

بررسی منشأ و خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوریان در استان فارس با استفاده از داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی

محمدعلی رجب‌زاده * و سهیلا اسماعیلی
بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوریان در لبه شرقی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان و در طول دره بوانات در شمال شرق استان فارس بین دو گسل سوریان در شمال شرق و گسل جیان در جنوب غرب رخنمون یافته است. این سنگ‌ها شامل: اپیدوت‌کلریت‌شیسست، کلریت‌اکتینولیت‌شیسست، کوارتز‌کلریت‌شیسست، میکاشیسست و آندالوزیت‌مسکویت‌شیسست است. داده‌های ژئوشیمیایی بر روی میزان Al_2O_3 ، CaO ، MgO ، Ni ، P_2O_5 ، TiO_2 و REE نشانگر منشأ رسوبی برای سنگ‌های آندالوزیت‌مسکویت‌شیسست، کوارتز‌کلریت‌شیسست و میکاشیسست از یک سو و منشأ آذرین برای سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیسست و اپیدوت‌کلریت‌شیسست از سوی دیگر است. میزان عناصر اصلی نامتحرک مانند: Ti، Al، عناصر با شدت میدان بالا نظیر: Nb، Y و Zr به همراه الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در سنگ‌های با منشأ رسوبی، جایگاه زمین‌ساختی حاشیه فعال قاره‌ای همراه با توریدایت‌های عمیق کف دریا و در سنگ‌های با منشأ آذرین محدوده بازالت‌های توله‌ایتی حوضه‌های ریفتی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی، پتروگرافی، سنگ دگرگونی، کمپلکس سوریان، سنندج-سیرجان

مقدمه

دگرگون شده برای تعیین محیط تکتونیکی و ماهیت سنگ‌های آذرین و رسوبی دگرگون شده دارای اهمیت است. نظر به اینکه در محیط‌های دگرگونی عناصر اصلی به ویژه عناصر قلیایی طی دگرگونی تحرک زیادی دارد از عناصری مانند: Nb، Ti، Y و Zr که در دگرگونی کمتر تحت تأثیر تحرک قرار می‌گیرد استفاده شده است. بر خلاف گستردگی و تنوع سنگ‌های دگرگونی در کمپلکس

در مناطق دگرگونی که فرآیندهای زمین‌شناسی مختلف موجب تخریب مجموعه‌های کانی‌شناسی و بافتی اولیه سنگ‌ها شده باشد از داده‌های ژئوشیمیایی برای تعیین خاستگاه زمین‌ساختی، منشأ و نحوه تکوین سنگ مادر استفاده می‌شود (Cullers, 1995؛ Zhu et al., 2005). بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین و رسوبی

جنوب غرب محصور است. گسل بزرگ تراستی سوریان در مرز بین پهنه سنندج-سیرجان و ایران مرکزی قرار می‌گیرد و گسل بزرگ جیان لبه کم شیب یک گسل قاشقی با سازوکار انقباضی است که مرز بین پهنه سنندج-سیرجان با زاگرس خرد شده را نشان می‌دهد (Hoshmandzadeh *et al.*, 1990؛ Oveisi and Jusefi, 1996). این گسل‌ها دارای امتداد NW-SE به موازات امتداد عمومی زاگرس است (شکل ۱). میکاشیست‌ها واحدهای سنگی پایینی کمپلکس سوریان را تشکیل می‌دهد و سنگ‌های کلریت‌آپیدوت‌شیست و سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیست اغلب در بخش‌های میانی و بالایی کمپلکس همراه با میان لایه‌هایی از میکاشیست و کوارتز کلریت‌شیست قرار می‌گیرد. ضخامت واحدهای سنگی از حدود چند سانتی‌متر تا چند ده متر در تغییر است. تغییرات سریع در ضخامت رخساره‌ها، شکل‌های عدسی و گاهی ناپیوسته واحدهای سنگی در ناحیه بررسی شده نشانگر عملکرد گسل‌ها در زمان تشکیل سنگ‌های اولیه و فعال بودن محیط زمین‌ساختی به صورت تغییرات مکرر در بالا و پایین رفتن حوضه زمین‌ساختی است (Xia *et al.*, 1999).

بر اساس پژوهش‌های Mousivand (۲۰۰۳) و Hoshmandzadeh و همکاران (۱۹۹۰) دگرگونی در این منطقه تا حد رخساره شیست سبز-آمفیبولیت زیرین رخ داده است که همراه با فازهای دگرسانی به صورت تشکیل رگه‌های پراکنده کوارتز و خرد شدگی سنگ‌ها است. آثار کانه‌زایی مس اغلب در کمپلکس سوریان بیشتر در واحدهای سنگی میانی و بالایی مشاهده می‌شود. از این ذخایر می‌توان به نهشته‌های مس دیده‌بانکی، مزایجان، بنو و چیر اشاره کرد که نشان‌دهنده کانه‌زایی مس در افق‌های خاص کمپلکس سوریان است (شکل ۲) (Mousivand *et al.*, 2007).

سوریان، منشأ این سنگ‌ها تاکنون ناشناخته مانده است. حضور رخساره‌های معدنی متفاوت مس و همراهی نزدیک اغلب آنها با سنگ‌های دگرگونی، تعیین منشأ این سنگ‌ها را دارای اهمیت زمین‌شناسی مضاعف می‌کند. از بررسی‌های پیشین که با اهداف پی‌جویی و تعیین نحوه کانه‌زایی مس، سرب، روی و باریت در منطقه بوانات انجام شده است می‌توان به Oveisi و Jusefi (۱۹۹۶)، Taghipour (۲۰۰۱) و Mousivand (۲۰۰۳) در قالب پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد اشاره کرد. در این بررسی‌ها، منشأ متفاوتی برای فلزات در نظر گرفته شده است در حالیکه به مطالعه دقیق پتروگرافی و ژئوشیمیایی سنگ‌های دگرگونی میزبان در منطقه بوانات پرداخته نشده است. در این پژوهش سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوریان از نظر منشأ و خاستگاه زمین‌ساختی با داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی، مورد بحث و تفکیک قرار گرفته‌اند.

