

پتروگرافی، شیمی کانی‌ها و ژئوشیمی گرانیتوئیدهای مجموعه پلوتونیک سامن (جنوب غرب ملایر، همدان)

علی اصغر سپاهی گرو^{۱*}، فرحناز سپهوند^۱، احمد احمدی خلجی^۲ و صدیقه سلامی^۱
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

مجموعه پلوتونیک ملایر در شمال نوار سنندج-سیرجان در غرب ایران قرار گرفته است. در مرکز این مجموعه، توده نفوذی با ترکیب گرانودیوریت معروف به گرانودیوریت سامن قرار دارد که با توده‌های کوچک مافیک و سنگ‌های گرانیتی همراه است. بخش اصلی توده نفوذی را سنگ‌های تونالیتی-گرانودیوریتی تشکیل می‌دهد. سنگ‌های مونوزوگرانیتی که بر خلاف سایر مجموعه‌های پلوتونیک نوار سنندج-سیرجان مانند الوند قسمت ناچیزی از این مجموعه را تشکیل می‌دهد، شاید بعد از توده تونالیتی-گرانودیوریتی تشکیل و جایگزین شده باشد و از نظر ژئوشیمیایی دارای ویژگی‌های کالک‌آلکان و پرآلومین و از نوع S است در حالی که سنگ‌های تونالیتی-گرانودیوریتی منطقه متآلومین و از نوع I هست. این گرانیتوئیدها در نمودارهای عنکبوتی از LILE (Th و Rb, K) غنی‌شدگی و از HFSE (Ti و P, Nb) تهی‌شدگی نشان می‌دهد. همچنین، در این نمودارها LREE نسبت به HREE دارای غنی‌شدگی است که این ویژگی‌ها در سنگ‌های مناطق فرورانش و حواشی فعال قاره‌ای دیده می‌شود. ترکیب بیوتیت موجود در گرانودیوریت‌ها از نوع سیدروفیلیت، آمفیبول‌ها از نوع هورنبلند و پلاژیوکلازها از نوع آندزین است. محاسبات فشارسنجی، فشار ۱ تا ۱/۲ کیلو بار (معادل عمق ۳ تا ۴ کیلومتر) را برای سنگ‌های نفوذی نشان داده است. دمای تبلور سنگ‌های گرانودیوریتی در فشار ۱ کیلو بار حدود ۵۹۲/۲ تا ۷۵۶/۹ درجه سانتیگراد و در فشار ۱/۲ کیلو بار، ۵۹۱/۲ تا ۷۵۷/۶ درجه سانتیگراد تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: گرانودیوریت، کالک‌آلکان، قوس قاره‌ای، سامن، پهنه سنندج-سیرجان

مقدمه

امتداد NW-SE است (شکل ۱). همانند بیشتر توده‌های نفوذی تزریق شده در این نوار دگرگونی، این توده متشکل از گرانیتوئید و رخنمون‌های کوچکی از ترکیبات مافیک است که بررسی سنگ‌شناسی و

توده گرانیتوئیدی سامن بین شهرهای ملایر و بروجرد واقع شده است. این مجموعه نفوذی قسمتی از بخش شمالی نوار دگرگونی سنندج-سیرجان و دارای

دگرسانی را داشت برای مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی گرانیتوئیدهای منطقه، انتخاب و به منظور تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب با روش‌های ICP-MS و ICP-AES به آزمایشگاه SGS کانادا ارسال شد (جدول ۱). در این پژوهش، از تعدادی تجزیه‌های شیمیایی قبلی نمونه‌های گرانیتوئیدی منطقه مربوط به Majidi (۱۹۹۶) نیز استفاده شده است. تعداد دو مقطع نازک صیقلی از سنگ‌های گرانودیوریتی نیز برای انجام تجزیه ریزکاو الکترونی به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج فرستاده شد. این تجزیه‌ها با دستگاه تجزیه نقطه‌ای مدل SX100، ساخت شرکت Cameca فرانسه در شرایط (ولتاژ) ۱۵ kV، فشار 10^{-7} Torr و (آمپراژ) ۲۰ nA انجام شده است. در این تجزیه‌ها کانی‌های بیوتیت (نه نقطه)، آمفیبول (سه نقطه) و پلاژیوکلاز (سه نقطه) تجزیه شد (جدول‌های ۲ تا ۴)، سپس با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند: AX و Mincalculation نمودارهای لازم ترسیم و تفسیر شد.

پتروگرافی

ترکیب سنگ‌شناسی مجموعه پلوتونیک ملایر به ترتیب وفور شامل: گرانودیوریت، تونالیت، مونزوگرانیت، سینیوگرانیت، آلکالی‌گرانیت و لوکوگرانیت است. بعضی توده‌های کوچک مافیک گابرویی تا دیوریتی نیز در منطقه وجود دارد.

گرانودیوریت و تونالیت: گرانودیوریت‌ها در توده نفوذی سامن، بیشترین حجم را به خود اختصاص داده‌اند که گاهی با تونالیت‌ها همراه می‌شود. این سنگ‌ها متوسط تا دانه‌درشت و بافت آنها اغلب ساب‌هدرال گرانولار و گاهی دارای بافت‌های پرتیت و میرمکیت است. کانی‌های اصلی شامل: کوارتز، آلکالی‌فلدسپار (میکروکلین)، پلاژیوکلاز، بیوتیت و

زمین‌شناسی آن می‌تواند مکمل مطالعات پیشین در نوار سنندج-سیرجان مانند: Sadeghian (۱۹۹۴)، Goudarzi (۱۹۹۵)، Sepahi (۱۹۹۹)، Ahmadi-Khalaji (۲۰۰۶) و Sepahi و همکاران (۲۰۱۲) روی توده‌های نفوذی بروجرد و همدان باشد. توده نفوذی ملایر توسط Madani (۱۹۸۰)، Majidi (۱۹۹۶)، Heidarian (۲۰۰۲) و Hosseinpour (۲۰۰۳) بررسی شده است. در پژوهش‌های پیشین بیشتر پتروولوژی و ژئوشیمی توده مد نظر بوده است اما در این پژوهش علاوه بر ژئوشیمی، شیمی کانی‌ها (بیوتیت، آمفیبول و پلاژیوکلاز) و ترموبارومتري بخش گرانیتوئیدی این مجموعه مفصل‌تر بررسی شده است.

زمین‌شناسی منطقه

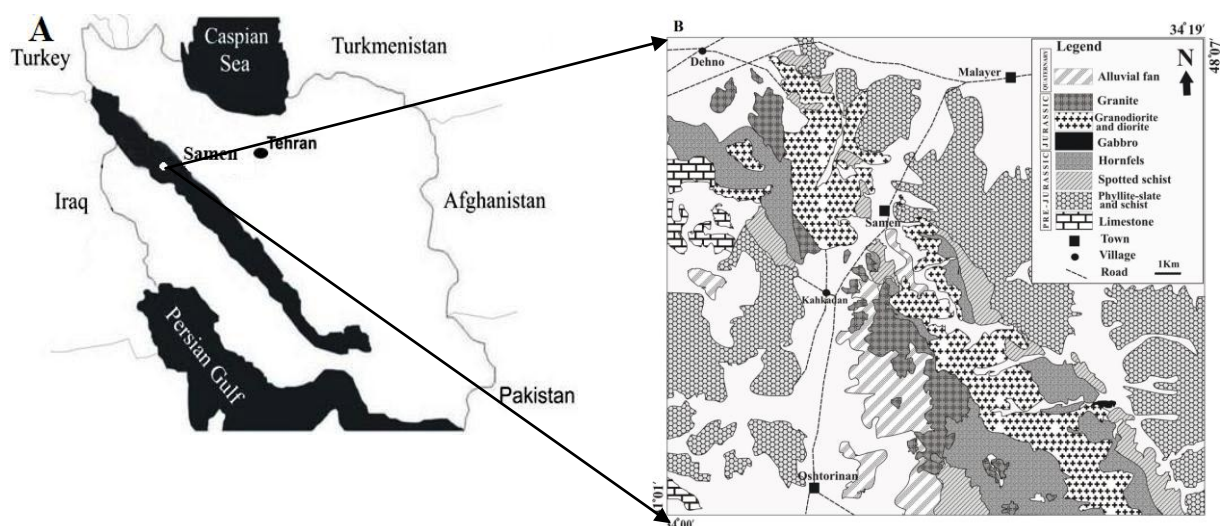
مجموعه پلوتونیک ملایر در شمال نوار سنندج-سیرجان در غرب ایران قرار گرفته است. به لحاظ وضع تکتونیکی ویژه این پهنه ساختاری ارتباط واحدهای سنگی مختلف به طور معمول گسلی است. در منطقه بررسی شده گسل‌های راست‌لغز و راندگی با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود. در حاشیه این مجموعه پلوتونیک سنگ‌های دگرگونی متنوع اما بیشتر پلیتی با سن ژوراسیک قرار دارد که متأثر از گرمای توده‌های نفوذی شده‌اند (Sadeghian, 1994; Goudarzi, 1995). مطالعات سن‌سنجی با روش U-Pb سن این توده را ژوراسیک میانی تخمین زده است (Ahadnejad et al., 2011).

