

تفسير مورفولوجية وتشكل جيودات الكوارتز ضمن توضعات تشكيلية صنفية

الدكتورة ندى سلمان*

(تاريخ الإيداع 18 / 3 / 2018. قُبِلَ للنشر في 3 / 6 / 2018)

□ ملخص □

تمّ تفسير مورفولوجية وآلية تشكّل جيودات الكوارتز المنتشرة في توضعات تشكيلية صنفية باستخدام تقنيات XRD، SEM، EDX، و PLM. أكّدت نتائج XRD بأن التركيب الفلزي للجيودات يتألف من الكوارتز. بيّنت صور SEM وجود مكّونات مكثفة ضمن النسيج المتبلور للكوارتز على شكل تجمّعات صلبة. أظهرت تحاليل EDX بأن المحتبسات تعود لفلز الكالسيوم بشكل رئيس. بيّنت دراسة الشرائح الرقيقة تنوع أشكال التبلور لفلزات الكوارتز ضمن الجيود الواحد. فسّرت المورفولوجيا المجرّدة للجيودات والشبيهة بثمرّة القرنبيط بأنها نتيجة لحدوث انتباج داخلي للجل السيليكاتي تليه إعادة تشكّل للسيليكا الأمورفية إلى كوارتز متبلور. تشكّل التجويف المركزي للجيود لاحقاً نتيجة لإعادة التبلور ونزع الماء، بالإضافة إلى انحلال الفلزات الحبيسة غير السيليكاتية. أكّدت الدراسة عدم حدوث سلسلة للرسوبيات بعملية الاستبدال.

الكلمات المفتاحية: جيود ثمرّة القرنبيط، كوارتز، آلية التبلور، تشكيلية صنفية.

* مدرس - قسم الجيولوجيا - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Interpretation of Formation and Morphology of Quartz Geodes within Slunfeh Formation Deposits

Dr. Nada Salman *

(Received 18 / 3 / 2018. Accepted 3 / 6 / 2018)

□ ABSTRACT □

Interpretation of formation mechanism and morphology of quartz geodes within Slunfeh Formation deposits using XRD, SEM, EDX, and PLM techniques was done. The XRD results confirmed that mineral composition of the geodes is quartz. SEM photographs showed the existence of embedded Ingredients within the crystalline texture of quartz in form of solid aggregates. EDX analyses revealed that the inclusions belong mainly to calcite mineral. The study of thin sections by PLM showed variation of quartz crystal forms within one geode. The study interpreted that the cauliflower curly outer morphology of geodes has formed as a result of internal inflammation of silica gel followed by reformation of amorphous silica into crystalline quartz. The central cavity of the geode was formed later by recrystallization and dehydration, plus dissolving of embedded non silicate minerals. This study confirmed the non occurrence of silicification of sediment by replacement.

Keywords: Cauliflower geode, Quartz, Crystallization mechanism, Slunfeh Formation.

*Assistant Professor-Department of Geology - Faculty of science - Tishreen university- Lattakia - Syria.

مقدمة

من المعروف بأن الجيود هو أحد أشكال وجود الكوارتز الرسوبي، والجيود عبارة عن صخر صلب كروي الشكل أو شبه كروي، يتشكل ضمن رسوبيات حاضنة له سابقة التشكل ضمن الحوض الرسوبي [1]، [2]. ورد في دراسات سابقة بأن جيودات الكوارتز قد تأخذ شكل تجويف صخري مسبق التشكل يفرض مورفولوجيته على الشكل الخارجي للجيود [3] كما تعرض بعض الدراسات أبحاثاً تتعلق بجيودات كوارتزية استبدلت الكربونات في مواقع متعضيات مستحاثية فتأخذ الجيودات في النهاية مورفولوجية هذه القواقع [4]. هنالك تصور آخر تم التطرق إليه كثيراً في دراسات سابقة ألا وهو التجايف الناشئة عن انحلال فلزات تبخرية وبالتحديد فلز الأنهدريت [5]، [6]، [7]، [8].

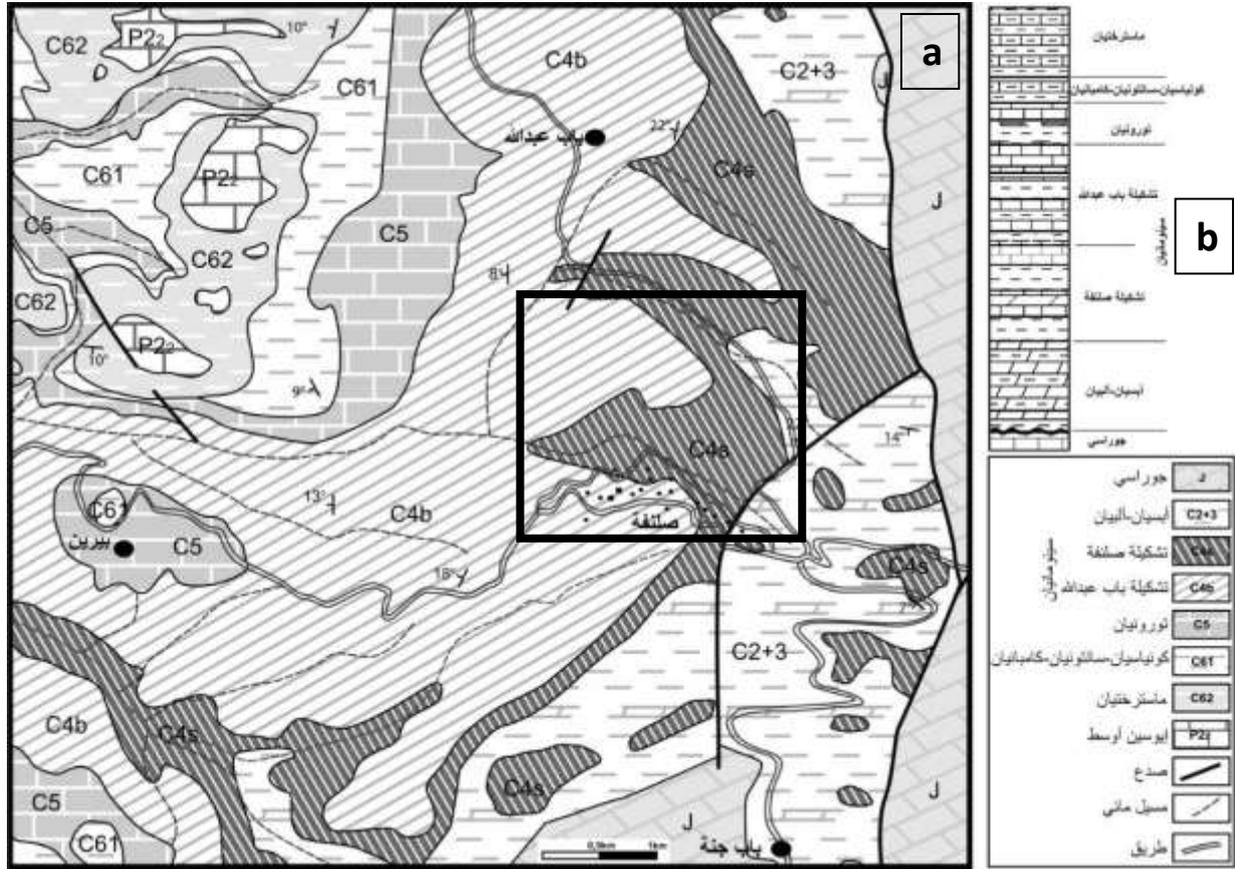
يختلف الأمر عند الحديث عن جيودات تشكيلية صلنفة والتي يشبه معظمها شكل ثمرة القرنبيط بغض النظر عن أبعادها. هذا يحتم البحث عن سبب آخر لهذه المورفولوجية المعقدة.

لا يمكن فصل آلية تشكل الجيودات عن بيئتها ضمن الحوض الترسيبي، ولفهم هذه الآلية يجب الإحاطة بالظروف الجيولوجية العامة التي كانت سائدة في زمن الكريتاسي الأعلى - السينوماني، وهو عمر التشكيل الحاضنة للجيودات المدروسة، بما فيها الظروف المناخية.

ورد في شرح المذكرة الإيضاحية لمنطقة الدراسة والتي تقع في رقعة الحفة وتحديدًا تشكيلية صلنفة بأن رسوبيات السينوماني الأعلى والعائدة للكريتاسي الأعلى تتألف من تتاوب أحجار كلسية أو دولوميتية سميكة التطبيق، مارل وأحجار كلسية مارلية تحتوي على طبقات كلسية تأخذ شكل الجدران [9].

تتصف الوحدة الحاملة لهذه الجيودات بأحجار كلسية حطامية سميكة التطبيق مدلمتة جزئياً، تحتوي على مستحاثات Oyster وتكثر فيها الجيودات المتسلسلة، والتي تشبه ثمرة القرنبيط، تزداد سماكتها باتجاه الجنوب، وتتألف من جدار من حجر دولوميتي كلسي، قاس، رمادي مصفر، حاو على عقد صوانية صغيرة الأبعاد في أسفله، والتي تختفي في منتصف التشكيل ثم تعود للظهور في الأعلى على شكل عدسات بأبعاد 8x6 سم، وفي الأعلى طبقة من حجر كلسي مستحاثي بسماكة 120 سم [9].

يبين الشكل (1) الخريطة الجيولوجية لرقعة الحفة بمقياس 1/50.000 وحدد فيها الجزء المدروس من لتشكيل صلنفة الحاملة للجيودات المدروسة. تم رسم الخريطة والمقطع بواسطة برنامج Cowrel Draw 12، إصدار عام 2007.



