فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۲۰، شماره ۷۷، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۶۱-۸۱

ماگماتیسم بازالتی آلکالن کواترنری در گستره سرایجوق (کمربند سنندج-سیرجان): شواهدی از ذوب بخشی درجه پایین گوشته لیتوسفری و تکامل چندمرحله‌ای ماگما بر پایه ژئوشیمی سنگ‌کل و کلینوپیروکسن

فاطمه نریمانی[۱]، محمد علی مکی‌زاده[۱و*] و مرتضی شریفی[۱]

۱. دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

چکیده

سنگ‌های آتشفشانی گستره سرایجوق در کمربند سنندج-سیرجان با هدف تعیین ویژگی‌های ژئوشیمیایی، شرایط تبلور و سرچشمه ماگما بررسی شدند. این سنگ‌ها از نظر ترکیب در محدوده بازالت آلکالن تا تراکی‌بازالت قرار می‌گیرند و مقادیر پایین LOI (۱/۰۸ تا ۱/۵۰ درصد وزنی) نشان می‌دهد که دگرسانی، تأثیر ناچیزی بر ترکیب شیمیایی آن‌ها داشته است. الگوهای عناصر نادر خاکی، غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و La/Yb را بین ۱۷ تا ۴۲ نشان می‌دهند. نبود ناهنجاری منفی قابل‌توجه Eu بیانگر آن است که تفریق پلاژیوکلاز در تکامل این ماگماها نقش کلانی نداشته است. همچنین، وجود افت نسبی تا ناهنجاری منفی ضعیف Nb-Ta در الگوهای چندعنصری، همراه با غنی‌شدگی LILE و LREE و مقادیر پایین Y و Yb، نشان‌دهنده نقش یک منبع گوشته‌ای لیتوسفری متاسوماتیسم‌شده است. کلینوپیروکسن‌ها دارای ترکیب دیوپسید تا اوژیت و غنی از Mg هستند و داده‌های ترموبارومتری آن‌ها دمای تبلور ۱۰۲۰ تا ۱۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴ تا ۱۰ کیلوبار را نشان می‌دهد. این داده‌ها بیانگر تبلور ماگما در یک سامانه ماگمایی چندمرحله‌ای در پوسته میانی تا پایینی است. در مجموع، بازالت‌های آلکالن سرایجوق حاصل ذوب‌بخشی درجه پایین گوشته لیتوسفری متاسوماتیسم‌شده است و در مسیر صعود، تنها دستخوش تفریق محدود و ذخیره‌سازی موقت در سطوح مختلف پوسته شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بازالت آلکالن، ترموبارومتری کلینوپیروکسن، پسابرخوردی، گوشته لیتوسفری متاسوماتیسم‌شده، سرایجوق

* نویسنده مرتبط: Mackizade44@gmail.com

مقدمه

ماگماتیسم آلکالن در پهنه‌های پسابرخوردی[1]، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای درک تکامل ژئودینامیکی لیتوسفر قاره‌ای شناخته می‌شود و بازتاب‌دهنده تأثیر هم‌زمان غنی‌شدگی گوشته‌ای، نازک‌شدگی لیتوسفر و بازفعال‌سازی ساختارهای تکتونیکی در شرایط پسابرخوردی است (Wilson and Lustrino, 2021). برخلاف فرآیندهای فرورانشی، ماگماتیسم آلکالنِ پسابرخوردی اغلب با گذار از شرایط فشاری به کششی و بازفعال‌سازی ساختارهای برشیِ عمیق همراه است که مسیری ترجیحی برای صعود مذاب‌های ناشی از ذوب‌بخشیِ درجه پایین فراهم می‌آورد (Xia et al., 2023). کمربند سنندج-سیرجان (SSZ) به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ هیمالیا، پس از بسته شدن نئوتتیس و برخورد قاره‌ای، دستخوش بازآرایی‌های تکتونیکیِ گسترده‌ای شده است (Agard et al., 2020). در بخش شمال و شمال‌شرق قروه، شامل محور قروه-بیجار -تکاب، پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که فعالیت‌های آتشفشانی این گستره با گسل‌های فعال منطقه‌ای و نازک‌شدگی لیتوسفر ارتباط دارد (صالحی و ترکیان، ۱۳۹۳؛ باجلان و شریفی، ۱۳۹۳؛ ترکیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ خیرخواه، ۱۳۹۴؛ نریمانی و همکاران، ۱۴۰۴).

پژوهش‌های اخیر در پهنه قروه-بیجار نشان می‌دهند که ماگماتیسم این پهنه احتمالاً از ذوب‌بخشی گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده در نتیجه رویدادهای فرورانشی مزوزوئیک ناشی شده و در شرایط پسابرخوردیِ همراه با کشش لیتوسفری به سطح رسیده است (Akbari et al., 2022؛ Verma and Molaei-Yeganeh, 2022؛ Salehi et al., 2023).

با این وجود، بحث بر سر نقش دقیقِ سهم آستنوسفر در مقابل لیتوسفر و تأثیر ساختارهایِ برشی در هدایتِ ماگماهای آلکالن به سطوح فوقانی در گستره سرایجوق، هم‌چنان به عنوان یکی از چالش‌های اصلی پترولوژیِ نوین این کمربند مطرح است.

اگرچه پژوهش‌های پیشین با تکیه بر ژئوشیمی سنگ‌کل، ماهیت غنی‌شدگیِ عناصر ناسازگار و خاستگاه گوشته‌ای این بازالت‌ها را پیشنهاد کرده‌اند، اما به دلیل ماهیتِ تلفیقی و معیار داده‌های سنگ‌کل، توانایی تفکیکِ فرایندهای تبلور تفریقی از تغییراتِ فیزیکوشیمیاییِ حین صعود ماگما را ندارند (Ubide et al., 2020). در همین راستا، رویکردهای نوین پترولوژیکی، بر استفاده از شیمیِ کانی‌های شاخص به عنوان ثبت‌کننده‌های دقیقِ تاریخچه‌ی پیش‌ازفوران تمرکز دارند. در این میان، کلینوپیروکسن به دلیل حساسیتِ بالا نسبت به تغییراتِ فشار، دما و فوگاسیته اکسیژن، به عنوان یک پتروسنجِ دقیق عمل می‌کند و امکان بازسازیِ شرایط خاستگاه و تکاملِ چندمرحله‌ای ماگما را فراهم می‌سازد (Mollo et al., 2021). با استفاده از ترموبارومتری مبتنی بر کلینوپیروکسن، می‌توان ابهام‌هایی مانند عمق تبلور، جایگاه مخازن ماگمایی و شرایط فیزیکوشیمیایی حین صعود ماگما را با دقت بیشتری بررسی کرد.

گستره سرایجوق در نیمه شمالی کمربند سنندج-سیرجان، به دلیل قرارگیری در مجاورت گسل‌های فعال منطقه‌ای و دارا بودن توالی‌های بازالتی آلکالن کواترنری، یک آزمایشگاه طبیعی مناسب برای بررسی ارتباط میان فرآیندهای گوشته‌ای، نازک‌شدگی لیتوسفر و کنترل‌های ساختاری بر صعود و تکامل ماگما فراهم می‌آورد. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه تفسیری جامع از سرچشمه و تکامل ماگمایی این گستره با تلفیق داده‌های صحرایی، پتروگرافی، ژئوشیمی سنگ‌کل و تحلیل‌های میکروپروب کلینوپیروکسن است. با استفاده از روش‌های ترموبارومتری، این پژوهش در پیِ پاسخ به این پرسش کلیدی است که چگونه وضعیت ساختاری لیتوسفر در گستره سرایجوق، مسیر صعود و فرآیندهای تفریقِ ماگمایی را کنترل می‌کند و آیا این بازالت‌ها محصولِ مستقیمِ ذوبِ لیتوسفرِ متاسوماتیسم‌شده هستند یا شواهدی از اختلاطِ ماگمایی را در طول صعود ثبت کرده‌اند؟ این پژوهش می‌تواند به تکمیل مدل‌های تکتونوماگمایی مرتبط با ماگماتیسم پسابرخوردی در نیمه شمالی کمربند سنندج-سیرجان کمک کند.

1. post-collisional

زمین‌شناسی گستره

گستره سرایجوق در نیمه شمالی کمربند سنندج-سیرجان (در حدود طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی)، به دلیل قرارگیری در مجاورت گسل‌های فعال منطقه‌ای و دارا بودن توالی‌های بازالتی آلکالن کواترنری، آزمایشگاهی طبیعی برای ارزیابی پیوند میان فرآیندهای گوشته‌ای، نازک‌شدگی لیتوسفر و کنترل‌های ساختاری بر صعود و تکامل ماگما فراهم می‌آورد (Berberian and King، 1981؛ Ghasemi and Talbot، 2006؛ Ghasemi et al.، 2024).

این گستره در بخش شمال‌شرق قروه، دارای تاریخچه پیچیده‌ای از رخدادهای دگرگونی، ماگماتیسم گسترده و دگریختی‌های چندمرحله‌ای از دوران مزوزوئیک تا کواترنری است. از دیدگاه چینه‌شناسی و ساختاری، این گستره را می‌توان مجموعه‌ای از واحدهای سنگی متنوع دانست که تحت تأثیر فازهای مختلف کوه‌زایی، به ویژه کوه‌زایی آلپی متأخر، متحول شده‌اند. سنگ‌های دگرگونی و توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی به عنوان پی‌سنگ اصلی گستره، شواهدی از رویدادهای حرارتی-تکتونیکی قدیمی‌تر را در خود ثبت کرده‌اند که بستر مناسبی برای فعالیت‌های آتشفشانی جوان‌تر ایجاد کرده‌اند (ترکیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ خیرخواه، ۱۳۹۴؛ Akbari et al.، 2022؛ Azizi et al.، 2014) (شکل ۱و ۲).

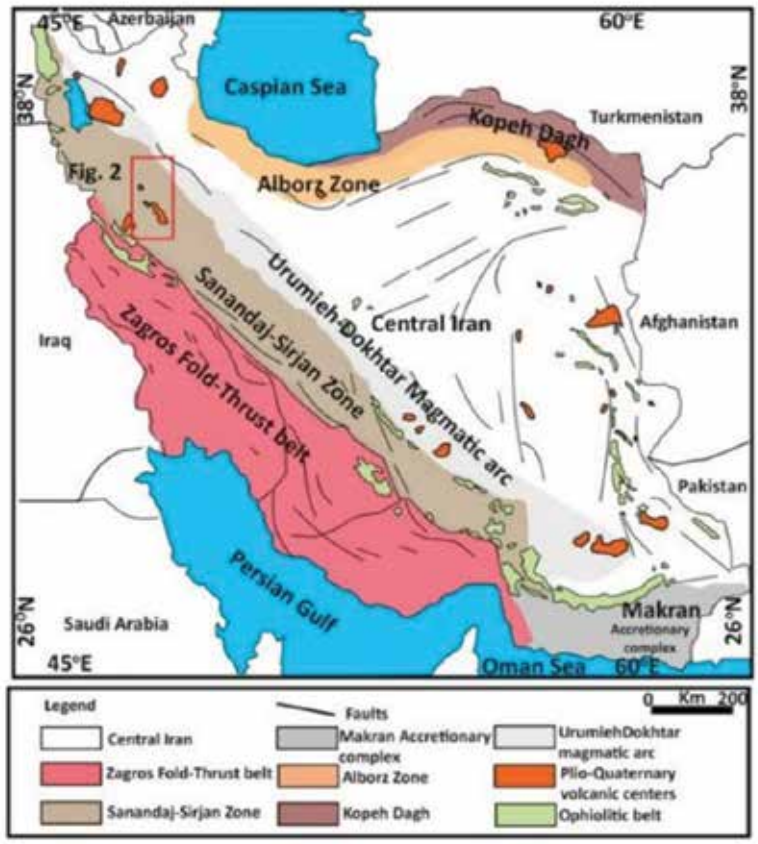
از دیدگاه سنگ‌چینه‌ای، توالی‌های سنگی گستره شامل واحدهای دگرگونی با درجه متوسط تا بالا (مانند گنیس‌ها، شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها) است که در دوران مزوزوئیک تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای و متاسوماتیسم قرار گرفته‌اند. نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی در این بستر، نه‌تنها موجب دگرگونی مجاورتی شده، بلکه با ایجاد ناپیوستگی‌های مکانیکی و ساختارهای ضعیف پوسته‌ای، به‌عنوان مجراهای اصلی برای نفوذ سیالات و مذاب‌های بعدی عمل کرده‌اند (Azizi and Moinevaziri، 2009؛ مرادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مرادی و طالع فاضل، ۱۴۰۳). بر روی این بستر قدیمی، نهشته‌های رسوبی و آتشفشانی کواترنری به صورت دگرشیبی قرار گرفته‌اند.