روش انجام پژوهش

پس از انجام بررسی‌های صحرائی، تعداد ۳۵ نمونه گرانیتوئید برای تهیه مقطع نازک و مطالعات میکروسکوپی انتخاب شد و سپس ۸ نمونه از نمونه‌های یاد شده که کمترین هوازدگی و

مقدار کانی‌های مافیک در این سنگ‌ها متغیر است. کوارتزها اغلب بی‌شکل و مرزهای مضرسی دارد.

آمفیبول (هورنبلند) و کانی‌های فرعی زیرکن، آپاتیت، اسفن، اپیدوت، آلانیت است (شکل ۲-۱A).



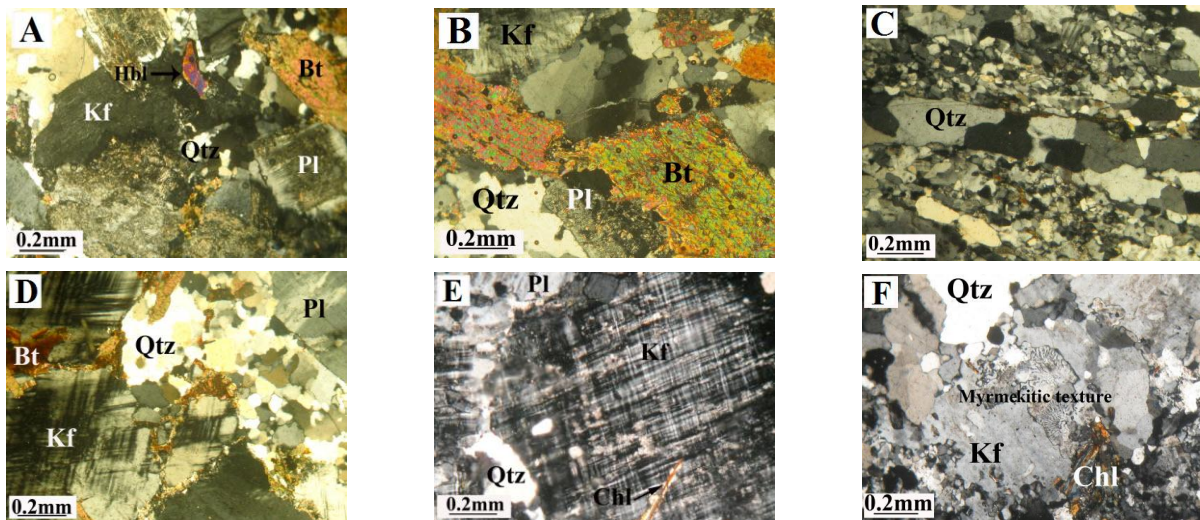
شکل ۱-۱A) موقعیت زمین‌شناسی منطقه سامن در نوار ساندج-سیرجان؛ B) نقشه سنگ‌شناسی توده گرانیتوئیدی سامن، بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه ملایر (Gafarian et al., 1980).

میکروکلین) و پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی شامل: بیوتیت، تورمالین، اسفن، زیرکن، آپاتیت است.

آلکالی‌گرانیته: بافت این نوع سنگ‌ها بیشتر از نوع گرانولار و پورفیروئید است. کانی‌های اصلی شامل: کوارتز، آلکالی‌فلدسپار (بیشتر از نوع میکروکلین) و پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی شامل: بیوتیت، تورمالین، زیرکن و آپاتیت است (شکل ۲-۱E). دانه‌های کوارتز تبلور مجدد یافته‌اند و به صورت دانه‌ریز تا دانه‌درشت با حاشیه مضرسی دیده می‌شود. بافت میرمکیت در اطراف بیشتر فلدسپارها تشکیل شده است (شکل ۲-۱F).

لوکوگرانیته: حجم این سنگ‌ها در توده سامن بسیار اندک است و فقط در منطقه مالیچه مشاهده شده است. کانی‌های اصلی شامل: کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی شامل: کلریت، مسکویت، تورمالین و زیرکن است. بافت‌های پرتیت و میرمکیت نیز در این نوع سنگ‌ها دیده می‌شود.

مونوزوگرانیته و سینیوگرانیته: مونوزوگرانیته‌ها دانه‌متوسط تا درشت است و بافت آنها بیشتر پورفیروئید بوده و گاهی نیز بافت‌های میرمکیت و پرتیت هم در آنها دیده می‌شود. کانی‌های اصلی شامل: کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار (میکروکلین و ارتوکلاز)، بیوتیت و آمفیبول و کانی‌های فرعی شامل: زیرکن، تورمالین، اسفن و روتیل است (شکل ۲-۱B). هورنبلند معمولاً در این سنگ‌ها دیده نمی‌شود و سوزن‌های روتیل به صورت ادخال در بیوتیت‌ها دیده می‌شود. دانه‌های کوارتز بیشتر دچار تبلور مجدد شده‌اند و به صورت دانه‌های ریز تشکیل باندهای کوارتزی را می‌دهد (شکل ۲-۱C). در سینیوگرانیته‌ها، بافت غالب گرانولار تا پورفیروئید است. گاهی بافت‌های میرمکیت و پرتیت نیز در آنها دیده می‌شود. فراوانی کمتر کانی‌های مافیک در آنها سبب شده تا روشن‌تر از بقیه واحدهای دیگر باشد (شکل ۲-۱D). کانی‌های اصلی شامل: کوارتز، آلکالی‌فلدسپار (بیشتر از نوع



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های مجموعه پلوتونیک ملایر؛ (A) گرانودیوریت؛ (B) مونزوگرانیت؛ (C) دانه‌های کوارتز ریزدانه حاصل از تبلور مجدد و تشکیل باندهای غنی از کوارتز در نمونه‌های سنگی مونزوگرانیت؛ (D) سینوگرانیت؛ (E) آلکالی‌گرانیت؛ (F) تشکیل بافت میرمیکیت در اطراف فلدسپار در نمونه‌های سنگی آلکالی‌گرانیت؛ علائم اختصاری کانی‌ها بر اساس Kretz (۱۹۸۳) است.

ژئوشیمی

ویژگی‌های گرانیت‌های نوع S را دارد (شکل ۴-۳) (Takahashi *et al.*, 1980).

