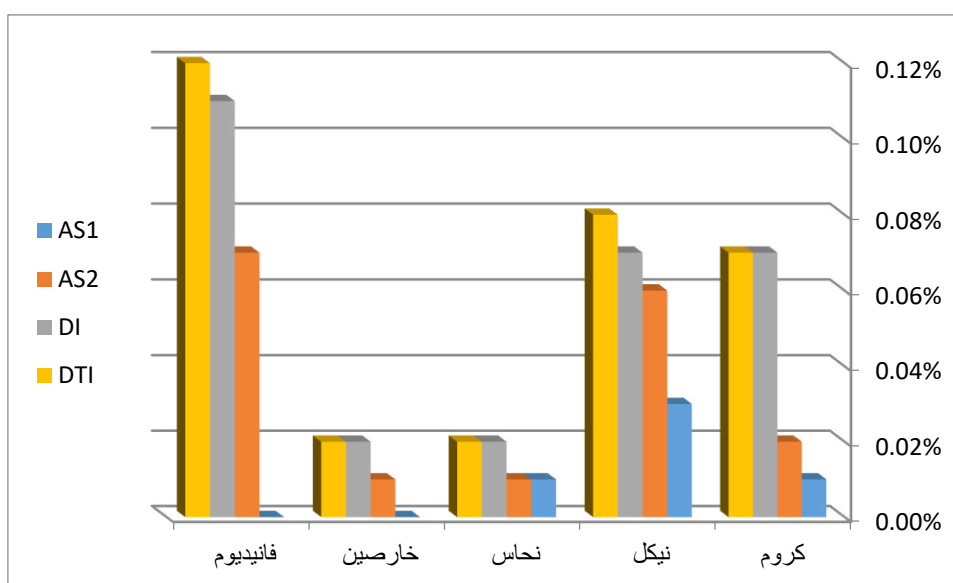
يُعرّف الشكل (10) تصوراً بيانياً أو مخططاً لتسلسل وتأثير العمليتين الرئيسيتين المستنتجتين من تحليل الجدول (2-4) التمايز الصهاري والتحولات الحرارية. التمايز الصهاري: من المرجح أن يوضح الجزء الأول من الشكل كيف تطورت التركيبة الكيميائية للصخور (مثل العينات DTI و DI من صهارة أصلية. قد يكون ذلك عبر مخططات كيميائية مثل (Harker) تظهر كيف تتغير تركيزات العناصر (مثل TiO₂ ، Al₂O₃) مع تقدم عملية التبلور والتفاضل. التحول الحراري: من المرجح أن يوضح الجزء الثاني من السلم كيف أدت السوائل الحرارية إلى تغيير جذري في تركيب الصخور الأصلية أو المتحولة سابقاً، مشكلة نطاقات تحول مثل تلك الممثلة بالعينتين AS1 و AS2. قد يظهر السلم علاقات استبدال معدني أو تغيير في النسيج الصخري.

ذ- توزيع العناصر النزرة

الجدول (3): تركيز العناصر النزرة في العينات المدروسة

العنصر	الرموز	AS1	AS2	DI	DTI	الدلالة الجيوكيميائية
كروم	Cr	0.01%	0.02%	0.07%	0.07%	عنصر محب للوشاح، يزداد في الصخور النارية
نيكل	Ni	0.03%	0.06%	0.07%	0.08%	يدل على المعادن المافية مثل الأوليفين
نحاس	Cu	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	عنصر كبريتيدي، يرتبط بالمعادن الخام
خارصين	Zn	0.00%	0.01%	0.02%	0.02%	يتشتت في العمليات الحرارية المائية
فاناديوم	V	0.00%	0.07%	0.11%	0.12%	يرتبط بالمعادن المافية وأكاسيد الحديد والتيتانيوم

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.