تحلیل‌های ساختاری نشان می‌دهد که عوامل کنترل کننده اصلی ماگماتیسم کواترنری در این گستره، سیستم‌های گسلی و پهنه‌های برشی هستند که در اثر رژیم‌های کششیِ پسابرخوردی فعال شده‌اند. در گستره سرایجوق و حومه آن، گسل‌های با امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، نقش مهمی در تمرکز و هدایت صعود ماگما ایفا کرده‌اند. این ساختارها با کاهش مقاومت مکانیکی پوسته و ایجاد فضای بازشدگی[1]، امکان صعود سریع ماگما را از اعماق گوشته به سطح فراهم کرده‌اند. بررسی‌های میدانی مؤید این نکته است که ماگماتیسم کواترنری در این گستره، برخلاف ماگماتیسم‌های کمانیِ قبلی، ماهیتی درون‌صفحه‌ای[2] دارد که با رژیم‌های کششی حاکم بر کمربند سنندج-سیرجان در دوران پسابرخوردی، هم‌خوانی دارد (Ghasemi and Talbot، 2006).

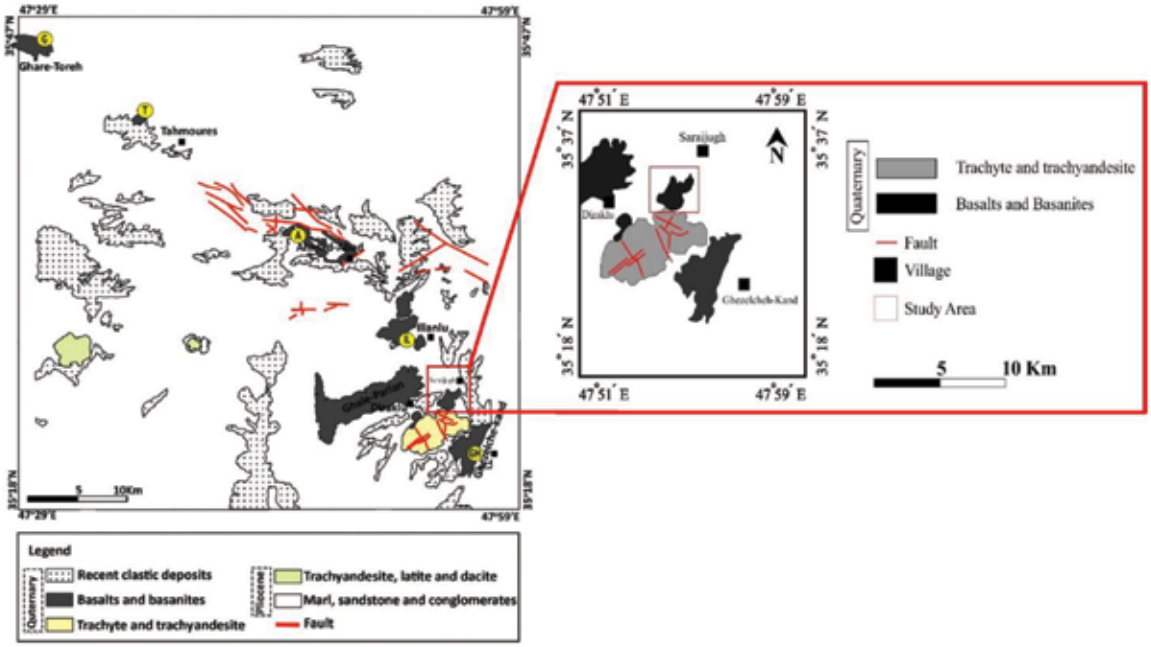
یکی از ویژگی‌های شاخص این گستره، قرارگیری توالی‌های بازالتی کواترنری به‌صورت ناپیوسته، بر روی سنگ‌های دگرگونی یا نهشته‌های رسوبی قدیمی‌تر است. این رابطه چینه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا نشان می‌دهد که میان شکل‌گیری بستر قدیمی و آغاز فعالیت‌های آتشفشانی جوان، یک وقفه تکتونیکی و فرسایشی قابل‌توجه وجود داشته است. این ناپیوستگی، حاکی از پویایی پوسته، تغییرات سطح نسبی و بازتنظیم میدان تنش در دوران پسابرخوردی است که زمینه را برای بازشدگی‌های کششی و فوران‌های آتشفشانی فراهم کرده است (Azizi et al.، 2013؛ ویسی و همکاران، ۱۳۹۴؛ قادری و همکاران، ۱۴۰۱). بر این اساس، استقرار بازالت‌های کواترنری در گستره را می‌توان نتیجه نازک‌شدگی لیتوسفر، افزایش گرادیان‌های حرارتی، و فراهم شدن شرایط مناسب برای ذوب‌بخشی گوشته‌ای دانست (Allen et al.، 2013).

در مجموع، شواهد ساختاری گستره نشان می‌دهد که گسل‌ها و پهنه‌های برشی، مسیرهای ترجیحی برای صعود ماگما فراهم کرده‌اند. این برداشت با نتایج نریمانی و همکاران (۱۴۰۴) درباره پهنه بازالتی آلکالن دیرکلو-مهدی‌خان نیز هم‌خوانی دارد؛ جایی که ماگماتیسم کواترنری به یک سازوکار کششی درون‌صفحه‌ای نسبت داده شده است.

1. Space-making
2. Intra-plate



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساختی ایران و جایگاه کمربند سنندج-سیرجان در چارچوب کمربندهای ساختاری اصلی. کادر مشخص‌شده موقعیت گستره موردمطالعه را در شمال‌غرب این کمربند و در مجاورت مراکز آتشفشانی پلیو-کواترنر نشان می‌دهد (اقتباس و اصلاح از Agard et al., 2020; Moghadam et al., 2022)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره شمال‌شرق قروه، استان کردستان، برگرفته از Salehi et al., (2023)؛ کادر مشخص‌شده موقعیت نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده گستره سرایجوق را نشان می‌دهد

روش مطالعه

به منظـــور پژوهش‌های پتروگرافی و آزمایشـــگاهی، از نمونه‌های برداشـــت شـــده ۲۰ مقطع نازک تهیه شد. شش نمونه از ســـنگ‌های ســـالم و همـــوژن را کـــه ویژگی‌های مجموعه ســـنگ‌های گســـتره را در بر می‌گیرنـــد و دارای حداقـــل هوازدگـــی و رگه‌های ثانویه بودند نیـــز برای آنالیز سنگ کل انتخاب شد. اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب، ازجمله عناصر خاکی کمیاب، پس از آماده‌ســـازی به روش ذوب قلیایی، در آزمایشـــگاه ACME کانادا و با روش‌های ICP-ES/ICP-MS اندازه‌گیری شدند. آماده‌سازی نمونه‌ها از طریق ذوب در لیتیوم متروبورات و سپس انحلال محصول ذوب‌شـــده در اسید نیتریک انجام شـــد. اکسیدهای اصلی بیشتر با ICP-ES و عناصر کمیاب و خاکی کمیاب با ICP-MS اندازه‌گیری شدند.

تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌های سه مقطع، با استفاده از میکروپـــروب الکترونی مـــدل JEOL JXA-8800R در دانشـــگاه یاماگاتا در کشور ژاپن انجام شد. آنالیز ۱۶ نقطه از این کانی‌ها تحت ولتاژ شـــتاب‌دهنده ۱۵ کیلوولت و جریان پرتو ۱۵ نانو آمپر انجام شد. مواد معدنی طبیعی و مصنوعی از ترکیبات شناخته‌شده به‌عنوان استاندارد استفاده شدند. نتایج تجزیه شیمی کل و شیمی کانی‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

پتروگرافی

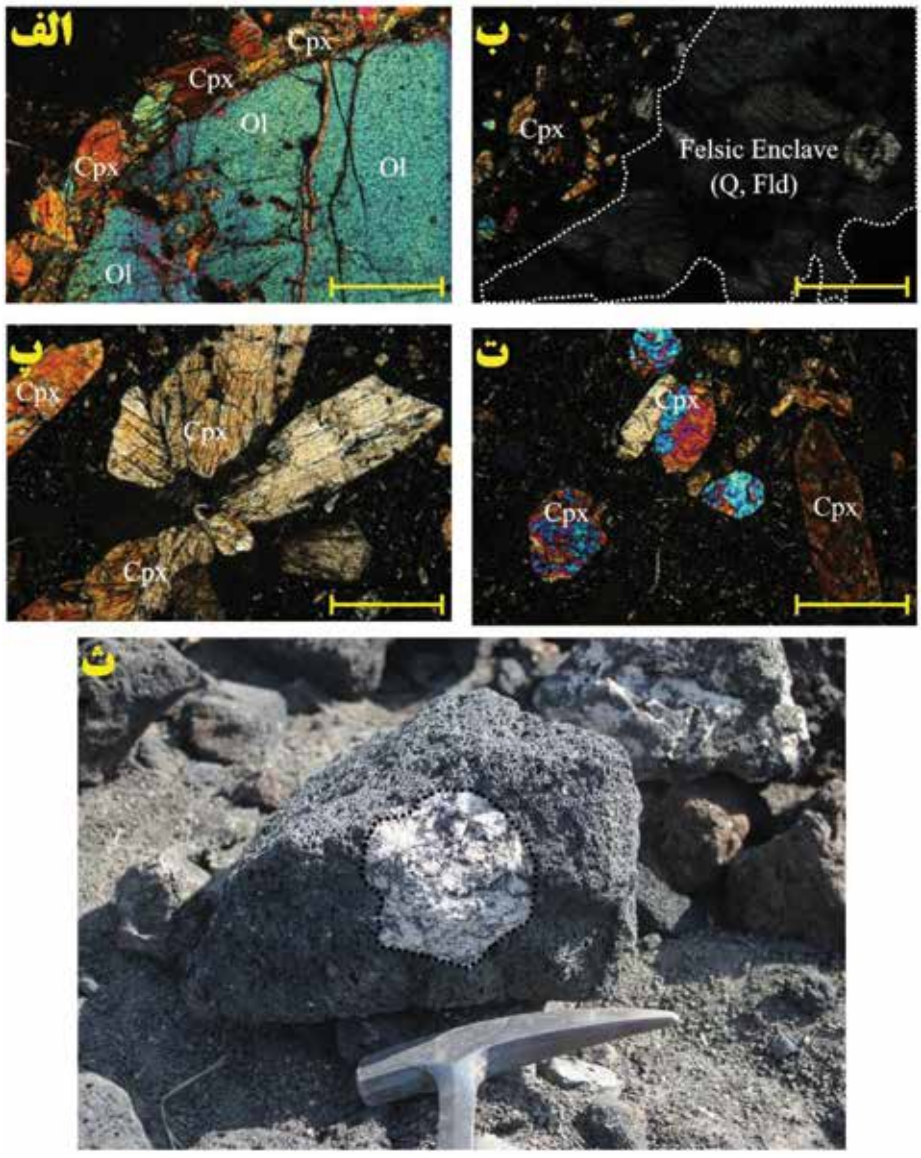
در این پژوهش، تمرکز اصلی بر نمونه‌های بازالتیِ گستره سرایجوق است و نتایج ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی ارائه‌شده بیشـــتر به همین سنگ‌ها مربوط می‌شود. واحدهایی مانند بازانیت، تراکیت و تراکی‌آندزیت که در نقشـــه زمین‌شناسی گستره دیده می‌شوند، بیانگر تنوع واحدهای آذرین در گستره مطالعه هستند، اما در این پژوهش نمونه‌برداری و آنالیزهای شیمیایی به‌طور ویژه بر بازالت‌های آلکالن متمرکز بوده است.

ویژگی‌هـــای پتروگرافی بازالت‌های آلکالن ســـرایجوق، نشـــان‌دهنده‌ی یک سامانه ماگمایی پویا با تاریخچه‌ی تبلور چندمرحله‌ای است. این سنگ‌ها بیشتر بافت‌های پورفیری تا گلومروپورفیری را نشان می‌دهند که در آن فنوکریست‌های الیوین و کلینوپیروکســـن در زمینه‌ای ریزبلور تا میکرولیتی جای گرفته‌اند (شکل ۳). حضور انکلاوهای فلسیک/گنیسی در نمونه‌های دســـتی می‌تواند نشان‌دهنده تعامل موضعی ماگما با ســـنگ‌های دربرگیرنده در حین صعود باشد. بافت زمینه‌ای اینترگرانولار تا اینترسرتال نشان‌دهنده سردشدگی تا اندازه‌ای ســـریع مذاب در مراحل پایانی صعود و استقرار در شـــرایط کم‌عمق تا ســـطحی اســـت؛ فرآیندی که تحت کنترلِ رژیم‌های کششـــی و وجود مجاری ســـاختاریِ فعال برای انتقال ســـریع ماگما از اعماق به ســـطح صورت گرفته است (Lustrino and Wilson، 2007)؛ با این حال، نبود بافت شیشه‌ای و بلورهای اسکلتی نشان می‌دهد که آهنگ سردشدگی به حد کوئنچ کامل (Complete quenching) یا فوق‌سردشدگیِ شـــدید نرسیده و مذاب همچنان فرصت تبلـــور ریزبلورهای زمینه‌ای را داشـــته اســـت (Hibbard، 1995؛ Winter، 2010؛ Philpotts and Ague، 2009؛ Kirkpatrick، 1975).

