

إعادة النظر في تصنيف "كربونات" بركنة جبل العرب/جنوب سورية جيوكيميائياً

الدكتور بشار بغدادى*

(تاريخ الإيداع 30 / 10 / 2018. قُبل للنشر في 20 / 1 / 2019)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث مؤشرات جديدة حول كربونات بركنة جبل العرب/جنوب سورية، والتي تبرز استثناء كربوناتها من التصنيف العالمي وفقاً للدراسات السابقة. نوقشت النتائج وتم التوصل لاستنتاجات عُرضت ضمن سيناريو جيوكيميائي من أجل فهم آلية تشكل هذه الكربونات وتراكيبها بالمقارنة مع حالات مشابهة في مناطق بركانية أخرى منتشرة حول العالم. تبين بالنتيجة أن كربونات بركنة جبل العرب تمثل كربونات رسوبية المنشأ هُضمت وتمثلت خلال العمليات المهلية البركانية.

الكلمات المفتاحية: كربونات، عناصر أرضية نادرة، نظائر مستقرة، بركنة جنوبي سورية، تقييم اقتصادي.

* مدرس - قسم الجيولوجيا - كلية العلوم - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

A Geochemical Review of Jabal Al Arab/Southern Syria “Carbonatite” classification

Dr. Bashar Baghdadi*

(Received 30 / 10 / 2018. Accepted 20 / 1 / 2019)

□ ABSTRACT □

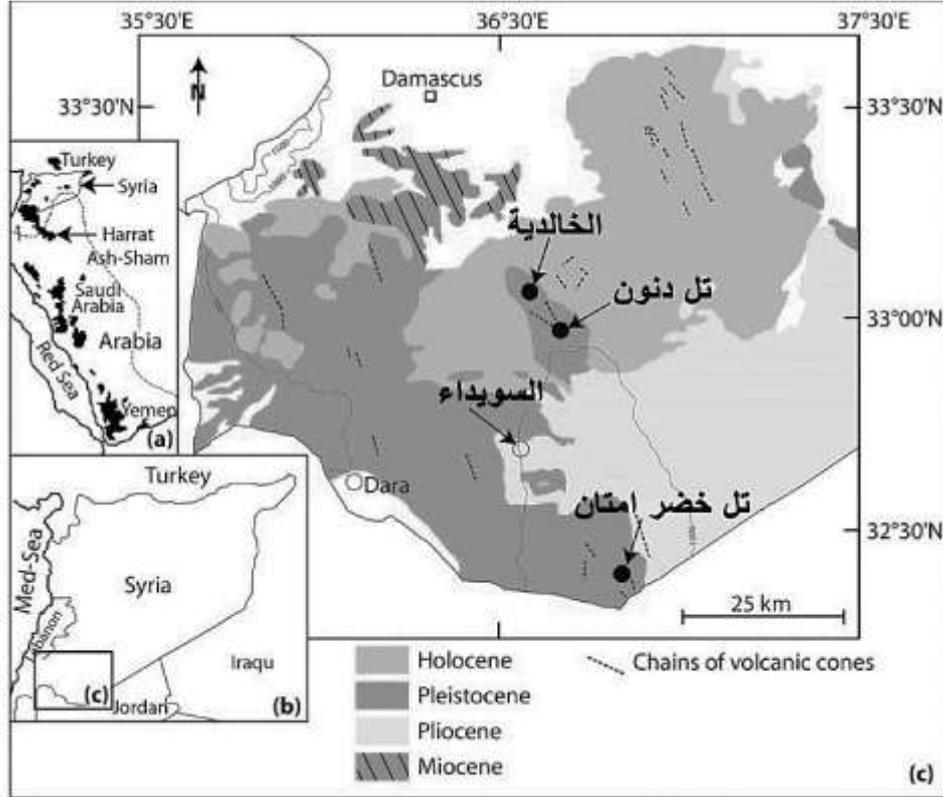
This study provides new indications about Jabal Al Arab/Southern Syria carbonatite, and justifies the exclusion of their carbonates from the international classification upon previous studies. The results were discussed and the conclusions were presented within a geochemical scenario in order to understand the mechanism of formation of these carbonates including their compositions in comparison with similar cases in other volcanic regions around the world. The results show that Jabal Al Arab volcanic carbonates represent sedimentary-origin carbonates that were assimilated during magmatic processes.

Keywords: Carbonatite, Rare earth elements, Stable isotopes, Southern Syria volcanism, Economic evaluation.

* Assistant Professor, Faculty of Science, Damascus University, Damascus, Syria

مقدمة:

تمثل حازات الشام واحداً من أكبر الحقول البركانية في الصفيحة العربية (Camp and Roobol، 1992). وهي تشكل جزءاً من البركة البازلتية القلوية المرتبطة بالحقب الحديث والممتدة اعتباراً من خليج عدن (اليمن) موازيةً للبحر الأحمر وصولاً إلى جنوب شرقي تركيا (الشكل 1: a). وتخترق حازات الشام جنوبي سورية والأردن والسعودية (Ilani et al., 2001)، (Shaw et al., 2013)، (Weinstein et al., 2006).



الشكل 1. (a) انتشار الحقول البركانية في غربي الصفيحة العربية (معدل عن (Krienitz et al., 2007))، والخط المنقط يحدد أبعاد الجزء العربي من النهوض الأفرو-عربي كما تم اقتراحه من قبل (Camp and Roobol، 1992). (b) المنطقة المدروسة وعلاقتها مع الدول المجاورة. (c) خريطة جيولوجية شاملة للجزء السوري من الحقل البركاني لحازات الشام يُظهر انتشار أو توزع الصخور البركانية من الميوسين والهولوسين وموقع بركان الخالدية، تل خضر امتان، وتل دنون.

في سورية، يُمكن تقسيم الحقل البركاني (الشكل 1: b و c) إلى أربعة قطاعات تتباين في أعمارها اعتباراً من الميوسين (Giannérini et al., 1988)، (Mouty et al., 1992)، (Sharkov et al., 1994)، (Krienitz et al., 2007) وتتألف من العديد من المخاريط والانسكابات البركانية. يحتوي العديد من تلك المخاريط على حشوات من القشرة والمعطف على حد سواء، شكلت مواضيعاً للعديد من الدراسات (مثال 2007; Shaw et al., 2003; 1993، Snyder et al., 1993). إنّ براكين الخالدية، تل خضر امتان وتل دنون تعتبر أمثلةً جيدةً عن هذه المخاريط وهي تتوضع في سورية في أعلى صبة بازلتية بليستوسينية (Ponikarov et al., 1963) (الشكل 1: c). تتكون المخاريط الثلاث من انسكابات بازلتية طفيفة وبازلت قلوي وبيروكلاست (قنابل بركانية وسكوريا) وتحتوي على العديد من الحشوات الأساسية وفوق الأساسية من الحشوات المعطفية (حشوات بيريدوتيتية) والقشرية أيضاً (Ismail et al., 2008)، (Nasir and Safarjalani, 2000)، (Sharkov et al., 1989)، (Snyder et al., 1993). ويُعد تل دنون

من أكثر المخاريط غنىً بالحشوات مقارنةً ببراكين الخالدية وخضر امتان. المناطق المسطحة حول هذه المخاريط البركانية مغطاة بطبقة رقيقة من تربة حمراء (Ponikarov, 1986)، وإن الغياب التام للصخور الكربوناتية (حيث أن أقربها يقع على بعد حوالي 50 كم من المنطقة) هو شيء جدير بالملاحظة. من ناحيةٍ أخرى فإن قرب الصخور البازلتية من انهدام البحر الأحمر (Mittlefehldt, 1984) يشير إلى ارتباط البركنة في تلك المنطقة مع عمليات الانهدام في جنوبي سورية.

في عام 1995 قام كل من Mahfoud و Beck بدراسة لصخور كل من بركاني الخالدية وتل خضر امتان سجلاً فيها مشاهداتهما لصخور ودايكات كربوناتية مترافقة مع البازلت وحشوات ومواد بركانية فتاتية و طفية. وقد صنّف الباحثان هذه الصخور الكربوناتية من ضمن صخور الكربوناتيت، داعمين وجهة النظر هذه بأن الكربوناتيت معطفي المصدر عادةً ما يرتبط بالأوضاع الجيولوجية ذات الصلة بعمليات الانهدام القاري وهذا هو الحال بالنسبة للبراكين المدروسة والتي هي مرتبطة بالفالق المشرقي جنوب سورية كما ذكرنا سابقاً. بناءً على ذلك التصنيف تم إطلاق دعوات من أجل استثمار تلك الخامات الكربوناتية الغنية بالعناصر الأرضية النادرة REEs (مثال Jarmakani, 2005)، إضافةً إلى تبني ذلك التصنيف من قبل العديد من الباحثين والمهتمين بهذا الشأن علماً أنّ هذا التصنيف يحتاج إلى المزيد من التدقيق بحسب (Baghdadi, 2013).

أهمية البحث وأهدافه

إن أهمية الكربوناتيت تتأتى ليس فقط من ندرته كصخر ناري فحسب، بل وأيضاً من كون صخر الكربوناتيت ونواتج فسادهما هي الأغنى بالعناصر الأرضية النادرة REEs من بين جميع الصخور الاندفاعية (على سبيل المثال 2010 Long et al.,).

في هذا العمل تم إعادة تقييم العناصر الرئيسية والأثر والعناصر الأرضية النادرة بالإضافة للنظائر المستقرة (أوكسجين وكربون) للصخور الكربوناتية في كل من بركان الخالدية وتل خضر امتان والمصنفة من قبل (Mahfoud, 1995) و Beck) على أنها كربوناتيت. تستند إعادة التقييم هذه إلى نتائج الدراسات التي قام بها (Baghdadi, 2013) والتي تركزت على النمط نفسه من الصخور الكربوناتية والمأخوذة من المنطقة نفسها (جبل العرب) وتحديداً في بركان تل دنون. الفكرة المثيرة في هذا البحث تتأتى من أنّ (Woolley and Church, 2005) قد قاما بتحديد 49 منطقة لتواجد الكربوناتيت حول العالم، أي قام الباحثان بتصنيف صخور الكربوناتيت الموثقة حول العالم مع ترتيبها وفق خصائصها مثل وضعها التكتوني، بنيتها، تركيبها الليثولوجي، الصخور السيليكاتية المرافقة لها، تركيبها الكيميائي، وجود أو غياب المواد المعطية ضمنها، مدى تأثيرها بالتجوية وإلخ، ولكنهما، بمنتهى الوضوح و بشكلٍ مباشر، استثنياً "حرفياً" منطقة بركنة جبل العرب في سورية من ذلك التصنيف ودون أن يقدموا أي مبرر لذلك الاستبعاد، و أفتبس "حرفياً" ما قالوا في تلك الورقة العلمية حول ما يسمى كربوناتيت سورية: (إن موقع جبل العرب في سورية قد تم تحديده على أنه يحتوي على الكربوناتيت خارجي المنشأ (Mahfoud and Beck, 1995)، ولكننا نعتقد أنها على الأرجح ليست كذلك، لذلك فقد تم استبعادها) انتهى الاقتباس.

