

تفاوت ترکیب کلینوپیروکسن در ماقماهای قلیایی و آهکی-قلیایی: بررسی موردی از توده پیرانشهر، شمال غرب ایران

* سید علی مظہری

دانشگاه پیام نور، گروه علمی زمین‌شناسی، تهران ۱۹۳۹۵-۴۶۹۷، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۱/۱۴، نسخه نهایی: ۹۷/۴/۲۰)

چکیده: در این پژوهش، ترکیب کلینوپیروکسن در دو نوع گابرو مشابه است و همه آنها در رده دیوپسید-اوژیت رده‌بندی می‌شوند، اما ترکیب عناصر کمیاب در این دو گروه بسیار متفاوت است. کلینوپیروکسن در گابروهای قلیایی غنی از عناصر باشد میدان یونی بالا (HFSE) و عناصر خاکی نادر ($\Sigma\text{REE} = ۳۴ - ۶۴ \text{ ppm}$) بوده و نسبت $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = ۹/۴ - ۲۶/۱$ ppm با نسبت‌های بالاتر $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = ۹/۴ - ۲۶/۱$ ppm هستند. محاسبه مذاب در حال تعادل با ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از ضرایب جدایش بین کلینوپیروکسن و ماقمای بازالتی نیز بیانگر ماهیت متفاوت منابع تشکیل آنهاست که با داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌کل گابروها همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن؛ گابرو؛ عناصر کمیاب؛ قلیایی؛ آهکی-قلیایی؛ توده پیرانشهر؛ پهنه سندنج-سیرجان.

متفاوت، به اثبات رسیده است [۹، ۸، ۳]. بنابراین، این کانی قابلیت استفاده به عنوان شاخص سنگ‌زایی، حتی در نمونه‌های دگرسان شده را نیز داراست و تعیین ترکیب آن (شامل اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب) کمکی مؤثر برای تحلیل فرایندهای زمین‌شناسی خواهد بود.

توده پیرانشهر یکی از توده‌های نفوذی متعددی است که در شمال غربی پهنه سندنج-سیرجان رخنمون یافته است. بررسی‌های دقیق سن‌سنگی و زمین‌شیمیایی بر این توده وجود دو نوع ماقمای مافیک قلیایی و آهکی-قلیایی در این مجموعه را به اثبات رسانده است [۱۰]. در این پژوهش، ترکیب کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های مختلف مافیک توده پیرانشهر تعیین شده و تأثیر ماقمای میزبان بر این کانی بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شود. بدین منظور، نتایج تجزیه نقطه‌ای اکسیدهای اصلی به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) و عناصر کمیاب

مقدمه

تغییر نوع و ماهیت ماقما بر بافت و ترکیب کانی‌ها تأثیر مستقیم دارد و بنابراین کانی‌ها می‌توانند اطلاعات با ارزشی از فرایندهای ماقمایی را در خود حفظ کنند [۱-۳]. با پیشرفت تجهیزات آزمایشگاهی و به ویژه تجزیه نقطه‌ای، طیف گستردۀ ای از کانی‌ها، از جمله فرومینیزین [۲-۴] و فلزی [۱، ۵، ۶]، در بررسی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌ساختی ماقمایی استفاده شده‌اند. در این میان، کلینوپیروکسن اهمیت ویژه‌ای در تعیین محیط زمین‌دینامیکی داشته است [۲-۴]. این کانی در انواع مختلف ماقمها حضور دارد و ترکیب آن به ماهیت و جایگاه زمین‌ساختی ماقمای اولیه حساس است [۴]. کلینوپیروکسن در برابر تغییرات ناشی از دگرگونی درجه پایین مقاوم است [۷] و رابطه بین ترکیب کلینوپیروکسن و ماقمای میزبان در بسیاری از نقاط دنیا و در محیط‌های زمین‌ساختی ماقمایی

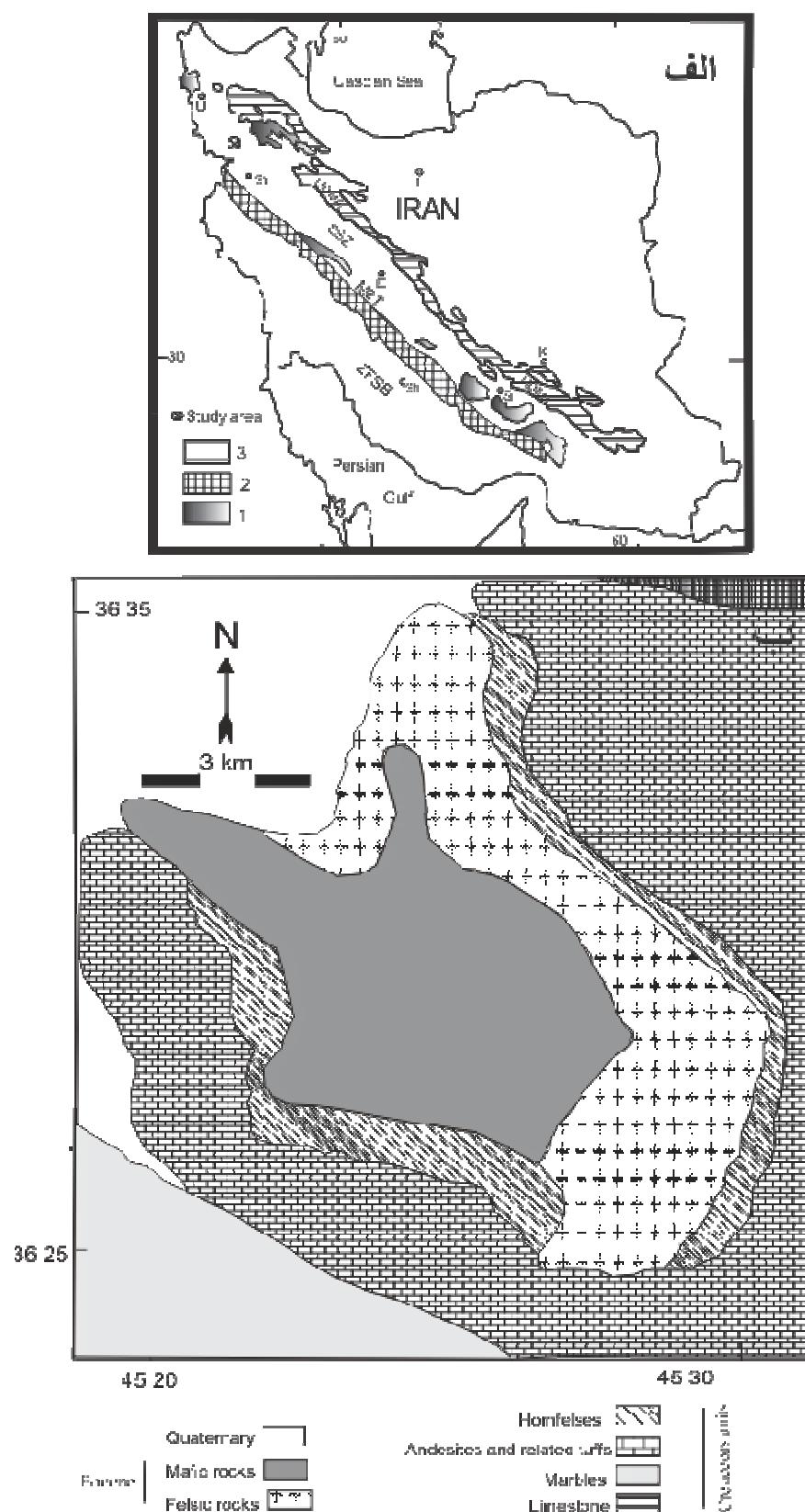
زائده (apophysis) با روند شمالی-جنوبی در سینیت‌ها نفوذ کرده‌اند (شکل ۱ ب). در سمت غربی زائده سینیت‌ها دارای کوارتز مودال می‌شوند و در برخی مناطق گرانیت قلیایی ظاهر می‌گردد، اما در شرق زائده، مقدار کوارتز در سینیت‌ها کم شده و رخنمون‌هایی از نفلین سینیت هیپرسولوس روشن دیده می‌شود. عموماً مرز بین سنگ‌های فلزی و مافیک مشخص است، به جز در زائده که شواهد آلایش ماقمای گابرویی با سینیت‌ها دیده می‌شود و سینیت‌ها دارای درونبوم-های بزرگ گابرویی هستند [۱۰].