در نمودارهای هارکر، مقدار Na_2O در مقابل SiO_2 روند افزایشی نشان می‌دهد (شکل ۵). زیرا با پیشرفت تفریق مقدار سدیم در مذاب باقی‌مانده افزایش می‌یابد و در نهایت وارد ساختمان فلدسپارها می‌شود. روند مثبت و افزایش مقادیر Na_2O و K_2O در مقابل SiO_2 نشان‌دهنده پیشرفت تبلور تفریقی در ماگما است. افزایش مقدار K_2O در ماگمای باقی‌مانده، منجر به تبلور کانی‌های آلکالی‌فلدسپار و مسکویت و افزایش Na_2O نیز باعث افزایش مقدار آل‌بیت در ترکیب پلاژیوکلازها می‌شود. مقادیر Al_2O_3 و CaO نسبت به SiO_2 به صورت نزولی است که به دلیل تبلور پلاژیوکلاز در طول تفریق ماگما است. مقادیر اکسیدهای TiO_2 ، Fe_2O_3 و MgO در مقابل SiO_2 کاهش نشان می‌دهد، زیرا این عناصر در مراحل ابتدایی تبلور تفریقی ماگما وارد ساختمان کانی‌های مافیک شده‌اند. مقدار P_2O_5 نیز با افزایش سیلیس کاهش می‌یابد زیرا در مراحل

نتایج مربوط به تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های سنگ کل با روش ICP-MS و ICP-AES در جدول ۱ ارایه شده است. به منظور نامگذاری سنگ‌های منطقه از نمودار Middlemost (۱۹۸۵) استفاده شده است (شکل ۳-۳). پراکنندگی غالب نمونه‌های مورد نظر در محدوده گرانودیوریت و گرانیت قرار می‌گیرد.

بر اساس نمودار سه تایی AFM (Irvine and Baragar, 1971) نمونه‌ها در محدوده کالک‌آلکان قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳). بر اساس نمودار $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ نمونه‌های مربوط به گرانیتوئیدهای سامن در محدوده‌های کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی جای می‌گیرد (شکل ۴-۳) (Peccerillo and Taylor, 1976) و در نمودار A/NK-A/CNK این گرانیتوئیدها بیشتر پرآلومین است (شکل ۴-۳) (Shand, 1943). بیشتر نمونه‌های گرانیتوئیدی بررسی شده دارای ویژگی‌های گرانیت‌های تیپ I است به جز مونزوگرانیت‌های بیوتیت‌دار (عاری از هورنبلند) که

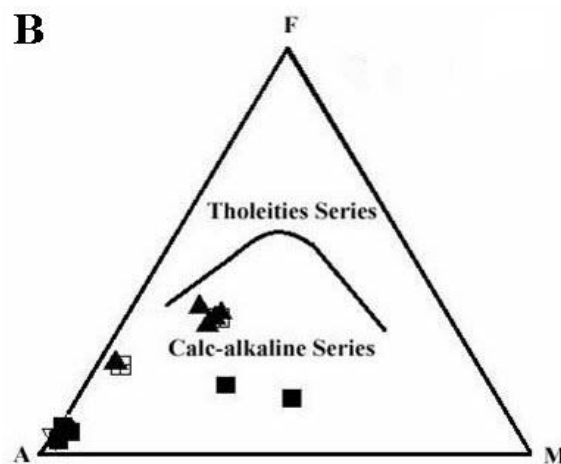
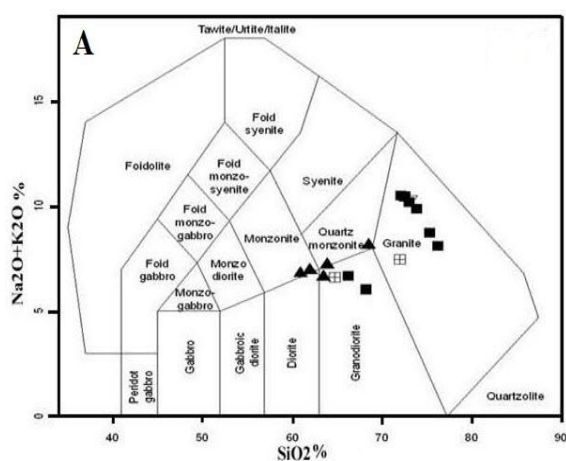
کانی‌هایی مانند: آپاتیت، زیرکن و گاهی اسفن جانشین می‌شود. تغییرات V در مقابل سیلیس کاهشی است. زیرا این عنصر جانشین عنصر Fe در ساختمان مگنتیت و کانی‌های مافیک می‌شود. در نمودار Zr-SiO₂ بالاترین فراوانی زیرکن در گرانیت‌های مافیک‌تر دیده می‌شود که به طرف ترکیبات فلسیک‌تر تهی می‌شود. از آنجا که عنصر Ga جانشین Al می‌شود مقدار بالای Ga در برخی نمونه‌ها نشان‌دهنده پیشرفت تبلور تفریقی کانی‌هایی مانند پلاژیوکلاز است (Rollinson, 1993).

ابتدایی تبلور وارد ساختمان آپاتیت شده است. کاهش P₂O₅ در طول تفریق می‌تواند دال بر I بودن توده نیز باشد. کاهش روند Sr در مقابل SiO₂ (شکل ۶) به دلیل جایگزینی Ca در کانی‌هایی مثل: پلاژیوکلاز و هورنبلند است و میزان آن با پیشرفت تبلور ماگما کاهش می‌یابد. Rb یک شیب افزایشی نشان می‌دهد. این عنصر در مراحل انتهایی تفریق ماگما در ساختمان کانی‌هایی مثل: بیوتیت و آلکالی‌فلدسپار وارد می‌شود. مقدار Y در مقابل سیلیس تقریباً به صورت کاهشی است. این عنصر در ساختمان

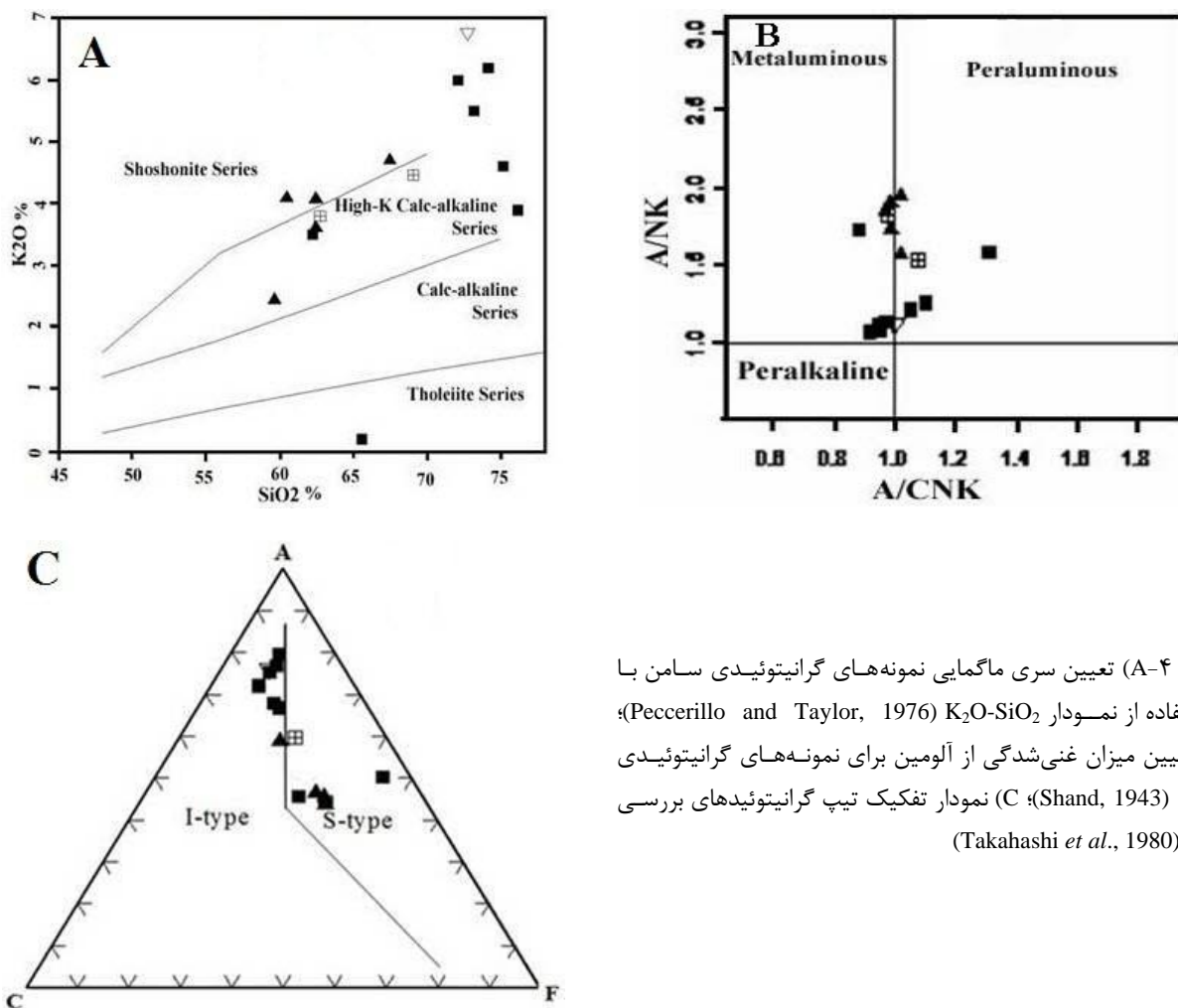
جدول ۱- نتایج تجزیه نمونه‌های مجموعه پلوتونیک سامن با روش ICP-AES و ICP-MS؛ نمونه‌های ستاره‌دار مربوط به Majidi (۱۹۹۶) است که با روش XRF آنالیز شده‌اند.