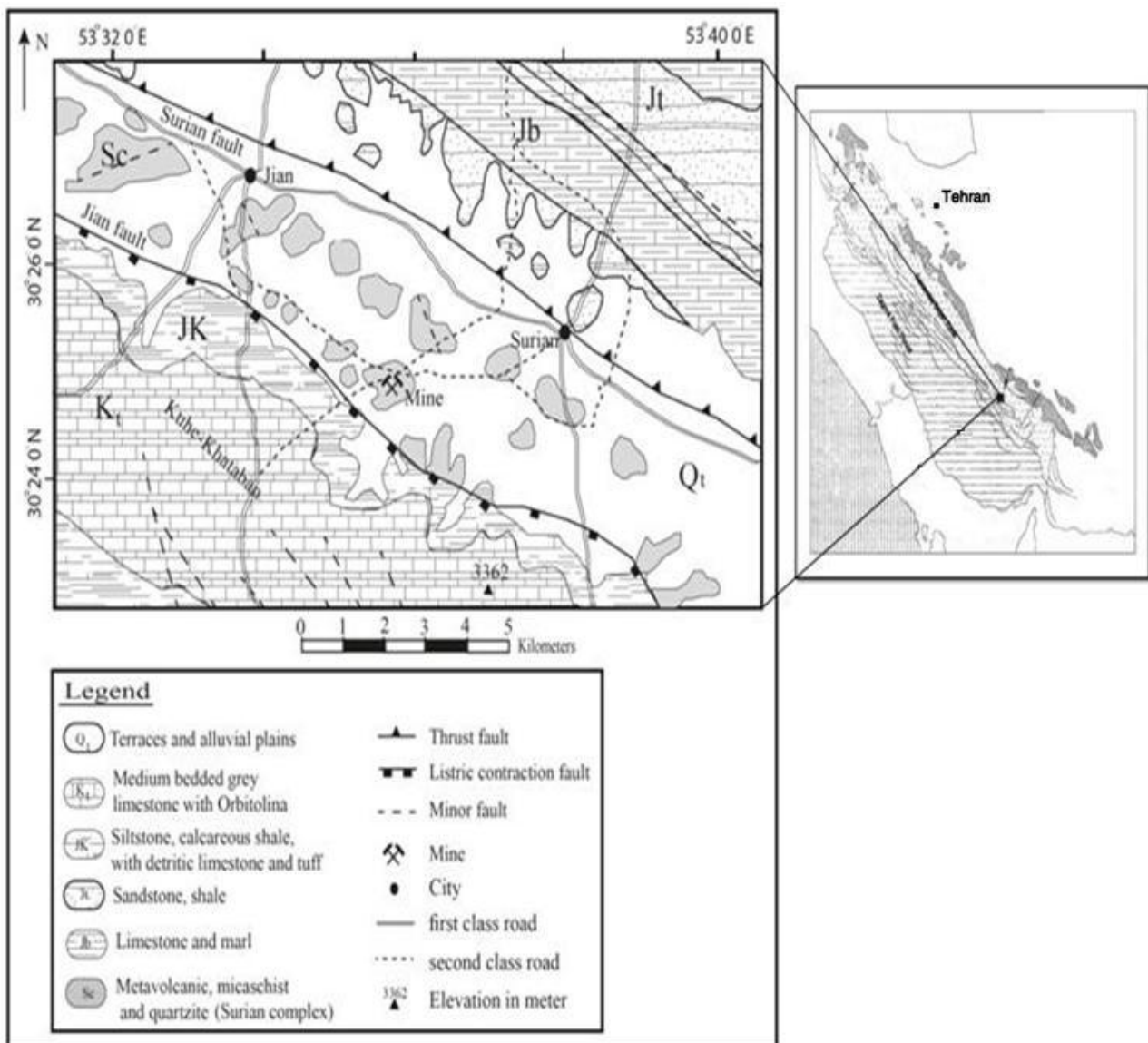
زمین‌شناسی منطقه

سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوریان در لبه شرقی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان با سن پرموتریاس در طول دره بوانات استان فارس به طول ۸۰ کیلومتر و عرض ۵ تا ۱۰ کیلومتر با روند شمال غرب-جنوب شرق به صورت تپه ماهورهای نه چندان مرتفع رخنمون یافته‌اند (Oveisi and Jusefi, 1996). از نظر چینه‌شناسی این مجموعه به صورت دگرشیب بر روی سنگ مرمر اسپاریتی-میکاشیستی مربوط به کمپلکس توتک با سن دونین بالایی-کربونیفر زیرین قرار می‌گیرد. بخش بالایی این کمپلکس نیز دارای یک مرز نامشخص با مجموعه کربناتی-آواری-آتشفشانی کولی کش است. از لحاظ ساختاری، کمپلکس سوریان بین دو گسل سوریان در شمال شرق و گسل جیان در

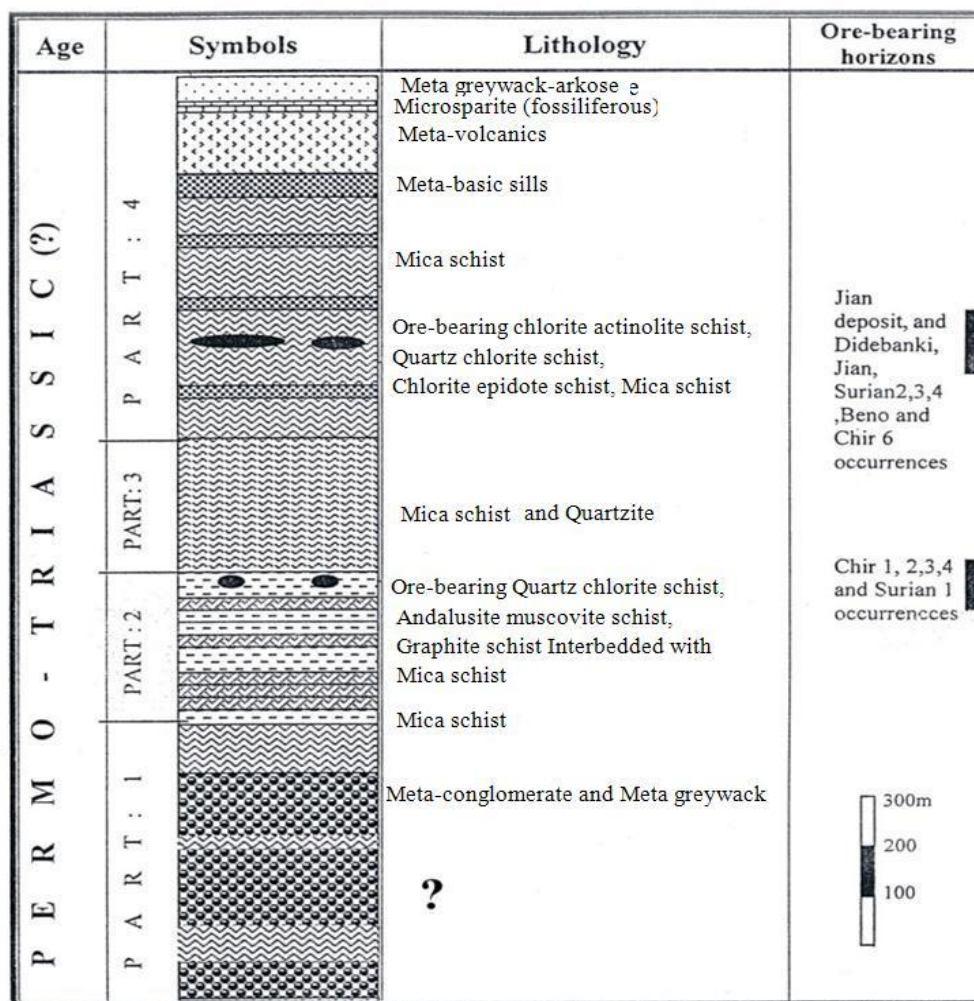
روش انجام پژوهش

تعداد هشتاد و چهار نمونه در امتداد دوازده پیمایش هدفمند عمود بر جهت طولی سنگ‌های مختلف کمپلکس دگرگونی سوریان برداشت شد. بررسی‌های میکروسکوپی با روش‌های میکروسکوپی نور انعکاسی و انکساری بر روی تعداد چهل و دو مقطع نازک و هجده مقطع صیقلی از نمونه‌های برجسته انجام گردید. تعداد دوازده نمونه سنگ کمتر دگرسان شده (سه نمونه کلریت‌آپیدوت‌شیسیت، سه

نمونه کلریت‌اکتینولیت‌شیسیت، دو نمونه کوارتز کلریت‌شیسیت، دو نمونه میکاشیسیت و دو نمونه آندالوزیت‌میکاشیسیت) با دستگاه آسیاب کاربرد تنگستن پودر شد. نمونه‌های سنگ در آزمایشگاه شرکت ACME با دو روش ICP-AES برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و برخی عناصر فرعی و ICP-MS برای تعیین عناصر نادر خاکی، عناصر پایه و برخی عناصر فرعی مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کمپلکس سوریان (بر گرفته از Hoshmandzadeh و همکاران (۱۹۹۰) با کمی تغییرات)



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی کمپلکس سوریان با تغییرات (Mousivand, 2003)

پتروگرافی

می‌شود. کلریت نیز اغلب به صورت دانه‌های ریز تا متوسط با فراوانی ۱۰ تا ۵۰ درصد وجود دارد. کانی‌های آل‌بیت، پلاژیوکلاز و کلسیت فازهای فرعی تشکیل‌دهنده کلریت اپیدوت‌شیسست است (شکل ۳- A).