الشكل (1)، a: الخريطة الجيولوجية لرقعة الحفة بمقياس 1:50,000، b: العمود الطبقي لرقعة الحفة. يمثل المربع الأسود جزء من تشكيل صلنفة العائدة لعمر السينومانيان والحاملة لجيودات الكوارتز الشبيهة بثمرة القرنبيط..

أهمية البحث وأهدافه

تدعى الجيودات الكوارتزيتية في المنطقة المدروسة بجيودات ثمرة القرنبيط (Cauliflower Geodes) بحسب [9] وهو شكل متفرد ونادر نسبياً حول العالم، ما يولي هذا البحث أهمية خاصة تتعلق بالمورفولوجيا الخارجية لها والتي تعتبر بحد ذاتها إشكالية هذا البحث. من جهة أخرى، تمكن أهمية البحث بكون الجيودات المدروسة تشكل قرينة هامة تشير إلى ظروف الترسيب التي كانت سائدة في ذلك الوقت، حيث يرتبط تشكلها بظروف مناخية وترسيبية محددة. بمعنى آخر؛ يشير وجودها في أية تشكيلية وبأي عمر إلى بيئات ترسيب متشابهة، كما تعطي تصور لآليات تبلور وتشكل الجيودات المماثلة لها والمنتشرة على امتداد السلسلة الساحلية والعائدة للعمر نفسه. يهدف هذا البحث إلى إيجاد تفسير لمورفولوجية الجيودات الكوارتزيتية المنتشرة في منطقة الدراسة وربطها بالظروف المنشئية لتشكيلها.

طرائق البحث ومواده:

تم إجراء عدة جولات حقلية إلى رقعة الحفة الجيولوجية في الفترة الواقعة ما بين الشهر العاشر والشهر 12 من العام 2017. تمت معاينة توضعات تشكيلية صلنفة وحددت السويات الحاملة للجيودات الشبيهة بثمر القرنبيط، كما تم جمع أكثر من 50 جيود درست جميعها جهرياً، واختير منها 10 عينات للدراسة المجهرية، و3 عينات للتحليل المخبرية اللاحقة، حيث أمكن، بالقياس، ربط الجيومورفولوجيا الخارجية لحيود ثمرة القرنبيط بتركيب فلزي محدد وهيئات تبلور خاصة به. يظهر في الشكل (2) مقطع من تشكيلية صلنفة يحتوي على الجيودات المذكورة، كما يبين الشكل (3) صورة لعدد من الجيودات في الحقل. تم أخذ مقاطع عرضية في العديد من العينات كما جمعت الجيودات التي تعرضت لتجوية قشرتها الخارجية بغية معاينتها جهرياً .



الشكل (2)، توضعات مارل صلنفة الحاملة للجيودات المدروسة. تشير الدوائر إلى أماكن توزع الجيودات.



الشكل (3)، مجموعة من العينات في الحقل تظهر اختلاف أبعاد الجيودات مع تشابه شكلها الخارجي.

تم استخدام جهاز قياس انعراج الأشعة السينية بطريقة المسحوق (X.R.D Powder) X-RAY Diffraction Method) من نوع STOE STADI - هيئة الطاقة الذرية، بغية تحديد التركيب الفلزي الدقيق للجيودات المدروسة . تم توليد الأشعة باستخدام مصعد نحاس بطول موجة $\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1.540 \text{ \AA}$ ضمن مجال لزواوية الانعكاس 2θ ما بين 4° و 90° . حضرت العينات على شكل مسحوق ناعم (Powder) بمقاييس لا تتجاوز عدة مايكروونات بطحنها باستخدام الهاون اليدوي. أخذ المسحوق من الأجزاء قرب الخارجية، الوسطى، والداخلية بعد صنع مقاطع عرضية في العينات المدروسة. تم إجراء هذا القياس على ثلاث عينات لجيودات عشوائية من منطقة الدراسة وأعطيت الرموز G3Qz، G2Qz، G1Qz. استخدم المجهر الإلكتروني الماسح (SEM Scanning Electron Microscope) تشيكي الصنع من نوع VIGA II xmu، شركة TESCAN - هيئة الطاقة الذرية، عالي التكبير والدقة (أبعاد من رتبة المايكرون ؛ $1 \mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$) بغية إظهار النسيج السطحي للمادة المتبلورة المؤلفة للجيودات المدروسة، كذلك تسمح صور المجهر الإلكتروني الماسح بإظهار إمكانية وجود أية فلزات دخيلة غريبة عنه، وقد تم أخذ الصور من العينات الثلاث المذكورة سابقاً. استخدم تحليل EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) أمريكي الصنع من نوع EDAX - هيئة الطاقة الذرية لإجراء التحاليل النقطية على العينات المدروسة وتحديد أنواع ونسب العناصر الكيميائية المكونة لها. يسمح التحليل الكيميائي النقطي بالحصول على التركيب الذري كنسب مئوية لنقطة محددة من سطح فلز يشار إليه في صورة الـ SEM. أجريت التحاليل على العينات الثلاث المذكورة سابقاً. أجريت التحاليل السابقة على ثلاث عينات من أصل عشر عينات مدروسة بترولوجياً، لتبيان التركيب الفلزي من جهة، وتحديد الشوائب المحتمل وجودها ضمن جيودات منطقة الدراسة. تم سحب نتائج هذه العينات على العينات العشر المدروسة مجهرياً، حيث تسمح الدراسة البتروغرافية اللاحقة بربط مورفولوجية الجيود والتتوعات البلورية المؤلفة له بتركيبه الفلزي.

استخدم المجهر الاستقطابي بالضوء النافذ PLM، نوع SCOMP-35 (كلية العلوم - جامعة تشرين) للدراسة البتروغرافية، والتي تبيّن طرق نمو الأشكال البلورية ضمن الشرائح الرقيقة. تمت دراسة العينة بالضوء المستقطب بوضعية مقطبين متعامدين (XPL). حضرت عشر عينات عن طريق صنع شرائح رقيقة من داخل الجيودات بثخانة $0.03-0.05 \text{ mm}$. يبيّن الشكل (4) صور لعشر شرائح رقيقة محضرة للدراسة المجهرية.



الشكل (4)، صور الشرائح الرقيقة المحضرة للدراسة المجهرية والمصنوعة من المقاطع العرضية للجيودات، قياس 3×2 سم.

النتائج والمناقشة

لوحظ، من خلال الدراسة العينية، للجبيودات أن لها شكل عام متماثل شبيه بثمره القرنبيط على الرغم من التنوع في أبعادها والذي يتراوح من سنتيمتر واحد إلى عدة عشرات من السنتيمترات. هذه الملاحظة الأولى تفتح الطريق أمام التفكير باتجاه أن الشكل الخارجي لهذا النوع من جبيودات الكوارتز يرتبط مباشرة بالنمو الداخلي للمادة المكونة للجبيود. هذا النهج يخالف كل ما ذكر سابقاً من أن الجبيودات الكوارتز تأخذ شكلاً تجويفاً أو فراغاً محدد الأبعاد وموجود مسبقاً يتحكم بالمورفولوجية الخارجية للجبيود.

ظهرت الجبيودات في عدة مستويات وكانت مختلفة الأشكال والأبعاد. استناداً إلى الملاحظات الحقلية ومعاينة جميع العينات المأخوذة من منطقة الدراسة تبين أن معظم الجبيودات تأخذ شكل كروي أو شبه كروي ذو سطح خارجي مجدّد على شكل ثمره القرنبيط، وذلك على اختلاف أبعادها اعتباراً من أجزاء السنتيمتر إلى عدة عشرات من السنتيمترات. تغيب الجبيودات الكروية المتطاولة أو الكروية المضغوطة في هذه التشكيلة، وتختلف ألوانها ما بين الأبيض الحليبي والبني المحمر.

