

پتروگرافی، ژئوشیمی و خاستگاه مجموعه نفوذی آلت، شمال غرب سقز

*نعمت‌اله رشیدنژاد عمران، مریم هنرمند، محمد محجل؛

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم، بخش زمین‌شناسی

چکیده

مجموعه گرانیتوئید آلت در بخش شمال غرب پهنه سندانج - سیرجان قرار گرفته است. این مجموعه از سه واحد سنگ‌شناختی اصلی تشکیل شده که عبارتند از توده‌های مونزوگرنیتی تا گرانودیوریتی ($\text{SiO}_2 = 65-77 \text{ wt\%}$) که بیش‌ترین رخ‌نمون را در این مجموعه دارند، واحد کوارتز دیوریت تا تونالیت ($\text{SiO}_2 = 52-63 \text{ wt\%}$) که به صورت دو استوک نفوذی در این مجموعه دیده می‌شوند و توده‌های گرانیتوئید میلونیتی شده که به‌صورت چندین رخ‌نمون در ناحیه برونزد دارند. مجموعه نفوذی آلت، از لحاظ ژئوشیمیایی، متالومین تا اندکی پeralومین، متعلق به سری کالک آلکالن تا تحولی پتاسیم پایین و گرانیتوئیدهای نوع I است و خصوصیات ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی در حواشی فعال قاره‌ایی را نشان می‌دهد (برای مثال تهی‌شدگی واضح از P، Ti، Nb و Sr). شواهد ژئوشیمیایی مربوط به واحد کوارتز دیوریت تا تونالیت نشان می‌دهد که ذوب پوسته تحتانی مافیک تحت تأثیر مذاب‌های گشته‌ای مهم‌ترین عامل در به‌وجود آمدن ماگمای کوارتز دیوریتی بوده است. همچنین ذوب سنگ‌های متاسدیمتری (حاوی کانی‌های آبدار مانند بیوتیت) در فشارهای نسبتاً پایین را می‌توان به‌عنوان منشأ احتمالی ماگمای مولد واحد مونزوگرنیتی تا گرانودیوریتی در نظر گرفت. وجود آنکلاوهای دانه‌ریز مافیک دلالت بر اختلاط ناقص ماگمای مافیک و فلسیک برای تشکیل ماگمای مولد توده‌های گرانودیوریتی تا گرانیتی در منطقه بررسی شده دارد.

مقدمه

زون سندانج- سیرجان که در بخش غربی ورقه ایران و شرق تراست اصلی زاگرس قرار گرفته است، در ناحیه گلیپایگان به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود [۱]. سندانج- سیرجان جنوبی عمدتاً از سنگ‌های دگرشکل یافته و دگرگونی مربوط به تریاس میانی تا تریاس پایانی تشکیل شده است در حالی که سندانج- سیرجان شمالی از سنگ‌های دگرگونی کرتاسه پایانی تشکیل شده و مورد هجوم توده‌های فلسیک زیادی قرار گرفته است [۱]. در عین حال تعدادی رخ‌نمون مربوط به واحدهای دگرگونی پرکامبرین و پالئوزوئیک، سنگ‌های غیردگرگونی و همچنین مقادیر زیادی آندزیت‌ها و بازالت‌های کرتاسه با خاصیت کالک آلکالن در سندانج-سیرجان شمالی گزارش شده است [۲]. در سندانج- سیرجان شمالی همانند بخش جنوبی، تعداد زیادی توده‌های گرانیتوئیدی

واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی، خاستگاه، گرانیتوئید، ذوب بخشی، مجموعه نفوذی، آلت، سقز

پذیرش ۹۱/۸/۳۰

دریافت ۹۰/۴/۱۱

Rashid@modares.ac.ir

*نویسنده مسئول

با سن ژوراسیک تا سنوزوئیک نفوذ کرده‌اند. پژوهش‌هایی بر روی این توده‌های گرانیتوئیدی انجام شده است [۳]-[۱۴].

بسیاری از این محققان بر این باورند که توده‌های نفوذی در زون سنندج- سیرجان غالباً دارای ترکیب گرانیت و گرانودیوریت با ماهیت کالک آلکالن و همچنین توده‌های دیوریت و گابرو هستند. در عین حال شهبازی و همکاران [۱۲]، ماهیت تولنییتی را برای ناحیه همدان ذکر می‌کنند. تمامی این شواهد نشان‌دهنده تشکیل توده‌های نفوذی زون سنندج- سیرجان در محیط حاشیه فعال قاره‌ای، حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیرپهنه سنندج- سیرجان، هستند.

در این مقاله مجموعه گرانیتوئیدی آلت بررسی شده است که در شمال غرب شهرستان سقز واقع است و شامل توده‌های مونزوگرانیتی تا گرانودیوریتی و کوارتزادیوریتی تا تونالیتی است. در رابطه با مباحث پترولوژیکی و ژئوشیمیایی، پژوهشی که به‌طور اختصاصی به ویژگی‌های مجموعه نفوذی ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ آلت پرداخته باشد، تا به حال انجام نشده است. به همین دلیل در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از همه شواهد صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی به بررسی توده‌های نفوذی در این بخش از پهنه سنندج- سیرجان شمالی پرداخته شود و در پایان ضمن ارائه مدل پترولوژیکی بر اساس شواهد ذکر شده برای توده‌های نفوذی آلت، مقایسه‌ای نیز با دیگر توده‌های مشابه این مجموعه در بخش شمالی زون سنندج- سیرجان صورت می‌گیرد. قابل ذکر است که سنگ‌های گرانیتی و ریولیتی که در بخش‌های شمالی محدوده مورد نظر (در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ مهاباد) برونزد دارند و تشکیل این واحدهای سنگی حاصل ذوب بخشی سنگ‌های پوسته‌ای در دماهای نه چندان بالا معرفی گردیده است [۱۵].

سن‌های به‌دست آمده برای برخی از مجموعه‌های آذرین بزرگ، که در زون سنندج- سیرجان جای‌گزین شده‌اند به کرتاسه و پالئوسن نسبت داده شده‌اند (برای مثال [۱۶]). شایان ذکر است که سن‌های به‌دست آمده برای گرانیتوئید مونه [۱۶] به روش K-Ar است و مربوط به سن حادثه دگرگونی در منطقه مونه است. در رابطه با سن تبلور مجموعه نفوذی آلت، افتخار نزهت [۱۷] آن‌ها را معادل گرانیت تیپ دوران (پرکامبرین پایانی) معرفی کرده است. در حالی‌که، عمرانی و همکاران [۱۸] تبلور این توده‌ها را مربوط به بعد از کرتاسه دانسته‌اند. برای سن‌سنجی رادیومتری این توده‌ها تنها مأخذی را که می‌توان به آن اشاره کرد مربوط به حسن‌زاده و همکاران است که با استفاده از روش U-Pb زیرکن برای گرانودیوریت شیخ چوپان و گرانیت بوبکتان (شکل ۱) به ترتیب سن ۵۵۱ میلیون سال و ۵۴۴ میلیون سال را معرفی کرده‌اند. طبق نظر حسن‌زاده و همکاران گرانیتوئیدهای مذکور، در داخل سنگ‌های دگرگونی تزریق نشده‌اند و می‌توان آن‌ها را معادل پروتولیت (فاقد دگرشکلی) سنگ‌های دگرگونی دانست [۱۹].

روش پژوهش

ضمن انجام بررسی‌های صحرایی، نمونه‌برداری و بررسی‌های دقیق پتروگرافی، تعداد ۱۱ نمونه مناسب از بخش‌های مختلف مجموعه مورد نظر (شامل توده‌های گرانیتوئیدی، آنکلاو و آپلیت)، که متحمل هوازدگی و

دگرسانی کمتری شده بودند، برای انجام آنالیز ژئوشیمیایی به روش ICP-MS انتخاب و به شرکت Als Chemex در کانادا ارسال شدند. نتایج پژوهش‌های کانی‌شناسی مودال در این نمونه‌ها در جدول ۱ و نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در پایان، نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی مربوط به انواع رخنمون‌های این مجموعه نفوذی با یکدیگر مقایسه و برای پی بردن به منشأ ماگماهای مولد این توده‌ها و نیز ارتباط ژنتیکی این توده‌ها با یکدیگر استفاده شد.

بحث

زمین‌شناسی منطقه

چنان‌که ذکر شد منطقه بررسی شده در پهنه شمالی زون سنندج- سیرجان، شمال غرب شهرستان سقز و در عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}12'$ و $36^{\circ}30'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $45^{\circ}52'$ و $46^{\circ}59'$ شرقی، قرار گرفته است (شکل ۱) [۲۰]. پهنه سنندج- سیرجان را در امتداد جنوب غرب به سمت شمال شرق به پنج زیر پهنه تقسیم کرده‌اند. منطقه بررسی شده در زیر زون با دگرشکلی پیچیده قرار گرفته است که از ویژگی‌های آن می‌توان به وجود سنگ‌های شدیداً دگرشکلی یافته و همچنین فراوانی واحدهای شیستی، فیلیتی و سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده اشاره کرد. مجموعه آذرین مورد بحث در این نوشتار، با ترکیب عمده مونزوگرنیتی، گرانودیوریت، کوارتزیدیوریتی و تونالیتی، با وسعتی بالغ بر ۱۴۰ کیلومتر مربع به‌داخل مجموعه دگرگونی (شیست، فیلیت و اسلیت) نفوذ کرده است. در همبری گرانیت با سنگ در برگیرنده، بخشی تیرمتر دیده می‌شود که اثر حرارتی بر سنگ در برگیرنده را نشان می‌دهد. این مشاهده نیز حاکی از تزریق و جای‌گیری توده‌نفوذی در سنگ‌های دگرگونه میزبان است. از سوی دیگر، مشاهده ارتباط چین‌خوردگی مرحله اول در سنگ‌های میزبان این توده‌ها و پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و همچنین حضور توده‌های گرانیتوئیدی فراوان در این منطقه (که بخشی از آن‌ها در پهنه‌های برشی نفوذ یافته‌اند)، نشان می‌دهد مجموعه دگرگونی (میزبان این توده‌ها، شکل ۱) که به پرکامبرین نسبت داده شده است (برای مثال [۱۸])، منسوب به مزوزوییک است که در طی باز شدن نئوتتیس جای‌گیر شده‌اند و با فرآیند بسته شدن آن در انتهای کرتاسه و سنوزوییک چین‌خورده و تکوین یافته‌اند [۲۱].

مجموعه شیست، فیلیت و اسلیت (Sch) (شکل ۱)، قدیمی‌ترین و در عین حال وسیع‌ترین واحد زمین‌شناسی در ناحیه مورد نظر است. این واحد روند عمدتاً شمال غربی- جنوب شرقی و موازی با روند راندگی اصلی در منطقه را دارد. سنگ مادر مجموعه Sch عمدتاً از نوع تخریبی (شیل، ماسه سنگ و سیلت سنگ) است و سازنده توفی در درجه دوم اهمیت در آن قرار دارد. در واقع واحد Sch اساساً یک توالی رسوبی- آتشفشانی است که در بالای ستون به یک واحد نه چندان ضخیم متاریولیتی و متاداسیتی Mr تبدیل می‌شود [۱۸]. از لحاظ درجه دگرگونی، واحد Mr نیز مانند شیست‌ها، در حد رخساره شیست سبز است. افتخار نزهت معتقد است که این

متاریولیت‌ها و متاتوف‌های اسیدی هم ارز خروجی گرانیت دوران هستند که در شیست‌های پرکامبرین (واحد Sch) نفوذ کرده، اما خود در زیر سازند بایندر (جنوب مهاباد) جای گرفته‌اند [۲۲].