Samples	تونالیت	گرانودیوریت							مونزوگرانیت				میکرو گرانیت	گرانیت		آلکالی گرانیت	لوکوگرانیت
	T°	G.y.1	AB	H	HGd°	E	K	M2°	M1°	M	L	M.G°	G.1°	G.2°	AFG°	G	
SiO ₂	65.6	67.5	62.5	62.5	62.3	60.5	59.7	76.2	75.2	69.1	62.8	72.1	74.2	73.2	72.6	72.8	
TiO ₂	0.60	0.25	0.64	0.59	0.70	0.68	0.59	0.00	0.00	0.27	0.60	0.10	0.10	0.10	0.00	0.05	
Al ₂ O ₃	14.8	16.4	16.1	16.5	14.4	16.4	18.6	13.9	14.1	14.2	15.3	14.7	14.1	14.7	14.6	14.7	
Fe ₂ O ₃	2.1	2.69	4.59	5.09	2.2	5.7	1.42	0.56	0.71	2.4	5.10	0.67	0.38	0.44	0.77	0.53	
MnO	0.00	0.04	0.08	0.08	0.10	0.09	0.08	0.00	0.10	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
MgO	6.1	0.42	2.53	2.53	3.40	2.83	1.88	0.20	0.10	0.49	2.66	0.40	0.20	0.20	0.20	0.06	
CaO	1.00	3.04	3.81	4.40	4.30	4.41	4.76	0.80	0.90	2.13	3.97	1.10	1.10	0.90	1.10	0.87	
Na ₂ O	5.60	3.30	3.00	2.90	2.80	2.70	4.20	4.2	4.10	2.7	2.60	4.50	3.70	4.70	3.00	3.50	
K ₂ O	0.20	4.70	4.07	3.61	3.50	4.09	2.45	3.9	4.60	4.46	3.80	6.00	6.20	5.50	7.40	6.76	
P ₂ O ₅	0.10	0.03	0.10	0.10	0.20	0.11	0.17	0.10	0.00	0.04	0.09	0.30	0.30	0.30	0.20	0.21	
Total	96.10	99.37	97.78	98.30	93.90	97.51	93.85	99.86	99.81	95.82	97.01	99.87	100.28	100.04	99.57	99.49	
Trace elements (ppm)																	
Ba	147	1000	560	480	630	580	550	85	150	430	530	272	254	165	280	140	
Ce	37	142	68.2	63.9	70	77.1	82.4	11	69	98	71.9	1	3	17	33	5.6	
Co	42	4.1	14.8	15.6	40	17.1	13.8	21	55	6.1	16	25	15	29	28	0.7	
Cr	97	0	0	0	108	0	0	21	19	0	0	22	21	20	18	0	
Cs	-	2.4	6.3	4.2	-	3.5	4.8	-	-	3.3	5.8	-	-	-	-	1.6	
Cu	15	8	12	18	31	15	19	34	20	10	23	26	11	21	13	6	
Dy	-	3.99	5.14	4.31	-	4.65	2.73	-	-	4.7	5.20	-	-	-	-	1.62	
Er	-	2.21	3.22	2.64	-	2.85	1.58	-	-	2.44	2.84	-	-	-	-	0.77	
Eu	-	1.29	0.93	1.07	-	1.03	1.07	-	-	1.17	0.85	-	-	-	-	0.25	
Ga	27	20	20	21	23	21	24	24	24	18	20	23	21	23	21	16	
Gd	-	5.05	5.97	4.75	-	4.85	3.06	-	-	4.97	5.37	-	-	-	-	0.89	
Hf	10	5	6	6	2	5	5	4	1	5	5	1	5	5	2	1	

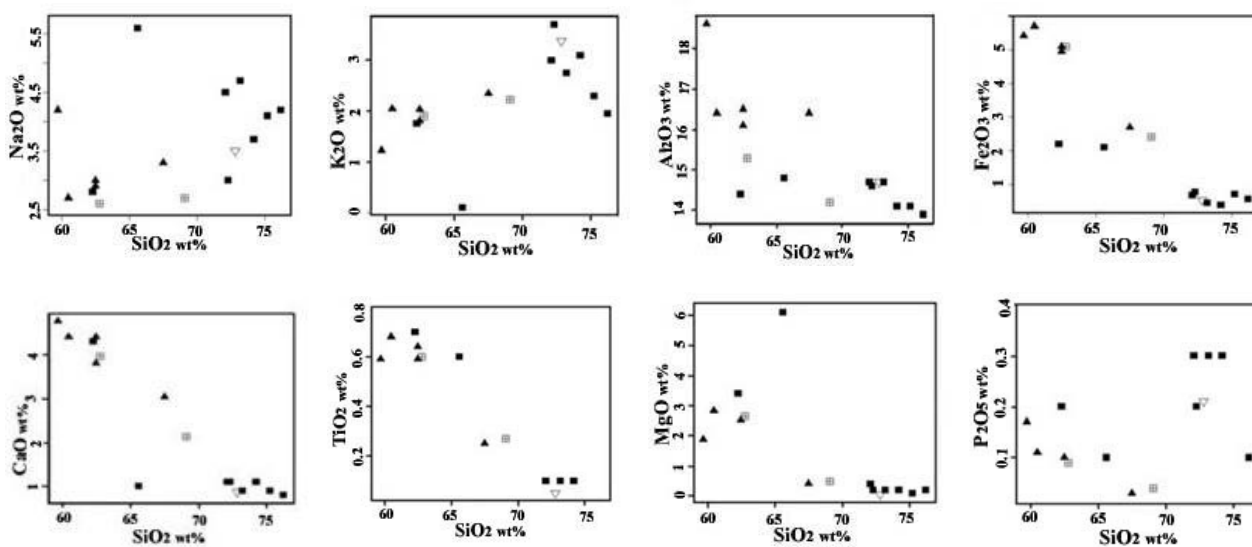
Samples	تونالیت	گرانودیوریت						مونزوگرانیت				میکرو گرانیت	گرانیت		الکالی گرانیت	لوکوگرانیت
	T°	G.y.1	AB	H	HGd°	E	K	M2°	M1°	M	L	M.G°	G.1°	G.2°	AFG°	G
ادامه جدول ۱-...																
Ho	-	0.78	1.01	0.84	-	0.94	0.52	-	-	0.82	1.01	-	-	-	-	0.26
La	22	77.8	50.3	31.6	33	40	49.8	0	23	50	35.3	0	0	2	0	3
Lu	-	0.29	0.41	0.39	-	0.40	0.22	-	-	0.35	0.38	-	-	-	-	0.10
Nd	32	50.7	38.9	28.1	42	31.6	27	13	37	39.1	30.9	13	13	11	21	2.4
Nb	25	11	16	13	27	15	24	13	2	11	14	26	2	8	20	10
Ni	28	8	32	37	46	39	9	4	0	17	55	9	8	0	0	<5
P	26	-	-	-	18	-	-	43	53	-	-	55	49	61	29	-
Pr	-	15.3	11.1	7.62	-	8.68	8.32	-	-	11	8.19	-	-	-	-	0.68
Rb	18	128	167	138	148	157	121	204	223	148	161	222	235	260	183	165
Sr	720	360	350	400	424	370	620	92	136	230	290	217	172	129	162	110
Sm	-	7.2	7	5.5	-	6.1	4.2	-	-	7	6	-	-	-	-	0.8
Tb	-	0.74	0.88	0.70	-	0.83	0.50	-	-	0.76	0.82	-	-	-	-	0.23
Th	30	24	19.6	15.1	22	19.1	15.8	0	27	22.8	18.6	0	8	2	22	1.9
Tm	-	0.32	0.40	0.36	-	0.41	0.22	-	-	0.32	0.38	-	-	-	-	0.10
U	0	2.5	3.73	2.8	1	2.77	1.86	0	3	2.68	3.03	1	0	0	4	2.58
V	115	22	121	117	125	135	97	7	11	54	103	11	7	14	6	<5
Y	15	21.8	30.4	25.5	51	28.8	16.1	44	107	24.3	29.5	44	49	53	59	9.4
Yb	-	2	2.7	2.4	-	2.6	1.3	-	-	2.2	2.5	-	-	-	-	0.8
Zr	364	168	195	182	227	165	214	71	90	162	169	120	96	89	120	22
Zn	32	37	52	56	82	59	55	16	16	28	54	23	13	14	17	14
Y+ Nb	40	32.8	46.4	38.5	78	43.8	40.1	57	109	35.3	33.5	70	51	61	79	19.4



