



Research Article

Investigation of the formation processes in the mafic enclaves of Naqadeh plutonic rocks assemblage by zircon U-Pb dating, Sr-Nd isotopic ratios, and amphibole composition

Seyed Ali Mazhari*, Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Payame Noor University, 19395-4697 Tehran, Iran
s_mazhari@pnu.ac.ir

Abstract

Naqadeh intrusive pluton is composed of two distinct sections of felsic (40 Ma age) and mafic (99 Ma age) rocks. The granitoid rocks of Naqadeh pluton have different types of mafic enclaves, including mafic microgranular enclaves (MME) and quartz + amphibole bearing enclaves. The MME has the same age to its host granitoids and could be divided into two types. The first type has similar Sr-Nd composition to the host rock ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7062$ and $\epsilon\text{Nd}_i = -0.89$), and their trace amphibole composition is like host granitoids. These enclaves are cogenetic with the granitoid magma and formed by early crystal-melt segregations. Another type of MME shows the textural evidence of magma mixing and is characterized by different isotopic ratios from granitoids ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7042$ and $\epsilon\text{Nd}_i = +2.98$). The trace element composition of this type of enclave is completely different from the other enclaves and the host rocks. The quartz + amphibole bearing enclave formed contemporaneous with mafic rocks of Naqadeh pluton (99 Ma), and displays the same isotopic ratios and amphibole composition.

Key words: mafic enclave, amphibole, isotopic ratio, trace elements, Naqadeh, Sanandaj-Sirjan Zone

* Corresponding author



بررسی فرایندهای پیدایش انکلاوهای مافیک در مجموعه سنگ‌های آذرین درونی نقره با به‌کارگیری سن‌سنجی U-Pb زیرکن، نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd و ترکیب آمفیبول

سید علی مظهري*، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران 4697-19395، ایران
s_mazhari@pnu.ac.ir

چکیده

مجموعه سنگ‌های توده آذرین درونی نقره از دو بخش سنگ‌های فلسیک (به سن ائوسن، نزدیک به 40 میلیون سال پیش) و مافیک (به سن کرتاسه، نزدیک به 99 میلیون سال پیش) تشکیل شده است. انواع انکلاوهای مافیک در گرانیتوئیدهای نقره دیده می‌شوند شامل انکلاوهای میکروگرانولار مافیک (MME) و انکلاوهای کوارتز و آمفیبول دار هستند. انکلاوهای MME همزمان با گرانیتوئیدهای میزبان پدید آمده‌اند و خود به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند. گروه نخست نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd همانند سنگ میزبان دارند ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/7062$ و $0/89$ - ϵNd_i) و ترکیب عنصرهای کمیاب آمفیبول‌ها در این نوع انکلاوها همانند گرانیتوئیدهای میزبان است. این انکلاوها همزاد با ماگمای گرانیتوئیدی هستند و حاصل جدایش اولیه بلور-مذاب هستند. گروه دیگر، انکلاو MME است که شواهد بافتی از آمیزش ماگمایی نشان می‌دهد و نسبت‌های ایزوتوپی آن از گرانیتوئیدها متفاوت است ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/7042$ و $\epsilon\text{Nd}_i=+2/98$). ترکیب عنصرهای کمیاب آمفیبول در این نوع انکلاو با دیگر انکلاوها و سنگ‌های میزبان کاملاً متفاوت است. انکلاو متشکل از کوارتز + آمفیبول همزمان با سنگ‌های مافیک نقره (99 میلیون سال پیش) پدید آمده و ویژگی‌های ایزوتوپی و ترکیب آمفیبول‌های آن نیز همانند آنهاست.

واژه‌های کلیدی: انکلاو مافیک، آمفیبول، نسبت ایزوتوپی، عنصرهای کمیاب، نقره، پهنه‌سنندج-سیرجان

مقدمه

(Zhao *et al.*, 2021). بررسی‌های بسیاری که در دهه‌های اخیر روی انکلاوها انجام شده‌اند، فرضیه‌های متعددی را برای پیدایش آنها مطرح کرده‌اند. مهم‌ترین سازوکار در نظر گرفته‌شده برای پیدایش انکلاوهای گرانیتوئیدها، به‌ویژه انکلاوهای مافیک میکروگرانولار (MME)، آمیزش ماگمایی است (Dadfar *et al.*, 2019)؛

انکلاوهای مافیک که در سنگ‌های آذرین درونی به‌ویژه گرانیتوئیدهای کالک‌آلکان بسیار رایج هستند و شاخص‌های مهمی برای تعیین خاستگاه و فرایندهای مختلف دخیل در تحول ماگما به‌شمار می‌روند و حتی در تعیین محیط ژئودینامیکی به‌کار گرفته می‌شوند

* نویسنده مسئول

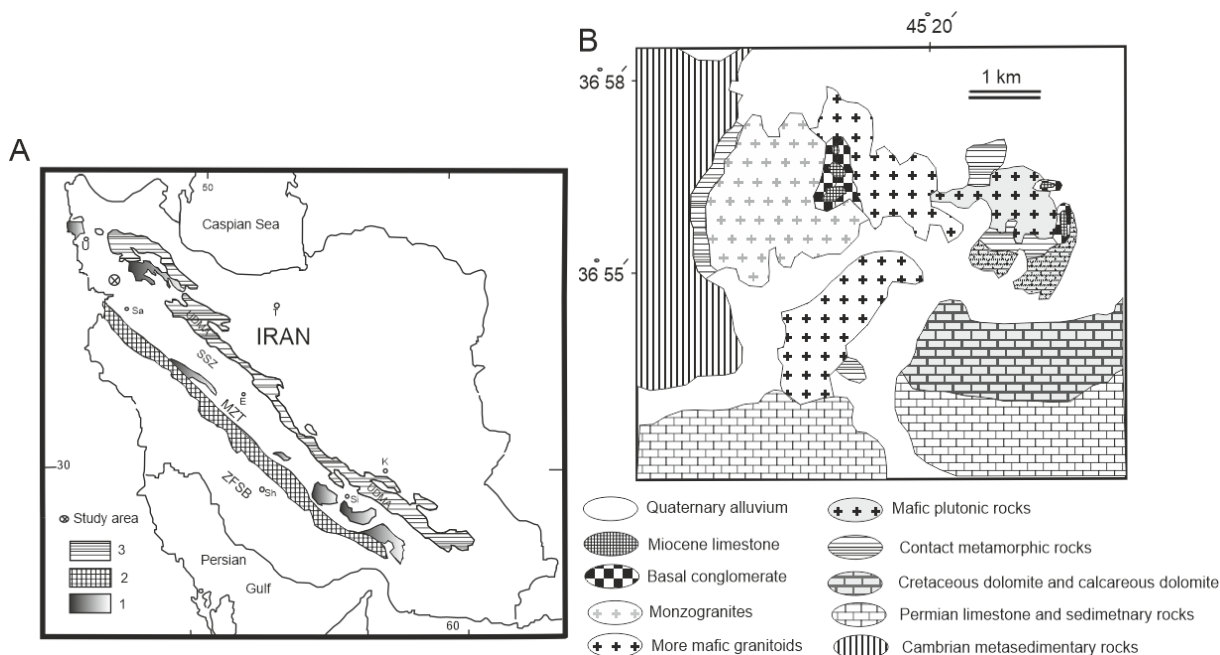
سنگ‌زایی انکلاوها مؤثر است. از این‌رو، در این پژوهش، ترکیب عنصرهای اصلی و کمیاب آمفیبول در انواع انکلاو و سنگ میزبان آنها تعیین و تجزیه و تحلیل می‌شود تا کاربرد مقایسه ترکیب آمفیبول در انکلاو و سنگ میزبان برای تعیین سرشت انکلاوهای مافیک سنگ‌های گرانیتوئیدی ارزیابی شود.

جایگاه زمین‌شناسی و زایش سنگ‌های آذرین درونی

مجموعه آذرین درونی نقده به‌صورت استوک‌های کوچک در منطقه‌ای به گستردگی نزدیک به 20 کیلومتر مربع در شمال‌باختری پهنه سنندج- سیرجان رخمنور یافته است (شکل 1). توپوگرافی ناحیه دشت‌مانند است و سنگ‌های آذرین درونی در ارتفاع پایین پدیدار شده‌اند؛ از این‌رو، دسترسی به آنها کار دشواری نیست. این سنگ‌های درونی را سنگ‌های رسوبی کامبرین، پرمین و کرتاسه فراگرفته‌اند (Khodabandeh and Soltani, 1994). در بیشتر نقاط مرز میان توده‌های آذرین درونی و سنگ میزبان با نهشته‌های کواترنری پوشیده شده است و ارتباط صحرائی میان این دو مشخص نیست. البته سنگ‌های دگرگونی همبری در برخی مناطق رخمنور دارند و ضخامت هورنفلس‌ها در حاشیه‌های باختری مجموعه آذرین درونی (در نزدیکی سنگ‌های رسوبی پرمین) به چند صد متر می‌رسند (شکل 1-B). در مرکز مجموعه آذرین درونی، کنگلومرا و سنگ آهک‌های میوسن روی سنگ‌های گرانیتی را پوشانده‌اند که آنها را به‌سازند قم نسبت می‌دهند (Khodabandeh and Soltani, 1994). قطعه‌هایی از گرانیت‌ها در آهک‌های میوسن دیده می‌شوند و هیچ‌گونه دگرگونی در مرز آهک‌ها با مجموعه آذرین درونی دیده نمی‌شود. این شواهد نشان‌دهنده جوان‌تر بودن آهک‌ها نسبت به سنگ‌های آذرین درونی هستند.

یعنی این انکلاوها گلبول‌هایی از ماگمای مافیک‌تر هستند که به درون ماگمای فلسیک تزریق شده و با آن درآمیخته‌اند (مانند: Vernon, 1984; Shakiba and Sepahi-Gerow, 2021; Eyuboglu et al., 2017). افزون بر این، الگوهای مختلف دیگری نیز برای پیدایش این انکلاوها پیشنهاد شده است که از آن میان آنها می‌توان قطعات سنگ‌های دگرگونی دیرگداز و بازمتبلور شده یا بازمانده‌هایی از سنگ خاستگاه ماگمای گرانیتی (White et al., 1999)، زنولیت‌های سنگ دیواره (Maas et al., 1997) و سازوکارهای جدایش بلور-مایع در یک ماگمای مادر (Dahlquist, 2002) را نام برد.