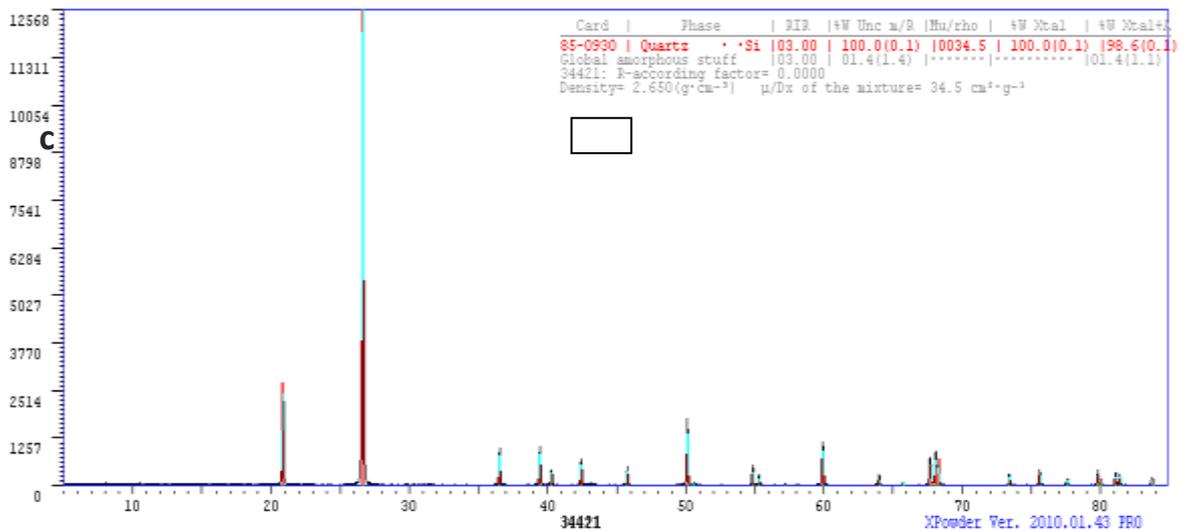
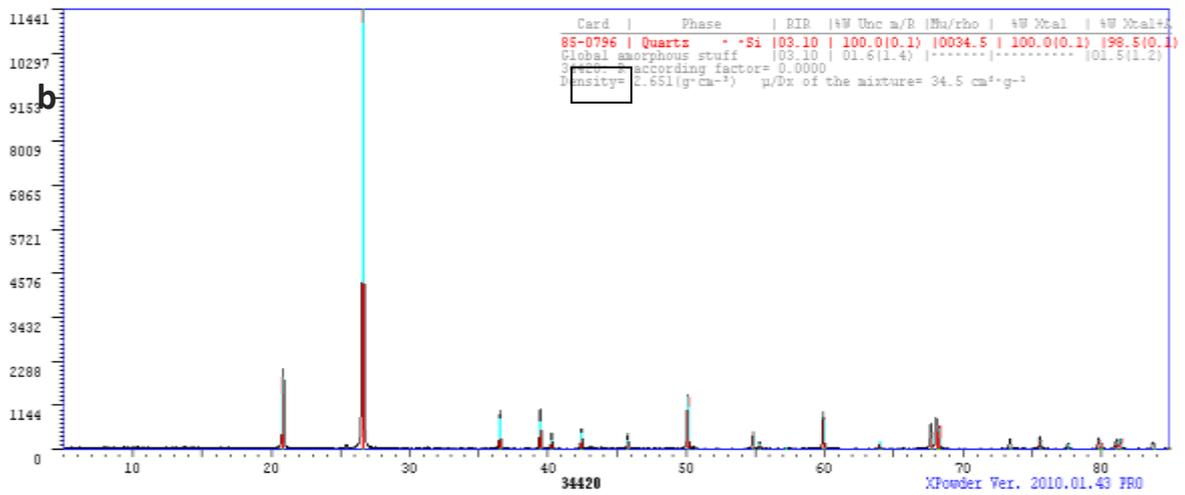
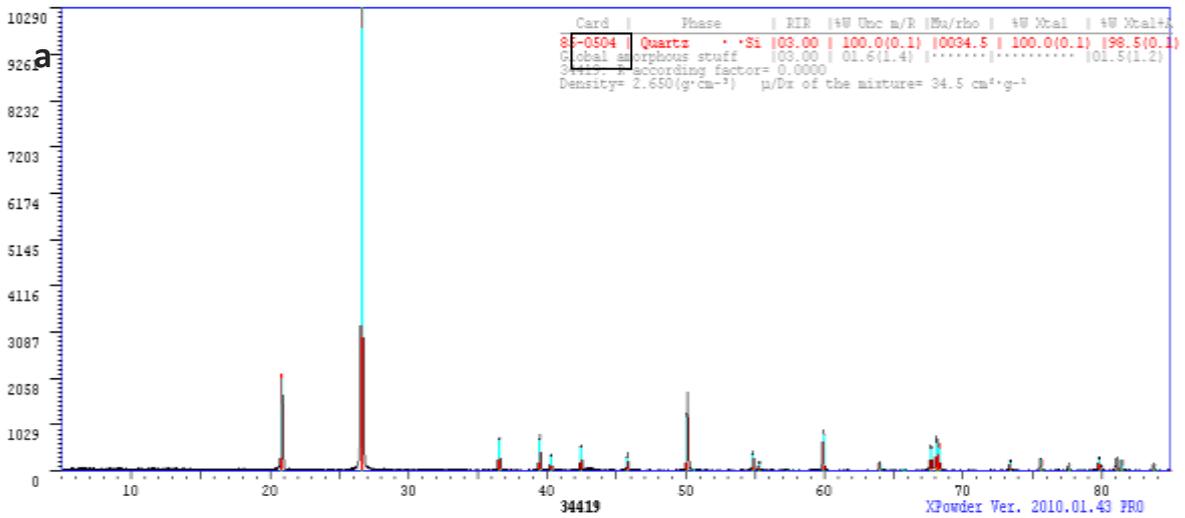
صنعت مقاطع عرضية في العديد من الجبيودات المدروسة، ولوحظ أنها تأخذ في مقاطعها ألوان تتراوح ما بين الأبيض الحليبي إلى الأبيض الشفاف، وتتبلور حبات الكوارتز فيها بهيئات وأبعاد مختلفة. غالباً ما يظهر تجويف مركزي فارغ تختلف أبعاده من عينة لأخرى، وقد يمتلئ التجويف بالكامل بمادة متبلورة.

نتائج قياس انعراج الأشعة السينية بطريقة المسحوق XRD

يظهر قياس انعراج الأشعة السينية بطريقة المسحوق XRD، وبشكل واضح جداً، مادة متبلورة عائدة لفلز واحد وهو فلز الكوارتز، على اختلاف هيئات تبلورها والتي سيتم توضيحها لاحقاً ضمن نتائج الدراسة المجهرية لها. يبين الشكل (5) ثلاثة أطراف انعراج (Diffraction) عائدة لثلاثة عينات من جبيودات ثمره القرنبيط مأخوذة بشكل عشوائي، وذلك لتأكيد تركيب هذه الجبيودات من ناحية هوية المادة المشكّلة لها. يبين كل طيف من الأطراف الثلاث مجموعة من الذرى (Peaks) تعود بكاملها لمادة متبلورة بتركيب محدد، وهو في هذه الحالة فلز الكوارتز SiO_2 ، استناداً لقيم التباعد الذري (d-spacing) الأساسية الدالة على الكوارتز وفق الآتي:

$$d_1: 4.255, d_2: 3.339, d_3: 2.455, d_4: 2.281, d_5: 1.819, d_6: 1.542$$

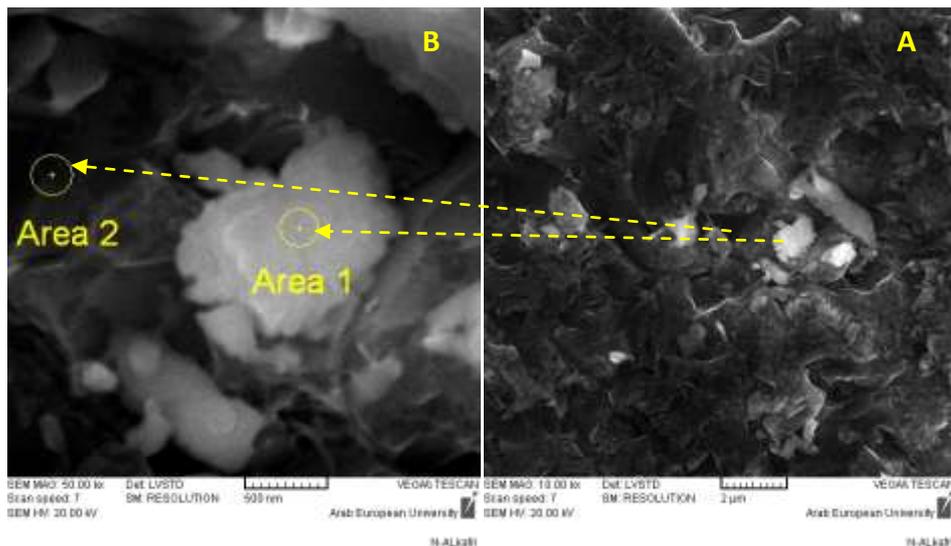
يصنّف الكالسيدوان كنوع من الكوارتز مجهري التبلور، ولا يختلف بالخصائص البلورية عن الكوارتز كبير الحبيبية. لم يعط قياس XRD أية إشارة لوجود فلز آخر مرافق للكوارتز ضمن العينات الثلاث. فكان لا بد من إجراء التحليل العنصري النقطي EDX لمناطق محدّدة من الجبيودات للبحث عن إمكانية لمكتنفات ذات تركيب بلوري مختلف.



الشكل (5). يظهر أطياف الانعراج للعينات الثلاث المدروسة والتي تظهر تبلور تام لفلز الكوارتز كفلز وحيد مشكل للجيودات المدروسة؛ a: .G1Qz ، b: .G2Qz ، c: .G3Qz.