کلریت اکتینولیت‌شیسست: حاوی کانی‌های کلریت، اکتینولیت، پلاژیوکلاز و مقادیر کمتری کانی‌های کلسیت، آل‌بیت، اپیدوت و ترمولیت است. اکتینولیت با اشکال ستونی، رشته‌ای و منشوری دیده می‌شود. اورالیتی شدن موجب تبدیل کانی پیروکسن به کلریت و اکتینولیت شده است با این حال بقایای کانی‌های پیروکسن با بافت‌های اولیه

مطالعات پتروگرافی بر روی سنگ‌های کمپلکس سوریان نشانگر حضور انواع سنگ‌های دگرگونی مختلف شامل: کلریت اپیدوت‌شیسست، کلریت اکتینولیت‌شیسست، کوارتز کلریت‌شیسست، میکاشیسست و آندالوزیت مسکویت‌شیسست است.

کلریت اپیدوت‌شیسست: اغلب به صورت لایه‌های چند سانتی‌متری تا چند ده متری در بخش بالایی لایه‌های کلریت اکتینولیت‌شیسست دیده می‌شود. اپیدوت با فراوانی ۲۰ تا ۶۰ درصد عمده‌ترین کانی تشکیل‌دهنده این سنگ بوده و اغلب به صورت بی‌شکل با بیرفرنزانس بالا دیده

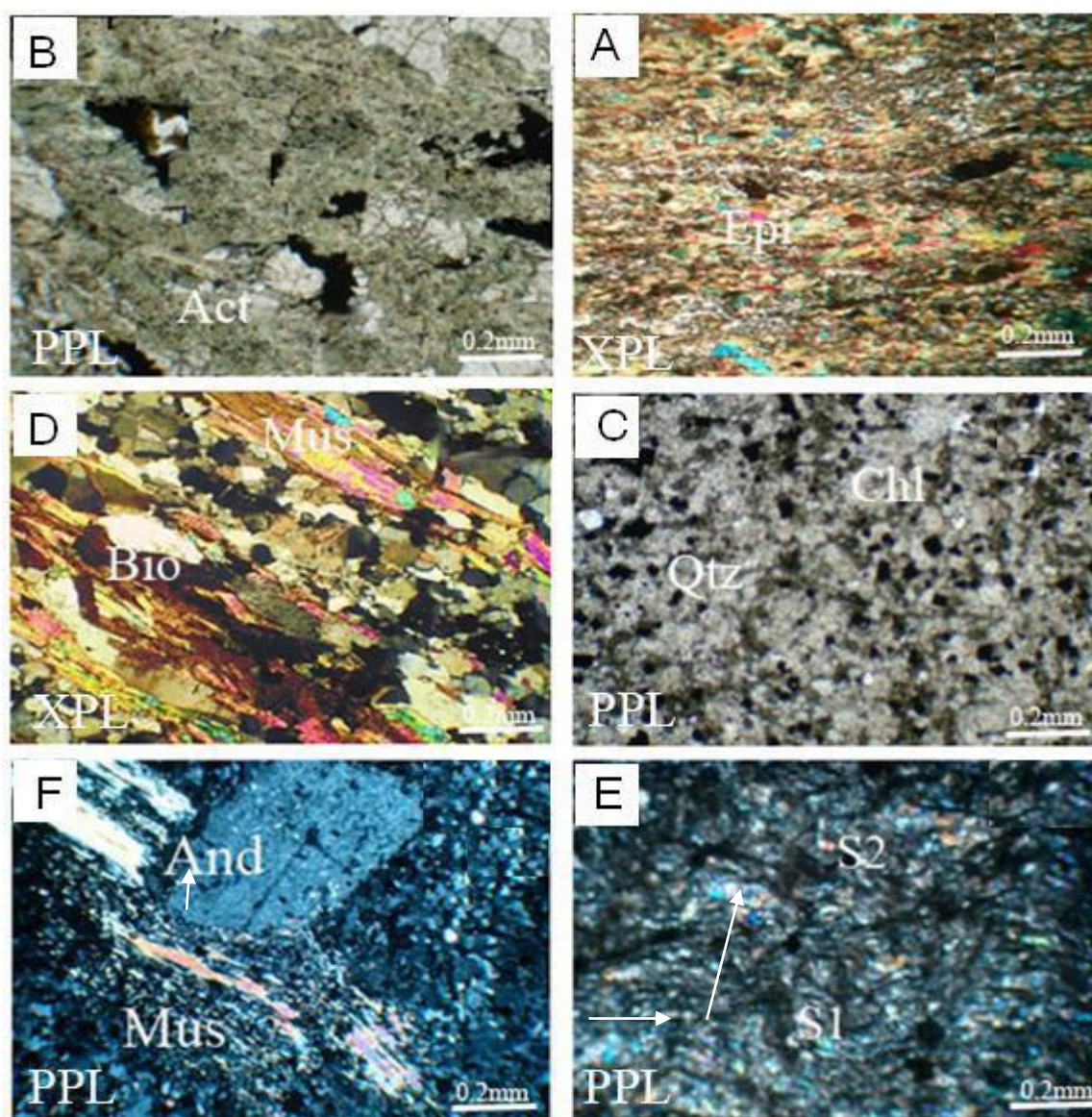
به موازات برگوارگی تشکیل شده‌اند و در گروه دوم به صورت عمود بر برگوارگی دیده می‌شود. بلورهای کوارتز در این سنگ دارای بافت موزائیکی با مرز ۱۲۰ درجه است. در سنگ میکاشیست دو بخش شامل: یک بخش غنی از میکا و دیگری بخش غنی از کوارتز قابل تشخیص است که شاید به دلیل لایه‌بندی اولیه سنگ ایجاد شده‌اند. با توجه به جهت یافتگی کامل میکاها و فراوانی آنها در بخش غنی از میکا، بافت این بخش لپیدوبلاستیک و در بخش غنی از کوارتز با توجه به فراوانی کوارتز، بافت گرانوبلاستیک غالب است. با استناد به این دو بافت می‌توان بافت عمومی گرانولپیدوبلاستیک را در میکاشیست به کار برد.

آندالوزیت میکاشیست: با حضور بلورهای آندالوزیت به شکل مربع در داخل زمینه سنگ مشخص می‌شود. در برخی از نمونه‌های این سنگ دو بخش غنی از آندالوزیت و غنی از کوارتز دیده می‌شود. این اختلاف شاید ناشی از تفاوت ترکیب اولیه سنگ است. به نحوی که طی دگرگونی در بخش‌های غنی از رس، آندالوزیت ایجاد شده است. در حالی که در بخش غنی از کوارتز که ماهیت سیلتستونی داشته است در اثر کمبود عنصر آلومینیوم این کانی تشکیل نشده است. بلورهای آندالوزیت از نوع کیاستولیت با میان‌بارهای فراوان گرافیت به حالت نیکول‌های عمود بر هم است که با بیرفرنژانس خاکستری در زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شود. آندالوزیت یکی از کانی‌های برجسته در سنگ‌های پلیتی دگرگون شده به شمار می‌رود و تحت شرایط دم‌فشار بالا پلی‌مورف‌های دیگر این کانی (کیانیت و سیلیمانیت) تشکیل می‌شود (Yardley, 1989). حضور مقادیر قابل ملاحظه آندالوزیت و میکا می‌تواند نشانگر تشکیل این سنگ در اثر دگرگونی شیل‌ها باشد (شکل ۳-F).

نظیر: بافت ساب‌افیتیک و پورفیری در برخی از سنگ‌ها به خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۳-B).

کوارتز کلریت‌شیست: به رنگ سبز و با گسترش فراوان در مجموعه سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوریان دیده می‌شود. کانی‌های اصلی آن شامل: کوارتز و کلریت است. از کانی‌های فرعی می‌توان به کانی‌های کلسیت و اپاک اشاره کرد. کوارتز در این سنگ با اندازه‌های ۰/۲ تا ۵ میلی‌متر و به صورت بی‌شکل، نیمه خودشکل تا خودشکل همراه با خاموشی موجی دیده می‌شود. کانی‌های اپاک بیشتر به صورت پراکنده در زمینه سنگ دیده می‌شود. مطالعه مقاطع صیقلی سنگ‌ها نشانگر حضور پیریت به عنوان کانی اصلی است. همچنین، این سنگ‌ها توسط یک سری رگچه‌های کربناتی قطع شده‌اند که در جهت عمود بر جهت شیست‌توزیته سنگ قرار گرفته‌اند (شکل ۳-C).