الیوین به‌عنوان یکی از فازهای فنوکریستی اولیه، بیشتر به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل مشاهده می‌شود. حاشـــیه‌های ایدینگســـیتی در برخی بلورها، نشان‌دهنده دگرســـانی پـــس از تبلور اســـت، در حالی‌کـــه بخش‌های مرکزی تا اندازه‌ای ســـالم و کم‌دگرسان، بیانگر حفظ بافت اولیه ایـــن کانی‌ها در مراحل آغازین تبلور ماگما هســـتند. همچنین، تشـــکیل تجمعات بلوری (گلومروکریســـت) از الیوین، نشـــان‌دهنده توقف‌های موقتی در مخازن کم‌عمق و فرآیندهای تفریـــق بلوری محدود پیـــش از خروج نهایی ماگماست (Le Maitre، 2002).

در میان فازهای کانیایی، کلینوپیروکســـن با بیشترین فراوانی، کلیدی‌ترین کانی برای بررســـی پتروژنز ســـنگ‌ها محسوب می‌شود. بلورهای کلینوپیروکسن با شکل منشوری کوتاه، اغلب منطقه‌بندی‌های نوســـانی یا نامنظم را نشان می‌دهند. این ناهمگنی‌های ترکیبی در هسته و حاشیه بلورها، بازتابی از ناپایداری‌های دینامیکی در مخازن ماگمایی، تغییراتِ فشار-دما و یا ورود پالس‌های ماگمایی جدید[1] به سامانه است

1. Magma recharge



شـــکل ۳. ویژگی‌های پتروگرافی نمونه‌های بازالتی الف) هســـته‌بندی و رشد بلورهای کلینوپیروکســـن بر روی فنوکریست‌های الیوینِ از پیش متبلور شـــده در یک نمونه اسکوری (XPL). ب) انکلاو گنیســـی حاوی بلورهای کوارتز و فلدسپار در متن یک بازالت (XPL). پ و ت) بافت گلومروپورفیری متشکل از گلومروکریست‌های کلینوپیروکسن با اشکال نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل (XPL). ث) انکلاو گنیسی در نمونه دستی یک اسکوری گستره سرایجوق

که در پهنه‌های پسابرخوردی، پیوندی ناگسستنی با فعالیت ســـاختارهای تکتونیکی در کنترل مسیر صعود ماگما دارد (Neave et al., 2014).

پلاژیوکلاز در این بازالت‌ها بیشتر در قالب میکرولیت‌های کشیده (سوزنی‌شـــکل) تا تیغه‌ای در فاز زمینه تبلور یافته است. سوگیری ترجیحی ضعیف این میکرولیت‌ها، نمایانگر جریان خفیف مذاب در مراحل پایانی تبلور و انجماد سنگ است. افزون بر این، فراوانی اندک فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها با ویژگی‌های ذاتی ماگماهای آلکالنِ حاصل از درجات پایین ذوب‌بخشـــی ســـازگاری دارد؛ در این نوع سیســـتم‌های ماگمایی، بالا بودن فعالیـــت عناصر آلکالی، پایداری پلاژیوکلاز را در دماهای بالا کاهش داده و تبلور آن را به مراحل پسین تکامل مذاب و تشکیل فاز زمینه محدود می‌ســـازد (Lustrino and Wilson, 2021). کانی‌هـــای کدر (اپک) فرعی شامل اکسیدهای آهن-تیتان (مگنتیت و ایلمنیت)، به‌صورت ریزبلورهای پراکنده در زمینه و یا به‌عنوان

ادخال در درشت‌بلورهای پیروکسن دیده می‌شوند؛ فراوانی و نحوه توزیع این فازها می‌تواند با شرایط تا اندازه‌ای اکسیدان در حین تبلور سازگار باشد (Mollo et al., 2021).

ژئوشیمی سنگ‌کل

برای کاهش اثر دگرسانی، نمونه‌های با کمترین تغییر ثانویه انتخاب شده‌اند. مقادیر پایین LOI (۱/۰۸ تا ۱/۵۰) نشان می‌دهد که دگرسانی در حد خفیف بوده و لذا تفسیر پتروژنتیکی مبتنی بر عناصر کم‌تحرک، به‌ویژه REE و HFSE معتبر است. همبستگی و رفتار تا اندازه‌ای منظم عناصر HFSE (مانند Nb, Ta, Zr, Hf, Y) نیز مؤید حفظ نشانه‌های اولیه ماگمایی است. در مقابل، پراکندگی محدود عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون (Rb, Ba, Sr) می‌تواند ناشی از سیالات دگرسانی/هیدروترمال یا هضم و آمیختگی موضعی قطعات گنیسی (مطابق مشاهده انکلاوهای گنیسی در سنگ‌ها) باشد؛ با این وجود، دامنه این تغییرات برای مخدوش کردن روندهای اصلی ژئوشیمیایی کافی نیست و بیش‌تر به‌صورت نویز ثانویه روی LILEها ظاهر می‌شود (Pearce, 2008).

رده‌بندی سنگ‌ها و سرشت ماگما

در این پژوهش، نام‌گذاری سنگ‌ها بر پایه تلفیق مشاهدات پتروگرافی و طبقه‌بندی ژئوشیمیایی (به‌ویژه نمودار TAS[1] و سایر شاخص‌های شیمی سنگ‌کل) انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های مطالعه‌شده بیشتر در محدوده سنگ‌های آلکالن بازالتی قرار می‌گیرند.

ترکیب شیمیایی سنگ‌های گستره سرایجوق نشان می‌دهد که نمونه‌ها بیشتر در محدوده بازالت‌های آلکالن قرار می‌گیرند و تنها تغییرات محدودی در میزان SiO_2 و مجموع آلکالی‌ها مشاهده می‌شود. مقادیر SiO_2 بین ۴۵/۵ تا ۴۸/۹ درصد وزنی و مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) بین ۳/۹ تا ۶/۲ درصد وزنی تغییر می‌کند (جدول ۱). این بازه ترکیبی، بیانگر ماهیت بیشتر آلکالن ماگماهاست؛ به‌گونه‌ای که در نمودار TAS، نمونه‌ها بیشتر در میدان‌های بازالت آلکالن و تراکی‌بازالت قرار می‌گیرند (Le Bas et al., 1986) (شکل ۴).

از نظر تغییرات عناصر اصلی، مقادیر تا اندازه‌ای بالای MgO (۶/۱ تا ۸/۴۵ درصد وزنی) و CaO (۸/۸ تا ۹/۹۳ درصد وزنی) نشان می‌دهد که ماگماهای مولد این سنگ‌ها ماهیتی تا اندازه‌ای اولیه داشته و نمونه‌ها دچار تفریق بلوریِ شدید نشده‌اند. با این حال، افزایش تدریجی SiO_2 همراه با افزایش Na_2O و K_2O بیانگر آن است که پس از مراحل آغازین تبلور، اندکی تکامل ماگمایی نیز در سامانه رخ داده و مذاب‌های باقیمانده به‌تدریج از آلکالی‌ها غنی‌تر شده‌اند.

مقادیر تا اندازه‌ای یکنواخت Al_2O_3 (۱۶/۴ تا ۱۷/۵۳ درصد وزنی) همراه با نبود ناهنجاری منفی شدید Eu نشان می‌دهد که احتمالاً جدایش گسترده پلاژیوکلاز در مراحل اولیه تبلور غالب نبوده است. این موضوع می‌تواند بیانگر آن باشد که در مراحل آغازین، تبلور کانی‌های مافیک، به‌ویژه الیوین و احتمالاً کلینوپیروکسن، نقش مهم‌تری در کنترل ترکیب مذاب داشته‌اند و سهم پلاژیوکلاز در مراحل بعدیِ تکامل ماگما افزایش یافته است. همچنین مقادیر تا اندازه‌ای بالای TiO_2 (۱/۶۴ تا ۳/۱۲ درصد وزنی) با ماهیت آلکالن ماگماها و غنی‌شدگی نسبی منبع گوشته‌ای آن‌ها سازگار است (Neave et al., 2014) (جدول ۱).

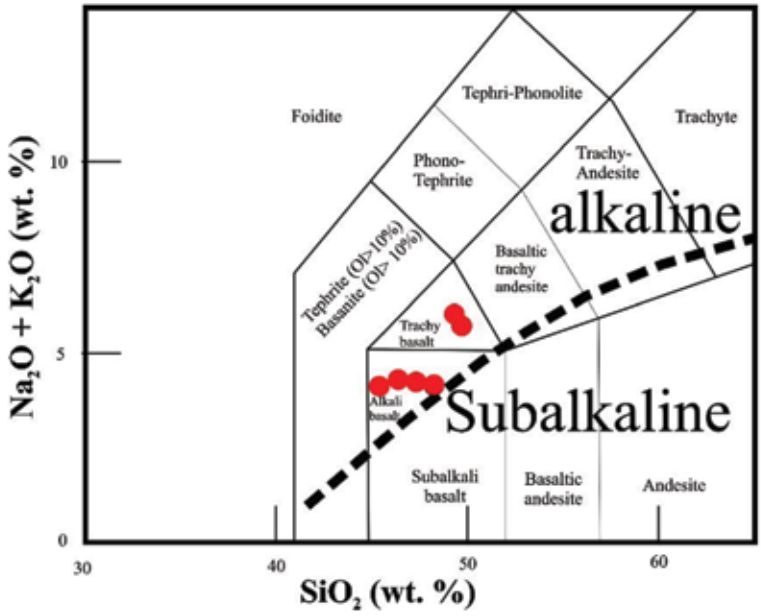
از سوی دیگر، نمودار تفکیک تکتونیکی Th/Hf-Ta/Hf نیز شواهد مکملی برای تفسیر جایگاه تکتونوماگمایی این سنگ‌ها فراهم می‌کند. در این نمودار، نمونه‌های مورد پژوهش بیشتر در قلمرو بازالت‌های درون قاره‌ای کششی قرار می‌گیرند و تنها تعداد محدودی از نقاط در قلمرو ریفت قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۵). نسبت‌های Th/Hf و Ta/Hf به دلیل استفاده از عناصر تا اندازه‌ای نامتحرک با رفتار ناسازگار، ابزار مناسبی برای بررسی محیط تکتونیکی بازالت‌ها و تشخیص تأثیرات منبع گوشته‌ای، آلودگی پوسته‌ای و فرآیندهای مرتبط با ذوب‌بخشی به‌شمار می‌روند (Pearce, 2020).

جایگاه داده‌ها در قلمرو کششی قاره‌ای نشان می‌دهد که تشکیل ماگمای بازالتی سرایجوق احتمالاً در ارتباط با نازک‌شدگی لیتوسفر قاره‌ای، بازشدگی ساختاری و آغاز فرایندهای ریفتی صورت گرفته است. این تفسیر با ماهیت

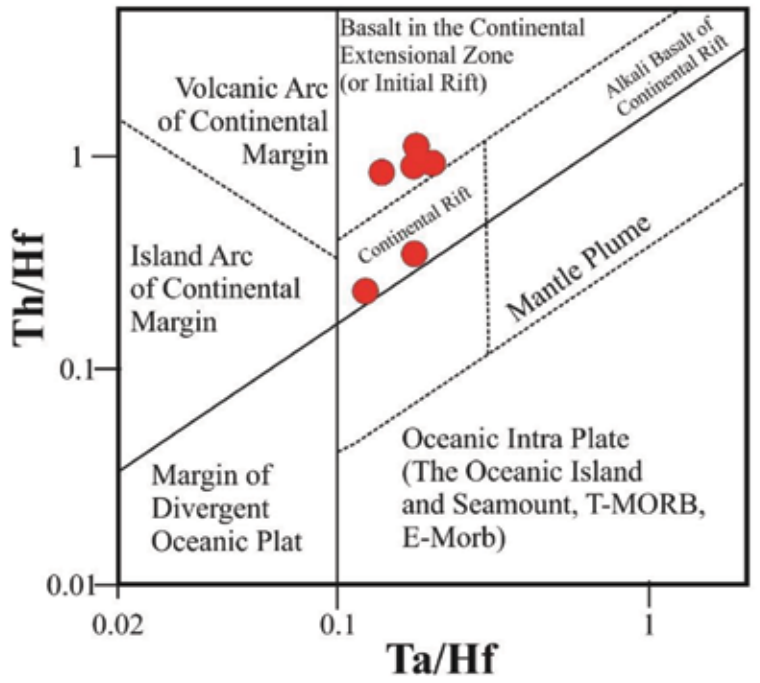
1. Total Alkali-Silica

جدول ۱. داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی سنگ کل سنگ‌های آتشفشانی سرایجوق توسط دستگاه ICP-ES/ICP-MS
(اکسیدهای اصلی به صورت درصد وزنی و دیگر عناصر به صورت ppm نمایش داده شده‌اند)