نتائج دراسة صور المجهر الإلكتروني الماسح SEM وتحليل EDX المرافقة

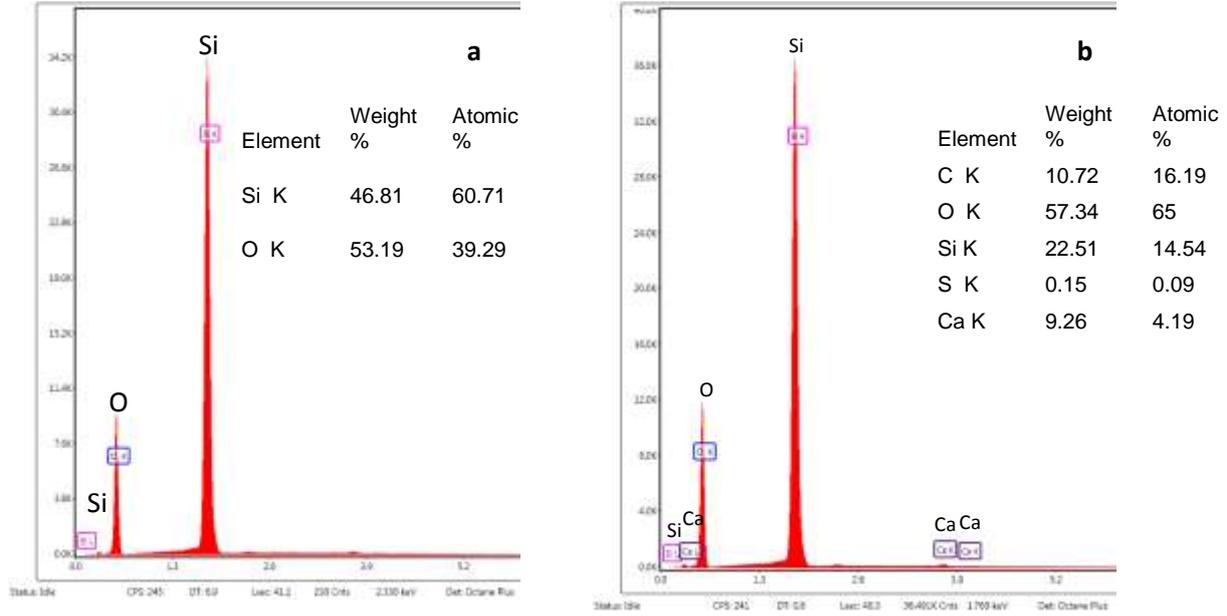
أخذت صور المجهر الإلكتروني الماسح SEM والتحليل الكيمائية النقطية المرفقة بها EDX على الجيودات السابقة والمحللة بقياس XRD لتحديد إمكانية وجود أية محتبسات لفلزات أو لأجزاء فلزية ضمنها، والتي لم تظهر بقياس XRD نظراً لكونها تشكل نسبة ضئيلة جداً من المادة المتبلورة الكلية وهي السيليكا المتبلورة (الكوارتز). يبين الشكل (6- A) صورة SEM للعينة G_1QZ والتي تظهر بوضوح وجود مادة بيضاء اللون ضمن النسيج العام القاتم بمقياس 2 مايكرون. كما يظهر الشكل (6- B) نقطتين إحداهما للمادة البيضاء وأخرى للقائمة بمقياس نصف مايكرون.



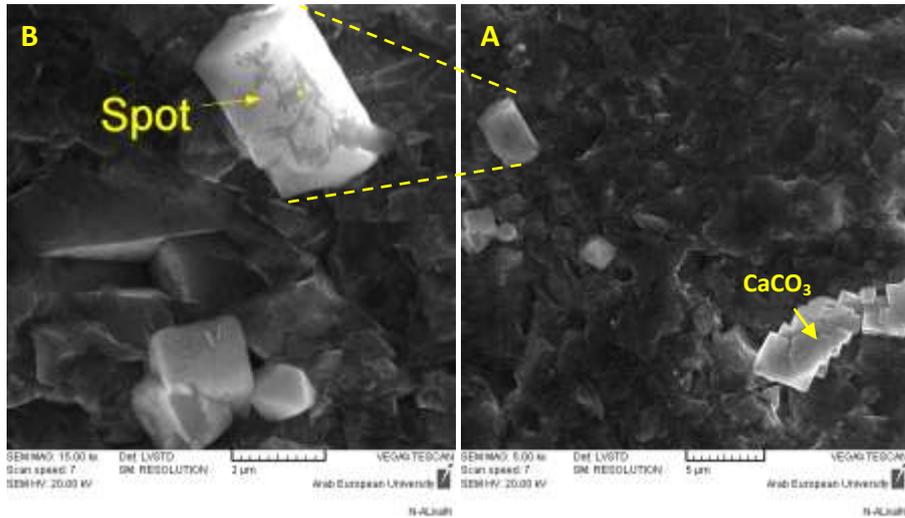
الشكل (6). صورنا SEM مأخوذتان للعينة G_1QZ ؛ A: النسيج العام بلون قاتم يكتنف مادة بيضاء مختلفة عنه بمقياس $2\mu m$ ، B: تكبير للصورة A ، حيث تظهر نقطتا تحليل EDX لكل من المادة البيضاء (1) والمنطقة القائمة المحيطة بها (2).

تظهر نتائج تحليل EDX العنصرية الكمية للعينة السابقة بأن المادة القائمة ذات تركيب ذري يقتصر على ذرتي Si و O ويشكلان نسبة 100%، وهو دون أدنى شك تركيب SiO_2 المتبلور، الشكل (7- a)، بينما تتكون المادة البيضاء من أربعة ذرات تعطي النسبة المئوية للتحليل في هذه النقطة؛ وهي ذرات Ca، C، Si، و O. من المؤكد أن كل من ذرتي الكالسيوم والكربون ترتبطان عبر ذرات الأوكسجين مشكّلة بمجموعها فلز الكالسيوم $CaCO_3$ (الشكل 7- b)، كذلك تدلّ ذرات Si في هذا التحليل على وجود الكوارتز بنسبة بسيطة وهذا طبيعي لكون أشعة X في تحليل EDX ذات عمق اختراق، وهو في هذه الحالة يدلّ على الكوارتز الموجود في أرضية فلز الكالسيوم. تعتبر فلزات الكالسيوم هنا بمثابة مكتنفات صلبة متبلورة موزعة ضمن بلورات الكوارتز وهي ضئيلة التواجد إلى درجة عدم ملاحظتها في تحليل انعراج الأشعة السينية XRD.

تعود شدة الذروة الكبيرة لعنصر Si إلى كونه يمثلّ الذرة الأثقل والأكثر تركيزاً بين مجموعة العناصر المرافقة. يلاحظ أن عنصر الكربون يظهر في نتيجة التحليل (الشكل 7- b) لكنه لا يعطي شدة انعكاس ملحوظة نظراً لخفته بين مجموعة العناصر المرافقة.

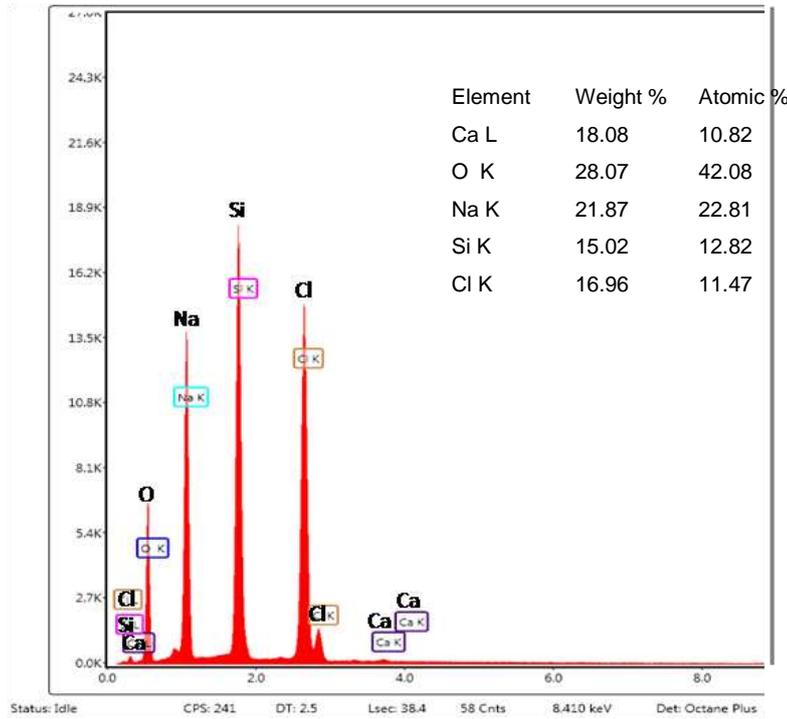


الشكل (7). يظهر نتائج التحليل العنصري EDX للعينة G_1QZ في النقطتين (a) و (b) المبيّنتين في الشكل (B-6).
 تبين صورة SEM للعينة G_2QZ وجود تجمعات بلورية معينة الشكل مميزة للكالسيت موزعة ضمن النسيج القائم الذي يمثل الكوارتز (الشكل A-8). كبرت إحدى الفلزات المختلفة عن النسيج العام بغية إجراء تحليل EDX العنصري لها (الشكل B-8).



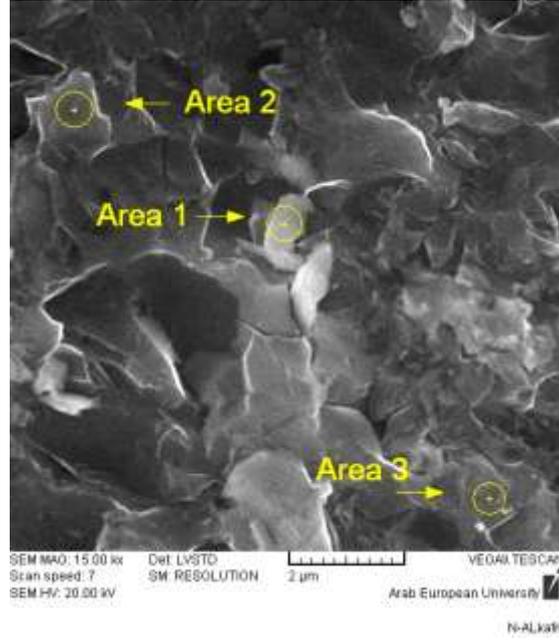
الشكل (8). صورتنا SEM مأخوذتان للعينة G_2QZ ; A: النسيج العام بلون قاتم تتوزع ضمنه تجمعات بلورية معينة مميزة للكالسيت (مقياس $5\mu m$)، B: تكبير للصورة A (مقياس $2\mu m$) تظهر نقطة تحليل لإحدى البلورات المختلفة عن النسيج العام.