با اینکه انواع انکلاوهای مافیک در ماگماهای گرانیتی ویژگی‌های مشترکی دارند، اما شناخت خاستگاه و الگوی پیدایش آنها کارچندان ساده‌ای نیست. در این پژوهش، انکلاوهای گوناگون مجموعه سنگ‌های آذرین درونی نقده بررسی شده‌اند که از مجموعه توده‌های آذرین درونی شمال‌باختری پهنه سنندج- سیرجان به‌شمار می‌روند. بررسی‌های پیشین روی این مجموعه آذرین درونی نشان‌دهنده فازهای گوناگون ماگمایی با سن‌های متفاوت کرتاسه و ائوسن با انکلاوهای مافیک فراوان با بافت و ویژگی‌های گوناگون هستند (Mazhari, 2008; Mazhari et al., 2011a, 2011b). در این پژوهش، سن و نسبت‌های ایزوتوپی این انکلاوها تعیین و بررسی می‌شود. این داده‌ها خاستگاه متفاوت انکلاوها در مجموعه آذرین درونی نقده را نشان می‌دهند که ارائه الگوی یکسان برای پیدایش انکلاوهای مافیک حتی در توده‌های کوچک را به‌خوبی رد می‌کنند. از آنجایی که آمفیبول کانی اصلی در این انکلاوهای مافیک است، بررسی آن در انکلاوها و مقایسه آن با ترکیب این کانی در سنگ میزبان در تعیین



شکل 1- A) موقعیت مجموعه آذرین درونی نقره در واحدهای زمین‌شناسی ایران (تصحیح شده پس از (Ghasemi and Talbot (2006) ZFSB) کمر بند چین‌خورده ساده زاگرس؛ MTZ: تراست اصلی زاگرس؛ SSZ: پهنه سنندج- سیرجان؛ 1: نواحی پرکامبرین؛ 2: پهنه تراست زاگرس؛ 3: مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر؛ B) نقشه ساده زمین‌شناسی مجموعه آذرین درونی نقره (برگرفته از (Khodabandeh and Soltani (1994).

پهنه سنندج- سیرجان پدید آمده‌اند (مانند: Mazhari *et al.*, 2009; Fazlnia and Pahlavani, 2018; Azizi *et al.*, 2018; Mazhari *et al.*, 2020). این سنگ‌های فلسیک شامل دو فاز گرانیتوئیدی هستند. فاز اصلی که حجم اصلی مجموعه آذرین درونی را در بر می‌گیرد و از آن به نام گرانیتوئیدهای مافیک‌تر (MMG) یاد می‌شود، گستره ترکیبی به نسبت متنوعی دارد (گرانودیوریت، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت) و داده‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده خاستگاه متابازالتی آنها هستند. صعود بازالت‌های تولیدشده در عمق می‌تواند از سمت پایین گرمای لازم برای ذوب پوسته آمفیبولیتی را فراهم کند و ماگمای گرانیتی را پدید آورد. پس از آن، فرایندهای سیستم باز فعال بوده است و برهم‌کنش میان ماگماهای فلسیک و مافیک سنگ‌های MMG به همراه انکلاوهای میکروگرانولار مافیک را پدید آورده است. البته جدایش بلورین که همراه با آمیزش

مجموعه آذرین درونی نقره از دو بخش سنگ‌های مافیک و فلسیک تشکیل شده است. سنگ‌های مافیک گستردگی اندکی (نزدیک به 20 درصد از حجم مجموعه) دارند و تنها در بخش‌های خاوری مجموعه آذرین درونی دیده می‌شوند (شکل 1-B). آنها دیوریت و گابرو-دیوریت متراکم بی‌هیچگونه جهت‌یافتگی ماگمایی یا دگرریختی ساختاری هستند. در بیشتر موارد هوازدگی و دگرسانی بر آنها اثر گذاشته‌اند؛ اما نمونه‌های سالمی را نیز می‌توان یافت و برداشت کرد. سن این سنگ‌ها نزدیک به 99 میلیون سال پیش است و از گواشته سنگ‌کره‌ای غنی‌شده در بالای ورقه فرورونده در هنگام فرورانش نئوتتیس به زیر ایران خاستگاه گرفته‌اند (Mazhari *et al.*, 2011b).

سنگ‌های فلسیک مجموعه آذرین درونی نقره سن ائوسن (نزدیک به 40 میلیون سال پیش) دارند و همزمان با پیدایش بسیاری از توده‌های دیگر (مانند: پیرانشهر، سردشت، بانه و مریوان) در شمال

جدول 1- سن و نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd در سنگ‌های گوناگون مجموعه آذرین درونی نقده (Mazhari, 2008; Mazhari *et al.*, 2011a).

Sample ID	N38	N2	N82	N104
Rock name	monzogranite	granodiorite	monzodiorite	diorite-gabbro
Age (Ma)	40.8 ± 0.8	40.6 ± 1.5	41.5 ± 1.2	98.9 ± 1.4
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i	0.70864	0.70681	0.70665	0.70423
εNd _t	-4.26	-1	-0.57	3.82
T _{DM} (Ga)	1.29	1.11	1.05	0.75

برای تعیین سن انکلاوها به روش U-Pb زیرکن، دانه‌های زیرکن از نمونه‌ها به روش مرسوم مایعات سنگین و مغناطیسی جدا شد. ریخت‌شناسی درونی بلورهای زیرکن پیش از تجزیه ایزوتوپی U-Pb با تصویرهای کاتادلومینسانس بررسی شد. تجزیه سن‌سنجی با تجهیزات Agilent 7700x ICP-MS (سری Resonetics Resolution M-50) و سیستم کاهنده لیزری 193 nm انجام شد. روش انجام آنالیز و جزییات استانداردهای به‌کاررفته به روش پیشنهادی Mazhari و همکاران (2019) بوده است.

نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd سه نمونه انکلاو مافیک گرانیتوئیدهای نقده با یک طیف‌سنج جرمی حرارتی - یونیزاسیون Finningan MAT 262 در آزمایشگاه Actlabs کانادا به‌دست آورده شدند. مراحل انجام کار و استانداردهای به‌کاررفته به روش پیشنهادی Mazhari و همکاران (2019) بوده است.

برای تعیین ترکیب آمفیبول‌ها، از سنگ‌های میزبان و انکلاوها و نیز نمونه گابرو-دیوریتی نقده مقاطع نازک صیقلی تهیه شدند. درصدوزنی اکسیدهای اصلی آمفیبول‌ها به روش EPMA و میزان عنصرهای کمیاب به روش LA-ICP-MS اندازه‌گیری شدند. تجزیه

ماگمایی روی داده است، پیدایش سنگ‌های گوناگون این واحد از کوارتز دیوریت تا گرانودیوریت را به‌دنبال داشته است (Mazhari, 2008). انکلاوهای مافیک به‌ویژه MME (انکلاوهای مافیک میکروگرانولار) در گرانیتوئیدهای MMG به‌فراوانی دیده می‌شوند. البته به جز اندازه ریز کانی‌ها، دیگر ویژگی‌های بافتی انکلاوهای MME در نمونه‌های مختلف MMG یکسان نیست. در بخش‌های بعدی به این ویژگی بیشتر پرداخته خواهد شد. فاز دوم فلسیک در مجموعه آذرین درونی نقده مونزوگرانیت‌های لوکوکرات با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی متفاوت از MMG هستند. این سنگ‌ها در پی فرایندهای ذوب‌بخشی آبدار سنگ‌های مافیک و هضم سنگ‌های رسوبی پدید آمده‌اند (Mazhari *et al.*, 2011a). انکلاوهای مافیک در مونزوگرانیت‌های نقده کمیاب و منحصر به انکلاوهای مافیک کوارتز و آمفیبول‌دار هستند که در ادامه بررسی خواهند شد.

روش انجام پژوهش

همان‌گونه‌که پیشتر گفته شد، سنگ‌زایی سنگ‌های آذرین درونی نقده در بررسی‌های پیشین بررسی شده است (Mazhari, 2008; Mazhari *et al.*, 2011a, 2011b). سن و نسبت‌های ایزوتوپی سنگ میزبان این انکلاوها به‌همراه واحد گابرو-دیوریتی مجموعه آذرین درونی نقده در جدول 1 آورده شده‌اند. برای این پژوهش سه نوع نمونه از انکلاوهای مافیک گوناگون در این مجموعه آذرین درونی برگزیده شد. این سه انکلاو شامل دو MME از واحد MMG در سنگ میزبان‌های گرانودیوریتی (نمونه En2) و مونودیوریتی (نمونه En82) و یک انکلاو کوارتز و آمفیبول‌دار در سنگ میزبان مونزوگرانیتی (نمونه En38) هستند.