بررسی سنگ‌شناسی

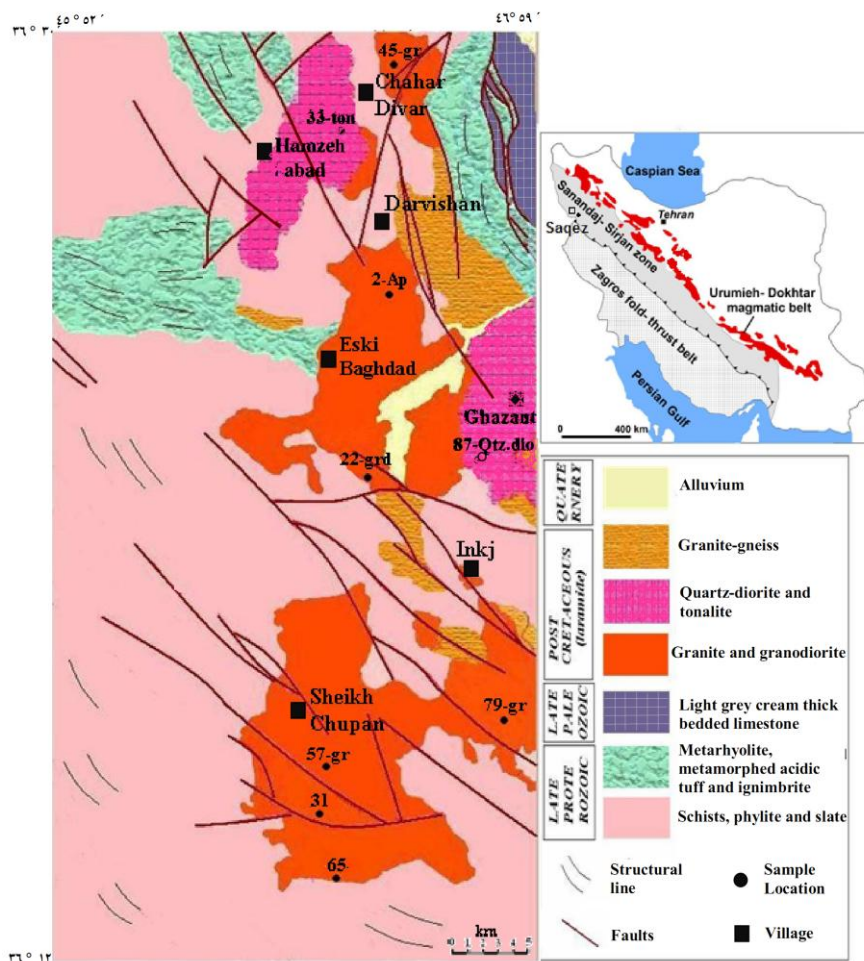
بخش عمده‌ای از مجموعه نفوذی مورد بحث، ترکیب مونزوگرانییتی دارد. بزرگترین برونزد آن توده گرانیتی شیخ چوپان است (شکل ۱) که در حواشی ترکیب گرانودیوریتی نشان می‌دهد. توده‌های نفوذی منطقه شامل توده‌های مونزوگرانییتی تا گرانودیوریتی اسکی بغداد، شیخ چوپان و چهاردیوار، توده کوارتز دیوریتی تا تونالیتی قازانتا و حمزه‌آباد و گرانیتوئید میلونیتی درویشان و غرب اینکج است. توده‌های گرانیتوئیدی بررسی شده به وسیله دایک‌های آپلیتی و بازیک تا حدواسط قطع شده‌اند. زینولیت‌هایی از سنگ‌های میزبان و آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک نیز در نقاط مختلف این توده‌های گرانیتوئیدی دیده می‌شوند.

۱. توده کوارتز دیوریتی تا تونالیتی قازانتا و حمزه‌آباد

این توده در بخش‌های شمالی و جنوبی روستای قازانتا و در اطراف روستای حمزه‌آباد قرار گرفته است (شکل ۱) و ترکیب آن از کوارتز دیوریت تا تونالیت تغییر می‌کند. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز هستند. از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها می‌توان به آلکالی فلدسپار، آپاتیت، زیرکن، اسفن و کانی‌های اپک اشاره کرد. این سنگ‌ها دارای بافت گرانولار است، پلاژیوکلازها به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ترکیب غالب لابرادوریت و در برخی موارد آندزین (تعیین ترکیب به روش میشل لوی) و دارای منطقه‌بندی دیده می‌شوند. پلاژیوکلازها به سریسیت، اپیدوت و سوسوریت تجزیه شده‌اند و همچنین در برخی موارد ماکل‌های خمیده در آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۲. A). از آن‌جا که دگرشکلی بستر مناسبی را برای تجزیه و دگرسانی بسیاری از کانی‌ها و از جمله بیوتی‌ها فراهم می‌کند، ورقه‌های بیوتیت‌ها ضمن دگرشکلی و چین‌خوردگی (شکل ۲. B)، تجزیه شدن به کلریت و یا مجموعه‌ای از اسفن، پرنیت، مسکوویت و کانی‌های اپک را نیز نشان می‌دهند. زیرا آمفیبول‌ها نیز به صورت بلورهای منشوری شکل‌دار است و در برخی موارد تجزیه به بیوتیت، کلریت، اپیدوت و پرنیت (دگرسانی سوسوریتی) را نشان می‌دهند. یک جهت‌یافتگی بارز در کانی‌ها (به‌ویژه بیوتیت‌ها) در مقاطع مربوط به این سنگ‌ها دیده می‌شود. بلورهای کوارتز، در شرایط دگرشکلی حالت جامد، تبلور دوباره یافته و خاموشی موحی نشان می‌دهند.

۲. توده‌های مونزوگرانییتی

توده‌های نفوذی در مناطق چهاردیوار، اسکی بغداد، بوبکتان و شیخ چوپان (شکل ۱) ترکیب مونزوگرانییتی دارند. در توده شیخ چوپان ترکیب توده در حواشی بیش‌تر به سمت گرانودیوریت متمایل می‌شود. در حقیقت می‌توان گفت بیش‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه ترکیب مونزوگرانییتی تا گرانودیوریتی دارند.



شکل ۱. موقعیت منطقه بررسی شده در نقشه ایران که با علامت (□) در شمال غرب سقز مشخص شده است و نقشه زمین‌شناسی منطقه در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ [۱۸])، به همراه موقعیت نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش این سنگ‌ها در نمونه‌دستی به رنگ خاکستری روشن و دارای جهت‌یافتگی هستند که نشان‌دهنده جای‌گزینی این توده‌ها در یک محیط فشارشی است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها شامل کوارتز (در برخی مقاطع دارای حاشیه دندان‌های و ماکل موجی (شکل ۲. C)، آلکالی فلدسپار، بیوتیت و پلاژیوکلاز با ترکیب غالب الیگوکلاز (تعیین ترکیب به روش میشل‌لوی) است. از کانی‌های فرعی موجود در این سنگ‌ها می‌توان به آپاتیت، زیرکن، اسفن و کانی‌های اپیک اشاره کرد. در مونوگرانیت شیخ چوپان آمفیبول از نوع هورنبلند نیز در مقاطع مربوط به این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. در این مقاطع یک سری رگچه‌های باریک کلینوزوئیزیت دیده می‌شود که در جهات مختلف کانی‌های موجود در مقطع را قطع کرده‌اند. تجمعی از کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و آمفیبول نیز در برخی موارد دیده می‌شود.

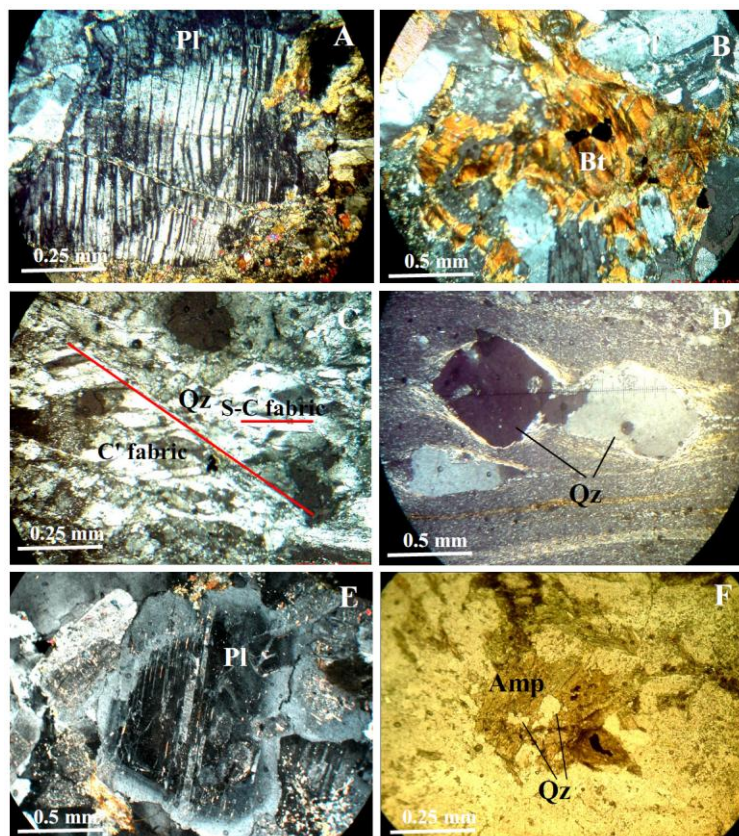
۳. گرانیتوئید میلونیتی درویشان و غرب اینکج

این سنگ‌ها عمدتاً از کوارتز و فلدسپار (شامل آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز) تشکیل شده است و به شدت دچار دگرشکلی شده‌اند. به دلیل شدت دگرسانی نمی‌توان ترکیب پلاژیوکلازها را با دقت تعیین کرد. بلورهای کوارتز به صورت چشمی در متن حاوی کوارتزهای دانه‌ریز دیده می‌شوند. در برخی موارد این بلورهای ریز

زمینه به داخل فنوکریست به صورت رگچه نفوذ کرده‌اند. به‌طور کلی در مقاطع این سنگ‌ها، پرفیروکلاست‌های کوارتز و فلدسپار بافت سیگموئیدال (چشمی) نشان می‌دهند (شکل ۲. D). به‌دلیل دگرگونی دینامیکی شدیدی که این سنگ‌ها متحمل شده‌اند، کانی‌شناسی مدال در این نمونه‌ها با اشکال مواجه می‌شود. اما با توجه به بررسی‌های پتروگرافی و ترکیب کانی‌شناسی، توده درویشان عمدتاً در محدوده گرانیته تا گرانودیوریت قرار می‌گیرد (نمونه‌های فلسیک تر در بخش مرکزی توده هستند). کانی‌های بیوتیت $\pm$ آمفیبول از دیگر کانی‌های مشاهده شده (به مقدار کمتر نسبت به کوارتز و فلدسپار) در این سنگ‌ها هستند.

۴. آنکلاوها

بررسی آنکلاوها اطلاعات مفیدی درباره منشأ و تحول سنگ‌های گرانیته در اختیار قرار می‌دهند. بر اساس پژوهش‌های پتروگرافی در منطقه آلت، آنکلاوهای موجود در توده‌های اسیدی و حوضات منطقه، غالباً ترکیب کوارتز مونودیوریت، کوارتزیدیوریت و گرانودیوریت دارند. در صحرا هاله واکنشی بین آن‌ها و سنگ میزبان‌شان دیده نمی‌شود و مرز آن‌ها با سنگ میزبان کاملاً مشخص است. حاشیه‌های آن‌ها از حالت تقریباً زاویه‌دار تا گرد شده در تغییر است، اما به‌طور عمده تقریباً بیضوی شکل است و در ابعاد میلی‌متری (به‌صورت لخته‌های مافیک در مقاطع میکروسکوپی) تا حدود ۲۰ سانتی‌متر، غالباً در بخش‌های حاشیه‌ای توده‌ها دیده می‌شوند. آنکلاوها اکثراً حالت کشیده داشته و محور طولی آن‌ها با جهت‌یافتگی ترجیحی در سنگ میزبان همسو است. این آنکلاوها از نوع میکروگرانولار مافیک است و از لحاظ پتروگرافی و کانی‌شناسی شبیه به سنگ میزبان، ولی همواره نسبت به آن‌ها دانه‌ریزتر هستند. کانی‌های اصلی موجود در آن‌ها شامل پلاژیوکلاز با ترکیب غالب آندزین و در برخی موارد لابرادوریت (تعیین ترکیب به روش میشل‌لوی)، آمفیبول و به مقدار کمتر کوارتز و بیوتیت هستند. پلاژیوکلازها در دو اندازه ریز و درشت در این سنگ‌ها دیده می‌شوند و نسبت به انواع موجود در سنگ میزبان از آنورتیت غنی‌تر بوده و ترکیب بازیک تری دارند. انواع دانه درشت در برخی موارد منطقه‌بندی نوسانی همراه با حاشیه خورده شده نشان می‌دهند (شکل ۲. E). شکل ۲. F نیز حضور بلورهای کوارتز در داخل آمفیبول را که یکی از نشانه‌های آمیزش ماگمایی است نشان می‌دهد [۲۴]. مقدار بیوتیت‌ها از آمفیبول‌ها کمتر است (جدول ۱) و در برخی موارد به کلریت تجزیه شده‌اند. از کانی‌های فرعی مشاهده شده در مقاطع مربوط به آنکلاوها می‌توان به بلورهای اسفن (به دو شکل اولیه و حاصل دگرسانی آمفیبول و بیوتیت)، آپاتیت، کانی آپک و زیرکن اشاره کرد. در رابطه با نحوه پیدایش این آنکلاوها و مقایسه آن‌ها با شیمی گرانیته میزبان در قسمت ژئوشیمی بحث شده است. علاوه بر آنکلاوهای میکروگرانولار مافیک، زینولیت‌هایی از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، میزبان توده‌های نفوذی، نیز در گرانودیوریت‌ها دیده می‌شوند. این زینولیت‌ها همانند سنگ‌های دگرگونی درونگیر که در کنتاکت با توده قرار گرفته‌اند تحت تأثیر حرارت توده قرار گرفته است و به‌همین دلیل حالت هورنفرسی پیدا کرده‌اند. زینولیت‌ها از لحاظ کانی‌شناسی شبیه به شلیست‌های میزبان توده هستند و عمدتاً در حاشیه توده‌های گرانیته منطقه دیده می‌شود (شکل ۳).