بالتالي، فإنّ أهداف البحث هي:

1- الوقوف على حقيقة صخور الكربوناتيت في المواقع المحددة في هذا البحث أي كربوناتيت معطفي أم صخور كربوناتية رسوبية؟

2- إعادة النظر بتصنيفها وتقييمها اقتصادياً

طرائق البحث ومواده

إن العينات التي قامت عليها هذه الدراسة قد تم أخذها من:

1- بركان تل دنون (موقعه محدد في الشكل 1:C)، وهي عبارة عن عينات تبدي كميات من الكربونات دون علامات فساد قوية (الشكل 2) وقد تم تحليلها ونشر النتائج في (Baghdadi، 2013). وقد تم أخذها من قاعدة بركان تل دنون حيث تتواجد على شكل حشوات بحجم من 10 إلى 40 سم ومنتشرة بين نواتج اندفاعية (مثل حشوات بيريدوتيتية وبازلت) حول البركان.

2- عينات تم نشر نتائج دراستها في (Mahfoud and Beck، 1995) وقد تم أخذها (بحسب تلك الدراسة) من منطقتين في جنوب سورية:

أ- عينات المنطقة الأولى مأخوذة من بركان الخالدية (موقعه محدد في الشكل 1:C). ب- تل خضر امتان (موقعه محدد في الشكل 1:C). مع العلم أن صور هذه العينات (الجهرية والمجهرية على حد سواء) تشابه في الشكل إلى حد التطابق عينات بركان تل دنون (الشكل 2) بحسب المشاهدات الحقلية والمخبرية وكذلك حسب ورودها في (Mahfoud and Beck، 1995)، لذلك تم الاكتفاء بعرض الشكل 2.



الشكل 2. صورة جهرية لعينة ممثلة للصخور الكربوناتية في مخروط تل دنون (وكذلك للصخور الكربوناتية في كل من تل خضر امتان والخالدية). تبدي العينة طورين أو قسمين مميزين من حيث الألوان، القسم القاتم عبارة عن قطع من البازلت مغروسة ضمن القسم الثاني (باللون الفاتح) الذي يمثل الأرضية عملياً بالنسبة للقسم الأول.

إن معظم العينات السابقة تتألف ويشكل واضح من قسمين رئيسيين: قطع سوداء من البازلت مغروسة ضمن القسم الآخر المكون من كربونات بيضاء مصفرة (الشكل 2) ذات بنية مسامية مع فراغات (فقاعات) متفاوتة الحجم. علاوة على ذلك فإن بلورات كبيرة غريبة عن الصخر (Xenocrysts) يمكن مشاهدتها بشكل ثانوي في الصخر. الوصف البتروغرافي المفصل ونتائج التحاليل الكيميائية للفلزات المختلفة إضافةً لتحليل التركيب النظائري (للأوكسجين والكربون) والعناصر الأرضية جميعها منشورة في المرجعين المذكورين أعلاه.

إن نتائج أبحاث Baghdadi في عام 2013 قد أفرزت معطيات جديدة حول كربونات بركنة جنوب سورية من شأنها أن تسمح بإجراء مقارنات تفصيلية وبالتالي إعادة النظر في تصنيف ذلك النمط من الصخور وعلى وجه الخصوص للاحية الأهمية الاقتصادية والتي تم الإشارة إليها بقوة في عمل Mahfoud و Beck في 1995، إن هذه المقارنات تشكل العمود الفقري لهذا البحث وجوهر الاختلاف عن الدراسات السابقة المشار إليها.

النتائج والمناقشة:

سيتم فيما يلي عرض نتائج الدراسات السابقة من تحاليل للعناصر الرئيسية والأثر والنظائر المستقرة للكربون والأوكسجين، كما سيتم مقارنة تلك التحاليل فيما بينها، وكذلك فيما بينها وبين التحاليل المناظرة لها في أشهر توضعات ومعقدات الكربونات وأكثرها نموذجية حول العالم، وكذلك الأمر مع توضعات الكربونات الرسوبية وخصوصاً تلك المرافقة لتوضعات بركانية أو كربوناتية. علماً أنّ العمل الحقلّي الذي شمل مسحاً ميدانياً للمنطقة وتسجيل المشاهدات الحقلية و أخذاً لعينات بركان تل دنون ووصفها جبرياً ومجهرياً قد تم إنجازهُ ونشر نتائجه كما ذكر سابقاً في (2013 Baghdadi).

1. العناصر الرئيسية

تمّ تلخيص وتجميع تراكيب العناصر الرئيسية لأهم وأشهر المعقدات الكربوناتية حول العالم في الجدول 1 بهدف إظهار التشابهات والتباينات بين الكربونات المدروسة نفسها وكذلك مقارنتها بنماذج مختلفة من الكربونات حول العالم. من الجدول 1 يمكن استنتاج قدر من التشابه فيما بين كربونات تل دنون والكربونات الإيطالية، حيث تُبدي هذه الكربونات تراكيز متقاربة لمعظم العناصر الرئيسية وعلى وجه الخصوص CaO، وهي تختلف عن الأنماط الأخرى من الكربونات بما في ذلك كربونات تل خضر امتان والخالدية. الطف الكربونات في تل خضر امتان والخالدية يُبدي غنىً متوسطاً بـ CaO (أقل مما هو عليه في تل دنون) مع محتوى متدني نسبياً من Na₂O مقارنةً بجميع أنماط الكربونات. إلا أن كربونات تل دنون تبدي أدنى تراكيز من Na₂O و K₂O (حتى بالمقارنة بكابيزرستول ذو التراكيز الأدنى من K₂O) كما يظهر من الجدول 1 مع ملاحظة أنّ الطف الكربوناتية لكابيزرستول كالسييتي مثل كربونات تل دنون ويحتوي على كميات قليلة من Na₂O (Keller, 1989) و إن هذه التراكيز المتدنية تطابق تقريباً تلك الخاصة بالحجر الكلسي الرسوبي (الجدول 1).

إن عينات كربونات تل خضر امتان والخالدية تمثل مجموعة متوسطة بين الناتوروكربوناتية (الكربونات الغني بالقلويات من نمط أولدوينو لينغاي)، وبين الكربونات الكالسييتي أو الفقير بالقلويات (من نمط كابيزرستول) (Mahfoud and Beck, 1995). يُمكن القول أنّ محتوى أوكسيد البوتاسيوم وتراكيز الأوكسيد الأخرى من عينات كربونات جنوب سورية يُشكل تركيباً وسطياً بين كربونات أولدوينو لينغاي (أعلى تراكيز من K₂O) وكابيزرستول (الجدول 1).

يجدر بالذكر هنا، أنه وبالرغم من التشابهات والتباينات في تراكيب العناصر الرئيسية بين الكربونات المدروسة من جهة، والكربونات حول العالم من جهة أخرى، فإنّ مثل تلك التشابهات والاختلافات لا تشكل معياراً نهائياً من أجل أن نعطي حكماً فيما إذا كانت الصخور الكربوناتية هي كربوناتية أم لا. على سبيل المثال فإنّ قطع الحجر الكلسي المشاهدة في الكربونات المشكلة للكربونات الطفي-الكلسي في بولينو مونتيشيليت (إيطاليا) تُظهر أن الحجر الكلسي يبدي تراكيباً من العناصر الرئيسية تطابق أو قريبة من تلك الخاصة بالكربوناتية (Rosatelli et al., 2010) إلا أنه في الحقيقة عبارة حجر كلسي ذو منشأ رسوبي وليس كربوناتية.

الجدول 1. تراكيب العناصر الرئيسية في الكربونات حول العالم وفي منطقة الدراسة.

فورت بورتال (أوغندا)	أولدوينو لينغاي (تنزانيا)		كابيزرستول (ألمانيا)	الكربونات الإيطالية	حجر كلسي رسوبي (إيطاليا)	تل خضر امتان والخالدية	تل دنون
طف عند المخروط	لافا	لافا	طف فتاتي	وسطياً	وسطياً	لافا	وسطياً
تطبقات طفية	1960	1988	معد التبلور	معد التبلور	معد التبلور	معد التبلور	معد التبلور

SiO ₂	0.46				1.41			0.01	0.73	11.03	15.89	33.66	
FeO	0.03	1.90	8.61	1.12	0.04	0.18	1.88	0.73	0.29	1.10	4.14	3.33	4.02
MgO	1.14	10.97	16.03	11.41	0.86	0.40	0.54	0.48	0.26	0.49	8.24	4.56	5.30
MnO	0.01		0.14		0.04	0.03	1.71	0.02	0.25	0.55	0.45	0.29	0.28
CaO	54.22	42.33	27.99	33.11	53.70	54.38	50.41	53.00	13.93	25.29	34.86	33.29	21.85
Na ₂ O	0.04	4.02	6.93	8.63	0.03	0.14	0.14	0.00	30.30	24.68	0.37	0.50	1.60
K ₂ O	0.02	0.58	1.73	0.86	0.02		0.20	0.09	6.55	0.68	0.26	0.86	1.17
SrO	0.06				0.11	0.81							
Total	55.53	59.22	59.70	55.13	54.79	55.94	49.53- 59.81	54.32	51.58	52.79	59.35	58.72	67.88

كالسيت تل دنون/جنوب سورية (Baghdadi, 2013).

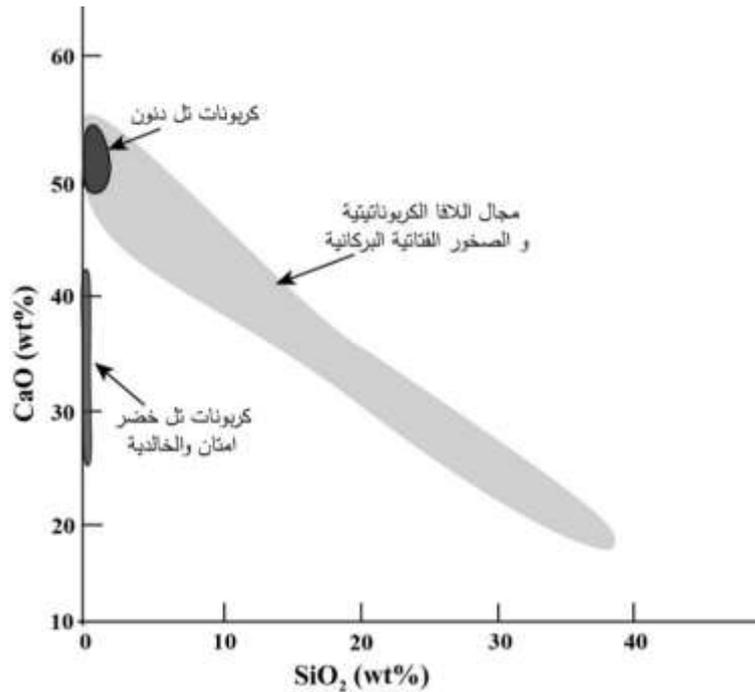
الكالسيت من الكربونات الكلسي الرسوبي في إيطاليا: سان فينانزو، بولينو، كابويلو و مونتيجيو (Stoppa and Woolley, 1997). اختصاراً تم تسميتها جميعها الكربونات الإيطالية.