الشكل (11): يبين تركيز العناصر النزرة في العينات المدروسة

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

يُعرف الشكل (11) تصوراً بيانياً أو مخططاً لتسلسل وتأثير العمليتين الرئيسيتين المستنتجتين من تحليل الجدول (3-4) يكشف تركيز العناصر النزرة (الهدف 1) عن تباين واضح في أنماط توزيعها بين العينات المدروسة:

1. عناصر المجموعة البلاتينية: (Cr, Ni, V) /

تظهر تركيزاً أعلى في العينات النارية (DI, DTI) مقارنة بالعينات الرسوبية (AS1, AS2)، مما يدل على الأصل الوشاحي للصهارة وارتباطها بالمعادن المافية مثل الكروميت والإلمينيت.

2. عناصر الكبريتيدات: (Cu, Zn)

تبقى تركيزاتها منخفضة في جميع العينات (أقل من 0.02%)، مما يشير إلى محدودية عمليات التمدن الكبريتيدي، وإن كانت قد تكون مرتبطة بمراحل هيدروثيرمالية متأخرة.
3. أنماط التوزيع العامة:

- العينات النارية: غنية بالعناصر المحبة للحديد (Cr, Ni, V)
- العينات الرسوبية: فقيرة في العناصر النزرة بشكل عام
- منطقة التماس: (AS1) أدى التحول الحراري إلى فقدان شبه كامل للعناصر النزرة

3-4 التصنيف الصخري للقاطع الناري

يقدم التحليل الكيميائي للعينات النارية (DI) و (DTI) أساساً دقيقاً لتصنيفها. بناءً على مخطط السيليكا-القلويات الكلي (TAS)، يمكن تصنيف هذه الصخور ضمن عائلة البازلت، وذلك استناداً إلى معايير التصنيف العالمية من الاتحاد الدولي للعلوم الجيولوجية (IUGS). كما يبين الجدول (4)، الجدول (4): بيانات التصنيف الكيميائي للعينات النارية

العينة	SiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O + K ₂ O (%)	التصنيف حسب TAS
DI	42.26	0.00	1.64	1.64	بازلت
DTI	43.13	0.00	1.84	1.84	بازلت

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

ر - التحليل الجيوكيميائي والمعدني:

1. نطاق السليكا والقلويات: تتراوح نسبة السيليكا (SiO₂) في العينات بين 42.26% و 43.13%، بينما يبلغ مجموع القلويات (Na₂O+K₂O) بين 1.64% و 1.84%. وفقاً لأسس التصنيف الكيميائي، يقع هذا التركيب ضمن نطاق الصخور القاعدية (Basic rocks)، التي تمتد نسبة السيليكا فيها من 40% إلى 52%. يتوافق انخفاض محتوى القلويات مع الطبيعة النموذجية للبازلت.
2. الطبيعة المعدنية: يدعم التركيب العنصري للعينات هذا التصنيف. حيث يشير الارتفاع النسبي لأكاسيد الحديد (Fe₂O₃ ≈ 12.81%) والمغنيسيوم (MgO ≈ 4.92%) والكالسيوم (CaO ≈ 43.13%)

(11.69% إلى أن الصخور "مافية". (Mafic) تتميز هذه الصخور بغناها بالمعادن المافية الداكنة

مثل البيروكسين والأوليفين، وهي معادن شائعة في البازلت والجابرو.

3. التصنيف النهائي والمكافئ الجوفي: بناءً على التركيب الكيميائي والمعدني، يتم تصنيف القاطع

الناري المدروس على أنه بازلت. يعتبر الجابرو (Gabbro) المكافئ الجوفي للبازلت، حيث

يتشاركان نفس التركيب الكيميائي أساساً، ولكن البازلت يبرد على السطح أو على أعماق ضحلة مما

يمنحه نسيجاً دقيق التحبب، بينما يبرد الجابرو ببطء في الأعماق فينتكون له نسيج خشن التحبب.