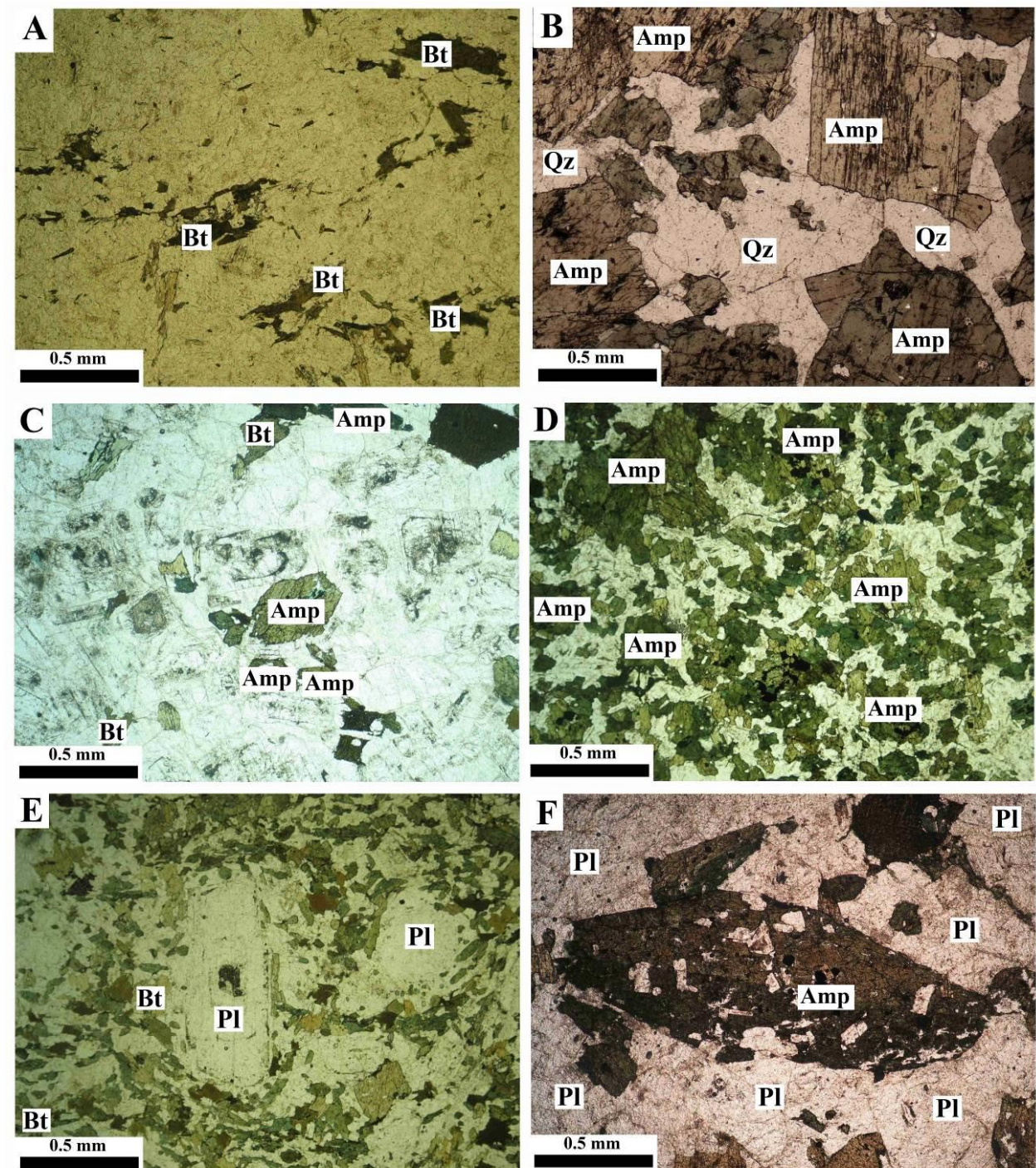
فرعی رایج هستند و زیرکن، آلانیت، مونازیت و پیریت گهگاه یافت می‌شوند (شکل 2-C). گرانیتویدهای این واحد در مجموعه آذرین درونی نرده انکلاوهای میکروگرانولار مافیک (MME) فراوانی دارند. انکلاوها اندازه متفاوتی دارند و به شکل‌های گوناگون دیده می‌شوند؛ هرچند بیشتر آنها از 50 سانتیمتر کوچک‌تر هستند. اگرچه انکلاوهای MME در همه گرانیتویدهای MMG یافت می‌شوند، اما ترکیب و تمرکز آنها در بخش‌های مختلف مجموعه آذرین درونی متفاوت است. کانی‌شناسی انکلاوهای MME شبیه به سنگ میزبان‌شان است؛ اما بافت ریزدانه و درصد مودال بالای (80-50 درصد حجمی) از کانی‌های مافیک (بیشتر آمفیبول و به مقدار بسیار کمتر بیوتیت و کلینوپیروکسن) دارند. ویژگی‌های بافتی در انکلاوهای MME مجموعه آذرین درونی نرده یکسان نیست. در برخی انکلاوهای MME (به‌ویژه آنهایی که در سنگ‌های میزبان گرانودیوریتی هستند)، تنها تفاوت بافتی در صد بالاتر کانی‌های مافیک به‌ویژه آمفیبول است و روابط بافتی مانند منطقه‌بندی پیچیده پلاژیوکلازها، آپاتیت‌های سوزنی و اوبیکوکرست‌های پتاسیم‌فلسپار دیده نمی‌شوند (شکل 2-D). از سوی دیگر، دیگر انکلاوهای میکروگرانولار مافیک (بیشتر در سنگ میزبان‌های مافیک‌تر موزودیوریتی) روابط بافتی پیچیده دارند (شکل 2-E). در این انکلاوها فنوکریست‌های پلاژیوکلاز منطقه‌بندی‌شده غیرتعدالی به شکل‌های گوناگون مانند بافت‌های جعبه-سلولی (اسکلتی) یا اسفنج-سلولی (شانه‌سلی) یافت می‌شوند که این ویژگی شاخص آمیزش ماگمایی دانسته شده است (Hibbard, 1991; Gagnevin *et al.*, 2004). آپاتیت سوزنی به‌همراه اوبیکوکرست‌های کوارتز و پتاسیم‌فلسپار ذرات ریز پلاژیوکلاز را فراگرفته‌اند که این از دیگر ویژگی‌های MME در مجموعه آذرین درونی نرده است و نشانه‌ای از آمیزش ماگمایی و ماگماهای هیبریدی دانسته می‌شود

EPMA در دانشگاه گرانا با دستگاه ریزکوالکترونی CAMECA SX100 انجام شد. برای این تجزیه ولتاژ شتاب‌دهنده 20 kV و جریان 20nA بود. ترکیب عنصرهای کمیاب آمفیبول در آزمایشگاه Actlabs کانادا به‌دست آورده شد. عنصرهای کمیاب آمفیبول در مقاطع نازک صیقلی با لیزر 213 نانومتر New Wave Research که به دستگاه Thermo Finnigan-High Resolution ICP-MS متصل بود، تعیین شدند. نقاط مشخص شده‌ای از بلورها با انرژی 0/07 mJ در 10 و به قطر 75 μm تجزیه شدند. روش و مراحل این کار برپایه روش پیشنهادی Liang و همکاران (2018) انجام شد.

سنگ‌نگاری انکلاوهای مافیک و سنگ میزبان

سنگ‌های واحد موزوگرانیتی رنگ روشن دارند و فراوانی کانی‌های مافیک در بیشتر آنها از 10 درصد حجمی کمتر است. در حقیقت، بیوتیت تنها کانی مافیک اصلی است و اکسیدهای آهن-تیتانیم به‌صورت کانی فرعی یا کمیاب در آنها دیده می‌شوند. آمفیبول در این واحد دیده نمی‌شود (شکل 2-A). بیشتر موزوگرانیتهای انکلاوی ندارند و تنها در چند رخمون از این سنگ‌ها انکلاوهای کوارتز و آمفیبول‌دار دیده می‌شوند (شکل 2-B). کوارتز و آمفیبول تنها کانی‌های این انکلاوها هستند که این ترکیب کانی‌شناسی چندان شبیه سنگ‌های آذرین نیست. گرانیتویدهای MMG تنوع چشمگیری دارند و ترکیب آنها در بازه ترکیبی گرانودیوریت، کوارتز موزودیوریت و موزودیوریت تغییر می‌کند. کانی‌های پلاژیوکلاز (39-28 درصد حجمی)، آمفیبول (14-33 درصد حجمی)، بیوتیت (20-8 درصد حجمی)، کوارتز (22-1 درصد حجمی) و پتاسیم‌فلسپار (16-8 درصد حجمی) از کانی‌های اصلی سازنده آنها هستند. ایلمنیت، مگنتیت، آپاتیت و تیتانیت نیز از کانی‌های

(Mazhari, 2008).



شکل 2- نمای کلی از بافت انکلاوهای مافیک و سنگ‌های مجموعه آذرین درونی نقره. (A) نمونه موزوگرانیته که بیوتیت تنها کانی مافیک آن است؛ (B) انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول که در سنگ میزبان موزوگرانیته دیده می‌شود؛ (C) نمونه‌ای از گرانودیوریت‌های واحد MMG؛ (D) انکلاو میکروگرانولار مافیک درون سنگ میزبان گرانودیوریتی (درصد بالای کانی مافیک به‌ویژه آمفیبول به همراه کانی‌های فلسیک بدون نشانه‌ای از آمیزش ماگمایی در این انکلاوها دیده می‌شود)؛ (E) انکلاو میکروگرانولار مافیک در نمونه موزوادیوریتی به همراه پلاژیوکلازهای دارای منطبق‌بندی پیچیده و شواهد بافتی آمیزش ماگمایی؛ (F) نمونه‌ای از دیوریت‌های واحد مافیک مجموعه آذرین درونی نقره (همه تصاویرها در نور PPL گرفته

شده‌اند. نام اختصاری کنایه‌ها از Whitney و Evans (2010) برگرفته شده است.

را قطع می‌کند (بر پایه 12 تجزیه نقطه‌ای با $0/04 = MSWD$ ؛ شکل 4-C).



شکل 3- تصویرهای کاتادلومینسانس و سن‌های U-Pb از تجزیه نقطه‌ای بلورهای منتخب زیرکن در نمونه انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره (En2: انکلاو MME در سنگ میزبان گرانودیوریتی؛ En82: انکلاو MME در سنگ میزبان مونزودیوریتی؛ En38: انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول در سنگ میزبان مونزوگرانیته).

داده‌های ایزوتوپی Sr و Nd برای نمونه‌های منتخب انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره در جدول 3 آورده شده‌اند. مقدار نسبت‌های اولیه ($\epsilon Nd_t, \delta Sr^{86} Sr_t$) با استفاده از سن U-Pb زیرکن‌های هر نمونه به دست آورده شد. انکلاو MME در سنگ میزبان گرانودیوریتی (نمونه

سن سنجی U-Pb زیرکن و نسبت‌های ایزوتوپی Nd-Sr انکلاوهای مافیک

بیشتر بلورهای زیرکن انتخاب‌شده از انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره شفاف و شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار، با رنگ‌های متفاوت از زرد تا قهوه‌ای روشن هستند. طول آنها نزدیک به $100 - 250 \mu m$ و نسبت درازا/پهنای آنها از 1:1 تا 1:4 در نوسان است (شکل 3). نسبت‌های بالای $Th/U (1/6 - 0/2)$ ؛ جدول (2) در بلورهای زیرکن نشان‌دهنده‌ی خاستگاه ماگمایی آنهاست (Hoskin and Black, 2000). این بلورهای زیرکن در تصویر کاتادلومینسانس منطقه‌بندی نوسانی و بخشی یا ساختارهای باندی نشان می‌دهند که از آنها به نام ساختارهای درونی شاخص رشد زیرکن ماگمایی از مذاب یاد شده است (Corfu *et al.*, 2003). داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه بلورهای زیرکن در جدول 2 آورده شده‌اند.

یازده نقطه از زیرکن‌های انکلاو MME در سنگ میزبان گرانودیوریتی (نمونه En2) تجزیه شدند. سن قطع‌شدگی در منحنی سازگاری و دریل¹ $39/0 \pm 8/3$ میلیون سال پیش ($MSWD = 0/7$) را برای سن این انکلاو نشان می‌دهد (شکل 4-A).