اندفاعات أولدينو لينغاي/تزانيا في عام 1960 و 1988 منشورة في (Dawson et al., 1987) و (Dawson, 1989). كايستول/ألمانيا (Keller, 1989)

كربونات تل خضر امتان والخالدية/جنوب سورية (Mahfoud and Beck, 1995)

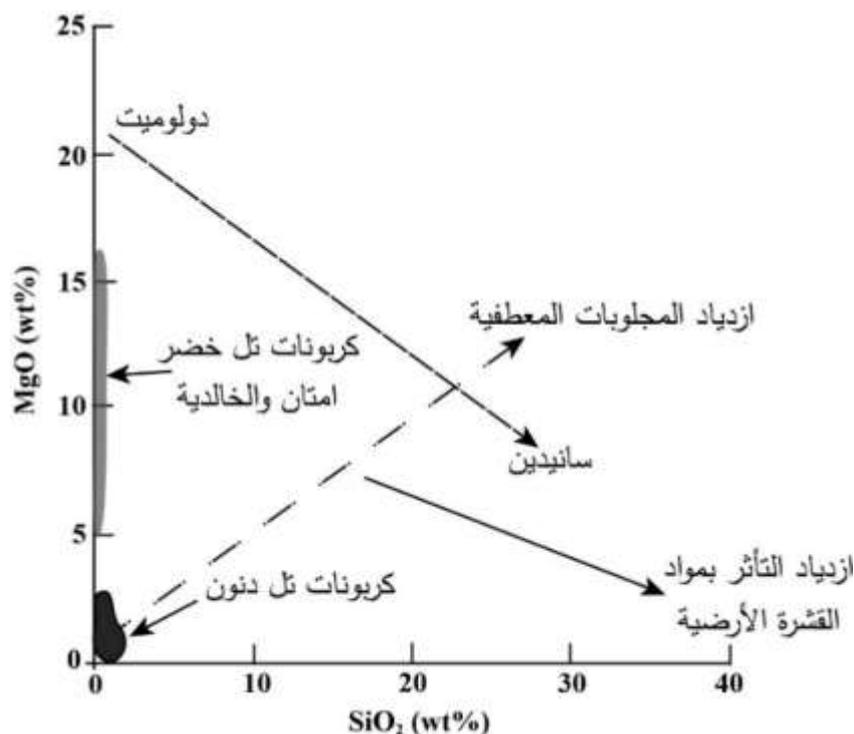
شظايا من حجر كلسي رسوبي من الطف الكربوناتي الكلسي في بولينو مونتيجيليت/إيطاليا (Rosatelli et al., 2010) فورت بورنال/أوغندا (Eby et al., 2009).

من ناحية أخرى، وعلى اعتبار أن الصخور الكربوناتيية (على وجه الخصوص) تحتوي عادةً على مجلوبات فتاتية فإن الطف الكربوناتي عند تحليله لن يكون ممثلاً لتركيب السائل الذي اشتق منه (بسبب اختلاف أو تغير كمية المجلوبات وتراكيبها)، من أجل ذلك فإن طريقة تقوم على تمثيل التراكيب بشكل مجالات من مزائج كربوناتيية سيليكاتيية يمكن أن تساعد في تجاوز هذه العقبة كما في الشكل 3 وذلك من خلال إسقاط المحتوى من SiO₂ % بدلالة CaO %. يُمكن أن يُظهر الشكل 3 بالتالي مجال التغيرات التركيبية بحسب المحتوى من المواد الفتاتية أو المجلوبات غير الكربوناتيية. تم اعتماد هذه الطريقة من قبل (Woolley and Church, 2005) في تصنيف الكربونات، وقد تبين أنه هناك مجالاً (مزيج الصخور الكربوناتيية مع المواد الفتاتية) ذو منحى معين ضمن هذا المخطط يمكن أن يُلاحظ فيه تغيرات اعتباراً من كربوناتية شبه نقي تقريباً (أكثر من 50 % وزناً من CaO وبالتالي أكثر من 90 % كالسيت) وصولاً إلى صخور كربوناتيية تحتوي فقط على 20 % وزناً من CaO، أي أن هذا المجال يُحدد حقلاً يمتد بين صخور ذات محتوى مهمل من السيليكا وصولاً إلى صخور ذات قيم تقارب الـ 40 % SiO₂ وحوالي 20 % CaO. إن هذا الحقل الذي توفره معطيات (Woolley and Church, 2005) يعكس مزيجاً من سائل كربوناتيية وحطاماً قشرياً (من القشرة الأرضية) أو معطياً (Woolley and Church, 2005). إن كربونات تل دنون ضمن هذا المنظور تمثل مزيجاً كربوناتيياً نقياً تقريباً (ذو كميات دنيا من السيليكات) تقع عند حافة حقل الكربوناتية الفتاتي مع أدنى محتوى من السيليكا ما يعني غياب التركيب المعطفي. بالمقابل فإن كربونات تل خضر امتان والخالدية تحددان مجالاً ذو منحى مختلف تماماً عن منحى صخور الكربوناتية في المخطط نفسه (الشكل 3)، حيث تُبدي كربونات تل خضر امتان والخالدية محتوى متوسط من CaO مقارنةً بالكربوناتية عموماً ومدني بالمقارنة مع كربونات تل دنون وذلك مترافق أيضاً مع المحتوى المهمل من SiO₂ وبالتالي غياب المواد السيليكاتيية المعطفية. يُمكن تفسير هذا الفرق في محتوى CaO بين كربونات تل دنون وكربونات كل من تل خضر امتان والخالدية بالمحتوى المرتفع نسبياً من MgO (على حساب CaO) في كربونات تل خضر امتان والخالدية، ما يشير إما إلى ارتفاع نسبة الدلمتة في كربونات هذين البركانين قياساً بتل دنون، أو إلى وجود متضمنات من مجلوبات معطفية سيليكاتيية مغنيزية، إلا أن المحتوى المهمل من السيليكا (صفر تقريباً) تجعل من الخيار الثاني أمراً مستبعداً.



الشكل 3. محتوى SiO_2 بدلالة CaO (% وزناً) من تحاليل منشورة للكربوناتيت (معدل عن Woolley and Church، 2005).

لتأكيد ما سبق ذكره، و بغية إظهار حالة كربونات جنوب سورية مقارنةً بالكربوناتيت معطفي المصدر حول العالم، فإنه من الضروري القيام بإظهار العلاقة بين الكربونات من جهة وبين المتضمنات أو المجلوبات المعطفية السيليكاتية المغنيزية المرتبطة بها من جهة أخرى، كذلك فعل Woolley و Church في 2005. في الشكل 4 (SiO_2 vs. MgO) يظهر أنه هناك منحنيين رئيسيين، منحني يُظهر ترابطاً واضحاً تبديه الصخور الكربوناتيت (مهلية المنشأ) منخفضة المحتوى من السيليكات والتي هي كربوناتيت كلسية بصورة رئيسية (Woolley and Church، 2005) بحيث ترتفع فيها نسبة SiO_2 مع MgO كلما زاد محتواها من التراكيب المعطفية، ومنحني آخر تزداد فيه نسبة SiO_2 مع تناقص نسبة MgO كلما زادت نسب المواد القشرية (من القشرة الأرضية) والتي يغلب عليها التركيب الفلدسباري الذي لا يحوي بطبيعة الحال المغنيزيوم في تركيبه. تم في هذا المخطط إسقاط المحتوى من SiO_2 بدلالة MgO (% وزناً) وتم الاستنتاج أنّ كربونات تل دنون تحدد مجالاً من الصخور مع محتوى مهمل من كل من SiO_2 و MgO ما يشير إلى افتقارها لإشراك أو مزج حطام معطفي أو مواد قشرية وبالتالي فإن هذه الكربونات إما أنها صخوراً كلسية شبه نقية أو أنها لافا كربوناتيتية نقية، وهذا ما ستحسمه نتائج الدراسات اللاحقة في هذا البحث. أما الصخور الكربوناتية لتل خضر اماتان والخالدية فتحدد مجالاً من التراكيب التي يتفاوت فيها التركيب بين كربونات ذات محتوى مرتفع نسبياً من MgO وكربونات ذات محتوى منخفض من MgO ، مع ملاحظة المحتوى المهمل من SiO_2 (صفر تقريباً) أي وبحسب المخطط فإن كربونات تل خضر اماتان والخالدية لا تبدي هي الأخرى تأثراً بالتراكيب المعطفية ولا بالمواد القشرية. وتفسير تفاوت نسب المغنيزيوم فيها هو تفاوت نسبة الدلمتة بين قطبين أو طرفين رئيسيين وهما كربونات تل دنون شبه الخالية من الدلمتة وبين الدولوميت النقي، أو أنها هي الأخرى تمثل لافا كربوناتيتية دولوميتية نقية (الشكل 4)، وهذه النقطة أيضاً تمّ حسمها في الفقرات اللاحقة في هذا البحث.



الشكل 4. محتوى SiO_2 بدلالة MgO (% وزناً) (معدل عن Woolley and Church، 2005).

2. العناصر صغيرة القطر مرتفعة الشحنة ذات الحقل الشديد High Field Strength (HFSE) Elements.

HFSE هي عناصر ذات حركية ضعيفة (Immobile)، أي أنها مقاومة للتحويل ولعمليات الهيدروثيرمالية وبالتالي فإن محتواها في الصخور المدروسة لا يتغير بنتيجة العمليات الجيولوجية اللاحقة، وبالنتيجة فإن محتوى الصخر من HFSE غالباً ما يكون ممثلاً لتكوين الصخر الأصلي (أي قبل التعرض لعمليات جيولوجية لاحقة). يكون الكرووناتيت عامةً غني بـ Nb و Ta، وغني بشكل طفيف بـ Zr (Möller، 1989)، وهذا لا يتوافق مع كرووناتيت دنون أو كرووناتيت كل من تل خضر امتان والخالدية بحسب الجدول 2.