Sample	Gh-4	Gh-47	Gh-42	Gh-8	Gh-9	Gh-12
SiO_2	۴۵/۵۰	۴۶/۸۰	۴۸/۹۰	۴۷/۷۰	۴۶/۵۰	۴۸/۶۵
TiO_2	۳/۱۲	۲/۶۵	۱/۷۸	۲/۹۷	۲/۳۴	۱/۶۴
Al_2O_3	۱۷/۵۳	۱۶/۴۰	۱۷/۲۰	۱۶/۹۵	۱۶/۷۱	۱۶/۹۲
Fe_2O_3	۹/۳۳	۹/۱۰	۸/۶۰	۹/۰۴	۹/۶۳	۹/۴۲
MnO	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۱۵
MgO	۸/۱۲	۸/۰۰	۶/۱۰	۸/۳۲	۸/۴۵	۶/۲۰
CaO	۹/۹۳	۹/۴۰	۸/۹۰	۸/۸۰	۹/۱۱	۹/۲۰
Na_2O	۲/۴۱	۲/۸۰	۴/۱۰	۲/۵۴	۲/۶۳	۴/۲۷
K_2O	۱/۵۵	۱/۴۲	۱/۸۵	۱/۴۹	۱/۵۶	۱/۹۷
P_2O_5	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۸۲	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۹۸
LOI	۱/۵۰	۱/۴۸	۱/۱۲	۱/۲۰	۱/۲۷	۱/۰۸
Total	۹۹/۵۶	۹۹/۹۲	۹۹/۹۷	۹۹/۵۲	۹۸/۷۶	۱۰۰/۴۸
Cs	۰/۱۱	۱/۸۰	۰/۹۰	۰/۳۸	۲/۱۶	۰/۴۹
Rb	۳۴/۶۰	۴۷/۰۰	۴۲/۰۰	۴۴/۰۰	۴۵/۶۰	۳۹/۵۰
Ba	۳۷۱/۰۰	۹۸۰/۰۰	۸۲۰/۰۰	۷۰۸/۰۰	۱۰۲۰/۰۰	۴۷۳/۰۰
Th	۱/۸۶	۴/۷۰	۳/۸۰	۵/۱۳	۳/۸۹	۲/۵۷
Ta	۰/۹۰	۱/۴۰	۱/۲۰	۱/۳۰	۱/۳۰	۱/۳۰
Nb	۱۷/۱۰	۱۸/۹۰	۲۲/۴۰	۲۳/۱۰	۲۴/۱۰	۲۷/۶۰
Sr	۴۲۲/۰۰	۱۳۸۰/۰۰	۱۵۵۰/۰۰	۱۴۵۰/۰۰	۱۳۰۰/۰۰	۱۶۹۵/۰۰
Pb	۱۰/۰۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۱۱/۰۰	۱۸/۰۰	۸/۰۰
Zr	۱۸۹/۰۰	۲۴۵/۰۰	۲۱۰/۰۰	۱۵۸/۰۰	۲۶۸/۰۰	۱۳۶/۰۰
Hf	۴/۵۰	۴/۸۰	۴/۱۰	۵/۷۰	۴/۲۰	۴/۵۰
Y	۲۰/۲۰	۲۲/۵۰	۱۷/۸۰	۲۸/۰۰	۱۹/۳۰	۲۰/۸۰
V	۱۸۲/۰۰	۱۹۵/۰۰	۱۸۵/۰۰	۱۷۶/۰۰	۱۸۵/۰۰	۱۷۱/۰۰
Cr	۱۵۳/۰۰	۲۹۵/۰۰	۱۸۰/۰۰	۱۵۵/۰۰	۳۲۰/۰۰	۱۶۹/۰۰
Co	۲۳/۷۰	۳۴/۰۰	۲۷/۰۰	۲۲/۴۰	۳۵/۴۰	۲۱/۱۰
Ni	۱۵۹/۰۰	۲۴۵/۰۰	۱۶۵/۰۰	۱۶۲/۰۰	۲۶۶/۰۰	۱۸۶/۰۰
Zn	۹۹/۰۰	۱۱۲/۰۰	۱۰۵/۰۰	۹۵/۰۰	۱۰۶/۰۰	۷۹/۰۰
La	۵۰/۱۰	۴۹/۰۰	۵۲/۰۰	۵۲/۷۰	۵۰/۰۰	۴۴/۲۰
Ce	۱۰۸/۵۰	۱۱۰/۰۰	۱۰۲/۰۰	۱۲۹/۸۰	۱۰۹/۵۰	۱۱۵/۰۰
Pr	۱۱/۹۰	۱۱/۴۰	۱۰/۸۰	۹/۹۷	۳/۹۷	۱۲/۸۰
Nd	۴۴/۹۰	۴۴/۰۰	۴۱/۰۰	۳۶/۷۰	۱۸/۱۰	۴۸/۳۰
Sm	۹/۴۶	۱۰/۲۰	۹/۸۰	۹/۹۴	۹/۴۰	۸/۶۶
Eu	۲/۱۲	۲/۱۰	۱/۹۰	۱/۶۳	۱/۵۵	۱/۸۲
Gd	۶/۹۰	۶/۸۰	۶/۳۰	۵/۸۵	۴/۴۶	۵/۸۹
Tb	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۶۱
Dy	۲/۰۵	۴/۰۰	۳/۶۰	۵/۷۱	۲/۶۶	۲/۶۶
Ho	۰/۳۹	۰/۷۴	۰/۶۵	۱/۰۴	۰/۵۰	۰/۴۴
Er	۱/۱۲	۲/۲۰	۱/۹۰	۲/۹۶	۱/۴۶	۱/۲۳
Tm	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۱۴
Yb	۱/۴۰	۲/۸۰	۲/۳۰	۳/۰۰	۱/۲۰	۲/۰۰
Lu	۰/۱۶	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۳۷	۰/۲۰	۰/۱۴



شکل ۴. نمودار TAS برای ترکیب سنگ کل نمونه‌ها (Le Bas et al.، 1986). بیشتر نمونه‌ها در محدوده بازالت آلکالن تا تراکی بازالت قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده ماهیت آلکالن ماگمای مولد این سنگ‌ها است



شکل ۵. نمودار تفکیک تکتونیکی Ta/Hf در برابر Th/Hf که جایگاه زمین‌ساختی ماگماها را نشان می‌دهد. داده‌ها بیشتر در محدوده بازالت‌های درون‌صفحه‌ای کمربندهای کششی و یا ریفت‌های قاره‌ای قرار می‌گیرند (Wang et al.، 2001)

آلکالن سنگ‌ها در نمودار TAS نیز همخوانی دارد، زیرا ماگماهای آلکالن بازالتی همواره در محیط‌هایی با درجه ذوب‌بخشی پایین‌تر، فشارهای تا اندازه‌ای بالاتر و منابع گوشته‌ای غنی‌شده در رژیم‌های کششی درون‌قاره‌ای یا پسابرخوردی تولید می‌شوند (Wilson، 1989؛ Pearce، 2020؛ Winter، 2010).

بنابراین، ترکیب نتایج حاصل از نمودارهای TAS و Th/Hf-Ta/Hf نشان می‌دهد که بازالت‌های سرایجوق از

نظر ژئوشیمی سنگ‌کل دارای ماهیت بازالت آلکالن تا تراکی بازالت بوده و از نظر تکتونوماگمایی با یک محیط کششی قاره‌ای، احتمالاً مرحله آغازین ریفت‌زایی در یک پهنه پسابرخوردی مرتبط هستند.

الگوهای بهنجارشده عناصر نادر خاکی و عناصر ناسازگار

الف. الگوهای REE بهنجارشده به کندریت

الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجارشده به کندریت (Boynton، 1984) در شکل ۶-الف، غنی‌شدگی قابل‌توجه LREE نسبت به HREE را نشان می‌دهند و نسبت‌های La/Yb = ۱۷-۴۲ این ویژگی را تأیید می‌کنند. با وجود این غنی‌شدگی، بخش HREE الگوی تا اندازه‌ای مسطح تا اندکی کاهشی دارد؛ ازاین‌رو، این داده‌ها به‌تنهایی شواهد قاطعی برای حضور گسترده گارنت در منبع ارائه نمی‌کنند؛ با این حال، مجموع شواهد شامل غنی‌شدگی LREE، مقادیر پایین Y و Yb و نتایج مدل‌سازی ذوب‌بخشی، با مشارکت محدود گارنت در باقیمانده منبع یا ذوب‌بخشی در محدوده گذار اسپینل-گارنت سازگار است (Aldanmaz et al.، 2000؛ Workman and Hart، 2005).

ناهنجاری Eu در اغلب نمونه‌ها ضعیف یا ناچیز است ($Eu/Eu^{*} \approx 1$). نبود ناهنجاری منفی مشخص Eu می‌تواند با چند سازوکار مکمل توضیح داده شود: نخست، در صورتی که الیوین و کلینوپیروکسن فازهای غالب تبلور اولیه باشند و پلاژیوکلاز در مراحل بعدی وارد مجموعه کانی‌شناسی شود، Eu در مذاب به‌طور سیستماتیک تهی نمی‌شود و ناهنجاری منفی چشمگیری شکل نمی‌گیرد. دوم، در شرایط فشار بالاتر و/یا ماگماهای تا اندازه‌ای آب‌دار، پایداری پلاژیوکلاز به تعویق می‌افتد و فازهای مافیک، به‌ویژه کلینوپیروکسن، نقش مهم‌تری در تکامل مذاب دارند. سوم، در ماگماهای آلکالنِ حاصل از ذوب‌بخشی درجه پایین، ویژگی‌های منبع و غنی‌شدگی LREE همواره بر اثر تفریق دیرهنگام پلاژیوکلاز غلبه می‌کند؛ بنابراین Eu ممکن است بدون ناهنجاری قابل‌توجه باقی بماند (Jegal et al.، 2025؛ Agard et al.، 2020؛ Lustrino and Wilson، 2021).

ب. نمودارهای عنکبوتی بهنجارشده به گوشته اولیه

نمودارهای چندعنصری بهنجارشده به گوشته اولیه (Sun and McDonough، 1989) در شکل ۶-ب نشان می‌دهند که نمونه‌ها از الگوی تا اندازه‌ای مشابه برخوردارند و به‌طور کلی غنی‌شدگی عناصر ناسازگار بزرگ‌یون (LILE) نسبت به عناصر ناسازگار با میدان قدرت بالا (HFSE) را نشان می‌دهند. یکی از ویژگی‌های مشخص این الگوها، افت نسبی تا ناهنجاری منفی ضعیف Nb و Ta است که در بسیاری از ماگماهای مشتق‌شده از منابع گوشته‌ای اثرپذیر از فرآیندهای فرورانش گزارش شده است. این الگو به‌طور کلی با ذوب‌بخشی یک منبع گوشته‌ای غنی‌شده یا متاسوماتیسم‌شده سازگار است (Agard et al.، 2020؛ Pearce، 2008).

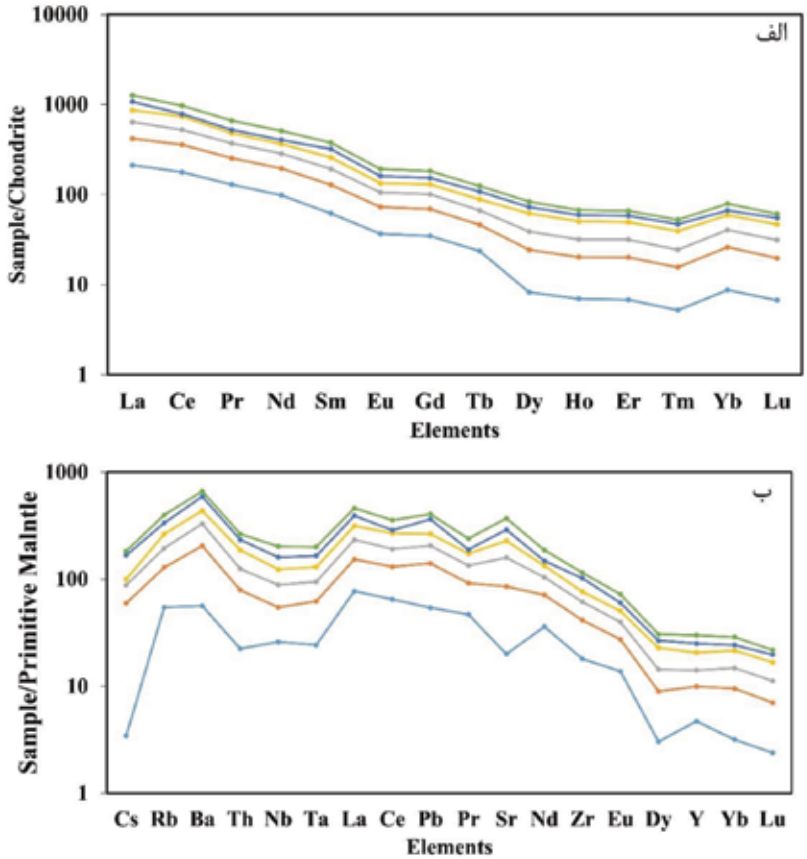
بحث

تفریق بلوری و تکامل ماگما

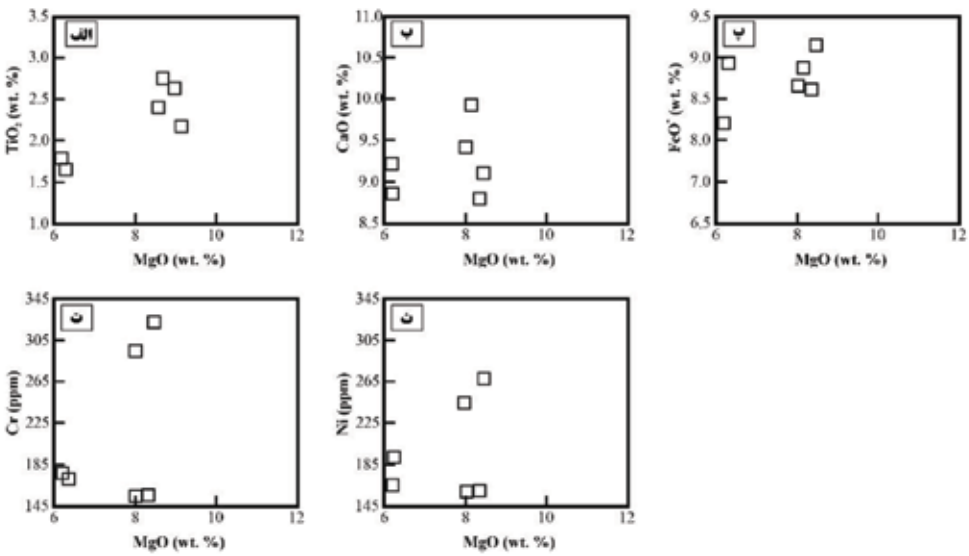
برای بررسی روند تکامل ماگما، تغییرات عناصر اصلی و کمیاب در برابر MgO به‌عنوان شاخص تفریق مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷). همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در دو خوشه[1] مجزا با میزان MgO حدود ۶ درصد وزنی و ۸-۹ درصد وزنی قرار می‌گیرند و روند خطی ممتدی بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