میکاشیست: در کمپلکس سوریان بیشتر حاوی کوارتز، مسکویت، بیوتیت و گارنت است. در برخی از نمونه‌ها، حضور مقادیر زیادی از کانی گرافیت موجب ایجاد رنگ خاکستری تیره در سنگ شده است. میزان گرافیت در برخی از نمونه‌ها به حدی است که می‌توان نام گرافیت‌شیست را به سنگ اطلاق کرد (شکل ۳-D). در برخی از نمونه‌های میکاشیست، کانی‌های کلریت، کلسیت و اپاک به مقدار زیادی مشاهده می‌شود. برگوارگی غالب این سنگ‌ها S1 دارای روند شمال غرب-جنوب است اما به علت چین‌خوردگی‌های محلی، برگوارگی S2 نیز در این سنگ‌ها به موازات سطح محوری چین‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳-E). سنگ میکاشیست در منطقه بررسی شده دارای ضخامت در خور توجهی بوده و در سرتاسر طول دره بوانات رخنمون دارد. این سنگ، میزبان دو گروه رگه‌ای و عدسی شکل کوارتزی است. در یک گروه کانی‌های کوارتز



شکل ۳- A) حضور گسترده اپیدوت در سنگ کلریت‌آپیدوت‌شایسته؛ B) سنگ کلریت‌آکتینولیت‌شایسته همراه با کانی‌های اپاک؛ C) سنگ کوارتز‌کلریت‌شایسته همراه با کانی‌های اپاک؛ D) میکاشیست حاوی کوارتز، مسکویت و بیوتیت؛ E) سنگ میکاشیست دارای برگوارگی S1 و چین‌خوردگی‌های تأخیری؛ F) سنگ آندالوزیت‌میکاشیست حاوی بلورهای آندالوزیت و میکا در زمینه کوارتز ریزدانه؛ (کوارتز = Qtz، آندالوزیت = And، مسکویت = Mus، کلریت = Chl، اپاک = Opq، اپیدوت = Epi، بیوتیت = Bio، اکتینولیت = Act).

ژئوشیمی

استفاده کرد. در این بین عناصر اصلی و جزئی نامتحرک مانند: Al و Ni، عناصر با شدت میدان بالا نظیر: Nb، P، Ti، Y و Zr به همراه عناصر نادر خاکی اهمیت ویژه ای دارد (Bayat *et al.*, 2012). نتایج تجزیه شیمیایی سنگ‌های کمپلکس سوریان در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به اینکه سنگ‌های آذرین و رسوبی اولیه منطقه بررسی شده تحت تأثیر دگرگونی قرار گرفته‌اند می‌توان برای تشخیص منشأ انواع سنگ‌های دگرگونی و خاستگاه زمین‌ساختی آنها در کمپلکس سوریان از داده‌های ژئوشیمیایی

جدول ۱- کوارتز کلریت‌شیسست: 2B-1B؛ میکاشیسست: 4B-3B؛ آندالوزیت میکاشیسست: 6B-5B؛ کلریت اکتینولیت‌شیسست: 9B-6B؛ کلریت اپیدوت‌شیسست: 12B-10B؛ (عناصر اصلی و LOI بر حسب درصد و عناصر جزئی بر حسب ppm است).

samples	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B
SiO ₂	75.68	67.08	68.76	72.07	70.42	73.24	47.18	45.08	46.13	47.52	46.3	45.69
TiO ₂	0.5	0.5	0.66	0.62	0.64	0.63	1.533	2.97	2.25	1.27	2.12	2.54
Al ₂ O ₃	11.9	12.06	13.29	14.03	13.16	13.1	15.73	13.47	14.6	13.93	15.7	14.59
Fe ₂ O ₃	2.92	3.64	6.03	5.39	5.715	4.55	7.06	9.11	8.088	9.25	9.18	9.14
MnO	0.37	0.31	0.3	1.93	1.035	1.48	0.26	0.28	0.27	0.14	0.21	0.24
MgO	3.85	4.27	2.46	2.32	2.39	1.35	13.76	9.94	11.85	7.35	8.64	9.29
CaO	0.19	1.49	1	0.14	0.57	0.35	8.69	7.04	7.865	9.12	9.08	9.56
Na ₂ O	0.01	0.78	1.73	0.03	0.88	0.45	2.68	3.04	2.86	2.92	2.98	3.01
K ₂ O	0.02	0.01	2.99	2.93	3.96	2.94	0.26	0.1	0.18	0.03	0.065	0.08
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.15	0.146	0.148	0.14	0.49	0.39	0.44	0.18	0.285	0.33
Cr ₂ O ₃	0.008	0.009	0.014	0.015	0.015	0.015	0.005	0.005	0.005	0.036	0.021	0.011
LOI	5.1	7.9	3.6	5.4	4.5	4.95	4.4	7.3	5.85	4	5.65	6.47
Sum	99.79	99.12	99.79	99.45	99.62	99.54	99.37	99.72	99.55	99.71	99.72	99.72
Cu	96.9	129.3	9.4	31	20.2	25.6	21	49	35	61.6	55.3	52.15
Pb	16.6	175.5	94.4	62	78.2	70.1	11	23.1	17.05	2.4	12.75	17.93
Zn	316	345	56	367	211.5	289.3	204	118	161	61	89.5	103.8
As	1	0.7	1.3	49	25.15	37.08	2.3	1.7	2	0.9	1.3	1.5
Cd	0.1	7.3	0.1	2.3	1.2	1.75	1	0.1	0.55	0.1	0.1	0.1
Sb	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	2	0.1	1.05	0.3	0.2	0.15
Bi	0.1	23	0.9	12	6.45	9.225	11	0.1	5.55	0.1	0.1	0.1
Ni	18	37	44	34	49	51.5	62	51	85.5	86	56.5	41.75
Sc	12	11	14	13	13.5	13.25	36	37	36.5	35	36	36.5
Ba	8	4	309	389	349	369	71	44	57.5	9	26.5	35.25
U	1.2	1.9	1.3	1.7	1.3	1.6	0.5	0.2	0.4	0.1	0.4	0.3
Co	67.6	70.5	86	59	72.5	65.75	33	73.1	53.05	75.8	74.45	73.78
Cs	0.1	0.3	4.1	3.1	3.6	3.35	0.5	0.3	0.4	0.1	0.2	0.25
Hf	3.2	3	6.2	6.2	6.2	6.2	4.8	5.1	4.95	2.5	3.8	4.45
Nb	7.4	7.6	11.2	13	12.1	12.55	6	7	6.5	7.5	7.25	7.12
Rb	0.4	0.1	72	65	68.5	66.75	15	2.1	8.55	0.1	1.1	1.6
Sr	2.5	13.5	43	14	28.5	21.25	487	197.1	342.1	315.5	256.3	226.7
Ta	0.9	0.8	1.8	1.7	1.75	1.725	0.6	0.6	0.6	0.9	0.75	0.675
Th	9.5	8.9	10.7	10.2	10.45	10.33	1.3	1.2	1.25	1	1.1	1.15
V	83	79	96	77	86.5	81.75	386	398	392	209	303.5	350.8
Zr	105.5	102.5	216	195	205.5	200.3	148	196.7	172.4	88.2	142.5	169.6
Y	18	13.3	21.8	21.7	21.75	21.73	45.2	46.4	45.8	23.3	34.85	40.63
La	15.5	7.9	31.8	15	23.4	19.2	14.3	14.5	14.4	8.8	11.65	13.08
Ce	36.2	19.9	57.5	54.3	55.9	55.1	34.1	35.4	34.75	18.9	27.15	31.28
Pr	4.58	2.92	6.63	6.32	6.475	6.39	5.22	5.25	5.235	2.61	3.93	4.59
Nd	17.2	12.4	24.9	24.1	24.5	24.3	24.3	24.4	24.35	11.5	17.95	21.1
Sm	3.69	2.94	4.52	4.3	4.41	4.35	6.63	6.65	6.64	3.26	4.955	5.80
Eu	0.78	0.48	1.17	0.98	1.075	1.02	2.21	2.24	2.225	1.21	1.725	1.98
Gd	3.35	2.66	4.15	4.21	4.18	4.195	7.92	7.91	7.915	3.91	5.91	6.91
Tb	0.57	0.46	0.63	0.61	0.62	0.615	1.35	1.36	1.355	0.68	1.02	1.19
Dy	3.12	2.44	3.82	3.1	3.46	3.28	8.15	8.13	8.14	4.19	6.16	7.145
Ho	0.67	0.48	0.78	0.73	0.755	0.743	1.78	1.77	1.775	0.94	1.355	1.563
Er	1.92	1.38	2.22	2.25	2.235	2.243	4.97	4.95	4.96	2.54	3.745	4.348
Tm	0.31	0.23	0.33	0.36	0.345	0.353	0.74	0.75	0.745	0.37	0.56	0.655
Yb	1.86	1.43	2.34	1.98	2.16	2.07	4.63	4.69	4.66	2.39	3.54	4.115
Lu	0.31	0.25	0.34	4.1	2.22	3.16	0.76	0.72	0.74	0.36	0.54	0.63