شکل ۲. A) خمیدگی ماکل‌ها در پلاژیوکلاز (Pl) مربوط به یک نمونه کوارتز دیوریتی در نور XPL، B) بلور بیوتیت (Bt) که شدیداً چین‌خورده (مجدد) است (در نور XPL). با وجود دگرشکلی شدیدی که در این‌جا اعمال شده پلاژیوکلازها (Pl) همچنان به‌صورت تیغه‌های کشیده در مقطع حضور دارند، C) بلورهای شدیداً دگرشکل یافته از کوارتز (Qz) همراه فابریک‌های S-C و C' در این تصویر مشخص شده‌اند (در نور XPL)، D) بافت چشمی در بلورهای کوارتز (Qz) در نمونه مربوط به گرانیتوئید میلونیتی درویشان (در نور XPL)، D) پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی نوسانی و حاشیه‌های خورده شده در یکی از نمونه‌های آنکلاو (در نور XPL) و F) تشکیل آمفیبول (Amp) در اطراف بلورهای کوارتز (Qz) (در نور PPL)



شکل ۳. A) تصویری از زینولیت مربوط به سنگ‌های متاولکانیک میزبان در داخل حاشیه جنوبی توده شیخ چوپان، B) آنکلاوهای کوارتز دیوریتی در داخل توده گرانیت

۵. دایک‌های منطقه

توده‌های نفوذی منطقه را رگه‌های سیلیسی و دایک‌های متعدد آپلیتی و انواع حدواسط قطع کرده است. کانی‌های دیده شده در آپلیت‌ها شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار و به مقدار کمتر پلاژیوکلاز، مسکوویت و کانی اپک هستند. امتداد دایک‌های آپلیتی غالباً NW-SE و در موارد اندکی در جهت NE-SW مجموعه نفوذی مورد نظر را قطع کرده‌اند.

دایک‌های حدواسط با روند NE-SW و در مواردی روند تقریباً N-S دارند. بافت آن‌ها دانه‌ریز است و کانی‌های تشکیل دهنده آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت، کلریت، اپیدوت و اسفن هستند. ترکیب این دایک‌ها در کل

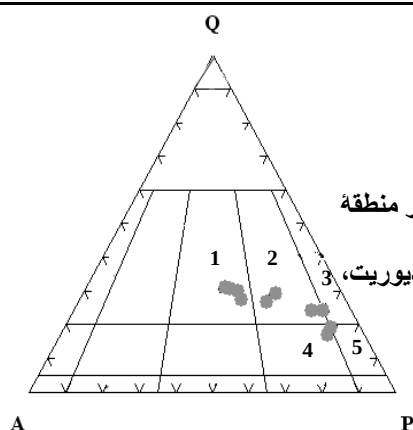
میکروکوآرتز دیوریت است. از آنجا که سنگ‌های این دایک‌ها به شدت دچار دگرسانی شده‌اند، به همین دلیل آنالیز شیمیایی از آن‌ها انجام نشده است. اما با توجه به شباهت‌های کانی‌شناسی این سنگ‌ها با سنگ‌های توده‌های کوآرتز دیوریتی می‌توان گفت که دایک‌های مذکور از نوع تغذیه‌کننده هستند که بخش اعظم آن به صورت توده‌های کوآرتز دیوریتی تا تونالیتی جای‌گزین شده و سپس باقی‌مانده آن به صورت دایک‌های کوآرتز دیوریتی پس از جای‌گزینی توده‌های مونزوگرنیتی به داخل آن‌ها نفوذ کرده است. از آنجا که دایک‌های حدواسط توسط دایک‌های آپلیتی قطع شده‌اند، بنا بر این نفوذ دایک‌های آپلیتی را می‌توان به عنوان جوان‌ترین فعالیت ماگمایی در منطقه تصور کرد.

نتایج بررسی مدال بر روی توده‌های نفوذی بررسی شده بر روی نمودار طبقه‌بندی مودال [۲۳] (شکل ۴) و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آنالیزهای مدال سنگ‌های استفاده شده در آنالیز ژئوشیمیایی مربوط به توده‌های نفوذی آلود

(برحسب درصد حجمی)

Rock type	monzogranite				Tonalite	Quartz-diorite	Enclave		Granodiorite	
Sample no.	A-45	A-57	A-31H	A-79	A-33	A-87	A-31En	A-65En	A-22	A-65
Qtz	۲۷	۲۴	۲۹	۳۰	۲۱	۱۴	۲۲	۱۷	۲۵	۲۲
Pl	۳۸	۳۹	۳۷	۳۷	۵۸	۶۱	۵۹	۶۴	۴۶	۴۳
Kfs	۲۶	۲۵	۲۸	۳۰	۸	۱۰	۱۱	۹	۱۶	۱۸
Bt	۵	۶	۵	۴	۴	۳	۴	۳	۳	۴
Hlb	۲	۲	۲	۳	۸	۹	۱۱	۸	۴	۶



شکل ۴. نتایج حاصل از شمارش مدال کانی‌ها در نمونه‌های آنالیز شده در منطقه بررسی شده بر روی نمودار [۲۳]، نمونه‌ها عمدتاً در محدوده‌های ۱. مونزوگرنیت، ۲. گرانودیوریت، ۳. تونالیت، ۴. کوآرتز مونزو دیوریت، ۵. کوآرتز دیوریت قرار می‌گیرند

دگرشکلی مجموعه نفوذی

در بیش‌تر نمونه‌های منطقه کوآرتزها دگرشکلی شکل‌پذیر^۱ نشان می‌دهد، در حالی‌که، فلدسپارها غالباً دگرشکلی از نوع شکنا^۲ را نشان می‌دهند. از نظر ورنون^۳ [۲۵] در یک سنگ گرانیتی که کوآرتز (کانی کم قوام در برابر دگرشکلی) با فلدسپار (کانی مقاوم) به‌طور همزیست قرار گرفته اند، چنانچه در دماهای نسبتاً اندک (کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) دچار دگرشکلی شود، فلدسپار قبل از این‌که متحمل تغییر شکل شکنا گردد، صرفاً به میزان اندکی دگرشکلی شکل‌پذیر پیدا می‌کند. حال آن‌که، کوآرتز به‌صورت شکل‌پذیر دچار دگرشکلی می‌شود و تبلور مجدد می‌یابد و معمولاً به‌صورت نوارهایی از تجمعات دانمریز کوآرتز (حاصل از تبلور مجدد) در می‌آید (مانند شکل ۵. A)؛ حال آن‌که، در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، دگرشکلی

۱. ductile

۲. Brittle

۳. Vernon

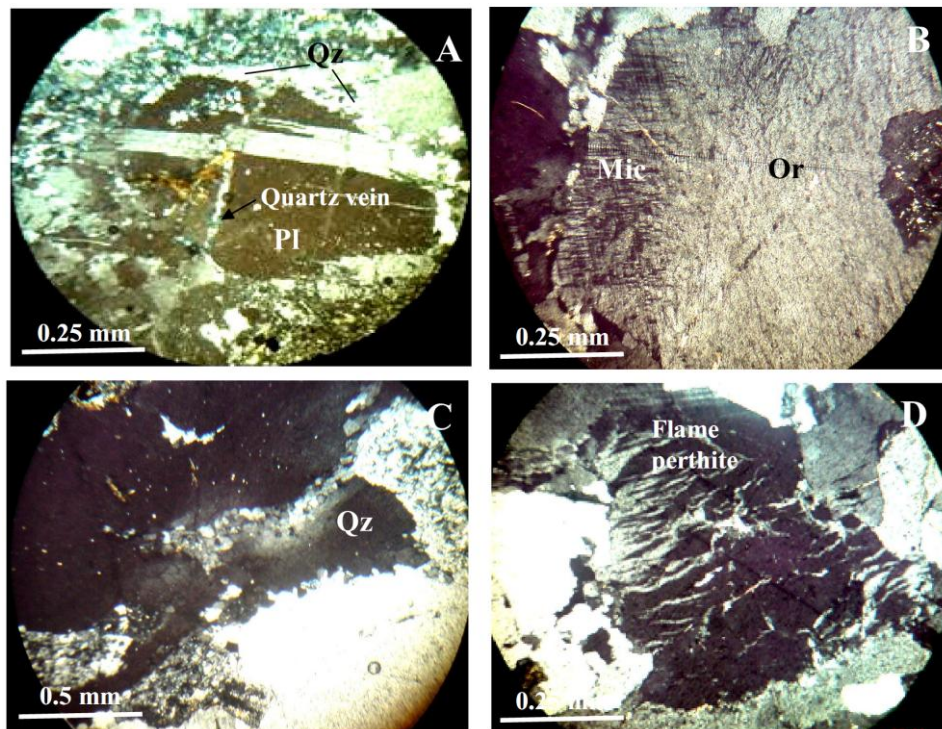
شکل‌پذیر راحت‌تر و بیش‌تر صورت می‌پذیرد و در نتیجه فلدسپار نیز به‌صورت یک کانی شکل‌پذیر عمل می‌کند [۲۶]. بنا بر این، دگرشکلی منطقه به احتمال زیاد در دماهای پایین‌تر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. در عین حال، یکی از شواهد دگرشکلی در دمای نسبتاً زیاد را می‌توان وجود شکستگی‌های باریک در پلاژیوکلاز دانست که با بلورهای بسیار ریزی از کوارتز و یا سایرکانی‌های مراحل آخر پر شده‌اند [۲۷]، [۳۸]. در حقیقت با توجه به شکستگی‌هایی که در فلدسپارها با کوارتز پر شده‌اند شکل ۵. A) می‌توان تصور کرد که دگرشکلی در درجه حرارت نسبتاً زیاد رخ داده است. در این‌جا احتمال می‌رود که دو مرحله تنش اتفاق افتاده باشد، مرحله اول همان جای‌گزینی سیلیس در شکستگی‌های فلدسپارهاست، و مرحله دوم در امتداد شکستگی‌های این مرحله فلدسپار سرپستی شده است (شکل ۵. A).

همچنین دگرشکلی در دمای نسبتاً زیاد در حالت جامد را می‌توان با مشاهده خمیدگی در ماکل پلاژیوکلازها (شکل ۲. A) و یا انقطاع در ماکل آن‌ها مشاهده کرد [۲۹]. در برخی از مقاطع تعدادی از بلورهای ارتوز از حاشیه در حال تبدیل به میکروکلین هستند (شکل ۵. B). از آن‌جاکه دمای تبدیل ارتوکلاز به میکروکلین بر اثر دگرشکی 50 ± 400 درجه سانتی‌گراد است [۳۰]، به احتمال زیاد دمای دگرشکلی این توده‌ها نزدیک به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۲. C تصویری از نوارهای مرکب از یک نوع بلور^۱ از کوارتز در یکی از نمونه‌های گرانیته که در پهنه برشی دچار دگرشکلی شده است. فابریک‌های S-C و C' در این تصویر مشخص شده‌اند. مهاجرت مرزی بین بلورهای کوارتز، که منجر به تشکیل بلورهای ریز و تازه تشکیل شده در اطراف بلورهای بزرگ‌تر می‌شود نیز در شکل ۵. C نشان داده شده است. از طرف دیگر پرتیت شعله‌ای^۲ که در آن لامل‌های آلبیت به شکل شعله‌های آتش در متن فلدسپار پتاسیم (به‌ویژه در حاشیه‌های بلور و در مکان‌های با استرس زیاد) دیده می‌شوند، در یکی از نمونه‌های گرانیته دگرشکل شده منطقه دیده می‌شود (شکل ۵. D). تشکیل این نوع پرتیت در این سنگ‌ها نشان‌دهنده وقوع دگرشکلی در توده‌های منطقه در حد رخساره شیبست سبز است (در حالت دگرشکلی شکل‌پذیر) و تغییر ترکیب کانی بر اثر استرین و در دمای ۴۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد [۳۱]. شکل ۲. B بلوری درشت بیوتیت را نشان می‌دهد که شدیداً دچار دگرشکلی شده و فابریک مجعد^۳ در آن مشاهده می‌شود (نمونه مورد نظر در نزدیکی حاشیه توده حمزه‌آباد قرار دارد). این فابریک، به موازات فابریک مشابه در کوارتزهای مجاور است. باوجود دگرشکلی شدیدی که در این‌جا اعمال شده است، ساختارهای ماگمایی باقی‌مانده (از جمله تیغه‌های کشیده پلاژیوکلاز) نیز وجود دارند. شواهد ساختاری در قسمت‌های مختلف توده متأثر شدن آن‌را از دگرریختی نشان می‌دهد. بخش‌هایی از گرانیته تحت تأثیر تغییر شکل برشی نیز قرار گرفته است. با توجه به شواهد مشاهده شده دگرشکلی عمدتاً از نوع شکل‌پذیر است. حادثه اصلی دگرشکلی در منطقه به احتمال زیاد مربوط به فاز کوه‌زایی سیم‌رین پسین (ژوراسیک پایانی) است.