در نمودارهای MgO در برابر TiO_2، CaO و FeO^{*} (شکل ۷-الف، ب و پ)، پراکندگی داده‌ها و نبود یک روند کاهشی یا افزایشی منظم نشان می‌دهد که تفریق بلوری کانی‌هایی مانند کلینوپیروکسن و کانی‌های کدر نقش مسلطی در تنوع ژئوشیمیایی این سنگ‌ها نداشته‌اند. همچنین در نمودارهای عناصر سازگار مانند Ni و Cr در برابر MgO (شکل ۷-ت و ث)، تغییرات وسیع این عناصر در مقادیر ثابت MgO، فرضیه تکامل صرفاً بر اساس تفریق بلوری را با چالش مواجه می‌کند. بنابراین، اگرچه تفریق محدود الیوین و کلینوپیروکسن در مسیر صعود رخ داده است، نبود روندهای خطی منظم نشان می‌دهد که این فرآیند عامل اصلی تنوع ترکیبی نمونه‌ها نبوده و ناهمگنی منبع و درجات

1. Cluster



شکل ۶. الف) الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجارشده به کندریت برای نمونه‌های بازالتی سرایجوق؛ بهنجارسازی بر اساس Boynton (1984) غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و شیب ملایم بخش HREE با ذوب‌بخشی درجه پایین یک منبع گوشته‌ای غنی‌شده سازگار است. ب) نمودار چندعنصری بهنجارشده به گوشته اولیه؛ بهنجارسازی بر اساس Sun and McDonough (1989) الگوها غنی‌شدگی LILE و LREE نسبت به HFSE، همراه با افت نسبی تا ناهنجاری منفی ضعیف Nb-Ta را نشان می‌دهند که بیانگر نقش یک منبع گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده با میراث فرورانشی است



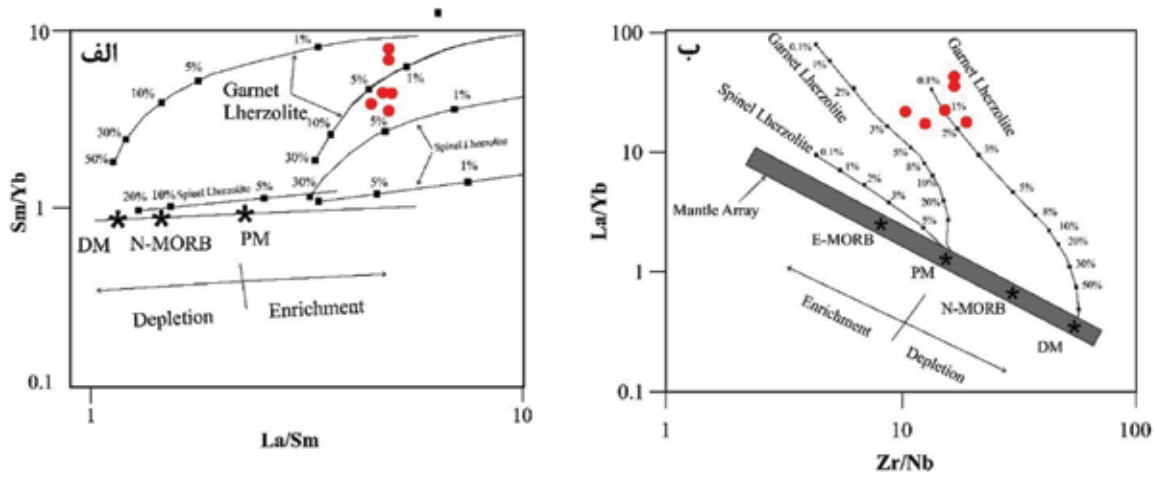
شکل ۷. نمودارهای تغییرات MgO در برابر اکسیدهای اصلی منتخب FeO_t، CaO و TiO_2 و عناصر سازگار Cr و Ni برای داده‌های سنگ‌کل. پراکندگی داده‌ها و نبود روندهای خطی منظم نشان می‌دهد که تفریق بلوری کلینوپیروکسن ± الیوین نقش مسلطی در کنترل تنوع ترکیبی نمونه‌ها نداشته و تغییرات ژئوشیمیایی بیشتر بازتاب‌دهنده ناهمگنی منبع و درجات متفاوت ذوب‌بخشی است

متفاوت ذوب‌بخشی نقش مهم‌تری داشته‌اند.

این ویژگی‌های ژئوشیمیایی (نبود روند خطی و پراکندگی عناصر سازگار) احتمالاً ناشی از درجات متفاوت ذوب‌بخشی از یک منبع گوشته‌ای ناهمگن و یا صعود سریع ماگما بدون توقف طولانی در اتاقک‌های ماگمایی است. در واقع، ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها بیشتر بازتاب‌دهنده ویژگی‌های اولیه پایه[1] و شرایط ذوب در منبع است تا فرآیندهای تفریق در اعماق کم.

درجه ذوب‌بخشی و ماهیت منبع

برای تعیین کانی‌شناسی منبع و برآورد درجه ذوب‌بخشی، از نمودارهای نسبت عناصر نادر خاکی و عناصر ناسازگار استفاده شد (شکل ۸). در نمودار Sm/Yb دربرابر La/Sm (شکل ۸-الف)، نمونه‌ها در محدوده‌ای قرار می‌گیرند که با ذوب‌بخشی درجه پایین از یک منبع گوشته‌ای غنی‌شده در محدوده گذار اسپینل-گارنت، یا با مشارکت محدود گارنت در باقیمانده منبع، سازگار است. همچنین در نمودار La/Yb در برابر Zr/Nb (شکل ۸-ب)، موقعیت نمونه‌ها بیانگر غنی‌شدگی منبع گوشته‌ای و نقش متاسوماتیسم پیش از ذوب‌بخشی است (Aldanmaz et al., 2000). در این نمودار نمونه‌ها بالاتر از محدوده گوشته اولیه (PM) و در امتداد روند غنی‌شدگی[2] قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه این نمونه‌ها غنی‌شدگی بالایی در عناصر ناسازگار (مانند La) نسبت به عناصر HFSE نشان می‌دهند و با در نظر گرفتن درجه پایین ذوب‌بخشی (حدود ۲ تا ۶ درصد)، می‌توان استنباط کرد که منبع گوشته‌ای پیش از وقوع ذوب‌بخشی، تحت تأثیر فرآیندهای متاسوماتیسم قرار گرفته است. در واقع، غنی‌شدگی نمایان در LREE که در این نمودارها دیده می‌شود، بدون فرض یک منبع گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده[3] از نظر فیزیکی و شیمیایی قابل توجیه نیست (Workman and Hart, 2005).



شکل ۸. نمودارهای نسبت عناصر نادر خاکی و عناصر ناسازگار برای ارزیابی ماهیت منبع گوشته‌ای و درجه ذوب‌بخشی. الف) نمودار Sm/Yb دربرابر La/Sm که قرارگیری نمونه‌ها را در محدوده سازگار با ذوب‌بخشی درجه پایین از یک منبع گوشته‌ای غنی‌شده در گذار اسپینل-گارنت، یا با مشارکت محدود گارنت در باقیمانده منبع، نشان می‌دهد. ب) نمودار La/Yb دربرابر Zr/Nb که غنی‌شدگی منبع گوشته‌ای و نقش متاسوماتیسم پیش از ذوب‌بخشی را پشتیبانی می‌کند. پراکندگی نمونه‌ها با ذوب‌بخشی حدود ۲ تا ۶ درصد از یک گوشته لیتوسفری متاسوماتیسم‌شده سازگار است (Aldanmaz et al., 2000; Workman and Hart, 2005)

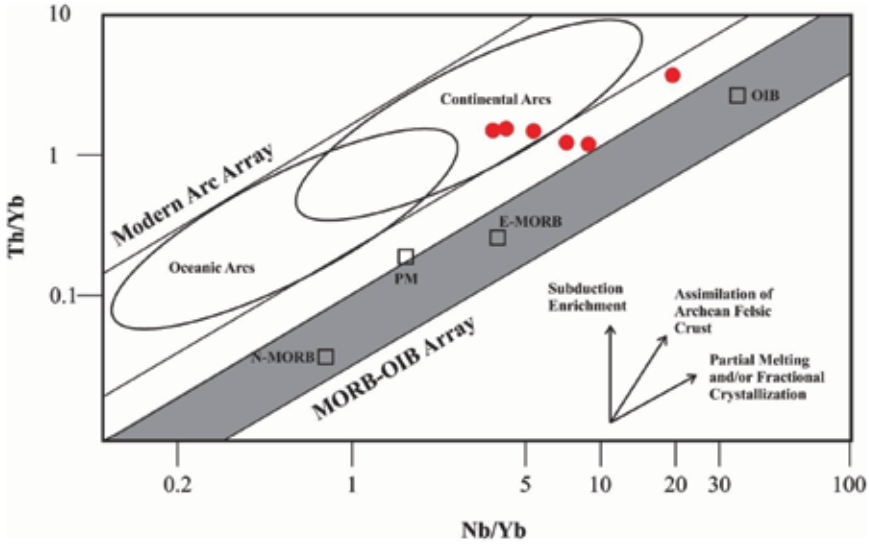
1. Primary/Primitive signatures
2. Enrichment
3. Enriched Mantle

متاسوماتیسم منبع و محیط تکتونیکی

الگوهای ژئوشیمیایی به‌دست‌آمده از سنگ‌های گستره سرایجوق، به‌ویژه در نمودارهای چندعنصری (شکل ۶-ب)، نشان‌دهنده غنی‌شـــدگی واضح در عناصر LILE و LREE نســـبت به عناصر HFSE است. یکی از ویژگی‌های شاخص این الگوها، افت نســـبی تا ناهنجـــاری منفی ضعیف Nb و Ta، همراه با مقادیر تا اندازه‌ای بالای La/Nb است. اگرچه این سنگ‌ها ماهیت آلکالن درون‌صفحه‌ای نشان می‌دهند، اما وجود این آنومالی‌ها بیانگر نقش مؤلفه‌های فرورانشی در سرچشمه آن‌هاست.

جهت بررســـی دقیق‌تر، از نمـــودار Th/Yb دربرابر Nb/Yb استفاده شد (شکل ۹). در این نمودار، نمونه‌های مورد پژوهش بالاتـــر از محدوده گوشـــته‌ای[1] و در نزدیکی قلمرو کمان‌هـــای قاره‌ای[2] قرار می‌گیرند. بـــا توجه به میزان بالای MgO و عناصر سازگار (Ni و Cr) در اکثر نمونه‌ها که احتمال آلودگی گسترده پوســـته‌ای را منتفی می‌کند، جابه‌جایی به سمت مقادیر بالای Th/Yb را می‌توان به متاسوماتیسم منبع گوشته لیتوسفری نسبت داد. در واقع، گوشته زیرین گستره در طی فرآیندهای فرورانش قدیمی‌تر (احتمالاً نئوتتیس)، توسط سیالات و مذاب‌های حاصل از پوسته اقیانوسی فرورفته غنی شده و میراثی از آنومالی‌های ژئوشیمیایی (مانند تهی‌شدگی Nb-Ta) را در خود حفظ کرده است.