منشأ متفاوت برای سنگ‌های این کمپلکس است. سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شایست، کلریت‌اپیدوت‌شایست دارای یک الگوی به نسبت مسطح با شیب کم با میانگین نسبت $(La/Lu)_N=2/9$ است که مشابه با الگوی سنگ‌های آذرین بازالتی دگرگون شده است (شکل ۶-۱). وجود این ویژگی در الگوی REE نشانگر یک ماگمای توله‌ایتی با منشأ جبه‌ای همراه با تفریق ناچیز است (Finamore et al., 2008).

تغییر ترکیب ژئوشیمیایی از بازالت‌های درون قاره‌ای (WPB) به سمت بازالت‌های نوع میان اقیانوسی غنی شده (E-MORB) از ویژگی‌های مهم بازالت‌های محیط‌های ریفتی است که با الگوی REE یکنواخت دارای شیب کم، از بازالت‌های محیط حاشیه مخرب با شیب تند در LREE (شاید نشانگر تفریق پلاژیوکلاز و ذوب بخش‌هایی از سنگ‌های لبه فرورونده در مذاب) متمایز می‌شود (Taylor et al., 2008).

سنگ‌های آن‌دالوزیت‌میکاشیست، کوارتز کلریت‌شایست، میکاشیست دارای الگوی شیب‌دار با میانگین نسبت $(La/Lu)_N=9/7$ با بی‌هنجاری منفی از Eu است که مشابه با الگوی شیل‌های آمریکای شمالی است (شکل ۶-۲).

ژئوشیمی سنگ‌های با منشأ آذرین

سنگ‌های با منشأ آذرین کمپلکس سوریان (کلریت‌اکتینولیت‌شایست و کلریت‌اپیدوت‌شایست) در نمودار دو تایی Zr/TiO_2 در مقابل Nb/Y و Zr در مقابل Y دارای موقعیتی مشابه بوده و در محدوده سنگ‌های بازالتی با گرایش توله‌ایتی قرار می‌گیرد (شکل ۷).

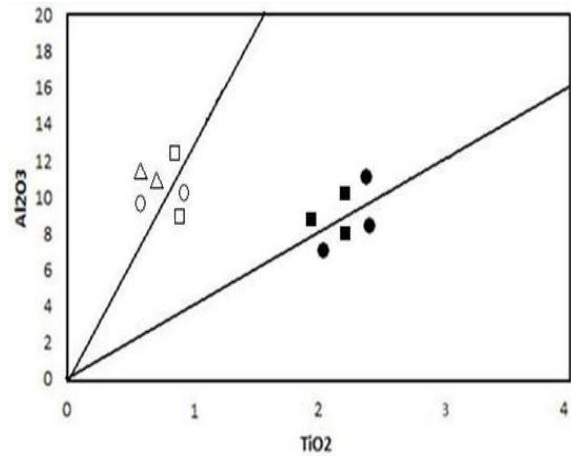
استفاده از نمودارهای دوتایی عناصر نامتحرک موجب آشکار شدن منشأ سنگ‌هایی می‌شود که دچار دگرگونی و دگرسانی شده‌اند. در نمودار Al_2O_3 در برابر TiO_2 ، سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شایست، کلریت‌اپیدوت‌شایست با یک منشأ و سنگ‌های آن‌دالوزیت‌میکاشیست، کوارتز کلریت‌شایست، میکاشیست نیز با منشأیی متفاوت قرار می‌گیرند (MacLean and Kranidiotis, 1987) (شکل ۴).

نمودار دوتایی Ti در برابر Ni برای تشخیص شایست‌های با منشأ سنگ آذرین از انواع با سنگ مادر رسوبی مورد استفاده قرار گرفته است (Floyd and Winchester, 1989).

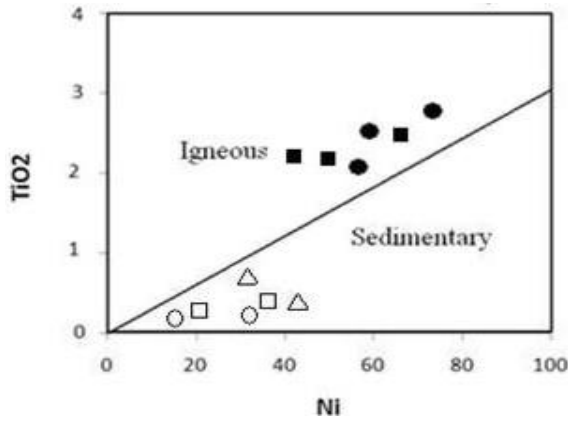
در این نمودار، سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شایست و کلریت‌اپیدوت‌شایست در ناحیه سنگ‌های آذرین و سنگ‌های آن‌دالوزیت‌میکاشیست، کوارتز کلریت‌شایست و میکاشیست در ناحیه سنگ‌های رسوبی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۱). همچنین، با استفاده از نمودار P_2O_5/TiO_2 در برابر MgO/CaO می‌توان منشأ سنگ‌ها را تعیین کرد (Floyd and Winchester, 1989). در این نمودار سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شایست و کلریت‌اپیدوت‌شایست در ناحیه سنگ‌های آذرین و سنگ‌های آن‌دالوزیت‌میکاشیست، کوارتز کلریت‌شایست و میکاشیست در ناحیه سنگ‌های رسوبی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۲).