۱. mono mineral ribbon

۲. Flame perthite

۳. kink band



شکل ۵. A) دگرشکلی شکنده در فلدسپار پلاژیوکلاز (Pl) در مقابل دگرشکی شکل‌پذیر در کوارتزهایی که تبلور دوباره یافته‌اند، B) بلور ارتوز (Or) که حاشیه آن در حال تبدیل به میکروکلین (Mic) است، C) مهاجرت مرزی بین بلورهای کوارتز (Qz) و فرآیند تجدید تبلور و D) پرتیت شعله‌ای در یکی از نمونه‌های گرانیت دگرشکل شده، همه تصاویر در نور XPL تهیه شده‌اند

ژئوشیمی و خاستگاه تکتونیکی

در اینجا از روش رده‌بندی شیمیایی [۳۲] برای طبقه‌بندی سنگ‌های منطقه استفاده شده است (شکل ۶. A) که بر اساس آن مجموعه نفوذی آلوت از نظر سنگ‌شناسی شامل کوارتز دیوریت، تونالیت، گرانودیوریت و گرانیت هستند. همچنین بر روی دیاگرام AFM [۳۳] نمونه‌ها در محدوده کالک آلکان تا تحولی قرار می‌گیرند (شکل ۶. B, D). مطابق با رده‌بندی [۳۴] نمونه‌های منطقه (شکل ۶. C) عمدتاً در محدوده مت‌آلومین قرار می‌گیرند (به‌استثنای یک نمونه از گرانیت‌ها که احتمالاً به‌دلیل تأثیر آلتراسیون و کاهش مقادیر عناصر آلکالی به‌ویژه K_2O در محدوده پرآلومین قرار گرفته‌اند). بر روی نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (شکل ۷) اقتباس از [۳۵]) نمونه‌های کوارتز دیوریت، تونالیت، گرانودیوریت و آنکلاوها در سری کالک آلکان تا تحولی پتاسیم متوسط و اندک و گرانیت‌ها (به‌استثنای نمونه مربوط به توده شیخ چوپان) در محدوده کالک آلکان پتاسیم زیاد قرار می‌گیرند. از آنجاکه رگه‌های آپلیتی مربوط به مراحل آخر ماگمایی هستند، انتظار می‌رود که مقادیر پتاسیم در این سنگ‌ها بیش‌تر از سایر نمونه‌های منطقه باشد. اما چنان‌که در نمودار شکل ۷ ملاحظه می‌شود نمونه آپلیتی حاوی پتاسیم اندکی است که می‌تواند مربوط به دگرسانی نسبی در این نمونه باشد، زیرا پتاسیم جزء عناصر متحرک است. تفاوت موجود در سری‌های ماگمایی سنگ‌های منطقه، مربوط به ذوب منابع پوسته

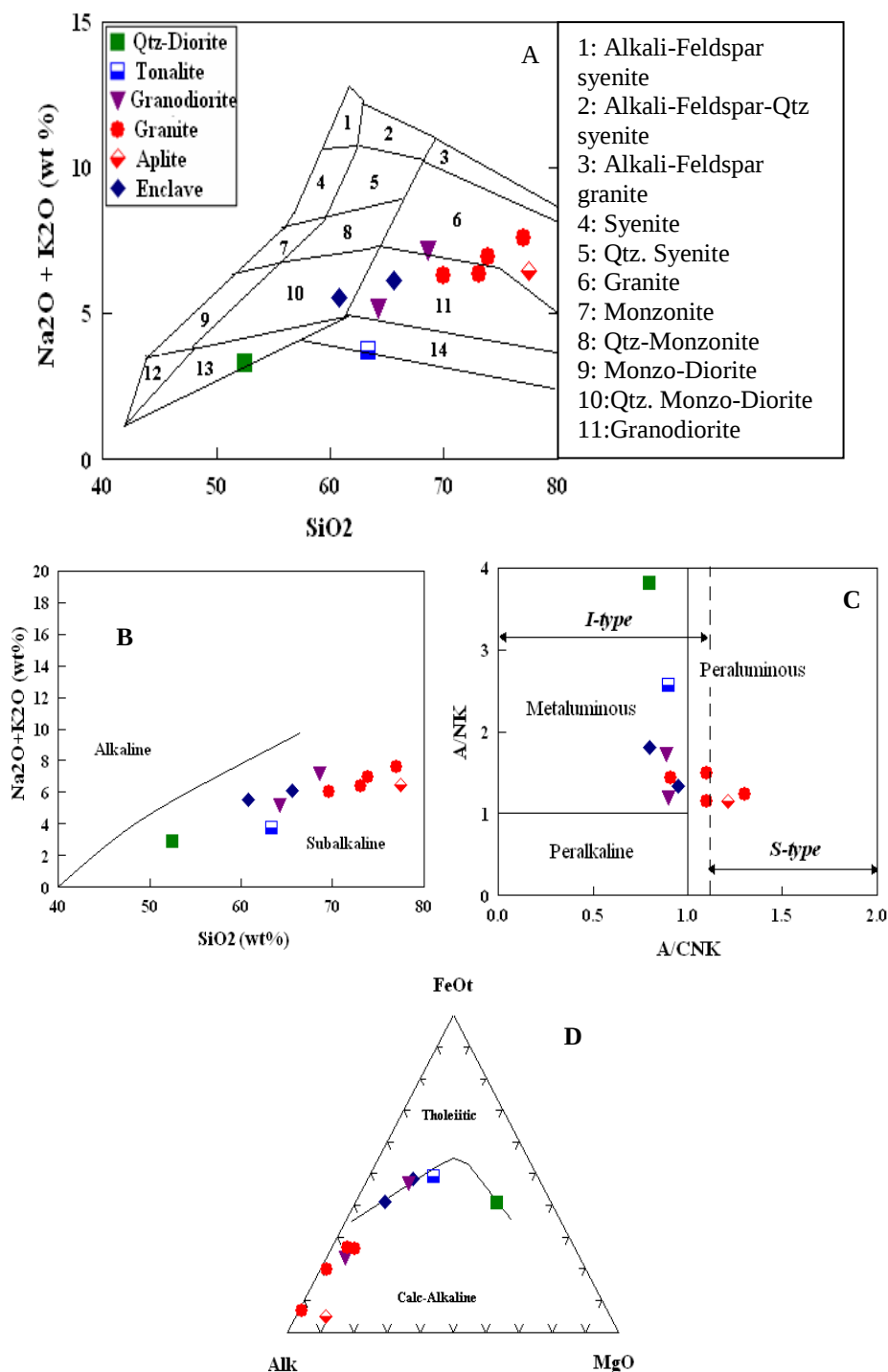
قاره‌ای و اختلاط ماگمایی است. شکل ۷ نمودارهای مربوط به تغییرات عناصر اصلی در مقابل SiO_2 را نشان می‌دهد. چنان‌که در این نمودارها ملاحظه می‌شود، مقدار اکسیدهای CaO ، TiO_2 ، MnO ، Fe_2O_3 ، MgO ، همراه با افزایش SiO_2 کاهش می‌یابند. در مورد اکسیدهای CaO ، Al_2O_3 و P_2O_5 می‌توان روند کاهشی این نمودارها را مربوط به تغییر ترکیب پلاژیوکلازها از انواع با آنورتیت بیشتر به سمت انواع با آل بیت بیشتر (در نمودارهای Al_2O_3 و CaO) و نیز زیاد بودن مقدار آپاتیت (در نمودار P_2O_5) در سنگ‌های حدواسط منطقه دانست. کاهش اکسیدهای MgO ، TiO_2 ، Fe_2O_3 و MnO نیز مربوط به تبلور تفریقی ماگما و جای‌گیری این عناصر در ساختار کانی‌های فرومنیزین و یا اپک مانند پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و اکسیدهای آهن و تیتانیوم دار است، زیرا فراوانی این کانی‌ها در واحدهای نفوذی حدواسط منطقه بیشتر از انواع اسیدی است. بر خلاف عناصر قبلی، نمودارهای مربوط به اکسیدهای Na_2O و K_2O روند کاهشی یا افزایشی مشخصی را نشان نمی‌دهند. با توجه به متحرک بودن این عناصر، این موضوع را می‌توان مربوط به دگرسانی نسبی در سنگ‌های این منطقه دانست. زیرا مراتب شدت و ضعف دگرسانی وابسته به شدت و ضعف دگرشکلی و یا دانسیته ساختارهای تکنونیک است که در آن صورت حجم سیال و زمان واکنش اهمیت کلیدی دارند. اما مجموع عناصر آلکالی در سنگ‌های منطقه روند صعودی نشان می‌دهد. زیرا با پیشرفت تبلور، مقادیر این عناصر در مذاب باقی‌مانده افزایش یافته و در مراحل آخر، وارد شبکه آلکالی فلدسپار می‌شوند. بنا بر این، طبیعی است که میزان این عناصر با فراوانی آلکالی فلدسپار در سنگ‌های منطقه همخوانی داشته باشد. در شکل ۸ نمودارهای مربوط به تغییرات عناصر کمیاب در مقابل SiO_2 نشان داده شده است. همراه با افزایش SiO_2 مقادیر عناصر Ni ، Co ، V ، Sr ، Cu و Zn کاهش و مقادیر مربوط به عناصر U ، Rb ، W ، Th و Ta روند افزایشی نشان می‌دهند. عناصر Zr ، Y ، Nb و Ga در نمونه‌های حدواسط مقدار حداکثر را دارد و سپس به سمت نمونه‌های اسیدی کاهش نشان می‌دهد.

نتایج آنالیز شیمیایی مربوط به عناصر کمیاب و نادر خاکی در جدول ۲ و الگوهای عادی شده این عناصر نسبت به فراوانی آن‌ها به کندریت در شکل ۹ ارائه شده است. براوانی عناصر کمیاب نسبت به [۳۶] و عناصر نادر خاکی نسبت به [۳۷] نرمالایز شده‌اند. چنان‌که در گرانیتوئیدهای کالک آلکالن مرتبط با قوس آتشفشانی قابل انتظار است (برای مثال [۳۸]) و در نمودار نیز مشاهده می‌شود، عناصر Ba ، Nb ، Ta ، Sr ، P و Ti آنومالی منفی نشان می‌دهند. آنومالی منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و می‌تواند نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرایندهای ماگمایی باشد. آنومالی منفی در Ti و P را می‌توان مربوط به تبلور فازهای فرعی اسفن و آپاتیت دانست. در مورد Sr باید اشاره شود که جانشینی آن با Ca و K در ساختار فلدسپارها، Ba به علت جانشینی با K در بیوتیت‌ها و آلکالی فلدسپار نیز می‌تواند چنین آنومالی‌های منفی را ایجاد کنند [۳۹]. به عقیده کاپل^۱ و وایت^۲ [۴۰] در گرانیت‌های تیپ I، مقدار Th با افزایش SiO_2 زیاد می‌شود. در حالی‌که، در گرانیت نوع S تغییرات

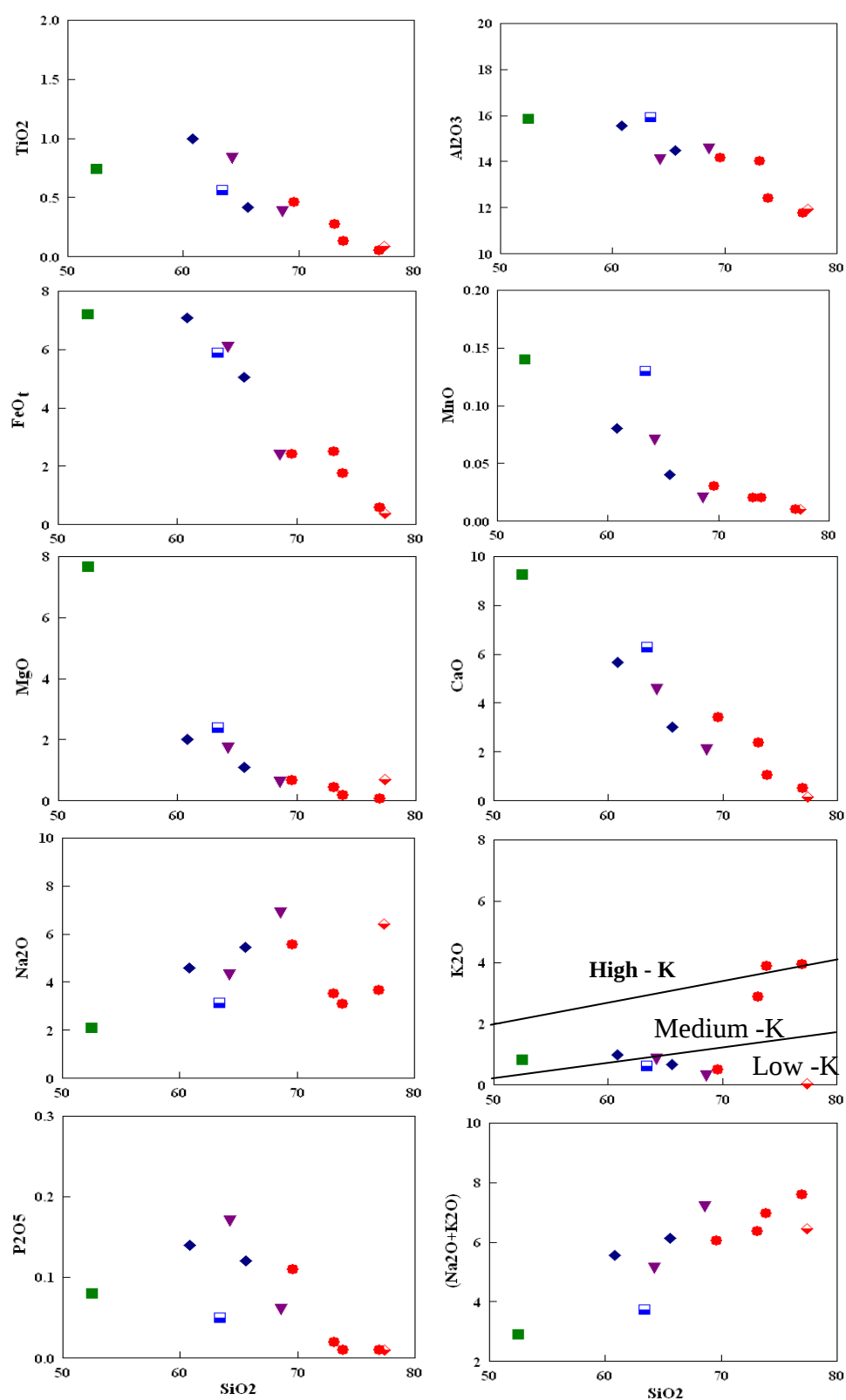
۱. Chappell

۲. White

مهمی بین آن‌ها دیده نمی‌شود. چنان‌که در نمودار شکل ۸ نیز ملاحظه می‌شود، مقادیر Th در سنگ‌های منطقه متناسب با افزایش SiO_2 ، روند افزایشی نشان می‌دهد.