الجدول 2. المحتوى من بعض عناصر HFSE في الكرووناتيت (النموذجي) وفي عينات تل دنون وتل خضر امتان والخالدية.

العينة	العنصر		
	Nb (ppm)	Ta (ppm)	Zr (ppm)
الكرووناتيت الكلسي	343.1	9.1	281.4
الكرووناتيت المغنيزي	255.4	8.1	248.4
تل دنون	0.26	0.16	0.41
تل خضر امتان والخالدية	-	1.57	87.44

الكرووناتيت الكلسي والكرووناتيت المغنيزي (Chakhmouradian، 2006).

كرووناتيت تل دنون (Baghdadi، 2013).

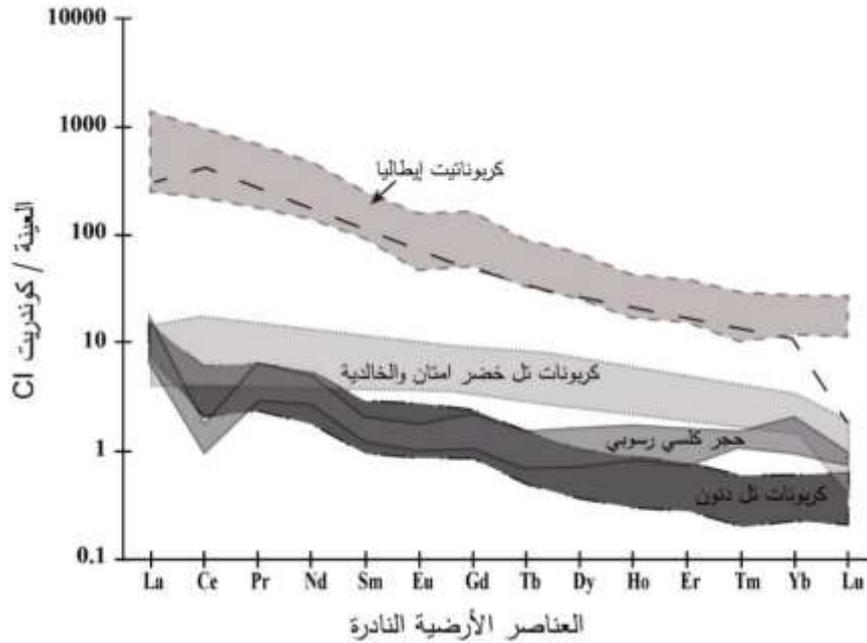
كرووناتيت تل خضر امتان والخالدية (Mahfoud and Beck، 1995).

(-) غير معطاة (تراكيدها أدنى من أن يتم اكتشافها كميًا بحسب (Mahfoud and Beck، 1995)).

يُبدى الكربوناتيت (سواء الكلسي أو المغنيزي منه) قيمة أعلى بكثير من القيم التي تبديها الكربونات المدروسة، فعلى سبيل المثال محتوى Nb في الكربوناتيت (الكلسي مثلاً) يُعادل 1320 ضعفاً قيمة Nb في كربونات تل دنون، وكذلك فإن قيمة Ta تمثل حوالي 57 ضعفاً قيمته في كربونات تل دنون، كذلك الأمر بالنسبة لكربونات كل من خضر امتان والخالدية، فمثلاً تعادل قيمة Ta في الكربونات (الكلسية مثلاً) حوالي 6 أضعاف قيمته في كربونات تل خضر امتان والخالدية، وفي الكربونات المغنيزية يعادل 5 أضعاف. إلا أنه، ومن أجل الدقة والأمانة العلمية، فإنه، وعلى الرغم من أن الغنى ب Nb قد تم اعتباره تقليدياً علامة جيوكيميائية هامة لتمييز الكربوناتيت إلا أن هناك العديد من الأمثلة عن الكربوناتيت التي محتواها من Nb في حدود متدنية جداً لدرجة أن التقنيات المستخدمة عادةً لذلك النمط من التحاليل (مثل مطياف الكتلة المقترن بالبحث بالبلازما) لا يمكن لها كشفه وتحليله (Dunworth and Bell، 2001). هناك حالات حتى يكون فيها الكربوناتيت ذو محتوى من Nb أدنى مقارنةً بالصخور الكربوناتية المحيطة به (Le ، 1992). علاوةً على ذلك فهناك أيضاً عدد من الأمثلة عن الكربوناتيت الفقير ب Zr، بعضاً منها يحتوي Zr أقل مقارنةً بالصخور المحيطة المعرضة للتبدل أو التجوية بالمحاليل (Bagdasarov، 1993). إلا أن هذه الأمثلة الاستثنائية المذكورة تبدي بالمقابل محتوى مرتفعاً من عناصر أثر أخرى مثل العناصر الأرضية النادرة وهذا مناقض لما هو مشاهد في كربونات تل دنون على سبيل المثال كما سنرى لاحقاً. بالنتيجة فإن الكربونات المدروسة لا تبدي محتوى من عناصر HFSE مماثل لذلك الذي يبديه الكربوناتيت حول العالم ما يعطي مؤشراً واضحاً على الاختلاف بين العينات المدروسة والكربوناتيت.

3- العناصر الأرضية النادرة REEs.

بالإضافة إلى الغنى الاستثنائي للكربوناتيت للنموذجي بالعناصر الأرضية النادرة (وهو ما سيناقد بالتفصيل في فقرة: القيمة الاقتصادية لكربونات تل دنون وتل خضر امتان والخالدية)، فإن نموذج (Pattern) توزع العناصر الأرضية النادرة REEs عادةً ما يكون ذو شكل مميز للكربوناتيت (الشكل 5)، حيث يكون مائلاً بشكل قوي وواضح باتجاه العناصر الأرضية النادرة ذات العدد الذري المرتفع (HREE)، أي يكون النموذج مغتنياً بالعناصر الأرضية النادرة الخفيفة (LREE) بالنسبة للثقيلة منها (Loubet et al.، 1972، Möller et al.، 1980، Treiman ، 1985، Viladkar and Pawaskar، 1989، Brassinnes et al.، 2005). من الطبيعي إذاً أن تتم مقارنة شكل نموذج توزع العناصر الأرضية النادرة في كربونات بركنة جنوبي سورية مع شكل نموذج توزع العناصر الأرضية النادرة في كربوناتيت نموذجي (وقد تم اختيار الكربوناتيت الإبطالي)، وكذلك المقارنة مع نموذج توزع العناصر الأرضية النادرة في كربونات رسوبية، واستخلاص مدى التشابه أو الاختلاف بين كربونات جنوبي سورية وبين الكربوناتيت والحجر الكربوناتيت الرسوبي.



الشكل 5. نماذج توزيع العناصر الأرضية النادرة (بالنسبة للكوندريت) في الصخور الكربوناتيّة في كل من تل دنون وتل خضر امتان والخالدية بالمقارنة مع نماذج توزيع نفس العناصر في كربونات نموذجي (الكربونات الإيطالي (Stoppa and Wooley, 1979). الحجر الكلسي الرسوبي (من معقد كربوناتيت بولينو/إيطاليا) بحسب (Rosatelli et al., 2010).

بحسب الشكل 5 فإن الكربوناتيت الإيطالي (Le Bas، 1996) يبدي نموذجاً شبه منتظم إلى حدّ ما مع ميل واضح من العناصر الخفيفة (LREE) باتجاه العناصر الأثقل (HREE) حيث أن $(La/Yb)_n$ يصل إلى 130 مع محتوى مرتفع من جميع العناصر الأرضية النادرة و هذا النمط يُعتبر نموذجياً للكربوناتيت. ويُمكن ملاحظة شواذ سالب صغير من اليوروبيوم Eu (يعتبر إستثنائياً في الكربوناتيت) يظهر في نموذج كربوناتيت إيطاليا، إلا أن ذلك يبدو وكأنه خاصية لطيف واسع من أنماط الصخور الواقعة في كربوناتيت تلك المنطقة (Peccerillo et al., 1998) (وهذا ليس موضوع بحث هذه الورقة). على أي حال فإن كربونات تل دنون تبدو مفقورة بشكل شديد بمحتواها من العناصر الأرضية النادرة مقارنةً بالكربوناتيت الإيطالي و مع أن شكل نموذج REEs لكربونات تل دنون يشابه بشكل عام شكل نموذج REEs للكربوناتيت الإيطالي من حيث الغنى النسبي بالعناصر الخفيفة بالنسبة للعناصر الثقيلة إلا أنّ الميل من الخفيفة باتجاه الثقيلة أقل بشكل واضح من تلك التي يبديها الكربوناتيت حيث أن $(La/Yb)_n = 23.59$ إلى 34.24 ، ويُلاحظ غياب الشواذ السالب في اليوروبيوم Eu إلا أن شواذاً سالباً في السيريوم Ce في كربونات تل دنون يمكن ملاحظته وهذا سيتم الحديث عنه لاحقاً في هذا النص.

بالنظر إلى كربونات تل خضر امتان والخالدية فإنه يجدر بالذكر هنا أن (Mahfoud and Beck، 1995) ميّزا ثلاثة أنماط (ذات أصل ماغمي واحد) مما أسماها كربوناتيت: قواطع (Dikes)، طف، و لافا. الطف (وهو عينة وحيدة وسيتم الحديث عن إشكالياتها) يُظهر النسب الأعلى من حيث محتواها من REEs مع نموذج مغتني بشكل طفيف بالعناصر الأرضية الخفيفة LREE ($(La/Yb)_n = 18.76$)، في حين أن اللافا والقواطع تبدي محتوى منخفض نسبياً من REEs و دون تفاوتات مهمة بين تراكيز LREE و HREE ($(La/Yb)_n = 2.52 - 4.68$) أي أن شكل النموذج أكثر استقامة وأقل ميلاً مقارنةً بكربوناتيت إيطاليا. إنه من الملفت والغريب المحتوى من العناصر الأرضية النادرة في عينة الطف الكربوناتي لبركان الخالدية بحسب ما يظهر من معطيات (Mahfoud and Beck، 1995)،

لأن هذه القيم تبدو استثنائية وغير منسجمة مع باقي القيم للعينات الخاضعة لنفس الدراسة (الفرق في محتوى REEs بين هذه العينة وباقي العينات وسطياً يعادل 50 ضعفاً!)، وبالمناسبة فإن عينة واحدة فقط من العينات المدروسة في ذلك المرجع هي التي أبدت هكذا قيم استثنائية في حين أن باقي العينات جميعها أبدت قيماً من العناصر الأرضية النادرة قريبة من تلك التي تبديها عينات بركان تل دنون، يُعتبر ذلك مثيراً للاستغراب ويدعو للتساؤل حول الدقة في اختيار تلك العينة من أجل تحليلها (وهو أمر وارد ولا ينتقص من أي عمل) بحيث أن تلك العينة لم تكن ممثلة بشكل جيد للقسم الكربوناتي من الصخر أو أن العينة مختلطة و متأثرة بمواد معطفية (Xenocryst) موجودة في الصخر نفسه وإلا فلماذا لم تتكرر مثل تلك القيم الاستثنائية في باقي العينات أو في عدد منها على الأقل؟ ولماذا هي عينة وحيدة فقط من الطف الكربوناتي؟. بناءً عليه يُمكن تجاهل قيم هذه العينة والتعامل مع باقي العينات في تل خضر امتان والخالدية على أنها هي الممثلة للمحتوى الأدق من العناصر الأرضية النادرة على اعتبار أنها تمثل عينات متعددة من أنماط الصخر الذي تنتمي إليه (أي ليست عينات وحيدة ومفردة) بالإضافة لأن القيم التي تبديها من REEs منسجمة فيما بينها.