تظهر نتيجة تحليل EDX للعينة G_2QZ وجود العناصر الكيميائية الآتية والتي تشكل مجموعها النسبة المئوية لهذا التحليل: Ca، C، Na، Cl، Si، و O. يدل ذلك على وجود أكثر من تركيب فلزي ويمكن أن تتوزع هذه العناصر على ثلاثة فلزات، وهي الكالسيت، الهاليت، والكوارتز (الشكل 9). إن وجود الهاليت ضمن بلورة الكالسيت يدل على اكتناف الهاليت في بلورة الكالسيت المعينة ويظهر بشكل ظلال قاتمة على سطحها (الشكل B-8).

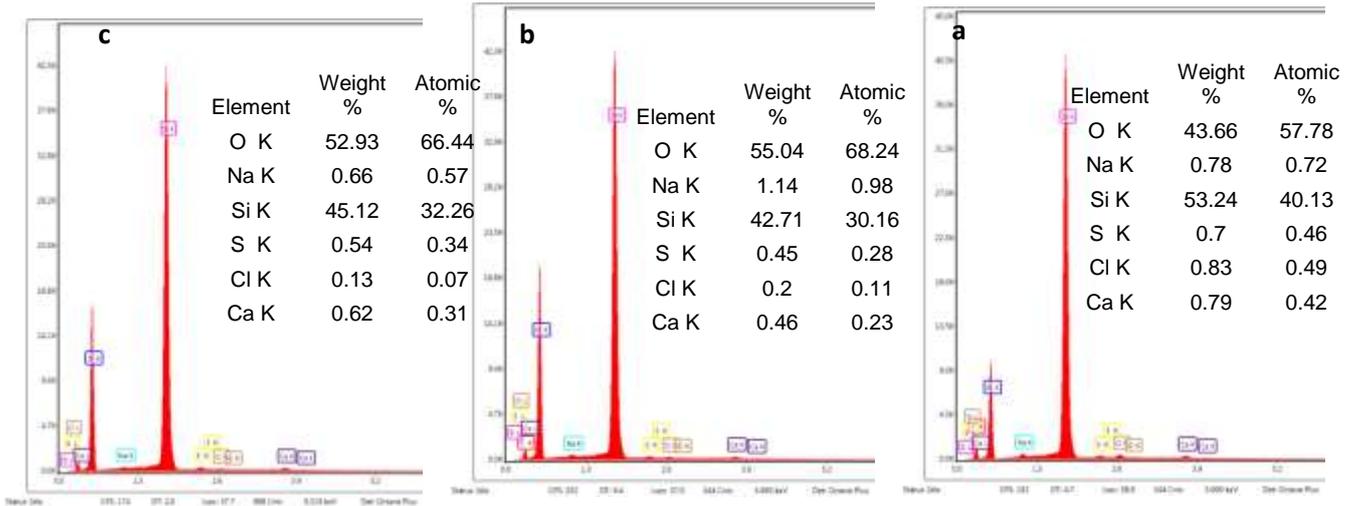


الشكل (9). يظهر نتائج التحليل العنصري EDX للعينة G1Qz في النقطة المبينة في الشكل (B-8).

تظهر صورة SEM للعينة G₃QZ نسيج عام نقي مؤلف بالكامل من الكوارتز والذي لا يمثل ضمن هذه الأبعاد (مقياس 2μm) سوى جزء من سطح بلورة كوارتز كبيرة الحجم، ولا يظهر اكتناف لأي نوع من الفلزات الأخرى التي ظهرت في العينتين السابقتين (الشكل 10). تمثل النقاط 1، 2، و3 في الشكل (10) مواقع إجراء تحليل EDX. تبين نتائج هذا التحليل بأن كل من ذرتي Si و O تشكّلان ما يقارب 97% من المجموع المئوي للعناصر الظاهرة في تحليل النقاط الثلاث، ما يدل بشكل واضح على أن الكوارتز يعدّ الشكل المتبلور الوحيد في هذه العينة، وباقي العناصر المتمثلة بذرات Ca، Na، Cl، و S تشكّل 3% فقط من المجموع الكلي بنسبة أقل من 1% لكل عنصر. إن وجود الذرات بهذه النسب الضئيلة لا يتعدى كونها شوائب متبقية من المحلول الأم أو الرسوبيات المحيطة.



الشكل (10). يظهر صورة SEM مأخوذة للعينة G₃Qz؛ وتمثل النقاط 1، 2، و3 مواقع إجراء التحليل العنصري الكمي EDX لها.

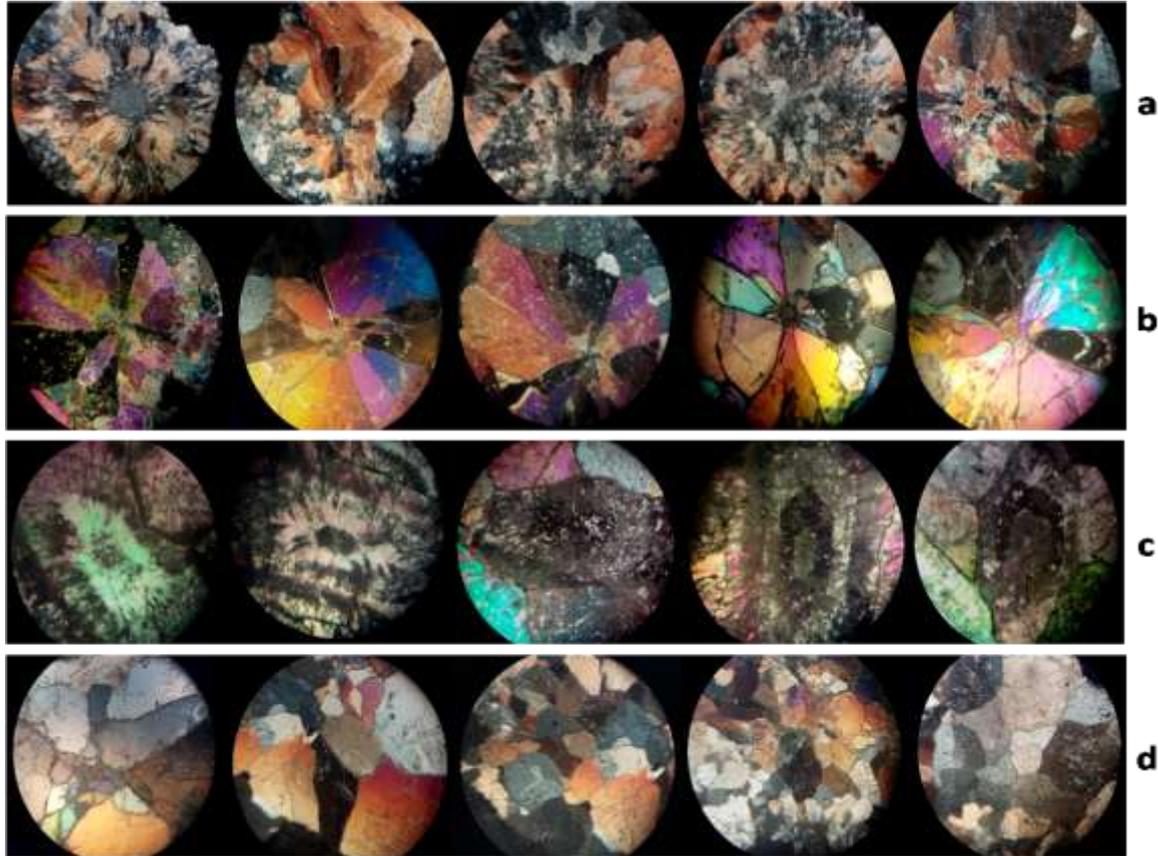


الشكل (11). يظهر نتائج تحليل EDX للعينة G₃Qz في النقاط 1 (a)، 2 (b)، و3 (c) المبينة في الشكل (10).

تظهر نتائج التحاليل الكيميائية للعينات الثلاث السابقة بأن بعضها يكتنف على فلزات كالسيوم موزعة ضمن نسيج بلورات الكوارتز بتركيز ضئيلة جداً حيث لم تلاحظ في قياس XRD للأطوار المتبلورة. لوحظ وجود الهاليت ضمن أحد فلزات الكالسيوم المحللة في إحدى العينات، بينما ظهرت تراكيز لا تذكر (~ 3%) لعناصر Ca، Na، Cl، و S مجتمعة في إحدى العينات، والتي لا تتعدى كونها شوائب ضمن المحلول السيليكاتي الأولي المتسلل إلى الفراغات قبل تشكل الكوارتز حيث تم اقتناصها أثناء تسلل المحلول السيليكاتي عبر الفراغات المشكّلة في الرسوبيات الطرية.

نتائج الدراسة المجهرية بالمجهر الاستقطابي Polarized Light Microscope

تبيّن نتائج دراسة الشرائح الرقيقة للجيودات الثلاثة السابقة وجود تنوع كبير في هيئات التبلور (الشكل 12)؛ حيث يظهر الكالسيدوان بهيئة بنى سفيروليتية شعاعية (Radial spherulitic structure) مؤلفة من ألياف مجهرية من بلورات الكالسيدوان وهو يعرف كنوع من الكوارتز المجهرية (Microcrystalline quartz) أو خفي التبلور أحياناً (Cryptocrystalline quartz).