شکل ۶. A) موقعیت نمونه‌های آنالیز شده بر روی نمودارهای [۳۲]، نمودارهای B و D از [۳۳] و C) نمودار [۳۴] همراه با راهنمای علائم استفاده شده در همه نمودارها



شکل ۷. نمودارهای تغییرات اکسید عناصر اصلی در برابر SiO_2 ، نمادها نظیر شکل ۴ هستند

تغییرات وانادیم نیز تا حدودی شبیه تغییرات TiO_2 و تا حدی Fe_2O_3 (شکل ۷) است. عنصر V در سنگ‌های کم‌تر تفریق یافته منطقه دارای حداکثر و در سنگ‌های اسیدی منطقه حداقل مقدار خود را دارد. به‌منظر می‌رسد که این تغییرات از فراوانی مودال کانی مگنتیت در سنگ‌های منطقه تأثیر پذیرفته، زیرا V می‌تواند به‌جای Fe^{3+} در شبکه مگنتیت وارد شود. نسبت Nb/U در نمونه‌های کوارتز دیوریت و تونالیت منطقه به‌ترتیب ۵/۶۸ و ۶/۰۳ و نسبت Ce/Pb به‌ترتیب ۱/۷۶ و ۳/۰۴ است، که به‌طور واضح کمتر از بازالت‌های پشته میان اقیانوسی و یا بازالت‌های جزایر اقیانوسی است (به‌ترتیب ۴۷ و ۲۷ از [۴۱]). این موضوع می‌تواند مؤید وجود مواد پوسته‌ای در ناحیه منبع و یا مشتق شدن ماگمای مولد این سنگ‌ها از مواد پوسته‌ای باشد [۴۲].

چنان‌که در نمودار شکل ۹ نیز ملاحظه می‌شود، عناصر نادر خاکی سنگین^۱ به‌طور کلی الگوهای تفریق نیافته‌ای را نشان می‌دهند (این موضوع می‌تواند مربوط به وجود نداشتن گارنت در منشأ مذاب باشد). همچنین آنومالی منفی عنصر Eu احتمالاً ناشی از تبلور تفریقی پلاژیوکلاز در طی پیشرفت تبلور در ماگما است. در عین حال، در نمونه کوارتز دیوریت و تونالیت عنصر Eu آنومالی منفی نشان نمی‌دهد که می‌تواند مربوط به فراوانی پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها باشد (همچنین می‌تواند مربوط به نبود پلاژیوکلاز در پسمانده حاصل از ذوب در منشأ ماگمای کوارتز دیوریتی باشد). در نمودار شکل ۹، عناصر با شعاع یونی بزرگ^۲ (مانند Rb، Th و K به استثنای K در آپلیت) و عناصر نادر خاکی سبک^۳ (مانند La، Ce، Pr و Nd) نسبت به عناصر با شدت میدان زیاد^۴ (مانند Nb، Ta، Zr، Hf، Ti و Y و عناصر نادر خاکی سنگین مانند Yb) غنی‌شدگی نشان می‌دهند. این غنی‌شدگی از عناصر با شعاع یونی بزرگ و عناصر نادر خاکی سبک را می‌توان مربوط به رسوبات و مایعات مرتبط با محیط‌های فروران‌شان دانست که باعث غنی‌شدگی غیرعادی عناصر کمیاب در این محیط‌ها می‌شوند [۴۳]، [۴۴]، [۴۵]، نسبت $(\text{Nb}/\text{Th} < 3)$ در سنگ‌های کالک آکالین در قوس [۴۶] و غنی‌شدگی Th نسبت به Nb [۴۶]، [۴۷]، [۴۸] می‌تواند تأییدی بر محیط قوس آتشفشانی باشد. برای سنگ‌های منطقه مورد نظر این نسبت از ۰/۳۹ تا ۱/۷۷ است. چنان‌که در نمودارهای (شکل ۱۰) [۳۸] ملاحظه می‌شود نمونه‌ها عمدتاً در محدوده مربوط به قوس‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند.

کوشنی [۴۹] با استفاده از نمودارهای نسبت‌های عناصر سازگار و ناسازگار، سه فرایند ذوب بخشی، تبلور بخشی و اختلاط ماگمایی را از هم متمایز کرد. زیرا عناصر سازگار و ناسازگار در فرایندهای ذوب بخشی و تبلور بخشی رفتار متفاوتی نشان می‌دهند. بدین صورت که چنان‌چه نمونه‌ها بر روی دیاگرام‌های عناصر سازگار در مقابل ناسازگار به‌صورت یک خط صاف و افقی قرار بگیرند نشان‌دهنده ذوب بخشی، اگر خطوط حاصل از نقاط به‌صورت یک خط مستقیم و قائم باشد نشان‌دهنده تبلور بخشی و چنان‌چه نمونه‌ها به‌صورت یک منحنی مقعر قرار بگیرند فرایند مؤثر در تحول ماگما به احتمال قوی اختلاط ماگمایی است. چنان‌که در نمودار شکل ۱۱ (تغییرات Ce/Nb در مقابل Th/Nb) مشاهده می‌شود نمونه‌ها یک روند تقریباً افقی تا کمی شیب‌دار را نشان

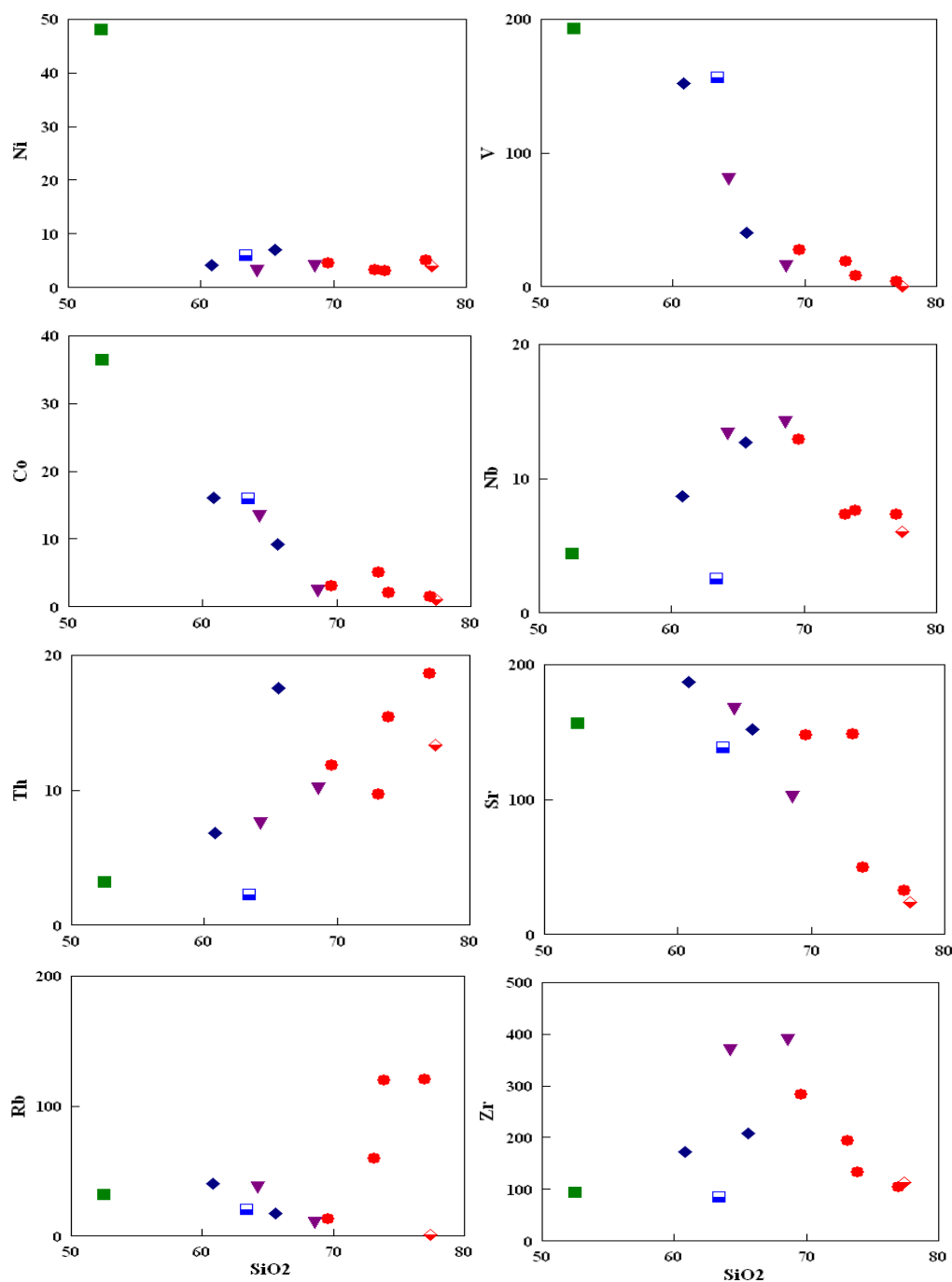
۱. Heavy rare earth elements

۲. large-ion lithophile elements

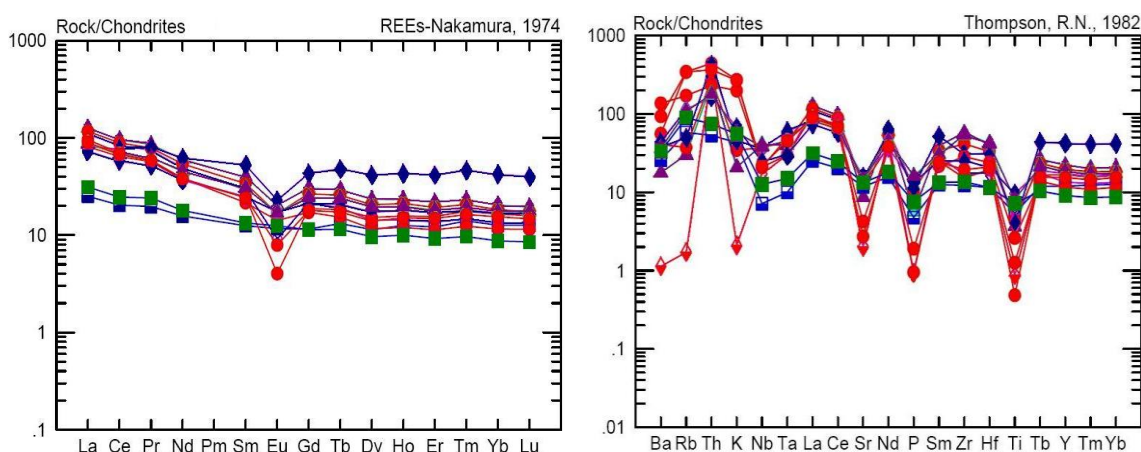
۳. Light rare earth elements

۴. high field strength elements

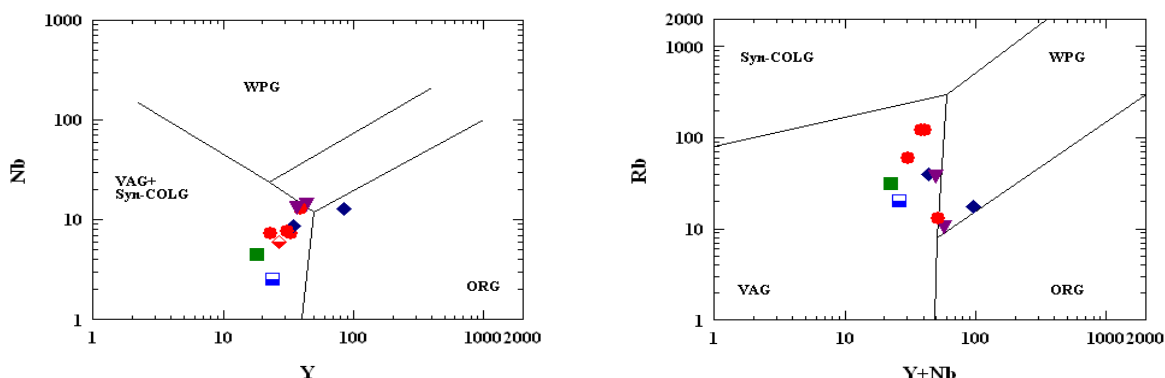
می‌دهند. بنا بر این، ذوب‌بخشی تنها مؤلفه کنترل‌کننده ماهیت توده‌های مورد بحث نیست، بلکه عوامل دیگری مثل اختلاط (مذاب دورگه) و تبلور بخشی نیز مشارکت دارند. در نمودار [۵۰] (شکل ۱۱. B) نیز ملاحظه می‌شود که نمونه‌ها عمدتاً در داخل و یا نزدیک محدوده OGT (گرانیتوئیدهای مناطق کوهزایی، شامل انواع گرانیت‌های I-S و M، که به‌طریق تفریق بلوری ایجاد نشده‌اند) قرار می‌گیرند. محدوده FG مربوط به گرانیت‌های I و S تفریق یافته است.