چهارده تجزیه نقطه‌ای از زیرکن‌های انکلاو MME در سنگ میزبان مونزودیوریتی (نمونه En82) نیز سن‌های $^{206}Pb/^{238}U$ هماهنگ در بازه زمانی 32-49 میلیون سال پیش با منحنی سازگاری $40/5 \pm 0/3$ میلیون سال پیش ($MSWD = 4/9$) را پیشنهاد می‌کند که بهترین برآورد برای سن پیدایش این انکلاو است (شکل 4-B).

نمونه انکلاو کوارتز مونزونیتی (En38) منحنی سازگاری و دریل را در $99/0 \pm 1/0$ میلیون سال پیش

¹ Wetherill

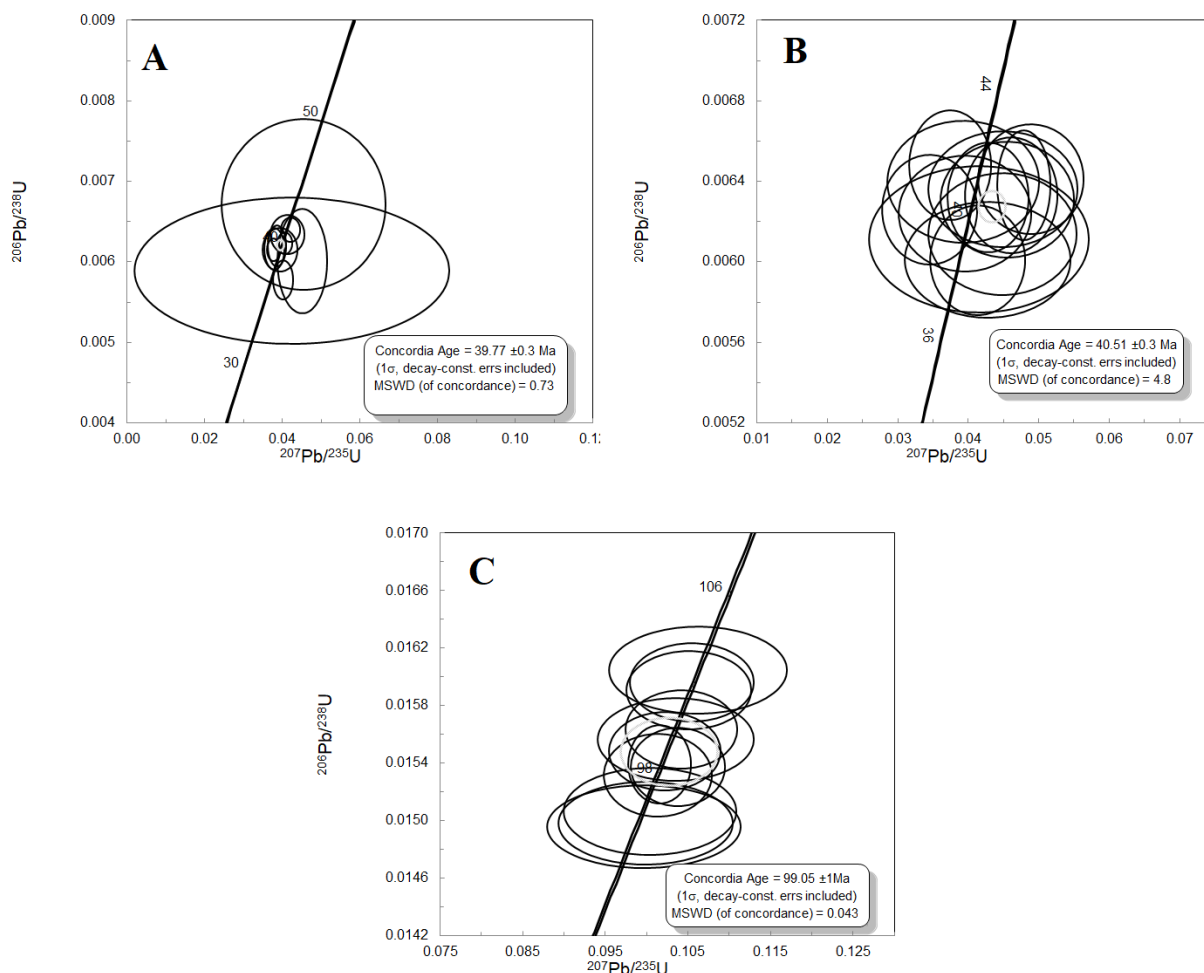
دارد که نشان می‌دهد از منبعی تهی‌شده‌تر خاستگاه گرفته است. داده‌های ایزوتوپی نمونه انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0/7047$ ، $\epsilon\text{Nd}_i = +3/29$ و Ga $T_{\text{DM}} = 0/705$) همانند سنگ‌های مافیک مجموعه آذرین درونی نقده است (جدول‌های 1 و 3 را مقایسه کنید).

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (En2) به نسبت بالا (0/7062) و ϵNd_i کمتری (-0/89) دارد. سن مدل گوشته تهی‌شده Nd در این نمونه از دیگر انکلاوها بیشتر است ($T_{\text{DM}} = 1/014$ Ga). نمونه En82 نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ کمتر (0/7042)، ϵNd_i بیشتر (+2/98) و سن مدل جوان‌تری (0/667 Ga)

جدول 2- داده‌های U-Pb در بلورهای زیرکن نمونه‌های انکلاو مافیک مجموعه آذرین درونی نقده (En2: انکلاو MME در سنگ میزبان گرانودیوریتی؛ En82: انکلاو MME در سنگ میزبان مونزودیوریتی؛ En38: انکلاو دارای کوارتز و آمفیبول در سنگ میزبان مونزوگرانییتی).

Spot No.	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age	1σ
En2-1	0.04442	0.0008	0.03764	0.0011	0.00615	0.00009	454	1945	0.23	42.6	0.9	40.2	1.4
En2-2	0.0477	0.0013	0.0421	0.0017	0.0064	0.0001	359	1105	0.32	41.0	0.7	41.3	0.4
En2-3	0.04729	0.0009	0.04062	0.0012	0.00623	0.00009	1207	5806	0.21	42.8	1.0	40.6	1.1
En2-4	0.04912	0.002	0.04547	0.0139	0.00671	0.0007	592	1593	0.37	42.2	1.2	42.7	0.8
En2-5	0.04652	0.0022	0.03943	0.0029	0.00615	0.00018	518	1570	0.33	40.0	0.4	39.7	0.5
En2-6	0.05221	0.0105	0.04241	0.0268	0.00589	0.0006	846	2686	0.31	41.0	1.3	38.3	0.7
En2-7	0.04519	0.0009	0.03865	0.0016	0.0062	0.00017	255	934	0.27	40.9	1.2	39.6	0.5
En2-8	0.0505	0.0011	0.04023	0.0017	0.00578	0.00016	473	1247	0.38	41.1	1.4	36.9	0.6
En2-9	0.04463	0.001	0.03793	0.0017	0.00616	0.00017	407	1604	0.25	41.5	0.7	40.4	0.8
En2-10	0.05449	0.0009	0.04514	0.0042	0.00601	0.00043	1319	3950	0.33	41.8	0.9	39.2	0.9
En2-11	0.04732	0.0025	0.04136	0.0029	0.00634	0.00016	549	1376	0.4	41.6	1.3	40.8	0.7
En82-1	0.05452	0.0016	0.04788	0.0025	0.00638	0.00018	467	857	0.54	41.7	1.5	41.1	1.0
En82-2	0.05284	0.0036	0.04609	0.0043	0.00633	0.00019	190	411	0.46	42.1	1.8	39.8	1.2
En82-3	0.05298	0.0067	0.04485	0.0069	0.00614	0.0002	106	303	0.35	37.9	1.7	38.8	0.4
En82-4	0.04914	0.0031	0.04279	0.0038	0.00632	0.00018	277	550	0.5	38.6	0.9	40.9	0.8
En82-5	0.05237	0.0058	0.04553	0.0063	0.00631	0.00019	81	279	0.29	38.9	1.1	41	0.7
En82-6	0.05122	0.0066	0.04494	0.007	0.00636	0.00019	58	220	0.27	41.1	1.6	40.5	0.8
En82-7	0.04987	0.0041	0.04132	0.0045	0.00601	0.00018	221	450	0.49	40.9	0.8	39.4	0.8
En82-8	0.04453	0.0068	0.03931	0.0071	0.0064	0.0002	103	218	0.47	37.7	0.9	39.8	0.8
En82-9	0.05526	0.0043	0.04886	0.005	0.00641	0.00018	110	330	0.33	43.5	1.2	40.6	0.8
En82-10	0.03993	0.0042	0.03448	0.0045	0.00626	0.00018	204	357	0.57	42.9	1.6	40	0.9
En82-11	0.05157	0.0079	0.04276	0.0077	0.00601	0.00019	44	196	0.23	42.7	1.5	39.3	0.8
En82-12	0.04191	0.0033	0.03746	0.0038	0.00648	0.00018	109	417	0.26	41.6	1.3	41.7	0.7
En82-13	0.04928	0.0105	0.0415	0.0103	0.00611	0.00024	45	202	0.3	42.7	1.4	38.8	0.8
En82-14	0.04599	0.006	0.03956	0.0062	0.00624	0.00019	78	283	0.27	41.1	1.3	39.7	1.8
En38-1	0.04820	0.0016	0.10152	0.0025	0.01539	0.00018	168	3186	0.05	101.2	3.8	98.3	3.8
En38-2	0.04838	0.0036	0.10135	0.0043	0.01532	0.00019	354	625	0.57	97.6	4.2	98.0	2.9
En38-3	0.04851	0.0067	0.10041	0.0069	0.01506	0.0002	152	2409	0.06	10.4	3.5	96.8	3.8
En38-4	0.04776	0.0031	0.10382	0.0038	0.01538	0.00018	171	256	0.67	100.1	3.4	99.4	3.7
En38-5	0.04785	0.0058	0.10353	0.0063	0.01556	0.00019	659	150	4.39	99.3	3.8	99.8	4.1
En38-6	0.04882	0.0066	0.09992	0.007	0.01498	0.00019	296	957	0.31	96.7	3.5	96.5	2.3
En38-7	0.04782	0.0041	0.10419	0.0045	0.01563	0.00018	367	705	0.52	103.0	2.7	100.3	4.9
En38-8	0.04832	0.0068	0.10621	0.0071	0.01605	0.0002	42	395	0.11	101.6	3.7	102.6	4.2
En38-9	0.04799	0.0043	0.10551	0.005	0.01596	0.00018	578	357	1.62	100.4	3.4	101.9	2.0
En38-10	0.04815	0.0042	0.10221	0.0045	0.01548	0.00018	237	208	1.14	99.3	2.3	98.9	2.6

En38-11	0.04820	0.0079	0.09972	0.0077	0.01496	0.00019	85	1428	0.06	103.6	2.8	96.2	1.8
En38-12	0.04823	0.0079	0.10513	0.005	0.01591	0.00018	77	1253	0.06	100.7	3.2	101.6	3.3



شکل 4- نمودار منحنی سازگاری سن U-Pb در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره. (A) نمونه En2؛ (B) نمونه En82؛ (C) نمونه En38.

error (2σ)	0.001	0.001	0.001
εNd_i	-0.89	2.98	3.29
T_{DM} (Ga)	1.014	0.667	0.705

شیمی آمفیبول در انکلاوها و سنگ‌های

آذرین درونی نقره

برای بررسی ترکیب اکسیدهای اصلی در آمفیبول‌ها، 38 نقطه از حاشیه و مرکز آنها در نمونه‌های منتخب سنگ‌های آذرین درونی و انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره تجزیه شدند. گزیده‌ای از داده‌های به‌دست‌آمده در جدول 4 آورده شده است. آمفیبول در همه

جدول 3- داده‌ها و نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره (نام اختصاری نمونه‌ها همانند جدول 2 است).