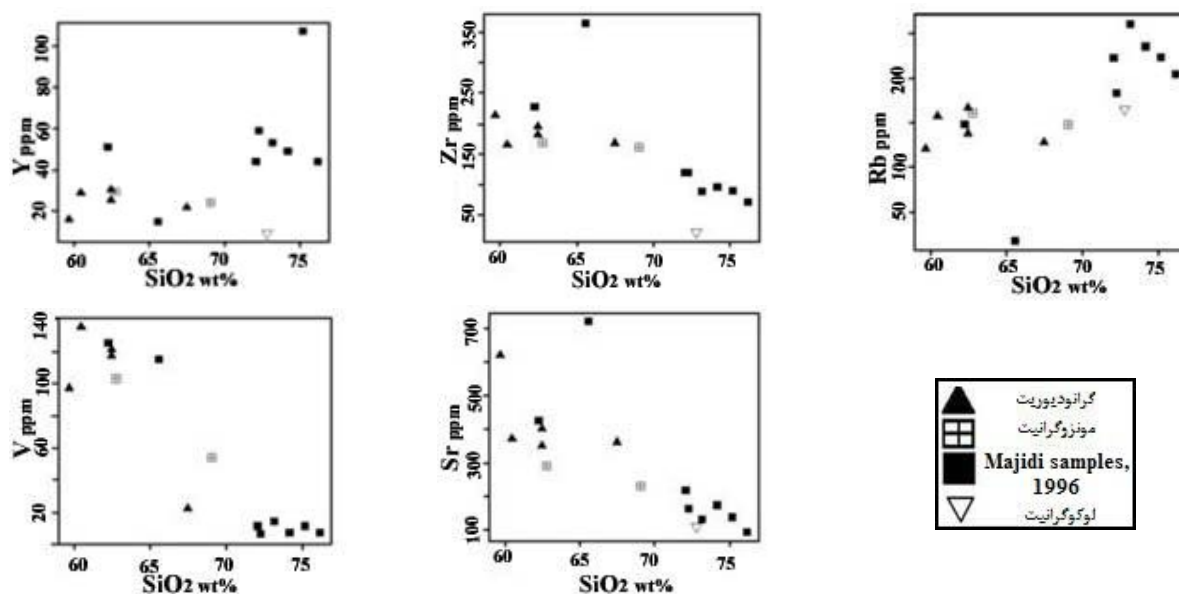
شکل ۳-۱ (A) موقعیت نمونه‌های گرانیتوئید سامن در تقسیم‌بندی (Middlemost, 1985) (برخی نمونه‌ها از لحاظ رده‌بندی مدال فلدسپارها از نوع مونزوگرانیت‌اند اما از نظر شیمیایی در محدوده گرانودیوریت و گرانیت قرار گرفته‌اند)؛ (B) تعیین سری ماگمایی نمونه‌های گرانیتوئید سامن در نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971).



شکل ۴- A) تعیین سری ماگمایی نمونه‌های گرانیتوئیدی سامن با استفاده از نمودار K_2O-SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)؛ B) تعیین میزان غنی‌شدگی از آلومین برای نمونه‌های گرانیتوئیدی سامن (Shand, 1943)؛ C) نمودار تفکیک تیپ گرانیتوئیدهای بررسی شده (Takahashi *et al.*, 1980)



شکل ۵- نمودارهای تغییرات عناصر اصلی نسبت به سیلیس در گرانیتوئیدهای سامن (Harker, 1909)



شکل ۶- نمودارهای تغییرات عناصر کمیاب نسبت به سیلیس در گرانیتوئیدهای سامن

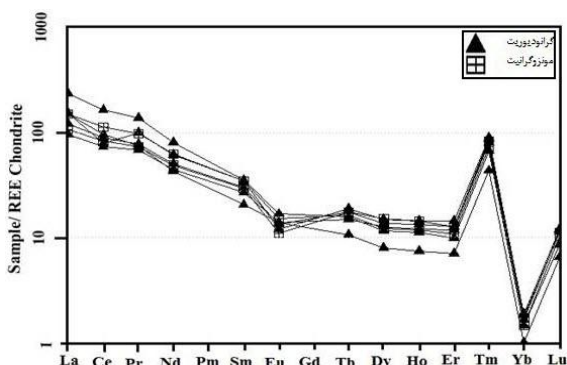
نمودارهای عنکبوتی

به منظور بررسی رفتار عناصر کمیاب و عناصر نادر خاکی، نمونه‌های تجزیه شده را در نمودارهای عنکبوتی با گوشته اولیه و کندریت مقایسه می‌کنیم (Sun and McDonough, Nakamura, 1974). در این نمودارها رفتار غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی (LREE) و عناصر متحرک گوشته مانند: K, Rb و Th و نیز تهی‌شدگی در عناصر غیر متحرک گوشته (HFSE) مانند: P, Nb, Ti دیده می‌شود. تهی‌شدگی از عناصر HFSE از ویژگی‌های گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی مرتبط با مناطق فرورانش و حواشی فعال قاره‌ای است (Foley and Wheller, 1990). در نمودار تغییرات عناصر نادر خاکی نمونه‌های توده گرانیتوئیدی سامن نسبت به کندریت (شکل ۷) الگوی به نسبت یکنواختی از غنی‌شدگی LREE در مقایسه با HREE مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وابستگی به سری ماگمایی کالک‌آلکان است (Sun and McDonough, 1989). آنومالی منفی Eu در شکل ۸ می‌تواند سه

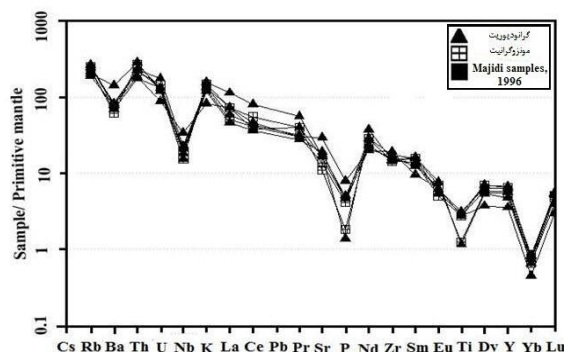
دلیل داشته باشد: الف- فوگاسیته بالای اکسیژن در محل ذوب، ب- تبلور تفریقی پلاژیوکلاز کلسیک یا ج- باقی‌ماندن پلاژیوکلاز کلسیک در فاز تفاله ذوب بخشی مواد خاستگاه. با توجه به روند کاهشی که در نمودار مربوط به تغییرات Sr و CaO در مقابل SiO₂ دیده می‌شود شاید دلیل اصلی تهی‌شدگی آنها در نمونه‌های بررسی شده، تبلور تفریقی پلاژیوکلاز کلسیک‌تر باشد.