الگوی بهنجار شده فراوانی عناصر REE در سنگ‌های دگرگون شده کمپلکس سوریان نسبت به غلظت این عناصر در کندریت (Pearce, 1996) دارای دو نوع الگوی متفاوت است که نشانگر دو

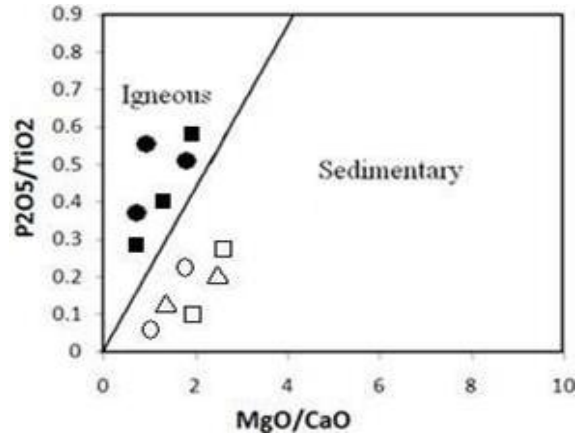
شکل ۴- محل قرارگیری سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیسیت (●)، کلریت‌اپیدوت‌شیسیت (■)، آندالوزیت‌میکاشیست (Δ)، کوارتز کلریت‌شیسیت (○) و میکاشیست (□) بر روی نمودار Al_2O_3 در برابر TiO_2



A

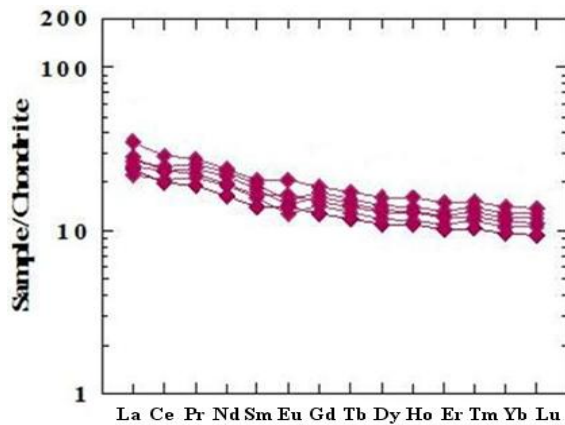


B

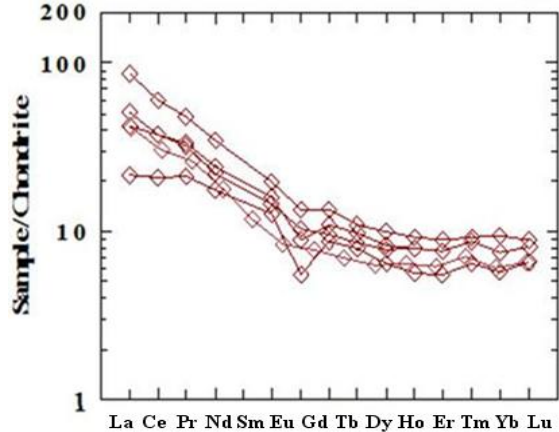


شکل ۵- محل قرارگیری سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیسیت (●)، کلریت‌اپیدوت‌شیسیت (■)، آندالوزیت‌میکاشیست (Δ)، کوارتز کلریت‌شیسیت (○)، میکاشیست (□) بر روی نمودار (علایم استفاده شده مطابق شکل ۴ است). A. TiO_2 در برابر Ni (Floyd and Winchester, 1989) و B) نمودار P_2O_5/TiO_2 در برابر MgO/CaO (Floyd and Winchester, 1989, 1977).

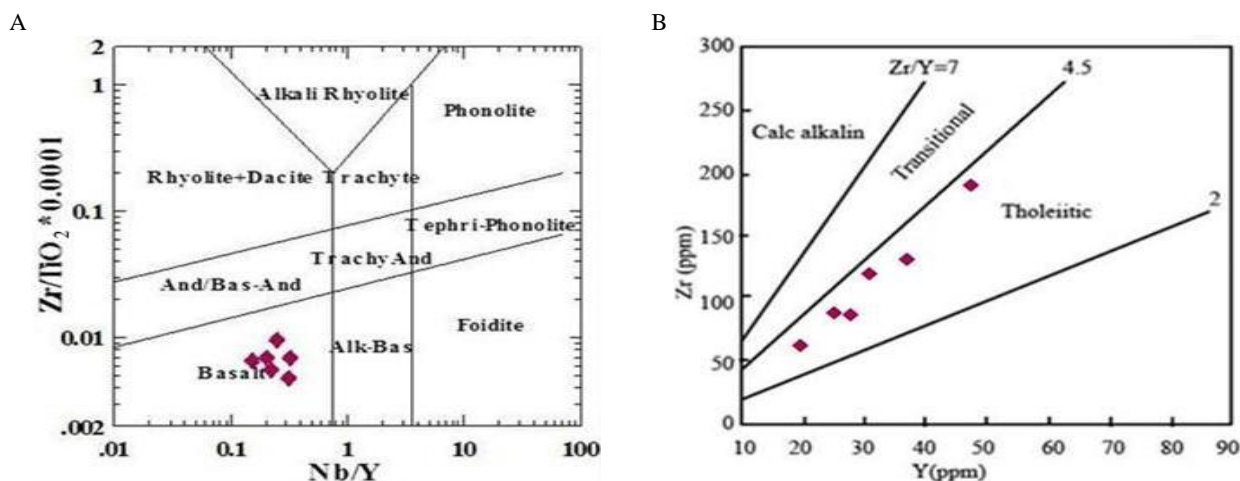
A



B



شکل ۶- الگوی توزیع بهنجار شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت (Pearce, 1996) در سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوربان؛ A) سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیسیت و کلریت‌اپیدوت‌شیسیت (●)؛ B) سنگ‌های آندالوزیت‌میکاشیست، کوارتز کلریت‌شیسیت و میکاشیست (◇)



شکل ۷- موقعیت نمونه‌های سنگ آذرین دگرگون شده در کمپلکس سوریان (علامه استفاده شده مطابق شکل ۶ است)؛ (A) نمودار Nb/Y در برابر Zr/(TiO₂*0.0001) (Barrett and MacLean, 1994) و (B) نمودار Y در برابر Zr (Floyd and Winchester, 1977) برای Zr (ppm).

ژئوشیمی سنگ‌های با منشأ رسوبی

اغلب سنگ‌های رسوبی دگرگون شده کوارتزکلریست‌شیسست، میکاشیسست و آندالوزیت‌مسکویت‌شیسست) کمپلکس سوریان در منطقه مورد بررسی دارای ۶۸ تا ۷۶ درصد وزنی سیلیس است. میزان اکسید آلومینیم در بیشتر این سنگ‌ها در محدوده ۱۱ تا ۱۴ درصد وزنی قرار می‌گیرد. مجموع اکسیدهای آهن (به صورت آهن سه ظرفیتی گزارش شده است) بین ۲ تا ۵ و میزان اکسید منیزیم اغلب از ۱ تا ۴ درصد در تغییر است. مقدار اکسید تیتانیوم کمتر از ۱ درصد و فراوانی منگنز بین ۰/۳ تا ۱/۵ درصد وزنی است. تغییرات مربوط به کلسیم، سدیم، پتاسیم با میزان سیلیس غیر خطی و پراکنده است که به فرآیندهای ثانویه نظیر: دگرسانی فلدسپارها و کانی‌های متفرقه مربوط می‌شود.

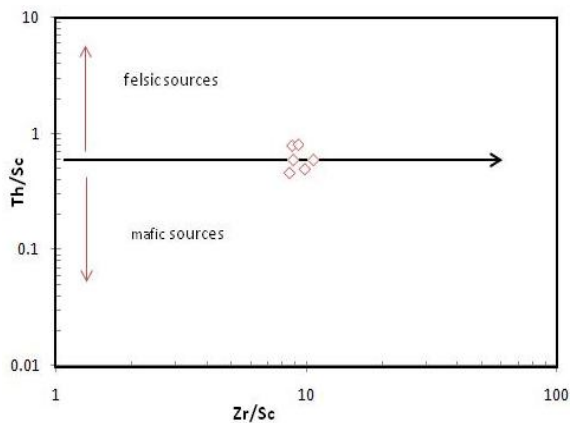
با استفاده از نسبت عناصر موجود در سنگ‌ها می‌توان ماهیت سنگ مادر را در سنگ‌های آواری تشخیص داد (Cullers, 2000; 1995; 1994). در این پژوهش با توجه به تحرک عناصر قلیایی و قلیایی

استفاده از نمودار سه تایی Zr-Ti/100-3Y از مؤثرترین روش‌ها برای تفکیک بازالت‌های درون قاره‌ای (WPB) از انواع پوسته اقیانوسی مخرب (VAB) است (Pearce and Cann, 1973). در این نمودار موقعیت میانگین پوسته بالایی (UC) و میانگین بازالت‌های نوع میان اقیانوسی معمولی (MM) نشان داده شده است. نمونه‌های نزدیک به بازالت‌های نوع میان اقیانوسی معمولی (N-MORB) نشانگر تشکیل آنها از یک ماگمای با منشأ ذوب جبه‌ای بوده و نمونه‌های با ترکیبی نزدیک به میانگین پوسته بالایی نشان می‌دهد که ماگمای بازالتی در اثر هضم پوسته، به شدت آلوده شده است (Finamore et al., 2008).