در رابطه با رفتار عناصر سنگین نادر خاکی (HREE)، الگوی تا اندازه‌ای مسطح این عناصر در نمونه‌ها نشان‌دهنده ذوب‌بخشـــی در اعماق کمتر از پایداری مطلق گارنت (مرز انتقال اســـپینل به گارنت) است. این ویژگی در بازالت‌های آلکالن پســـابرخوردی یا درون‌صفحـــه‌ای که در محیط‌های کششـــی حاصل از نازک‌شدگی لیتوسفر و احتمالاً مشارکت حرارتی/دینامیکی آستنوسفر شـــکل می‌گیرند، بسیار رایج اســـت. در مقابل، در محیط‌های فرورانش فعال، به دلیل حضـــور پایدار گارنـــت در اعماق زیـــاد، HREEها همواره تهی‌شدگی شدیدی نشـــان می‌دهند. بنابراین، ویژگی‌های ژئوشیمیایی گستره سرایجوق ترکیبی از ماهیت ماگماتیسم کششـــی (آلکالن) و شواهد ژئوشـــیمیایی میراث فرورانش (متاسوماتیسم قبلی گوشـــته) (Agard et al., 2020) را به‌طور همزمان نشان می‌دهد که با مدل‌های پسابرخوردی برای کمربند سنندج-سیرجان در کواترنری مطابقت دارد.

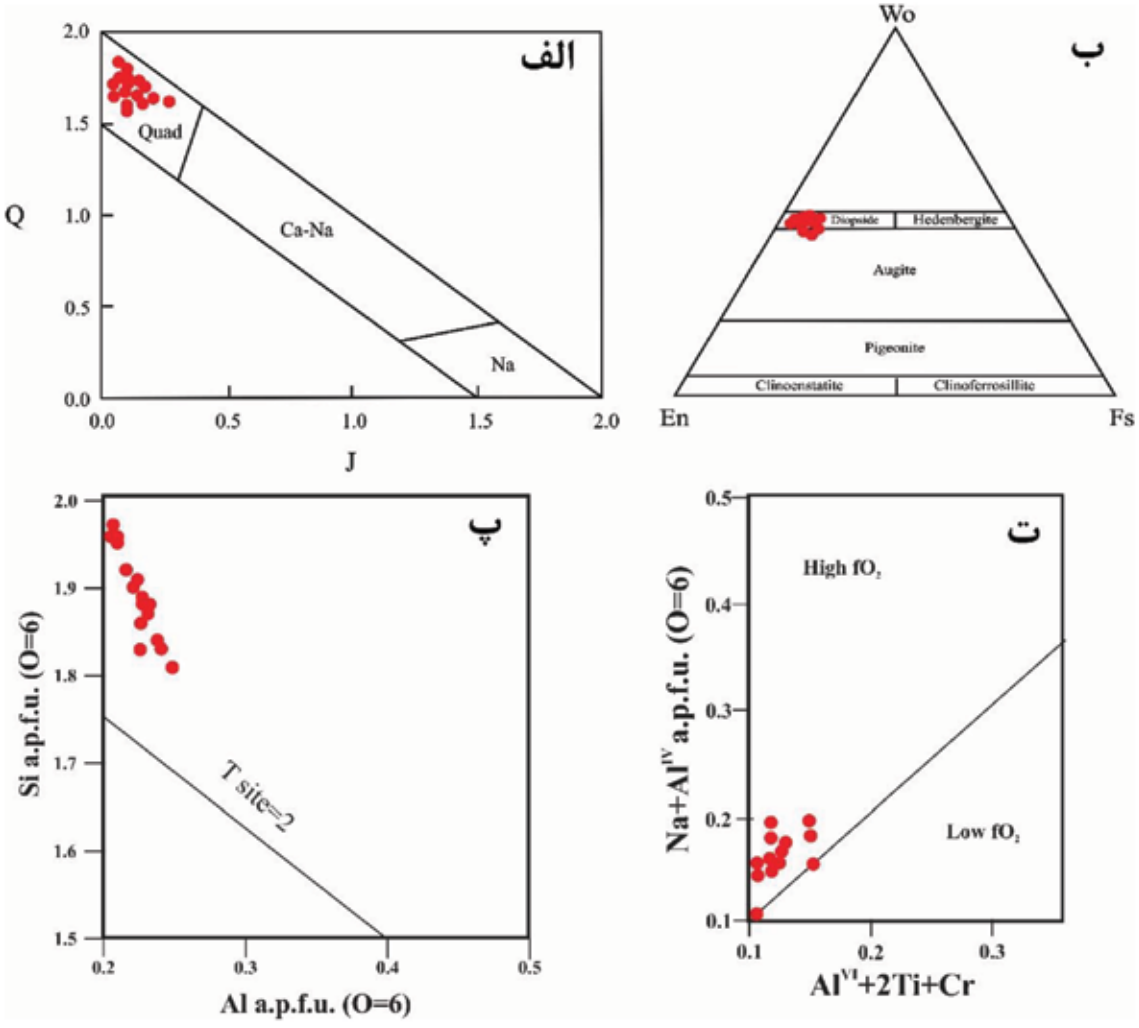


شـــکل ۹. نمودار تفکیک محیط زمین‌ســـاختی Th/Yb دربرابر Nb/Yb (Pearce, 2008) برای بررســـی نقش مؤلفه‌های فرورانشی و آلودگی پوسته‌ای در ترکیب ماگماها؛ قرارگیری نمونه‌های سرایجوق در بالای آرایه MORB-OIB و تمایل آن‌ها به سوی قلمرو کمان‌های قاره‌ای، بیانگر غنی‌شدگی منبع گوشته‌ای توسط مؤلفه‌های وابسته به فرورانش پیشین است. با توجه به مقادیر تا اندازه‌ای بالای MgO، Ni و Cr، سهم آلودگی پوسته‌ای گسترده محدود ارزیابی می‌شود.

1. MORB-OIB Array
2. Continental Arcs

شیمی کانی کلینوپیروکسن و تکامل ماگمایی

کلینوپیروکسن‌های گستره سرایجوق از نظر ترکیبی در قلمرو دیوپسید و در موارد معدودی (نمونه‌های تکامل‌یافته‌تر) در قلمرو اوژیت قرار می‌گیرند. بر اساس ویژگی‌های ساختاری، این کانی‌ها از نظر ترکیبی دارای مقدار تا اندازه‌ای پایین Al هستند و جانشینی Al در جایگاه تتراهدرال آن‌ها محدود است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. (الف) نمودار Q-J برای تعیین نوع کلینوپیروکسن، که نشان‌دهنده قرارگیری نمونه‌ها در محدوده Quad است. (ب) نمودار مثلثی Wo-En-Fs؛ نمونه‌ها بیشتر در محدوده دیوپسید (Diopside) متمرکز شده‌اند. (پ) نمودار Si در مقابل Al بر حسب a.p.f.u که میزان جانشینی Al در جایگاه تتراهدرال کلینوپیروکسن را نشان می‌دهد. (ت) نمودار تغییرات Na+AlIV در برابر AlVI+2Ti+Cr برای تخمین شرایط فوگاسیته اکسیژن؛ داده‌ها با شرایط تا اندازه‌ای اکسیدان در زمان تبلور سازگارند و می‌توانند بازتاب‌دهنده تأثیر سیالات یا میراث متاسوماتیسم منبع باشند (Morimoto، 1988)

جدول ۲. نتایج تجزیه میکروپروب کانی‌های پیروکسن سرایجوق (برپایه درصد وزنی) و بازمحاسبه تعداد کاتیون‌ها بر اساس ۶ اتم اکسیژن

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
SiO_2	۵۳٫۳۱	۵۱٫۲۷	۵۳٫۲۶	۵۲٫۳۷	۵۰٫۱۲	۴۹٫۷۶	۵۲٫۲۳	۵۰٫۲۸	۵۱٫۵۷	۵۲٫۲۹	۵۲٫۳۴	۴۹٫۵۸	۵۱٫۲۳	۴۹٫۵۸	۴۹٫۸۴	۵۳٫۲۱
TiO_2	۰٫۱۷	۰٫۴۷	۰٫۱۸	۰٫۲۱	۰٫۸۵	۰٫۵۵	۰٫۳۵	۰٫۸۸	۰٫۳۹	۰٫۲۸	۰٫۴۲	۱٫۱۹	۰٫۵۳	۱٫۱۷	۱٫۲۹	۰٫۳۸
Al_2O_3	۱٫۷۵	۳٫۶۹	۱٫۷۲	۳٫۰۳	۳٫۴۸	۴٫۶۵	۲٫۵۹	۴٫۸۱	۳٫۸۹	۳٫۱۵	۱٫۸۹	۳٫۳۲	۳٫۳۹	۵٫۴۸	۳٫۸۵	۱٫۷
Cr_2O_3	۰٫۲۶	۰٫۳۷	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۱۱	۰٫۵۴	۰٫۲۳	۰٫۵۹	۰٫۸۲	۰٫۶۹	۰٫۱۹	۰٫۴۵	۰٫۴۹	۰٫۷۶	۰٫۱۱	۰٫۵۱
FeOt	۵٫۲۵	۵٫۶۸	۳٫۶۹	۵٫۰۳	۸٫۷۸	۶٫۱۸	۵٫۸۳	۶٫۲۱	۴٫۵۶	۳٫۹۹	۵٫۵۲	۱۲٫۶۳	۶٫۰۹	۶٫۱۹	۹٫۱۹	۵٫۳۲
MnO	۰٫۱۵	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۳۵	۰٫۱۷	۰٫۱۹	۰٫۱۹	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۰٫۲۳	۰٫۳۲	۰٫۱۴	۰٫۱۶	۰٫۲۵	۰٫۱۵
MgO	۱۹٫۲۱	۱۶٫۵۶	۱۷٫۹۷	۱۷٫۱	۱۵٫۲۵	۱۵٫۳۵	۱۷٫۰۹	۱۶٫۱۴	۱۷٫۷۴	۱۷٫۸۲	۱۶٫۴۸	۱۵٫۱۱	۱۶٫۷۳	۱۵٫۵۹	۱۴٫۷۸	۱۸٫۷۵
CaO	۱۹٫۴۶	۲۱٫۵۵	۲۲٫۵۸	۲۱٫۵۵	۱۹٫۹۸	۲۲٫۰۹	۲۱٫۳۹	۲۱٫۲۳	۲۰٫۴۶	۲۱٫۵۶	۲۰٫۵۲	۱۶٫۸۷	۲۰٫۷۶	۲۰٫۸۹	۲۰٫۲۳	۱۹٫۶۴
Na_2O	۰٫۱۵	۰٫۲۲	۰٫۱۷	۰٫۲۱	۰٫۳۹	۰٫۲۳	۰٫۱۷	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۱۹	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۳۵	۰٫۳۴	۰٫۱۷
K_2O	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Total	۹۹٫۷۵	۱۰۰٫۰۲	۱۰۰٫۰۲	۹۹٫۹۵	۹۹٫۳۲	۹۹٫۵۵	۱۰۰٫۰۸	۱۰۰٫۶۴	۹۹٫۸۴	۱۰۰٫۱۷	۱۰۰٫۸۶	۹۹٫۷۶	۹۹٫۶۳	۱۰۰٫۱۹	۹۹٫۸۹	۹۹٫۸۴
Si (apfu)	۱٫۹۴۵	۱٫۸۸۶	۱٫۹۴۲	۱٫۹۱۷	۱٫۸۸	۱٫۸۵۱	۱٫۹۱۷	۱٫۸۴۵	۱٫۸۸۵	۱٫۹۰۴	۱٫۹۲۲	۱٫۸۷	۱٫۸۹۲	۱٫۸۲۷	۱٫۸۶۳	۱٫۹۴۵
Al^{IV} (T) (apfu)	۰٫۰۵۵	۰٫۱۱۴	۰٫۰۵۸	۰٫۰۸۳	۰٫۱۲	۰٫۱۴۹	۰٫۰۸۳	۰٫۱۵۵	۰٫۱۱۵	۰٫۰۹۶	۰٫۰۷۸	۰٫۱۳	۰٫۱۰۸	۰٫۱۷۳	۰٫۱۳۷	۰٫۰۵۵
Al^{VI} (M) (apfu)	۰٫۰۲	۰٫۰۴۶	۰٫۰۱۶	۰٫۰۴۸	۰٫۰۳۴	۰٫۰۵۵	۰٫۰۲۹	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۳	۰٫۰۴	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۸	۰٫۰۳۹	۰٫۰۶۵	۰٫۰۳۳	۰٫۰۲۱
Ti (apfu)	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۲۴	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱	۰٫۰۲۴	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۲	۰٫۰۳۴	۰٫۰۱۵	۰٫۰۳۲	۰٫۰۳۶	۰٫۰۰۵
Cr (apfu)	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۷	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲	۰٫۰۰۶	۰٫۰۱۳	۰٫۰۱۴	۰٫۰۲۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱۳
Fe^{2+} (apfu)	۰٫۱۶	۰٫۱۷۵	۰٫۱۱۳	۰٫۱۵۴	۰٫۲۷۵	۰٫۱۹۲	۰٫۱۷۹	۰٫۱۹۱	۰٫۱۳۹	۰٫۱۲۲	۰٫۱۶۹	۰٫۳۹۸	۰٫۱۸۸	۰٫۱۹۱	۰٫۲۸۷	۰٫۱۶۱
Mn (apfu)	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۵
Mg (apfu)	۱٫۰۴۵	۰٫۹۰۸	۰٫۹۷۷	۰٫۹۳۳	۰٫۸۵۳	۰٫۸۵۱	۰٫۹۳۵	۰٫۸۸۳	۰٫۹۶۷	۰٫۹۶۸	۰٫۹۰۲	۰٫۸۵	۰٫۹۲۱	۰٫۸۵۷	۰٫۸۲۴	۱٫۰۲۱
Ca (apfu)	۰٫۷۶۱	۰٫۸۴۹	۰٫۸۸۲	۰٫۸۴۵	۰٫۸۰۳	۰٫۸۸	۰٫۸۴۱	۰٫۸۳۵	۰٫۸۰۱	۰٫۸۴۱	۰٫۸۰۷	۰٫۶۸۲	۰٫۸۲۱	۰٫۸۲۵	۰٫۸۱	۰٫۷۶۸
Na (apfu)	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۲۸	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۲	۰٫۰۲۱	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۳	۰٫۰۳۲	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۵	۰٫۰۱۲
K (apfu)	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰	۰٫۰۰۱	۰	۰٫۰۰۱	۰	۰٫۰۰۱	۰	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰	۰
Wo (%)	۴۵٫۳	۴۶٫۷	۴۸٫۷	۴۷٫۵	۴۴٫۳	۴۶٫۶	۴۶٫۹	۴۶	۴۵٫۲	۴۶٫۷	۴۵٫۹	۴۲٫۵	۴۵٫۸	۴۶٫۲	۴۴٫۹	۴۵٫۱
En (%)	۴۸٫۲	۴۰٫۴	۴۴	۴۲٫۳	۳۷٫۴	۳۶٫۳	۴۱٫۷	۳۷٫۷	۴۴٫۱	۴۴	۴۱٫۸	۳۸٫۸	۴۱٫۲	۳۷٫۷	۳۶٫۸	۴۶٫۶
Fs (%)	۶٫۵	۱۲٫۹	۷٫۳	۱۰٫۲	۱۸٫۳	۱۷٫۱	۱۱٫۴	۱۶٫۳	۱۰٫۷	۹٫۳	۱۲٫۳	۱۸٫۷	۱۳	۱۶٫۱	۱۸٫۳	۸٫۳
Type	Diopside	Diopside	Diopside	Diopside	Augite	Diopside	Diopside	Diopside	Diopside	Diopside	Diopside	Augite	Diopside	Diopside	Augite	Diopside