موقعیت تکتونیکی

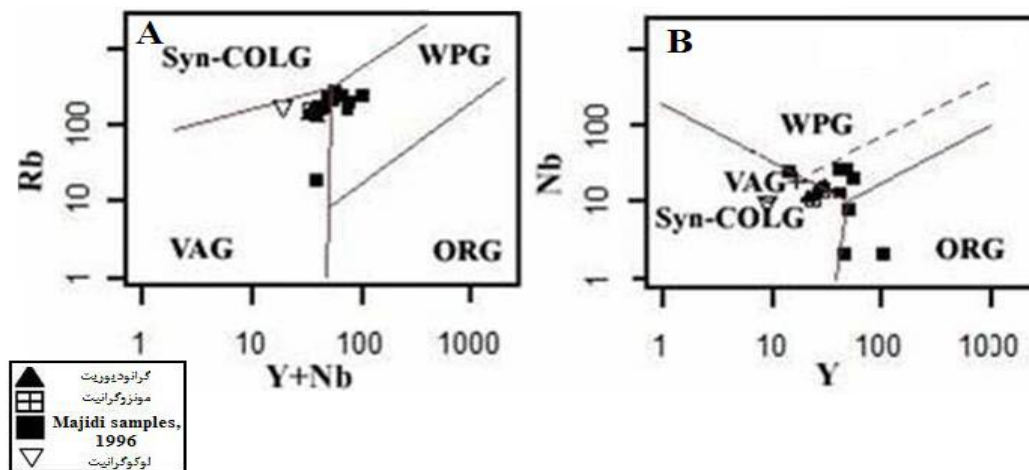
نمونه‌های گرانیتوئیدی بررسی شده در نمودارهای Nb-Y و Rb-Y+Nb در محدوده VAG و WPG قرار می‌گیرد (شکل ۹-A و B) (Pearce *et al.*, 1984). با توجه به این که سایر ویژگی‌های این گرانیتوئیدها مشابه گرانیتوئیدهای قوس‌های آتشفشانی است؛ بنابراین، علت آنکه برخی نمونه‌ها در محدوده WPG قرار می‌گیرد ممکن است به علت تغییرات پس از انجماد مانند تأثیر دگرسانی و متاسوماتیسم بر نمونه‌ها باشد.



شکل ۸- نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی توده گرانیتوئیدی سامن، نرمالیزه شده نسبت به کندریت (Nakamura, 1974).



شکل ۷- نمودار عنکبوتی عناصر نادر و نادر خاکی توده گرانیتوئیدی سامن، نرمالیزه شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989).



شکل ۹- A و B) موقعیت تکتونیکی نمونه‌های گرانیتوئیدی سامن روی نمودارهای Pearce و همکاران (۱۹۸۴)

(شکل ۱۱) (Nachite, 1986).

آمفیبول: نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌های آمفیبول منطقه سامن در جدول شماره ۳ آمده است. با توجه به نمودارهای تقسیم‌بندی آمفیبول، نمونه‌های بررسی شده این منطقه از نوع هورنبلند است (شکل ۱۲- A و B) (Hietanen, 1974; Leake et al., 1997).

پلاژیوکلاز: پلاژیوکلازهای موجود در این سنگ‌ها (گرانودیوریت) اغلب دارای ماکل تکراری آلبیت و گاهی ماکل مرکب کارلسباد-آلبیت هستند. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌های پلاژیوکلاز بررسی شده در جدول شماره ۴ آمده است.

شیمی کانی‌ها

بیوتیت: این کانی‌ها در مقاطع نازک به رنگ قهوه‌ای کم‌رنگ تا پررنگ و قهوه‌ای مایل به قرمز و سبز دیده می‌شود که دارای پلی‌کروئیسیم شدیدی است. گاهی در آن ادخال‌های زیرکن و روتیل دیده می‌شود. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌های بیوتیت بررسی شده در جدول شماره ۲ آمده است. بیوتیت‌های موجود در نمونه‌های گرانودیوریتی منطقه، از نوع سیدروفیلیت است (شکل ۱۰) (Deer et al., 1992).

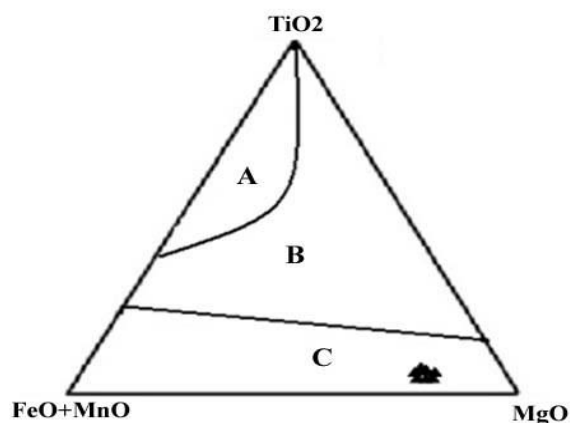
در نمودار مثلثی TiO_2 - MgO -($FeO+MnO$)، نمونه‌های بیوتیت توده سامن در محدوده C قرار می‌گیرد و از نوع بیوتیت‌های ثانویه است

اسست (Ab=%58، An=%42) (شکل ۱۳)
(Leake *et al.*, 1997).

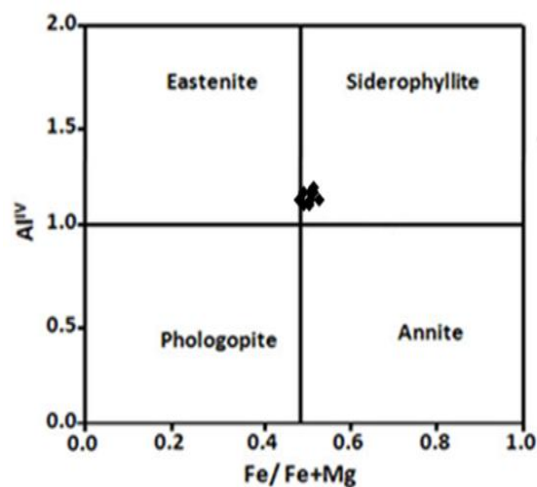
بر اساس نمودار تقسیم‌بندی پلاژیوکلازها،
نمونه‌های پلاژیوکلاز این منطقه از نوع آندزین

جدول ۲- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی بیوتیت‌های موجود در نمونه گرانودیوریتی (H) در منطقه سامن

Sample	Bi-C2-1	Bi-C2-2	Bi-C2-3	Bi-C3-1	Bi-C3-2	Bi-C2-1	Bi-C3-3	Bi-C6-2	Bi-C6-3
SiO ₂	36.89	37.57	37.51	37.25	37.74	35.58	36.14	37.13	37.19
TiO ₂	1.84	1.75	1.86	1.61	1.86	1.72	1.79	1.88	1.98
Al ₂ O ₃	15.66	15.63	15.51	15.43	15.22	14.81	15.40	15.39	15.13
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	19.11	18.76	19.39	20.88	19.99	21.00	19.13	20.13	19.34
MgO	10.03	10.29	10.78	10.84	10.74	10.49	10.58	10.79	10.68
MnO	0.26	0.28	0.28	0.28	0.24	0.32	0.31	0.30	0.28
CaO	0.05	0.01	0.02	0.11	0.12	0.09	0.07	0.11	0.04
Na ₂ O	0.11	0.07	0.07	0.28	0.28	0.22	0.19	0.16	0.29
K ₂ O	10.13	10.15	10.28	9.54	9.70	9.16	10.09	10.19	10.08
Total	94.08	94.52	95.70	95.62	94.89	93.50	93.70	96.08	95.01
Number of cations on the basis of 11 Oxygens									
Si	2.857	2.886	2.857	2.845	2.832	2.796	2.821	2.831	2.857
Ti	0.107	0.101	0.107	0.092	0.108	0.102	0.105	0.108	0.114
Al	1.430	1.415	1.393	1.398	1.383	1.372	1.417	1.384	1.370
Fe ⁺²	1.238	1.205	1.235	1.295	1.289	1.315	1.249	1.284	1.242
Mn	0.017	0.018	0.018	0.018	0.016	0.021	0.020	0.019	0.018
Mg	1.158	1.178	1.224	1.234	1.234	1.229	1.231	1.226	1.223
Ca	0.004	0.001	0.002	0.009	0.010	0.008	0.006	0.009	0.003
K	1.001	0.994	0.999	0.930	0.954	0.918	1.005	0.991	0.998
Na	0.017	0.010	0.010	0.041	0.042	0.034	0.029	0.024	0.043
Total	7.819	7.807	7.845	7.853	7.902	7.860	7.883	7.867	7.850