Sample No.	En2	En38	En82
Rb (ppm)	158	60.8	34.8
Sr (ppm)	111	375	317
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	3.72854	0.467684	0.48213
error (2σ)	0.003	0.006	0.007
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70834	0.704814	0.705
error (2σ)	0.001	0.001	0.001
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sm	0.70622	0.704156	0.70474
Nd (ppm)	34.42	19.33	25.16
Sm (ppm)	7.53	4.04	5.39
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.13255	0.126168	0.141858
error (2σ)	0.012	0.015	0.007
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.51258	0.512745	0.51279

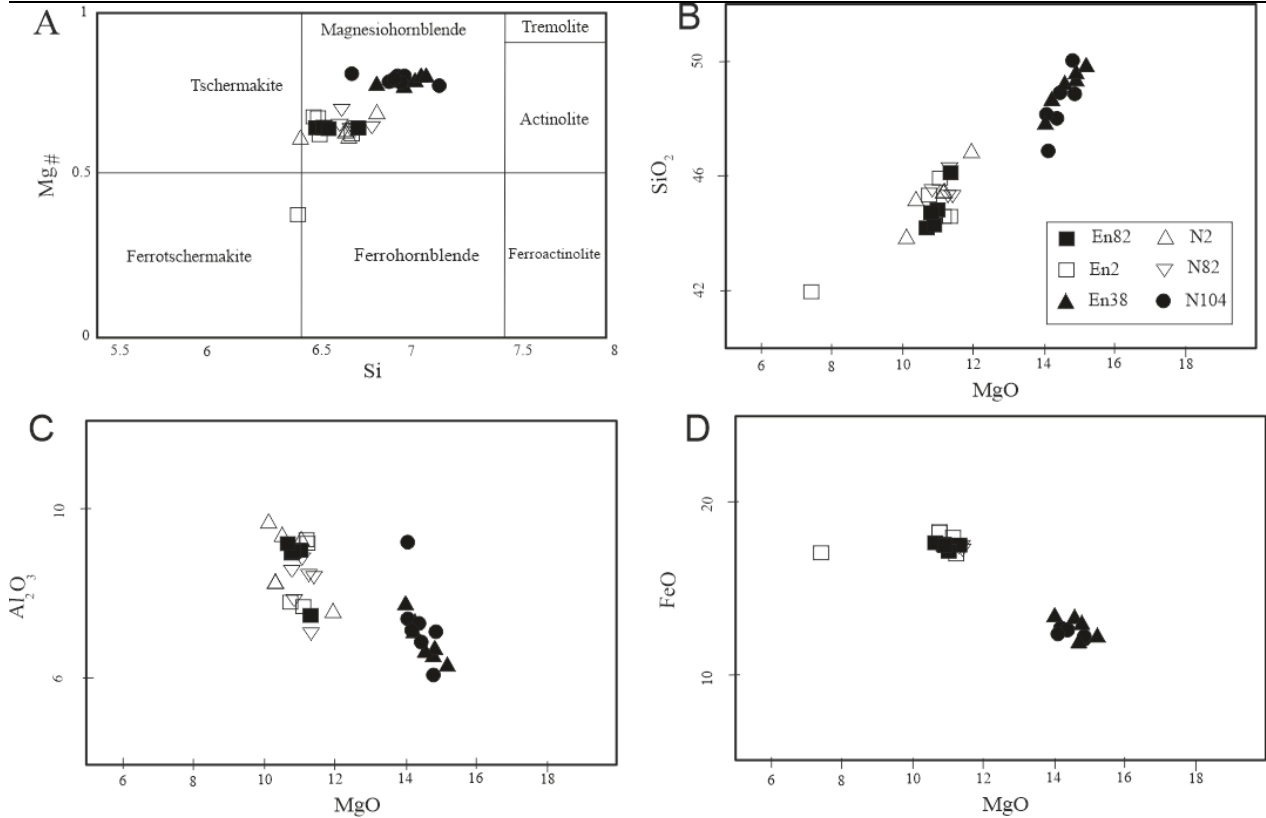
نمونه‌ها در سیستم نامگذاری آمفیبول‌ها (Leake *et al.*, 1997) به نام مگنزیوهورنبلند رده‌بندی می‌شود (شکل 5-A). از دیدگاه ترکیب اکسیدهای اصلی آمفیبول‌ها، نمونه‌های بررسی شده را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد. در دسته نخست نمونه‌های N104 (دیوریت-گابرو) و En38 (انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول درون سنگ میزبان مونوزوگرانییتی) جای می‌گیرند. این گروه با مقدار MgO (14-15/19 درصدوزنی) و SiO₂ (47/56-49/96 درصدوزنی) بیشتر و میزان Al₂O₃ (6/10-7/69 درصدوزنی) و FeO

نمونه‌ها در سیستم نامگذاری آمفیبول‌ها (Leake *et al.*, 1997) به نام مگنزیوهورنبلند رده‌بندی می‌شود (شکل 5-A). از دیدگاه ترکیب اکسیدهای اصلی آمفیبول‌ها، نمونه‌های بررسی شده را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد. در دسته نخست نمونه‌های N104 (دیوریت-گابرو) و En38 (انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول درون سنگ میزبان مونوزوگرانییتی) جای می‌گیرند. این گروه با مقدار MgO (14-15/19 درصدوزنی) و SiO₂ (47/56-49/96 درصدوزنی) بیشتر و میزان Al₂O₃ (6/10-7/69 درصدوزنی) و FeO

جدول 4- گزیده‌ای از داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه آمفیبول‌ها در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره به روش EPMA (میزان اکسیدهای اصلی برپایه درصدوزنی است. نام اختصاری نمونه‌ها همانند جدول 2 است).

Sample ID	N82-1	N82-5	En2-3	En2-5	En82-2	En82-3	N2-1	N2-5	N104-5	N104-8	En38-4	En38-6
SiO ₂	46.35	44.37	44.70	45.94	44.34	44.82	43.83	46.83	48.52	48.88	48.55	48.32
TiO ₂	1.30	1.96	1.84	1.15	1.48	1.40	1.70	0.58	0.95	1.11	0.94	0.83
Al ₂ O ₃	7.09	8.59	9.22	7.69	8.88	8.99	9.66	7.56	7.07	7.08	7.03	7.30
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.06	0.00	0.03	0.01	0.06	0.03	0.12	0.14	0.15	0.13
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.09	0.02
FeO	17.53	17.66	17.00	18.01	17.38	17.04	18.69	16.94	12.91	12.07	12.70	12.68
MnO	0.81	0.68	0.41	0.74	0.44	0.41	0.47	0.41	0.38	0.33	0.38	0.36
MgO	11.33	10.77	11.23	11.10	10.82	10.97	10.11	11.94	14.25	14.86	14.21	14.34
CaO	11.43	11.36	11.26	11.33	11.55	11.45	11.35	11.68	11.75	11.77	11.73	11.81
Na ₂ O	1.22	1.54	1.32	1.34	1.20	1.20	1.31	0.81	0.94	0.92	0.95	0.91
K ₂ O	0.57	0.76	0.75	0.57	0.99	0.93	0.95	0.71	0.58	0.51	0.58	0.65
F	0.24	0.25	0.20	0.21	0.25	0.26	0.20	0.25	0.24	0.21	0.17	0.18
Cl	0.15	0.28	0.23	0.20	0.24	0.21	0.25	0.10	0.13	0.11	0.14	0.11
Total	98.02	98.24	98.22	98.28	97.62	97.70	98.59	97.84	97.84	98.05	97.62	97.64
Method	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK	13NCK
Factor	8.88	8.94	8.85	8.87	8.98	8.93	8.91	8.82	8.68	8.61	8.69	8.68
Si	6.85	6.60	6.58	6.78	6.63	6.66	6.50	6.88	7.01	7.00	7.02	6.98
Ti	0.14	0.22	0.20	0.13	0.17	0.16	0.19	0.06	0.10	0.12	0.10	0.09
Al	1.24	1.51	1.60	1.34	1.56	1.58	1.69	1.31	1.20	1.20	1.20	1.24
Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Fe3	0.84	0.83	0.91	0.93	0.79	0.79	0.92	0.91	0.70	0.70	0.63	0.67
Fe2	1.33	1.37	1.19	1.30	1.38	1.33	1.40	1.18	0.86	0.74	0.90	0.86
Mn	0.10	0.09	0.05	0.09	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04
Mg	2.50	2.39	2.46	2.44	2.41	2.43	2.24	2.61	3.07	3.17	3.06	3.09
Ca	1.81	1.81	1.78	1.79	1.85	1.82	1.80	1.84	1.82	1.81	1.82	1.83
Na	0.35	0.44	0.38	0.38	0.35	0.35	0.38	0.23	0.26	0.26	0.27	0.25

K	0.11	0.14	0.14	0.11	0.19	0.18	0.18	0.13	0.11	0.09	0.11	0.12
F	0.11	0.12	0.09	0.10	0.12	0.12	0.09	0.12	0.11	0.10	0.08	0.08
Cl	0.04	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03



شکل 5- نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی در آمفیبول‌ها (انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقرده). (A) نمودار طبقه بندی انواع آمفیبول‌های کلاسیک (Leake *et al.*, 1997); (B, D) نمودارهای دو تایی ارائه دهنده روند تغییرات آمفیبول‌ها. En2=انکلاو MME در سنگ میزبان گرانودیوریتی، En82=انکلاو MME در سنگ میزبان مونوزودیوریتی، En38=انکلاو دارای کوارتز+آمفیبول در سنگ میزبان مونوزوگرانییتی.