سری ماگمایی و جایگاه تکتونوماگمایی بر اساس کانی

بررسی نمودارهای تمایز بر پایه ترکیب کلینوپیروکسن (شکل ۱۱-الف و ب)، نمونه‌ها را در قلمرو ساب‌آلکالن نشان می‌دهد. همچنین در نمودارهای تفکیک محیط تکتونوماگمایی (شکل ۱۱-پ و ت)، این کانی‌ها گرایش به محدوده بازالت‌های کمان آتشفشانی[1] نشان می‌دهند و از محدوده معمول بازالت‌های درون‌صفحه‌ای[2] فاصله می‌گیرند. اگرچه داده‌های سنگ‌کل ماهیت آلکالن دارند، اما این رفتار دوگانه کانی کلینوپیروکسن (شواهد ساب‌آلکالن در کانی در مقابل ماهیت آلکالن در سنگ‌کل) نشان‌دهنده «میراث فرورانش[3]» در منبع گوشته‌ای است. در واقع، ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن می‌تواند تا حد زیادی تحت تأثیر شیمی منبع گوشته لیتوسفری باشد که پیش‌تر در طی فرآیندهای فرورانش (احتمالاً نئوتتیس) متاسوماتیسم شده و اثر آن به‌صورت گرایش‌های کم‌تیتان، شواهد ساب‌آلکالن کلینوپیروکسن و افت نسبی Nb-Ta در الگوهای سنگ‌کل بازتاب یافته است (Agard et al., 2020).

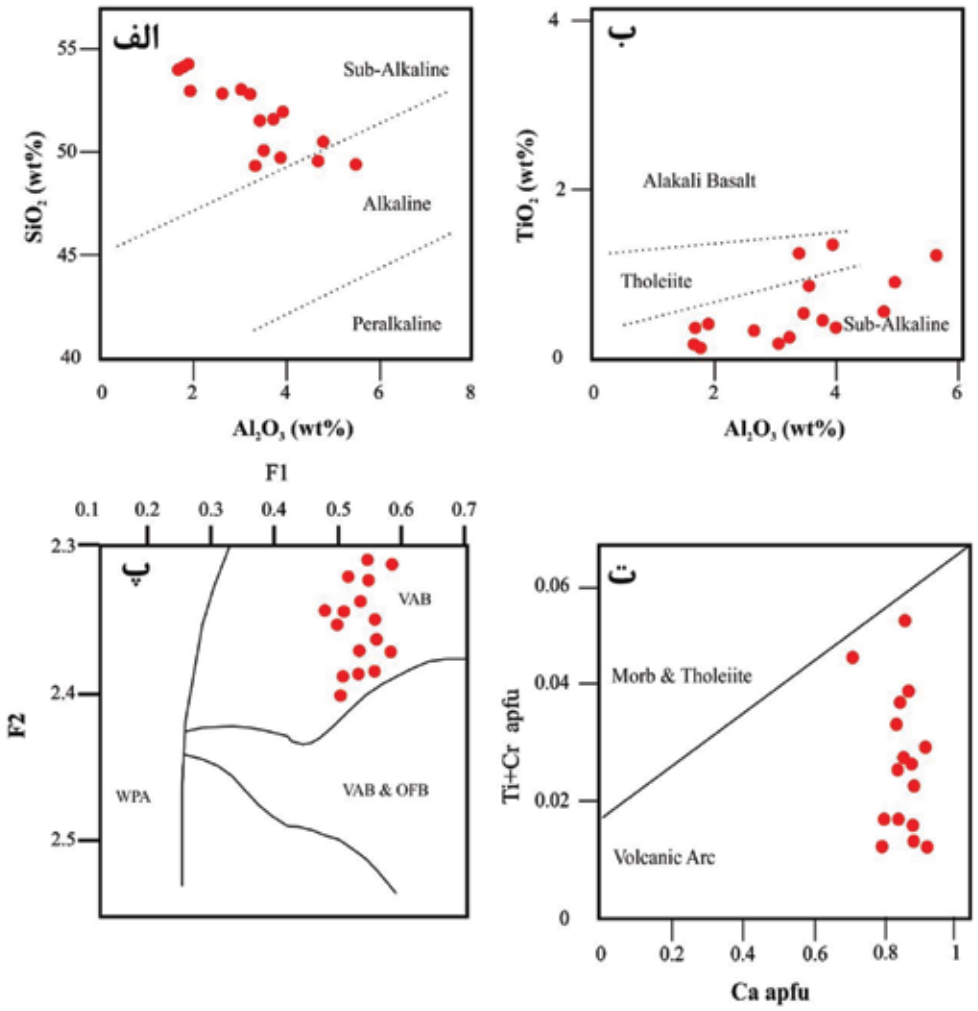
ترموبارومتری و شرایط تبلور

با استفاده از نمودارهای ترموبارومتری (شکل ۱۲)، شرایط تشکیل کانی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های دیوپسیدی که دارای عدد منیزیم بالاتر و میزان Cr بیشتری هستند، در دماهای بالاتر (بالاتر از ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشارهای تا اندازه‌ای بیشتر (اعماق میانی تا پایین پوسته) متبلور شده‌اند. این کانی‌ها نماینده مراحل اولیه تبلور در طی صعود ماگمای ابتدایی هستند (اثنی عشری و سرجوقیان، ۱۳۹۶). در مقابل، کلینوپیروکسن‌های با ترکیب اوژیت (مانند نمونه‌های S۵ و S۱۵) که با افزایش میزان Fe و کاهش Mg همراه هستند، در دماهای پایین‌تر و ترازهای پویای کم‌عمق‌تر (آشیانه ماگمایی فوقانی) تشکیل شده‌اند. این روند نزولی دما و فشار (از دیوپسید به اوژیت) به خوبی با مدل تبلور بخشی در حین صعود ماگما مطابقت دارد (Neave et al., 2022; Putirka and Busby, 2021).

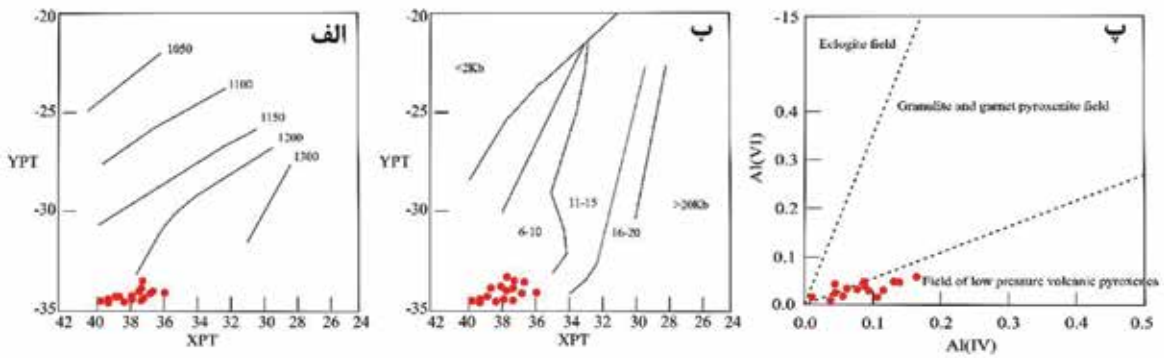
پیوند شیمی کانی با محیط تکتونوماگمایی گستره

تطبیق داده‌های کلینوپیروکسن با داده‌های سنگ‌کل، به‌ویژه افت نسبی Nb و Ta در نمودارهای چندعنصری، ناسازگاری ظاهری میان شیمی کانی و ترکیب سنگ‌کل را توضیح می‌دهد. ماگماتیسم سرایجوق در یک محیط پسابرخوردی کششی[4] رخ داده است که منجر به تولید ماگمای آلکالن شده است؛ اما این ماگما از یک منبع گوشته لیتوسفری متاسوماتیسم شده سرچشمه گرفته است. به همین دلیل، کلینوپیروکسن به‌عنوان ثبت‌کننده ژئوشیمیایی شرایط منبع و تکامل ماگما، ویژگی‌های ساب‌آلکالن و کمانی مرتبط با منبع متاسوماتیسم‌شده را نشان می‌دهد، در حالی که ترکیب سنگ‌کل، رژیم تکتونیکی زمان فوران کواترنری را منعکس می‌کند (Wang et al., 2021; Esna-Ashari et al., 2025).

1. VAB
2. WPA
3. Subduction Legacy
4. Post-collisional



شکل ۱۱. نمودارهای ژئوشیمیایی و تکتونوماگمایی کلینوپیروکسن‌های مورد پژوهش. موقعیت داده‌ها در نمودارهای ترکیبی کلینوپیروکسن، بیشتر با ترکیب‌های ساب‌آلکالن تا کم‌تیتان سازگار است و در نمودارهای تفکیک محیط تکتونیکی، گرایش آن‌ها به میدان بازالت‌های کمان آتشفشانی را نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها به‌عنوان بازتابی از میراث فرورانشی در منبع گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده تفسیر می‌شوند، نه لزوماً به معنی تشکیل ماگما در یک کمان فعال امروزی. میدان‌های تفکیکی بر اساس Leterrier et al.، (1982) و Nisbet and Pearce (1977) رسم شده‌اند



شکل ۱۲. الف و ب) برآورد دما و فشار تبلور کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از روابط ترموبارومتری تک‌کلینوپیروکسن (Putirka، 2008؛ Neave and Putirka، 2017). نتایج، بازه دمایی حدود ۱۰۲۰ تا ۱۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۴ تا ۱۰ کیلوبار را نشان می‌دهد و بیانگر تبلور در ترازهای پوسته میانی تا پایینی است. پ) تغییرات Al در کلینوپیروکسن به‌عنوان شاخصی نسبی از تغییرات فشار تبلور. پراکندگی داده‌ها نشان‌دهنده تبلور چندمرحله‌ای کلینوپیروکسن‌ها در ترازهای فشاری متفاوت طی صعود ماگما است

نتیجه‌گیری

بررسی‌های صحرایی، پتروگرافی، ژئوشیمی سنگ‌کل و شیمی کانی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی گستره سرایجوق، بخشی از ماگماتیسم آلکالن کواترنری در نیمه شمالی پهنه سنندج-سیرجان هستند که از یک ماگمای مافیک با درجات دگرسانی بسیار پایین سرچشمه گرفته‌اند. پایداری عناصر نامتحرک (HFSE و REE) و مقادیر اندک LOI، اعتبار داده‌های ژئوشیمیایی را برای تفسیرهای پتروژنتیکی پشتیبانی می‌کند.