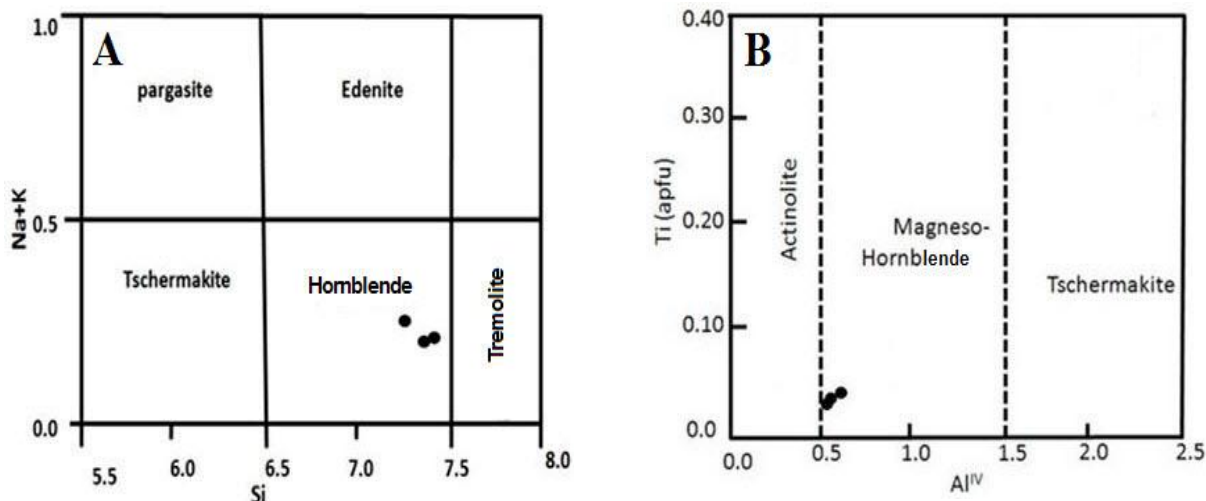
شکل ۱۱- تعیین نوع بیوتیت بر اساس اولیه، تبلور دوباره و ثانویه
(Nachite, 1986).



شکل ۱۰- تقسیم‌بندی بیوتیت‌های منطقه بر اساس
ترکیب شیمیایی (Deer *et al.*, 1992).

جدول ۳- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی آمفیبول های منطقه سامن؛ آمفیبول های تجزیه شده مربوط به نمونه گرانودیوریتی (H)

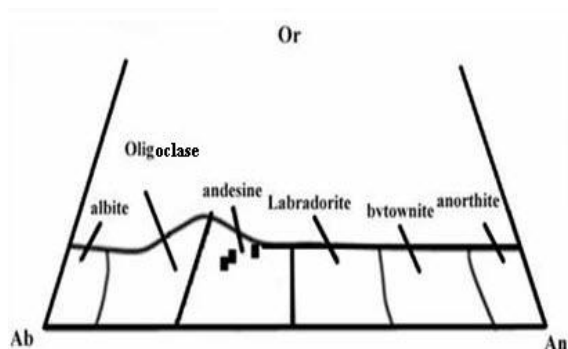
Sample	Am.1	Am.2	Am.3
SiO ₂	51.15	51.23	50.88
TiO ₂	0.42	0.43	0.48
Al ₂ O ₃	4.93	4.94	4.66
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00
FeO	14.86	14.69	16.29
MgO	12.87	13.14	13.27
MnO	0.52	0.46	0.48
CaO	12.15	12.22	11.00
Na ₂ O	0.63	0.58	0.80
K ₂ O	0.48	0.43	0.46
Total	98.02	98.19	98.57
Number of cations on the basis of 23 Oxygens			
Si	7.454	7.443	7.391
Ti	0.046	0.047	0.052
Al	0.847	0.846	0.798
Cr	0.000	0.000	0.000
Fe ⁺³	0.059	0.080	0.247
Fe ⁺²	1.752	1.704	1.705
Mn	0.064	0.057	0.059
Mg	2.795	2.845	2.837
Ca	1.897	1.902	1.712
K	0.089	0.080	0.085
Na	0.178	0.163	0.225
Total	15.181	15.167	15.138



شکل ۱۲- (A و B) نمودار تقسیم بندی آمفیبول ها بر اساس ترکیب شیمیایی (Leake et al., 1997; Hietanen, 1974)

جدول ۴- نتایج تجزیه ریزکاو تلکترونی پلاژیوکلاز گرانودیوریت‌های منطقه سامن

Sample	P1.C1	P1.C2	P1.C3
SiO ₂	57.11	57.57	56.79
TiO ₂	0.01	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	25.56	26.83	26.82
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00
FeO	0.00	0.02	0.03
MgO	0.01	0.01	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00
CaO	9.04	8.59	9.00
Na ₂ O	6.68	7.03	6.50
K ₂ O	0.00	0.00	0.40
Total	98.41	100.07	99.54
Number of cations on the basis of 8 Oxygens			
Si	2.601	2.557	2.563
Ti	0.00	0.001	0.00
Al	1.372	1.416	1.427
Cr	0.00	0.00	0.00
Fe ⁺³	0.00	0.001	0.001
Fe ⁺²	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00
Mg	0.001	0.001	0.00
Ca	0.441	0.412	0.435
K	0.004	0.006	0.027
Na	0.590	0.610	0.569
Total	5.009	5.003	5.067



شکل ۱۳- تقسیم‌بندی پلاژیوکلازها بر اساس ترکیب شیمیایی (Deer et al., 1992).

ترموبارومتري

بارومتري: مطالعات اخير نشان می دهد که در گرانیتهای کالک‌آلکان، بین میزان Al موجود در هورنبلند و فشار حاکم در زمان تبلور ارتباط مستقیم وجود دارد. بنابراین، بر این اساس می‌توان عمق جایگیری را تعیین کرد (Schmidt, 1992; Vyhnał et

al., 1991) کالیبراسیون‌های مختلفی برای بارومتري بر اساس محتوای Al موجود در هورنبلند ارائه شده است که یکی از رایج‌ترین آنها که در این پژوهش نیز استفاده شده است روش Smith و Anderson (۱۹۹۵) است. در این روش دما در محدوده ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد فرض شده است و رابطه ۱ برای این روش پیشنهاد شد:

رابطه ۱:

$$P(\text{kbar})=4.76Al(\text{total})-3.01-$$

$$\{[T-675]/85\}*\{0.53Al+0.005294[T-675]\}$$

بر این اساس فشار حاکم در زمان جایگیری ۱ تا ۱/۲ کیلوبار و عمق تشکیل توده بررسی شده ۳/۵ تا ۴ کیلومتر بوده است.

ترمومتر هورنبلند-پلاژیوکلاز: هورنبلند و پلاژیوکلاز دو کانی هستند که معمولاً در سنگ‌های آذرین کالک‌آلکان یافت می‌شود. بنابراین، اغلب برای ترمومتری استفاده می‌شود. Holland و Blundy (۱۹۹۴) ترمومتر پلاژیوکلاز-هورنبلند شامل واکنش ۱

را ارایه دادند:

واکنش ۱:



Anderson (۱۹۹۶) نیز اظهار داشت که ترمومتر ادنیت-ریشریت کالیراسیون بسیار قابل اعتماد است. بنابراین، بر اساس روش Anderson (۱۹۹۶) و با تکیه بر نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند (جدول ۶) در فشار ۱ کیلو بار دمای تشکیل سنگ‌های گرانودیوریت حدود ۵۹۲/۲ تا ۷۵۶/۹ درجه سانتیگراد و در فشار ۱/۲ کیلو بار، ۵۹۱/۲ تا ۷۵۷/۶ درجه سانتیگراد است.