الشكل (12). يظهر هيئات التبلور المتنوعة للكوارتز في الشرائح الرقيقة بوضعية مقطبين متعامدين XPL (تكبير 10x4) - a: كالسيدوان بهيئة بنى السفيروليت، b: ميغا كوارتز شعاعي التبلور، c: كوارتز نطاقي بشكل مواشير متطاولة، d: كوارتز موزايكي.

يظهر الكوارتز كبير الحبيبية بعدة أشكال متبلورة فقد يعطي بنى شعاعية شبيهة بالسفيروليت، بلورات ميغا كوارتز (Mega quartz ≤ 500 مايكرون) نطاقية (Zoned quartz) على شكل مواشير متطاولة، وتجمعات من حبيبات الكوارتز صغيرة الحجم نسبياً (20 - 50 مايكرون) متقاربة الأشكال ذات نسيج موزايكي (Mosaic quartz). يدل هذا التنوع في الأشكال البلورية للكوارتز واختلاف أبعادها إلى تطوّر الجيود عبر مراحل زمنية متفاوتة. قد تتشكل التنوعات البلورية السابقة في جيود واحد أو قد يظهر منها نوع أو أكثر في جيود آخر. يرجح أن تكون بلورات الكالسيدوان من نوع الكوارتزين (Quartzine) حيث ذكر في أبحاث سابقة أن الكوارتزين يتشكل في بيئات مدارية جافة ذات حرارة مرتفعة نسبياً [10]. ستتم الاستعانة بشرائح مجهرية إضافية لاحقاً عند تفسير المورفولوجيا السطحية للجيودات المدروسة.

تفسير مورفولوجية الشكل الخارجي لجيودات الكوارتز الشبيهة بثمره القرنبيط

إن الشكل الخارجي العام شبه الموحد لجيودات منطقة الدراسة، على اختلاف مقاييسها، يفرض استبعاد نظرية وجود فراغ صخري بأبعاد وشكل محدد مسبقاً تم فيه لاحقاً تبلور الكوارتز إلى جيود. يشير المظهر الشبيه بثمره القرنبيط للجبيودات المدروسة حدوث "انتباج" للجل السيليكاتي وتصلبه قبل البدء بعملية تشكل بلورات الكوارتز، ما يقود إلى الافتراض بوجود رسوبيات طرية غير متصلبة سمحت لحادثة الانتباج هذه بالحدوث.

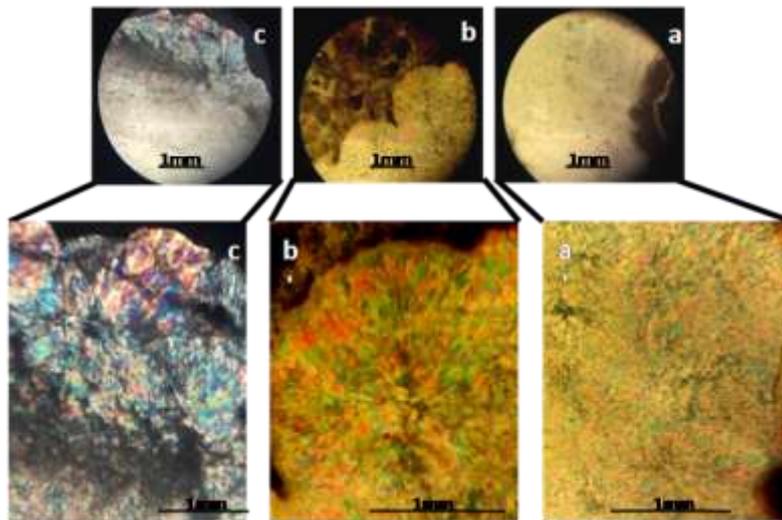
تم الاستناد إلى الدراسات البلورية، الكيميائية والمجهريّة السابقة في التفسير اللاحق للمورفولوجيا الخارجية للجبيودات المدروسة. يبدأ الأمر بتشكّل الأوبال من الهلام السيليكاتي ضمن ظروف فيزياء-كيميائية محددة [11]. يلعب انحلال بقايا وأجزاء الهياكل المستحاثّة السيليسية المنتشرة ضمن سويات التشكيلية المدروسة وفي التشكيلات التي تعلوها [9] الدور الأبرز في زيادة تركيز فوق الإشباع للمحلول المشكّل للهلام السيليكاتي الأولي، لكن يبقى الأمر غير مفسّر فيما يتعلّق بظروف الحوض الترسيبي المؤدية إلى انحلال كميات هائلة من الهياكل السيليسية في فترات زمنية محدّدة. يشار بأن أشواك الإسفنجيات السيليسية المنحلّة تشكّل المصدر الرئيس للسيليكا في مياه البحار حول العالم [12].

بالعودة إلى بيئة الحوض الرسوبي لمنطقة الدراسة في زمن الكريتاسي الأعلى؛ نجد أنها بيئة بحرية ضحلة تقع ضمن نطاق مد-جزر وذات مناخ حار. يسبب البحر نتيجة ارتفاع الحرارة في النطاق الضحل انخفاض مستوى المياه الملحية المشبعة بالسيليكا لهذا الجزء من الحوض ما يسمح بحدوث فوق إشباع للمحلول السيليكاتي الذي سرعان ما يتحول إلى سيليكا غروية تتكثف بظروف أقرب إلى الحمضية وتتحوّل إلى هلام بتركيز يناسب ترسّب الأوبال.

تنتشر جيودات ثمره القرنبيط وفق سويات محدّدة ضمن التشكيلية المدروسة موازية لسطوح التطبّق. يدلّ ذلك على أن ترسب الهلام السيليكاتي قد تكوّن على قاع الرسوبيات الطرية مباشرة وبشكل متوافق مع الترسيب، وبالتالي شغل حيزاً مشبعاً بالسيليكا في رسوبيات الحوض ضمن فترات زمنية محدّدة ومنفصلة. يتم اقتناص شوارد لأملح منحلّة مثل Na ، Ca ، Cl ، S كعناصر شائبة في الهلام السيليكاتي (كما أظهرت نتائج تحاليل EDX) الذي قد يبقى أيضاً على فلزات متبلورة تم احتباسها من الرسوبيات المحيطة، وسرعان ما يتصلّب ليبدأ بتشكيل الأوبال. يحتاج الأوبال لدرجة حرارة ما دون 100° مئوية وظروف أقرب إلى الحمضية ليترسب [13]، [14]؛ وهو عبارة عن ثاني أكسيد السيليكون المائي ($SiO_2 \cdot nH_2O$) حيث تتراوح نسبة الماء فيه ما بين 5% و 20% [15]. يشكّل الأوبال ترتيبات محلية بشكل تجمعات كروية من رتبة الأنغستروم ضمن الهلام السيليكاتي (تصل أبعاد الكرة الواحدة إلى 3500Å) وتتألف الواحدة منها من انضمام مجموعات السيلانول ($Si-OH$) [16]. تنمو هذه التجمعات الكروية وتزداد حجمها بحسب إمدادها بمجموعات السيلانول من الهلام السيليكاتي، والتي تلتصق بدورها على السطوح الكروية. تتضمن الكريات التي قد تصل أبعادها الآن إلى مئات المايكرونات وتتغلّق على بعضها البعض بشكل أقرب إلى الكروي حيث تنضم كل مجموعة كرات إلى بعضها تاركة فيما بينها فراغات يملؤها الماء الحر. يفسر سبب ميل الكرات إلى الالتفاف بشكل كروي على بعضها البعض بالسعي لمنع أو خفض الخسارة في الطاقة عن طريق الانتشار [17]. من هنا يمكن الحديث عن بدء تشكّل المورفولوجيا الخارجية للجبيودات والتي يلاحظ بأن سطحها الخارجي المجدع ما هو إلا نتيجة النفاف كروي بحيث تشكّل كل مجموعة كرات متجاورة شكل "وردة" ذات انخماص مركزي، وذلك نتيجة وجود فراغ ما بين الكرات المجتمعة حيث يزداد الانخماص بزيادة حجوم الكرات بفعل انتباجها ضمن الرسوبيات الطرية، وتشارك مجموعة من الوردات في تشكيل الجيود الواحد. من هنا يمكن تفسير اختلاف مقاييس الجيودات الكوارتزية، والتي تبلورت فيما بعد من الأوبال المنتبج المرتبط بشكل رئيس بمعدّل الإمداد الأولي من المحلول السيليكاتي. ورد في

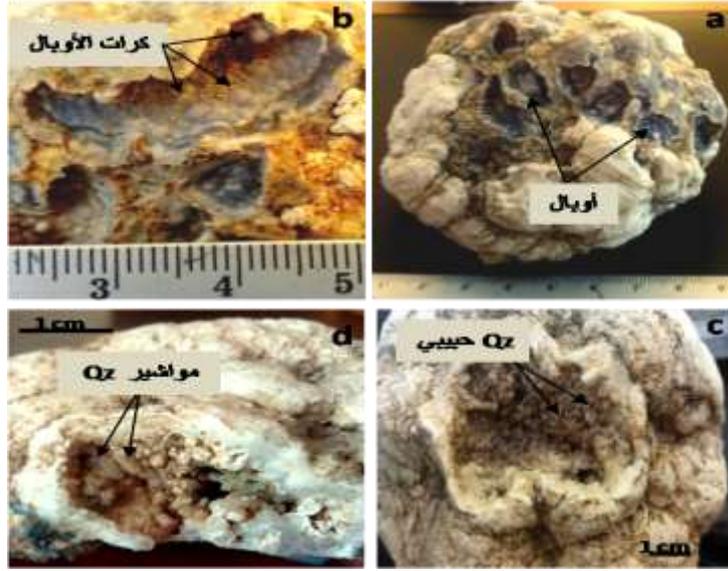
دراسات سابقة بأن الأوبال يحتاج لفترة زمنية قصيرة نسبياً للتشكل، بينما تحتاج بلورات الكوارتز الحقيقية إلى ملايين السنين للنمو إلى بضعة ميليمترات [18]. من هنا يرجح بأن الجيود قد أخذ شكله النهائي المتصلب أولاً بأبعاده الثابتة ضمن رسوبيات طرية بعملية انتباج الأوبال، وينعكس هذا في تقبب الرسوبيات المحيطة بالجيودات من الجهة العلوية. بعد المرحلة الأولية من مراحل تشكل الجيود، تزداد سماكة العمود الرسوبي فوق الجيودات المتشكلة وتبدأ عملية الضغط على الجيود المتصلب أصلاً على شكل أوبال. قد يؤدي حمل الرسوبيات على الجيود إلى تحوله بشكل طفيف من شكل كروي إلى شكل شبه كروي وذلك بحسب درجة الضغط المعروض له.