چنان که اشاره شد، بررسی‌های دقیق زمین‌شیمیایی بر سنگ‌های این مجموعه نفوذی انجام گرفته است [۱۰]. سنگ‌های فلزی سینیت، نفلین سینیت و گرانیت‌های متا‌الومین نوع A-2 هستند که درشت بلور، هیپرسولوس و دارای آنیت-فایالیت-هدنبژیت هستند. سینیت‌ها، نفلین سینیت‌ها و گرانیت‌ها خاستگاه مشترک دارند. نفلین سینیت‌ها بازمانده غنی از آب و قلیایی از ماقمایی هستند که یک فاز غنی از فلوئور پیشتر از آن جدا شده است. گرانیت‌ها در یک محیط شیمیایی باز تشکیل شده‌اند، به طوریکه سیال قلیایی غنی از فلوئور و آبدار آزادشده از سینیت‌ها با سنگ‌های فلزی قدیمی واکنش داده است [۱۰]. داده‌های سنگ‌شناسی بیانگر وجود نوع ماقمای مافیک در توده پیرانشهر هستند؛ نوع غالب گابروهای قلیایی (G1) هستند که نسبت‌های عناصر سنگ دوست بزرگ یون به عناصر باشدت یونی بالا (LILE/HFSE) شبیه به ماقمای گوشتی درون صفحه‌ای دارند. نوع دوم گابروهای با روند آهکی قلیایی (G2) با مشخصه‌های ماقمای قوسی هستند که ویژگی‌های ایزوتوبی نمایانگر خاستگاه غنی شده‌تر آنها نسبت به نوع G1 است [۱۰]. جایگاه برخوردي در محيط تشکيل توده پيرانشهر موجب ايجاد ماقمای مختلف با منابع متفاوت شده است. ماقمای قلیایی از يك خاستگاه گوشته كمتر دگرگون شده و نوع آهکی قلیایی از واكنش‌های دگرسانی در گوشته بالای مناطق فرورانش شکل گرفته است [۱۰]. در اين پژوهش، تمرکز بر نمونه‌های مافیک و بررسی تركيب كلينوپيروكسن‌های دو نوع گابروی G1 و G2 است.

به روش طيف‌سنجي جرمی سايش ليزري پلاسمای جفت القايي (LA-ICP-MS) ارائه شده و پيرامون روابط بين عناصر مختلف و ماقمای اوليه بحث می‌شود. نتایج اين پژوهش می‌تواند برای مناطق مشابه و بویژه برای تعیين خاستگاه سنگ‌های انباشتی پيروكسن‌دار که تعیين نوع ماقمای آنها از طريق داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌کل امكان‌پذير نیست، به کار گرفته شود.

جایگاه زمین‌شناسی

توده پیرانشهر در شمال غربی پهنه سندنج-سیرجان و در مختصات $20^{\circ} 45'$ تا $30^{\circ} 35'$ طول جغرافیایی شرقی و $25^{\circ} 36'$ تا $36^{\circ} 35'$ عرض جغرافیایی شمالی واقع است. پهنه سندنج-سیرجان يکی از واحدهای زمین‌ساختی ماقمای ايران است که با گسترش طولی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنه‌ی امتداد یافته است (شکل ۱ الف). در اين پهنه و به ویژه در نیمه شمالی آن، مجموعه نفوذی‌های فراوانی ظاهر شده‌اند که در گستره زمانی وسیع شامل پالئوزوئیک [۱۱]، مزوژوئیک [۱۲] و سنوزوئیک [۱۳، ۱۰] تشکیل شده‌اند. توده نفوذی پیرانشهر يکی از مجموعه سنگ‌های نفوذی است که در اوسن و طی برخورد صفحات ایران و عربستان و بسته شدن نئوتیس شکل گرفته است [۱۰]. اين توده به شکل بيضوي نامنظم با عرضی حدود ۱۰ و طول ۱۶ کیلومتر در يك روند اصلی S³⁰E رخنمون یافته است (شکل ۱ ب). سنگ‌های آهکی و سنگ‌های رسوبی دگرگون شده مزوژوئیک سنگ‌های ميزبان اين توده هستند که بر اثر گرمای توده دستخوش دگرگونی مجاوري شده‌اند، به طوریکه ضخامت هورنفیس‌ها در برخی مناطق به يك کیلومتر نيز می‌رسد. در اين توده، ماقمای کاملًا تمایز فلزی و مافیک که دارای خاستگاه متفاوت هستند، حضور دارند. تعیین سن به روش پرتوسنجی گستره يکسانی را (حدود ۴۱ میلیون سال پیش) برای تشکیل آنها پیشنهاد می‌دهد [۱۰]. سنگ‌های مافیک گابروهایی هستند که بيشتر در مرکز و غرب توده جای گرفته‌اند، در حالیکه سنگ‌های فلزی بيشتر تركيب سینیتی دارند و در شمال، شرق و در جنوب توده واقع شده‌اند. در شمال توده گابروها به صورت يك

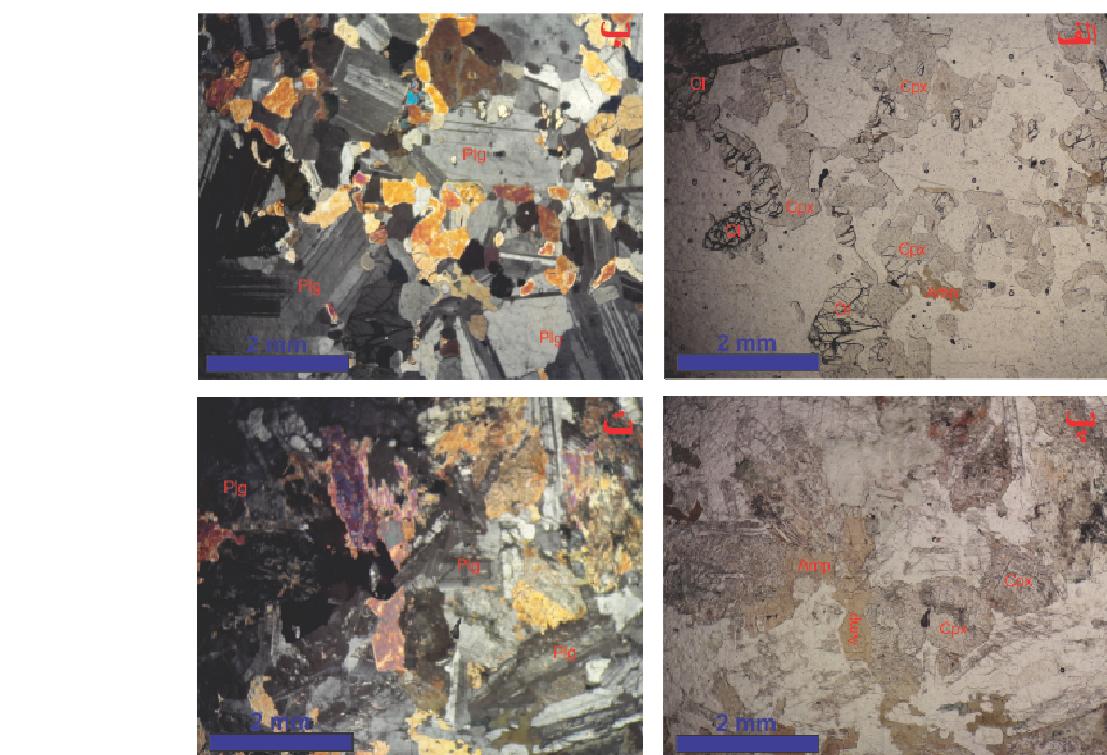


شکل ۱ (الف) جایگاه منطقه مورد بررسی در ایران و پهنه سندج-سیرجان (برگرفته از مرجع [۱۵]). ۱ = نواحی پر کامبرین، ۲ = پهنه روراندگی زاگرس، ۳ = مجموعه ماجمایی ارومیه دختر. E = اصفهان، K = کرمان، MTZ = روراندگی اصلی زاگرس، Sa = سندج، SSZ = پهنه سندج-سیرجان، T = تهران، U = ارومیه و ZFSB = کربنید چین خورده ساده زاگرس. (ب) نقشه ساده توده پیرانشهر [۱۰].