شکل ۸. نمودارهای تغییرات عناصر کمیاب (بر حسب ppm) در برابر SiO_2 ، نمادها نظیر شکل ۴ هستند



شکل ۹. نمودارهای فراوانی و الگوهای عناصر ناسازگار در سنگ‌های مجموعه نفوذی منطقه نسبت به ترکیب کندریت [۳۶] و عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت [۳۷])، نمادها نظیر شکل ۴ هستند



شکل ۱۰. موقعیت نمونه‌های گرانیتوئیدی منطقه آلت در نمودارهای تشخیص محیط تکتونیکی [۳۸]. نمادها نظیر شکل ۴ هستند

در نمودار La/Yb در مقابل La [۵۱] (شکل ۱۲) ملاحظه می‌شود که نمونه‌ها با روند ذوب بخشی در این نمودار هماهنگی بیش‌تری نشان می‌دهند. در نمودارهای شکل ۹ نیز با مقایسه الگوهای مربوط به سنگ‌های کوارتز دیوریتی و تونالیتی با سنگ‌های گرانودیوریتی و گرانیتی مشخص می‌شود که شباهت زیادی بین آن‌ها دیده نمی‌شود. همین موضوع، مشتق شدن گرانودیوریت‌ها به‌واسطه فرآیند تفریق از مذاب کوارتز دیوریتی را با احتمال کمی مواجه می‌کند (دلیل دیگر برای کاهش احتمال وقوع تفریق می‌تواند روابط حجمی رخ‌نمون‌ها در منطقه باشد. زیرا واحدهای گرانودیوریتی و گرانیتی حجم بیش‌تری نسبت به کوارتز دیوریت‌ها و تونالیت‌ها نشان می‌دهند).

برای تشکیل کوارتز دیوریت‌ها سه منشأ احتمالی را می‌توان در نظر گرفت [۵۱]: الف) ذوب پوسته تحتانی مافیک، ب) ذوب گوشته فوقانی غنی‌شده، ج) ذوب گوشته کم‌تر غنی‌شده یا تهی شده و فرایندهای بعدی آلودگی پوسته‌ای. چنان‌که قبلاً نیز ذکر شد، برخی از خصوصیات سنگ‌های منطقه با ماگماهای حاصل از ذوب گوشته فوقانی که تحت تأثیر سیالات و یا مذاب‌هایی از پوسته اقیانوسی فرورانده (زون فرورائش) بوده است، مطابقت می‌کنند. برای مثال مقادیر Y و Sr/Y در همه نمونه‌های آنالیز شده در منطقه آلت، نشان‌دهنده ماگماهای مشتق

شده از گوشته در نواحی فرورانش هستند [۵۲]. آنومالی منفی Nb نیز از دیگر شواهد مربوط به ماگماهای حاصل از گوشته متاسوماتیزه در نواحی فرورانش است [۵۳]. از سوی دیگر با توجه به عدم مشاهده سنگ‌های مافیک‌تر از کوارتز دیوریت‌ها در منطقه و مقادیر نسبتاً کم Sr، احتمال مشتق شدن مستقیم ماگمای مولد این سنگ‌ها از گوشته، کم است.

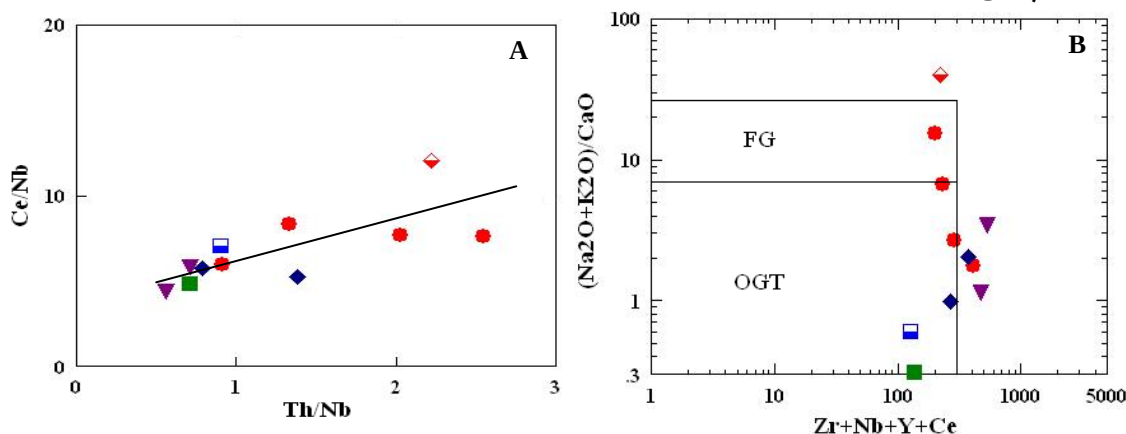
به احتمال زیاد ذوب پوسته تحتانی مافیک تحت تأثیر مذاب‌های گوشته غنی‌شده در محیط فرورانش، در تشکیل ماگمای مولد کوارتز دیوریت‌ها دخیل بوده است. شکل ۱۲. B نیز تأییدی بر این مطلب است. در این نمودار، نمونه‌های کوارتز دیوریت و تونالیت در محدوده مذاب‌های حاصل از آمفیبولیت قرار می‌گیرند. همچنین، برخی از خصوصیات شیمیایی کوارتز دیوریت‌ها با مذاب‌های بخشی مشتق از سنگ‌های متابازالتی مطابقت دارند. از جمله، این سنگ‌ها مقادیر اندک SiO_2 ، مقادیر نسبتاً زیاد Al_2O_3 ، نسبت زیاد $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ و فراوانی نسبتاً زیاد عناصر نادر خاکی سبک و آنومالی بسیار ضعیف Eu نشان می‌دهند. با توجه به مقادیر کم TiO_2 و نسبت‌های کم Rb/Sr و K/Rb در کوارتز دیوریت‌ها، یک پسمانده ذوب حاوی آمفیبول برای آن‌ها مناسب به نظر می‌رسد [۵۴]. آزمایش‌های تجربی [۵۵]، [۵۶]، [۵۷]، [۵۸] نشان داده‌اند که بازالت اولیه بدون آب در پوسته تحتانی می‌تواند حجم‌های چشمگیری از مذاب‌های بخشی مافیک ایجاد کند (به‌ویژه در محیط‌های با جریان حرارتی زیاد). آزمایش‌های مربوط به ذوب‌بخشی ترکیب بازالتی تحت فشارهای پوسته‌ای، نشان می‌دهند که شرایط ذوب (به‌ویژه از لحاظ میزان آب)، تأثیر زیادی بر روی ترکیب مذاب‌بخشی و تقاله حاصل از ذوب دارند. برای مثال ذوب آب‌زدایی آمفیبولیت در دماهای ۹۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰-۶۰ درصد مذاب با ترکیب کوارتز دیوریت تا تونالیت ایجاد می‌کند. در حالی‌که، همین ترکیب اولیه، در شرایط اشباع از آب و حرارت ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، مذاب‌های با ترکیب گرانودیوریت تا گرانیتی ایجاد می‌کند [۵۱]. خصوصیات عناصر اصلی و کمیاب کوارتز دیوریت‌ها نشان می‌دهد که این سنگ‌ها حاصل ذوب‌بخشی سنگ‌های متابازالتی در حرارت‌های زیاد در پوسته تحتانی هستند. حاصل این فرآیند ذوب، مذاب کوارتز دیوریتی همراه با تقاله آمفیبول‌دار است. الگوی تفريق نیافته عناصر نادر خاکی سنگین در دیاگرام شکل ۹ و عدم مشاهده آنومالی مربوط به عنصر Eu، می‌تواند نشان‌دهنده عدم حضور گارنت و پلاژیوکلاز در تقاله حاصل از ذوب باشد. در نمودارهای شکل ۹ میزان عناصر نادر خاکی به‌ویژه نادر خاکی سنگین در یکی از آنکلاوها (HA-3-31En) بیش‌تر از میزبان آن است. این موضوع احتمالاً مربوط به تبادلات شیمیایی با ماگمای میزبان است که موجب تبلور تأخیری فازهای فرعی در آنکلاو می‌شود [۵۹]. علاوه بر فاکتورهای کانی‌شناسی، توزیع انتخابی عناصر نادر خاکی بین مذاب‌های مافیک و فلسیک می‌تواند دلیل دیگری بر این غنی‌شدگی باشد [۶۰].

الگوی تفريق نیافته عناصر نادر خاکی سنگین در دیاگرام شکل ۹ و عدم مشاهده آنومالی مربوط به عنصر Eu، می‌تواند نشان‌دهنده عدم حضور گارنت و پلاژیوکلاز در تقاله حاصل از ذوب باشد. در نمودارهای شکل ۹

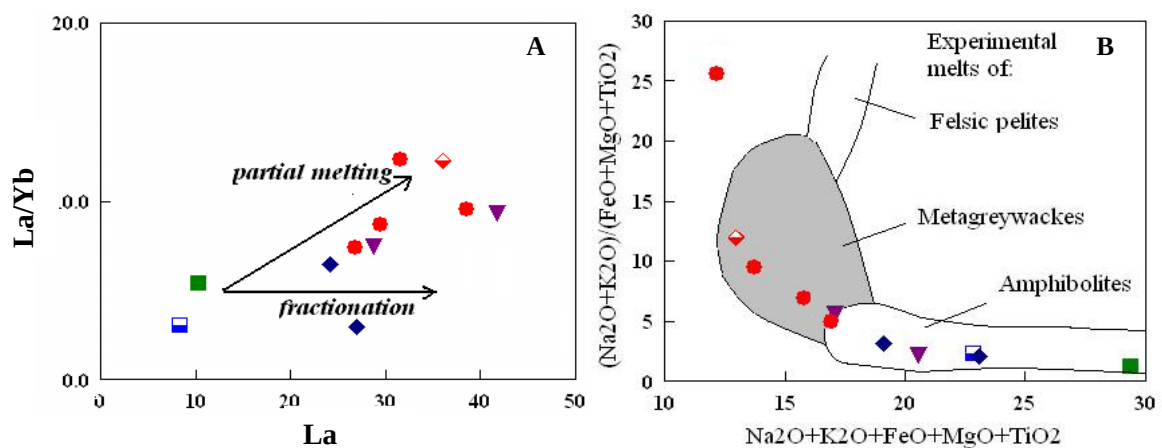
میزان عناصر نادر خاکی، به‌ویژه عناصر نادر خاکی سنگین، در یکی از آنکلاوها (HA-3-31En) بیش‌تر از میزبان آن است. این موضوع احتمالاً مربوط به تبدلات شیمیایی با ماگمای میزبان است که موجب تبلور تأخیری فازهای فرعی در آنکلاو می‌شود [۵۹]. علاوه بر فاکتورهای کانی‌شناسی، توزیع انتخابی عناصر نادر خاکی بین مذاب‌های مافیک و فلسیک می‌تواند دلیل دیگری بر این غنی‌شدگی باشد [۶۰].

در پایان به‌منظور ارزیابی شباهت‌ها و تفاوت‌ها در مقیاس ناحیه‌ای، ترکیب ژئوشیمیایی گرانودیوریت‌ها و مونزوگرانیت‌های آلت و نیز تحولات ماگمای تشکیل‌دهنده آن‌ها با تعدادی از مجموعه‌های گرانیتی I-type در پهنه سنج-سیرجان مقایسه گردید. به‌همین منظور تعدادی از توده‌های گرانیتی که در پهنه سنج-سیرجان قرار داشته و ویژگی‌های سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی مشابه با گرانیت‌های آلت دارند برای مقایسه ناحیه‌ای با منطقه بررسی شده انتخاب شدند. در شکل ۱۳ الگوهای ژئوشیمیایی سنگ‌های گرانودیوریتی الیگودرز [۶۱]، گرانودیوریت دهنو [۶۲]، گرانودیوریت بروجرد [۶۳]، و گرانیت نوع I حسن سالاری [۱۲] با الگوی ژئوشیمیایی توده‌های گرانودیوریتی و مونزوگرانیتی آلت و الگوی گرانیتوئیدها در مناطق حاشیه فعال قاره‌ای [۶۳] مقایسه شدند.