مع زيادة الضغط ودرجة الحرارة يمكن للجيود أن يتعرض لإجهاد تكتوني يظهر بهيئة شبكة من التشققات عبر جسم الجيود تتوزع عادة على محيط كرات الأوبال وتتصل ببعضها البعض، ويرافق ذلك عملية نزع الماء وإعادة تبلور السيليكا الأمورفية إلى أشكال أكثر تبلوراً كالكالسيدوان بهيئة بنى سفيروليتية والذي تمت الإشارة إليه سابقاً (الشكل 13). يتبلور الميغا كوارتز كذلك إما من إعادة تبلور الكالسيدوان أو من تبلور الأوبال نفسه، وهذا يفسر التنوعات البلورية للكوارتز ضمن الجيود الواحد. فمثلاً يظهر النمو الشعاعي لبلورات الكوارتز التي تصل أبعادها إلى 2-3 مم تماماً كمظهر البنية السفيروليتية للكالسيدوان الذي يتألف من ألياف مجهرية لا تتعدى أبعادها عدة مايكرونان. في الوقت نفسه نجد حبيبات كوارتز متقاربة الأحجام تصل أبعادها إلى 20-50 مايكرون متوزعة ما بين بنى الكالسيدوان وحبيبات الكوارتز وكأنها ملأت فراغ حر متبقٍ ومحصور ما بين الهياكل المتبلورة السابقة على شكل كوارتز موزايكي. يلاحظ أيضاً وجود كوارتز نطاقي، حيث ينتج التمنطق عن احتباس شوائب أو مكتنفات لعناصر أو فلزات ضمن البنية البلورية للكوارتز وتعتبر عن فترات زمنية مرحلية لنمو الكوارتز (الشكل 12).



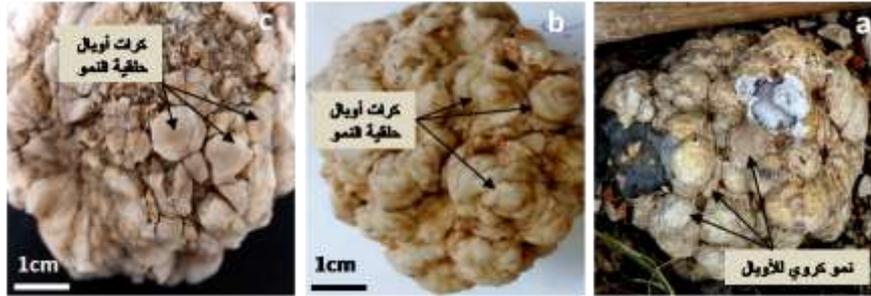
الشكل (13). يظهر شرائح رقيقة لجيود يحتوي على الأوبال في نطاقه الخارجي، تبين بداية تحوّل كرات الأوبال (a', a) خفية التبلور إلى كالسيدوان ليفي شعاعي (b', b) ومن ثم نمو ألياف الكالسيدوان لتعطي بنى سفيروليتية أكبر حجماً (c', c). الشرائح a, b, c بتكبير 10 x 4.

تظهر بعض الجيودات المعرّضة للتجوية الخارجية تكشف للوردات المكوّنة للسطح الخارجي لها. يبيّن الشكل (a-14, b) تجويف متعدد الحجرات لإحدى الوردات تغلف جدرانها الداخلية بطانة من الأوبال على شكل كرات غير مبلورة، بينما يظهر الشكل (c-14, d) نمو بلورات كبيرة الحجم من الكوارتز الذي يملأ التجويف الداخلي للوردة.



الشكل (14). يظهر. يلاحظ اختلاف درجة نضج التبلور في الوردات المولفة للطبقة الخارجية للجيودات الكوارتزية: a- تجويف متعدد الحجرات تغلف جدرانه بطانة من الأوبال ، b- تجمعات كروية غير ناضجة تبطن التجويف الداخلي لإحدى الوردات المعرضة للتجويف، c- بنية واضحة التبلور ذات حبيبات صغيرة متقاربة الأبعاد من الكوارتز تحل محل كرات الأوبال، d- بنية واضحة التبلور بشكل مواشير سداسية كبيرة حجوم الحبات من الكوارتز.

يحدث الأمر نفسه بالنسبة للجيود ككل، ويتشكل التجويف المركزي للجيود عن عملية إعادة تشكل الأوبال وتقلصه بعد نزع الماء وتبلوره لاحقاً بزيادة الضغط والحرارة المترافقين مع حمل العمود الرسوبي. تكشف بعض الجيودات المعرضة للتجويف طريقة النمو السطحي للأوبال، حيث تظهر مقاطعها العرضية نمو كروي حلقي أثناء زيادة حجمها تماماً كما هو الحال في حلقات نمو الأشجار (الشكل 15).



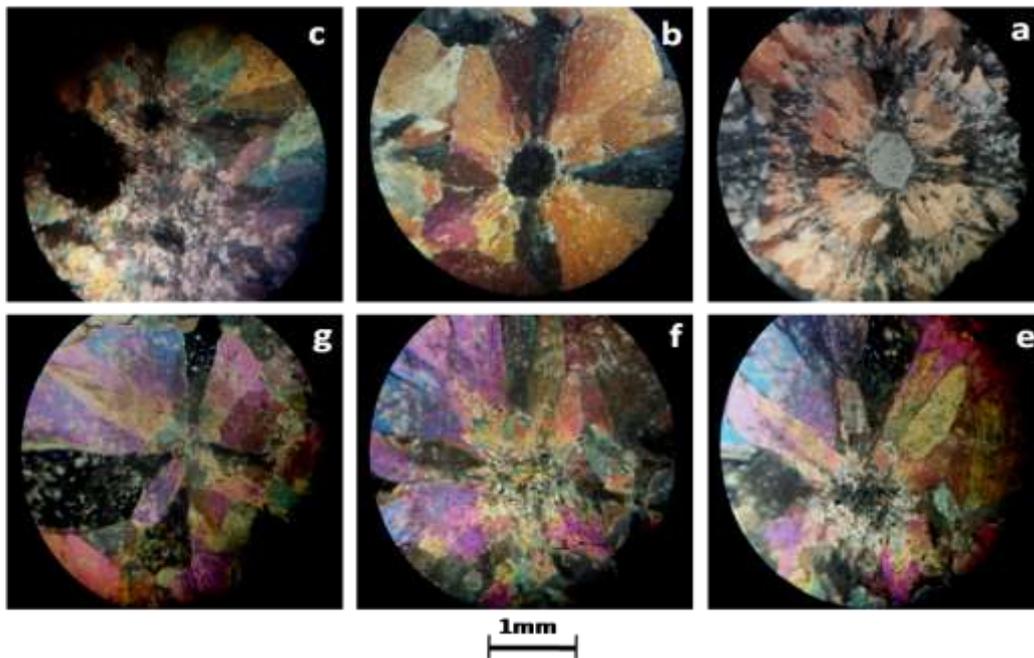
الشكل (15). يظهر طريقة النمو الكروي للأوبال غير المبلور على سطح الجيود (a)، وتبين الكرات المجاورة نمو كروي حلقي حيث تعكس الحلقات المشكّلة لسطح الجيود انتاج الكرات خلال مراحل زمنية متلاحقة (b, c).

تميل البلورات، في قوانين النمو البلوري، إلى تفضيل وجود جدران أو شوائب ضمن وسط النمو والتي تلعب دور نقاط استناد أثناء نموها. بالعودة إلى نتائج تحاليل EDX فإن بلورات الكالسيت الشائبة تتوزع ضمن النسيج العام لبلورات الكوارتز بنسب ضئيلة لم يلحظها تحليل XRD. قد تشكل بلورات الكالسيت هذه نقاط ارتكاز جاهزة لتبلور الكالسيدوان.