جانشین کلینوپیروکسن حضور دارد (شکل‌های ۲ پ و ت). کلینوپیروکسن در همه نمونه‌ها به شکل بلورهای بی‌شکل بی‌رنگ تا صورتی کمرنگ دیده می‌شود که به طور موضعی ممکن است به بیوتیت یا آمفیبول تبدیل شده باشد. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در بخش‌های بعدی به تفصیل بررسی می‌شود.

تجزیه بلورهای کلینوپیروکسن

برای انجام این تحقیق مقاطع نازک صیقلی تهیه شده از دو نمونه گابروی قلیایی (N26 و N63) و دو نمونه گابروی آهکی قلیایی (N61 و N31)، به منظور تعیین اکسیدهای اصلی (به روش EPMA) و عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوبی (با استفاده از LA-ICP-MS) در بلورهای کلینوپیروکسن، تجزیه شدند. داده‌های زمین‌شیمیایی این نمونه‌ها (شامل اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب، ایزوتوب‌های Rb-Sr و Sm-Nd و تعیین سن U-Th-Pb)، وابستگی این نمونه‌ها به دو گروه مختلف G1 و G2 را تأیید می‌کند [۱۰]. آنالیز EPMA در سال ۲۰۰۷ و در دانشگاه گرانادا با استفاده از دستگاه ریزپردازشگر الکترونی CAMECA SX100 با ولتاژ شتابنده ۲۰ kV و جریان پرتو ۲۰ nA انجام گرفته است.



شکل ۲ تصاویری از بافت میکروسکوپی گابروهای پسوه: (الف و ب) گابروی قلیایی به ترتیب در نور PPL و نور XPL؛ (پ و ت) گابروی آهکی قلیایی به ترتیب در نور PPL و نور XPL. (Cpx = کلینوپیروکسن؛ Ol = آمفیبول؛ Amp = آمفورا؛ Plg = پلازیوکلاز).

سنگنگاری

سنگهای مافیک گابروهایی متراکم با اندازه دانه‌های متفاوت از ۰/۵ میلیمتر تا ۲ سانتیمتر (به طور معمول $\text{Ø} = ۱-۳$ میلیمتر) هستند. پلازیوکلاز، کلینوپیروکسن و در مرحله بعد آمفیبول فراوانترین کانی‌های هر دو نوع گابرو هستند (شکل ۲). الیوین در همه نمونه‌های گابروی G1 وجود دارد و حجم آن تا ۱۰ درصد مودل نیز ممکن است برسد (شکل‌های ۲ الف و ب؛ در حالیکه در نمونه‌های G2 الیوین به ندرت و آنهم به شکل کاملاً ایدینگزیتی شده ظاهر می‌شود). کانی‌های فرعی گابروهای پیرانشهر شامل ایلمنیت، تیتانومگنتیت، پیریت، آپاتیت و مقادیر بسیار کم زیرکن هستند. پلازیوکلاز به گونه‌های مختلف شکل دار تا بی‌شکل با هسته لابرادوریتی (An_{45-60}) و لبه آندزینی (۴۵-۵۵) دیده می‌شود. ترکیب پلازیوکلازها در انواع قلیایی و آهکی قلیایی تقریباً مشابه است [۱۶]. آمفیبول در گابروهای پیرانشهر به رنگ قهوه‌ای و با ترکیب پارگاسیت تا کرسوتیت ظاهر می‌شود. آمفیبول در گابروهای G1 تیتانیوم بیشتری نسبت به نوع G2 دارد [۱۶] و اغلب به صورت درشت بلورهایی دیده می‌شود که کانی‌های پلازیوکلاز، الیوین و کلینوپیروکسن را دربر می‌گیرد. در گابروهای G2 آمفیبول بیشتر به صورت بلورهای بین دانه‌ای کوچک یا به شکل

ICP-MS تعیین شد. این کار براساس دستورالعمل مرجع [۲] انجام گرفت.

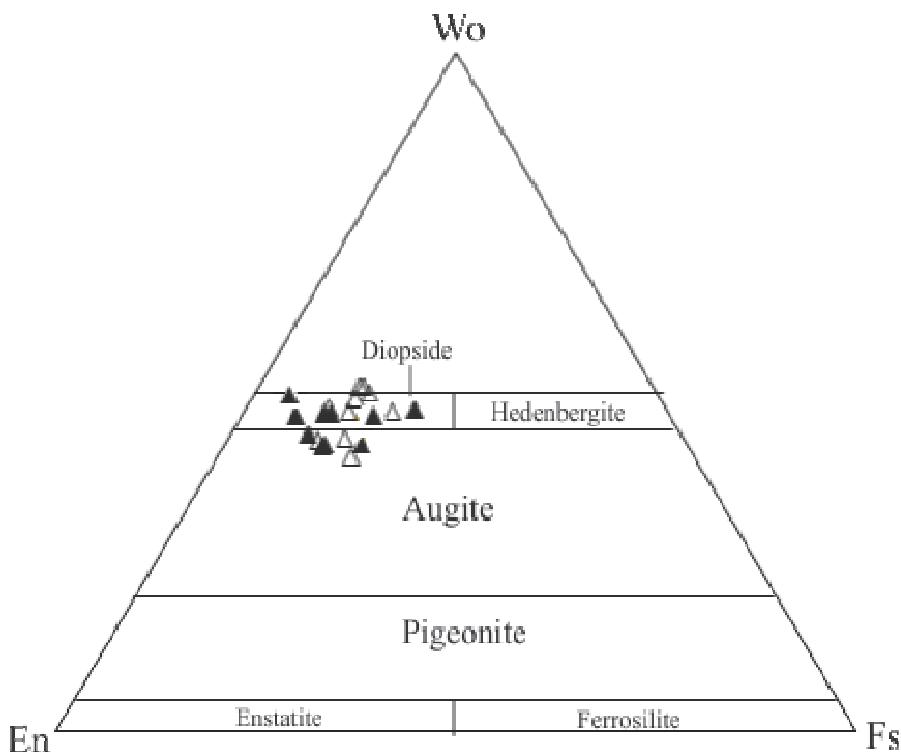
شیمی کانی

ترکیب اکسیدهای اصلی کلینوپیروکسن‌های گابروهای توده پیرانشهر در جدول ۱ ارائه شده است. تغییرات فراوانی اکسیدهای اصلی در بلورهای کلینوپیروکسن گابروهای G1 و G2 مشابه است و همه آنها در گستره دیوپسید-اوژیت ($\text{En}_{37.5}\text{Fs}_{10.21}\text{Wo}_{32.51}$) رده‌بندی می‌شوند (شکل ۳).