إن تلك الكربونات (تل خضر امتان والخالدية) تبدي محتوى منخفضاً من REEs. مقارنةً بالكربونات، وبالمقارنة مع كربونات تل دنون فإن كربونات كل من تل خضر امتان والخالدية تبدي قيماً قريبة أو أعلى بشكل طفيف جداً. وتجدر الإشارة هنا إلى أن قيماً لعناصر مثل Pr، Nd، Sm، Gd، Dy، Ho، Er، Tm لم يتم تحليلها في دراسة (1995 Mahfoud and Bek،) و تم رسم مخطط نماذج توزع REE دون تلك القيم وذلك من خلال اعتبار أن تلك العناصر تأخذ قيماً وسطية بين قيمتين معروفتين (مثل Gd الذي لم يتم تحليله و تم استنتاجه كوسطي بين قيم كل من Eu و Tb)، ولو كانت تلك القيم معطاة في تلك الدراسة لأظهر نموذج توزع العناصر الأرضية النادرة لتل خضر امتان والخالدية شكلاً معبراً بشكل أدق من شأنه أن يظهر تباينات طفيفة أو كبيرة بين قيم تلك العناصر مثل تلك التي يظهرها نموذج تل دنون.

بجميع الأحوال فإن نموذج تل خضر امتان والخالدية يُظهر شكلاً عاماً مماثلاً لشكل نموذج تل دنون والكربونات الإيطالي من حيث الغنى النسبي بمحتواه من العناصر الأرضية النادرة الخفيفة مع فقر نسبي بالعناصر الثقيلة، إلا أن الميل أقل بشكل واضح، أي أن الاغتناء النسبي بـ LREE بالنسبة لـ HREE ضعيف قياساً بنموذج الكربونات. الآن، إذا ما تمت مقارنة نماذج العناصر الأرضية النادرة للكربونات في العينات المدروسة وللـ كربونات الإيطالي بتلك الأنماط (النموذجية) الخاصة بالحجر الكلسي الرسوبي (المأخوذة من نفس منطقة الكربونات الإيطالي بما أن منطقة الدراسة هنا لا يظهر فيها حجر كلسي)، فإنه يمكن ملاحظة التالي: في الحقيقة، يُبدي الحجر الكلسي قيماً من $(La/Yb)_n$ تتراوح بين 6.4 و 18، أقل من تلك الخاصة بتل دنون (23.6 - 34.2) ولكن محتواها من REEs يقع بغالبيتها ضمن مجال تل دنون، و لا يبدو أن HREE في الحجر الكلسي قد خضعت لتمييز مهم بالنسبة لـ LREE مقارنةً بالكربونات، وهي علاوةً على ذلك تبدي محتوى أعلى بشكل طفيف مقارنةً بـ HREE لتل دنون.

إن الشواذ السالب المرتفع نسبياً من السيريوم Ce المشاهد في نموذج REEs للحجر الكلسي يمكن رده إلى البيئة السطحية ذات الفعالية الأوكسجينية و/أو للشروط القلوية التي تعزز أكسدة Ce^{3+} إلى Ce^{4+} (Pourret et al، 2008). (Möller and Bau، 1993). إن هذه الخاصية (أي الشواذات في السيريوم) تمتاز بها الصخور الكربوناتيّة الرسوبية و يمكن ملاحظتها أيضاً على نموذج العناصر الأرضية النادرة لكل من تل دنون الذي يبدي شواذاً سالباً من السيريوم، و تل خضر امتان والخالدية ذات شواذات السيريوم الأقرب لأن تكون موجبة والتي تعكس أيضاً شروطاً

سطحية إنما مع نسب أعلى من الدلمتة حيث تساهم دلمتة الكالسيت إلى دولوميت بإنقاص الشواذ السالب من السيريوم (Tostevin et al., 2016)، و هذا يتوافق مع ما تم استنتاجه من تركيب العناصر الرئيسية سابقاً في هذه الورقة (أنظر العناصر الرئيسية) من أن كربونات تل دنون تعتبر كلسية نقية تقريباً فيما كربونات تل خضر امتان والخالدية هي كربونات مدلمتة. يجب التأكيد هنا على أنه وبالرغم من التشابهات في نماذجهم من العناصر الأرضية النادرة لنماذج الكربونات حول العالم إلا أن كربونات تل دنون وتل خضر امتان والخالدية تُعتبر شديدة الافتقار بالعناصر الأرضية النادرة مقارنةً بكربونات العالم. إن (Mahfoud and Beck, 1995) قد أرجعوا العوز أو النقص في العناصر الأرضية النادرة في عينات كربونات تل خضر امتان والخالدية لطبيعة تلك الكربونات التي تعزز ذلك الافتقار نتيجةً للمسامية العالية (وخصوصاً في الطفية منها) وفعالية عمليات الغسل. وهنا نود أن نشير على أن مثل عمليات الغسل المشار إليها من شأنها أن تؤدي إلى إفقار الكربونات بالعناصر الأرضية النادرة ولكن بالمقابل سيكون هناك إعادة توزيع وتركيز لهذه العناصر الأرضية النادرة في فلزات ثانوية (كالفلزات الفوسفاتية أو الهيدروكسيدية) ضمن الصخر نفسه (Nasraoui et al., 2000) أو ضمن توضعات رسوبية في الحقل البركاني نفسه أو بالقرب منه وهو ما لم يسجل مشاهدته لا في الصخر المدروس ولا في المنطقة.

4. التركيب النظائري للكربون والأوكسجين

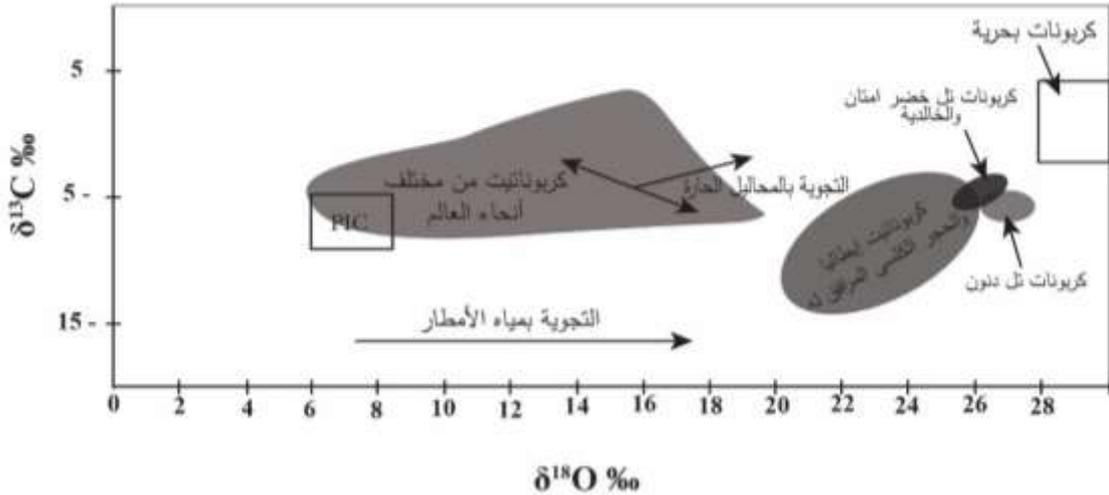
في عملية استقصاء أصل الكربونات التي يُشك في أصلها وصلتها بالمعطف فإنّ واحدةً من الأدوات التي يتم عادةً اللجوء إليها هي تحليل النظائر المستقرة للأوكسجين والكربون للصخور الكربوناتية ((Pineau et al., 1973)، (Deines and Gold, 1973)، (Nelson et al., 1988)، (Santos et al., 1990))، وبناءً عليه فإن النمط المدروس من الصخور يتم تصنيفه على أنه ناتج إما عن عملية تفاضلية، أو أنه حجر كلسي مصهور أو معرض للتجوية، و/أو ناتج ترسب من محاليل هيدروثيرمالية (Pecora, 1996). ويتم إسقاط قيم نظائر الأوكسجين والكربون ضمن مخطط يُعبر عن علاقة النظيرين بدلالة بعضهما البعض، وقد حدّد (Taylor et al., 1967) مجالاً من قيم نظائر الأوكسجين والكربون ضمن المخطط المذكور تكون الصخور الواقعة ضمنه معطفية وتصنف على أنها كربوناتية أولي المنشأ، يُطلق على ذلك المجال أسم صندوق الكربوناتية الناري أولي النشأة (PIC: Primary Igneous Carbonatite). أي أنّ وقوع الصخر المدروس ضمن المربع أو الصندوق PIC المحدّد بقيم نظائر الأوكسجين $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (+6.0 إلى +8.5%) وقيم نظائر الكربون $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (-5.1 إلى -7.3%) يمثل مؤشراً قوياً على كون الصخر هو كربوناتية معطفي المنشأ (الشكل 6). إذاً، فعملية إسقاط قيم نظائر الأوكسجين والكربون ضمن المخطط المذكور من شأنه أن يعطي مؤشراً إضافياً حول أصل وطبيعة العينات المدروسة وإلى أي مدى تقترب أو تبتعد في التصنيف عن الكربوناتية أولي النشأة.

في التحاليل المتوفرة يُمكن ملاحظة ما يلي: إنّ كربونات تل دنون أعطت قيماً من $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ تتراوح بين -5.41 و -6.65% (الجدول 3) وهي قيمة تتسجم مع تلك الخاصة بالكربونات المشتقة من المعطف الأرضي. في حين أن التركيب النظائري للأوكسجين $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ يبدي غنىً كبيراً جداً (بين +26.57 و +27.33%) وهي قيم أعلى بشكل واضح وكبير من قيم نظائر الأوكسجين في الكربونات معطفية المصدر (+6 إلى +9% تقريباً) والتي تم تحديدها من قبل (Taylor et al., 1967) (الشكل 6). إنّ القيم التي تبديها عينات تل دنون في الحقيقة قابلة للمقارنة بشكلٍ جيّدٍ مع كربونات بركانيّ تل خضر امتان والخالدية جنوب سورية والمدروسين من قبل (Mahfoud and Beck, 1995) (الجدول 3) وهي متطابقة تقريباً.