ز - تفسير المناطق في مخطط TAS

تفسير مخطط TAS الموقع الدقيق للعينتين (DI, DTI) في حقل "البازلت" بمخطط TAS يتوافق

مع تركيبها الكيميائي القاعدي (مافيك) المنخفض في السيليكا والقلويات. إن انخفاض محتوى

الصوديوم ($\text{Na}_2\text{O} = 0.00\%$) هو سمة يمكن ملاحظتها في بعض البازلت، وقد يعود إلى ظروف

التبلور أو المصدر الصحاري. الرأي: استخدام مخطط TAS كان منهجياً وصحيحاً، وهو الأداة

القياسية الأولى لتصنيف الصخور النارية. ومع ذلك، من المهم التأكيد أن هذا التصنيف الكيميائي

بحث كما في الشكل

(12)، وأن التأكيد النهائي على التسمية (مثل البازلت أوليفين-ثولبيتي، إلخ) يتطلب الدليل المعدني

النسيجي المجهرى.

تحليل موقع عيناتنا:

• العينة: DI

• $\text{SiO}_2 = 42.26\%$ قريب من الحد الأدنى للبازلت

• $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.64\%$ منخفض ولكن ضمن المدى

• الموقع: حقل البازلت/الجابرو

• العينة: DTI

• $\text{SiO}_2 = 43.13\%$ ضمن مدى البازلت

• $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.84\%$ أعلى قليلاً من DI

• الموقع: حقل البازلت/ الغابرو

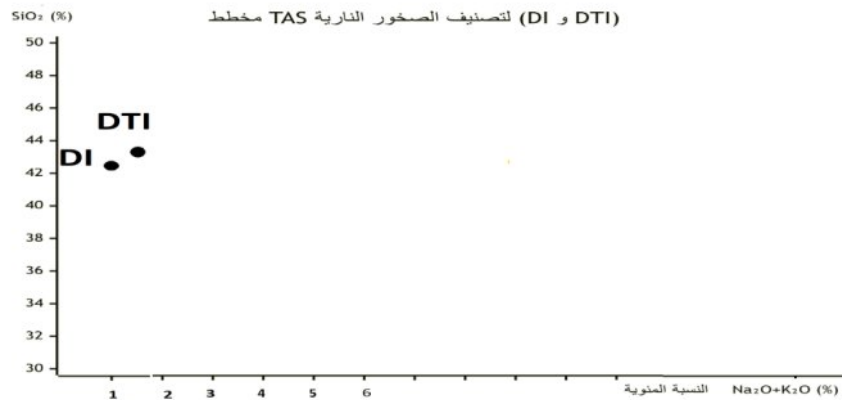
• التفسير الرياضي:

معادلة التصنيف TAS = موقع (SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)

→ DI: مجال البازلت (42.26, 1.64)

→ DTI: مجال البازلت (43.13, 1.84)

• التمثيل البياني لمخطط TAS:



الشكل (12): يبين التمثيل البياني لمخطط TAS:

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

س- دراسة التحول الحراري للصخور الرسوبية: مثل دراسة التحول الحراري في الصخور الرسوبية المحيطة بالقاطع الناري عنصراً أساسياً لفهم التأثيرات الحرارية والكيميائية المصاحبة للتدخلات النارية. وتكشف التحليلات المجرة على العينات AS1 و AS2 عن دلائل واضحة على حدوث تحول حراري متفاوت الشدة.

ش- النتائج الميدانية والنسجية:

• في العينة: AS1

• لون داكن نتيجة وجود أكاسيد الحديد

• نسج كثيف متحول مع فقدان كامل للتطبيق

• ظهور عروق كربوناتية دقيقة

• في العينة: AS2

○ الحفاظ على الخصائص الرسوبية الأصلية

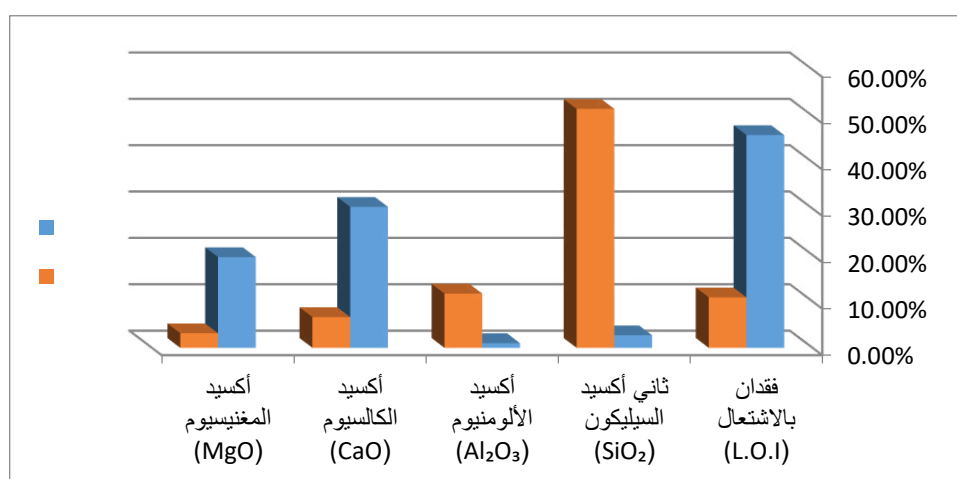
○ لون فاتح ونسيج طيني محفوظ

○ وجود بعض الأدلة على تسخين طفيف

الجدول (4): مؤشرات التحول الحراري في الصخور الرسوبية

الدالة العلمية	AS2 (م1)	AS1 (ملمس)	المؤشر
فقدان هائل للمواد المتطايرة في AS1	10.87%	45.87%	فقدان بالاشتعال (L.O.I)
تحطم المعادن السيليكاتية في منطقة التماس	51.52%	2.70%	ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)
تدمير المعادن الطينية بالحرارة	11.68%	1.00%	أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3)
تكون معادن كربوناتها جديدة	6.62%	30.37%	أكسيد الكالسيوم (CaO)
تحول إلى معادن مغنيسية	3.14%	19.54%	أكسيد المغنيسيوم (MgO)

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.



الشكل (13): يوضح مؤشرات التحول الحراري في الصخور الرسوبية

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

ص - الآليات الأساسية للتحول الحراري كما في الشكل 13 والتي منها:

1-التسخين المباشر:

- انتقال الحرارة بالتوصيل من القاطع الناري
- تأثير مباشر لسمك يصل إلى 50 سم حول القاطع
- درجات حرارة تصل إلى 600-800°م في منطقة التماس

2-التحول الحراري المائي:

- تفاعل السوائل الحرارية مع الصخور المضيفة
- إعادة تبلور المعادن الطينية والكربوناتية
- نقل العناصر الذائبة بعيداً عن منطقة التماس

3-إعادة التبلور:

- تحول المعادن الطينية إلى معادن متحولة
- تكون معادن جديدة مثل الكلوريت والسرينتين
- نمو بلورات الكالسيت والدولوميت المتجددة

4-التحليل المعدني والنسيجي:

- AS1 تعرضت لدرجات حرارة عالية (1000°) م
- AS2 لم تتأثر بشكل كبير بالحرارة
- الفرق في L.O.I يدل على تدفق حراري مكثف من الدايك
- التغير في النسب المعدنية:

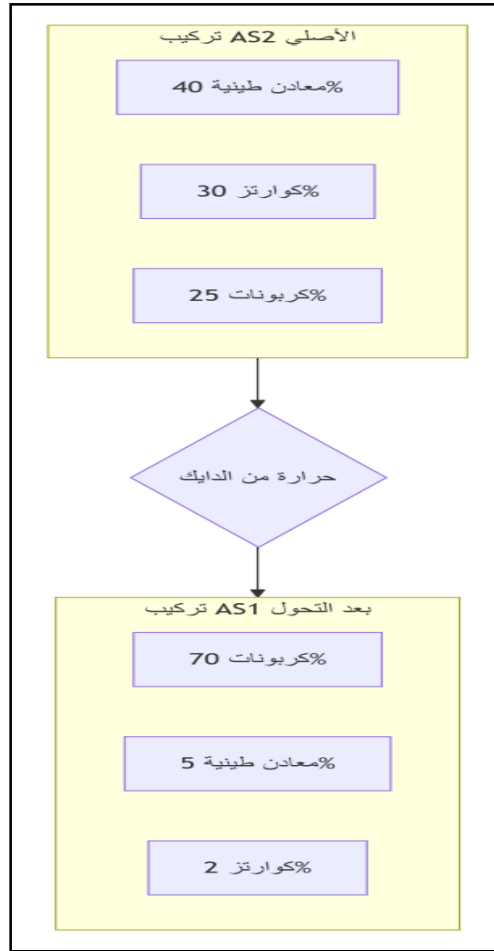
الجدول (5) التغير في النسب المعدنية

المعادن	AS2 (أصلية)	AS1 (متحولة)	التغير
معادن طينية	~40%	~5%	-87.5%
كربونات	~25%	~70%	+180%
كوارتز	~30%	~2%	-93.3%

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

يوضح الجدول (6) التحول الجذري في التركيب المعدني نتيجة التعرض للحرارة العالية والسوائل الحارة من الدايك الناري حيث العينة المتحولة (AS1) فقدت معظم المعادن الطينية والكوارتز (فقدان 87.5%-93.3% والعينة (AS1) اكتسبت: زيادة هائلة في الكربونات (+180%) بسبب عملية "التكلس"، حيث حملت السوائل الحارة عناصر الكالسيوم والمغنيسيوم وحلت محل المعادن الأصلية.

- الرمز (~) يسمى "علامة التيلدا" وفي هذا السياق يعني القيمة ليست مثبتة بدقة متناهية، ولكنها ضمن نطاق تقريبي.



الشكل (14): المخطط البياني للتحول الحراري

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

يصور الشكل (14): المخطط البياني للتحول الحراري العلاقة المكانية بين مصدر الحرارة (الدايك) ودرجة تأثر الصخور في نطاق التماس قريب من الدايك حرارة عالية جداً (تصل لـ 800°م أو أكثر) → تحول مباشر مثل العينة AS1 ونطاق التحول المائي أبعد قليلاً: تهيمن فيه تأثيرات السوائل الحارة → تحدث فيه عمليات الإذابة والإحلال المعدني مثل تكون الكربونات. والصخور غير المتأثرة بعيدة: تحتفظ بتركيبها الأصلي مثل العينة (AS2) ض- التحول الحراري والتركيب المعدني: كشفت التحليلات المعدنية عن تغيرات جوهرية في التركيب المعدني للصخور المحيطة بالقاطع الناري:

الجدول (6): التغير في النسب المعدنية بسبب التحول الحراري

النوع المعدني	AS2 أصلية	AS1 متحولة	نسبة التغير	التفسير العلمي
المعادن الطينية	~40%	~5%	-87.5%	تحطم بفعل الحرارة الشديدة
المعادن الكربوناتيّة	~25%	~70%	+180%	إعادة تبلور حراري
الكوارتز	~30%	~2%	-93.3%	تفكك السيليكات

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

- تعرضت العينة AS1 لدرجات حرارة عالية $> 800^{\circ}\text{C}$ أدت إلى تحول الصخور الطينية إلى هورنفليس.
- إعادة تبلور المعادن الكربوناتيّة حولت الصخور إلى تركيب شبيه بالحجر الجيري.
- حافظت العينة AS2 على التركيب الأصلي لكونها خارج نطاق التأثير الحراري المباشر.