داده‌های عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوپی در سال ۲۰۱۷ و در آزمایشگاه Actlabs کانادا تعیین شد. عناصر کمیاب پیروکسن‌ها در مقاطع نازک صیقلی با استفاده از لیزر Thermo ۲۱۳ نانومتر New Wave Research که به دستگاه Finnigan-High Resolution ICP-MS متصل بود، تعیین شدند. بلورها با استفاده از یک نقطه به قطر $75 \mu\text{m}$ با انرژی 10 mJ در 10 Hz تجزیه شدند. ترکیب ایزوتوپی Sr بر کلینوپیروکسن بلورهای مقاطع نازک صیقلی به روش MC-Neptune Multi Collector با استفاده از دستگاه ICP-MS

جدول ۱ ترکیب اکسیدهای اصلی (بر حسب درصد وزنی) نمونه‌های برگزیده کلینوپیروکسن در گابروهای پیرانشهر. CA = گابروی آهکی قلیایی؛ A = گابروی قلیایی.

شماره نمونه	N26	N26	N31	N31	N31	N61	N61	N63	N63	N63
نوع سنگ	A	A	CA	CA	CA	CA	CA	A	A	A
SiO_2	52.7	51.90	51.18	52.31	51.89	51.73	52.16	52.24	52.29	52.64
TiO_2	0.58	0.67	1.10	0.54	0.64	0.75	0.51	0.58	0.47	0.43
Al_2O_3	1.99	2.94	2.52	2.13	2.42	1.83	1.43	1.38	1.66	1.26
Cr_2O_3	0.10	0.26	0.06	0.19	0.21	0.09	0.06	0.02	0.01	0.01
NiO	0.08	0.	0.02	0.	0.05	0.01	0.	0.06	0.	0.
FeO	6.33	10.35	8.78	9.29	8.28	10.96	10.83	10.80	10.44	11.05
MnO	0.22	0.26	0.29	0.26	0.20	0.37	0.36	0.39	0.32	0.37
MgO	16.06	17.99	14.11	15.56	14.42	12.76	12.83	12.95	12.96	13.05
CaO	22.18	16.48	21.68	19.92	21.75	21.78	21.79	21.61	12.84	21.64
Na_2O	0.32	0.31	0.41	0.33	0.44	0.40	0.39	0.36	0.41	0.37
K_2O	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
F	0.12	0.12	0.11	0.18	0.12	0.06	0.11	0.12	0.10	0.12
Cl	0.	0.02	0.	0.01	0.	0.02	0.	0.01	0.	0.
مجموع	100.70	101.32	100.28	100.63	100.55	100.76	100.48	100.52	100.50	100.97
(6O) فرمول										
Si	1.93	1.89	1.90	1.93	1.92	1.93	1.95	1.95	1.95	1.96
Ti	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
Al	0.09	0.13	0.11	0.09	0.11	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06
Cr	0.	0.01	0.	0.01	0.01	0.	0.	0.	0.	0.
Ni	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Fe_t	0.19	0.31	0.27	0.29	0.26	0.34	0.34	0.34	0.33	0.34
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.88	0.97	0.78	0.85	0.79	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72
Ca	0.87	0.64	0.86	0.79	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86
Na	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
K	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
F	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cl	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
Fe_3	0.06	0.09	0.07	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
Fe_2	0.13	0.22	0.20	0.23	0.19	0.29	0.29	0.30	0.29	0.30
En	0.45	0.50	0.41	0.44	0.42	0.37	0.37	0.37	0.38	0.38
Wo	0.45	0.33	0.45	0.41	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Fs	0.10	0.16	0.14	0.15	0.13	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18



شکل ۳ نمایش ترکیب کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر در نمودار رده بندی پیروکسن‌ها [۱۷]. ▲ = کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای قلیایی؛ Δ = کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای آهکی قلیایی.

مراتب بیشتر از نمونه‌های آهکی قلیایی (ΣREE = ۹,۴ - ۲۶,۱ ppm) است. افزون بر این، ناهنجاری منفی Eu در کلینوپیروکسن‌های G1 مشهود است Eu/Eu^{*} = ۰,۶۳ - ۰,۷۷ (Eu/Eu^{*} = ۰,۹۲ - ۱,۱). در حالیکه انواع G2 ناهنجاری ندارند (Eu/Eu^{*} = ۰,۹۲ - ۱,۱).

نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اندازه‌گیری شده برای کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر در جدول ۳ آورده شده است. گفتنی است که تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی در این پژوهش تنها قادر به تعیین مقدار نسبت‌های ایزوتوپی Sr بوده و متاسفانه برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی Rb مناسب نبودند. بنابراین، مقدار ارائه شده در اینجا بدون تصحیحات سنی بوده و در واقع مقدار کمی و واقعی نسبت‌های ایزوتوپی در نمونه‌های گابرو را نشان نمی‌دهند. با این حال، از این داده‌ها می‌توان برای مقایسه نسبت‌های ایزوتوپی بین کلینوپیروکسن‌های شکل گرفته از مآگماهای مادر متفاوت استفاده نمود [۲]. چنان که در جدول ۳ آورده شده است، نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در کلینوپیروکسن‌های G2

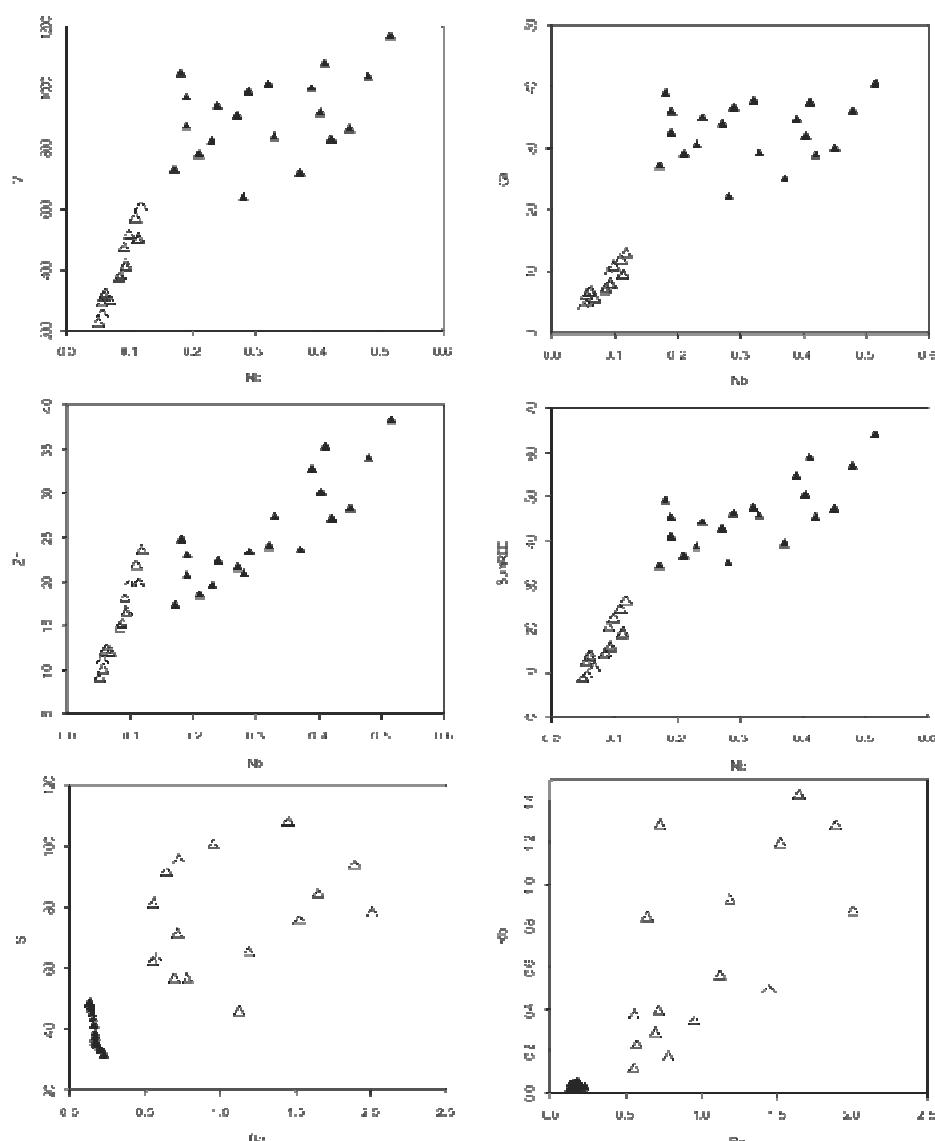
مقدار عناصر کمیاب کلینوپیروکسن‌ها (جدول ۲) روندی کاملاً متفاوت با اکسیدهای اصلی را نشان می‌دهد. کلینوپیروکسن‌های گابروهای قلیایی در بسیاری از عناصر اختلاف ترکیبی بازی با انواع آهکی قلیایی نشان می‌دهند. تمرکز عناصر LILE (Ba و Rb) در کلینوپیروکسن‌های گابروهای G2 بالاتر از نمونه‌های G1 است؛ حال آن‌که کلینوپیروکسن‌های G1 به نسبت G2 از عناصر Sc, HFSE, Th, Hf, Zr, Ta, Nb, Y, Ga, V (REE) غنی شده‌اند (شکل ۴). تفاوت ترکیب کلینوپیروکسن در انواع گابروهای پیرانشهر در الگوی نمودار عنکبوتی بهنجارشده نسبت به کندریت اولیه به خوبی نمایان است (شکل ۵ الف). در الگوی نمودار عناصر نادر خاکی (REE) نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین کلینوپیروکسن‌های گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی دیده می‌شود (شکل ۵ ب). با وجود اینکه روند الگوی REE در کلینوپیروکسن‌های G1 ($\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = ۰,۴۴ - ۰,۴۵$) و G2 ($\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = ۰,۳۸ - ۰,۴۰$) تقریباً مشابه است، مقدار عناصر خاکی نادر در کلینوپیروکسن‌های قلیایی ($\Sigma\text{REE} = ۳۴ - ۶۴ \text{ ppm}$) به