الجدول 3. تحاليل التراكيب النظائرية للأوكسجين والكربون في كربونات بركان تل دنون و كربونات براكين تل خضر امتان والخالدية.

العينات	$\delta^{13}\text{C}$ (‰VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰SMOW)
كربونات تل دنون	بين -5.41 و -6.65	بين +26.57 و +27.33
كربونات تل خضر امتان والخالدية	بين -3.6 و -6.35	بين +25.02 و +26.67

المصدر لتحاليل عينات تل دنون هو (Baghdadi, 2013) المصدر لتحاليل عينات خضر امتان والخالدية هو (Mahfoud and Beck, 1995).
 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) العينة المرجعية لقياس نظائر الكربون.
 SMOW (Standard Mean Ocean Water) العينة المرجعية لقياس نظائر الأوكسجين.



الشكل 6. مقارنة معطيات نظائر الأوكسجين والكربون للكربونات المأخوذة من كل من تل دنون وتل خضر امتان والخالدية مع معطيات الكربونات حول العالم. الأسهم تشير إلى المسارات المحتملة التي يمكن أن تنتج عن العمليات الرئيسية المسؤولة عن التغير النظائري للكربونات بحسب (Ray and Ramesh, 1999).

يجدر بالذكر هنا أنه ليس من النادر من أجل معطيات نظائر كل من الكربون والأوكسجين في الكربونات أن تقع خارج مجال أو حقل الكربونات المعطية الأولي (PIC) (الشكل 6). ولقد اقترح من قبل العديد من الباحثين مثل (Hay, 1978)، (Henderson, 1982)، و (Dawson, 1993) أن السبب وراء القيم المرتفعة لـ $\delta^{18}\text{O}$ هو ترسب الكالسيت الثانوي الغني بـ ^{18}O اعتباراً من الماء المطري الذي يرشح ويتفاعل بالغسل (Leaching) ضمن الكربونات عالي المسامية والنفوذية. أو أن التغيرات في قيم $\delta^{18}\text{O}$ الغير مصحوبة بتغيرات في قيم $\delta^{13}\text{C}$ عادة ما تشير إلى تعرية أو تجوية للكربونات عند درجات حرارة منخفضة بواسطة المحاليل الهيدروثيرمالية الغنية بالمياه (Santos and Clayton, 1995). إلا أنه لا أثر لأي من المظاهر الهيدروثيرمالية قد تمت مشاهدته في كربونات بركنة جنوبي سورية، لا بتروغرافياً ولا حتى من حيث التركيب الفلزي. بالإضافة إلى أن قيمة $\delta^{18}\text{O}$ المساوية لحوالي 27 ‰ تُعتبر من بين الأعلى مقارنةً بالكربونات حول العالم.

إن مثل هكذا قيمة مرتفعة لـ $\delta^{18}\text{O}$ (حوالي +26 أو +27 ‰) قد تم مشاهدتها وتسجيلها ضمن حقل الكربونات الإيطالي ولكن من أجل حجر كلسي رسوبي (Stoppa and Wooley, 1997) (أنظر الشكل 6)، وبالتالي فإن قيماً كهذه لنظائر الأوكسجين تُعتبر عادية وطبيعية من أجل الحجر الكلسي الرسوبي المنشأ وليس الكربونات.

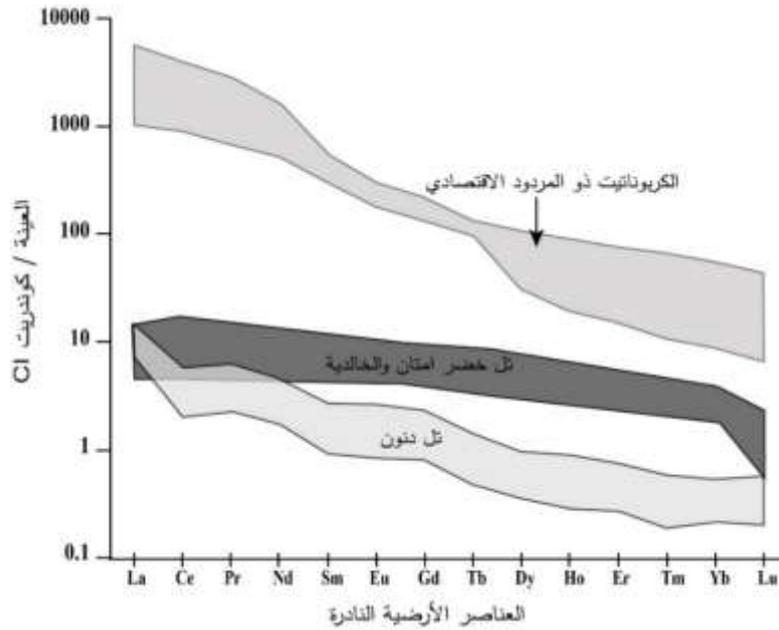
في الحقيقة فإن الطريقة الأبسط من أجل تفسير قيم كل من $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ هي اعتبار أن الصخور الكربونانية لتل دنون وتل خضر امتان والخالدية عبارة عن حجر كلسي رسوبي بما أن قيم $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ للحجر الكلسي الرسوبي أو

للكربونات الرسوبية هي: $\delta^{13}\text{C}$ من -6.6 حتى +2.0 و $\delta^{18}\text{O}$ من +20.3 حتى +29.6 (Keith and Weber, 2009)، (Gishler et al., 2009).

5. القيمة الاقتصادية لكربونات تل دنون وتل خضر امتان والخالدية.

تمثل المعقدات الكربوناتية بشكل عام والصخور القلوية الانداساسية ونواتج تجويتها بطبيعة الحال المصدر الأول للخامات الغنية بـ REE (Long et al., 2010)، وقد اعتُبر الكربوناتيت لمدة خمسون عاماً مضت المصدر الأول للنيوبيوم Nb والعناصر الأرضية النادرة REE، وعلى وجه الخصوص العناصر الأرضية النادرة الخفيفة (La، Ce، Pr، Nd) (Xu, 2010). ولقد قام (Orris and Grauch, 2002) بإعداد قائمة تشتمل على أكثر من 100 موقعاً للكربوناتيت الحاوي على فلزات غنية بـ REE، كما أن وصفاً موجزاً ومفيداً لتواجد وانتشار التوضعات المعدنية أو الفلزية الغنية بـ REE حول العالم يمكن الاطلاع عليه في (Mariano, 1989) و (Woolley, 1987) وكذلك في (Wall and Mariano, 1996). ونظراً لاستخداماتها المتنوع والواسعة في التكنولوجيا الحديثة وتطبيقاتها فإن الطلب قد تزايد بشكل كبير على REEs خلال العقود الأربعة أو الخمسة الأخيرة، وإن التوضعات ذات القيمة الاقتصادية من REEs غير شائعة الانتشار وعدداً قليلاً منها لديه إنتاجية عالية مثل آيرون هيلز (كولورادو، الولايات المتحدة) (Long et al., 2010)، قمة ويلد (أستراليا) (Lottermoser 1990)، وتوضعات بايان أوبو (منغوليا، الصين) (Yang et al., 2011).

في سورية، تم التنويه بأهمية كربونات جبل العرب مع التوصيات بالتقيب واستثمار الفلزات الحاوية على العناصر الأرضية النادرة والمرتبطة بهذه الصخور من قبل بعض الباحثين في هذا المجال (مثال Jarmakani, 2005). من أجل التحقق من ذلك فمن الممكن إجراء مقارنة بين هذه التراكيز وتلك ذات القيم الاقتصادية الهامة حول العالم (Von Maravic and Morteani, 1980، Lottermose, 1990، Long et al., 2010، Yang et al., 2011)، ومن ثم الاستنتاج فيما إذا كانت هذه الكربونات تبدي أهمية اقتصادية وقابلية للاستثمار. يُمثل الشكل 7 هذه المقارنة بحيث يظهر ببساطة وبوضوح أن الصخور الكربوناتية لتل دنون تبدي تراكيزاً متواضعة جداً (من 100 إلى 800 مرة أقل تقريباً) من العناصر الأرضية النادرة مقارنةً بتلك ذات القيمة الاقتصادية، كذلك الأمر فإن كربونات تل خضر امتان والخالدية تبدي تراكيزاً منخفضة مقارنةً بالتراكيز القابلة للاستثمار عالمياً (من 15 إلى 300 مرة أقل تقريباً)، وبالتالي يمكن أن نستنتج أن كربونات جنوب سورية هي غير ذات قيمة اقتصادية على الرغم من التشابهات النسبية في الشكل العام لنموذج العناصر الأرضية النادرة للكربوناتيت كما ذكرنا سابقاً (الشكلين 5 و 7). لا بل إن هذه الصخور تبدي محتوىً من العناصر الأرضية النادرة يقع ضمن مجال الحجر الكلسي الرسوبي (الشكل 5).



الشكل 7. مخطط نماذج العناصر الأرضية النادرة (بالنسبة للقيم الكوندريتية) في كربونات بركنة جنوبي سورية (جبل العرب) مقارنةً بالكربونات ذو القيمة الاقتصادية والخاضع للاستثمار عالمياً.