عنصرها مانند Th به نسبت تهی شده‌اند (شکل 6). بالاترین میزان عنصرهای خاکی کمیاب (REE^3) نیز در این آمفیبول‌ها دیده می‌شود (230- ppm). $\sum REE=101$ تمرکز پایین عنصرهای خاکی کمیاب سبک ($LREE^3$) در این آمفیبول‌ها موجب ایجاد شیب منفی در الگوی REE (La_N/Yb_N نزدیک به 0/52) شده است (شکل 7-A).

آمفیبول انکلاو میکروگرانولار مافیک (نمونه En2) که از سنگ میزبان گرانودیوریتی برداشت شده است) از نظر عنصرهای کمیاب آمفیبول ترکیبی همانند نمونه مونوزودیوریتی (نمونه N82)

برای به دست آوردن میزان عنصرهای کمیاب در آمفیبول‌های بررسی شده، 46 تجزیه نقطه‌ای در مرکز و حاشیه این کانی‌ها انجام شد. گزیده‌ای از نتایج به دست آمده در جدول 5 آورده شده است. داده‌های به دست آمده نشان‌دهنده تمایز بالای مقدار عنصرهای کمیاب میان آمفیبول‌های انواع انکلاوها و سنگ میزبان هستند (شکل‌های 6 و 7). آمفیبول‌های انکلاو میکروگرانولار مافیک در سنگ میزبان مونوزودیوریتی (نمونه En82) ترکیبی کاملاً متمایزی از دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهند. این آمفیبول‌ها از بسیاری از عنصرهای کمیاب مانند Y، Zr و Hf غنی شده‌اند و در برخی

³ Light Rare Earth Elements

² Rare Earth Elements

اندکی شیب مثبت ($La_N/Yb_N = 1/3 - 1/8$) نشان می‌دهد (شکل 7-A). روند عنصرهای کمیاب آمفیبول‌ها در نمودار عنکبوتی نیز برای نمونه‌های N82 و En2 مشابه است (شکل 7-B).

دارد (شکل‌های 6 و 7). این آمفیبول‌ها به نسبت از Th و Sr غنی هستند (شکل 6) و تمرکز عنصرهای خاکی کمیاب در آنها برابر با 100-140 ppm است (جدول 5). الگوی نمودار بهنجار شده REE در آنها

جدول 5- گزیده‌ای از داده‌های به دست آمده از تجزیه آمفیبول در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقده به روش LA-ICP-MS (غلظت عنصرهای کمیاب بر پایه ppm آورده شده است. نام اختصاری نمونه‌ها همانند جدول 2 است).

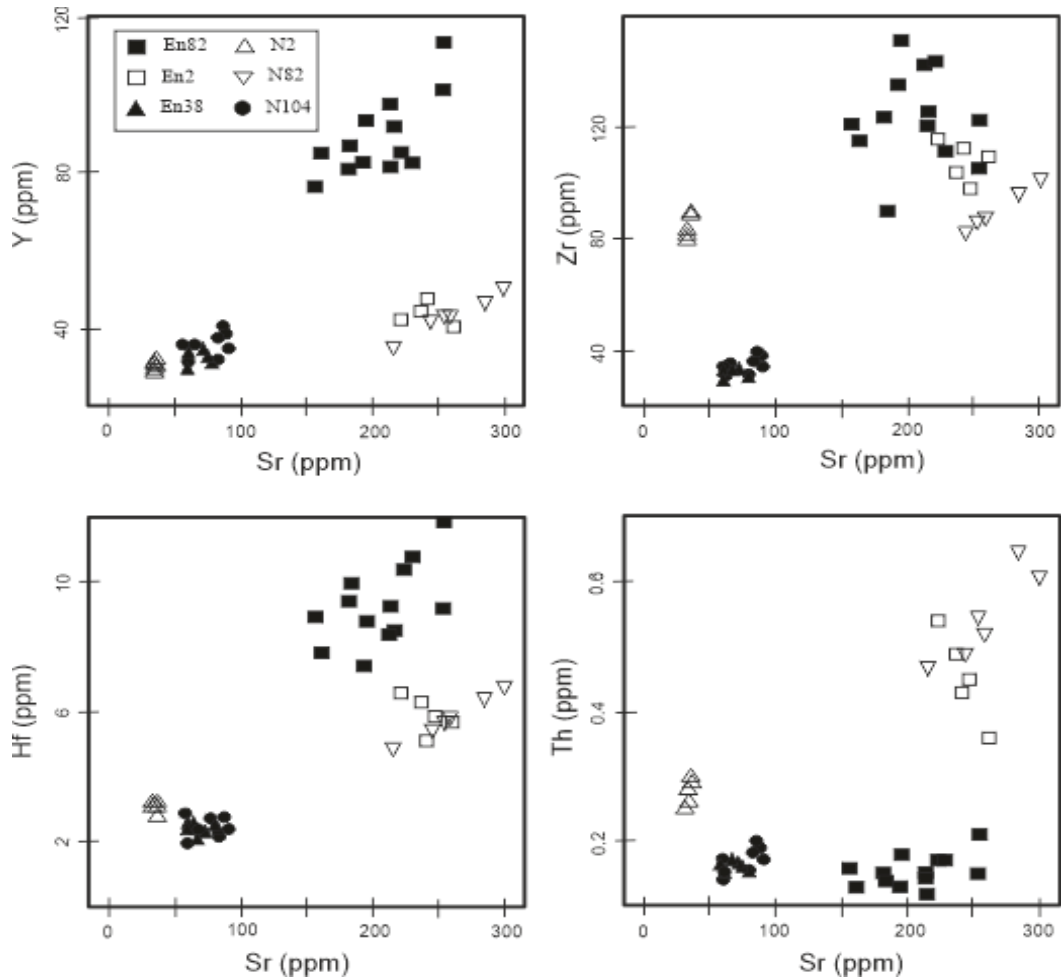
Sample ID	N104	N104	N104	En38	En38	N82	N82	En82	En82	En82	N2	N2	En2	En2
Li	5.08	3.91	3.99	4.27	3.78	1.54	1.89	2.65	2.37	3.31	2.09	2.21	1.83	2.04
Rb	10.21	7.72	8.01	8.51	7.53	4.06	4.99	5.02	4.47	6.26	4.01	4.25	4.67	5.20
Sr	85.42	60.42	76.40	71.77	60.26	243.70	299.55	213.07	182.04	254.86	33.16	35.15	236.25	221.60
Ba	112.6	86.7	88.6	94.7	87.2	106.0	130.2	121.3	108.1	151.4	115.0	121.9	97.2	108.2
Sc	159.8	123.1	125.6	134.5	118.9	87.5	107.6	333.2	297.1	415.9	12.7	13.5	112.2	124.9
V	1064	819	785	896	695	765	941	1693	1509	2113	56	59	777	865
Cr	3311	2549	2602	2787	2513	221	271	2120	1890	2646	75	80	237	263
Y	40.61	31.27	31.92	34.18	29.41	42.35	50.85	97.21	80.59	113.24	29.79	31.58	44.17	42.35
Nb	2.80	2.16	2.20	2.36	2.19	3.05	3.75	6.69	5.97	8.35	8.02	8.50	4.21	4.69
Ta	0.26	0.20	0.20	0.22	0.19	0.25	0.30	0.36	0.32	0.45	0.59	0.63	0.34	0.38
Zr	39.64	30.52	31.16	33.37	29.18	83.02	102.05	142.05	123.26	105.11	83.39	88.40	103.81	115.56
Hf	2.76	2.45	2.70	2.31	2.50	5.52	6.78	8.35	9.34	11.83	3.19	2.78	6.31	6.56
Pb	0.40	0.31	0.32	0.34	0.28	0.68	0.84	1.09	0.97	1.36	1.94	2.05	0.84	0.94
U	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Th	0.20	0.15	0.16	0.17	0.15	0.49	0.61	0.14	0.15	0.21	0.28	0.30	0.49	0.54
La	3.67	2.83	2.89	3.09	2.96	11.13	13.68	8.57	7.64	10.70	11.22	11.89	10.68	11.89
Ce	15.56	11.98	12.23	13.10	12.54	33.07	40.65	43.41	38.70	54.18	37.01	39.23	33.54	37.34
Pr	3.42	2.63	2.69	2.88	2.75	5.51	6.78	6.65	5.93	8.30	5.75	6.09	6.20	6.90
Nd	18.12	13.95	14.25	15.25	14.60	23.92	29.41	38.96	34.74	48.64	27.14	28.76	26.83	29.86
Sm	7.47	5.75	5.87	6.29	6.02	7.78	9.57	18.29	16.30	22.83	8.32	8.82	9.53	10.61
Eu	1.03	0.79	0.81	0.87	0.83	1.74	2.13	4.81	4.29	6.01	2.06	2.19	2.37	2.64
Gd	9.25	7.12	7.27	7.78	7.45	8.78	10.79	18.74	16.71	23.39	6.84	7.25	10.58	11.77
Tb	1.22	0.94	0.96	1.03	0.98	1.22	1.50	2.40	2.14	2.99	0.64	0.68	1.37	1.52
Dy	8.96	6.90	7.04	7.54	7.22	8.88	10.92	16.78	14.96	20.95	4.82	5.11	9.86	10.97
Ho	1.67	1.29	1.31	1.41	1.35	1.79	2.20	3.20	2.85	3.99	0.73	0.78	1.78	1.98
Er	4.06	3.12	3.19	3.42	3.27	4.53	5.57	9.16	8.16	11.43	2.24	2.37	5.04	5.61
Tm	0.64	0.49	0.50	0.54	0.51	0.70	0.86	1.54	1.37	1.92	0.32	0.34	0.76	0.84
Yb	3.81	2.94	3.00	3.21	3.07	4.25	5.22	11.16	9.95	13.93	2.24	2.38	4.89	5.45
Lu	0.44	0.34	0.35	0.37	0.36	0.52	0.65	1.33	1.19	1.67	0.28	0.29	0.61	0.67

از عنصرهای کمیاب این آمفیبول‌ها، به ویژه عنصرهای خاکی کمیاب ($\sum REE = 57-77 ppm$)، آنها را از دیگر آمفیبول‌ها متمایز می‌کند. الگوی روند عناصر REE در این آمفیبول‌ها نشان دهنده تپی شدگی از LREE و شیب منفی