ط- أنماط التمعّن والتركيب المعدني

الجدول (8): أنماط التمعّن في العينات المدروسة

نمط التمعّن	الموقع	المعادن الرئيسية	التركيز	الشكل التركيبي
التمعّن الناري الأصلي	منتصف الدايك (DI)	ماجنيتيت، هيماتيت، إلمينيت، أباتيت	Fe: 12.67% Ti: 3.31% P: 1.08%	حبيبات منتشرة
التمعّن المتمايز	طرف الدايك (DTI)	إلمينيت- ماجنيتيت، روتيل	Fe: 12.95% Ti: 4.15%	عروق وعناقيد
التمعّن الحراري	منطقة التماس (AS1)	كالكسيت، دولوميت	CaO: 30.37% MgO: 19.54%	كتل متبلورة
التمعّن الرسوبي	الصخور البعيدة (AS2)	هيماتيت، كوارتز	Fe: 9.63% SiO ₂ : 51.52%	طبقات منتظمة

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

يُظهر الجدول (9) التوزيع المكاني الواضح للمعادن حول القاطع الناري، ويعكس أربعة أنماط مرتبطة بأصلها الجيولوجي:

- في منتصف القاطع (DI) معادن الحديد والتيتانيوم الأولية منتشرة كحبيبات دقيقة.
- في طرف القاطع (DTI) نفس المعادن لكنها أكثر تركيزاً (Ti 4.15% وتظهر في عروق، نتيجة للتبلور التجزيئي النهائي).
- في الصخور المحيطة الملاصقة (AS1) تحولت المعادن الأصلية بفعل الحرارة إلى كتل متبلورة من الكالكسيت والدولوميت (معادن صناعية).
- في الصخور البعيدة (AS2) لم تتأثر بالحرارة، وحافظت على طبقاتها الأصلية من الهيماتيت والكوارتز (خامات حديدية ورمال سيليكات).
- يؤكد هذا التوزيع أن أعلى تركيز اقتصادي للمعادن الفلزية يوجد داخل القاطع نفسه (خاصة أطرافه)، بينما تنتج المناطق المحيطة مواد خام ذات استخدامات صناعية مختلفة.

ظ- التحليل التفصيلي للأنماط المعدنية:

النمط الأول: التمدن في الصخور النارية الأصلية

- في منتصف الدايك (DI) يتميز بوجود معادن الماجنتيت والهيماتيت بنسبة 12.67%، والإلمينيت بنسبة 3.31%، والأباتيت بنسبة 1.08%، على شكل حبيبات منتشرة في كتلة الصخر الأساسية.
- في طرف الدايك (DTI) يظهر تركيز أعلى للعناصر (TiO₂ = 4.15% ، Fe₂O₃ = 12.95%) على شكل عروق وعناقيد من معادن الإلمينيت - ماجنتيت، مما يشير إلى عملية تبلور تجزيئي متقدم.

النمط الثاني: التمدن في مناطق التحول الحراري

- منطقة التماس (AS1) أدى التحول الحراري إلى فقدان معظم العناصر الاقتصادية، لكنه ساهم في تكوين معادن صناعية مثل الكالسيت النقي (CaO = 30.37%) والدولوميت (MgO = 19.54%)، والتي يمكن استغلالها في صناعات مواد البناء.
- الصخور البعيدة (AS2) تحتفظ بتركيبها الرسوبي الأصلي مع وجود خام حديد رسوبي بنسبة 9.63%، ورمال سيليكات صناعية بنسبة 51.52%، مما يوفر إمكانات اقتصادية في مجال المواد الخام الصناعية.

ع- العناصر النزرة ذات الأهمية الاقتصادية: الجدول (9) تحليل العناصر الاقتصادية في العينات المدروسة ومقارنتها بالمعايير الاقتصادية.

العنصر	التركيز في الدراسة	التقييم الاقتصادي	العينة الحاملة	الحد الاقتصادي الأدنى	التركيز الطبيعي المتوسط
الحديد (Fe)	12.95%	شبه اقتصادي	غير محدد	>25%	5-8%
التيتانيوم (Ti)	4.15%	شبه اقتصادي	DI	>3%	0.5-1%
الفاناديوم (V)	0.12%	غير اقتصادي	DTI	>0.5%	0.02%
الكروم (Cr)	0.07%	غير اقتصادي	DI, DTI	>1%	0.1%
النكل (Ni)	0.08%	غير اقتصادي	DTI	>1%	0.008%
الزركونيوم (Zr)	0.05%	غير اقتصادي	جميع العينات	>0.5%	0.02%
النحاس (Cu)	0.02%	غير اقتصادي	غير محدد	>0.5%	0.005%

المصدر: التحاليل الكيميائية في (2025) - إعداد الباحث.