سنگ‌های آذرین دگرگون شده کمپلکس سوریان در محدوده بازالت‌های نوع میان اقیانوسی و توله‌ایت‌های درون صفحه‌ای (ناحیه B) قرار می‌گیرد که نشانگر عدم آلودگی پوسته‌ای و درجه ذوب بخشی پایین‌تری نسبت به بازالت‌های نوع میان اقیانوسی معمولی هستند و نشانگر یک محیط کشتی (ریفیتی) است (شکل ۸).

برابر La/Sc استفاده شده است. فرض اساسی در خصوص به کارگیری نمودارهای متمایز کننده سنگ‌های رسوبی این است که رابطه نزدیکی بین جایگاه تکتونیکی و منشأ رسوب وجود دارد (Cingolani *et al.*, 2003).

نمونه‌های سنگ رسوبی دگرگون شده مطالعه شده در نمودار شکل ۱۱ در محدوده سنگ‌های رسوبی حاشیه فعال قاره‌ای همراه با سنگ‌های توربیدیتی عمیق کف دریا قرار می‌گیرد. حضور میکاشیست‌های ریزدانه، به همراه سنگ‌های آتشفشانی نشان می‌دهد که در اثر نیروهای کششی، منطقه بررسی شده به طور مرتب در حال نشست بوده است و ضمن نهشته شدن رسوبات آواری و توربیدیتی در این حوضه، نفوذ و خروج ماگماهای بازالتی نیز صورت می‌گرفته است. سرانجام با تغییر رژیم زمین‌ساختی و شروع فرورانش، این مجموعه دچار دگرگونی شده است.

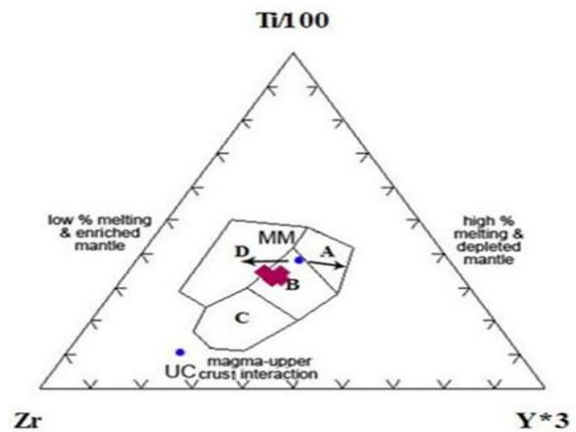


شکل ۹- نمودار تفکیک کننده منشأ سنگ‌های رسوبی بر اساس Zr/Sc در برابر Th/Sc (Cullers, 2000) (علایم استفاده شده مطابق شکل ۶ است).

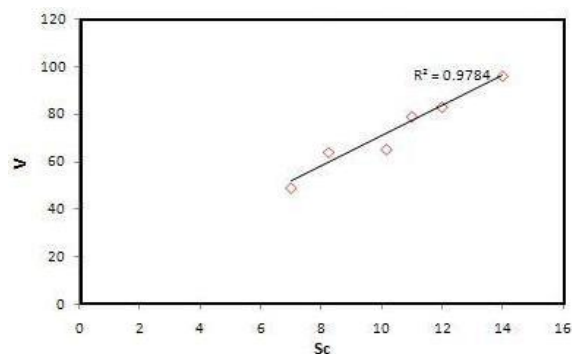
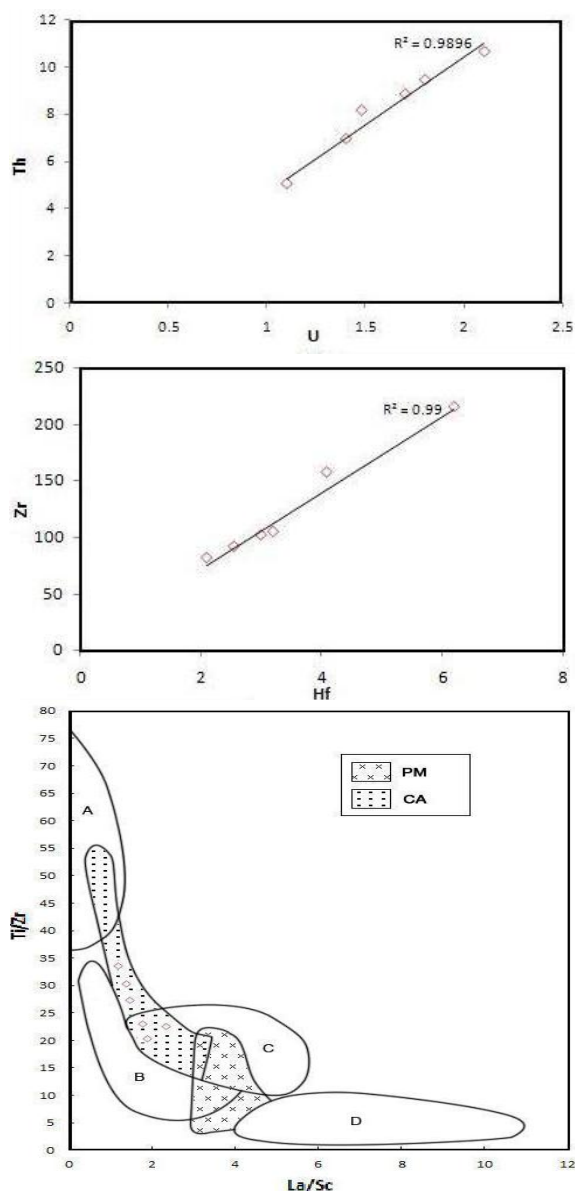
خاکی طی دگرگونی و دگرسانی، از نمودار تفکیکی Zr/Sc در برابر Th/Sc استفاده شده است که نشانگر قرارگیری سنگ‌های محدوده بررسی شده در مرز بین سنگ‌های فلسیک و مافیک است (شکل ۹).

همبستگی مثبت بین جفت عناصر نامتحرک $U-Th$ و $V-Sc$ ، $Hf-Zr$ نیز تأیید کننده حالت دو منشأی سنگ‌های فلسیک و مافیک برای سنگ‌های رسوبی دگرگون شده منطقه مطالعه شده است (Kolb *et al.*, 2004) (شکل ۱۰).

از برخی نمودارهای متمایز کننده می‌توان به محیط تکتونیکی تشکیل سنگ‌های رسوبی پی برد. اگر چه به دلیل تحرک بعضی از عناصر مانند Ca و Na طی دگرگونی، باید در به کار بردن نمودارهای تعیین محیط تکتونیکی تشکیل سنگ‌های رسوبی احتیاط کرد. به این منظور در نمودارهای تشخیص محیط تکتونیکی سنگ‌های رسوبی از میزان نسبت‌های عناصر بین Ti/Zr در



شکل ۸- موقعیت نمونه‌های سنگ آذرین دگرگون شده منطقه بررسی شده در نمودار سه تایی $Zr-Ti/100-3Y$ (Pearce and Cann, 1973) (علایم استفاده شده مطابق شکل ۶ است)؛ (A) میدان بازالت‌های توله‌ایتی جزایر کمانی؛ (B) میدان بازالت‌های میان اقیانوسی و توله‌ایت‌های درون صفحه‌ای؛ (C) میدان بازالت‌های کلسیمی-قلیایی؛ (D) میدان بازالت‌های میان قاره‌ای؛ (UC) میانگین پوسته بالایی و (MM) میانگین بازالت‌های نوع میان اقیانوسی معمولی.