همخوانی دارد، چرا که نمونه‌های سنگ‌کل گابروهای G2 نیز دارای نسبت‌های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بالاتری از نمونه‌های G1 هستند [۱۰].

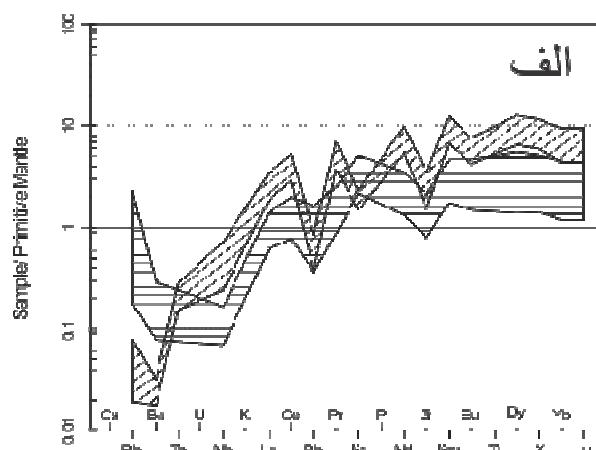
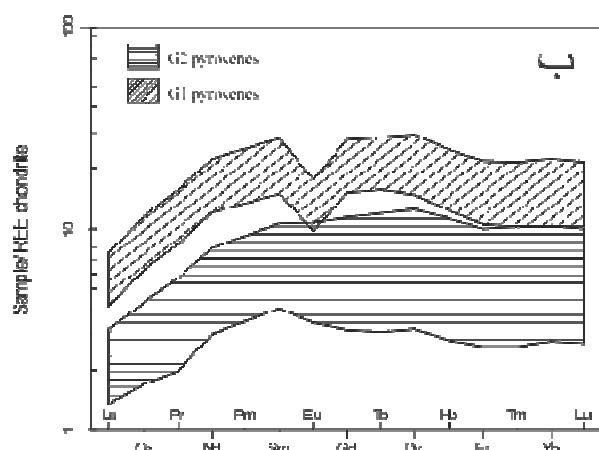
G1 (۰,۷۰۷۴۸ - ۰,۷۰۷۱۳) بالاتر از کلینوپیروکسن‌های ۰,۷۰۶۱۲ (۰,۷۰۵۴۳ - ۰,۷۰۶۱۲) است. این مقادیر بیانگر ماهیت پربوزاد خاستگاه نمونه‌های آهکی-قلیایی است که با روند مشاهده شده برای نسبت‌های ایزوتوپی سنگ‌کل برای گابروهای پیرانشهر

جدول ۲ ترکیب عناصر کمیاب (بر حسب ppm) کلینوپیروکسن در گابروهای پیرانشهر. (CA = گابروی آهکی قلیایی؛ A = گابروی قلیایی. پایین تر از حد تشخیص = b.d.)