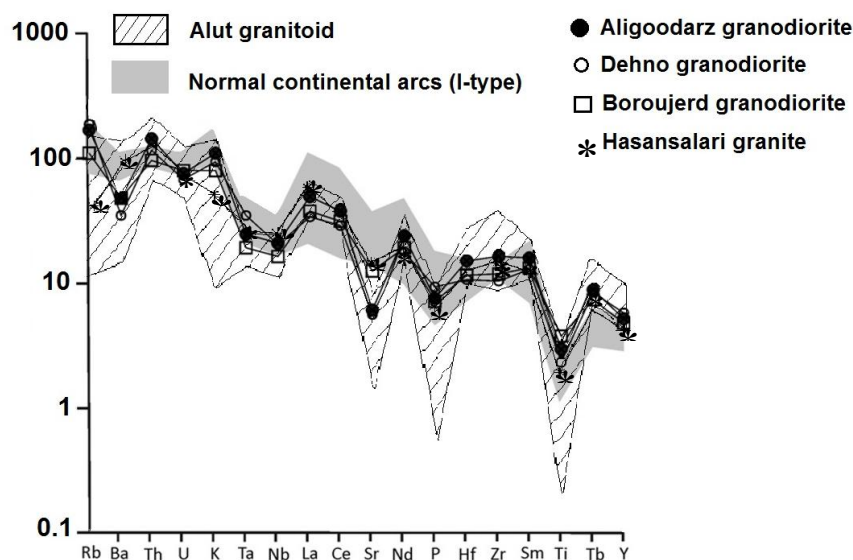
فراوانی عناصر کمیاب در نمودار شکل ۱۳ نسبت به [۶۴] نرمالایز شده‌اند. چنان‌که در این نمودار هم مشاهده می‌شود الگوی ژئوشیمیایی گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌های آلت همخوانی نسبتاً زیادی با الگوی ژئوشیمیایی دیگر گرانیت‌های واقع در پهنه شمالی سنج-سیرجان و همچنین با الگوی ژئوشیمیایی گرانیت‌ها در مناطق حاشیه فعال قاره‌ای دارند. بنا بر این بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، محیط تکتونیکی احتمالی که برای تشکیل این مجموعه نفوذی می‌توان در نظر گرفت محیط قوس آتشفشانی است. فرورانش پوسته اقیانوسی تنیس از زمان ژوراسیک بالایی تا کرتاسه موجب دگرشکلی، دگرگونی و دگرشیمی در زیر پهنه سنج-سیرجان شده است [۶۵]. همچنین با توجه به شواهد مربوط به دگرگونی میزبان [۲۲] و دگرشکلی در توده‌های منطقه (که از نوع ductile و با فاز کومزایی سیمرین پیشین همخوانی دارد) و نیز تشابه‌های ژئوشیمیایی با گرانیتوئیدهای I-type پهنه سنج-سیرجان شمالی، به‌نظر می‌آید قدیمی‌ترین سنی که برای مجموعه آلت می‌توان در نظر گرفت، ژوراسیک پایانی است.



شکل ۱۱. A) نمودار تغییرات Ce/Nb در مقابل Th/Nb [۴۹] و B) نمودار [۵۰]. نمادها نظیر شکل ۴ هستند



شکل ۱۲. A) نمودار تغییرات La/Yb در مقابل La [۵۱] و B) نمودار [۵۷] مربوط به تفکیک مذاب‌های بخشی حاصل از منابع مختلف پوسته‌ای. نمادها نظیر شکل ۴ هستند



شکل ۱۳. نمودارهای فراوانی و الگوهای عناصر ناسازگار مربوط به تعدادی از مجموعه‌های نفوذی در زون سنج سیرجان و مقایسه آن با کمان قاره‌ایی [۶۳]، مقادیر نرمالیزاسیون از [۶۴]. نمادها نظیر شکل ۴ هستند

نتیجه‌گیری

پژوهش‌های صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که مجموعه نفوذی آلوت دارای تنوع سنگ‌شناسی مونزوگرانیته، گرانودیوریتی و کوارتزیدیوریتی تا تونالیتی است. ترکیب کانی‌شناسی اصلی این توده‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، آکالی فلدسپار، آمفیبول و بیوتیت به‌نسبت‌های مختلف هستند. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، زیرکن، اسفن و کانی‌های اپک است و کلریت، سربیسیت، کلسیت، اپیدوت و کانی‌های رسی از جمله کانی‌های ثانویه مشاهده شده در این سنگ‌ها هستند. سنگ‌های این مجموعه گرانیتوئیدی مشخصات ماگمایی کالک آلکان تا تحولی، کلسیک منیزیم‌دار، متآلومین و از تیپ I هستند. شواهد بافتی و کانی‌شناسی حاکی از دگرشکلی این توده در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند. به‌طور کلی دگرشکلی این توده‌ها عمدتاً از نوع

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی سنگ‌های بررسی شده در منطقه (اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب PPM هستند): mg: مونزوگرانیت، gd: گرانودیوریت، Q-di: کوارتزیدیوریت، To: تونالیت، En: آنکلو، Ap: آپلیت

Sample	87 Q.di	31 En	65 En	22 gd	65 gd	mg 45	mg 57	31H mg	mg 79	Ap 2	33 To
SiO ₂	۵۲/۵	۶۵/۶	۶۰/۸	۶۸/۶	۶۴/۲	۷۷	۶۹/۶	۷۳/۱	۷۳/۹	۷۷/۴	۶۳/۴
TiO ₂	۰/۷۴	۰/۴۲	۱	۰/۳۸	۰/۸۳	۰/۰۵	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۱۳	۹/۰۹	۰/۵۶
Al ₂ O ₃	۱۵/۸۵	۱۴/۵	۱۵/۵۵	۱۴/۵۵	۱۴/۱	۱۱/۷۵	۱۴/۱۵	۱۴	۱۲/۴	۱۱/۹۵	۱۵/۹
Fe ₂ O ₃	۸/۰۲	۵/۶۴	۷/۹۱	۲/۶۷	۶/۸	۰/۶۴	۲/۶۸	۲/۷۸	۱/۹۴	۴۲/۰	۶/۵۷
MnO	۰/۱۴	۰/۴۰	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۳
MgO	۷/۶۴	۱/۰۸	۲/۰۲	۰/۶	۱/۷۲	۰/۰۷	۰/۶۷	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۶۹	۲/۳۷
CaO	۹/۲۳	۳/۰۱	۵/۶۵	۲/۰۹	۴/۵۵	۰/۵	۳/۴۲	۲/۳۸	۱/۰۳	۰/۱۶	۶/۲۶
Na ₂ O	۲/۰۹	۵/۴۶	۴/۵۸	۶/۸۸	۴/۳	۳/۶۶	۵/۵۵	۳/۵	۳/۰۷	۶/۴۲	۳/۱۱
K ₂ O	۰/۸	۰/۶۶	۰/۹۸	۰/۳	۰/۸۴	۳/۹۴	۰/۵	۲/۸۷	۳/۸۸	۰/۰۳	۰/۶۲
P ₂ O ₅	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۲
Total	۹۷/۰۳	۹۶/۴۳	۹۸/۵۹	۹۶/۱	۹۷/۴۳	۹۷/۶۳	۹۷/۰۸	۹۹/۳۸	۵۶/۹۶	۹۷/۱۸	۹۸/۹۴
Ni	۴۸	۷/۰	۴/۰	۴/۰	۳/۵	۵	۴	۴	۴	۳	۶
Cr	۴۹۰	۲۳۰	۲۱۰	۱۳۰	۱۲۰	۳۳۰	۱۶۰	۲۲۰	۱۷۰	۱۹۰	۱۷۰
Co	۳۶/۴	۹/۲	۱۶/۱	۲/۳	۱۳/۳	۱۴	۳/۱	۵	۲/۱	۱/۱	۱۵/۹
V	۱۹۳	۴۰	۱۵۲	۱۵	۸۰	۴	۲۷	۱۹	۸	۴	۱۵۶
Cs	۰/۹	۰/۱۹	۰/۴۳	۰/۱۹	۰/۴۸	۰/۴	۰/۰۹	۴۰	۰/۹۲	۰/۰۲	۰/۶۵
Rb	۳۱/۳	۱۷/۴	۴۰	۱۰/۵	۳۷/۷	۱۲۰/۵	۱۳	۵۹/۹	۱۲۰	۰/۶	۲۰/۳
Sr	۱۵۶	۱۵۲	۱۸۷	۱۰۲	۱۶۷	۳۲/۱	۱۴۸	۱۴۸/۵	۴۹/۸	۲۳/۶	۱۳۸/۵
Ba	۲۲۹	۲۵۱	۳۰۵	۱۲۳	۲۵۰	۳۸۶	۲۸۲	۹۴۴	۶۴۳	۷/۸	۱۷۸/۵
Th	۳/۱۳	۱۷/۵۵	۶/۸۴	۱۰/۱	۷/۵	۱۸/۶	۱۱/۸	۹/۷۱	۱۵/۴	۱۳/۳	۲/۲۴
U	۰/۷۳	۴/۷۵	۱/۳۵	۱/۷۵	۱/۵	۳/۰۸	۲/۴۴	۱/۷۸	۲/۹۴	۱/۴۳	۰/۴۴
Ta	۰/۳	۱/۲	۰/۶	۰/۸	۰/۹	۱	۰/۹	۰/۶	۰/۹	۰/۶	۰/۲
Nb	۴/۴	۱۲/۷	۸/۷	۱۴/۲	۱۳/۳	۷/۳	۱۲/۹	۷/۳	۷/۶	۶	۲/۵
Pb	۰/۷	۱۰	۷/۰	۷/۰	۸/۰	۱۲	۶	۸	۱۹	۴	۱۰
La	۱۰/۳	۲۷	۲۴/۱	۴۱/۸	۲۸/۸	۲۶/۸	۳۸/۵	۳۱/۵	۲۹/۵	۳۶	۸/۳
Ce	۲۱/۳	۶۶/۳	۴۹/۷	۸۲/۷	۵۸/۳	۵۵/۶	۷۷	۶۰/۸	۵۸/۶	۷۲/۴	۱۷/۶
Pr	۲/۷	۹/۰۳	۵/۸۳	۹/۶	۷/۰۳	۶/۳۸	۸/۸۲	۶/۵۶	۶/۵۵	۸/۳۶	۲/۲
Nd	۱۱/۳	۳۹/۲	۲۳/۱	۳۷/۸	۲۸/۴	۲۳/۴	۳۴	۲۴/۲	۲۴/۱	۳۰/۹	۹/۹
Sm	۲/۷۱	۱۰/۶۵	۵/۰۱	۸/۰	۶/۱۷	۵/۰۵	۶/۸۸	۴/۳۸	۴/۹۲	۵/۹۳	۲/۵۴
Eu	۰/۹۶	۱/۷۶	۱/۳۴	۱/۵۷	۱/۳۱	۰/۳۱	۱/۲۹	۱/۰۹	۰/۶۱	۰/۷۱	۰/۹
Gd	۳/۱۴	۱۱/۹	۵/۷۹	۸/۳۷	۶/۷۳	۵/۱۸	۷/۳۵	۴/۷۳	۴/۹۵	۵/۹	۳/۱۹
Tb	۰/۵۴	۲/۲۶	۰/۹۸	۱/۳۸	۱/۱۲	۰/۸۶	۱/۲۱	۰/۷۲	۰/۸۱	۰/۹	۰/۶۲
Dy	۳/۳۱	۱۴/۲۵	۵/۹۲	۸/۰۱	۶/۷۱	۵/۲۲	۷/۰۳	۴	۴/۷۹	۴/۸۷	۳/۹۱
Ho	۰/۷	۳/۰۳	۱/۲۵	۱/۶۳	۱/۳۸	۱/۱	۱/۴۸	۰/۸۴	۱/۰۵	۱/۰۱	۰/۸۸
Er	۲/۰۸	۹/۳۲	۳/۸۳	۴/۹۲	۴/۰۷	۳/۵	۴/۳۳	۲/۵۵	۳/۳۵	۳/۰۷	۲/۷۳
Tm	۰/۲۹	۱/۳۹	۰/۵۴	۰/۶۹	۰/۵۸	۰/۵۳	۰/۶۲	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۲
Yb	۱/۹۲	۹/۲۲	۳/۷۴	۴/۴۸	۳/۸۶	۳/۶۳	۴/۰۳	۲/۵۵	۳/۴	۲/۹۴	۲/۷۸
Lu	۰/۲۹	۱/۳۶	۰/۵۶	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۳۹	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۳
Y	۹۳	۲۰۸	۱۷۲	۳۸۸	۳۶۹	۱۰۴	۲۸۴	۱۹۴	۱۳۳	۱۱۴	۸۴
Hf	۲/۳	۶/۳	۴/۲	۸/۴	۸/۳	۳/۹	۶/۶	۴/۸	۴/۲	۳/۶	۲/۳
Zr	۹۳	۲۰۸	۱۷۲	۳۸۸	۳۶۹	۱۰۴	۲۸۴	۱۹۴	۱۳۳	۱۱۴	۸۴
Zn	۶۹	۳۰	۴۷	۱۴	۴۳	۴	۱۴	۱۳	۳۰	۴	۶۶
Ga	۱۶/۹	۲۲/۶	۲۰/۳	۲۳/۱	۱۹/۶	۱۶/۳	۱۹/۳	۱۸/۹	۱۶/۷	۱۵/۷	۱۶/۶
Sn	۱/۰	۶/۰	۴/۰	۴/۰	۴/۰	۳	۴	۲	۲	۲	۱
W	۳/۰	۱۶	۱۳	۹/۰	۷/۰	۲۰	۱۰	۱۴	۱۰	۱۳	۱۱

ductile است و به احتمال زیاد مربوط به فاز کومزایی سیمین پسین (ژوراسیک پایانی) است. نمودارهای تعیین خاستگاه تکتونیکی، محیط قوس آتشفشانی را برای مجموعه نفوذی آلوت نشان می‌دهند. رفتار عناصر کمیاب نمونه‌های گرانیت آلوت با گرانیت‌های مربوط به الیگودرز، دهنو، بروجرد و حسن سالاری و همچنین الگوی گرانیتوئیدها در مناطق حاشیه فعال قاره‌ای مشابه است.