- تقييم الجدوى الاقتصادية: جميع العناصر النزرة (Cr, Ni, V, Zr) أقل من التركيز الاقتصادي المطلوب

- التيتانيوم هو الأكثر قابلية من الناحية الاقتصادية (4.15%)
- الحديد يحتاج إلى عمليات تركيز إضافية لتحقيق الجدوى

غ- الأولويات الاستكشافية وخارطة الطريق التنموية

أ. الأولويات الاستكشافية

- الأولوية القصوى: الدايك الناري نفسه، باستخدام مسوحات مغناطيسية وأخذ عينات مركزة لتحديد كتل الماجنتيت والإلمنيت.
- الأولوية المتوسطة: منطقة التماس الحراري لتقييم نقاء الكالسيت والدولوميت لصناعات البناء والأسمنت.
- الأولوية المنخفضة: الصخور الرسوبية غير المتحولة لتقييم خام الحديد الرسوبي عبر حفر استطلاعي.

ب. خارطة الطريق التنموية

- قصير المدى: مسوحات جيوفيزيائية تفصيلية وتقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لمنطقة الدايك.
- متوسط المدى: تطوير تقنيات استخلاص، دراسات الأثر البيئي، البحث عن شركاء استثماريين.
- طويل المدى: تطوير البنية التحتية، إقامة وحدات معالجة، تطوير سلسلة القيمة المضافة.

ف- النتائج والتوصيات:

• النتائج

1. التصنيف الصخري: القاطع الناري يصنف كبازلت قاعدي (SiO_2 : 42.26-43.13%) ، مجموع القلويات: 1.64-1.84%) حسب XRF ومخطط TAS.
2. تمايز صهاري وتركيز التيتانيوم: تركيز التيتانيوم في طرف القاطع (4.15%) تجاوز الحد الاقتصادي (3%)، مما يجعله العنصر الأكثر وعداً.
3. تحول حراري شديد: في منطقة التماس (AS1) ، فقدان 93.6% من السيليكا وزيادة 143.3% في أكسيد الكالسيوم مع تحول الصخور الطينية إلى هورنفليس.
4. الجدوى الاقتصادية: الحديد شبه اقتصادي (12.95%)، الكالسيوم والمغنيسيوم (30.37%)، 19.54% يصلحان لصناعات البناء، وباقي العناصر النزرة دون المستوى الاقتصادي.
5. المخاطر البيئية: الكروم (0.07%) تجاوز الحد المسموح بنسبة 700%، مما يصنف المنطقة ضمن الخطر البيئي المتوسط.



6. فعالية XRF: أثبتت التقنية كفاءتها مع بروتوكولات ضبط الجودة (معايرة، عينات مرجعية، تكرار 20%) لبناء نماذج تنبؤية.
7. نموذج التحول والتمعدن: توثيق أربعة أنماط تمعدن (ناري أصلي، متمايز، حراري، رسوبي) مرتبطة بالموقع من القاطع.
- التوصيات
1. التركيز الاستكشافي: توجيه برامج الحفر والمسوحات المغناطيسية إلى أطراف القاطع وليس مركزه لتركيز التيتانيوم (4.15%) والحديد (12.95%).
 2. دراسات مجهرية مستقبلية: استخدام SEM أو Microprobe لتأكيد التصنيف وتفصيل المعادن (بلاجيوكلاز، بيروكسين، أوليفين).
 3. خطة مراقبة بيئية: مسح أساسي، مراقبة دورية للمياه الجوفية والتربة، معالجة المخلفات، وإعادة التأهيل بعد التعدين.
 4. استغلال الكالسيت قصير المدى: استغلال الكالسيت (CaO 30.37%) في الأسمنت ومواد البناء لتمويل استكشاف التيتانيوم والحديد.
 5. تطوير تقنيات استخلاص: تطوير تقنيات تركيز جاذبية ومغناطيسية لرفع جودة التيتانيوم والحديد وجعل استغلالهما مجدياً اقتصادياً.
 6. مجمع صناعي متكامل طويل المدى: إنشاء وحدات لاستخلاص التيتانيوم والحديد، وصناعة الأسمنت، وإنتاج مواد البناء.
 7. توسيع الدراسة: تطبيق المنهجية نفسها على قواطع نارية أخرى شمال غرب ليبيا (غريان، يفرن، الجبل الغربي) لبناء قاعدة بيانات وطنية.