شماره نمونه	N26	N26	N26	N63	N63	N63	N31	N31	N31	N61	N61	N61
نوع سنگ	A	A	A	A	A	A	CA	CA	CA	CA	CA	CA
Rb	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۱۷	۰,۳۹	۰,۳۷	۰,۸۷	۰,۴۹	۰,۹۲
Sr	۴۸,۵۵	۴۵,۱۵	۳۱,۱۸	۴۱,۱۹	۳۸,۴۶	۳۵,۵۰	۵۶,۳۹	۷۰,۸۶	۸۰,۸۷	۷۸,۰۹	۱۰۷,۸۰	۶۵,۲۵
Ba	۰,۱۳	۰,۱۴	۰,۲۳	۰,۱۶	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۷۸	۰,۷۱	۰,۵۵	۲,۰۱	۱,۴۵	۱,۱۹
Sc	۲۵۶,۹۴	۲۹۰,۷۱	۴۱۶,۲۹	۳۲۰,۸۷	۳۳۱,۷۲	۳۴۷,۴۱	۵۴,۰۹	۴۸,۷۹	۸۷,۱۵	۸۰,۴۵	۱۰۳,۴۱	۶۶,۹۱
V	۷۷۷,۱۷	۸۲۲,۷۶	۱۱۶۶,۷۴	۹۰,۱۱	۹۳۸,۸۳	۹۸۳,۲۱	۳۱۸,۳۸	۲۸۷,۱۷	۵۱۲,۹۷	۴۹۹,۷۵	۶۰,۸۶۷	۴۱۵,۶۷
Ga	۲۶,۹۴	۳۰,۴۹	۴۰,۴۰	۳۳,۶۵	۳۴,۴۹	۳۶,۴۳	۶,۶۱	۵,۹۶	۱۰,۶۴	۹,۲۵	۱۲,۶۳	۷,۶۹
Y	۲۶,۵۱	۲۹,۹۹	۵۲,۲۵	۳۳,۱۱	۳۴,۲۳	۳۵,۸۴	۱۲,۳۴	۱۱,۱۳	۱۹,۸۷	۱۴,۳۴	۲۳,۵۸	۱۱,۳۹
Nb	۰,۱۷	۰,۲۳	۰,۵۱	۰,۲۷	۰,۲۴	۰,۲۹	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۱۰	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۰۹
Ta	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۵	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
Zr	۱۷,۲۴	۱۹,۵۱	۳۸,۲۹	۲۱,۵۳	۲۲,۲۶	۲۳,۳۱	۱۲,۲۶	۱۱,۰۶	۱۹,۷۵	۱۹,۹۵	۲۳,۴۴	۱۶,۵۹
Hf	۱,۳۴	۱,۵۱	۳,۲۱	۱,۶۷	۱,۷۲	۱,۸۱	۰,۷۷	۰,۶۹	۱,۲۴	۱,۶۱	۱,۴۷	۱,۳۴
Pb	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۱۱	۰,۰۶	۰,۱۰
Th	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
La	۱,۴۰	۱,۵۸	۲,۳۶	۱,۷۴	۱,۸۰	۱,۸۹	۰,۵۱	۰,۴۶	۰,۸۳	۰,۹۴	۰,۹۸	۰,۷۹
Ce	۵,۱۶	۵,۸۴	۹,۲۸	۶,۴۵	۶,۶۶	۶,۹۸	۱,۸۲	۱,۶۴	۲,۹۳	۳,۰۶	۳,۴۷	۲,۵۵
Pr	۱,۰۳	۱,۱۶	۱,۸۹	۱,۲۸	۱,۳۳	۱,۳۹	۰,۳۶	۰,۳۳	۰,۵۸	۰,۵۴	۰,۶۹	۰,۴۵
Nd	۷,۲۰	۸,۱۵	۱۲,۲۸	۸,۹۹	۹,۲۹	۹,۷۳	۲,۵۲	۲,۲۷	۴,۰۵	۴,۰۳	۴,۸۱	۳,۳۵
Sm	۲,۹۱	۳,۲۹	۵,۴۷	۳,۶۳	۳,۷۶	۳,۹۴	۱,۰۹	۰,۹۸	۱,۷۵	۱,۷۵	۲,۰۸	۱,۴۶
Eu	۰,۸۶	۰,۹۷	۱,۲۸	۱,۰۶	۱,۱۲	۱,۱۹	۰,۳۹	۰,۳۸	۰,۶۵	۰,۵۴	۰,۷۹	۰,۴۸
Gd	۴,۰۶	۴,۵۹	۷,۱۱	۵,۰۷	۵,۲۴	۵,۴۹	۱,۵۴	۱,۳۹	۲,۴۹	۱,۸۳	۲,۹۵	۱,۵۲
Tb	۰,۷۴	۰,۸۴	۱,۳۵	۰,۹۲	۰,۹۵	۱,۰۰	۰,۳۰	۰,۲۷	۰,۴۸	۰,۳۳	۰,۵۷	۰,۲۷
Dy	۴,۷۶	۵,۳۸	۹,۳۷	۵,۹۴	۶,۱۴	۶,۴۳	۲,۱۱	۱,۹۱	۳,۴۰	۲,۳۰	۴,۰۴	۱,۹۲
Ho	۰,۸۹	۱,۰۰	۱,۷۷	۱,۱۱	۱,۱۴	۱,۲۰	۰,۴۲	۰,۳۸	۰,۶۸	۰,۴۵	۰,۸۱	۰,۳۸
Er	۲,۲۰	۲,۴۸	۴,۵۴	۲,۷۴	۲,۸۴	۲,۹۷	۱,۱۰	۰,۹۹	۱,۷۸	۱,۲۳	۲,۱۱	۱,۰۳
Tm	۰,۳۳	۰,۳۷	۰,۶۹	۰,۴۱	۰,۴۳	۰,۴۵	۰,۱۷	۰,۱۶	۰,۲۸	۰,۱۹	۰,۳۳	۰,۱۶
Yb	۲,۱۵	۲,۴۳	۴,۶۰	۲,۶۹	۲,۷۸	۲,۹۱	۱,۱۴	۱,۰۳	۱,۸۳	۱,۳۰	۲,۱۸	۱,۰۸
Lu	۰,۳۳	۰,۳۷	۰,۶۹	۰,۴۱	۰,۴۳	۰,۴۵	۰,۱۷	۰,۱۵	۰,۲۷	۰,۲۰	۰,۳۲	۰,۱۶
ΣREE	۳۴,۰۳	۳۸,۵۰	۶۳,۷۴	۴۲,۴۹	۴۳,۹۳	۴۶,۰۱	۱۳,۶۶	۱۲,۳۲	۲۲,۰۱	۱۸,۷۲	۲۶,۱۲	۱۵,۵۷



شکل ۴ نمودارهای دوتایی بیانگر تفاوت ترکیب عناصر کمیاب در کلینوپیروکسن‌های گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی توده پیرانشهر. علاوه همانند شکل ۳ است.



شکل ۵ (الف) نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشه اولیه ب) الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت برای کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای پسونه. مقادیر بهنجار شده برگرفته از مرجع [۱۸] هستند.

جدول ۳ ترکیب ایزوتوب‌های Sr کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر.

شماره نمونه	نوع سنگ	^{84}Sr	^{86}Sr	^{87}Sr	^{88}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1σ	$^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1σ
N26	A	۰,۰۴۱۴۵	۰,۵۶۳۴۱	۰,۴۸۰۸۲	۴,۱۴۳۵۲	۰,۷۰۵۴۸	۰,۰۰۰۰۴	۰,۰۵۶۵۵	۰,۰۰۰۰۶
N26	A	۰,۰۰۳۴۷	۰,۰۶۴۲۷	۰,۰۵۶۶۸	۰,۷۴۴۲۶	۰,۷۰۵۴۳	۰,۰۰۰۱۱	۰,۰۶۱۷۱	۰,۰۰۰۴۲
N26	A	۰,۰۱۴۳۵	۰,۲۶۳۰۷	۰,۲۵۴۱۹	۲,۲۷۸۶۴	۰,۷۰۶۰۹	۰,۰۰۰۰۸	۰,۰۵۷۲۶	۰,۰۰۰۲۱
N63	A	۰,۰۰۳۳۱	۰,۰۴۹۲۶	۰,۰۴۴۹۹	۰,۴۲۷۱۹	۰,۷۰۶۱۳	۰,۰۰۰۲۰	۰,۰۷۱۹۷	۰,۰۰۰۷۸
N63	A	۰,۰۱۰۵۵	۰,۱۸۷۳۵	۰,۱۷۸۵۱	۲,۶۲۳۸۴	۰,۷۰۶۰۶	۰,۰۰۰۰۹	۰,۰۵۹۱۹	۰,۰۰۰۵۰
N63	A	۰,۰۰۳۸۱	۰,۰۶۳۳۴	۰,۰۸۴۴۹	۰,۵۴۷۲۹	۰,۷۰۵۷۸	۰,۰۰۰۱۸	۰,۰۶۰۹۴	۰,۰۰۰۳۶
N31	CA	۰,۰۲۲۱۷	۰,۳۸۸۷۴	۰,۳۶۲۴۱	۳,۳۸۲۴۹	۰,۷۰۷۳۹	۰,۰۰۰۰۵	۰,۰۵۶۵۰	۰,۰۰۰۰۷
N31	CA	۰,۰۱۷۱۸	۰,۳۰۲۱۳	۰,۳۰۵۱۲	۲,۶۱۸۳۴	۰,۷۰۷۲۸	۰,۰۰۰۰۶	۰,۰۵۵۹۴	۰,۰۰۰۲۱
N31	CA	۰,۰۰۲۲۳	۰,۰۳۱۷۳	۰,۰۲۶۵۹	۰,۲۶۵۷۸	۰,۷۰۷۳۳	۰,۰۰۰۱۵	۰,۰۷۶۱۳	۰,۰۰۰۸۳
N61	CA	۰,۰۱۸۰۵	۰,۳۲۶۳۸	۰,۳۴۱۹۲	۲,۸۳۶۲	۰,۷۰۷۱۳	۰,۰۰۰۰۴	۰,۰۵۷۰۳	۰,۰۰۰۱۳
N61	CA	۰,۰۰۵۷۹	۰,۱۰۸۱۳	۰,۰۸۲۵۱	۰,۹۳۷۷۵	۰,۷۰۷۲۴	۰,۰۰۰۱۰	۰,۰۶۳۰۷	۰,۰۰۰۷۱
N61	CA	۰,۰۲۲۹۳	۰,۴۲۳۷۲	۰,۴۶۵۱۶	۳,۶۷۱۵۲	۰,۷۰۷۱۶	۰,۰۰۰۰۵	۰,۰۵۶۰۴	۰,۰۰۰۶