بنا بر آنچه گفته شد، بر اساس شواهد موجود می‌توان گفت که توده‌های نفوذی بررسی شده به‌واسطه ذوب‌بخشی منابع پوسته‌ای با ترکیب‌های متفاوت (در یک چنین حاشیه فعال و دگرشکل شده قاره‌ای) تشکیل شده‌اند. در چنین محیطی مهم‌ترین عامل در تشکیل ماگماهای مولد این گرانیتوئیدها به احتمال زیاد ذوب پوسته تحتانی مافیک، تحت تأثیر مذاب‌های گوشته‌ای (به‌عنوان عامل مهمی برای تأمین مواد و گرما) بوده است. با توجه به تشابه الگوی عناصر کمیاب منطقه بررسی شده با تعدادی از گرانیتوئیدهای I-type در زون سندانج-سیرجان می‌توان خاستگاه تکتونوماگمایی قوس آتشفشانی و سن جای‌گزینی در حدود ژوراسیک پایانی را برای مجموعه گرانیتوئید آلوت در نظر گرفت.

تشکر و قدردانی

از معاونت امور مالی و اداری دانشگاه تربیت مدرس برای فراهم آوردن تسهیلات لازم برای انجام پروژه صحرایی این پژوهش، سپاس‌گزاریم.

منابع

1. A. Ghasemi, C. J. Talbot, "A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences*, 26 (2006) 683-693.
2. H. Azizi, A. Jahangiri, "Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone", *Iran, Journal of Geodynamics*, 45 (2008) 178-190.
3. Berberian, I. D. Muir, R. J. Pankhurst, M. Berberian, "Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran", *Journal of the Geological Society of London*, 139 (1982) 605-615.
4. D. Esmaeily, A. Nédélec, M. V. Valizadeh, F. Moore, J. Cotton, "Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization", *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 (2005) 961-980.
5. A. A. Sepahi, S. F. Athari, "Petrology of major granitic plutons of the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Zagros Orogen Iran: with emphasis on A-type granitoids from the SE Saqqez area", *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 183 (2006) 93-106.
6. M. Arvin, Y. Pan, S. Dargahi, A. Malekizadeh, A. Babaei, "Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock southwest of Kerman Iran: implications for initiation of Neotethys Subduction", *Journal of Asian Earth Sciences*, 30 (2007) 474-489.

7. A. Ahmadi Khalaji, D. Esmaeily, M. V. Valizadeh, H. Rahimpour-Bonab, "Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, 29 (2007) 859-877.
8. A. Torkian, M. Khalili, A. A. Sepahi, "Petrology and geochemistry of the I-type calc-alkaline Qorveh Granitoid Complex Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran", *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 185 (2) (2008) 131-142.
9. J. Ghalamghash, A. Nedelec, H. Bellon, M. Vousoughi Abedini, J. L. Bouchez, "The Urumieh plutonic complex (NWIran): a record of the geodynamic evolution of the Sanandaj-Sirjan zone during Cretaceous times", Part I. Petrogenesis and K/Ar dating, *Journal of Asian Earth Sciences*, 35 (2009) 401-415.
10. S. A. Mazhari, S. Amini, J. Ghalamghash, F. Bea, "Petrogenesis of granitic unit of Naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, 4 (2009) 59-67.
11. A. A. Sepahi, S. R. Jafari, S. Mani-Kashani, "Low pressure migmatites from the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt in the Hamedan region (Iran)", *Geologica Carpathica*, 60 (2009) 107-119.
12. H. Shahbazi, W. Siebel, M. Pourmoafee, M. Ghorbani, A. A. Sepahi, C. K. Shang, M. Vousoughi Abedini, Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj-Sirjan Zone (Iran): new evidence for Jurassic magmatism, *Journal of Asian Earth Sciences*, 6 (2010) 668-683.
13. M. Mansouri Esfahani, M. Khalili, N. Kochhar, L. N. Gupta, "A-type granite of the Hasan Robat area (NW of Isfahan, Iran) and its tectonic significance", *Journal of Asian Earth Sciences*, 37 (2010) 207-218.
14. Sh. Mahmoudi, F. Corfu, F. Masoudi, B. Mehrabi, M. Mohajjel, U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj- Sirjan Zone, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, 41 (2011) 238-249.
۱۵. ح. شهبازی، جایگاه تکتونیکی سنگ‌های آنرین نفوذی و خروجی تیپ دوران و قره داش منطقه زنجان مهاباد (غرب ایران)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۷۸).
16. N. Rachidnejad-Omran, M. H. Emami, M. Sabzehi, E. Rastad, H. Belon, A. Pique, "Lithostratigraphie et histoire paleozoique a Paleocene des complexes metamorphiques de la region de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran meridional)", *Comptes Rendus Geosciences*. 334 (2002) 1185-1191.

17. J. Eftekhari-Nezhad, "The Mahabad Quadrangle map (scale 1:250,000)", Geological Survey of Iran. Tehran, Iran (1973).
۱۸. ج. عمرانی، ع. خبازنیا، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ آلت، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۲).
19. J. Hassanzadeh, D. F. Stockli, B. K. Horton, G. J. Axen, L. D. Stockli, M. Grove, A. K. Schmitt, J. D. Walker, "U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement", Tectonophysics, 451 (2008) 71-96.
۲۰. م. محجل، ر. سهندی، تکامل تکتونیکی پهنه سندانج- سیرجان در نیمه شمال باختری و معرفی زیر پهنه‌های جدید در آن، فصلنامه علوم زمین شماره ۳۱-۳۲، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۸).
۲۱. م. محجل، ساختار در پهنه‌های برشی طلادار منطقه آلت (کردستان)، بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (بهمن ۱۳۸۳).
22. J. Eftekhari-Nezhad, "Explatory Report for Mahabad Quadrangle Map, 1:250,000", English version of the thesis submitted to the Universite de Paris sad (Centre drasy), Geological Survey of Iran, No. B4 (1980).
23. A. Streckeisen, "To each plutonic rocks its proper name", Earth Science Review. Vol (1976) 12: 1-33.
24. S. Baxter, M. Feely, "Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite", Connemara, Irland., Mineralogy and Petrology, 76 (2002) 63-74.
25. R. H. Vernon, "A practical Guide to Rock Microstructure, Cambridge University Press", Cambridge (2004).
26. Tullis, J., "Deformation of feldspars. In Ribbe, P.H (ed): Feldspar Mineralogy (second edition)", Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 2 (1983) 297-323.
27. R. Vernon, "Review of microstructural evidence of magmatic and solid state flow", Geoscience Electronics, 5, 2 (2000).
28. J. L. Bouchez, C. Deals, G. Gleizes, A. Nédélec, M. Cuney, "Submagmatic microfractures in granites", Geology, 20 (1992) 35-38.
29. M. G. López de Luchi, A. E. Rapalini, E. Rosello, S. Geuna, "Rock and magnetic fabric of the Renca Batholith (Sierra de San Luis, Argentina): constraints on emplacement", Lithos, 61 (2002) 161-186.

30. P. Pandey, R. S. Rawat, T. N. Jowhar, "Structural state transformation in alkali feldspar: evidence for post-crystallization deformation from Proterozoic granite", Kumaun Himalaya (India), *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 (2005) 611-620.
- 31 C. W. Passchier, R. A. J. Trouw, "Microtectonics, second edition", Springer-Verlag, Berlin, (2005).
32. E. A. K. Middlemost, "Magmas and magmatic rocks, an introduction to igneous petrology", Longman Groupuk, UK (1985).
33. T. N. Irvine, W. R. A. Baragar, "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 (1971) 523-548.
34. P. D. Maniar, P. M. Picooli, "Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin", 101 (1989) 635-643.
35. P. C. Rickwood, "Boundary lines within petrologic diagrams, which use oxides of major and minor elements", *Lithos*, 22 (1989) 247-263.
36. A. B. Thompson, "Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province", *Scottish Journal of Geology*, 18 (1982) 49-107.
37. N. Nakamura, "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica acta*", 38 (1974) 757-775.
38. J. A. Pearce, N. B. W. Harris, A. G. Tindle, "Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks", *Journal of Petrology*, 25 (1984) 956-983.
39. B. M. Wilson, "Igneous Petrogenesis, A Global Tectonic Approach. Unwin Hyman", London (1989).
40. B. W. Chappell, A. J. R. White, "I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*", *Earth sciences*, 83 (1992) 1-26.
41. A. Hofmann, K. Jochum, M. Seufert, M. White, "Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution", *Earth and Planetary Science Letters*, 33 (1986) 33-45.
42. J. H. Yang, S. L. Chung, S. A. Wilde, F. Wu, M.F. Chu, C.H. Lo, H.R. Fan, "Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence", *Chemical Geology*, 214 (2005) 99-125.
43. P. A. Floyd, J. A. Winchester, "Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements", *Earth and Planetary Science Letters*, 27 (1975) 211-218.

44. G. Rogers, C. Hawkesworth, "A geochemical traverse across the north Chilean Andes evidence for crust generation from the mantle wedge", *Earth and Planetary Science Letters*, 91 (1989) 271-285.
45. F. G. Sojana, R. C. Maury, H. Belon, J. Cotton, M. Defant, "High field strength elements of Pliocene-Pliostocene island arc basalts Zamboanga Peninsula", *Western Mindanao (Philippines)*, *Journal of Petrology*, 37 (1996) 693-726.
46. J. B. Whalen, V. J. McNicoll, C. R. van Staal., C. J. Lissenberg, F. J. Longstaffe, G. A. Jenner, O. van Breeman, "Spatial, temporal and geochemical characteristics of Silurian collision-zone magmatism, Newfoundland Appalachians: An example of a rapidly evolving magmatic system related to slab break-off", *Lithos*, 89 (2006) 377-404.
47. J. B. Whalen, G. A. Jenner, F. J. Longstaffe, C. Garipey, B. Fryer, "Implications of granitoid geochemical and isotopic (Nd,O,Pb) data from the Cambro-Ordovician Notre Dame arc for the evolution of the Central Mobile Belt, Newfoundland Appalachians. In: Sinha, A. K., Whalen, J. B., Hogan, J. P. (Eds.), *The Nature of Magmatism in the Appalachian Orogen*", *Geological Society of America Memoirs*, 191 (1997) 367-395.
48. H. S. Swinden, G. A. Jenner, Z. A. Szybinski, "Magmatic and tectonic evolution of the Cambrian-Ordovician Laurentian margin of Iapetus: geochemical and isotopic constraints from the Notre Dame Subzone, Newfoundland. In: Sinha, A. K., Whalen, J. B., Hogan, J. P. (Eds.), *The Nature of Magmatism in the Appalachian Orogen*", *Geological Society of America Memoirs* (1997) 191-365.
49. A. Cocherie, "Systematic use of trace element distribution patterns in log-log diagrams for plutonic suites", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50 (1986) 2517-2522.
50. J. B. Whalen, K. L. Currie, B. W. Chappell, "A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis", *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 96 (1987) 407-419.
51. S. Jung, P. Masberg, D. Mihm, S. Hoernes, "Partial melting of diverse crustal sources Constraints from Sr-Nd-O isotope compositions of quartz diorite-granodiorite-leucogranite associations (Kaoko Belt, Namibia)", *Lithos*, 111 (2009) 236-251.
52. H. Martin, "The mechanism of petrogenesis of the Archean continental crustcomparison with modern processes", *Lithos*, (1993) 30, 373-388.
53. M. Wilson, "Igneous Petrogenesis", Springer Verlag (2007).

54. N. Petford, M. Atherton, "Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholiths", Peru. *Journal of Petrology*, 37 (1996) 1491-1521.
55. T. Rushmer, "Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid absent conditions", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107 (1991) 41-59.
56. J. S. Beard, G. E. Lofgren, "Dehydration melting and watersaturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kbar", *Journal of Petrology*, 32 (1991) 365-402.
57. M. B. Wolf, J. P. Wyllie, "Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115 (1994) 369-383.
58. R. P. Rapp, E. B. Watson, C. F. Miller, "Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities", *Precambrian Research*, 51 (1991) 1-25.
59. S. Y. Sahin, "Geochemistry of mafic microgranular enclaves in the Tamdere Quartz Monzonite, south of Dereli/Giresun", Eastern Pontides, Turkey, *Chemie der Erde geochemistry*, 68 (2008) 81-92.
60. A. J. Stimac, H. A. Clark, Y. Chen, S. Garcia, "Enclaves and their bearing on the origin of the Cornubian batholith, southwest England", *Mineralogical Magazine*, 59 (1995) 273-296.
61. A. Esna-Ashari, M. Tiepolo, M. V. Valizadeh, J. Hassanzadeh, A. Sepahi, "Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, 43 (2012) 11-22.
62. M. Rajaie, M. Khalili, I. Richards, "The significance of mafic microgranular enclaves in the petrogenesis of the Dehno Complex, Sanandaj-Sirjan belt, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (2010) 24-36.
63. G. C., Brown, R. S., Thorpe, P. C., Webb, "The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources", *Journal of the Geological Society of London*, 141(1984) 413-426.
64. D. A., Wood, J. L., Joron, M., Treuil, M., Norry, J., Tarney, "Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70 (1979) 319-339.
65. M. Mohajjel, C. L. Fergusson, M. R. Sahandi, "Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran", *OriginalResearchArticle Journal of Asian Earth Sciences*, 21 (2003) 397-412.