الگوهای عناصر نادر خاکی (REE)، با غنی‌شدگی مشخص LREE نسبت به HREE و شیب ملایم در بخش عناصر سنگین، با ذوب‌بخشی درجه پایین، حدود ۲ تا ۶ درصد، از یک منبع گوشته لیتوسفری در محدوده گذار اسپینل-گارنت سازگار است. وجود افت نسبی تا ناهنجاری منفی ضعیف Nb و Ta در نمودارهای چندعنصری و نسبت‌های بالای La/Nb و Th/Yb، نشان‌دهنده یک «میراث فرورانش» در منبع ماگمایی است. این ویژگی‌ها بیانگر آن است که منبع گوشته لیتوسفری گستره پیش از ذوب‌بخشی، توسط سیالات یا مذاب‌های حاصل از فرورانش‌های قدیمی (احتمالاً نئوتتیس) متاسوماتیسم و غنی شده است. با این حال، ماهیت آلکالن سنگ‌کل و محیط ژئودینامیکی گستره، تولید این ماگماها را در یک رژیم کششی پسابرخوردی و احتمالاً در پاسخ به نازک‌شدگی لیتوسفر و/یا مشارکت حرارتی-دینامیکی آستنوسفر پشتیبانی می‌کند.

داده‌های شیمی کانی کلینوپیروکسن، ابعاد تازه‌ای از تکامل این سامانه را آشکار می‌سازد. ترکیب این کانی‌ها بیشتر در قلمرو دیوپسید (در مراحل اولیه و دمابالا) و اوژیت (در مراحل تکامل‌یافته‌تر) قرار می‌گیرد. قرارگیری کلینوپیروکسن‌ها در محدوده‌های ساب‌آلکالن و کمان‌های آتشفشانی در نمودارهای تمایز کانی، بازتابی از همان میراث متاسوماتیسم در منبع گوشته‌ای است که در ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها بازتاب یافته است. این تضاد ظاهری بین شیمی کانی و ماهیت سنگ‌کل، یکی از شواهد مهم برای پشتیبانی از پایه‌گیری ماگما از گوشته لیتوسفری دارای میراث ژئوشیمیایی فرورانش قدیمی در یک محیط تکتونوماگمایی کششی جدید است.

نتایج ترموبارومتری نشان‌دهنده یک تکامل ماگمایی چندمرحله‌ای است. کلینوپیروکسن‌های دیوپسیدی در دماهای بالاتر (بالاتر از ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و اعماق بیشتر متبلور شده‌اند، در حالی که انواع اوژیتی در طی فرآیند تفریق ماگمایی و در ترازهای پویای کم‌عمق‌تر پوسته شکل گرفته‌اند. تفریق محدود فازهای مافیک (الیوین و پیروکسن) و تعامل موضعی و محدود با سنگ‌های پوسته‌ای، که حضور انکلاوهای گنیسی از آن پشتیبانی می‌کند، از دیگر ویژگی‌های تکامل این ماگما در مسیر صعود از طریق گسل‌های عمیق گستره است.

در مجموع، بازالت‌های سرایجوق محصول بازفعال‌شدن گوشته لیتوسفری متاسوماتیسم‌شده در طی فازهای کششی کواترنری هستند. این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های ژئوشیمیایی این سنگ‌ها، ترکیبی از فرآیندهای ذوب‌بخشی در اعماق میانی، میراث ژئوشیمیایی فرورانش قدیمی و تکامل در آشیانه‌های ماگمایی چندمرحله‌ای است که پیوند میان دینامیک گوشته و تکامل ساختاری کمربند سنندج-سیرجان را روشن‌تر می‌سازد.

منابع

- اثنی عشری، ا.، سرجوقیان، ف.، ۱۳۹۶. سنگ‌های الترامافیک در بخش میانی پهنه سنندج-سیرجان و نقش آنها در ارزیابی شرایط فیزیکوشیمیایی زمان آغاز فرورانش. پترولوژی، ۸(۳۲): ۶۶-۴۵.
- باجلان، ع.، شریفی، م.، ۱۳۹۳. بررسی پتروگرافی و پترولوژی سنگهای آتشفشانی کواترنر قزل قلعه واقع در شمال شرق قروه. زمین‌شناسی اقتصادی، ۶(۲): ۳۲۹-۳۱۵.
- ترکیان، ا.، محبی، خ.، سپاهی، ع.، ۱۳۹۳. پترولوژی نفوذی‌های گابرو-دیوریتی در کوه پریشان، جنوب قروه استان کردستان. پترولوژی، ۶(۲۳): ۴۰-۲۷.
- خیرخواه، م.، ۱۳۹۴. ولکانیسم همزمان با برخورد کواترنری در شمال پهنه سنندج-سیرجان، ماگماتیسم در

یک فلات فعال کوهزایی. پترولوژی، ۶(۲۳): ۶۴-۴۵.

- صالحی، ن.، ترکیان، ا.، ۱۳۹۳. مطالعه پتروگرافی، ژئوشیمی و تعیین خاستگاه سنگ‌های بازالتی شمال‌شرق قروه (کردستان). پترولوژی، ۵(۱۹): ۵۲-۳۷.

- قادری، م.، عامل، ن.، موید، م.، ۱۴۰۱. شیمی کانی کلینوپیروکسن، رهیافتی بر پتروژنز کمپلکس آتشفشانی سارای-شمال غرب ایران. زمین‌شناسی ایران، ۱۶(۶۱): ۶۱-۴۵.

- مرادی، م.، طالع فاضل، ا.، ۱۴۰۳. بررسی شرایط سولفیداسیون و تحول سیال گرمابی در نحوه تشکیل رگه‌های کوارتز-سولفید± طلا کانسار موچش (جنوب کردستان): شواهد کانه‌زایی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار گوگرد. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۳): ۳۴-۱۷.

- مرادی، م.، اعلمی‌نیا، ز.، طالع فاضل، ا.، علیپور، ر.، ۱۳۹۸. منشا سیال کانه ساز و عوامل موثر در ته نشست طلا در کانسار داشکسن (شمال خاور قروه): شواهد ساختاری، ریزدماسنجی و ایزوتوپ‌های پایدار O-H. زمین‌شناسی ایران، ۱۳(۵۲): ۳۸-۱۹.

- نریمانی، ف.، مکی‌زاده، م.ع.، شریفی، م.، ۱۴۰۴. پهنه بازالت آلکالن دیرکلو- مهدی‌خان، نشانه‌ای از یک سازوکار کششی درون‌صفحه قاره‌ای کواترنری. پترولوژی، ۱۶(۱): ۵۰-۲۳.

- ویسی، س.، آسیابان‌ها، ع.، شهبازی، ح.، نصرآبادی، م.، ۱۳۹۴. انکلاوهای مخروط اسکوری قزلجه‌کند (شمال قروه): زینولیت یا کومولا؟. زمین‌شناسی ایران، ۹(۳۴): ۷۰-۵۱.

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F. (2020). Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and post-collisional tectonics. Earth-Science Reviews, 200: 102987.

- Akbari, M., Ghorbani, M.R., Cousens, B.L. and Graham, I.T. (2022). Quaternary post-collisional high Nb-like basalts from Bijar-Qorveh, NW Iran: A metasomatized lithospheric mantle source. Lithos, 426-427: 106781.

- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G. (2000). Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 102(1-2): 67-95.

- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Neill, I., Emami, M.H. and McLeod, C.L. (2013). Generation of arc and within-plate chemical signatures in collision zone magmatism: quaternary lavas from kurdistan province, Iran. Journal of Petrology, 54(5): 887-911.

- Azizi, H. and Moinevaziri, H. (2009). Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. Journal of Geodynamics, 47(3): 167-179.

- Azizi, H., Hadi, A., Asahara, Y. and Mohammad, Y.O. (2013). Geochemistry and geodynamics of the Mawat mafic complex in the Zagros Suture zone, northeast Iraq. Central European Journal of Geosciences, 5(4): 523-537.

- Berberian, M. and King, G.C.P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences, 18(2): 210-265.

- Boynton, W.V. (1984). Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.), Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, Amsterdam, 63-114.

- Esna-Ashari, A., Hassanzadeh, J., Langone, A., Sarjoughian, F. and Tiepolo, M. (2025). Can Nb-enriched arc basalts result from mixing of boninite and ocean island basalt magmas? A case study from Jurassic gabbroic rocks of western Iran (Sanandaj-Sirjan Zone). Journal of Asian Earth Sciences, 277: 106852.

- Ghasemi, A. and Talbot, C.J. (2006). A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). Journal of Asian Earth Sciences, 26(6): 683-693.

- Ghasemi, A., Mohajjel, M. and Alavi, M. (2024). Structural control on Quaternary magmatism in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 251: 105756.

- Hibbard, M.J. (1995). Petrography to

petrogenesis. Prentice Hall, New Jersey, 587 p.

- Jegal, Y., Ubide, T., Huertas, M.J., Herrera, R., Márquez, Á., Ancochea, E. and Coello-Bravo, J.J. (2025). Plagioclase antecrysts record syn-eruptive incorporation of evolved mush during the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Spain). Contributions to Mineralogy and Petrology, 180: 66.

- Kirkpatrick, R.J. (1975). Crystal growth from the melt: A review. American Mineralogist, 60(9-10): 798-814.

- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27(3): 745-750.

- Le Maitre, R.W. (Ed.) (2002). Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 236 p.

- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M. (1982). Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. Earth and Planetary Science Letters, 59(1): 139-154.

- Lustrino, M. and Wilson, M. (2007). The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province. Earth-Science Reviews, 81(1-2): 1-65.

- Lustrino, M. and Wilson, M. (2021). The origin of post-collisional magmatism: Insights from alkaline basalts. Earth-Science Reviews, 216: 103580.

- Moghadam, H.S., Stern, R.J. and Ghorbani, G. (2022). Neotethyan subduction to collision and post-collision evolution of Iran. Gondwana Research, 102: 12-34.

- Mollo, S., Ubide, T., Nazzari, M., Scarlato, P. and Hauri, E.H. (2021). Clinopyroxene-based thermobarometry: A review and new perspectives. Earth-Science Reviews, 216: 103584.

- Morimoto, N. (1988). Nomenclature of pyroxenes. Mineralogy and Petrology, 39(1): 55-76.

- Neave, D.A., Maclennan, J., Hartley, M.E., Edmonds, M. and Thordarson, T. (2014). Crystal storage and transfer in basaltic systems: the Skuggafjöll eruption, Iceland. Journal of Petrology, 55(12): 2311-2346.

- Neave, D.A. and Putirka, K.D. (2017). A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones. American Mineralogist, 102(4): 777-794.

- Neave, D.A., Putirka, K.D. and Namur, O. (2022). Clinopyroxene thermobarometry and magma storage conditions. Contributions to Mineralogy and Petrology, 177: 35.

- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A. (1977). Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. Contributions to Mineralogy and Petrology, 63(2): 149-160.

- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification. Lithos, 100(1-4): 14-48.

- Pearce, J.A. (2020). Geochemical discrimination diagrams: A critical review. Journal of Petrology, 61(1): egaa008.

- Philpotts, A.R. and Ague, J.J. (2009). Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 663 p.

- Putirka, K.D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. In: Putirka, K.D. and Tepley, F.J. (Eds.), Minerals, Inclusions and Volcanic Processes, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, Chantilly, 69(1): 61-120.

- Salehi, N., Torkian, A., Furman, T. and le Roux, P. (2023). Petrogenesis and geochemical characteristics of Plio-Quaternary alkali basalts from the Qorveh-Bijar volcanic belt, Kurd-

istan Province, NW Iran. Geological Magazine, 160(5): 888-904.

- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society, London, Special Publication, 42: 313-345.

- Ubide, T., Mollo, S., Zhao, J.X. and Nazzari, M. (2020). Magma dynamics revealed by clinopyroxene zoning patterns. Journal of Petrology, 61(7): egaa049.

- Verma, S.P. and Molaei-Yeganeh, T. (2022). Tectonic settings of the Plio-Quaternary volcanism in Iran from multidimensional and multielement solutions. Geological Journal, 57(2): 410-424.

- Wang, X., Hou, T., Wang, M. and Zhang, C. (2021). A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. European Journal of Mineralogy, 33(5): 621-637.

- Wang, Y.L., Zhang, C.J. and Xiu, S.Z. (2001). Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 413-421 (in Chinese with English abstract).

- Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. Unwin Hyman, London, 466 p.

- Winter, J.D. (2010). Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 702 p.

- Workman, R.K. and Hart, S.R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). Earth and Planetary Science Letters, 231(1-2): 53-72.

- Xia, Y.S., Sun, G.C., Wen, G., Qin, L., Xu, Q.Y., Dai, L.Q. and Zhao, Z.F. (2023). Recycling of continental crust materials: Geochemical constraints from post-collisional alkaline intrusive rocks in the Dabie orogen. Lithos, 454-455: 107278.