جدول ۵- نتایج ترموبارومتری هورنبلند-پلاژیوکلاز در سنگ گرانودیوریت توده سامن

P (Kb)	1	1	1	1.2	1.2	1.2
T (C)OHB1 '94	592.2	594.5	661.4	591.2	593.4	660.0
T (C) OHB2 '94	697.3	680.7	756.9	698.3	681.6	757.6
T (C)OBH '90	678.0	670.3	693.9	675.3	668.7	691.2

نتیجه‌گیری

کانی‌های پلاژیوکلاز نیز در محدوده آندزین قرار می‌گیرد. بر اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی، گرانیتوئیدهای سامن از نوع گرانیتوئیدهای مناطق کوهزایی و اغلب در محدوده گرانیتهای قوس‌های آتشفشانی (VAG) قرار می‌گیرد. این توده نفوذی در اعماق به نسبت کم (۳ تا ۴ کیلومتر) متبلور شده است. همچنین، با توجه به بالا نبودن درجه دگرگونی سنگ‌های حاشیه توده و ترکیب کانی‌هایی مانند آمفیبول، فشار حاکم در زمان جایگیری توده مورد نظر ۱ تا ۱/۲ کیلوبار است.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از گروه زمین‌شناسی و معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا همدان به خاطر مساعدت‌هایی که در به ثمر رسیدن این پژوهش داشته‌اند کمال تشکر را دارند.

گرانیتوئیدهای منطقه سامن بیشتر در قلمرو گرانودیوریت، تونالیت و گرانیتهای قرار می‌گیرد. سنگ‌های آذرین گرانیتوئیدی در این منطقه از تنوع زیادی برخوردار نیست و ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و زمین‌شناسی مشابهی دارد. با توجه به نمودار مجموع آلکان در مقابل SiO_2 و نمودار AFM، بیشتر سنگ‌های تشکیل‌دهنده این توده گرانیتوئیدی از نوع کالک‌آلکان و غنی از پتاسیم و از نظر درجه اشباع از پرآلومین تا متآلومین و از نوع I است به جز مونزوگرانیتهای بیوتیت‌دار (عاری از هورنبلند) که ویژگی‌های گرانیتهای نوع S را دارد. بیوتیت موجود در گرانودیوریت‌های این منطقه از نوع سیدروفیلیت و ثانویه است. کانی‌های آمفیبول موجود در سنگ‌های گرانودیوریت از نوع هورنبلند و

منابع

- Ahadnejad, V., Valizadeh, M. V., Deevsalar, R. and Rezaei-Kahkhaei, M. (2011) Age and geotectonic position of the Malayer granitoids: implication for plutonism in the Sanandaj-Sirjan zone, W Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen* 261(1): 61-75.
- Ahmadi-Khalaji, A. (2006) Petrology of the granitoid complex of Boroujerd. PhD thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Anderson, J. L. (1996) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Transactions of Royal Society of Edinburgh Earth Sciences* 87: 125-138.
- Anderson, J. L. and Smith, D. R. (1995) The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80: 549-559.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) An introduction to the rock forming minerals. Longman, London.
- Foley, S. F. and Wheller, G. E. (1990) Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanic and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanites. *Chemical Geology* 1-18.
- Gafarian, M. B., Zamani, P. and Soheili, M. (1980) 1/100000 map of Malayer, Series sheet 5758, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Goudarzi, H. A. (1995) Magmatism and metamorphism of Malayer-Boroujerd area. MSc thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Harker, A. (1909) The natural history of igneous rocks. Methuen, London.
- Heidarian, M. (2002) Mineralogy and geochemistry of skarn from west and northwest of Samen related to Malayer intrusive rocks. MSc thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (in Persian).
- Hietanen, A. (1974) Amphibole pairs, epidote mineral, chlorite and plagioclase in metamorphic rocks, northern Sierra, California. *American Mineralogist* 59: 22-40.
- Holland, T. and Blundy, J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116: 433-447.
- Hosseinpour, Z. (2003) Petrography and petrology of Samen intrusive complex and its metamorphic aureole rocks. MSc thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science* 8: 523-584.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rocks-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 227-279.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997) Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *American Mineralogist* 82: 1019-1037.
- Madani, H. (1980) Petrology and petrography of Samen intrusive complex. MSc thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Majidi, T. (1996) Petrology and geochemistry of intrusive complex from west of Samen. MSc thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran (in Persian).
- Middlemost, E. A. K. (1985) Magma and magmatic rocks. An introduction to igneous petrology. Longman, London.

- Nachite, H. (1986) Contribution a l'etude analytique et experimental des biotites des granitoids applications typologiques. these de doctorat de l'universite de Bretagne occidentale, Brest, France.
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38: 757-775.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Rollinson, H. R. (1993) Using geological data, evolution, presentation, interpretation. Longman Ltd Publication, London.
- Sadeghian, M. (1994) Petrology of igneous and metamorphic rocks of Cheshmeh Ghassaban area, Hamedan. MSc thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Schmidt, M. W. (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110: 304-310.
- Sepahi, A. A. (1999) Petrology of the Alvand plutonic complex with special reference on granitoids. PhD thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Sepahi, A. A., Borzoei, K. and Salami, S. (2012) The study of mineral chemistry, thermobarometry and tectonic setting of plutonic rocks from Sarabi Tueyserkan area (Hamedan province). *Petrology* 3(11): 39-58 (in Persian).
- Shand, S. J. (1943) Eruptive Rocks, their genesis, composition, classification and their relation to ore deposits. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publication 42: 313- 345. Geological Society, London.
- Takahashi, M., Aramaki, Sh. and Ishihara, S. (1980) Magnetite-series ilmenite-series. I-Type granitoids. *Mining Geology special Issue* 8: 13-28.
- Vyhnal, C. R., Mccsween, H. Y. and Speer, J. A. (1991) Hornblende chemistry in southern Appalachian granitoids: implications for aluminum hornblende thermobarometry and magmatic epidote stability. *American Mineralogist* 76: 167-188.

Petrography, mineral chemistry and geochemistry of granitoids of the Samen plutonic complex (SW Malayer, Hamedan)

**Ali Asghar Sepahi Gerow^{1*}, Farahnaz Sepahvand¹, Ahmad Ahmadi Khalaji²
and Sedigheh Salami¹**

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract

The Malayer plutonic complex is located in the northern Sanandaj-Sirjan zone of the western Iran. An intrusive body with granodioritic component known as the Samen granodiorite is in the center of this complex, which is accompanied by other granitic rocks and small mafic bodies. The major part of this intrusive body composed of tonalitic-granodioritic rocks. The monzogranitic rocks, unlike the other plutonic complexes of the Sanandaj-Sirjan zone such as the Alvand pluton constitute a small part of this complex, and probably formed and emplaced after tonalite-granodiorite body. In terms of geochemical characteristics these rocks are calc-alkaline, peraluminous and S-type, while tonalitic-granodioritic rocks are metaluminous and I-type in nature. These granitoids on the spider diagrams show enrichment in LILE (K, Rb and Th) and depletion in HFSE (Nb, P and Ti). Also they are enriched in LREE rather than HREE, the characteristics which are usually observed in the rocks from subduction environments and active continental margins. The biotites in the granodiorites are siderophyllite, amphiboles and plagioclases are hornblende and andesine type. Barometric calculations yield pressures of 1-1.2 kbar (equal to 3-4 km of depth) for intrusive rocks. Crystallization temperature of the granodioritic rocks in 1 kbar pressure is estimated to be 592.2 to 756.9 °C and in 1.2 kbar pressure around 591.2 to 757.6 °C.

Key words: Granodiorite, Calc-alkaline, Continental arc, Samen, Sanandaj-Sirjan zone