شکل ۱۰- همبستگی عناصر U-Th، V-Sc، Zr-Hf در سنگ‌های رسوبی دگرگون شده کمپلکس سوربان (علایم استفاده شده مطابق شکل ۶ است).

شکل ۱۱- موقعیت نمونه‌های کمپلکس سوربان در نمودار تعیین جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های تخریبی بر اساس عناصر نامتحرک Ti/Zr در برابر La/Sc (علایم استفاده شده مطابق شکل ۶ است). (A) جزایر قوسی اقیانوسی؛ (B) جزایر قوسی قاره‌ای؛ (C) حاشیه فعال قاره‌ای؛ (D) حاشیه غیر فعال قاره‌ای؛ (PM) توربیدایت‌های عمیق دریا مشتق شده از حاشیه غیر فعال قاره‌ای؛ (CA) توربیدایت‌های عمیق دریا مشتق شده از حاشیه فعال قاره‌ای (Cingolani et al., 2003).

نتیجه‌گیری

کلریت‌آپیدوت‌شیسست با منشأ آذرین است. سنگ‌های با منشأ آذرین در محدوده بازالت توله‌ایتی با یک منشأ جبه‌ای با درجه ذوب بخشی پایین نسبت به N-MORB و در محیط ریفتی قرار می‌گیرد. سنگ‌های با منشأ رسوبی نیز با ماهیت دومنشأیی نشانگر همزمانی فعالیت‌های آتشفشانی مافیک درون یک حوضه ریفتی همزمان با ورود سنگ‌های تخریبی خارج از حوضه هستند که از نظر جایگاه زمین‌ساختی بر روی محیط حاشیه فعال قاره‌ای همراه با توربیدایت‌های عمیق

سنگ‌های دگرگونی کمپلکس سوربان شامل: کلریت‌آپیدوت‌شیسست، کلریت‌اکتینولیت‌شیسست، کوارتز کلریت‌شیسست، میکاشیسست و آندالوزیت میکاشیسست با سن پرموتریاس در پهنه سنندج-سیرجان در طول دره بوانات استان فارس رخنمون دارد. داده‌های ژئوشیمیایی نشانگر تشکیل سنگ‌های میکاشیسست، آندالوزیت میکاشیسست، کوارتز کلریت‌شیسست با منشأ رسوبی و سنگ‌های کلریت‌اکتینولیت‌شیسست،

تمرکز سیالات گرمایی با دمای بالا، محیط مناسبی را برای تشکیل کانسارهای آتشفشانی زیر دریایی فراهم می‌کند.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز در انجام این پژوهش تشکر نمایند. همچنین، از همکاری مدیریت معدن مس جیان در طول بررسی‌های صحرایی قدردانی می‌شود.

کف دریا در یک محیط ریفت درون قاره‌ای قرار می‌گیرد. شاید در اواخر پالئوزوئیک بالایی تا تریاس میانی در پهنه سنندج-سیرجان در منطقه مطالعه شده، پدیده کافتش و خروج ماگماهای بازالتی همراه با رسوبگذاری اتفاق افتاده باشد که نشانگر رژیم زمین‌ساختی کششی و جدایش بلوک ایران مرکزی از گندوانا و گسترش بستر اقیانوس نئوتتیس است؛ سپس با تغییر رژیم زمین‌ساختی و شروع فرورانش، دگرگونی در منطقه بررسی شده رخ داده است. این حوضه‌های کششی (ریفتی) با

منابع

- Barrett, T. J. and MacLean, W. H. (1994) Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda area. *Exploration and Mining Geology* 3: 131-160.
- Bayat, F., Torabi, G. and Koepke, J. (2012) Mineralogical study of metabasites in Me'raji and Chah Palang mountains (south of Chupanan, NE Esfahan province). *Journal of Petrology* 10: 48-67 (in Persian).
- Cingolani, C. A., Manassero, M. and Abre, P. (2003) Composition, provenance, and tectonic setting of Ordovician siliciclastic rocks in the San Rafael block: southern extension of the Precordillera crustal fragment, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 91: 93-106.
- Cullers, R. L. (1994) The controls on the major and trace element variation of shales, siltstone and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado of platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 4955-4972.
- Cullers, R. L. (1995) The controls on the major and trace element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet mountain region, Colorado, USA. *Chemical Geology* 123: 107-131.
- Cullers, R. L. (2000) The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51: 181-203.
- Finamore, S. M., Gibson, H. L. and Thurston, P. C. (2008) Archean synvolcanic intrusions and volcanogenic massive sulfide at the Genex mine Kamiskotia Area, Timmins, Ontario. *Economic Geology* 103: 1203-1218.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.
- Floyd, P. A. and Winchester, J. A. (1989) Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. *Chemical Geology* 21: 291-306.
- Hoshmand zadeh, A., Soheili, M. and Hamdi, B. (1990) Eqlid geological map 1: 250000, No. G10, Geological Survey and Mineral Expoloration of Iran (in Persian).
- Kolb, J., Hellmann, A. and Rogers, A. (2004) The role of transcrustal shear zone in orogenic gold mineralization at the Ajjanahalli mine, Dharwarcraton, south India. *Economic Geology* 99: 743-759.
- MacLean, W. H. and Kranidiotis, P. (1987) Immobile elements as monitors of mass transport in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami. *Economic Geology* 82: 951-962.

- Mousivand, F. (2003) Mineralogy, geochemistry and copper mineralization in the Surian volcano sedimentary complex, Bavanat area, Fars province. MSc thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (in Persian).
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K. and Watanabe, M. (2007) The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: first recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen* 183: 297-315.
- Oveisi, B. and Jusefi, T. (1996) Prospecting and preliminary exploration project for lead and barite deposits in Bavanat area, Fars province. Geological Survey and Mineral Expoloration of Iran (in Persian).
- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters* 2: 290-300.
- Pearce, J. (1996) Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19: 120-125.
- Taghipour, N. (2001) Geology and origin of Jian copper occurrence, Fars province. MSc thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran (in Persian).
- Taylor, C. D., Premo, W. R., Meier, A. L. and Taggart, E. T. (2008) The metallogeny of late Triassic rifting of the Alexander Terrain in southeastern Alaska and northwestern British Columbia. *Economic Geology* 103: 89-115.
- Xia, X., Changtao, L. and Zhongmo, L. (1999) Geology and mineralizing action of polymetallic sulfur-iron deposit in eastern Hebei. *Geology of Chemical Minerals* 3: 38-49.
- Yardley, B. W. D. (1989) An introduction to metamorphic petrology, Longman, London.
- Zhu, B., Kidd, W. S. F., Rowley, D. B., Currie, B. S. and Shafique, N. (2005) Age of initiation of the Indiana-Asia collision in the east-central Himalaya. *Journal of Geology* 113: 265-285.

Investigation on protolith and tectonic setting of metamorphic rocks in the Surian complex using petrographic and geochemical data

Mohammad Ali Rajabzadeh * and Soheila Esmaili

Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract

The metamorphic rocks of the Surian complex occurred along the Bavanat Valley, northeast of Fars province at the eastern edge of the Sanandaj-Sirjan zone. The complex is located between the Surian fault in the northeast, and Jian fault in the southeast, and consists of chlorite epidote schist, chlorite actinolite schist, quartz chlorite schist, mica schist and andalusite muscovite schist. Geochemical data (Al_2O_3 , CaO, MgO, Ni, P_2O_5 , TiO_2 and REE) contents reveal that the primary rocks of andalusite muscovite schist, quartz chlorite schist and mica schist were formed in sedimentary environments, whereas those of the chlorite actinolite schist and chlorite epidote schist have igneous origin. The concentrations of major immobile elements (e.g. Al, Ti), REE and High Field Strength Elements (HFSE) (e.g. Nb, Y, Zr), indicate that the rocks of sedimentary origin were formed in active continental margin setting in association with turbidites of deep sea floor and those of igneous origin show tholeiitic basalt nature of rift basins.

Key words: geochemistry, petrography, metamorphic rocks, Surian complex, Sanandaj-Sirjan zone