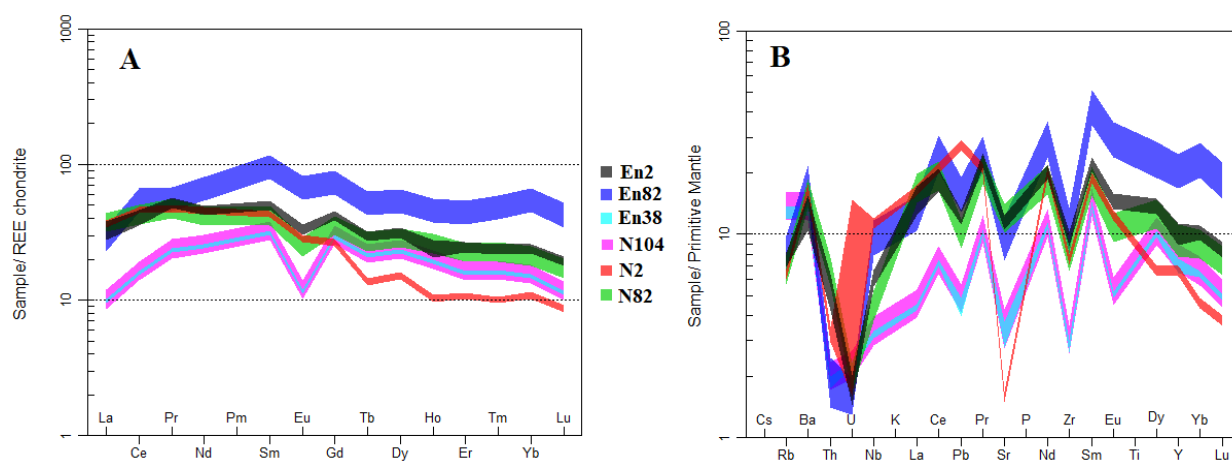
انکلاو دارای کوارتز و آمفیبول درون سنگ میزبان مونوزگرانیتی (نمونه En38) از نظر شیمی عنصرهای کمیاب آمفیبول ترکیبی همانند نمونه گابرو-دیوریتی (نمونه N104) دارد (شکل‌های 6 و 7). مقدار کم بسیاری

(شکل های 7-A و 7-B). تهی‌شدگی از HREE
ظاهری تفکیک‌یافته در روندهای نمودار REE
نزدیک به La_N/Yb_N (3/7) برای این گروه از آمفیبول‌ها
پدید آورده است (شکل 7-A).

در نمودار La_N/Yb_N نزدیک به 0/65 است (شکل 7-
A). آمفیبول‌های نمونه گرانودیوریتی (N2) به نسبت
دیگر آمفیبول‌های بررسی شده مقدار کمی Sr (شکل 6)
و عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) دارند



شکل 6- نمودارهای تغییرات عنصرهای کمیاب آمفیبول‌ها در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقره.



شکل 7- آمفیبول در انکلاوهای مافیک مجموعه آذرین درونی نقده در: (A) نمودار توزیع REE بهنجار شده به ترکیب کندریت؛ (B) نمودار عنکبوتی عنصرهای کمیاب بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (ترکیب کندریت و گوشته اولیه از Sun و McDonough (1989) برگرفته شده است).

(Mazhari *et al.*, 2011a). انکلاو دارای کوارتز+

آمفیبول و نمونه دیوریت- گابرویی نقده هر دو در کرتاسه پدید آمده‌اند (جدول 1؛ شکل 4) و نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd آنها مشابه است (جدول‌های 1 و 3). این ویژگی‌ها از سنگ میزبان مونزوگرانییتی که در ائوسن پدید آمده است کاملاً متمایز است. از این‌رو، می‌توان فرض کرد انکلاو دارای کوارتز و آمفیبول بخشی از باقی‌مانده یا ذرات دیرگداز منبع اولیه ماگمای مونزوگرانییتی بوده است. نکته جالب اینست که ترکیب آمفیبول‌های نمونه En38 و سنگ دیوریت- گابرو (نمونه N104) کاملاً همپوشانی دارد و ترکیب اکسیدهای اصلی و عنصرهای کمیاب آنها روند کاملاً مشابهی نشان می‌دهند (شکل‌های 6 و 7). البته درصد فراوان کوارتز در ترکیب این نمونه با ذرات دیرگداز یک منبع مافیک همخوانی ندارد و از این‌رو، فرایند پیدایش این انکلاو را نمی‌توان تنها با این روند ساده توصیف کرد. با وجود این داده‌ها، منبعی همانند دیوریت-گابروی کرتاسه در مجموعه آذرین درونی نقده را می‌توان منبع اولیه‌ای دانست که ماگمای مونزوگرانییتی از ذوب‌بخشی آن و هضم سنگ‌های رسوبی دربرگیرنده پدید آمده است.

بحث

درباره خاستگاه و چگونگی پیدایش انکلاوهای مافیک در ماگماهای گرانیتوییدی فرضیه‌های بسیاری پیشنهاد شده است که در بخش مقدمه به مهم‌ترین فرضیه‌ها اشاره شد. تحقیقات پیشین روی مجموعه آذرین درونی نقده وجود انواع مختلف از انکلاوهای مافیک در این مجموعه را نشان داده است (Mazhari, 2008; Mazhari *et al.*, 2011a,) (2011b). داده‌های ایزوتوپی هم بر تفاوت منبع و تحول این انکلاوها تأکید دارد. دو نوع انکلاو MME در سنگ‌های گرانیتوییدی نقده (نمونه‌های En2 و En82) نسبت‌های ایزوتوپی متمایزی دارند (جدول‌های 2 و 3) که نشان می‌دهد خاستگاه آنها متفاوت بوده است. انکلاو دارای کوارتز+ آمفیبول (نمونه En38) نیز سنی کاملاً متفاوت از گرانیتوییدهای نقده دارد. از این‌رو، دست‌کم سه سازوکار متفاوت در پیدایش انکلاوهای مافیک در مجموعه آذرین درونی کوچکی مانند نقده نقش داشته است.

داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند واحد مونزوگرانییتی نقده از ذوب‌بخشی آبدار سنگ‌های مافیک و هضم سنگ‌های رسوبی پدید آمده است

نقش ماگمای مافیک اولیه را داشته باشد.

2- انکلاو En2 در سنگ میزبان گرانودیوریتی نسبت‌های ϵNd_i و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ مشابه با گرانیتوئیدهای MMG دارد (جدول‌های 1 و 3) و شواهد بافتی رو پدید آمدن آمیزش ماگمایی را نشان نمی‌دهد. ترکیب عنصرهای کمیاب آمفیبول در این انکلاو شبیه آمفیبول‌های نمونه مونزودیوریت (N82) است (شکل‌های 6 و 7). بنابراین می‌توان انکلاو میکروگرانولار مافیک En2 را با سنگ میزبان همزاد دانست و آن را پیامد تجمع کانی‌های اولیه پدیدآمده از ماگمای MMG بر شمرده. در حقیقت، سازوکاری مشابه با آنچه Castro (2013) برای پیدایش باتولیت‌های کالک‌آلکالین پیشنهاد کرده است، البته در مقیاس کوچک‌تر را می‌توان به‌عنوان فرایند پیدایش این نوع انکلاو معرفی کرد؛ به این ترتیب که به‌علت فشار بالا، مایع میان‌بلوری به زمینه کمتر متبلور شده (یعنی میزبان) مهاجرت می‌کند و یک بخش تهی از مایع به جای می‌ماند که انکلاو را پدید می‌آورد. این فرایند با مدل کومولایی توصیف شده توسط Daly (1933) متفاوت است؛ زیرا شامل جایگیری بلور در کف آشیانه ماگمایی نیست و یک تجمع تک کانی به‌شمار نمی‌رود.

همان‌گونه که گفته شد، ترکیب عنصرهای کمیاب در آمفیبول‌های نمونه گرانودیوریتی (N2) به‌نسبت آمفیبول‌های دیگر سنگ‌ها و انکلاوها در MMG متفاوت است. این آمفیبول‌ها از بسیاری از عنصرهای کمیاب مانند Y، Hf، Th و HREE فقیر شده‌اند (شکل‌های 6 و 7). با نگاهی به سنگ‌شناسی گرانیتوئیدهای MMG می‌توان دریافت گرانودیوریت‌ها تحول‌یافته‌ترین سازندگان این واحد هستند که از جدایش بلورین ماگمایی مونزودیوریت و کوارتز مونزودیوریت پدید آمده‌اند (Mazhari, 2008). جدایش آمفیبول از ماگمای گرانیتوئیدی اولیه هنگام تحول ماگمایی موجب تهی‌شدگی ماگما از این عنصرها شده است و در پی آن، آمفیبول متبلور شده در گرانودیوریت

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، برای پیدایش انکلاوهای MME با بافت آذرین دو نظریه غالب پیشنهاد شده است:

1- تجمع کانی‌های اولیه یا همان سازوکار جدایش بلور-مایع در یک ماگمای مادر منفرد؛
2- آمیزش ماگمایی (مانند: Moita *et al.*, 2015).

یکی از راه‌های شناخت این دو سازوکار، نسبت‌های ایزوتوپی است به‌گونه‌ای که معمولاً فرض بر اینست که انکلاوهایی همزاد با سنگ میزبان نسبت‌های ایزوتوپی مشابهی دارند (Dodge and Kistler, 1990). البته اگر در هنگام آمیزش ماگمایی همگن‌سازی ایزوتوپی روی دهد، ترکیب ایزوتوپی انکلاو و سنگ میزبان مشابه خواهد شد و فرض پیشین دیگر صدق نخواهد کرد (Pin *et al.*, 1990).