قلیایی سایر نقاط دنیا نیز قابل مشاهده است [۲۲]. در نمونه‌های مورد بررسی، فراوانی عناصر کمیاب ماقماهای در حال تعادل با کلینوپیروکسن‌ها از طریق ضرایب جدایش کلینوپیروکسن و ماقمای بازالتی [۲۳] و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

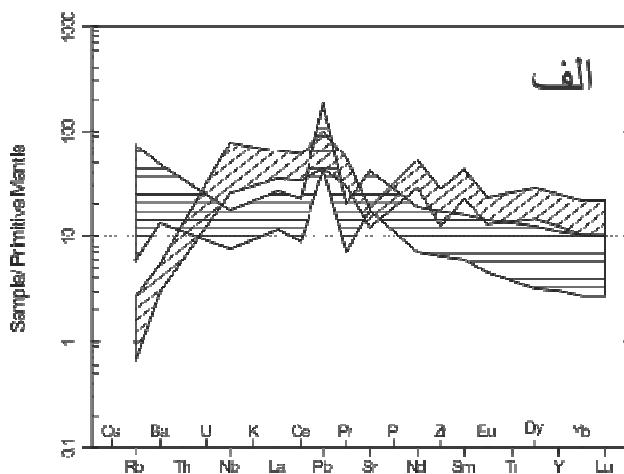
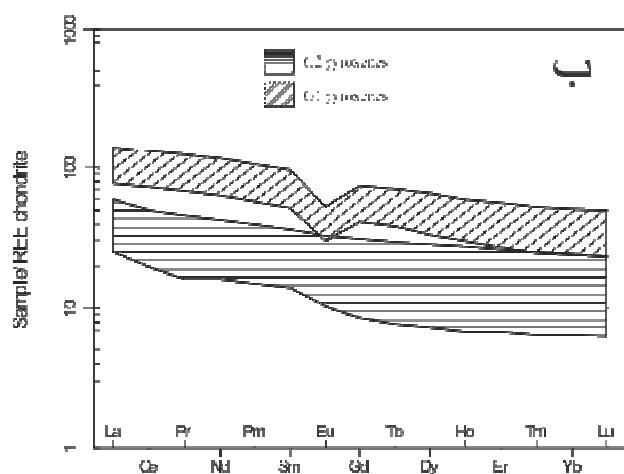
$$K_d = C_s / C_l$$

در این رابطه، K_d ضریب جدایش، C_s غلظت عنصر مورد نظر در کلینوپیروکسن و C_l غلظت عنصر در ماقمای در حال تعادل است.

در نمودار عنکبوتی بهنجارشده نسبت به کندریت، ماقمای محاسبه شده از ترکیب کلینوپیروکسن‌های G1 به نسبت LILE، G2، از عناصر HFSE غنی‌تر و از عناصر REE فقیرتر شده‌اند (شکل ۶ الف). ناهنجاری منفی Nb در نمونه‌های G2 قابل مشاهده است، در حالیکه در نمونه‌های G1 وجود ندارد و همچنین ناهنجاری مثبت Pb در نمونه‌های G2 بارزتر است (شکل ۶ الف). این ویژگی‌ها از تفاوت‌های بارز ماقماهای آهکی قلیایی مناطق قوسی با ماقماهای قلیایی محسوب می‌شود [۲۴]. روند الگوی REE در ترکیب ماقماهای در حال تعادل محاسبه شده از کلینوپیروکسن‌های گابروهای G1 مشابه با نمونه‌های G2 است، با این تفاوت که مجموع عناصر خاکی نادر در انواع قلیایی (میانگین $\Sigma\text{REE} = ۲۳۴ \text{ ppm}$) بسیار بیشتر از مقدار ماقمای محاسبه شده آهکی قلیایی (میانگین $\Sigma\text{REE} = ۸۶ \text{ ppm}$) است (شکل ۶ ب). ناهنجاری منفی یوروبیوم نیز در ماقمای محاسبه شده G1 بارزتر از G2 است که می‌تواند بیانگر تفکیک پلازیوکلاز طی دگرگونی ماقمای G1 باشد.

بحث در بررسی‌های انجام شده پیرامون ارتباط ترکیب کلینوپیروکسن و ماهیت ماقمای مادر، بر تأثیر نوع ماقما در اکسیدهای اصلی تأکید شده [۲، ۳] و بر همین اساس نمودارهای مختلفی برای تشخیص انواع ماقماها و محیط‌های زمین‌ساختی مختلف ارائه شده است [۲، ۳]. در کلینوپیروکسن‌های انواع گابروهای توده پیرانشهر تفاوت چندانی در ترکیب اکسیدهای اصلی دیده نمی‌شود (جدول ۱ و شکل ۳). نبود تفاوت در ترکیب اکسیدهای اصلی کلینوپیروکسن‌های توده پیرانشهر درنگاه نخست ممکن است تفاوت ماهیت ترکیب ماقمای اولیه را رد کند، اما پژوهش‌های اخیر پیرامون جایگاه‌های برخورده و قوسی، وجود ماقماهای مختلف و هم‌سن در این مناطق را به اثبات رسانده است [۲۰، ۱۹] و کلینوپیروکسن‌های متببور شده از ماقماهای مختلف این نواحی اغلب از نظر اکسیدهای اصلی دارای همپوششی قابل توجه هستند [۲۱]. در توده پیرانشهر نیز به این علت ترکیب اکسیدهای اصلی در ماقماهای قلیایی و آهکی قلیایی تقریباً مشابه است.

در سوی دیگر، کلینوپیروکسن‌های گابروهای G1 و G2 ترکیب کاملاً متفاوتی از عناصر کمیاب از خود نشان می‌دهند. کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای قلیایی نسبت به همتاها آهکی قلیایی خود از بسیاری از عناصر HFSE و REE غنی شده‌اند؛ در حالیکه فراوانی عناصر LILE چون Ba، Sr، Rb در نمونه‌های آهکی قلیایی بیشتر است (شکل‌های ۴ و ۵). چنین تفاوت‌هایی در کلینوپیروکسن‌های ماقماهای قلیایی و آهکی



شکل ۶(الف) نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه و (ب) الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت(ب) برای مذاب در حال تعادل محاسبه شده از ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن های گابروهای پسونه.

برداشت

کانی کلینوپیروکسن در گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی توده پیرانشهر، با وجود داشتن ترکیب یکسان در اکسیدهای اصلی، از نظر عناصر کمیاب تفاوت های قابل ملاحظه ای دارند. کلینوپیروکسن های نمونه های قلیایی غنی از عناصر HFSE و REE هستند و نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در آنها پایین است؛ در حالیکه کلینوپیروکسن های گابروهای آهکی قلیایی غنی از Sr، Rb و Ba هستند و مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ آنها بالاتر است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که بررسی توزیع عناصر کمیاب می تواند کمکی به سزا در تعیین ماهیت ماقمای اولیه و بررسی های سنگ زایی باشد. ترکیب ماقمای محاسبه شده در حال تعادل با کلینوپیروکسن ها در ماقماهای قلیایی و آهکی قلیایی متفاوت است که می تواند در تشخیص ماهیت سنگ های انباشتی (کومولایی) که از طریق شیمی سنگ کل امکان پذیر نیست، به کار رود.

قدرت دانی

از دو داور محترم مجله که با پیشنهادات ارزشمند خود موجب بالارفتن کیفیت این مقاله شدند، بسیار سپاسگزارم.