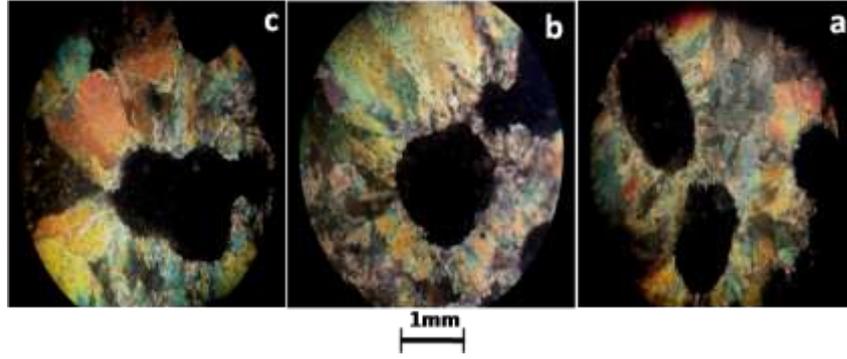
يظهر الشكل (16) عرض بانورامي تبيّنه شرائح مجهرية مختلفة للعيّنة G_2QZ لمراحل مختلفة من النمو الشعاعي للكالسيديوان ومن ثم الميغا كوارتز واستنادها على بلورة كالسيت مركزية في بادئ الأمر، الشكل (a-16)؛ ومن ثم انحلال بلورة الكالسيت لتترك فراغاً مركزياً مكانها، الشكل (b-16). قد يتحوّل الكالسيديوان بإعادة التبلور إلى كوارتز شعاعي. في مرحلة لاحقة، يبدأ الفراغ الناتج عن انحلال الكالسيت بالإمتلاء ببلورات مجهرية من الكوارتز التي تتشكّل من الجدران الداخلية لفراغ الانحلال وبتجاه مركزه، ولا تلبث أن تكبر وتملأ التجويف في بعض الأحيان ببلورات كوارتز حبيبية (الشكل 16-c, e, f, g).

يساهم انحلال حبيبات الكالسيت في تشكيل التجويف المركزي للجوّد، إذا ما شكّلت هذه الحبيبات تجمّعات قريبة من بعضها البعض، حيث تترك بانحلالها فراغاً متصلاً يملأ لاحقاً ببلورات كوارتز كبيرة الحبيبية، أو قد يخلف تجويفاً فارغاً تختلف أبعاده من جيود لآخر (الشكل 17).

لم تلاحظ أية مظاهر لاستبدال الكالسيت بالكوارتز في أي من الشرائح الرقيقة لجيودات منطقة الدراسة، حيث تظهر فلزات الكالسيت إما كاملة متجانسة المظهر ومحاطة بالكوارتز، أو تظهر أمكنة شاغرة لفلزاتها المنحلة، أو قد توجد بشكل محتبسات ضمن بلورات الميغا كوارتز.



الشكل (16). يظهر النمو الشعاعي لكل من بلورات الكالسيديوان والميغا كوارتز في الشرائح الرقيقة للعيّنة G_2QZ ؛ XPL (تكبير 10×4)؛
a: يظهر ارتكاز ألباف الكالسيديوان أثناء نموها على بلورة كالسيت مركزية، **b**: انحلال البلورة المركزية تاركة فراغاً مركزياً يحيط به نمو شعاعي لبلورات الميغا كوارتز التي تتشكّل من إعادة تبلور ألياف الكالسيديوان، **c**: بدء التبلور من جديد عند الجدران الداخلية لفراغ الانحلال وبتجاه مركزه ببلورات الكوارتز الدقيقة، **e**: البلورات المتشكّلة في التجويف يزداد عددها ليضيق الفراغ تدريجياً، **f**: ملأ الفراغ بالكامل ببلورات الكوارتز، **g**: نمو البلورات التي ملأت فراغ الانحلال بالكامل وتحولها إلى بلورات من الكوارتز الأكبر حجماً.



الشكل (17). يظهر فراغات خلفتها بلورات كالسيت منحلّة في الشرائح الرقيقة للعينة G_2Qz ؛ XPL (تكبير 10×4)؛ a: عدة فراغات عائدة لانحلال بلورات كالسيت متجاورة ويظهر حولها النمو الشعاعي للكوارتز، b و c: اتصال أكثر من فراغ انحلال معطياً تجويفاً متصلاً.

إن آلية تشكّل جيودات ثمرة القرنبيط ترتبط مباشرة بظروف بيئة الترسيب الضحلة ذات المناخ الحار المميزة لتشكيلية صلنفة في زمن السينوماني، حيث لا يمكن للمحلول السيليكاتي أن يتركز ويتحوّل إلى محلول غروي إلا من خلال ظروف مناخية تحدث فوق الإشباع كما ورد في الشرح سابقاً، ولا يمكن لجيودات الكوارتز من هذا النوع أن تتشكّل إلا في بيئات ترسيب مشابهة، لذا يمكن اعتبار وجودها في أية تشكيلية رسوبية وبغض النظر عن نوعية الرسوبيات دلالة على نفس ظروف الترسيب.

الاستنتاجات والتوصيات

- تتشكّل جيودات الكوارتز الشبيهة بثمرة القرنبيط ضمن رسوبيات ضحلة في الجزء من الحوض الرسوبي العائد لتشكيلية صلنفة في زمن الكريتاسي الأعلى - السينوماني الأعلى.
- تتشكّل جيودات الكوارتز بدءاً من محاليل غروية تتشكّل على قاع الرسوبيات الطرية بشكل متوافق مع الترسيب؛ لتعطي هلام سيليكاتي يتحوّل بدوره إلى أوبال غير مبلور.
- لا تخضع الجيودات المتشكلة لمورفولوجية تجويف مسبق إنما تصنع تجويفها الخاص بها من خلال آلية الانتباج لكرات الأوبال والتي يسمح بها وجود رسوبيات طرية محيطية تتيح التمدد الحجمي لها.
- يتصلّب الأوبال ليعطي الشكل النهائي للجوود أولاً وذلك بانضمام تجمعات كروية غير مبلورة من الأوبال والتفافها بشكل شبه كروي، ومن ثم انتباجها لتعطي شكل وردات سطحية منخفضة المركز.
- تحدث إعادة تشكّل للأوبال إلى هيئات متبلورة على شكل كالسيدوان و كوارتز كبير الحبيبية من خلال عملية نزع الماء منه بزيادة الضغط والحرارة الناتجين عن حمل العمود الرسوبي فوقه.
- تعتبر جيودات الكوارتز الشبيهة بثمرة القرنبيط قرائن دالة على بيئات الترسيب الضحلة وفي مناخ حار.
- يوصى بإجراء مقارنة ومضاهاة لجيودات منطقة الدراسة مع الجيودات المشابهة والمنتشرة على كامل السلسلة الساحلية.

المراجع

- [1]. STEWART, A.M., CHADDERTON, L.T., SENIOR, B.R., *Self-assembly in the growth of precious opal*. Journal of Crystal Growth, 2010, 391-396.
- [2]. CHOWNS, T. M., ELKINS, J.E., *The origin of quartz geodes and cauliflower cherts through the silicification of anhydrite nodules*. Sediment Petrol, 1974, 885-903.
- [3]. MILLIKEN, K. L., *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 2003, . 306-308.
- [4]. MAKHLOUF. I.M., AL HADDAD, A., AL BADRI, O., *Quartz geodes and their distribution in the Cretaceous lower Tar Member, Libya*. N Jb Geol Palaont Mh, 2003, 667-682.
- [5]. ELORZA. J. J., RODRIGUEZ-LAZARO. J., *Late cretaceous quartz geodes after anhydrite from Burgos, Spain*. Geological Magazine, 1984, 107-113.
- [6]. MILLIKEN, K. L., *The silicified evaporite syndrome: Two aspects of silicification history of former evaporite nodules from southern Kentucky and northern Tennessee*. Journal of Sedimentary Petrology, 1979, 245-256.
- [7]. EL KHORIBY, E. M., *Origin of the gypsum-rich silica nodules, Moghra Formation, Northwest Qattara depression, Western Desert, Egypt*. Sedimentary Geology, 2005, 41-55.
- [8]. MALIVA, R. C., *Quartz geodes: Early diagenetic silicified anhydrite nodules related to dolomitization*. Journal of Sedimentary Geology, 1987, 1054-1059.
- [9]. روسكي، ر. (1978). المذكرة الإيضاحية لرقعة الحفة بمقياس 1/50.000. NI-37-S-1-C، المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية.
- [10]. HATTORI, I., *Length-Slow Chalcedony in Sedimentary Rocks of the Mesozoic Allochthonous Terrane in Central Japan and Its Use for Tectonic Synthesis*. Springer International Publishing AG (Springer Nature), 2017, 201-215.
- [11]. HEANEY, A. P.J., VEBLEN, D.R., POST, J.E., *Structural disparities between chalcedony and macrocrystalline quartz*. American Mineralogist, 1994, 452-460.
- [12]. ELORZA, J. J., LAZAROM, J. R., *Late cretaceous quartz geodes after anhydrite from Burgosm Spain*. 1984, 107-113.
- [13]. KINNUNEN, KARI, A., IKONEN, L., *Opal – A new hydromorphic precipitate type from graved deposits in southern Finland*. Bull. Geol. Soc. Finland, 1991, 95-104.
- [14]. ANDHIKA, M., CASTANEDA, M. H., REGENSPURG, S., *Characterization of silica precipitation at geothermal conditions*. Proceeding World Geothermal Congress-Australia, 2015, 19-25.
- [15]. SEGNET, E. R., STEVENS, T. J., JONES, J. B., *The role of water in opal*. Journal of the Geological Society of Australia, 1965, 211-226.
- [16]. BELTON, D. J., DESCHAUME, O., PERRY, C. C., *An overview of the fundamentals of the chemistry of silica with relevance to biosilicification and technological advances*. PMC, 2012, 1710-1720.
- [17]. LIESEGANG, M. M., MILKE, R., *Silica Colloid Ordering in a Dynamic Sedimentary Environment*. Minerals, 2018, 12.
- [18]. MUSTOE, G. E., *Late Tertiary Petrified Wood from Nevada, USA: Evidence of Multiple Silicification Pathways*. Geosciences, 2015, 286-309.