دو نوع متفاوت از انکلاوهای MME در مجموعه آذرین درونی نرده دیده می‌شود:

1- انکلاو En82 در سنگ میزبان مونزودیوریتی ترکیب ایزوتوپی متفاوت با $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ کم و ϵNd_i بالا نسبت به گرانیتوئیدهای MMG دارد (جدول‌های 1 و 3). البته ویژگی‌های بافتی این انکلاو نشانه‌هایی از آمیزش ماگمایی را نیز نشان می‌دهد. ترکیب اکسیدهای اصلی آمفیبول در انکلاو En82 با En2 و گرانیتوئیدهای نرده مشابه است (شکل 5)؛ اما از نظر عنصرهای کمیاب کاملاً متمایز از آنهاست. این ویژگی نشان‌دهنده خاستگاه متفاوت آنهاست (شکل‌های 6 و 7). برپایه این شواهد می‌توان انکلاو En82 را گلوبول‌هایی از ماگمای مافیک دانست که درون ماگمای MMG تزریق شده و با آن آمیخته‌اند. ماگمای مافیک اولیه به سن ائوسن در مجموعه آذرین درونی نرده رخنمون ندارد؛ اما در بخش‌های مجاور مانند توده‌های پسوه (Mazhari *et al.*, 2011c)، بانه (Azizi *et al.*, 2018) و پیرانشهر (Mazhari *et al.*, 2009) حجم گسترده‌ای از ماگماهای گابرویی ائوسن پدیدار شده است که می‌تواند

سنگ‌های آذرین درونی نقده نشان می‌دهد شیمی این آمفیبول‌ها به‌ویژه ترکیب عنصرهای کمیاب آنها بازتابی از تفاوت سرشت و چگونگی پیدایش انکلاوهای مافیک است. ترکیب آمفیبول در انکلاوهای مافیک همزاد با ماگمای میزبان همانند آمفیبول‌های متبلور شده از همان ماگماست؛ اما انکلاوهای پدیدآمده در پی آمیزش ماگمایی آمفیبول‌هایی با ترکیب عنصرهای کمیاب متمایز از ماگمای میزبان هستند. این تمایز در نمودارهای دوتایی و عنکبوتی به‌خوبی نمایان است. یافته‌های به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان می‌دهند کاربرد ترکیب عنصرهای کمیاب آمفیبول می‌تواند در تعیین سرشت و فرایندهای پیدایش انکلاوهای مافیک، به‌ویژه MME به‌کار برده شود. البته برای ارزیابی دقیق این امر به بررسی‌های گسترده‌تر و انجام تجزیه‌های بیشتر روی انواع گرانیتوییدها و انکلاوهای آنها در محیط‌های مختلف نیاز است.

سپاس‌گزاری

بخشی از هزینه‌های این مطالعه از محل پژوهانه مصوب دانشگاه پیام‌نور تأمین شده است. از معاونت پژوهشی دانشگاه پیام‌نور صمیمانه تشکر می‌شود. در فرایند داوری و ارزیابی مقاله پنج داور گرامی نکته‌های ارزشمندی برای بهبود کیفیت مقاله پیشنهاد کردند که در اینجا از پیشنهادهای ارزنده آنها سپاس‌گزاری می‌شود.

از این عنصرها به‌نسبت فقیر می‌شود. البته باید به‌یاد داشت که ضریب توزیع عنصرها میان آمفیبول و مذاب، افزون‌بر میزان تمرکز عنصر در مذاب تحت‌تأثیر عوامل دیگری مانند پلیمریزا سیون، دما و فشار نیز هست (مانند: Tiepolo *et al.*, 2007; Brophy, 2008).

برداشت

بررسی ترکیب ایزوتوپی، ویژگی‌های بافتی و ترکیب کانی‌شناسی انکلاوهای مافیک در مجموعه آذرین درونی نقده نشان می‌دهد نمی‌توان فرایند یکسانی را برای پیدایش این انکلاوها در سنگ‌های گرانیتوییدی، حتی در مقیاس توده‌های کوچک، پیشنهاد کرد. دست‌کم سه سازوکار در پیدایش انکلاوهای مافیک گوناگون مجموعه آذرین درونی نقده نقش داشته‌اند. انکلاوهای MME در گرانیتوییدهای MMG به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند. گروه نخست شواهد بافتی آمیزش ماگمایی را نشان می‌دهند و نسبت‌های ایزوتوپی آنها از گرانیتوییدهای میزبان متفاوت هستند. گروه دیگر نسبت‌های ایزوتوپی مشابه سنگ‌های میزبان دارند و در پی جدایش بلور-مایع هنگام رویداد تحولات درون‌ماگمایی پدید آمده‌اند. سن و ویژگی‌های ایزوتوپی انکلاو دارای کوارتز + آمفیبول در واحد مونوزگرانیتی نیز همانند سنگ‌های مافیک مجموعه آذرین درونی نقده است.

تجزیه و تحلیل ترکیب آمفیبول در انواع انکلاوها و

منابع

- Azizi, H., Hadad, S., Stern, R. J. and Asahara, Y. (2018) Age, geochemistry, and emplacement of the ~40-Ma Baneh granite–appinite complex in a transpressional tectonic regime, Zagros suture zone, northwest Iran. *International Geology Review* 61(2): 195–223.
- Brophy, J. (2008) A study of rare earth element (REE)–SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 156: 337–357.
- Castro, A. (2013) Tonalite–granodiorite suites as cotectic systems: a review of experimental studies with applications to granitoid petrogenesis. *Earth-Science Reviews* 124: 68–95.
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. and Kinny, P. (2003) Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53(1): 469–500.

- Dadfar, S., Aliani, F., Baharifar, A. A. and Zarrinkoub, M. H. (2019) Study of origin and petrogenesis of granitoid bodies of Soursat complex (Northwest of Takab): whole-rock geochemical and Sr-Nd evidences. *Petrology* 9(36): 1-24 (in Persian).
- Dahlquist, J. A. (2002) Mafic microgranular enclaves: early segregation from metaluminous magma (Sierra de Chepes), Pampean Ranges, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 15(6): 643-655.
- Daly, R. A. (1933) *Igneous Rocks and the Depths of the Earth*. McGraw Hill, New York (Hafner Reprint, 1962).
- Dodge, F. and Kistler, R. (1990) Some additional observations on inclusions in the granitic rocks of the Sierra Nevada. *Journal of Geophysical Research* 95: 17841-17848.
- Eyuboglu, Y., Dudas, F. O., Thorkelson, D., Zhu, D. C., Liu, Z., Chatterjee, N., Yi, K. and Santosh, M. (2017) Eocene granitoids of northern Turkey: Polybaric magmatism in an evolving arc-slab window system. *Gondwana Research* 50: 311-345.
- Fazlania, F. and Pahnai, A. (2018) Geochemistry and tectonomagmatic setting of the Gharuchah-Sofla intrusions (South Mahabad). *Petrology* 9(34): 39-58 (in Persian).
- Gagnevin, D., Daly, J. S. and Poli, G. (2004) Petrographic, geochemical and isotopic constraints on magma dynamics and mixing in the Miocene Monte Capanne monzogranite (Elba Island, Italy). *Lithos* 78: 157-195.
- Ghasemi, A. and Talbot, C. J. (2006) A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 26: 683-693.
- Hibbard, M. J. (1991) Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In: *Enclaves and Granite Petrology* (Eds. Didier, J. and Barbarin, B.) 431-444. Elsevier, Amsterdam.
- Hoskin, P. W. O. and Black, L. P. (2000) Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology* 18(4): 423-439.
- Khodabandeh, A. A. and Soltani, G. (1994) Geological Quadrangle Map 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Leake B. E., Woolly A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W. V., Nickel E. H., Rocks N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. (1997) Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral name. *The Canadian Mineralogist* 35, 219-246.
- Liang, Y., Deng, J., Liu, X., Wang, Q., Qin, C., Li, Y., Yang, Y. Zhou, M. and Jiang, J. (2018) Major and trace element, and Sr isotope compositions of clinopyroxene phenocrysts in mafic dykes on Jiaodong Peninsula, southeastern North China Craton: Insights into magma mixing and source metasomatism. *Lithos* 302-303: 480-495.
- Maas, R., Nicholls, I. A. and Legg, C. (1997) Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing. *Journal of Petrology* 38(7): 815-841.
- Mazhari, S. A. (2008) Petrogenesis of Naqadeh-Sardasht plutons. Ph. D. Thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Mazhari, S. A., Amini, S., Ghalamghash, J. and Bea, F. (2011a) Petrogenesis of granitic unit of Naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 4: 59-67.
- Mazhari, S. A., Aminin, S., Ghalamghash, J. and Bea, F. (2011b) The origin of mafic rocks in the Naqadeh intrusive complex, Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 4: 1207- 1214.
- Mazhari, S. A., Amini, S., Ghalamghash, J. and Bea, F. (2011c) Metasomatic stages and scapolitization

- effects on chemical composition of Pasveh pluton, NW Iran. *Journal of Earth Sciences* 22(5): 619–631.
- Mazhari, S. A., Bea, F., Amini, S., Ghalamghash, J., Molina, J. F., Montero, P., Scarrow, J. H. and Williams, I. S. (2009) The Eocene bimodal Piranshahr massif of the Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran: a marker of the end of the collision in the Zagros orogen. *Journal of the Geological Society* 166: 53–69.
- Mazhari, S. A., Ghalamghash, J., Kumar, Shellnut, G., S. and Bea, F. (2020) Tectonomagmatic development of the Eocene Pasevh pluton (NW Iran): Implications for the Arabia-Eurasia collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 203: 104551.
- Mazhari, S. A., Klötzli, U. and Safari, M. (2019) Petrological investigation of Late Cretaceous magmatism in Kaboodan area, NE Iran: Evidence for an active continental arc at Sabzevar zone. *Lithos* 348-349: 105183.
- Moita, P., Santos, J. F., Pereira, M. F., Costa, M. M. and Corfu, F. (2015) The quartz-dioritic Hospitais intrusion (SW Iberian Massif) and its mafic microgranular enclaves, Evidence for mineral clustering. *Lithos* 224-225: 78-100.
- Pin, C., Binon, M., Belin, M., Barbarin, B. and Clemens, J. (1990) Origin of microgranular enclaves in granitoids: equivocal Sr–Nd evidence from Hercynian rocks in the Massif Central (France). *Journal of Geophysical Research* 95: 17821-17828.
- Shakiba, S. and Sepahi-Gerow, A. A. (2021) Petrography, geochemistry and Fractal analysis of Mafic Enclaves in the Alvand Plutonic to investigate magma mixing processes. *Petrology* 12 (46): 43-70 (in Persian).
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society, London.
- Tiepolo, M., Oberti, R., Zanetti, A., Vannucci, R. and Foley, S. F. (2007) Trace-element partitioning between amphibole and silicate melt. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 67: 417-452.
- Vernon, R. H. (1984) Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature* 309: 438-439.
- White, R. V., Tarney, J., Kerr, A. C., Saunders, A. D., Kempton, P. D., Pringle, M. S. and Klaver, G. T. (1999) Modification of an oceanic plateau, Aruba, Dutch Caribbean: implications for the generation of continental crust. *Lithos* 46: 43-68.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Zhao, Z., Wang, C. Y., Wei, B. and Dou, J. (2021) Elemental and Nd isotopic compositions of zoned titanite in mafic microgranular enclaves of the Early Cretaceous Sanguliu granitic pluton in the North China Craton: Insights into magma mixing process. *Lithos* 392-393: 106138.