الاستنتاجات والتوصيات:

- من خلال كل ما تقدم من عمل ومقارنات فقد توصلَ البحث إلى ما يلي:
 - تُظهر كربونات تل دنون وتل خضراء امتان والخالدية تراكيزاً من العناصر الرئيسية مشابهة لتلك (وخصوصاً من حيث محتوى CaO) التي يبديها كل من الكربونات والحجر الكلسي الرسوبي وبالتالي فإن التشابه بتكوين العناصر الرئيسية ليس دليلاً كافياً لتكون الكربونات المدروسة كربوناتية.
 - إنّ كربونات جنوب سورية بحسب العناصر الرئيسية هي كلسية (تل دنون) وكلسية دولوميتية (تل خضراء امتان والخالدية)، ولا تبدو أنها تمثل مزيجاً من مواد كربوناتية مع مركبات سيليكاتية معطفية أو قشرية، وإنّ محتواها من السيليكا مهملاً أو ضعيف جداً.
 - تُظهر دراسة العناصر HFSE أنّ كربونات جنوب سورية تبدي قيماً تُعتبر صغيرة جداً لا تقارن بتلك التي يبديها الكربونات وخصوصاً بالنسبة لعناصر مثل Nb، Ta، Zr التي عادةً ما تكون ذات قيم مرتفعة في الكربونات معطفية المنشأ.
 - تُبدي الكربونات المدروسة نماذجاً لتوزع REEs يتشابه لحدٍ ما مع نماذج توزع REEs في الكربونات إلا أنها نماذج ذات ميول ضعيفة أو بمعنى آخر أقلّ اعتناءً بـ LREE بالنسبة للثقيلة منها. إضافةً لذلك، فإن كربونات جنوب سورية فقيرة جداً بـ REEs مقارنةً بالكربونات حول العالم، وهي تبدي تراكيزاً من هذه العناصر مشابهة لتلك التي تبديها الصخور الكربوناتية الرسوبية.
 - بالنسبة لتكوين نظائر الكربون والأوكسجين، فإن كربونات جنوب سورية تبدي قيم من $\delta^{13}C$ تتراوح بين -5.78 و -5.52‰ لكربونات تل دنون و بين -3.6 و -6.41‰ وهذا ينسجم مع القيم التي تبديها الكربونات المشتقة من المعطف وفي الوقت ذاته توافق الحد الأدنى لقيم $\delta^{13}C$ في الصخور الكربوناتية الرسوبية، إلا أن القيم

المرتفعة من $\delta^{18}\text{O}$ (بين +26.57 و +27.33 % في ثل دنون و بين +25.02 و +26.67 % في ثل خضر امتان) تتجاوز أعلى قيمة موثقة لـ $\delta^{18}\text{O}$ بالنسبة للكاربوناتيت معطفي المنشأ، ولا تُعتبر التجوية و لا العمليات الهيدروثيرمالية كافيتين لتفسير هذه القيم المرتفعة خصوصاً مع غياب أي أثر هيدروثيرمالي في الصخور المدروسة بحسب الدراسات السابقة والدراسة الحالية، بل إنّ هذه التراكيب النظائرية تقع ضمن مجال التراكيب النظائرية (C و O) للحجر الكلسي الرسوبي ويمكن ببساطة تفسيرها بأنها رسوبية المنشأ.

○ من ناحية القيمة الاقتصادية لكاربونات جنوبي سورية، فإنه وبالمقارنة مع توضع الكاربوناتيت الاقتصادية المعروفة والمستثمرة عالمياً، لا تبدي عينات الصخور الكاربوناتية المدروسة أهمية اقتصادية، حيث أن محتواها من REEs يُعتبر ضعيف جداً قياساً بالكاربوناتيت وهو محتوى ينسجم مع ذلك الذي يبديه الحجر الكلسي الرسوبي. إضافة لكل هذه الاستنتاجات، فإن بنية الصخور الكاربوناتية (الفراغية الفقاعية) المدروسة تشير إلى إدخال أو اختراق ماغمي شديدة الغازات، وإن الكاربونات المدروسة تحتوي على كميات كبيرة نسبياً من الكالسيت والدولوميت، تماماً مثل الحجر الكلسي الرسوبي، ولكنها متوضعة ضمن صخور بركانية أو مخترقة لصخور بركانية و تحتوي شظايا بازلتية و بعضاً من البلورات الغريبة (Xenocrysts)، كل ذلك يقودنا إلى اقتراح أنه وخلال اندفاع الماغما البازلتية القلوية فإن اختراقاً لصخور كاربوناتية رسوبية (عميقة) أدى إلى انصهارها جزئياً مشكلةً سائلاً كاربونائياً غير قابل للامتزاج (Immiscible) تبرّد وتبلور لاحقاً على السطح، وإن التوازن (أو التوازن الجزئي) بين السيليكات والمحاليل الكاربوناتية نجم عنه خصائص جيوكيميائية مشابهة لحد ما لجيوكيمياء الكاربوناتيت. إن فرضيةً مشابهة قد تم اقتراحها من قبل (Bogoch and Magaritz, 1983) لتفسير تواجد كاربونات ذات خصائص جيوكيميائية مشابهة للكاربوناتيت مع محتوى مهم من REE مرافقة لدايكات من الدياباز في سيناء بمصر. كذلك أيضاً فإن الحجر الكلسي الرسوبي قد تم تسجيل استيعابه وإشراكه في عمليات الانغراز (subduction) من أجل فهم وتفسير الكاربوناتيت الإيطالي والحجر الكلسي المرافق له (Peccherillo, 1998). وإن جبل فيزوف يُعتبر مثلاً جيداً عن استيعاب الكاربونات الرسوبية بعملية البركنة، فلقد تم إظهار كيف أن محتبسات من الكاربونات وانبعاثات من CO_2 في جبل فيزوف هي عبارة عن مظاهر سطحية لاندساسات عميقة من الماغما البازلتية من قاعدة أو ركيزة من الكاربونات الرسوبية مترافقة باستيعاب لصخور جدران الاندساس وتطاير لـ CO_2 (Savelli, 1968) و (Iacono-Marziano et al., 2008). بناءً على النتائج التي تمّ التوصل إليها في هذا البحث فإنّ اختبارات إضافية مكتملة من شأنها أن تدعم هذه النتائج يُمكن التوصية بإجرائها:

- 1- تحاليل لنظائر السترونسيوم Sr والنيوديميوم Nd كمؤشر جيوكيميائي إضافي حول أصل الصخور المدروسة.
- 2- تحاليل جيوكيميائية معمقة لفلزات البازلت المرافق للكاربونات من شأنه أن يوفر معطيات ومؤشرات حول مدى تأثر التركيب الفلزي للبازلت بعمليات الاستيعاب والتمثل للصخور الكاربوناتية المخترقة أثناء صعود الماغما البازلتية.

المراجع

- Bagdasarov, Yu. A. *Geochemical Features of Upper Vendian Zr Bearing Dolomites, a New Type of Zr Ore Show*. *Geochemistry international*, 30, 1993, 88–98.
- Baghdadi, B. *Géochimie Analytique et Prospection: Application aux Roches Mantelliques de Type Péridotitique*. Retrieved from Theses.fr (<http://www.theses.fr/2013PA066235>), 2013.
- Bogoch, R and Magaritz, M. *Immiscible Silicate-Carbonate Liquids as Evidenced from Ocellar Diabase Dykes, Southeast Sinai*. *Contribution to Mineral Petrology*, 83, 1983, 227-230.
- Brassinnes, S., Balaganskaya, E., Demaiffe, D. *Magmatic Evolution of the Differentiated Ultramafic, Alkaline and Carbonatite Intrusion of Vuoriyarvi (kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS Study of Apatite*. *Lithos*, 85, 2005, 76 – 92.
- Camp, V. E. and Roobol, M. J. *Upwelling Asthenosphere Beneath Western Arabia and its Regional Implications*. *Journal of Geophysical Research* 97, 1992, 15255-15271.
- Chakhmouradian, A. R. *High-Field-Strength Elements in Carbonatitic Rocks: Geochemistry, Crystal Chemistry and Significance for Constraining the Sources of Carbonatites*. *Chemical Geology*, 235, 2006, 138-160.
- Deines P. and Gold D. P. *The Isotopic Composition of Carbonatites and Kimberlite Carbonates and their Bearing on the Isotopic Composition of Deep-Seated Carbon*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1973, 1709-1733.
- Dawson, J. B., Garson, M. S. and Roberts, B. *Altered Former Alkalic Carbonatite Lavas from Oldoinyo Lengai, Tanzania: Inferences for Calcitic Carbonatite Lavas*. *Geology*, 15, 1987, 765-8.
- Dawson, J. B. *Sodium carbonatite extrusions from Oldoinyo Lengai, Tanzania: Implications for carbonatite complex genesis*, in Bell, K., ed., *Carbonatites: genesis and evolution*. London, Unwin Hyman, 1989, 255-277.
- Dawson, J. B. *A Supposed Sovite from Oldoinyo Lengai, Tanzania: Result of Extreme Alteration of Alkali Carbonatite Lava*. *Mineralogical Magazine*, 57, 1993, 93-101.
- Dunworth, E. A. and Bell, K. *The Turiy Massif, Kola Peninsula, Russia: Isotopic and Geochemical Evidence for Multi-Source Evolution*. *Journal of Petrology*, 42, 2001, 377–405.
- Eby N., Lioyd F. E., and Woolley A. R. *Geochemistry and Petrogenesis of the Fort Portal, Uganda, Extrusive Carbonatite*. *Lithos*, 113, 2009, 785-800.
- Giannérini, G., Campredon, R., Féraud, G. and Abou Zakhem, B. *Deformations Intraplaques et Volcanisme Associe ; Exemple de la Bordure NW de la Plaque Arabique au Cenozoique*. *Bulletin de la Société Géologique de France, Huitieme Série* 4, 1988, 937-947.
- Gischler, E., Swart, P. K., and Lomando, A. J. *Stable Isotopes of Carbon and Oxygen in Modern Sediments of Carbonate Platforms, Barrier Reefs, Atolls And Ramps: Patterns and Implications*. *International Association of Sedimentologists*, 41, 2009, 61-47.
- Hay R. L. *Melilite-Carbonatite Tuffs in the Laetolil Beds of Tanzania*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 1978, 357-367.

- Henderson, P. *Inorganic Geochemistry*. Pergamon Press, Oxford, 1982, 353.
- Iacono-Marziano, G., Gaillard, F., Pichavant, M. *Limestone Assimilation by Basaltic Magmas: An Experimental Re-Assessment and Application to Italian Volcanoes*. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 155, 2008, 719–738.
- Ilani, S., Harlavan, Y., Tarawneh, K., Rabba, I., Weinberger, R., Ibrahim, K., Peltz, S., and Steinitz, G. *New K-Ar Ages of Basalts from the Harrat Ash Shaam Volcanic Field in Jordan: Implications for the Span and Duration of the Upper-Mantle Upwelling Beneath the Western Arabian Plate*, *Geology*, 29, 2001, 171-174.
- Ismail, M., Delpech, G., Cottin, J.-Y., Gregoire, M., Moine, B. N., and Bilal, A. *Petrological and geochemical constraints on the composition of the lithospheric mantle beneath the Syrian rift, northern part of the Arabian plate*. In: Coltorti, M., Gregoire, M. (Eds.), *Metasomatism in oceanic and continental lithospheric mantle*. Geological Society, London, Special Publications, 2008, 223–251. doi:10.1144/SP293.11.
- Jarmakani, I. *Carbonatites: Appeal to The Government; This is the Most Promising Hope for Mineral Resources in Syria*. *Environment and Health Journal*, 15, 2005, only at http://www.envmt-healthmag.com/archive_detail.asp?issue=15andid_arch=578.
- Keith, M. L. and Weber, J. N. *Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils*. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 28, 1964, 1787–1816.
- Keller, J. Extrusive carbonatites and their significance, in Bell, K., ed., *Carbonatites: genesis and evolution*. London, Unwin Hyman, 1989, 70-88.
- Krienitz, M.-S., Haase, K. M., Mezger, K., and Shaikh-Mashail, M. A. *Magma Genesis and Mantle Dynamics at the Harrat Ash Shamah Volcanic Field (Southern Syria)*. *Journal of Petrology* 48, 2007, 1513-1542.
- Le Bas, M. J., Keller, J., Kejie, T., Wall, F., Williams, C. T., and Peishan, Z. *Carbonatite Dykes at Bayan Obo, Inner Mongolia, China*. *Mineralogy and Petrology*, 46, 1992, 195–228.
- Le Bas, M. J. *Standard Rare Earth Element Compositions for Sovitic and Alvikitic Carbonatites*. In: Gupta A. K., Onuma. K., Arima, M. (eds) *Geochemical Studies on Synthetic and Natural Rock Systems (Kenzo Yagi volume)*. Allied Publishers, New Delhi, 1996, 90–110.
- Long, X. P., Yuan, C., Sun, M., Zhao, G. C., Xiao, W. J., Wang, Y. J., Yang, Y. H., and Hu, A. Q. *Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U–Pb and Hf isotopic constraints*. *Precambrian Research*, 180, 2010, 272–284.
- Lottermoser, B. G. *Rare-Earth Element Mineralisation within the Mr. Weld Carbonatite Laterite, Western Australia*. *Lithos* 24, 1990, 151-167.
- Loubet, M., Bernat, M., Javoy, M., and Allègre, C. J. *Rare Earth Contents in Carbonatites*. *Earth and Planetary Science Letters*, 14, 1972, 226-232.
- Mahfoud, R. f., and Beck, J. *Composition, Origin, and Classification of Extrusive Carbonatites in Rifted Southern Syria*. *International Geology Review* 31, 1995, 361-378.