قائمة المراجع:

أولاً: المراجع العربية

1. أبو فارس، ع. (2010). (الدراسات المعدنية في شمال غرب ليبيا .مركز البحوث الصناعية، طرابلس.
2. الخلفي، م. (2018). (الصخور النارية والمتحولة: تركيبها وتصنيفها .دار المعرفة، الرياض..
3. الهيئة الليبية للبحوث الجيولوجية. (2019). (التقرير السنوي عن الموارد المعدنية في ليبيا .طرابلس.
4. مركز البحوث الصناعية، إدارة البحوث الجيولوجية والتعدين. خريطة/تقرير جيولوجي رقم . * 13-33 NI
طرابلس.
5. عبد الله، خ. (2018). (الدايكات النارية في حوض سرت .مجلة جامعة بنغازي.
6. الهرش، أ. (2010). (تقييم المكامن النارية في جنوب الجزائر باستخدام XRF .المجلة العربية لعلوم
الأرض.

ثانياً: المراجع الإنجليزية

- 7.Anketell, J. M. (1996). Geological history of the Jabal Nafusah region, NW
Libya. Arab Journal of Geology.
- 8.ASTM International. (2021). ASTM D7348-21: Standard test methods for loss on
ignition (LOI).
- 9.Boukhlof, A. et al. (2020). Assessment of dolerite dykes in the Hoggar (Algeria)
using XRF. Arabian Journal of Geosciences.
- 10.El Hadi, H. et al. (2017). Analysis of dolerite dykes in the Anti-Atlas
(Morocco). Journal of African Earth Sciences.
- 11.Malvern Panalytical. (2016). Epsilon 3XLE spec sheet.
- 13.Masoud, M. A. (2022). Geochemistry and petrographic study of Abu Shaybah
Formation, NW Libya. HNSJ, 3(12).
- 13.Nabertherm GmbH. (2015). Product manual: L5/11 laboratory furnace.
- 14.Sartorius Lab Instruments. (2010). CPA225D analytical balance user manual.
- 15.van Wees, J. D. et al. (2008). Tectonics and basin evolution of the Sirt Basin,
Libya. African Journal of Earth Sciences.



الهوامش

- ¹ (2008). Abadi, A. M., van Wees, J. D., van Dijk, P. M., & Cloetingh, S. A. تكتونيات وتطور حوض سرت، ليبيا: منظور جديد. *مجلة الجيولوجيا الأفريقية*. 224-209, 15(2),
- ² أبو فارس، ع. (2010). *(الدراسات المعدنية في شمال غرب ليبيا. مركز البحوث الصناعية، طرابلس.*
- ³ (1996). Anketell, J. M. التاريخ الجيولوجي لمنطقة جبل نفوسة، شمال غرب ليبيا. *مجلة الجيولوجيا العربية*, 4(1), 1-15.
- ⁴ (Schüller & Wehrmann, 2018, 1.ص)
- ⁵ (Nabertherm L5/11): (Nabertherm, 2015, 4.ص) مواصفات الفرن
- ⁶ (Malvern Panalytical, 2016, 1.ص)
- ⁷ ASTM D7348-21, ASTM International, 2021, 2-1.ص
- ⁸ Sartorius Lab Instruments, 2010, 1.ص