مراجع

- [1] Hou T., Zhang Z.C., Keiding J.K., Veksler I.V., "Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the North China Craton: implications for lithospheric mantle metasomatism and the

بنابراین تفاوت ترکیب عناصر کمیاب در کلینوپیروکسن های انواع گابروهای توده پیرانشهر کاملاً وابسته به ماهیت ماقمای اولیه تشکیل دهنده این سنگ ها بوده است. کلینوپیروکسن های G1 پیرو ماقمای مادر قلیایی خود دارای تراکم بالاتری از عناصر HFSE هستند و نسبت پایین $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در آنها (جدول ۳) نشان دهنده کمتر دگرگونه بودن ماقمای اولیه است [۲۵]. از طرف دیگر، کلینوپیروکسن های G2 ترکیب بالاتری از $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ داشته، نسبت های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بالاتری دارند و آشکارا از عناصر HFSE تهی شدگی نشان می دهند. این ویژگی ها نشان از دگرسانی خاستگاه گوشته ای به وسیله سیال های آبدار مشتق شده از فرایندهای آبزدایی ورقه فرورونده و رسوبات دریایی در مناطق فرورانش و ماهیت آهکی قلیایی ماقمای اولیه دارد [۲].

این داده ها نشان می دهد که تمایر ترکیب ماقمای اولیه در ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن بهتر از اکسیدهای اصلی نمود می یابد و می تواند به عنوان شاخصی در تعیین ماهیت مبهم ماقماهایی که تعیین آنها از طریق روش های متداول زمین شیمیایی محدود نیست، به کار رود. البته برای استفاده از این شاخص باید همه ویژگی های زمین دینامیکی و سنگ شناسی را نیز در نظر گرفت چرا که ترکیب ماقماها در شرایط محیطی متفاوت کاملاً متفاوت است و حتی بر ضرایب جدایش کانی/مذاب نیز تأثیر می گذارد [۲۶].

Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran: A Marker of the End of the Collision in the Zagros Orogen”, Journal of the Geological Society, 166 (2009) 53–69.

[11] Bea F., Mazhari A., Montero P., Amini S., Ghalamghash J., “Zircon dating, Sr and Nd isotopes, and element geochemistry of the Khalifan pluton, NW Iran: evidence for Variscan magmatism in a supposedly Cimmerian superterrane”, Journal of Asian Earth Sciences 40 (2011) 172–179.

[12] Mazhari S.A., Amini S., Ghalamghash J., Bea F., “Petrogenesis of granitic unit of naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran”, Arabian Journal of Geosciences 4 (2011) 1207–1214.

[13] Yajam S., Montero P., Scarrow J.H., Ghalamghash J., Razavai S.M.H., Bea F., “The spatial and compositional evolution of the Late Jurassic Ghorveh-Dehgolan plutons of the Zagros Orogen, Iran: SHRIMP zircon U-Pb and Sr and Nd isotope evidence”, Geologica Acta 13 (2015) 25-43.

[14] Azizi H., Hadad S., Stern R.J., Asahara Y., “Age, geochemistry, and emplacement of the ~40-Ma Baneh granite-appinite complex in a transpressional tectonic regime, Zagros suture zone, northwest Iran”, International Geology Review 4 (2018) 2–29 doi.org/10.1080/00206814.2017.1422394

[15] Alavi M., “Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations”, Tectonophysics 229 (1994) 211–238.

[16] Mazhari S.A., “Petrogenesis of Naqadeh-Sardasht plutons”, PhD Thesis, Tarbiat Moallem University (2008) 320p.

[17] Morimoto N., “Nomenclature of pyroxenes”, Canadian Mineralogist 27 (1989) 143-156.

[18] Sun S.S., McDonough W.F., “Chemical and isotopic systematics of the oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: In: Saundar, A.D., Norry, M.J. (Eds), Magmatism in the Oceanic Basalts”, Geological Society of London. London 42 (1989) 313-345.

[19] Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y., “Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional

origin of apatite ores”, Journal of Petrology 5 (2015) 893–918.

[2] Liang Y., Deng J., Liu X., Wang Q., Qin C., Li Y., Yang Y., Zhou M., Jiang J., “Major and trace element, and Sr isotope compositions of clinopyroxene phenocrysts in mafic dykes on Jiaodong Peninsula, southeastern North China Craton: Insights into magma mixing and source metasomatism”, Lithos 302–303 (2018) 480–495.

[3] Ovung T.N., Ray J., Ghosh B., Koeberl C., Topa D., Paul M., “Clinopyroxene composition of volcanics from the Manipur Ophiolite, Northeastern India: implications to geodynamic setting”, International Journal of Earth Sciences (2017) DOI 10.1007/s00531-017-1529-y.

[4] Leterrier J., Maury RC., Thonon P., Girard D., Marchal M., “Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of Paleo-volcanic series”, Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 139–154.

[5] Jacamon F., Larsen R.B., “Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation”, Lithos 107 (2009) 281–291.

[6] Mazhari S.A., Ghalamghash J., Mazloumi Bajestani A.R., Hajalilou B., “Application of trace elements composition in quartz for Naqadeh granitoids petrogenesis interpretation, NW Sanandaj-Sirjan Zone”, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012) 505–514.

[7] Nisbet E.G., Pearce J.A., “Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings”, Contribution to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 149–160.

[8] Jankovics M.É., Taracsák Z., Dobosi G., Embey-Isztin A., Batki A., Harangi S., Hauzenberger C.A., “Clinopyroxene with diverse origins in alkaline basalts from the western Pannonian Basin: implications from trace element characteristics”, Lithos 262 (2016) 120–134.

[9] Ronick R., Renno A.D., “Clinopyroxene from basaltic rocks of the Erzgebirge-Krusne hory Mts.-implications for modelling the magmatic plumbing system”, Journal of Geosciences 55 (2010) 231–249.

[10] Mazhari S. A., Bea F., Amini S., et al., “The Eocene Bimodal Piranshahr Massif of the

- Ultramafic Complex, South Korea”, Lithos 264 (2016) 28–40.*
- [24] Tatsumi Y., Eggins S.M., “*Subduction Zone Magmatism: Frontiers in Earth Sciences. Blackwell Science*”, Cambridge, Mass, USA (1995) 211 p.
- [25] Dalton H.B., Scott J.M., Liu J., Waight T.E., et al, “*Diffusion-zoned pyroxenes in an isotopically heterogeneous mantle lithosphere beneath the Dunedin Volcanic Group, New Zealand, and their implications for intraplate alkaline magma sources*”, *Lithosphere* 9 (2017) 463-475.
- [26] Arzamastsev A.A., Arzamastsev L.V., Bea F., Montero P., “*Trace Elements in Minerals as Indicators of the Evolution of Alkaline Ultrabasic Dike Series: LA-ICP-MS Data for the Magmatic Provinces of Northeastern Fennoscandia and Germany*”, *Petrology* 17 (2009) 46-72.
- igneous province of Transbaikalia (Russia)”, Lithos 3-4 (2011) 845- 874.*
- [20] Andrić N., Vogt K., Matenco L., Cvetković C., et al, “*Variability of orogenic magmatism during Mediterranean-style continental collisions: A numerical modelling approach*”, *Gondwana Research* 56 (2018) 119-134.
- [21] Molina J.F., Scarrow J.H., Montero P.G., Bea F., “*High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia*”, *Contribution to Mineralogy and Petrology* 158 (2009) 69-98.
- [22] Driouch Y., Béziat D., Grégoire M., Laguenini F. et al, “*Clinopyroxene trace element compositions of cumulate mafic rocks and basalts from the Hercynian Moroccan Central Meseta: Petrogenetic implications*”, *Journal of African Earth Sciences* 56 (2010) 97–106.
- [23] Kim N.K., Choi S.H., “*Petrogenesis of Late Triassic ultramafic rocks from the Andong*