- Mariano, A. N. *Economic Geology of Rare Earth Minerals*, in Lipin, B. R. and McKay, G. A., eds., *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. Mineralogical Society of America, Washington D. C., Reviews in Mineralogy, 21, 1989, 309–338.
- Mittlefehldt D, W. *Genesis of Clinopyroxene-Amphibole Xenoliths from Birket Ram: Trace Elements and Petrologic Constraints*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 88, 1984, 280-287.
- Möller, P., Morteani, G. and Schley, F. *Discussion of REE Distribution Patterns of Carbonatites and Alkalic Rocks*. Lithos, 13, 1980, 171-179.
- Möller P. *REE(Y), Nb, and Ta Enrichment in Pegmatites and Carbonatite-Alkalic Rock Complexes*. In: Möller P., Černý P., Saupé F. (eds) *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Special Publication No. 7 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, vol 7. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989.
- Möller, P., and Bau, M. *Rare-Earth Patterns with Positive Cerium Anomalies in Alkaline Lake Waters from Lake Van, Turkey*. Earth and Planetary Science Letters, 117, 1993, 671-676.
- Mouty, M., M. Delaloye, D. Fontignie, O. Piskin and J.-J. Wagner. *The Volcanic Activity in Syria and Lebanon between Jurassic and Actual*. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, V. 72. 1, 1992, 91–105.
- Nasir, S., and Safarjalani, A. *Lithospheric Petrology Beneath the Northern Part of the Arabian Plate in Syria: Evidence from Xenoliths in Alkali Basalts*. Journal of African Earth Sciences, 30, 2000, 149–168.
- Nasraoui, M., Toulkeridis, T., Clauer, N. and Bilal, E. *Differentiated Hydrothermal and Meteoric Alterations in the Lueshe Carbonatite Complex (Democratic Republic of Congo) Identified by a REE Study Combined with a Sequential Acid-Leaching Experiment*. Chemical Geology, 165, 2000, 109-132.
- Nelson D. R., Chivas A. R., Chappell B. W., and McCulloch M. T. *Geochemical and Isotopic Systematics in Carbonatites and Implications for the Evolution of Ocean-Island Sources*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52, 1988, 1-17.
- Orris, G. J. and Grauch, R. *Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences*. United States Geological Survey Open-File Report, 02-189, 2002, 174, available only at <http://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-189/>.
- Peccerillo, A. *Relationships Between Ultrapotassic and Carbonate-Rich Volcanic Rocks in Central Italy: Petrogenetic Implications and Geodynamic Significance*. Lithos, 43, 1998, 267-279.
- Pecora, W. T. *Carbonatites: A Review*. Geological Society of America Bulletin, 67, 1996, 1537-1556.
- Pineau F., Javoy M., and Allgre C. J. *Etude Systématique des Isotopes de l'Oxygene, du Carbone et du Strontium dans les Carbonatites*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37, 1973, 2363-2377.
- Ponikarov, V. P., Protasevich, L., Maximov, A., and Tkachev, G. *Geological Map of Syria, 1:200 000*. Moscow: V.O. Technoexport, 1963.
- Ponikarov, V. *Geological Map of Syria (1: 1,000,000; 2nd Edition)*. Establishment of Geology and Mineral Resources (Ministry of Petroleum and Mineral Resources), Syrian Arab Republic. 1986.

- Pourret O, Davranche M, Gruau G, Dia A. *New Insights into Cerium Anomalies in Organic Rich Alkaline Waters*. Chemical Geology, 251, 2008, 120-127. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.03.002.
- Ray, J. S., and Ramesh, R. *A Fluid-Rock Interaction Model for Carbon and Oxygen Isotopic Variations in Altered Carbonatites*, Journal of the Geological Society of India, 54, 1999, 179-186.
- Rosatelli, G., Wall, F., Stoppa, F., and Brilli M. *Geochemical Distinctions Between Igneous Carbonate, Calcite Cements, and Limestone Xenoliths (Polino Carbonatite, Italy): Spatially Resolved LAICPMS Analyses*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160, 2010, 645-661.
- Santos, R. V., Dardenne, M. A., and Matsui, E. *Geoquímica de Isótopos de Carbono e Oxigênio dos Carbonatitos do Complexo Alcalino de Mato Preto, Paraná, Brasil*. Rev. Bras. Geoc., 14, 1990, 153-158.
- Santos, R. V. and Clayton, R. N. *Variations of Oxygen and Carbon Isotopes in Carbonatites: A Study of Brazilian Alkaline Complexes*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 9, 1995, 1339-1352.
- Savelli, C. *The Problem of rock Assimilation by Somma-Vesuvius Magma*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 18, 1968, 43-64.
- Sharkov, Y. V., Lazko, Y. Y., Fedosova, S. P., and Khanna, S. *Depth-Derived Inclusions of the Quaternary Volcano Tel-Danun, Southern Syria, in Relation to the Problem of Intraplate Basaltic Magmatism*. Geokhimiya, 1989, 1609-1623 (in Russian).
- Sharkov, Y. V., Chernyshev, I. V., Devyatkin, Y. V., Dodonov, A. Y., Ivanenko, V. V., Karpenko, M. I., Leonov, Y. G., Novikov, V. M., Khanna, S., and Khatib, K. *Geochronology of late Cenozoic basalts in western Syria*. Petrologiya 2, 1994, 385-394 (in Russian).
- Shaw, J. E., Baker, J. A., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., Ibrahim, K. M. *Petrogenesis of the Largest Intraplate Volcanic Field on the Arabian Plate (Jordan): A Mixed Lithosphere–Asthenosphere Source Activated by Lithospheric Extension*. Journal of Petrology, 44, 2003, 1657–1679.
- Shaw, J. E., Baker, J. A., Kent, A. J. R., Ibrahim, K. M., Menzies, M. A. *The Geochemistry of the Arabian lithospheric Mantle—a Source for Intraplate Volcanism?*. Journal of Petrology 48, 2007, 1495–1512.
- Snyder, G. A., Taylor, L. A., Jerde, E. A., Sharkov, Y., Lazko, Y., and Hanna, S. *Petrogenesis of Garnet Pyroxenite and Spinel Peridotite Xenoliths of the Tell-Danun Alkali Basalt Volcano, Harrat AS Shamah, Syria*. International Geology Review 35, 1993, 1104–1120.
- Stoppa, F. and Woolley, A. R. *The Italian Carbonatites: Field Occurrence, Petrology and Regional Significance*. Mineralogy and Petrology, 59, 1997, 43-67.
- Taylor, H. P., Frechen, J., and Degens, E. T. *Oxygen and Carbon Isotope Studies of Carbonatites from the Laacher See District, West Germany and the Alnö District, Sweden*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 31, 1967, 407-430.
- Tostevin, R., A.Shields., M.Tarback, G., He, M., O.Clarkson, M., A.Wood, R. *Effective Use of Cerium Anomalies as A Redox Proxy in Carbonate-Dominated Marine Settings*. Chemical Geology 438, 2016, 146-162.

- Treiman, A. H. and Essene, E. J. *The Oka Carbonatite Complex, Quebec: Geology and Evidence for Silicate-Carbonate Liquid Immiscibility*. *American Mineralogist*, 70, 1985, 1101-1113.
- Viladkar, S. G. and Pawaskar, P. B. *Rare Earth Element Abundances in Carbonatites and Fenites of the Newania Complex, Rajasthan, India*. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 61, 1989, 113-122.
- Von Maravic, H. and Morteani, G. *Petrology and Geochemistry of the Carbonatite and Syenite Complex of Lueshe (N.E. Zaire)*. *Lithos* 13, 1980, 159-170.
- Wall, F. and Mariano, A. N. *Rare Earth Minerals in Carbonatites—a Discussion Centered on the Kangankunde Carbonatite, Malawi*. in Jones, A. P., Wall, F., and Williams, C.T., eds., *Rare earth minerals—Chemistry, origin and ore deposits*, London, United Kingdom, Chapman and Hall, The Mineralogical Society, Series 7, 1996, 193-225.
- Weinstein, Y., Navon, O., Altherr, R., Stein, M. *The Role of Fluids and of Lithospheric Heterogeneity in the Generation of Alkali Basaltic Suites from Northwestern Arabia*. *Journal of Petrology* 47, 2006, 1017-1050.
- Woolley, A. R. *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World*. Part 1: North and South America. Austin: University of Texas Press; and Cambridge, England, British Museum of Natural History, 1987.
- Woolley, A. R. and Church A. A. *Extrusive Carbonatites: a Brief Review*. *Lithos*, 85, 2005, 1-14.
- Xu, C., Wang, L., Song, W., Wu, M. *Carbonatites in China: A Review for Genesis and Mineralization*. *Geoscience Frontiers*. 1, 2010, 105-114.
- Yang, K. F., Fan, H. R., Santosh, M., F-F Hu. and Wang, K. Y. *Mesoproterozoic Carbonatitic Magmatism in the Bayan Obo Deposit, Inner Mongolia, North China: Constraints for the Mechanism of Super Accumulation of Rare Earth Elements*. *Ore Geology Reviews*, 40, 2011, 122-131.